

室蘭工業大学研究報告. 理工編 第38号 全1冊

その他（別言語等） のタイトル	Memoirs of the Murooran Institute of Technology. Science and engineering vol.38
journal or publication title	Memoirs of the Murooran Institute of Technology. Science and engineering
volume	38
year	1988-11-10
URL	http://hdl.handle.net/10258/2778

(ISSN 0580-2415)
(CODEN : MKDKBC)

室蘭工業大学
研 究 報 告

理 工 編

第 38 号
昭和63年11月

MEMOIRS

OF

THE MURORAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Science and Engineering

NO. 38
Nov., 1988

MURORAN HOKKAIDO

JAPAN

Editing Committee

T. Arakawa	Prof.	<i>Chief Librarian</i>
S. Mochizuki	Asst. Prof.	<i>Electrical Engineering</i>
N. Takeno	Prof.	<i>Industrial Chemistry</i>
N. Goto	Asst. Prof.	<i>Mineral Resources Engineering</i>
K. Matsuoka	Prof.	<i>Civil Engineering</i>
H. Sugiyama	Prof.	<i>Mechanical Engineering</i>
H. Sugawara	Prof.	<i>Metallurgical Engineering</i>
K. Ando	Prof.	<i>Chemical Engineering</i>
Y. Kubota	Asst. Prof.	<i>Industrial Mechanical Engineering</i>
K. Otsuki	Prof.	<i>Architecture and Building Engineering</i>
S. Nomura	Prof.	<i>Electronic Engineering</i>
K. Nakagawa	Asst. Prof.	<i>Applied Material Science</i>
Y. Baba	Asst. Prof.	<i>Literature</i>
H. Katsurada	Asst. Prof.	<i>Science</i>
T. Watabe	Prof.	<i>Mechanical Engineering (Evening Session)</i>
H. Tanabe	Asst. Prof.	<i>Applied Science for Energy</i>

All communications regarding the memoirs should be addressed to the chairman of the committee.

These publications are issued at irregular intervals. They consist of two parts, Science and Engineering and Cultural Science.

室蘭工業大学研究報告 第 38 号

理 工 編

目 次

氷の拡張転位のエネルギー.....	福 田 明 治	1
Report on the optical and electric properties of the nitrate compound crystals	川 島 利 器 福 田 明 治 勝 木 喜 一 鈴 木 和 郎	9
電界イオン顕微鏡の製作とその金属針先端の改質への応用.....	安 達 洋 三 神 圭 松 田 隆 鈴 木 和 郎	27
SPIN-WAVE EXCITATION IN Gd AT LOW TEMPERATURES	永田正一・宮崎雅年 藤田英司・戎 修二 山村秀美・谷口 哲	37
液体急冷法による非晶質 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 合金薄帯の磁気異方性に及ぼす 低温加熱の影響.....	宮 脇 好 彦 近 沢 進 谷 口 哲	59
色素薄膜を用いた位相共役干渉法.....	中 川 一 夫 古 川 弘 司 藤 原 裕 文	65
有機色素含有薄膜光導波路における位相共役波の発生.....	宮 永 滋 己 山 林 智 明 村 山 勝 宏 藤 原 裕 文	75
スペクトラム拡散通信方式による電燈線データ伝送に関する研究.....	一 柳 和 弘 黒 島 利 一 杉 岡 一 郎 秋 山 稠	85
スペクトラム拡散通信方式における符号変調に関する研究.....	一 柳 和 弘 黒 島 利 一 杉 岡 一 郎 秋 山 稠	97

スペクトラム拡散通信方式における同期捕捉，保持に関する研究.....	一 黒 柳 和 弘 杉 島 利 弘 秋 岡 一 一郎 稠	107
ヒト型結核菌 Mycobacterium Tuberculosis 遺伝子のクローニングと 組み換え遺伝子の大腸菌における発現.....	菊 池 慎太郎	123
A Procedure for the Analysis of Long-Time Deflection of Reinforced Concrete Members and Its Adaptability	杉野目 章 井野藤 正 智 伊藤 達 義 駒 環	131
プラスチックねじ締結体のエネルギー吸収能に関する一考察.....	斉 当 建 星 野 一 悟	143
ロータリ除雪車の負荷制御.....	久保田 讓 山下 光 正 田 弘 渡 部 富 久 治	153
機械油圧式変速機的设计.....	渡 部 富 治 久保田 讓 柳 沢 雄 二	165
小型流量調整弁の試作・研究.....	渡 部 富 治 Jason R. Timm 斉 藤 図	177
分数の教授学的研究.....	山 口 格	185
学術研究発表集録 (昭62. 4. 1 ~ 63. 3. 31)		205

氷の拡張転位のエネルギー

福田 明治

Energies of dissociated dislocations in ice

Akeharu Fukuda

Abstract

Elastic energies of dissociated dislocations on the basal plane were calculated using anisotropic elasticity. Energies of stacking faults and dislocation cores were supposed to get total energies of the dislocations. It is proposed that a dislocation with $[0001]$ Burgers vectors dissociated two partial dislocations with $1/2 [0001]$ Burgers vector not with $1/6 \langle 2203 \rangle$ Burgers vector, and that a combination of dislocations with $[0001]$ Burgers vector and with $1/3 \langle 1120 \rangle$ Burgers vector is stable.

1. はじめに

常圧下の氷の結晶構造は六方晶（詳しくは、ウルツ鉱型 ZnS の Zn と S をともに H_2O に置きかえた型）である。この六方晶の基本格子ベクトルは 4 軸表示で a_1 , a_2 , a_3 および c であり、この結晶中の任意のベクトルを $\langle hkil \rangle$ で表す。ここで $i = -(h+k)$ の関係がある。氷の転位は、この 4 軸表示で、バーガース・ベクトルが $1/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$, $[0001]$, $1/3 \langle 11\bar{2}3 \rangle$ のものが、X 線回折顕微法によって確認されている¹⁾²⁾³⁾。

氷のこれらの転位の拡張は、今では、当然のこととなりつつある。しかし、この顕微法の最高分解能は $1 \mu m$ 程度であるから、これより詳細は観察できない。それ故、氷の転位の拡張幅は極端に大きいとはいえ、これより一桁以下であるから、この方法では確認できない。もっと分解能の大きな電子顕微鏡では、氷の結合エネルギーが小さいため、電子が氷の分子をはじき出してしまうため、格子間分子を多量に作りだし、この影響を受けやすいと思われる拡張転位の研究には不向きである。

従って、氷の転位の拡張に関することは、転位の挙動や積層欠陥の現在の知見をもとに計算によって導出されなければならない。しかし、拡張幅については議論されるが、エネルギーに関するものについては、あまり議論されてはいない。これは、転位の芯のエネルギーが知られていないことにもよる。この論文では、いくつかの仮設をたてて、そのエネルギーに関する事柄を導出しようと試みる。

2. 部分転位と積層欠陥

氷の部分転位の主なものは3種類あると考えられる。このうち、1つはX線回折顕微鏡法で既に確認されている³⁾。他のものは、直接観察されていないが、その存在の可能性の高いことを示すのもこの論文の目的である。この部分転位を先に述べた完全転位の拡張によって示し、これに付随する積層欠陥について述べる。

$1/3\langle 11\bar{2}0 \rangle$ バーガース・ベクトルの転位は氷の塑性変形のほとんど全部を担う重要な転位である。この転位は

$$\frac{1}{3}\langle 11\bar{2}0 \rangle = \frac{1}{3}\langle 10\bar{1}0 \rangle + \frac{1}{3}\langle 01\bar{1}0 \rangle \quad (1)$$

型の反応で、2つの $1/3\langle 1\bar{1}00 \rangle$ の部分転位に分解して、拡張転位になっていることが考えられる。この部分転位はまだ直接に観察されていない。しかし、X線回折顕微鏡法では $1/3\langle 11\bar{2}0 \rangle$ の完全転位として観察されているこの転位からせん転位であっても、六方晶基底面（以下、簡単に、底面という）内だけを運動することなどから⁴⁾、拡張していることは確実である。このように拡張しているとき、この部分転位の間にある積層欠陥は結晶幾何学的要請から、氷の正規のウルツ鉱型の中に、ダイヤモンド型の構造が2層入った形態となる。

つぎの、 $\langle 0001 \rangle$ バーガース・ベクトルの転位は人工氷単結晶中に同心円ループ転位群として顕著にみられるものである。この転位の殆んどものは刃状転位ループとして底面内で観察されている。底面から立ち上がりらせん成分をもつことは極めて稀である。この転位は点欠陥の吸収、排出で運動し、氷の塑性変形に関わりをもつ、拡散に支配されるため変形量は小さいが、先の $1/3\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 転位でまかなえない変形方向を受け持つ重要性がある⁵⁾。この転位は、

$$\langle 0001 \rangle = \frac{1}{2}\langle 0001 \rangle + \frac{1}{2}\langle 0001 \rangle \quad (2)$$

あるいは

$$\langle 0001 \rangle = \frac{1}{6}\langle 2\bar{2}03 \rangle + \frac{1}{6}\langle \bar{2}203 \rangle \quad (3)$$

型の反応により、2つの部分転位に分解する幾何学的可能性がある。現在のところ、いずれが優勢であるのか知られていない。前者、 $1/2\langle 0001 \rangle$ の部分転位の積層欠陥はダイヤモンド型構造が3層であり、後者、 $1/6\langle 2\bar{2}03 \rangle$ の部分転位の間積層欠陥はダイヤモンド型構造が1層である。実際に観察されている積層欠陥は後者のものであるが、決して、この反応によって見られているのではない。

最後に、 $1/3\langle 11\bar{2}3 \rangle$ バーガース・ベクトルの転位は主として熱処理による点欠陥の欠乏、余剰により発生すると考えられる。この転位は

$$\frac{1}{3}[11\bar{2}3] = \frac{1}{6}[20\bar{2}3] + \frac{1}{6}[02\bar{2}3] \quad (4)$$

型の反応により、2つの $1/6\langle 2\bar{2}03 \rangle$ の部分転位に分解することが観察されている³⁾。この部分転位に付随する積層欠陥はダイヤモンド型が1層である。転位の拡張、部分転位、積層欠陥が実際に観察されているのは、この反応の場合だけである。

3. 氷の弾性異方性とエネルギー・ファクタ

弾性率は Dantle⁶⁾ によって求められ、 -20°C で、 $C_{11}=13.30$, $C_{33}=14.55$, $C_{44}=2.91$, $C_{12}=6.77$, $C_{13}=5.83$ (単位は $10^{10} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$, c 軸を第3軸として表示) である。格子常数は数多くの研究者によって求められ Lonsdale⁷⁾ によってまとめられており、 -20°C では、 $a=1/3\langle 11\bar{2}0 \rangle = 4.52$, $c=\langle 0001 \rangle = 7.63$ (単位はÅ) である。

転位の弾性エネルギーは、等方弾性体であればらせん転位、刃状転位についてそれぞれ、

$$(\text{screw}) = \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0}, \quad (\text{edge}) = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0} \quad (5)$$

となり、 G は剛性率であり、 ν はポアソン比である。 b はバーガース・ベクトルの大きさで、 r_0 は転位の芯の半径で、 R は結晶の大きさ、または、転位間の平均距離である。らせん転位については、剛性率 G そのものを、刃状転位については $G/(1-\nu)$ をエネルギー・ファクタと呼ぶ。氷は弾性率をみると方位によって10%程度の異方性がある。したがって、異方性を考慮したエネルギー・ファクタを用いなければならない⁷⁾。

本論文では転位が底面内にあるときだけを扱う。座標は転位に沿って z 軸をとり、六方晶 c 軸に沿って y 軸をとり、両者に直角に x 軸をとる。すなわち、 zx 面が底面となる。らせん転位のエネルギー・ファクタは

$$K_s = \sqrt{C_{44} \cdot C_{66}} \quad (6)$$

で求められ、 $3.08 \times 10^{10} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ である。刃状転位のエネルギー・ファクタは2つある。バーガース・ベクトルが x 軸に平行ならば、

$$K_{ex} = (\bar{C}_{11} + C_{13}) \sqrt{\frac{C_{44}(\bar{C}_{11} - C_{13})}{C_{33}(\bar{C}_{11} + C_{13} + 2C_{44})}}, \quad \bar{C}_{11} = \sqrt{C_{11} \cdot C_{33}} \quad (7)$$

で求められ、 $4.96 \times 10^{10} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ である。バーガース・ベクトルが y 軸に平行ならば、

$$K_{ey} = (\bar{C}_{11} + C_{13}) \sqrt{\frac{C_{44}(\bar{C}_{11} - C_{13})}{C_{11}(\bar{C}_{11} + C_{13} + 2C_{44})}} \quad (8)$$

で求められ、 $5.19 \times 10^{10} \text{ dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$ である。これらのエネルギー・ファクタは転位の応力場を表わすときにもそのまま使用される。

4. 転位の弾性エネルギー

転位のエネルギーを弾性エネルギーと芯のエネルギーに分けると、前者は弾性論で導出できるが、後者は理論的に導出することはできない。芯のエネルギーは小角境界のエネルギーなどから実験的に求めるが、これらの実験を正しく行うことはむずかしい。とくに、部分転位では無理と思われる。

弾性エネルギーを求める方法の一つに、結晶に適当な切れ目を入れて、目的の転位を形成させるための変位をおこない、このとき、する仕事が弾性エネルギーとして貯えられるとする方法がある。図1のように転位の芯となる部分 r_0 をくり抜き、切れ目をいれる。形成させる転位が z 軸と平行になり、切れ目の面が底面、すなわち zx 面になるように座標軸をきめておく。この座標軸のとり方は先のエネルギー・ファクタを求めたときのものと一致させてある。切れ目の下側に対して上側をずらす。このとき結晶全体は弾性的に変形してずらせた大きさのバーガース・ベクトルをもつ転位がくり抜き（芯）の部分にでき、周りにその転位の応力場をつくる、したがって、このつくられた応力に抗しながらずらしてゆくことになり、仕事をする。このときした仕事がこの転位の弾性エネルギーとして貯えられる。

つぎに、転位が2本平行に並んでいる場合の転位のエネルギーについて述べる。図2のように、1本目の転位を $x = -w$, $y = 0$ のところに、上記のようにつくっておく。このとき既にこの転位の弾性エネルギーが貯えられている。切れ目を相対的にずらせて z 軸上に2本目の転位をつくる。このとき、このつくられていく転位の応力場と1本目の転位の応力場を重ね合わされて応力場に抗して仕事をする。そして、この仕事をすでに1本目の転位をつくったときに貯えられていた仕

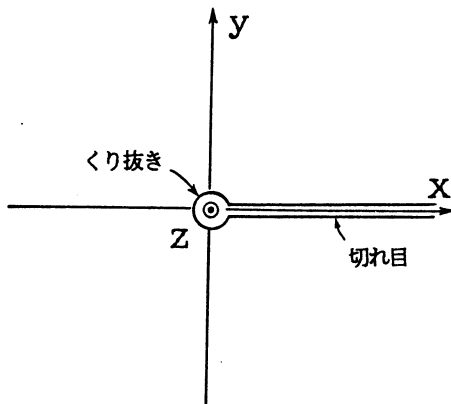


図1. 1本目の転位の形成

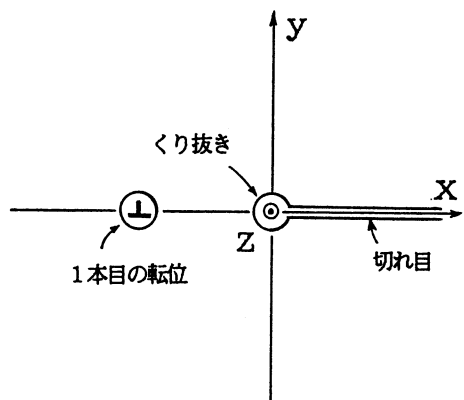


図2. 2本目の転位の形成

事の和が転位が2本あるときの弾性エネルギーとなる。以下に述べる拡張転位は平行な2本の部分転位からなっているので、弾性エネルギー計算はこの方法に従って行なった。

氷の拡張転位のエネルギー

$1/3\langle 11\bar{2}0 \rangle$ バーガス・ベクトルの全転位の弾性エネルギーはバーガス・ベクトルの大きさを a として、転位とバーガス・ベクトルのなす角を α とすれば、

$$W_{at} = \frac{a^2}{4\pi} \{K_{ex} \sin^2 \alpha + K_s \cos^2 \alpha\} \ln \frac{R}{r_0} \quad (9)$$

これが2つの $1/3\langle 1\bar{1}00 \rangle$ 型の部分転位に分解して、その間隔が W となっているとき(バーガス・ベクトルの大きさは p で示す)、この弾性エネルギーをさきに示した手順で求めると、

$$W_{ad} = \frac{K_{ex} p^2}{4\pi} \left\{ \left(\frac{3}{2} - \cos^2 \alpha \right) \ln \frac{R}{r_0} + \left(\frac{3}{2} - 2\cos^2 \alpha \right) \ln \frac{W+R}{W+r_0} \right\} \\ + \frac{K_s p^2}{4\pi} \left\{ \left(\frac{1}{2} - \cos^2 \alpha \right) \ln \frac{R}{r_0} + \left(2\cos^2 \alpha - \frac{1}{2} \right) \ln \frac{W+R}{W+r_0} \right\} \quad (10)$$

$[0001]$ バーガス・ベクトルの全転位の弾性エネルギーはバーガス・ベクトルの大きさを c とすると、

$$W_{ct} = \frac{K_{ey} c^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0} \quad (11)$$

これが、 $1/2[0001]$ 型の部分転位に分解して、その間隔が W となっているとき(バーガス・ベクトルの大きさ $h=c/2$ で示す)、その弾性エネルギーは、

$$W_{cd1} = \frac{K_{ey} h^2}{2\pi} \left\{ \ln \frac{R}{r_0} + \ln \frac{W+R}{W+r_0} \right\} \quad (12)$$

つきき、 $1/6\langle 2\bar{2}03 \rangle$ 型の部分転位に分解しているとき、このバーガス・ベクトルの zx 面上の分解成分ベクトルと z 軸となす角を β とすれば、弾性エネルギーは

$$W_{ed2} = \frac{K_{ex} h^2}{2\pi} \left\{ \ln \frac{R}{r_0} + \ln \frac{W+R}{W+r_0} \right\} + \frac{p^2}{2\pi} \{K_{ex} \sin^2 \beta + K_s \cos^2 \beta\} \left\{ \ln \frac{R}{r_0} - \ln \frac{W+R}{W+r_0} \right\} \quad (13)$$

$1/3\langle 11\bar{2}3 \rangle$ バーガス・ベクトルの全転位の弾性エネルギーは

$$W_{c+a} = \frac{1}{4\pi} \{K_{ey} c^2 + K_{ex} a^2 \sin^2 \alpha + K_s a^2 \cos^2 \alpha\} \ln \frac{R}{r_0} \quad (14)$$

ここで、この転位のバーガス・ベクトルの大きさは $(c^2 + a^2)^{1/2}$ であるが、新しく特定の記号をつくらず c , a を用いてあり、この方が便利である。なお α は、 zx 面上の分解ベクトルと転位のなす角である。この転位が $1/6\langle 2\bar{2}03 \rangle$ 型の部分転位に分解してその拡張幅 W であれば、弾性エネルギーは、

$$W_{h+p} = \frac{K_{ey} h^2}{2\pi} \left\{ \ln \frac{R}{r_0} + \ln \frac{W+R}{W+r_0} \right\} + \frac{K_{ex} p^2}{4\pi} \left\{ \left(\frac{3}{2} - \cos^2 \alpha \right) \ln \frac{R}{r_0} + \left(\frac{3}{2} - 2\cos^2 \alpha \right) \ln \frac{W+R}{W+r_0} \right\} \\ + \frac{K_s p^2}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{2} + \cos^2 \alpha \right) \ln \frac{R}{r_0} + \left(2\cos^2 \alpha - \frac{1}{2} \right) \ln \frac{W+R}{W+r_0} \right\} \quad (15)$$

ここで、この転位のバーガス・ベクトルの大きさは $(h^2+p^2)^{1/2}$ であるが、新しく特定の記号をつくらず、 h, p を用いてある。

5. 積層欠陥エネルギー

実験的にエネルギー密度の知られている積層欠陥はダイヤモンド型が1層のものであり、その値は $0.31 \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2}$ である。ダイヤモンド型が2層および3層のものについては単純に1層のものの2倍および3倍程度とし、それぞれ $0.6, 0.9 \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2}$ と仮定する。この値に拡張幅をかけると積層欠陥のエネルギーになる。これに弾性エネルギーを加えて、このエネルギーの最小値をとる幅 W を求めると、これが拡張転位の平衡幅である。

このようにして求めた拡張幅は、 $1/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$ が $1/3 \langle 1\bar{1}00 \rangle$ に分解しているときは $W = 193 \text{Å} (\alpha = 0)$, $533 \text{Å} (\alpha = \pi/2)$ である。 $[0001]$ が $1/2 [0001]$ に分解しているときは $W = 1243 \text{Å}$ である。 $[0001]$ が $1/6 \langle 2\bar{2}03 \rangle$ に分解しているときは、 $W = 2531 \text{Å} (\beta = 0)$, $1874 \text{Å} (\beta = \pi/2)$ である。 $1/3 \langle 11\bar{2}3 \rangle$ が $1/6 \langle 2\bar{2}03 \rangle$ に分解しているときは、 $W = 3983 \text{Å} (\alpha = 0)$, $4640 \text{Å} (\alpha = \pi/2)$ である。

6. 転位の芯のエネルギー

転位の芯の半径はバーガス・ベクトルの半径の5倍と仮定する。芯のエネルギーはエネルギー密度 $k = 4 \times 10^8 \text{erg} \cdot \text{cm}^{-3}$ を仮定し、これに芯の半径の自乗をかけたものとする。これはバーガス・ベクトル $1/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 転位の芯のエネルギーを通常見積っているもの⁸⁾を基本とした。

7. ま と め

平衡幅が決定されると、 R が与えられると、平衡状態の弾性エネルギーが決定される。 R は、 X 線回折顕微法で観察される試片が通常数 mm なので、1mm としておく。これに積層欠陥のエネルギーと芯のエネルギーを加えると拡張転位全体のエネルギーとなる。全転位のエネルギーは弾性エネルギーと芯のエネルギーの和である。

$1/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$ バーガス・ベクトルの全転位のエネルギー

$$\begin{aligned} E_{at} &= 8.55 \times 10^{-5} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-1} (\alpha = 0) \\ &= 12.52 \times 10^{-5} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-1} (\alpha = \pi/2) \end{aligned} \quad (15)$$

拡張しているときは、

$$\begin{aligned} E_{ad} &= 8.03 \times 10^{-5} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-1} (\alpha = 0) \\ &= 11.64 \times 10^{-5} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-1} (\alpha = \pi/2) \end{aligned} \quad (16)$$

氷の拡張転位のエネルギー

$[0001]$ バーガス・ベクトルの全転位のエネルギー

$$E_c = 3.34 \times 10^{-4} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (17)$$

$1/2[0001]$ に拡張しているとき

$$E_{cd1} = 2.86 \times 10^{-4} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (18)$$

$1/6\langle 2\bar{2}03 \rangle$ に拡張しているとき

$$\begin{aligned} E_{cd2} &= 3.02 \times 10^{-4} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (\beta = 0) \\ &= 3.12 \times 10^{-4} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (\beta = \pi/2) \end{aligned} \quad (19)$$

$1/3\langle 11\bar{2}3 \rangle$ バーガス・ベクトルの全転位のエネルギー

$$\begin{aligned} E_{c+a} &= 4.13 \times 10^{-4} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (\alpha = 0) \\ &= 4.51 \times 10^{-4} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (\alpha = \pi/2) \end{aligned} \quad (20)$$

拡張しているときは、

$$\begin{aligned} E_{h+p} &= 3.46 \times 10^{-4} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (\alpha = 0) \\ &= 3.77 \times 10^{-4} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (\alpha = \pi/2) \end{aligned} \quad (21)$$

以上に値を比較した興味ある結果は、すべての転位について拡張した方がエネルギーが低いことが示されている。つまり、転位はすべて拡張した状態にあるとみられる。また、 $[0001]$ バーガス・ベクトルの転位は $1/6\langle 2\bar{2}03 \rangle$ 型に拡張するよりも $1/2[0001]$ 型に拡張する方がエネルギーが低い。つまり、拡張は後者の型をとっていると考えられる。 $1/3\langle 1\bar{1}20 \rangle$ バーガス・ベクトルの転位と $[0001]$ バーガス・ベクトルの転位とが合体して、 $1/3\langle 11\bar{2}3 \rangle$ バーガス・ベクトルの転位となった方が全転位でも拡張転位でもエネルギーが低くなる。つまり、この2つの転位が出合えば合体し、また、 $1/3\langle 11\bar{2}3 \rangle$ バーガスの転位は分離し難いであろう。

参考文献

- 1) Hayes, C.E. and Webb W.W. : Science **147**, 44 (1965)
- 2) Fukuda, A. and Higashi, A. : J.J.A.P. **8**, 993 (1969)
- 3) Oguro, M. and Higashi, A. : Physics and Chemistry of Ice (Roy. Soc. Canada 1973) P338
- 4) Fukuda, A. and Higashi, A. : Cryst. Latt. Defect. **4**, 203 (1973)
- 5) Fukuda, A., Hondoh, T. and Higashi, A. : Journal de Physique **48**, C1-163 (1987)
- 6) Dantle, G. : Phys. Kondens. Materie. **7**, 390 (1968)
- 7) Hirth, J.P. and Lothe, J. : Theory of dislocations P429 (McGraw-Hill, New York 1968)

福 田 明 治

8) Oguro, M. and Higashi, A. : J.J.A.P. **18**, 1897 (1979)

Report on the optical and electric properties of the nitrate compound crystals

川 島 利 器・福 田 明 治・勝 木 喜 一 郎・鈴 木 和 郎

Riki Kawashima, Akeharu Fukuda, Kichiro Katsuki and Kazuo Suzuki

Abstract

The crystals of nitrates show various phase transitions. The crystal structure changes near the transition temperature T_{tr} . The characteristic phenomena, associated with the physical properties have been observed near the phase transition points. The optical and electric properties have been reported in the temperature region of the alkali and the rare earth nitrate crystals.

1. Introduction

The variation in the physical properties of the crystals are observed near the phase transition points⁽¹⁾. The nitrates are among the few readily soluble and easily prepared inorganic compounds. The crystal of the nitrate is a dielectric one, which shows a various phase transition with the change in the crystal structure. The authors have investigated the optical⁽²⁾ and electric properties⁽³⁾ of the nitrate crystals near their phase transition points. In this paper, we report on the optical and electric properties of the alkali and rare earth nitrate crystals in our investigation, which is proceeding in the present stage.

2. Experimental Procedures

2.1 Crystal Growth

Single crystals used in these experiments were prepared as follows by using the solution method. An aqueous solution of nitrate compound was prepared from the nitrate powder. To remove dust and impurities insoluble in water, the solution of nitrate was filtered with micron filter of $0.2 \mu\text{m}$ pore size. The single crystals were grown from the aqueous solution by slow evaporation at room temperature.

2.2 Optical Measurement

The optical measurement was made in the following way⁽²⁾. A ploy-chromatic light source

(deuterium lamp) is chopped at 175 Hz. The incident light beam was made nearly perpendicular to the prepared plane of the single crystal. The fluctuation of the light intensity was within 1%. A Nikon P-250 monochromator was used, whose diffraction grating (1200 lines per cm) gives a resolution of 1 Å by using the following experimental conditions: height of the slits 4 mm: width of the slits, 0.01 mm: scanning speed, 450~150 Å/min for the observation of full spectrum range. The beam diffracted by the monochromator was received by a photomultiplier R-189 (HTV), connected with a Nikon SP104 electrometer. Temperature dependence of the absorption spectrum was measured by using the furnace. The temperature of sample was detected by a alumel-chromel thermocouple, the signal of which was also utilized for controlling the furnace temperature. Temperature of the sample was less than 0.01°C. Temperature of the sample was changed from room temperature to 350°C.

2.3 Electric Measurement

We have measured the frequency dependence of AC impedance of the crystal by using an auto-phase lock in amplifier (NF Electronic Instrum., LI-574A with pre-amp. P-51A) and wide band oscillator (NF Electronic Instrum., E-1205)⁽³⁾. Specimens were prepared by cutting the crystal parallel to the observed plane: the typical dimension of sample is 0.047 ± 0.005 cm in thickness and 0.096 ± 0.005 cm² in area. The silver electrodes were pasted on the surfaces. The measurements were performed in the course of heating and cooling. The specimen was placed in a furnace controlled to $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

3. Results

3.1 Optical absorption spectrum

The single crystal of robidium nitrate, as one of the alkali nitrate crystals, undergoes three phase transitions⁽⁴⁾. The orthorhombic phase (IV) changes to a cubic (SsCl-type) phase (III) at $\sim 164^\circ\text{C}$, then to rhombohedral type phase (II) at $\sim 219^\circ\text{C}$ and finally to NaCl type cubic phase (I) at $\sim 285^\circ\text{C}$. The successive phase transitions are related with orientational disorder of the NO_3^- ions.

Figure 1, as already given in Ref.(2), shows the absorption spectra in the photon energy region from 3.10 eV to 5.0 eV at temperatures in the phases IV, III and II of PbNO_3 crystal. The two absorption bands, corresponding to the $n_2 \rightarrow \pi^*$ and $\pi_2 \rightarrow \pi^*$ band⁽⁵⁾, are contained in the region from 3.10 eV to 5.0 eV for the alkali nitrate crystal. The absorption band from 3.50 to 4.50 eV has been assigned to the $n_2 \rightarrow \pi^*$ forbidden intramolecular electronic transition of the NO_3^- ions in

the RbNO_3 crystal. The stronger absorption band above 4.50 eV has been assigned to the $\pi_2 \rightarrow \pi^*$ allowed electronic transition of the ion.

3.2 Electric Conductivity

Figure 2 shows temperature dependence of the real part σ' and the imaginary part σ'' of the complex conductivity derived from the measurements of the AC impedance at 1 kHz along the c -axis of the RbNO_3 crystal in the temperature region from temperature to 236°C , ranged over the IV \rightarrow III and III \rightarrow II successive phase transition points. This result has already been given in Ref.(3). The hystereses of σ' and σ'' near the IV \rightarrow III and III \rightarrow II phase transition points are found in Fig. 2.

Frequency dependence of σ' and σ'' (the real part σ' corresponding to conductivity and the imaginary part σ'' to dielectric constant) in the complex conductivity is measured over the range

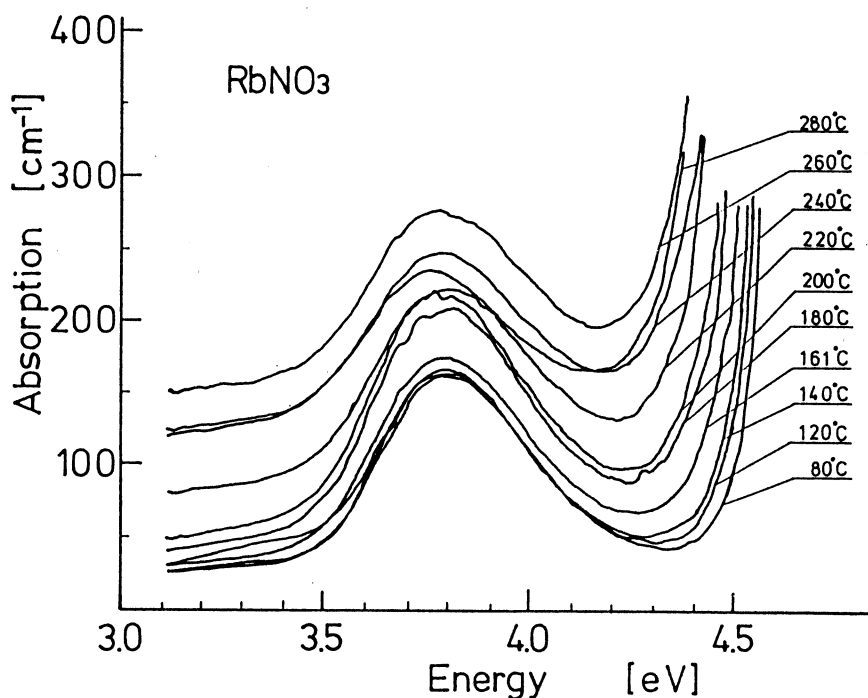


Fig. 1 Temperature dependence of the absorption spectrum $\alpha(E, T)$ at several temperatures ranged from room temperature to 280°C .

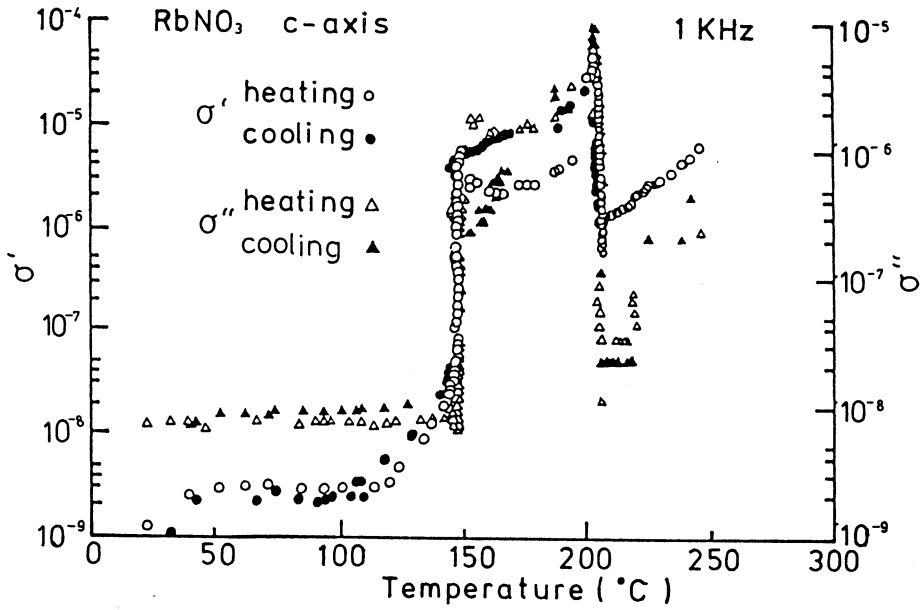


Fig. 2 Temperature dependence of real σ' and imaginary σ'' in the complex conductivity σ^* measured by the AC impedance method along the c-axis of RbNO₃ crystal at 1 KHz in the course of heating and cooling after Ref.(3).

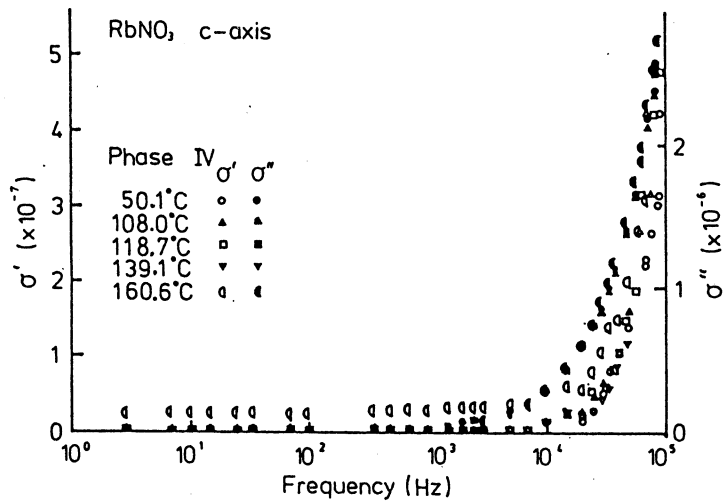


Fig. 3 Frequency variation of the real σ' and imaginary σ'' in the complex conductivity σ^* measured by the AC impedance method along the c-axis of RbNO₃ crystal at temperatures in the phase IV after Ref.(3).

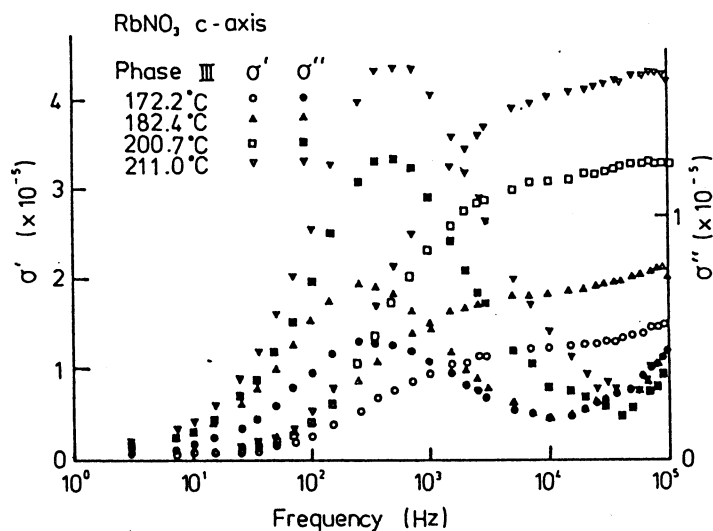


Fig. 4 Frequency variation of σ' and σ'' in the complex conductivity σ^* measured by the AC impedance method along the c-axis of RbNO₃ crystal at temperatures in the phase III after Ref.(3).

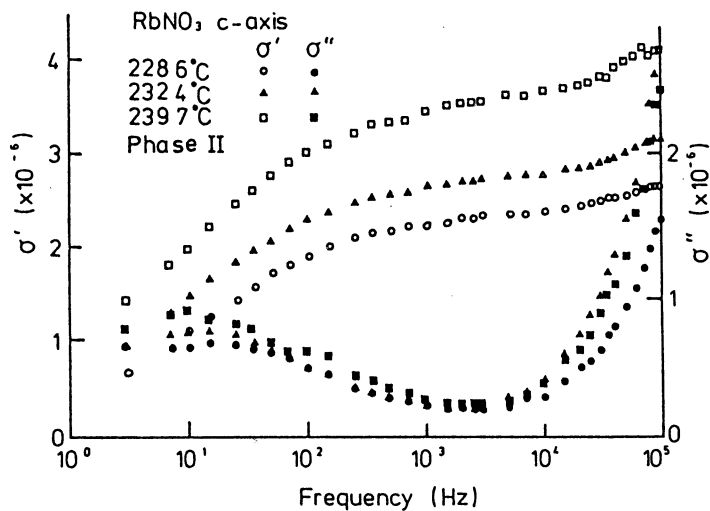


Fig. 5 Frequency variation of σ' and σ'' in the complex conductivity σ^* measured by the AC impedance method along the c-axis of RbNO₃ crystal at temperatures in the phase II after Ref.(3).

from 3 Hz to 100 kHz at several temperatures, respectively, in the phases IV, III and II. Figures 3, 4 and 5 show the frequency dependence of conductivities σ' and σ'' in the phases IV, III and II, respectively, of the RbNO_3 . These results have already been reported in Ref.(3).

4. Discussion

4.1 Optical properties near the phase transitions of alkali nitrates

The author and his collaborators⁽²⁾ have given the experimental results and the analyses on the temperature dependence of the absorption spectra, in the alkali nitrate crystals, ascribed to both the $n_2 \rightarrow \pi^*$ and π^* bands by using the profile model given in Ref.(6) for studying the absorption spectra in the RbNO_3 melt. In the model, the spectrum consisted of the sum of a Gaussian function, identified with the $n_2 \rightarrow \pi^*$ band, and an exponential function, identified with the edge of the $\pi_2 \rightarrow \pi^*$ band,

$$\alpha = \alpha_{Max} \exp \left\{ -\frac{(\ln 2)(E - E_{Max})^2}{(\Delta E)^2} \right\} + \alpha_o \exp \left\{ \sigma(T)(E - E_o)/K_B T \right\} \quad (1)$$

For the Gaussian assigned to the $n_2 \rightarrow \pi^*$ band, α_{Max} and E_{Max} of the first term in the above equation are the coordinates of the maximum of the $n_2 \rightarrow \pi^*$ band. On the other hand, as the second term in the right side of Eq.(1), the edge of the $\pi_2 \rightarrow \pi^*$ band exhibits exponential shape obeying the Urbach rule. Where α_o and E_o are constants determining the coordinates of the intersection point of extrapolated linear sections of absorption curves $\alpha = f(\hbar\omega, T)$, and where a parameter $\alpha(T)$ is called as the steepness one⁽⁷⁾.

The digitized data obtained by the A/D converter of the optical measurements were fitted to the model given in Eq.(1) by using a micro-computer PC9801E(NEC). By the digital computer procedures for the profile analysis on the basis of the model given in Eq.(1), the $\pi_2 \rightarrow \pi^*$ band was separated from the overlapping absorption edge. Figure 6 shows the spectra obtained by the analyses, at temperatures between 80°C and 280°C, in the vicinity of the tails of the $\pi_2 \rightarrow \pi^*$ band spectra.

Figure 7 shows these data plotted as $\log \alpha$ vs. E at several temperatures in the phase IV, III and II for the tail of the separated $\pi_2 \rightarrow \pi^*$ band spectra. From the numerical analyses on the tails of the separated $\pi_2 \rightarrow \pi^*$ band spectra, as given in Ref.(11), the values of E_o and α_o have been determined: $E_o = 4.80 \pm 0.10$ eV and $\alpha_o = 3000 \pm 10$ cm⁻³ for the IV phase: $E_o = 4.75 \pm 0.09$ eV and $\alpha_o = 2000 \pm 10$ cm⁻¹ for the III phase: $E_o = 4.60 \pm 0.10$ eV and $\alpha_o = 1000 \pm 10$ cm⁻¹ for the II phase.

Figure 8, after Ref(1), shows the temperature dependence of the slope parameter $\sigma(T)$ derived from the results analyzed from the data on the base of the profile model. The anomalies of $\sigma(T)$ are found at the phase transition points. The behaviors of the absorption edge, as given in Figs. 7 and 8, and as described by the values of E_0 and α_0 is not classified into the limiting cases of the Urbach edge⁽⁸⁾, slope parameter $\sigma(T)$, and the absorption edge shift, as function of temperature: anomaly of $\sigma(T)$ only, of E_0 only, of α_0 only and no anomaly at the phase transition point.

The shift of E_0 is in direct relation to the change in the width between the energy levels in the intramolecular state of NO_3^- , corresponding to the forbidden band width in the Urbach rule discussed in the semiconductor or ionic crystal⁽⁷⁾. On the other hand, the parameter $\sigma(T)$ is given by,

$$\sigma(T) = \sigma_0 \frac{2k_B T}{\hbar \omega} \tanh(\hbar \omega / 2k_B T), \quad (2)$$

where $\hbar \omega$ is the energy of effective phonon, most strongly coupled with the electronic processes or excitons. α_0 is a constant represented the strength of the electron-phonon interaction or exciton-phonon interaction. At high temperatures ($k_B T \gg \hbar \omega$),

$$\sigma(T) \sim \sigma_0 \quad (3)$$

The variation in $\sigma(T)$ may be due to either a change in the electron-phonon or exciton-phonon in-

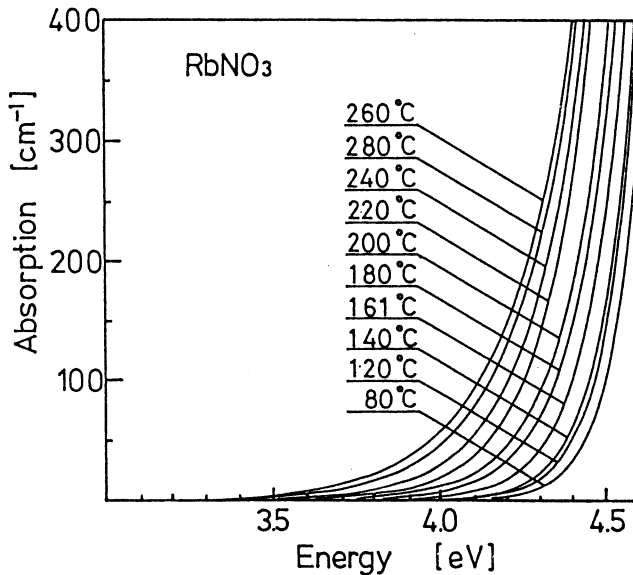


Fig. 6 Temperature dependence of the $\pi_2 \rightarrow \pi^*$ band spectra separated from the observed spectra at temperatures ranged from 80°C to 280°C.

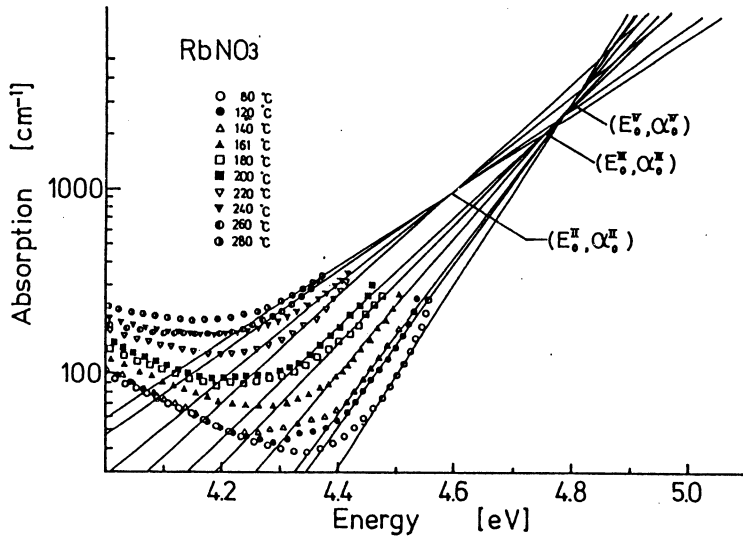


Fig. 7 The linear relationship of $\log \alpha$ (cm^{-1}) vs. photon energy E (eV) of the absorption edge at several temperatures ranged from 80°C to 280°C .

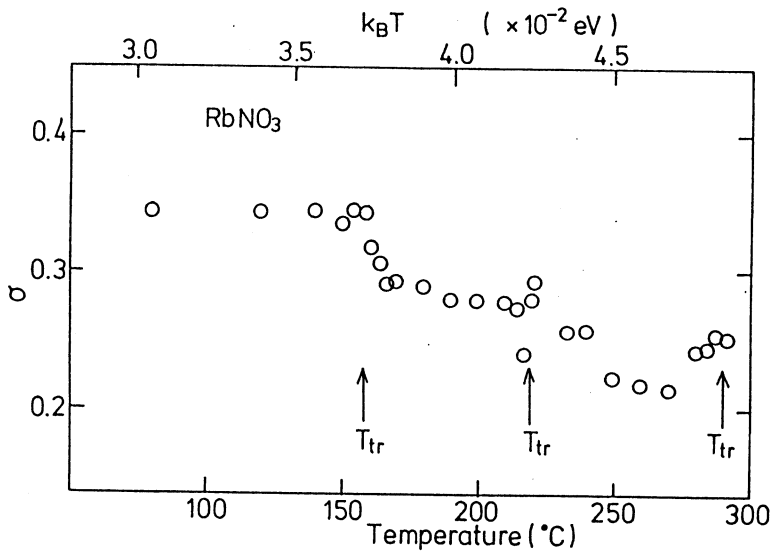


Fig. 8 The steepness parameter σ (T) derived as a function of thermal energy $k_B T$ (eV) and Temperature ($^\circ\text{C}$) for the RbNO_3 crystal after Ref.(2).

teraction strength through α_0 or to a possible change of the phonon, the instability of phonon mode, coupled to electron or exciton near the phase transitions.

Overall values of σ (T) in both the phases IV, III and II of RbNO_3 crystal are less than 1.0. Line shapes of the absorption-band have been discussed in simple ionic crystals⁽⁷⁾. The type of the electronic process, associated with the optical absorption, has been classified by a criterion attributed to the σ values. Though the RbNO_3 crystal has more complicated crystal structures, it may be inferred from $\sigma < 1.0$ that the electronic process in three phases of the crystal is of localized type as suggested in the case of other alkali nitrate crystals⁽²⁾; LiNO_3 , NaNO_3 , KNO_3 , CsNO_3 . The results could suggest that the intramolecular electronic state of the NO_3^- ion in the alkali nitrate crystal is of localized type.

Line shapes of the absorption spectra for the $n_2 \rightarrow \pi^*$ band have been separated from the measured overlapping absorption ones at each temperatures, in the RbNO_3 crystal. The $n_2 \rightarrow \pi^*$ absorption is represented in the form,

$$\alpha' = \alpha_{\text{Max}} \exp \left\{ -(1/2)(E - E_{\text{Max}})^2 / (\Delta E)^2 \right\} . \quad (4)$$

The value of E_{Max} is that of the energy of the maximum of the $n_2 \rightarrow \pi^*$ band. In the temperature range over the phases IV and III, the value of E_{Max} is independent of temperature, as defined by 3.79 eV, within experimental accuracy. On the other hand, the value of E_{Max} in the phase II is determined by 3.78 eV. This result is consistent with that of the spectra obtained in the molten RbNO_3 . The $n_2 \rightarrow \pi^*$ band itself does not shift in the RbNO_3 crystal, as this behavior of E_{Max} is similar to that obtained in the CsNO_3 crystal, but different to that observed in the NaNO_3 crystal.

The temperature dependence of the half-value width $\Delta E(T)$ for the $n_2 \rightarrow \pi^*$ band is plotted in Figure 9, referred to Ref.(2), for the RbNO_3 crystal. The value of $\Delta E(T)$ increase by increasing temperature, but show stepwise variation at the successive phase transition points. Figure 10 shows these data plotted as $\Delta E(T)$ vs. T in both the phase II and I of NaNO_3 crystal. As seen from Fig. 10, the values of $\Delta E(T)$ changes near the λ transition point of NaNO_3 . The phase transitions of alkali nitrate crystals are attributed to the orientational disorder-ordered state of the NO_3^- ions. The NO_3^- ions show free rotation along the c-axis in the phase I of NaNO_3 . The increase of $\Delta E(T)$ with increasing temperature in the phase I could be related to the dynamical state of NO_3^- .

The line width of the absorption band has been discussed in the relation with thermal broadening due to the coupling of the electronic process to lattice vibrations⁽⁹⁾ and with the external and internal fluctuations of vibronic states corresponded with inhomogeneous broadening⁽¹⁰⁾. The $n_2 \rightarrow \pi^*$ absorption band has been assigned to the vibronic intramolecular electronic transition in the

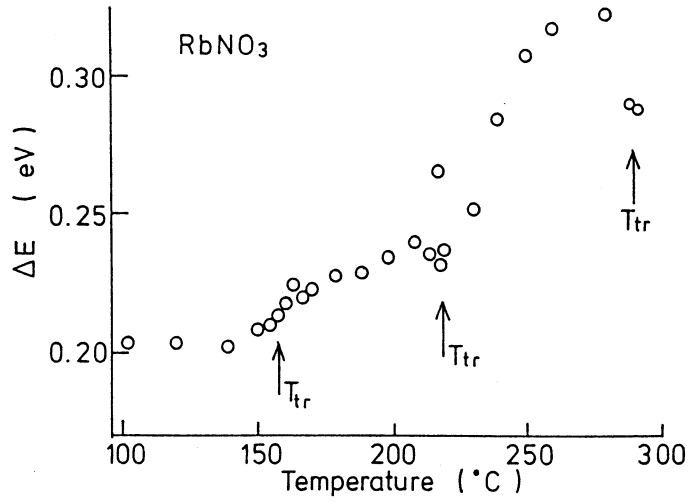


Fig. 9 Temperature dependence of the half-valued width ΔE of the $n_2 \rightarrow \pi^*$ absorption band for the RbNO₃ crystal after Ref.(2).

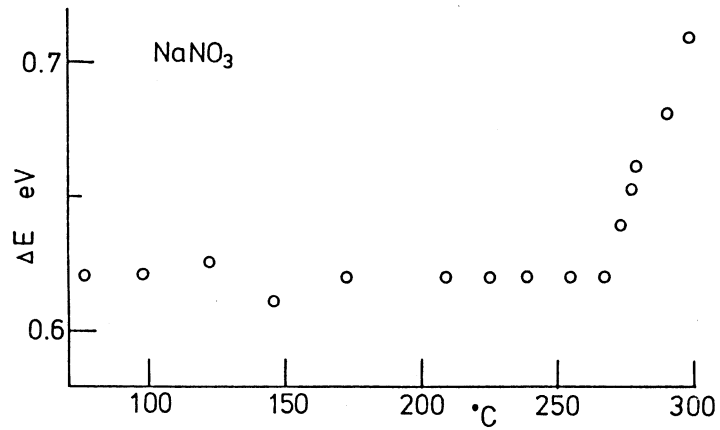


Fig. 10 Temperature dependence of the half-valued width ΔE of the $n_2 \rightarrow \pi^*$ absorption band for the NaNO₃ crystal.

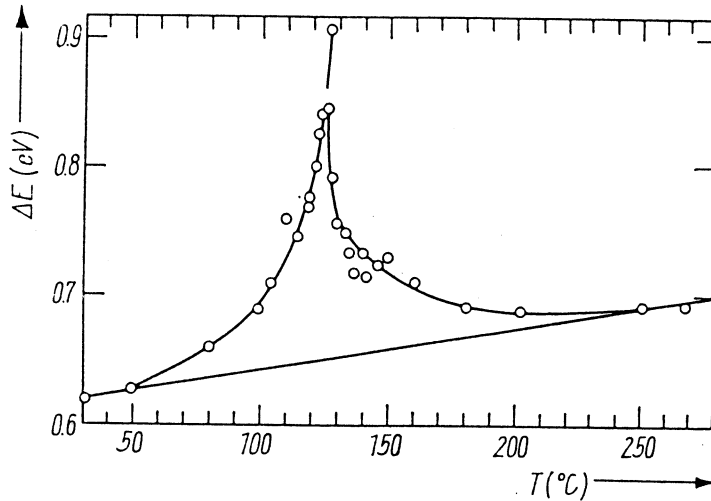


Fig. 11 Temperature dependence of the half-valued width ΔE of the $n_2 \rightarrow \pi^*$ absorption band for the KNO_3 crystal after Ref.(2).

NO_3^- ions. In the case, the behavior of $\Delta E(T)$ could depend on the variation in the thermal fluctuation in the molecular structure and dynamical state of NO_3^- ions themselves or distribution of the different environment around the ions.

Various types of the anomalous behaviors (a maximum peak, a minimum dip or stepwise change) in the thermodynamical coefficients⁽¹¹⁾ (dielectric constant, conductivity, heat capacity, elastic coefficient, ultrasonic attenuation etc.) have been observed near the phase transition point. The variation, in the variables to describe the physical property of the crystal⁽³³⁾, could be dependent on the type of the coupling of the variable with the order parameter of the phase transition. The properties of the coupling could be determined by the symmetry of crystal in the phenomenological theory on the structural phase transition. In the ultrasonic studies⁽¹²⁾, for example, as the elastic strain induced by the ultrasonic wave couples linearly with the order parameter, the elastic constant, derived from the ultrasonic velocity, do a maximum peak at the phase transition point. But in the case of the nonlinear coupling, the coefficient shows a stepwise variation at the temperature.

The line width $\Delta E(T)$ shows a sharp peak near the $\text{II} \rightarrow \text{I}$ phase transition point of the KNO_3 crystal in Figure 11, as reported in Ref.(2), but do not in the vicinity of the successive phase transition points of RbNO_3 as seen in Fig. 9. The facts would suggest the linear coupling between the intramolecular electronic process and the order parameter in the limited case of the alkali nitrate crystal such as the KNO_3 crystal. In the case of the RbNO_3 crystal, however, the order parameter could not couple linearly with the electronic property in the NO_3^- ion.

4.2 Electric properties near the phase transitions of alkali nitrate crystals

The conductivity of the alkali nitrate crystal is attributed to the cation Frenkel defects⁽¹³⁾. The temperature dependence of the transport property near the successive phase transition points of the RbNO_3 crystal has been qualitatively interpreted by the change of the crystal structure⁽¹⁴⁾.

The large increase of the electric conduction at the IV \rightarrow III phase transition point is ascribed to the fact that the shortest distance (3.63Å) of NO_3^- from Rb^+ in the phase III is greater than the sum (3.42Å) of the radii of the NO_3^- groups (1.94 Å) and Rb^+ ion (1.48 Å). In the cube of phase III, the NO_3^- group lies on the body diagonal slightly shifted from the center. In the rhombohedron of the phase II, also, the NO_3^- group remains in an off-center position to the same relative extent as in the phase III. The distance between the NO_3^- group and the three nearest Rb^+ , surrounding the body diagonal, becomes equal to 3.32 Å in the rhombohedron of phase II. This distance is smaller than the sum of the radii of the NO_3^- group and the Rb^+ ion. The NO_3^- ions are locked in an off-center position on the body diagonal so that its movement on it is hampered, leading to the decrease of the conductivity at the III \rightarrow II phase transition point.

These electric properties in the phases IV, III and II of the RbNO_3 crystal could be described by complex plane of the complex conductivity (known as the Grant Plots⁽¹⁵⁾). The present discussion on the properties have been referred to Ref.(3). Figure 12 shows the conductivity of the phase IV

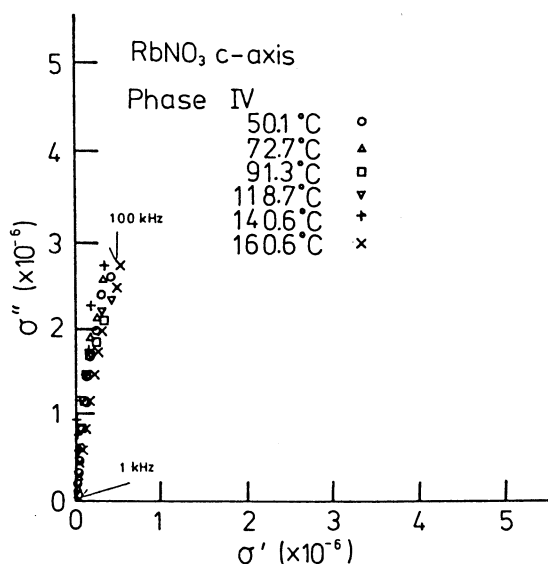


Fig. 12 Representation of the conductivity along the c-axis in the complex plane (σ'' vs σ') at temperatures in the IV phase of the RbNO_3 crystal after Ref.(3).

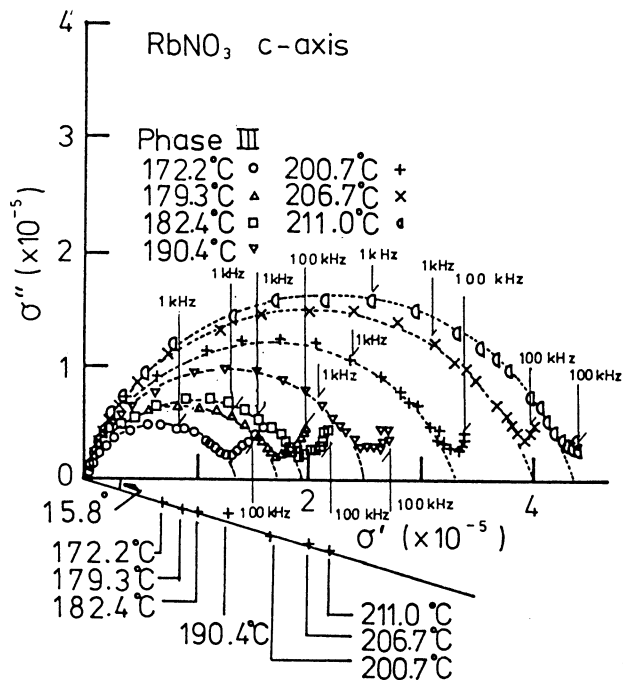


Fig. 13 Representation of the conductivity along the c-axis in the complex plane (σ'' vs σ') at temperatures in the III phase of the RbNO₃ crystal after Ref.(3).

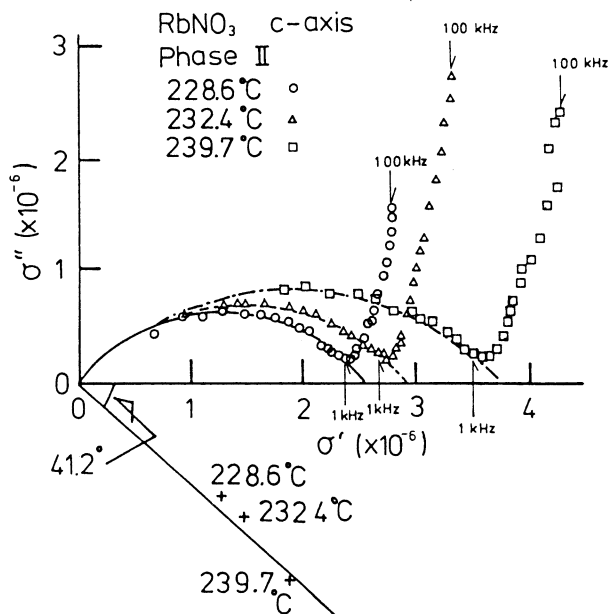


Fig. 14 The complex conductivity (σ'' vs σ') along the c-axis at temperatures in the II phase of the RbNO₃ crystal after Ref.(3).

plotted in the complex plane. The values of σ' at $\sigma''=0$ increase with approaching the IV \rightarrow III phase transition point. The frequency dispersion of the normal dielectric crystal has been usually observed in the frequency region above ~ 1 MHz. The observed dispersion in the phase IV near the IV \rightarrow III phase transition point corresponds to the tail in the lower frequency side of the Cole-Cole semicircle.

Figure 13 shows the frequency dependence of the complex conductivity in the complex plane, σ'' vs σ' , at temperatures of the phase III. The complex conductivity in the phase III can be represented by semi-circles with centers below the real axis σ' . The centers lie on the line making an angle $\alpha = 15.8^\circ$ with the real axis. This dispersion in the phase III is similar to that in the ferroelectric materials⁽¹⁶⁾ with the distributed relaxation time. This result is different from that obtained by measuring the AC electric conductivity along the *a*-axis of the crystal.

The frequency variation of the complex conductivity in the complex plane at several temperatures of the phase II is given in Figure 14. In this phase, the spectra in the complex conductivity also fit the semi-circles. The centers of the semicircles at the temperatures lie below the real axis with the deviated angle $\alpha = 41.2^\circ$.

These diagrams given in Figs. 13 and 14 show that in the temperature region of the phases III and II, the frequency dispersion of the complex conductivity $\sigma^*(T, \omega)$ can be given by

$$\{ \sigma^*(T, \omega) - \sigma(T, \infty) \} / \{ \sigma(T, 0) - \sigma(T, \infty) \} \quad (5)$$

in which the adjustable parameter β indicates the degree of distribution of the relaxation time. The parameter β is given by the angle α of the Cole-Cole diagram through the relation $\beta = 1 - 2\alpha/\pi$ (α in the radian unit); $\beta = 0.53$ in the phase II and $\beta = 0.82$ in the phase III. This value of β derived in the phase II of the RbNO₃ crystal is nearly equal to that, $0.52 \sim 0.57$, given in the dielectric measurement on the phase I of the KNO₃ crystal⁽¹⁷⁾. The crystal structure, R3m, in the phase II of RbNO₃ is the same⁽¹⁸⁾ as that in the phase I of KNO₃. The fact suggests the similarity between the dielectric relaxation processes of these crystals. However, the dielectric spectrum in the phase I of KNO₃ was observed in the range from 15 GHz to 22.3 GHz.

4.3 Phase transition of Rare earth compound crystals

Recently, investigation of rare earth compounds has received considerable attention to study the physical properties associated with rare earths spectroscopy⁽¹⁹⁾, valence instability⁽²¹⁾, high temperature superconductivity (rare earth oxides)⁽²²⁾ and ferroelectricity and ferroelasticity (Gd₂(MoO₄)₃ family)⁽¹¹⁾.

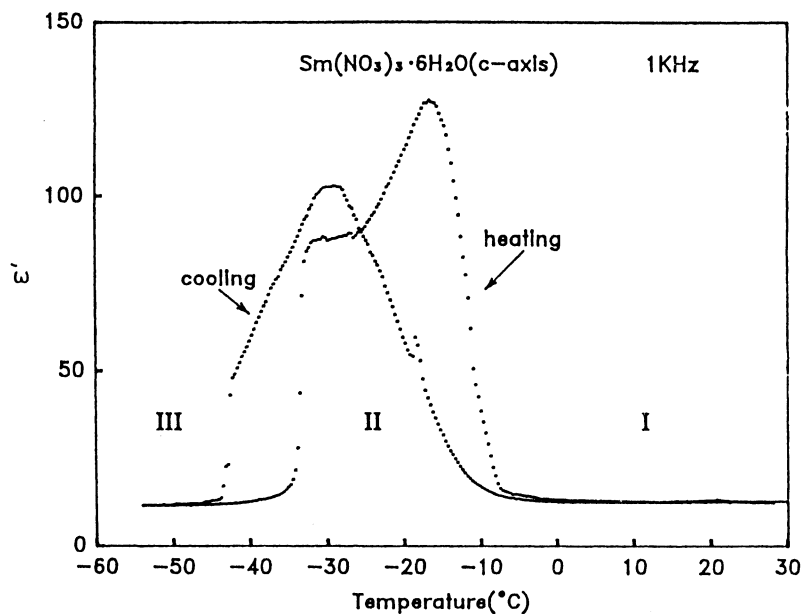


Fig. 15 The real part ϵ' of complex dielectric constant ϵ^* along the c-axis of samarium nitrate crystal at temperatures in the range between room temperature and -55.0°C in both the cooling and warming processes after Ref.(3).

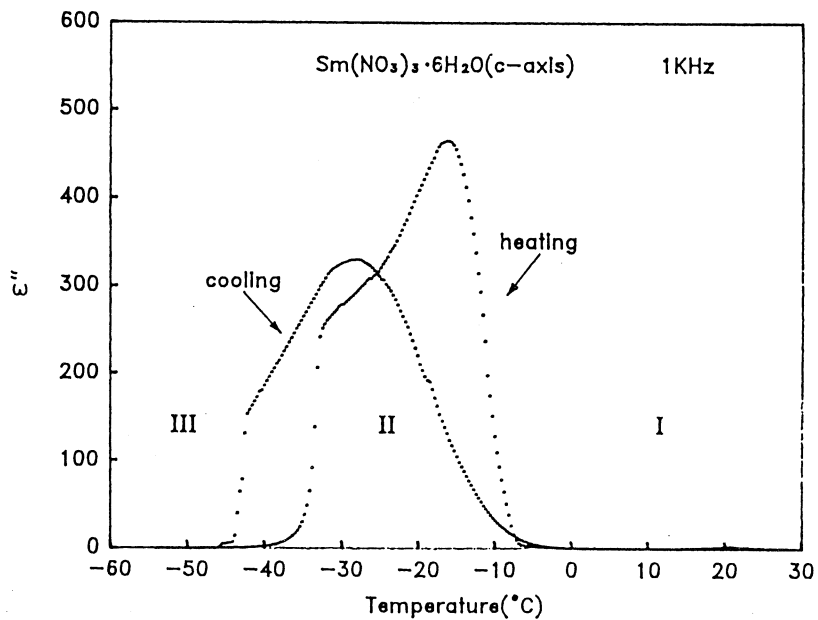


Fig. 16 The imaginary part ϵ'' of complex dielectric constant ϵ^* along the c-axis of samarium nitrate crystal at temperatures in the range between room temperature and -55.0°C in both the cooling and warming processes after Ref.(3).

In the material system, a rare earth ion plays an important role for the characteristic properties. The nitrates are among the few soluble and easily prepared inorganic compounds of the rare earths. It is possible to find unknown physical phenomena in the crystals of rare earth nitrates. In the present section, the experimental results on the samarium nitrate crystal are given by the electric measurement with the automatic system in order to study the phase transition of samarium nitrate crystal in detailed.

The temperature dependence of the real ϵ'' and the imaginary part ϵ'' at 1KHz are given in Figures 15 and 16 of both heating and cooling run in the range from room temperature to -55°C . From the results, two singularities with thermal hystereses are found in the temperature variation of dielectric constants.

The anomalous temperature dependence of the dielectric constants between $\sim -45^\circ\text{C}$ and $\sim 0^\circ\text{C}$ should be related to polymorphic transitions with the change of the crystal structure in the samarium nitrate crystal. The crystal symmetry of samarium nitrate crystal, $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, is triclinic, the space group $\text{P}\bar{1}$ with lattice parameters of $a=9.20 \text{ \AA}$, $b=11.7 \text{ \AA}$, $c=6.78 \text{ \AA}$, $\alpha=91^\circ$, $\beta=112^\circ$ and $\gamma=109^\circ$ ⁽²²⁾ at room temperature. The detailed structural analyses on the crystal and the temperature variation has not been reported by the X-ray or neutron diffraction methods.

There, however, have been the X-ray studies on other rare earth compound crystals, such as La, Ce, Pr, Nd, Gd and Y⁽²³⁾. The X-ray diffractometric studies have confirmed the crystal triclinic and shown that there exists two isostructural series, both crystallizing in the space group $\text{P}\bar{1}$; La and Ce belongs to the first series, and Pr . . . Lu and Y to the second.

The structure of $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ⁽²⁴⁾ has been revealed by X-ray study that La^{+3} is surrounded by 11 oxygens, from three NO_3^- groups and from five H_2O molecules. The other rare earth series (Nd, Pr)⁽²⁵⁾, the coordination number is 10. The trivalent rare earth compound $[\text{R}(\text{H}_2\text{O})_n(\text{NO}_3)_3]$ ($n=1$ or 2) and the rest outer-sphere water molecules are joined into a three-dimensional structure by hydrogen bonds. The network of hydrogen bonds has been found in a ferroelectric crystal, such as Rochelle salt and KH_2PO_4 , and plays an important role of the phase transition⁽²⁶⁾.

The results in this study may suggest the possibility of the two three phases I, II and III, given in Figs. 15 and 16, for the samarium nitrate crystal. The phase transitions may be related to the variation in the complex structure, by the hydrogen bonds, attributed to the characteristic electronic property of the rare earth ion, Sm^{+3} , in the crystal.

5. Summary

- 1) From the observation of the temperature dependence of ultraviolet absorption spectrum in the

Report on the optical and electric properties
of the nitrate compound crystals

alkali nitrate crystal, the variation in the coupling between the electronic process and lattice system could be found at the various phase transition points.

- 2) From the measurements of the frequency and temperature dependence of AC conductivity in the alkali nitrate crystal, we have obtained experimental information on the changes of ionic conduction in the various phases accompanied with the changes of the crystal structure at the first order phase transition points.
- 3) From the measurements of temperature dependence of dielectric constant in the rare earth nitrate crystals, polymorphic transitions have been found.

References

- (1) C. N. R. Rao and K. J. Rao: Phase transitions in Solids, An Approach to the Study of the Chemistry and Physics of Solids (McGraw-Hill Inc., New York, 1978), H. E. Introduction to phase transitions and critical phenomena, (Clarendon Press, Oxford, 1971).
- (2) R. Kawashima and K. Suzuki: J. Phys. Soc. Jpn 52 (1983) 1857., R. Kawashima, K. Katsuki and K. Suzuki: Phys. Stat. Sol. (b) 129 (1985) 697, R. Kawashima, et. al.: Phys. Lett. 111A (1985) 304, R. Kawashima: Sol. Stat. Commun. 57 (1986) 265, R. Kawashima, K. Katsuki and K. Suzuki: J. Phys. Soc. Jpn. 54 (1985) 2057, R. Kawashima; J. Phys. C. Solid State Phys. 19 (1986) L759.
- (3) R. Kawashima, K. Katsuki and K. Suzuki: J. Phys. Soc. Jpn. 54 (1985) 2057, R. Kawashima and T. Uchiumi: Solid State Commun. 58 (1986) 625, R. Kawashima and T. Uchiumi: J. Phys. Soc. Jpn. 550 (1986) 3143, R. Kawashima and K. Hirai to be published in Philo. Mag. R. Kawashima and T. Matuda to be published in Phys. Stat. Sol. (a) 108.
- (4) R. N. Brown and A.C. McLaren: Acta Cryst. 15 (1962) 974.
- (5) K. L. McEwen: J. Chem. Phys. 34(1961)547.
- (6) G. P. Smith and C. R. Boston: J. Chem. Phys. 34 (1961) 1396.
- (7) H. Sumi and Y. Toyozawa: J. Phys. Soc. Jpn. 31 (1971) 341, M. Schreiber and Y. Toyozawa: J. Phys. Soc. Jpn. 51 (1982) 1528, 1537, 1544, 53 (1984) 864.
- (8) V. I. Zametin, M. A. Yakubovskii and L. M. Rabkin: Sov. Phys. Solid State 21 (1979) 291, V. I. Zametin: Phys. Stat. Sol. (b) 124 (1984) 625.
- (9) Y. Toyozawa: Prog. Theor. Phys. 20 (1958) 64.
- (10) T. Kakitani: J. Phys. Soc. Jpn. 55 (1986) 993.
- (11) T. Mitsui, ed.: Landolt-Bornstein, Vol. 16, Ferroelectrics and Related substances (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982).
- (12) W. Rehwald: Adv. Phys. 22 (1973) 721.
- (13) J. Hladik ed.: Physics Electrolytes Vol. 1 (Academic Press London, New York, 1972).
- (14) P. P. Salhotra, E. C. Subbaro and P. Venkateswarlu: Phys. Status Solidi 29 (1968) 859 and 31 (1969) 233, S. W. Kennedy: Phys. Status Solidi (a) 2 (1970) 415.
- (15) F. A. Grant: J. Appl. Phys. 29 (1985) 76.
- (16) Vera V. Daniel: Dielectric Relaxation (Academic Press London New York, 1967).
- (17) A. Chen and F. Chernow: Phys. Rev. 154 (1967) 498.
- (18) M. Shamsuzzoha and B. W. Lucas: Acta Cryst. B38 (1982) 2353.
- (19) B. Jezowska-Trzebiatowska, J. Legendriewicz and W. Strek ed., Rare Earths Spectroscopy, Proceedings

- of the International Symposium on Rare Earths Spectroscopy (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1985).
- (20) P. Wachter and H. Boppart ed., Valence Instabilities, Proceedings of the International Conference on Valence Instabilities (North-Holland Publishing Co., Amsterdam, New York, Oxford, 1982).
 - (21) J. G. Bednorz and K. A. Mulller, Z. Phys. B. Cond. Matt. 64, 159–193 (1986).
 - (22) M. Quarton and D. Svoronos, J. Solid State Chem. 42 (1982) 324.
 - (23) K. A. Gshneider Jr. and L. Eyring, ed., Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths Vol. 8 p302–334 (North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1986).
 - (24) B. Eriksson et. al., Inorg. Chem. 19 (1980) 473.
 - (25) G. F. Volodina, I. M. Rumanova and N. V. Berov, Sov. Phys. Cryst. 6 (1962) 741.
 - (26) P. Schuster et al. ed., The hydrogen bond—recent developments (North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1976). Chapter 23 Ferroelectric hydrogen bonded systems, by V. H. Schmidt.

電界イオン顕微鏡の製作とその金属針先端の改質への応用

安達 洋・三神 圭司・松田 隆志・鈴木 和郎

Carburization of Metal Needles by Using a Field Ion Microscope

Hiroshi Adachi, Keiji Mikami, Takashi Matsuda and Kazuo Suzuki

Abstract

A conventional field ion microscope (FIM) having an atomic resolution is constructed. Experiments of carburization of sharp metal needles are done by introducing ethylene gas to the FIM instead of the imaging gas. Tungsten is successfully carburized and sharp needles of tungsten carbide are obtained. It is not successful to get a sharp needle of tantalum carbide. Formation of a small sphere of tantalum carbide is observed at the apex of a tantalum needle.

1. はじめに

近年電子工業に於ける半導体素子の微細化は急速に進展しており、半導体加工装置あるいは検査装置に於ける分解能の向上が期待されている。これらの機器では集束電子ビームを用いており、分解能は電子顕微鏡と同じに論ずることが出来る。電子顕微鏡では高い加速電圧を持ったものほど高分解能であることは広く知られた事実である。しかし、電子ビームのエネルギーが高いとそれだけ試料に電子が侵入する深さが深くなり、試料に与える影響も大きくなる。また、半導体素子の場合には多層構造になっており、複数の層を突き抜けて電子が進むために、半導体素子表面の情報が得られなくなってしまう。電子顕微鏡で加速電圧が高いほど分解能が高いのは、それだけ平行性のよい電子ビームが得られることに由来する。低加速電圧でしかも高分解能であるという二つの要求は矛盾する訳で、これを解決するには低加速電圧でも平行性のよい電子ビームを発生させなければならない。そのためには、極めて小さな面積から密度の高い電子流を放射できるような陰極、すなわち、高輝度陰極が必要になる。

高輝度陰極としては、電界放射型陰極が用いられる。現在実用化されている電界放射型陰極としては、タングステンを鋭い針状に加工したものを用いているが、その動作は極めて不安定であり、取り扱いも難しく、また、安定化にも多大の費用を必要とするため装置そのものの価格が高くなり、極めて特殊な場合を除いて広く一般に用いられてはいない。最近遷移金属の炭化物からの電界放射電流が安定であることが報告され、次世代の電界放射陰極のための材料として注目されている^[1,2]。遷移金属の炭化物は極めて高い融点を持ち、単結晶を育成するには、極めて高い

技術と装置が必要になり、帯域溶融法により単結晶を育成する技術は完成されてはいるが、結晶そのものは市販されておらず、また、仮に市販されたとしても極めて高価なものになるのは避けられない。高輝度陰極として用いる結晶は極めて小さいもので、帯域溶融法で育成されるものほど大きい必要はない。また、大きな結晶であれば、それから小さな結晶を切り出さなくてはならず、余分な工程を必要とする。

遷移金属の鋭い針の先端を炭化し、単結晶化できれば、それは高輝度陰極材料として十分に用いることが出来るものと考えられる。事実、その様な考えのもとに遷移金属の鋭い針を炭化水素ガスの中で加熱して炭化物の針状結晶を得、それを電界放射陰極として用いる試みがすでに行われている^[3]。しかし、加熱用の支持ループの温度が針状試料の温度よりもはるかに高くなり、針状試料よりも加熱ループの方の炭化反応のほうが進行し、針状試料を支えられなくなり、実用的ではない。そこで、本研究では電界イオン顕微鏡に於ける試料表面での反応を積極的に利用して、鋭い針状金属の先端近傍のみを炭化して高輝度陰極用の炭化物微結晶を得ることを試みた。

2. 電界イオン顕微鏡

電界イオン顕微鏡はミュラーによって開発され、世界ではじめて原子の影像をみることが出来た装置として名高い^[4]。顕微鏡とはいってもその基本構造は原理的には極めて単純であり、鋭い針状に加工された試料に対向して蛍光板を配置し、試料と蛍光板の間に高電圧を印加する。このとき試料針先端に集中する電界を利用して拡大する装置であって、レンズ系は一切使用していない。一般に水素またはヘリウムが結像ガスとして使われ、試料針先端の極く近傍でイオン化された結像ガスは電気力線にそって蛍光板に向かって進み、蛍光板に衝突したところに輝点を生ずる。従って、蛍光板上の輝点はイオン化の発生した点に一对一に対応し、イオン化の生じた点を蛍光板上に二次元に投射することになる。試料針は通常電解腐食法で作られ、その形状の一例を図1に示す。

試料針の先端近傍の原子の並びを模式的に描いたものが図2である。先端近傍に集中した電界により分極された結像ガス分子は試料針先端に引き寄せられ衝突する。そのとき表面で何度か飛び跳ねるような動きをしながら移動し、ある条件が満たされた場所にきたときのみ分極した結像ガス分子はイオン化される。イオン化されるための条件は、結像ガス分子のイオン化ポテンシャル ϕ_i 、試料針の仕事関数 ϕ 、その場所での電界強度 F の三つの条件によって定まる。イオン化の条件が満たされたときのポテンシャルの様子を図3に示す^[5]。結像ガス分子と試料金属の間のポテンシャル障壁を通して電子が結像ガス分子から金属へトンネル効果で通り抜けることにより分子がイオン化する。このトンネル確率が最大になるのは図3に示したように金属のフェルミレベルと結像ガス分子の電子準位が一致したときである。数式で表すとこの条件は、

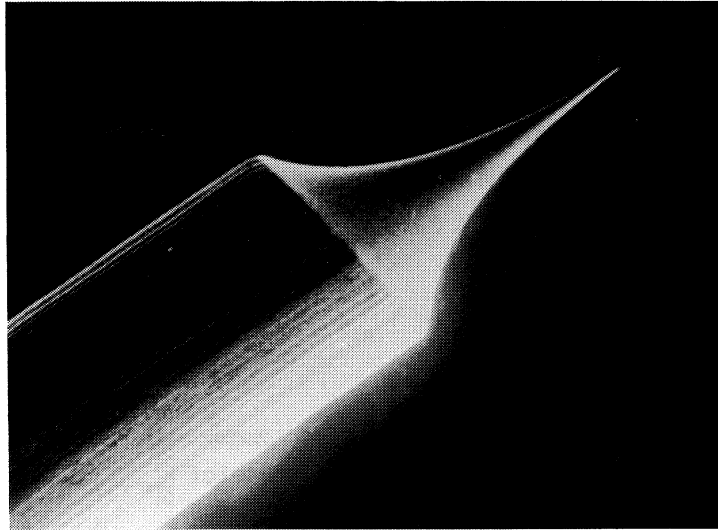


図1. 電解エッチングで得られたFIM 試料針.
材質はWで、幹山の大きさは0.1mmφ.

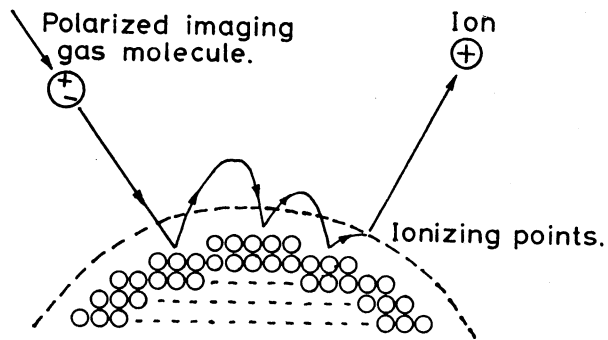


図2. 結像ガス分子の試料針先端での挙動.

$$F\lambda = \phi_i - \phi \quad (1)$$

で与えられる。ここで λ はイオン化距離である。

仕事関数は金属の表面全体において必ずしも一定ではなく、場所によって変化する。たとえば、清浄な金属表面でも結晶方向によって仕事関数が変化する。また、試料表面での電界強度 F は印加電圧 V に比例し、

$$F = \beta V \quad (2)$$

の関係式で与えられる。 β は試料の幾何学的な形状で定まる因子で、正確には試料それぞれに対して違った値をもつものであるが、試料が直円錐形をしていて、その先端が半径 r の半球状である場合には近似的に、

$$\beta = 1/5r \quad (3)$$

で与えられる^[6]。ただし、 r はcmの単位で代入するものとする。このとき、電界強度は、 V/cm の単位で与えられる。すなわち、ある一定の電圧条件のもとでは、電界 F は試料針の局所的な形状によって変化し、(1)式を満たす場所は原子配列によって定まる局所に限られ、そのために蛍光板上にイオン化条件を満たした点が輝点となって生ずることになる。

電界イオン顕微鏡では、このように試料針先端の極く近傍で結像ガスがイオン化することを利用して、結像ガスに不純物ガス分子との反応が生じ、試料のもつ本来の性質とは異なった像が得られることがしばしばある。また、試料本来の性質が変えられて異常な現象が生じることも少なくない。たとえば、結像ガスに、故意に窒素、酸素、水分等を含ませると、高電界を加えたとき試料物質が電界により容易に蒸発されるようになる。これは電界蒸発の促進現象として知られており、試料針の清浄化に積極的に応用されている^[7]。すなわち、これらの事実は試料針の表面近傍で活性化された気体と試料金属との間で化学反応が進行していることを示しており、導入ガスの種類を選ぶことにより、電界イオン顕微鏡が針状試料の先端を改質するのに利用できることを示唆している。

3. 実験装置

製作した電界イオン顕微鏡を図4に模式的に示す。針状試料を支えるコールドステージはガラス製で、液体窒素により試料を冷却出来るようになっている。結像ガスは液体窒素で冷却されたチューブの中を通して真空容器のなかに導入されるようになっている。この顕微鏡の分解能は結像ガスの持っている熱エネルギーが低い程高くなるので、このように導入するときに冷却する必要がある^[7]。また導入された結像ガス分子は室温に保たれている真空容器の外壁に衝突すると、熱エネルギーが大きくなり、分解能の低下を招くので、常に結像ガスを排気して冷却された結像

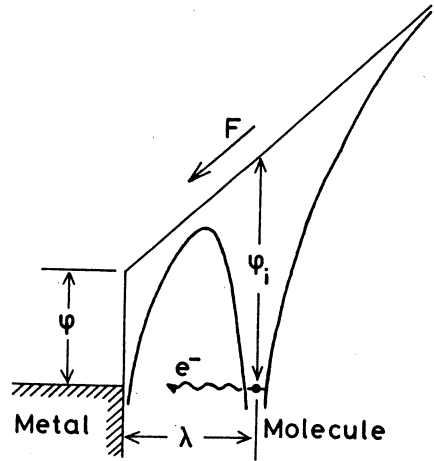


図3. 結像ガス分子のイオン化条件におけるポテンシャル図。

ガスと置換しなくてはならない。
顕微鏡としての動作中における結像ガスの圧力は 5×10^{-6} Torr 程度である。

排気にはガス排気能力の高い油拡散ポンプを採用した。作動油としてポリフェニルエーテル (Saintvac 5) を用いることにより、 5×10^{-10} Torr という超高真空が得られるようになっている。先にも述べたように残留ガス圧が高いと試料が残留ガス分子と反応してしまうので真空容器の残留ガス圧が低いということは導入される結像ガスの純度が高いということと共にこの顕微鏡の具備しなくてはならない条件である。

電界イオン顕微鏡では、加速されたイオンを蛍光板に衝突させて試料の光像を得ているが、裸眼で像が観測できるほどイオン電流を大きくすると蛍光板の劣化が著しく、実用的ではない。そのため、ここではイオン電流を極めて小さく抑え、二次電子増倍板（チャンネルプレート）により、イオン電流を電子電流に変換するとともに、電流量を増大させて、裸眼でも蛍光板上の像が観測出来るようにしてある。

試料針をコールドステージに取り付け、真空系全体を 5×10^{-10} Torr になるまで排気する。真空中で試料針を短時間ではあるが非常に高温にして、表面に付着している汚染物質を蒸発させる。（この操作をフラッシングと呼んでいる。）つぎに、液体窒素でコールドステージを徐々に冷却し、試料が液体窒素温度に到達するのを待つ。結像ガスとして水素を 5×10^{-6} Torr まで導入し、接地電位にたいして試料に正の高電圧を印加すると蛍光板上に試料の原子配列に対応したパターンが見られるようになる。パターンが鮮明に見られる電圧 (Best Image Voltage) より電圧を高めると、試料先端での電界が非常に強くなり、この強電界により原子が表面より離脱するようになる。この現象を電界蒸発といって試料の整形とともに清浄化する目的で用いることがある。

電界蒸発を用いて十分に清浄化したタングステン (110) 針を試料としたときに得られた電界イオン像の例を図5に示す。図では円状に並んでいるのが、それぞれ試料表面での原子層の一つ一つに対応し、輝点の一つ一つがそれぞれ試料表面での原子の一つ一つに対応する。輝点が同心円状に並んでいるのは、試料先端が半球体であることを示しており、中央に見られるのが、先

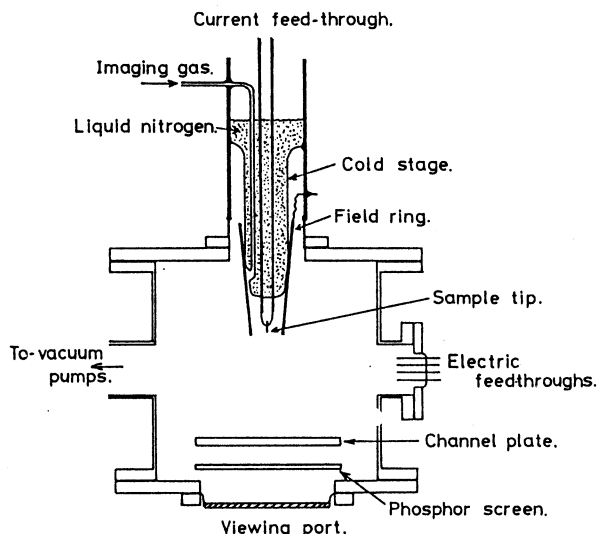


図4. 製作した電界イオン顕微鏡(FIM)の構造。

端の(110)面に対応し、それを囲むような長方形の角の位置に見られる同心円がそれぞれ(211), (121), (12 $\bar{1}$)(21 $\bar{1}$)面に対応する。円状に並んだ輝点のうち、特に明るく見えるのは電気陰性度の高い原子、例えば酸素の吸着している点に対応する。

4. 炭化実験

試料は、高純度金属細線をタングステン製の加熱用ループの先端にスポット溶接し、さらに電解研磨法により、鋭い針状に加工したものである。

針状試料はコールドステージに取り付け、真空中に排気する。試料を冷却した後、結像ガスを導入して、電界イオン像の観察を行い、先端近傍での原子の並び方とともに、清浄度の確認を行う。先端半径の大きな試料では、 β の値が小さく、そのため最適結像電圧が高くなり過ぎてイオン像を観察するのが困難なものとなり、そのためにイオン像の確認が出来ないこともあった。

炭化時には、結像ガスのかわりに真空容器にエチレンガスを導入する。イオン像の確認が済んだ後、コールドステージの液体窒素を蒸発させ、常温にもどすとともに結像ガスを排気する。十分に良い真空度に到達してからエチレンガスを所定の圧力まで導入した後、試料には高電圧を印加する。試料先端近傍で発生する高電界により、エチレンガス分子は活性化され、あるいはイオン化されて、試料との反応性を高める。同時に、加熱ループに電流を通じて試料針を加熱し、試料先端での炭化を促進させる。

4.1 タングステンの炭化

エチレンガスを 5.0×10^{-6} Torrの圧力まで導入し、試料には2.6kVを印加するとともに、1840°Cの高温に5分間保ったとき、試料先端での炭化反応が確認された。反応後の電界イオン像を図6に示す。この試料の炭化反応の前の電界イオン像が図5に示したもので写真の中央部に見られる先端の(110)面の原子配列が、炭化反応の後では見られず、明るい点列で縁どられた大きな暗い丸に変わっている。他の結晶面でも同じように円状に並んだ原子の配列に対応する輝点の列が消え、暗い丸に変わっているのが観測されている。暗い

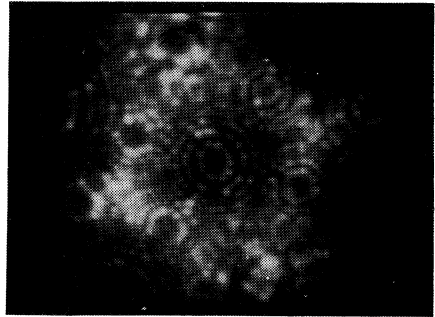


図5. W(110)針のFIM像.

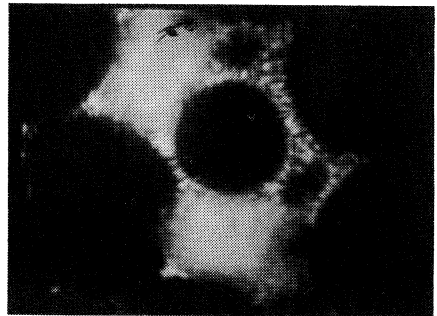


図6. W(110)針の炭化後にみられたFIM像.

丸状のものが見られる所では電界強度が結像ガスのイオン化に必要な値に達していないことを示しており、これらの暗い丸の内側に対応する面では局部的に曲率半径が大きくなっている。外縁を形成する円状の輝点の列は、この部分で(1)式で与えられるイオン化の条件が満足されていることを示しており、局部的に電界強度の強い部分が円状になっていることになるので、この大きな暗い丸は試料先端で丸い平面状の面が形成されたことを意味している。このような暗い丸状の構造が電界イオン顕微鏡像にみられることは、炭化物が試料針の先端に形成されたときに多く見られることが他の研究者からも報告されている^[7]。

炭化反応は試料温度が1500℃以下の場合には確認出来なかった。むしろ、酸化物が形成された。これは、反応時に導入したエチレンガスに不純物として酸素または水が含まれていたためと考えている。低温では、炭化水素の活性化が充分ではなくそのために炭化反応が酸化反応に比べて相対的に遅く、結果として酸化物のみが試料表面に形成されたものと推定している。

このようにして炭化物を形成した試料を 10^{-10} Torr 程度の良い真空のなかで、2200℃以上に加熱すると、電界放射イオン像に再び同心円状の輝点の列が観測されるようになる。すなわち、試料先端の形状が半球状になる。安定な WC は融点が極めて高く3000℃以上であると推定され、 W_2C では融点が2800℃程度であるので、2200℃程度の温度で変化が見られたことは、ここで形成された炭化物が安定な WC にまでは到達していない状態であったと推定される。

4.2 タンタルの炭化

タンタルの酸化物は極めて安定で蒸気圧も低い。そのため、清浄面を得るために必要なフラッシングの温度は高温にならざるを得ない。また、タンタルの融点は2850℃で、タングステンの融点3382℃に比べてはるかに低いため、タングステンより低い温度で表面の原子の移動が発生し、試料針は鈍ってしまい、先端の半径が大きくなってしまう。その結果、電界イオン顕微鏡像を得るための最適結像電圧がタングステンの場合よりも遙かに高くなってしまい、ここで製作した高電圧電源の最大値20kV を越えてしまうことがしばしば発生した。そのため、タンタルの炭化実験では電界イオン像の観察を同時に行うことを断念した。

タングステンの場合に採用した炭化の条件をタンタルの場合に適用しても炭化反応が発生した兆候はみられなかった。そのため、タンタルの炭化においては、エチレンガスの圧力を 5×10^{-4} Torr と高め、炭化の時間も10分から30分とし、タングステンの場合よりも数倍延長した。また、ガス圧を高めたために放電が発生しやすくなった

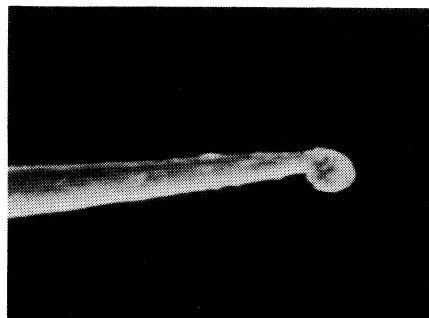


図7. Ta 針の炭化後にみられた先端形状。

ので、放電による試料の破壊を防ぐために印加電圧は1 kV 以下に制限した。

炭化反応の後の試料には、図7に示したように先端に球状のものが付着しているものがしばしばであった。光学顕微鏡で観察してみるとタンタル炭化物に特有な金色をしていた。また、X線回折の結果では、TaCの回折線と一致したところに回折線が現れたので、一応 TaC と推定出来た。用いることが出来た X 線回折装置は微小領域用のものではなく、X線の照射領域が広がったので、この球状の部分とみの回折結果とはいえないが、TaCの特性色からの推定を支持する結果であると考えている。

5. 結 論

電界イオン顕微鏡を製作し、タングステンの針状試料の先端の原子配列を測察することができ程度の能力をもたせることができた。電界イオン顕微鏡の結像ガスと試料の表面との反応の問題点に注目し、電界イオン顕微鏡で清浄面を観察するには有害なものと考えられているこの反応を積極的に利用し、金属針の先端を炭化することを試みた。

タングステンの炭化反応は確認できたが、炭化物の融点から推測される温度よりはるかに低い温度において、炭化された試料の先端の形状の変化が観測された。タングステンの炭化物の安定なものは WC であるが、3200°C 程度という比較的低い温度で先端の形状の変化が観測されたので、それより不安定な W_2C が形成された可能性が高い。

タンタルの炭化では、タンタルの融点が低いためにフラッシング温度を高くすることが出来ず一方タンタルの酸化物は蒸気圧が低いためそれを除くには高温のフラッシングが要求された。この相反する要求が克服出来ず、鋭い針状の炭化タンタルを得ることは出来ず、炭化されたものは先端が球状に変化してしまった。炭化した試料は炭化タンタルの特性色である金色をしていて、また X 線回折の結果でも炭化タンタルの回折線を示した。

当初目的とした高輝度陰極に適用出来る程度に鋭くて安定な針状炭化物を得ることは出来なかった。そのため、得られた炭化物からの電子放射特性を議論できるところまでは到達出来なかったが、この方法で炭化物が形成出来ることは確認出来た。

参 考 文 献

1. S. Zaima, H. Adachi and Y. Shibata: J. Vac. Sci. Technol. vol. B2 p. 73 (1984)
2. H. Adachi, K. Fujii, S. Zaima and Y. Shibata: Appl. Phys. Lett. vol 43 p. 702 (1983)
3. M. Ono, H. Hojo, H. Shimizu and H. Murakami: Proc. 27th International field emission symposium. (Tokyo University) p. 353 (1980)
4. E.W. Müller: Z. Physik vol. 131 p. 136 (1951)
5. R. Wagner: Field Ion Microscopy, Springer Verlag. p. 10. (1982)
6. W.P. Dyke and W.W. Dolan: Advances in Electronics & Electron Physics, vol. 8 p. 89 (1956)
7. E.W. Müller and T. Z. Tsong: Field Ion Microscopy, American Elsevier. Publishing Company, Inc.

電界イオン顕微鏡の製作とその金属針先端の改質への応用

(1969)

SPIN-WAVE EXCITATIONS IN Gd AT LOW TEMPERATURES

永田正一・宮崎雅年・藤田英司
戎修二・山村秀美・谷口哲

Shoich NAGATA, Masatosi MIYAZAKI, Eiji FUJITA
Shuji EBISU, Hidemi YAMAMURA and Satoshi TANIGUCHI

Abstract

It has been manifestly demonstrated that Gd is one of the best example to be realistically applied to the spin-wave theory of Heisenberg model for the localized magnetic moment.

The magnetization of Gd has been measured in the temperature $4 < T < 310$ K at a constant magnetic field of 6 kOe using a homemade vibrating sample magnetometer. We present an exact analysis of the spin-wave excitations for Gd. In the presence of an applied magnetic field, H , an energy gap exists in the spin-wave dispersion relation. As a consequence, the temperature dependence of the magnetization for ferromagnets must differ from the simple Bloch $T^{3/2}$ law. The low temperature magnetization per gram is found to obey the form:

$\Delta\sigma(T)/\sigma(0) = BZ(3/2, T_g/T)T^{3/2} + CZ(5/2, T_g/T)T^{5/2}$, where B and C are constants and $\Delta\sigma(T) = \sigma(0) - \sigma(T)$. The modification factors $Z(3/2, T_g/T)$ and $Z(5/2, T_g/T)$ are the characteristic functions of T and the magnetic field, H . The spontaneous magnetization of ferromagnetic Gd follows $BZ(3/2, T_g/T)T^{3/2}$ relation (the modified Bloch $T^{3/2}$ law) with remarkable fidelity below 200 K.

1. Introduction

Ferromagnetic Gd metal has a Curie temperature of $T \sim 293$ K and exhibits little single-ion anisotropy since its magnetic moment is produced almost wholly by spherically symmetric $^8S_{7/2}$ Gd $^{3+}$ ions. Because its large magnetic moment is localized in the small $4f$ shell, Gd is, in principle, of more general validity for the spin-wave theory of Heisenberg model than the partially itinerant ferromagnets such as Fe and Ni.^{1,2)} However, much less information is available on the experimental study for the spin-wave excitations of Gd,³⁻⁵⁾ which motivated the present investigation.

We give an exact analysis of the spin-wave excitations in the presence of an applied magnetic field, H . It is seen that the energy gap due to the external magnetic field has a pronounced effect on the magnetization at lower temperatures. An energy gap exists in the spin-wave dispersion relation. As a consequence, the temperature dependence of the magnetization for ferromagnets must differ from the simple Bloch $T^{3/2}$ law. The low temperature magnetization per gram is found to obey the form:

永田正一・宮崎雅年・藤田英司・戎修二・山村秀美・谷口哲

$\Delta\sigma(T)/\sigma(0) = BZ(3/2, T_g/T)T^{3/2} + CZ(5/2, T_g/T)T^{5/2}$, where B and C are constants and $\Delta\sigma(T)$ is the decrease in the magnetization, $\Delta\sigma(T) = \sigma(0) - \sigma(T)$. The modification factors $Z(3/2, T_g/T)$ and $Z(5/2, T_g/T)$ are the characteristic functions of T and the magnetic field, H . These functions $Z(3/2, T_g/T)$ and $Z(5/2, T_g/T)$ have been calculated systematically.⁶⁾

One can see that the ferromagnetic Gd proved directly the spin-wave excitations at low temperatures in accordance with the modified Bloch $T^{3/2}$ law. The best extrapolation to $T = 0$ K at $H = 6.00$ kOe gives $\sigma(0) = 264$ (emu/g), which corresponds to $gJ = 7.44$ Bohr magnetons/Gd-atom.⁷⁾ The source of the excess moment of $0.44 \mu_B$ per Gd atom over the value of $7.00 \mu_B$ arising from the seven unpaired $4f$ electrons has attracted significant theoretical attention.⁸⁾ In appendix, we will give some consideration on the subject of detection coil configurations for the Foner-type vibrating sample magnetometer from an analytical viewpoint.

2. Spin-Wave Excitations in a Constant Magnetic Field

In this section we describe briefly the spin-wave excitations in a constant magnetic field, in which the Bloch $T^{3/2}$ law should be modified as a consequence of the influence of the magnetic field.

In thermal equilibrium the number of magnon n_k excited at temperature T is given by the Bose distribution

$$\langle n_k \rangle = 1 / \{ \exp(\epsilon_k / k_B T) - 1 \}, \quad (1)$$

where ϵ_k is the excitation energy of a spin wave of wave vector k . Since the total spin is reduced from its saturation value NS by one unit per spin wave, the magnetization per unit volume at temperature T satisfies

$$\begin{aligned} M(T) &= g \mu_B \{ NS - \sum_k \langle n_k \rangle \} \\ &= M(0) \{ 1 - (1/NS) \sum_k \langle n_k \rangle \}. \end{aligned} \quad (2)$$

This sum may be turned into an integral, and at low temperatures the Bose factor for large k is so small that the integral may safely be carried to infinity. Thus, for cubic lattice,

$$\frac{M(0) - M(T)}{M(0)} = \frac{g \mu_B}{M(0) (2\pi)^3} \int_0^\infty \frac{4\pi k^2}{\exp(\epsilon_k / k_B T) - 1} dk, \quad (3)$$

where the integral extends over all k -space, multiplying by the $(1/2\pi)^3$ states available per unit volume of k -space in a unit volume of material.

SPIN-WAVE EXCITATIONS IN Gd AT LOW TEMPERATURES

In the absence of an applied magnetic field and the magnetocrystalline anisotropy, a general expansion appropriate to cubic symmetry for small k (the long-wave limit), is

$$\epsilon_k = Dk^2 + Ek^4, \quad (4)$$

where D is the spin-wave stiffness constant and E is the constant of proportionality for the k^4 term. Making the substitution of eq. (4) into eq. (3), the magnetization per unit volume follows the Heisenberg-model prediction:⁹⁾

$$\frac{\Delta M(T)}{M(0)} = \frac{M(0) - M(T)}{M(0)} = BT^{3/2} + CT^{5/2}, \quad (5)$$

where B and C are constants and the first term is the Bloch $T^{3/2}$ law, while the second one is due to higher-order term in the magnon dispersion relation. The coefficients of the corresponding terms in these equations are related through the expressions^{9,10)}

$$B = \zeta(3/2)[g\mu_B/M(0)](k_B/4\pi D)^{3/2}, \quad (6)$$

and

$$C = \zeta(5/2)[g\mu_B/M(0)](k_B/4\pi D)^{5/2}(3\pi/4)\langle r^2 \rangle, \quad (7)$$

where $\zeta(3/2) = 2.612$ and $\zeta(5/2) = 1.341$ are the Riemann ζ functions and $\langle r^2 \rangle$ is the average mean-square range of the exchange interaction.

In the presence of an applied field H , on the other hand, the spin-wave dispersion relation for the long-wavelength limit ($k \sim 0$) is given by

$$\epsilon_k = g\mu_B H + Dk^2 + Ek^4, \quad (8)$$

where $g\mu_B H$ is an energy gap. Here we introduce a gap temperature T_g ,^{1,2)} defined by

$$T_g = g\mu_B H/k_B. \quad (9)$$

We obtain simply an expression for the magnetization if we neglect the k^4 term in the dispersion relation given by eq. (8).

$$\frac{M(0) - M(T)}{M(0)} = \frac{g\mu_B}{M(0)(2\pi)^3} \int_0^\infty \frac{4\pi k^2}{\exp[(Dk^2 + k_B T_g)/k_B T] - 1} dk \quad (10)$$

$$= \frac{g\mu_B}{M(0)(2\pi)^3} \left(\frac{k_B T}{D}\right)^{3/2} \int_0^\infty \frac{4\pi q^2}{\exp(q^2 + T_g/T) - 1} dq. \quad (11)$$

The integration is to be carried out by

$$\begin{aligned}
 \int_0^{\infty} \frac{q^2}{\exp(q^2 + T_g/T) - 1} dq &= \int_0^{\infty} q^2 dq \sum_{n=1}^{\infty} \exp[-n(q^2 + T_g/T)] \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} \exp[(-n)T_g/T] \int_0^{\infty} [\exp(-n)q^2] q^2 dq \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} \{[\exp((-n)T_g)] [(\sqrt{\pi}/4)n^{-3/2}]\} \\
 &\equiv (\sqrt{\pi}/4) \zeta(3/2, T_g/T).
 \end{aligned} \tag{12}$$

Then, we have

$$\frac{\Delta M(T)}{M(0)} = \frac{g\mu_B}{M(0)} \left(\frac{k_B}{4\pi D} \right)^{3/2} \zeta(3/2, T_g/T) T^{3/2}. \tag{14}$$

Because of the energy gap in eq. (8), eq. (5) must be modified and be described as eq. (14). The temperature dependence of the magnetization differs from the simple Bloch $T^{3/2}$ law under the influence of the magnetic field.

Furthermore, if we consider the k^4 term of eq. (8) in the dispersion relation, the modified version of eq. (5) is finally given by

$$\frac{\Delta M(T)}{M(0)} = BZ(3/2, T_g/T) T^{3/2} + CZ(5/2, T_g/T) T^{5/2}. \tag{15}$$

These coefficients of B and C are related to the spin-wave stiffness constant D and the average mean-square range $\langle r^2 \rangle$ of the exchange interaction given by eq. (6) and (7). The functions $Z(3/2, T_g/T)$ and $Z(5/2, T_g/T)$ can be written as

$$\zeta(3/2, T_g/T) = \zeta(3/2) Z(3/2, T_g/T), \tag{16}$$

$$\zeta(5/2, T_g/T) = \zeta(5/2) Z(5/2, T_g/T), \tag{17}$$

$$\zeta(a) = \sum_{n=1}^{\infty} n^{-a}, \quad \zeta(3/2) = 2.612, \quad \zeta(5/2) = 1.341,$$

$$Z(3/2, T_g/T) = \frac{1}{\zeta(3/2)} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-3/2} \exp[(-n)T_g/T], \tag{18}$$

$$Z(5/2, T_g/T) = \frac{1}{\zeta(5/2)} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-5/2} \exp[(-n)T_g/T]. \tag{19}$$

These $Z(3/2, T_g/T)$, $Z(5/2, T_g/T)$ functions reduce to unity when T_g goes to zero. Namely, if there is no external magnetic field, the magnetization is immediately reduced to the eq. (5).

We give results of systematic calculations for the functions of $Z(3/2, T_g/T)$ and $Z(5/2, T_g/T)$.⁶⁾

SPIN-WAVE EXCITATIONS IN Gd AT LOW TEMPERATURES

Figures 1 and 2 show the numerical results of these functions. The defining series (18) and (19) converge slowly at high temperatures. Our computer calculations have been truncated if the numerical value had reached smaller quantity than 10^{-10} , for each temperature. As can be seen in Figs. 1 and 2, at lower temperatures the values of both Z functions become small, which reflects the important role of the magnetic field as a magnetic anisotropy. The stronger magnetic anisotropy makes to excite the less spin-waves. In each magnetic field, the magnitude of $Z(3/2, T_g/T)$ is

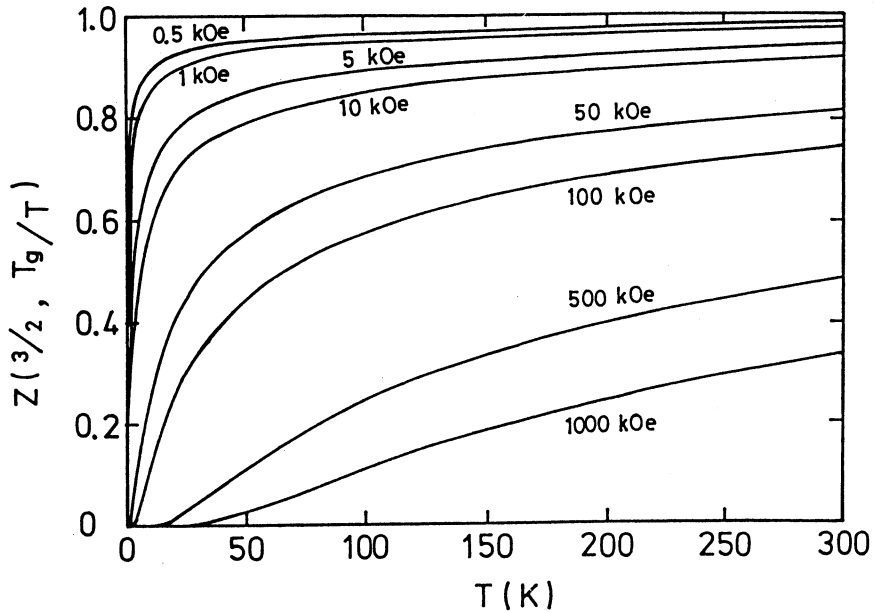


Fig. 1. The temperature variation of $Z(3/2, T_g/T)$ at various magnetic fields. T_g is defined by eq. (9), using $g=2.00$.

smaller than that of $Z(5/2, T_g/T)$.

At higher temperatures, in general, the spin-wave interactions become increasingly important and the T^4 term arises in eq. (5) as a consequence of this dynamical spin-wave interaction,¹¹⁾ which is not discussed here.

3. Experimental Method

Polycrystalline small piece of sample $7 \times 7 \times 0.1 \text{ mm}^3$ (99.9 % purity) was used with its plane parallel to the field in order to minimize the demagnetizing field effects.

The magnetization measurements were performed with a homemade vibrating sample magnetom-

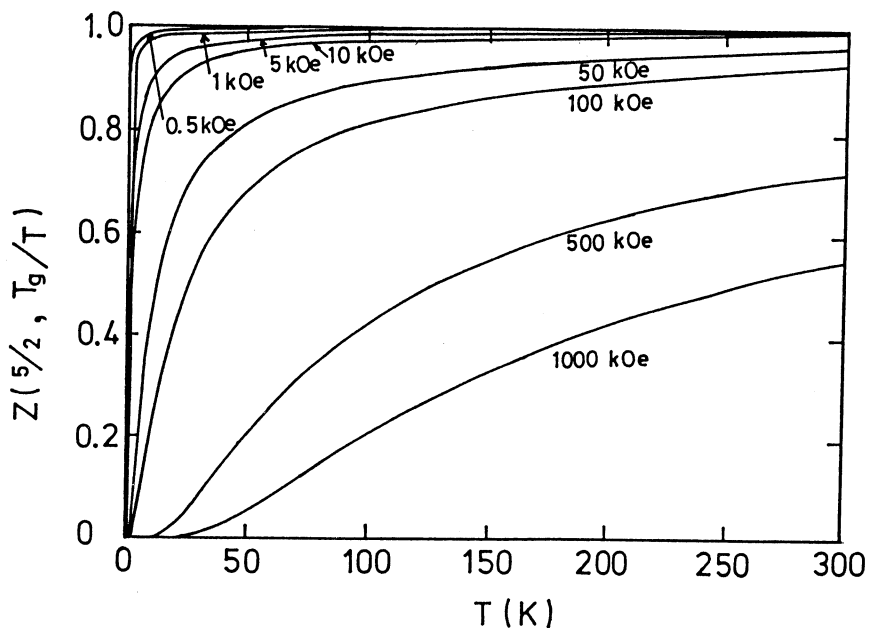


Fig. 2. The temperature variation of $Z(5/2, T_g/T)$ at various magnetic fields. T_g is defined by eq. (9), using $g=2.00$.

eter calibrated by pure nickel. The details about the apparatus which shows a setup of the cryostat and a measuring system of the magnetometer electronics, are given elsewhere.¹²⁻¹⁴⁾ Here, we show only a schematic representation of the mechanical arrangement for the homemade vibrating sample magnetometer in Fig. 3. In this paper, a new analysis of optimum design of a detection coil system for Foner-type vibrating sample magnetometer is given in Appendix.

The magnetization versus magnetic-field isotherms were taken at 5 K intervals from 4.2 to 310 K in a field up to 7.5 kOe. The magnetization as a function of temperature was also measured at a constant field of 6.00 kOe.

4. Experimental Results And Discussion

When one obtains a spontaneous magnetization of ferromagnets at a given temperature, the law of approach to saturation magnetization for the magnetization curve {extrapolating to $(1/H)=0$ or $H=0$ } is used for actual measurements.¹⁵⁾ However in practical experiments, this process of the extrapolation sacrifices high precision of the evaluated values of the spontaneous magnetization. While, the temperature dependence of the magnetization at a constant field can be done fairly

SPIN-WAVE EXCITATIONS IN Gd AT LOW TEMPERATURES

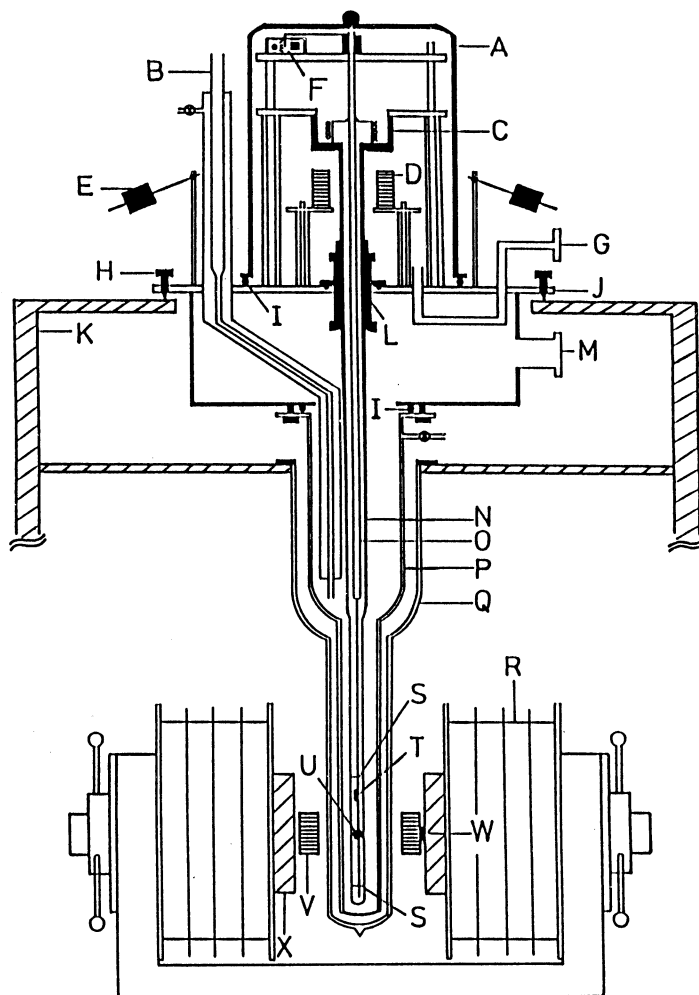


Fig. 3. Mechanical arrangement for the homemade vibrating sample magnetometer. (A) glass bell-jar, (B) liquid He transfer line, (C) speaker, (D) pick-up coils, (E) brass weight for vibration-damping, (F) amplitude detector(photodetection), (G) pumping line of sample chamber, (H) leveling screw, (I) O-ring seal, (J) base plate, (K) support bracket, (L) sample chamber centering guide attached to N, (M) He pumping line, (N) sample chamber, (O) sample support tube, (P) He Dewar, (Q) nitrogen Dewar, (R) magnet, (S) teflon spacer, (T) thermometer, (U) sample, (V) signal pick-up coils(four-coil detection system), (W) Hall sensor, (X) pole piece.

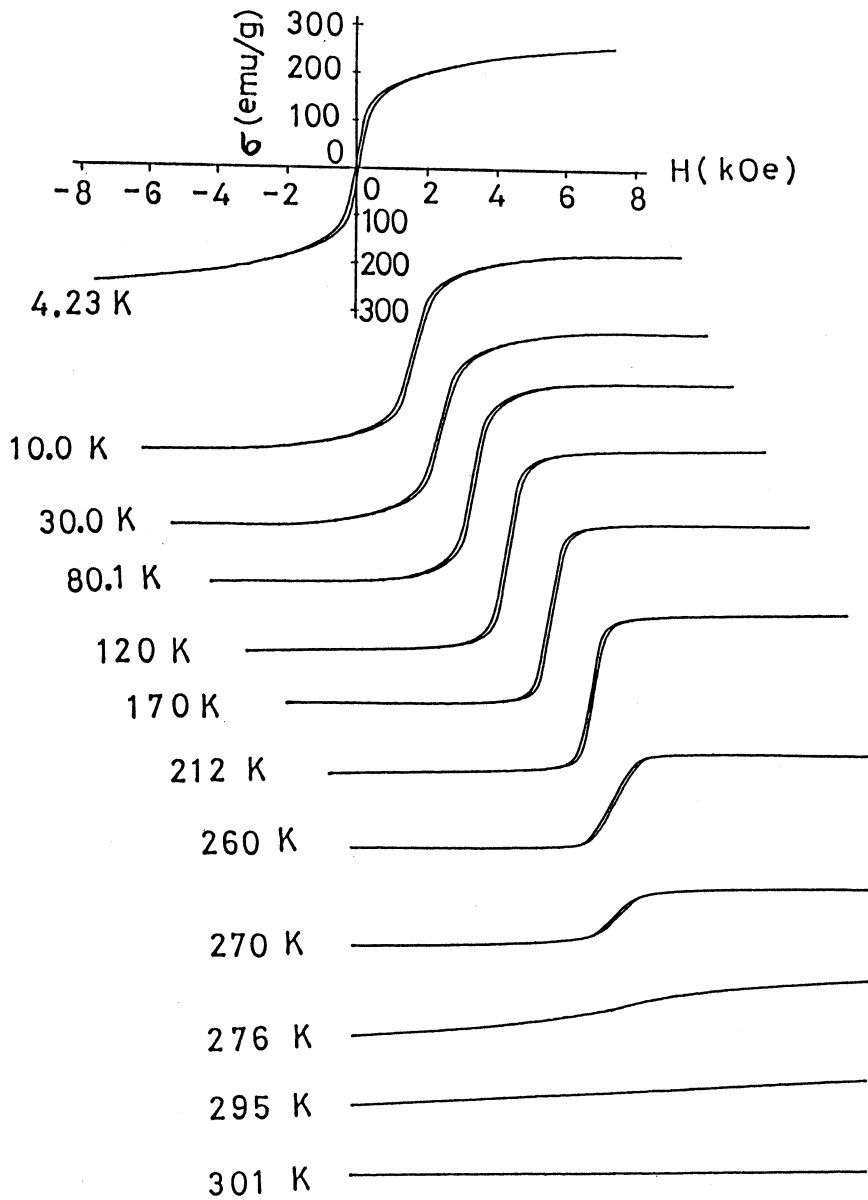


Fig. 4. Magnetization curves of Gd at various temperatures.

accurately.^{7,10)} However it should be noted that in the presence of the magnetic field, an increase of the magnetization itself is caused by the external magnetic field, in addition to Weiss molecular field. Under a moderately strong magnetic field, the excess magnetization forced by this external magnetic field is overlapped in the magnetization process. In a high field region, the forced-ferro magnetization remains as a function of the magnetic field in the almost saturated state. Consequently, we can determine carefully the magnitude of the magnetization at a constant magnetic field. Therefore, the spin-wave analysis in presence of the magnetic field, described in §2, is very important and useful for the analysis.

Because of our sample shape and the orientation to the applied magnetic field, demagnetizing effects are expected to be small. The magnetocrystalline anisotropy can be assumed to be also small for the $L=0$ state in Gd.³⁾ Therefore, no corrections were applied for the above two effects.

Figure 4 shows the magnetization curves up to 7.5 kOe. The magnetization versus magnetic-field isotherms were taken at 5 K intervals. The representative data of the temperature dependence of magnetization curves are shown. The temperature dependence of the magnetization at a constant magnetic field of 6.00 kOe is shown in Fig. 5.

It is easy to construct actual $Z(3/2, T_g/T)$ and $Z(5/2, T_g/T)$ functions on the theoretical ground described in §2. The numerical calculations of these Z -functions at $H=6.00$ kOe are given in Fig. 6. At lower temperatures these functions become seriously significant in eq. (15).

The assumption used in §2 that the spin-wave energy ϵ_k is given simply by eq. (8), is restricted to cubic lattice, while Gd has hexagonal lattice structure. Nevertheless, the simple analysis given in §2 is applied to Gd owing to a lack of the detailed knowledge for Gd at the present stage.

On the basis of the computer calculations of Z -function in Fig. 6, Fig. 7 shows the results for $\Delta\sigma(T)/\sigma(0)$ vs $Z(3/2, T_g/T)T^{3/2}$ at the particular gap temperature T_g corresponding to $H=6.00$ kOe. One can find manifestly a straight line up to 200 K. The dominant $Z(3/2, T_g/T)T^{3/2}$ dependence can be clearly seen. The slope gives the spin-wave parameter B .

Realizing that besides the $Z(3/2, T_g/T)T^{3/2}$ contribution there exist $Z(5/2, T_g/T)T^{5/2}$ term in eq. (15), the next step of the analysis is to include $Z(5/2, T_g/T)T^{5/2}$ term. To show the evidence of the existence of the coefficient C , we plot $[Z(3/2, T_g/T)T^{3/2}]^{-1} [\Delta\sigma(T)/\sigma(0)]$ versus $[Z(5/2, T_g/T)/Z(3/2, T_g/T)] T$ in Fig. 8 at the magnetic field of 6.00 kOe. From the intercept and the slope of the straight line, the spin-wave parameters B and C are determined. Below 50 K, the data points are very scattered as shown in Fig. 8.

Our experimental results are summarized as follows: (a) At temperatures below 200 K, $\Delta\sigma(T)$ is well represented by first $Z(3/2, T_g/T)T^{3/2}$ term clearly indicated in Fig. 7. (b) However, over

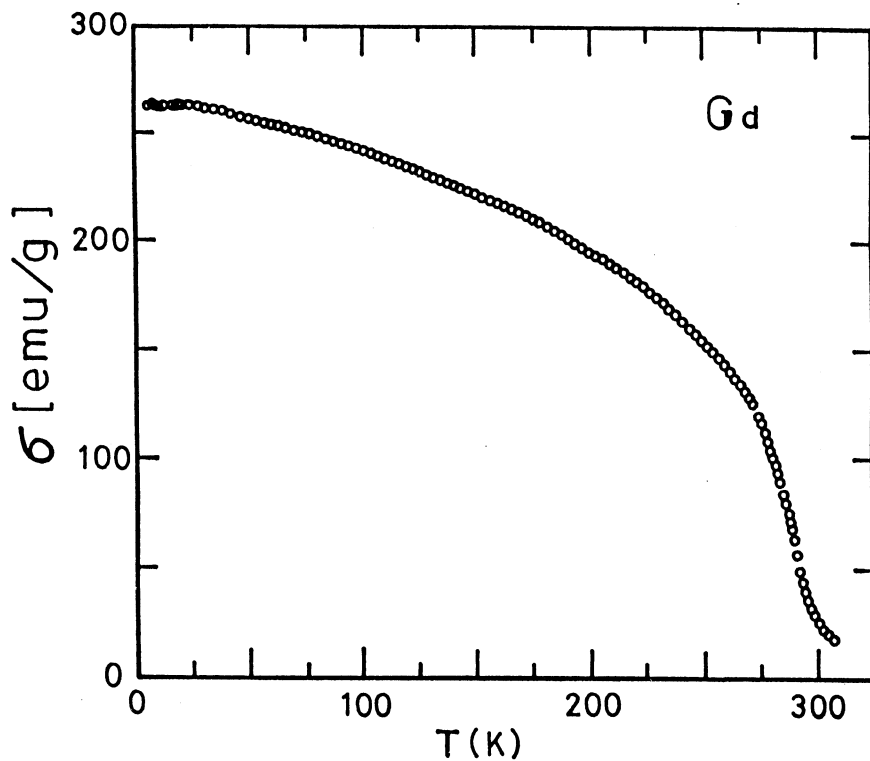


Fig. 5. The magnetization of Gd at $H=6.00$ kOe as a function of temperature.

wide temperature range below $T < 250$ K a much better representation is obtained by eq. (15) as shown in Fig. 8. (c) The spin-wave parameter B and C have been determined by a least-square fit:

$$B = (8.6 \pm 0.8) \times 10^{-5} \text{ (K}^{-3/2}\text{)}, \quad (20)$$

$$C = (4.2 \pm 2.5) \times 10^{-8} \text{ (K}^{-5/2}\text{)}. \quad (21)$$

Here the obtained value B from the results of Figs. 7 and 8 gives the same value within experimental errors. (d) The best extrapolation to $T=0$ K at $H=6.00$ kOe gives

$$\sigma(0) = 264 \text{ (emu/g)}, \quad (22)$$

which corresponds to

SPIN-WAVE EXCITATIONS IN Gd AT LOW TEMPERATURES

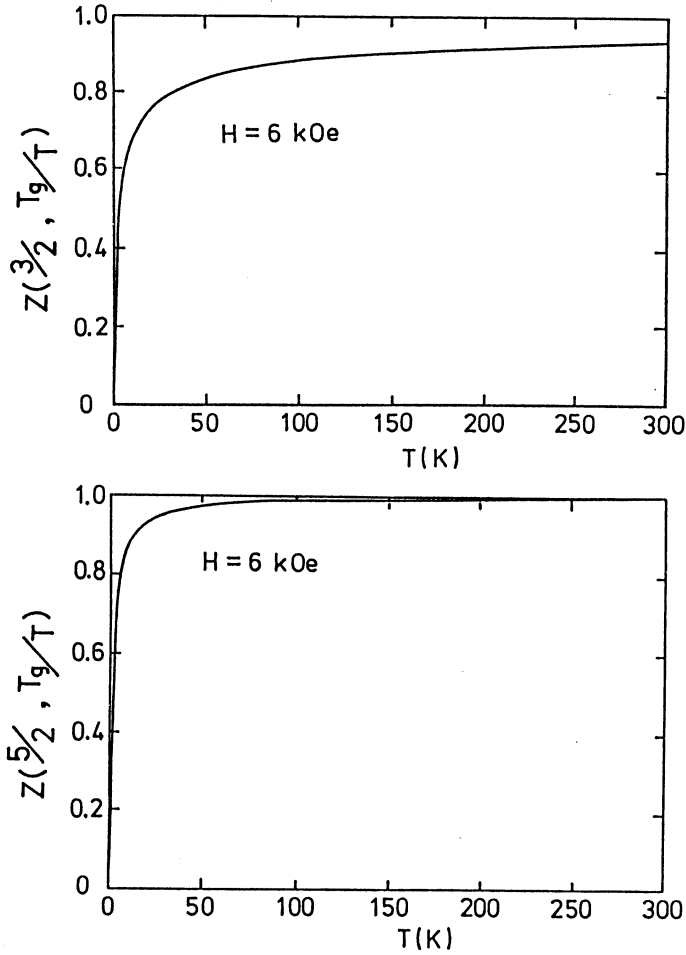


Fig. 6. Computer calculation of $Z(3/2, T_g/T)$ and $Z(5/2, T_g/T)$ at $H=6.00$ kOe as a function of temperature.

$$n_B = gJ = 7.44 (\mu_B / \text{Gd-atom}). \quad (23)$$

The source of the excess moment of $0.44 \mu_B$ per Gd atom over the value of $7.00 \mu_B$ arising from the seven unpaired $4f$ electrons has attracted significant theoretical attention. It is now attributed to the polarization of the conduction band electrons mediated by the localized $4f$ electrons via the exchange interaction.⁸⁾

As shown in Fig. 7, the magnetization follows modified Bloch $T^{3/2}$ law up to remarkably high temperature 200 K.¹⁶⁾ Then the contribution of $T^{5/2}$ term to the magnetization becomes increasingly important at temperature higher than 200 K.

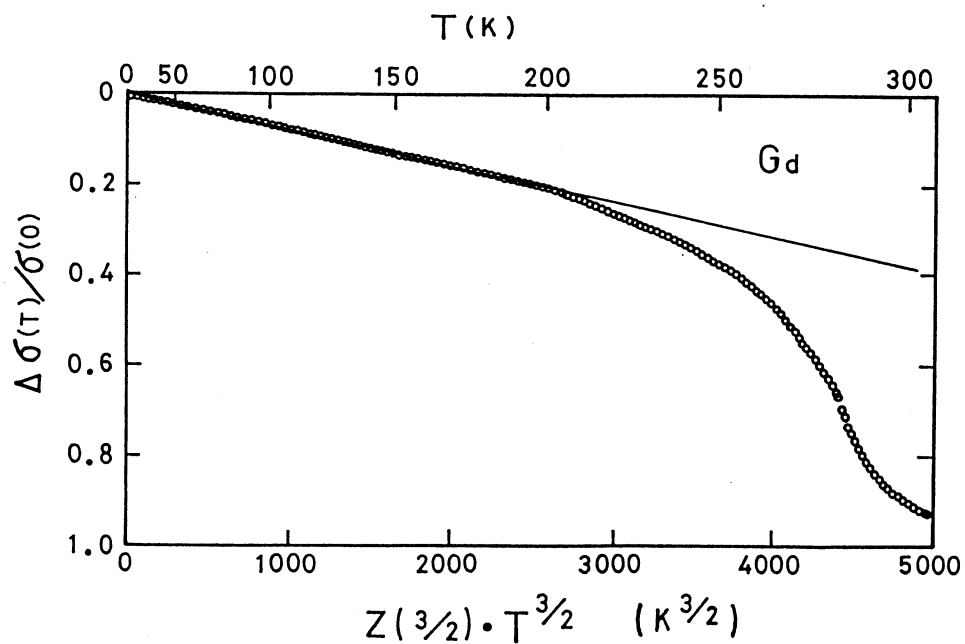


Fig. 7. $\Delta\sigma(T)/\sigma(0)$ vs $Z(3/2, T_g/T)^{3/2}$ at $H=6.00$ kOe.

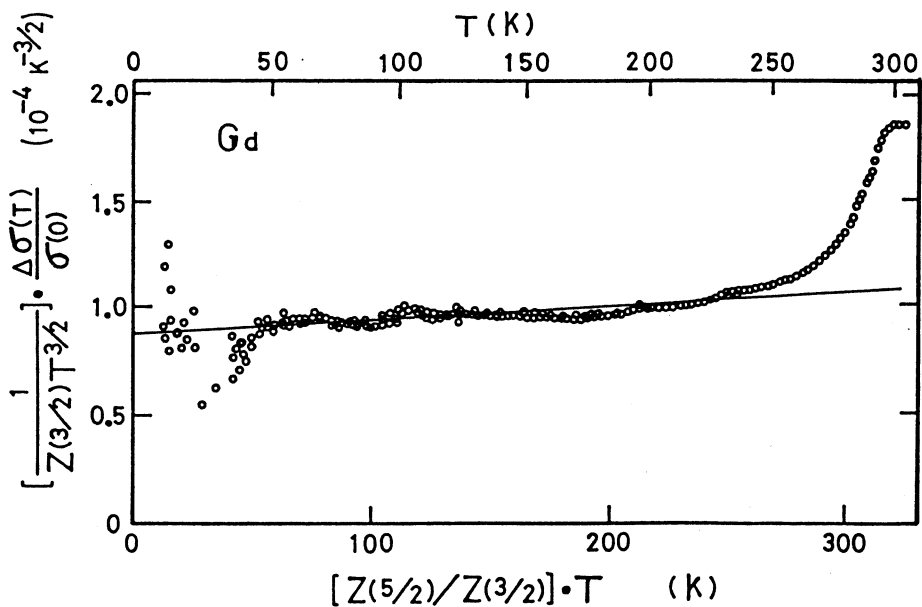


Fig. 8. $[Z(3/2, T_g/T)T^{3/2}]^{-1} \times \{\Delta\sigma(T)/\sigma(0)\}$ vs $[Z(5/2, T_g/T)/Z(3/2, T_g/T)]T$ at $H=6.00$ kOe.

5. Concluding Remarks

The low temperature magnetization per gram of Gd is found to obey the form:

$$\Delta\sigma(T)/\sigma(0) = BZ(3/2, T_g/T)T^{3/2} + CZ(5/2, T_g/T)T^{5/2}. \quad (24)$$

Below 200 K the dominant $BZ(3/2, T_g/T)T^{3/2}$ dependence can be clearly seen. The best extrapolation to $T=0$ K at $H=6.00$ kOe gives $\sigma(0) = 264$ (emu/g), which corresponds to $n_B = gJ = 7.44$ ($\mu_B/\text{Gd-atom}$).

It has been manifestly demonstrated that Gd is the best example to be applied realistically to the spin-wave theory of Heisenberg model for the localized magnetic moment.

Appendix

A1. Optimum Design of Detection Coil System for Vibrating Sample Magnetometer

The optimum design of a detection coil system for Foner-type vibrating sample magnetometers is studied, which minimizes any undesirable influence due to sample mispositioning.¹³⁾

The principle of the vibrating sample magnetometer can be understood with reference to the schematic drawing in Fig. A1. Consider a detection coil (pick-up coil) consisting of a cross-sectional area S , of the number of turns N at point $A(x,y,z)$ sufficiently far away from the sample having a magnetic moment M located at the origin. The voltage V induced in the coil is

$$V = -N\mu_0 S dH_z(t)/dt, \quad (A 1)$$

where μ_0 is the permeability of vacuum, and $H_z(t)$ is the z -component of the magnetic field created by the dipole moment M of the small sample vibrating along the z -axis. The magnetic potential ϕ_m at point A generated by the sample is given by

$$\phi_m = (Mx)/(4\pi\mu_0 r^3). \quad (A 2)$$

Writing out the magnetic potentials at $t=0$ and $t=t$, we have

$$\phi_m(0) = (Mx)/(4\pi\mu_0 r^3)$$

and

$$\phi_m(t) = (Mx)/[4\pi\mu_0 (r + \Delta r(t))^3]$$

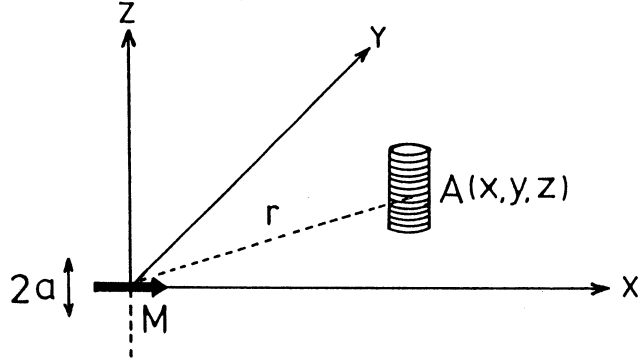


Fig. A1 The principle of a vibrating magnetometer based on Faraday's law. A magnetic moment M , which is aligned along the x -axis by an applied magnetic field, is vibrated along the z -axis at an angular frequency ω with an amplitude of a . The voltage is induced by a time-varying magnetic flux in a detection coil at the point $A(x, y, z)$. The axis of the detection coil is parallel to the direction of vibration of the sample.

$$= (Mx) / (4\pi\mu_0 r^3) \cdot [1 - (3\Delta r(t))/r]. \quad (\text{A } 3)$$

Therefore, the part of $\phi_m(t)$ which varies with time is

$$\phi_m'(t) = -[(3Mx)/(4\pi\mu_0 r^4)] \Delta r(t). \quad (\text{A } 4)$$

For the motion of the magnetic moment M described by

$$\delta = (a) \cdot \cos(\omega t), \quad (\text{A } 5)$$

$\Delta r(t)$ approximately gives the value $\Delta r(t) = (z/r)\delta(t)$ for a sufficiently small displacement δ from the mean sample position. Then, the $\phi_m'(t)$ leads to

$$\phi_m'(t) = -[(3Mxz)/(4\pi\mu_0 r^5)](a)\cos(\omega t), \quad (\text{A } 6)$$

and the z -component of the magnetic field, $H_z(t)$, at point A is given by

$$\begin{aligned} H_z(t) &= -d\phi_m'(t)/dz \\ &= [(3aMx)/(4\pi\mu_0)] \cdot [(1/r^5) - (5z^2)/r^7] \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (\text{A } 7)$$

Let us now take the mean position of the detection coil as $A(x, y, 0)$; hence, the value of $(5z^2)/r^7$ be-

comes small. Therefore, the second term of eq. (A7) becomes negligible. Consequently, from eq. (A1) the voltage V generated by moving the sample is given by

$$V = [(3NSa\omega xM)/(4\pi r^5)] \sin(\omega t) = V_0 \sin(\omega t),$$

$$V_0 = (3NSa\omega xM)/(4\pi r^5) = C(x/r^5) \quad (\text{A } 8)$$

and

$$C = 3NSa\omega M/4\pi.$$

The amplitude V_0 is described by the geometrical factor and the characteristics of the detection coil, as well as by ω , a , and M . If the magnetization M is vibrated with constant ω and a , the amplitude of the electro-motive force V is proportional to the sample magnetic moment M . This paper is concerned with the discussion of the geometrical factor (x/r^5) in the amplitude of V_0 in order to reduce the influence due to sample mispositioning.

We will only be concerned with the four-coil detection system from now on. Figure A2(a) shows this multiple-coil configuration. The four coils have a series connection, where the Nos. 2 and 3 coils in Fig. 2(a) are connected in the opposite wind to Nos. 1 and 4 coils in order to obtain a net output signal. Thus, when the mean position of the magnetic moment is taken as the origin, the amplitude of the voltage induced in the four detection coils becomes

$$V_0(\text{total}) = (4Cx_0)/r_0^5 \equiv W, \quad (\text{A } 9)$$

where a new simple notation, W , is introduced.

In order to make further progress, it is necessary to obtain the induced voltage when the magnetic moment M is displaced from the origin by a small amount $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ at the same time. For example, the amplitude of the induced voltage in the number-1 detection coil is

$$\begin{aligned} V_1(\Delta x, \Delta y, \Delta z) &= C(x_0 - \Delta x) / [(x_0 - \Delta x)^2 + (y_0 - \Delta y)^2 + (\Delta z)^2]^{5/2} \\ &\equiv C[(x_0 - \Delta x)/r_0^5] \cdot [1 - (5/2)P + (35/8)Q], \end{aligned} \quad (\text{A } 10)$$

where, the higher order of displacement is neglected, and P and Q are, respectively, defined as

$$P = [(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - 2(\Delta x)x_0 - 2(\Delta y)y_0] / (r_0^2) \quad (\text{A } 11)$$

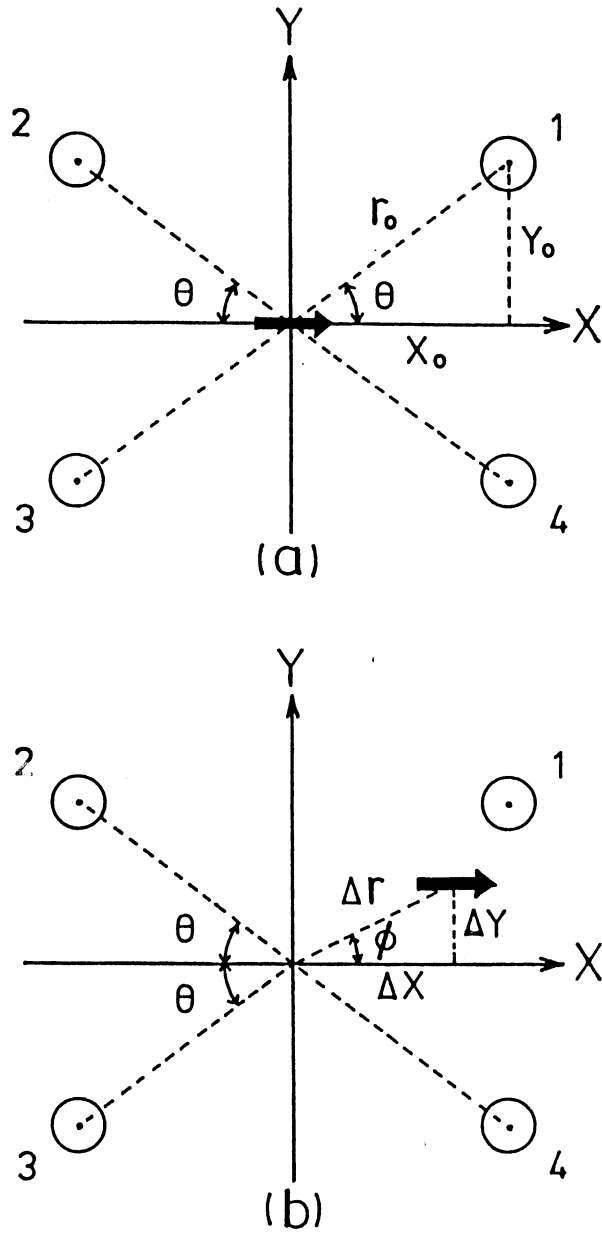


Fig. A2(a) A detection coil configuration consisting of four identical N -turn coils. The cross sections of four coils in this multiple-coil arrangement are shown. The sample having a magnetic moment M , indicated by the heavy arrow, is vibrated along the z -direction. The angle θ is measured from the x -axis.

(b) A situation in which the mean position of the sample magnetic moment originally at the origin is displaced by a small amount $\Delta r(\Delta x, \Delta y, 0)$ due to the sample mispositioning. The sample still keeps vibrating along the z -direction. The angle ϕ is the angle between the x -axis and the Δr .

SPIN-WAVE EXCITATIONS IN Gd AT LOW TEMPERATURES

and

$$Q = [4(\Delta x)^2 x_0^2 + 8(\Delta x)(\Delta y)x_0 y_0 + 4(\Delta y)^2 y_0^2] / (r_0^4). \quad (\text{A12})$$

Then, the amplitude in the induced voltage is given by

$$V(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

$$= W[1 + K_x(\Delta x/r_0)^2 + K_y(\Delta y/r_0)^2 + K_z(\Delta z/r_0)^2]. \quad (\text{A13})$$

To bring eq. (A13) into a manageable form, we introduced the following definitions:

$$K_x = -(5/2)[3 - 7(x_0/r_0)^2],$$

$$K_y = -(5/2)[1 - 7(y_0/r_0)^2] \quad (\text{A14})$$

and

Table A1 Numerical values of K_ϕ , defined in text, as a function of ϕ for several detection coil arrangements characterized by θ (see Fig. A2).

ϕ (°) : sample position	θ (°) : detection coil configuration					
	0	30	36.7	45	60	90
0	10.0	5.63	3.75	1.25	-3.13	-7.50
15	9.16	5.37	3.75	1.58	-2.20	-5.99
30	6.88	4.69	3.75	2.50	0.313	-1.88
45	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
60	0.625	2.81	3.75	5.00	7.19	9.37
75	-1.66	2.13	3.75	5.92	9.70	13.5
90	-2.50	1.88	3.75	6.25	10.6	15.0

$$K_z = -(5/2).$$

Furthermore, let us introduce the angle ϕ and Δr as (see Fig. A2(b))

$$\Delta x = (\Delta r) \cos \phi$$

and

$$\Delta y = (\Delta r) \sin \phi. \quad (\text{A15})$$

Also, let

$$K_\phi = K_x (\cos \phi)^2 + K_y (\sin \phi)^2. \quad (\text{A16})$$

Then, eq. (A13) can be rewritten in terms of these definitions

$$V(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = W[1 + K_\phi (\Delta r/r_0)^2 + K_z (\Delta z/r_0)^2] \quad (\text{A17})$$

as well as

$$V(\Delta x, \Delta y, 0) = W[1 + K_\phi (\Delta r/r_0)^2], \quad (\text{A18})$$

$$V(0, 0, \Delta z) = W[1 + K_z (\Delta z/z_0)^2]. \quad (\text{A19})$$

As a result, if the magnetic moment is displaced in the x - y plane, the characteristics of the induced voltage is completely determined by K_ϕ (having a simply reduced parameter of angle ϕ).

Next, the results of a numerical calculation of K_ϕ will be shown. Table A1 gives a list of the numerical values for K_ϕ as a function of the angle ϕ , in which the various detection coil arrangements are characterized by the angle θ indicated in Fig. A2(a). Our final objective concerning this argument is to determine a relevant angle θ in order to minimize the undesirable effects due to any sample mispositioning which comes from the existence of Δx and Δy . Here, it should be noted that there exist a characteristic angle $\theta = 36.7$ degree in which K_x is equal to K_y ; then, the magnitude K_ϕ is independent of the angle ϕ , as can be seen in Table A1. The angular dependence of K_ϕ is shown in Fig. A3. The detection coil configuration having the characteristic angle $\theta = 36.7$ degrees gives a constant magnitude of $K_\phi = 3.75$. All the other detection coil configurations have a larger value for K_ϕ in a certain region of angle ϕ . These results lead us to a significant conclusion. Namely when the magnetic moment M is displaced in the x - y plane owing to sample mispositioning, the detection-coil configuration should be set at $\theta = 36.7$ degrees in order to reduce any mispositioning influence.

SPIN-WAVE EXCITATIONS IN Gd AT LOW TEMPERATURES

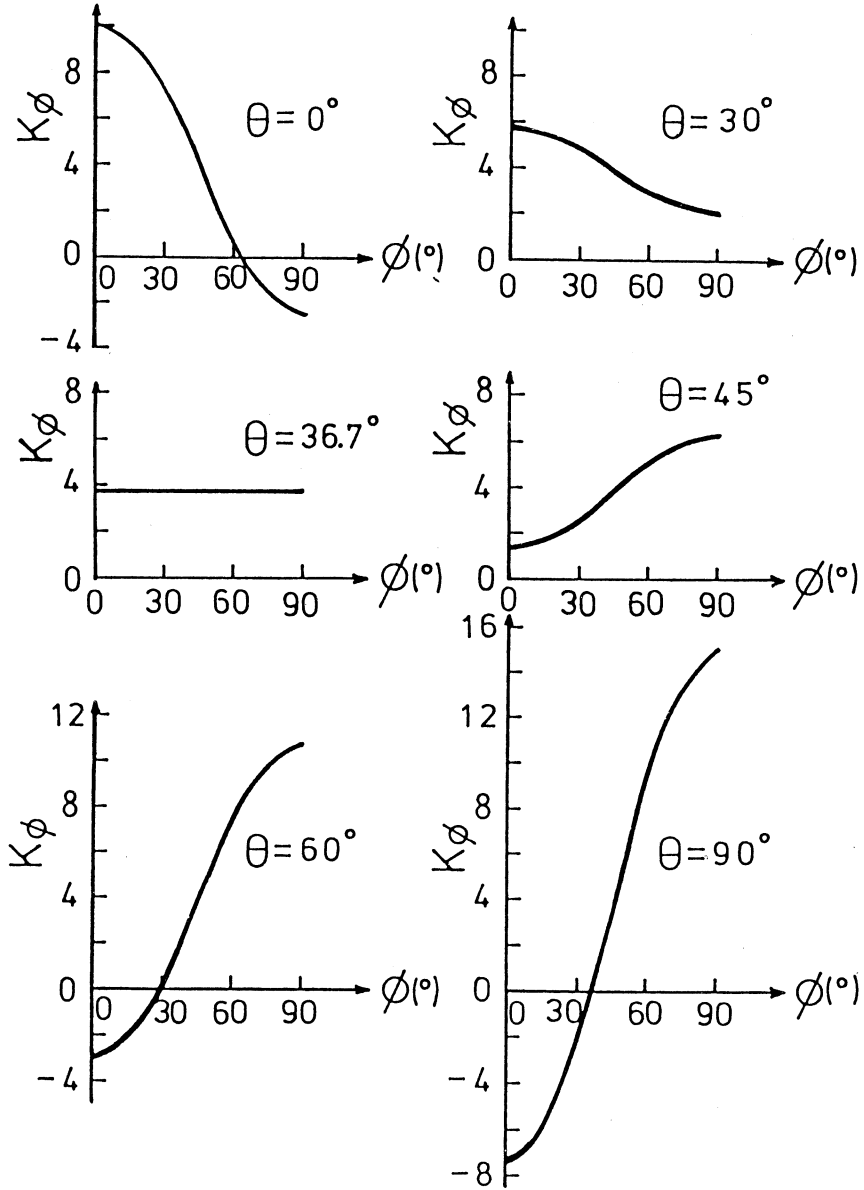


Fig. A3 The characteristic feature of the angular dependence of K_ϕ for the 6 different detection coil arrangements. If the detection coils are set up to have $\theta = 36.7$ degrees, it can be seen that K_ϕ has a constant value of 3.75 for any displacement angle ϕ . For all the other coil configurations, the magnitude of K_ϕ is larger than 3.75 in a certain region of the displacement angle ϕ .

As a next approach, the amount of the relative output signal from a four-coil detection system, with the relevant angle $\theta = 36.7$ degree, is obtained in Table A2. The actual feature of the relative output signal is seen in Fig. A4. If the angle θ is chosen to be 36.7 degree, the relative output signal gives less than 1 % change in the output signal within the range of the 5 % in the relative displacement.

Since the z -axis is the direction of motion of the sample and the sample position is determined by a vibrating rod, it is unlikely that the displacement, itself, along the z -direction would arise.

Table A2 The numerical values of the relative output signal from a four-coil detection system when $\theta = 36.7$ degree. The sample positions are given by $\Delta r/r_0$ and $\Delta z/r_0$.

Displacement in the x-y plane		Displacement along the z-direction	
$\frac{\Delta r}{r_0}$	$\frac{V(\Delta x, \Delta y, 0)}{V(0, 0, 0)}$	$\frac{\Delta z}{r_0}$	$\frac{V(0, 0, \Delta z)}{V(0, 0, 0)}$
0	1	0	1
0.01	1.0004	0.01	0.9998
0.02	1.0015	0.02	0.9990
0.03	1.0034	0.03	0.9978
0.04	1.0060	0.04	0.9960
0.05	1.0094	0.05	0.9938
0.06	1.0135	0.06	0.9910
0.07	1.0184	0.07	0.9878
0.08	1.0240	0.08	0.9840
0.09	1.0304	0.09	0.9798
0.10	1.0375	0.10	0.9750

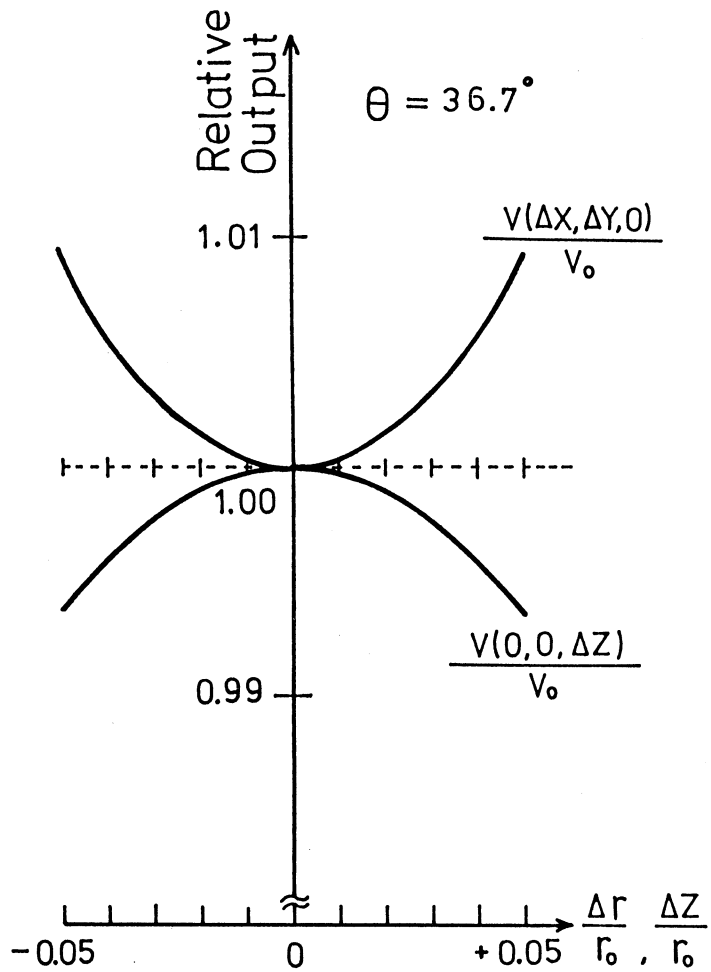


Fig. A4 The relative output signal of the four-coil detection system as a function of the sample position. The angle between r_0 and the x -axis is 36.7 degree, that is the the best angle to reduce undesirable sample mispositioning effects.

From the preceding results, the discussion of the relative sensitivity in the output voltage for the displacement in the x - y plane has significant importance in the actual experimental situation; this is because the problem for the z -direction displacement is less significant. Consequently, if the relevant angle, $\theta = 36.7$ degrees is chosen, any undesirable influence due to sample mispositioning and departures from constructional ideality can be minimized.

References

- 1) B. E. Argyle, S. H. Charap and E. W. Pugh: Phys. Rev. *132*, 2051 (1963).
- 2) E. W. Pugh and B. E. Argyle: Suppl. J. Appl. Phys. *33*, 1178 (1962).
- 3) H. E. Nigh, S. Legvold and F. H. Spedding: Phys. Rev. *132*, 1092 (1963).
- 4) W. D. Corner, W. C. Roe and K. N. R. Taylor: Proc. Phys. Soc. (London) *80*, 927 (1962).
- 5) C. D. Graham: J. Appl. Phys. Suppl., *34*, 1341 (1963).
- 6) S. Nagata, S. Ebisu and S. Taniguchi: Physica B (Utrecht) *150*, 423 (1988).
- 7) S. Nagata, S. Ebisu, E. Fujita, M. Miyazaki and S. Taniguchi: Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. *26-3*, 825 (1987).
- 8) H. W. White, B. J. Beaudry, P. Burgardt, S. Legvold and B. N. Harmon: AIP Conf. (USA) No. *29*, 329 (1976).
- 9) F. Keffer: *Handbuch der Physik* Vol. *18/2*, p. 1 (Springer-Verlag, edited by H.P.J. Wijn, New-York, 1966).
- 10) S. N. Kaul: Phys. Rev. *B27*, 5761 (1983).
- 11) C. Kittel: *Quantum theory of solids*, p 49 (John Wiley & Sons, Inc., New York • London 1963).
- 12) S. Nagata, M. Miyazaki, E. Fujita and S. Taniguchi: Cryogenic Engineering (Teion-Kougaku) *21*, 295 (1986) [in Japanese].
- 13) S. Nagata, E. Fujita, S. Ebisu and S. Taniguchi: Jpn. J. Appl. Phys. *26*, 92 (1987).
- 14) S. Nagata and S. Taniguchi: Solid State Physics (Kotai Butsuri) *21*, 877 (1986) [in Japanese].
- 15) S. Chikazumi: *Physics of Magnetism*, p 274 (Robert E. Krieger Pub., Huntington, New York 1978).
- 16) J. F. Elliott, S. Legvold and F. H. Spedding: Phys. Rev. *91*, 28 (1953).

液体急冷法による非晶質 $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ 合金薄帯の 磁気異方性に及ぼす低温加熱の影響

宮 脇 良 彦・近 沢 進・谷 口 哲

Effects of Low Temperature Annealing on the Ferromagnetic Anisotropies in an Amorphous $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ Alloy Splat—Quenched by the Single Roller Method

Yoshihiko MIYAWAKI, Susumu CHIKAZAWA and Satoshi TANIGUCHI

Abstract

Effects of the low temperature annealing were studied on the ferromagnetic anisotropies in an amorphous $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ alloy sput—quenched by the single roller method. Measurements were made by the torque magnetometer after magnetic annealing in one direction, and next, in another direction perpendicular to the former. Besides magnetically induced anisotropy, an anisotropy was found to exist and the easy direction of which was almost the longitudinal direction of the original strip. This newly found anisotropy did not change appreciably by the low temperature annealing, but the magnetically induced anisotropy decreased with annealing time following approximately to the exponential law. Activation energy of this process was found to be about 0.3 eV.

These behaviors were discussed based on the amorphous model presented formerly by one of the authors.

1. 緒 言

液体急冷法（単ロール法）によって作成された強磁性非晶合金薄帯には、異なる起源を持ついくつかの磁気異方性が共存している。これらの内、符号が正で大きな磁歪を持つ合金薄帯においてしばしば観察されるメーズ磁区を発生させる歪磁気異方性（その磁化容易方向は薄帯の厚さ方向）は、非晶質合金薄帯作成時における冷却速度の局所的な変動によって生じた密度のゆらぎと正の大きな磁歪との結合によって生ずるとして説明できる⁽¹⁾。また、磁界中の加熱によって誘起される誘導磁気異方性は、結晶合金におけると同様に、合金中の異種原子対の方向分布が磁界中熱処理によって異方的になるために生ずると理解されている⁽²⁾。非晶質合金には、これらの他に、薄帯の長さの方向を磁化容易方向とする単軸的な磁気異方性（以下においては配向磁気異方性という）が存在するが、この磁気異方性の性格や起源については、十分には調べられていない。

一般に、磁気異方性は強磁性体内部の原子の並び方を反映している。したがって、これらの磁気異方性の低温加熱による変化を研究することによって、非晶質合金内部の原子の並び方や、その低温加熱に伴う変化を知ることが出来る筈である。このような観点から、単ロール法で作成さ

れた非晶質 $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ 合金薄帯の誘導磁気異方性と配向磁気異方性の低温加熱に伴う変化について研究した。なお、この合金薄帯に共存する歪磁気異方性は、その磁化容易方向が薄帯の厚さ方向であるから、面内の磁気異方性の測定結果には影響しない。

2. 実験方法及び試料

磁気異方性の測定には、自作した磁気トルク計を用いた。この装置では、試料円板に働くトルクを、永久磁石が作る放射状の磁界中に吊されたコイルに働くトルクで補償し、そのコイル電流に比例する電圧をデジタル化してコンピュータにとり込み、必要なデータ処理を行なえるようにしてある。

誘導磁気異方性と配向磁気異方性との分離には、試料円板のある方向（例えば薄帯の長さ方向）に磁界中熱処理（220℃、1時間^{*}）して、室温でトルク曲線を測定し、次に、それと直交する方向（薄帯の幅方向）に磁界中熱処理を施してから、室温で再びトルク曲線を測定し、これらふたつのトルク曲線を組み合わせて解析する方法を用いた。この分離法は、誘導磁気異方性の磁化容易方向は、非晶質合金の場合には、熱処理中の磁界の方向に完全に一致するという理論的考察と、配向磁気異方性はこのような低温短時間の加熱ではほとんど変化しないという実験事実とに基づいている。

低温加熱は、220～360℃の温度範囲で行なった。非晶質合金においては、その内部微細構造は加熱によって非可逆的に変化するので、ひとつの加熱温度に対してひとつの試料を用い、ある時間低温加熱後上記の磁界中熱処理と測定を行ない、再びその温度で加熱してから磁界中熱処理と測定を行なうという手順を繰返した。この実験条件を用いれば、磁界中熱処理と測定の条件はすべて同じであるから、試料内部の微細構造に変化が起こらなければ、誘導磁気異方性の大きさや配向磁気異方性は変化しないことになる。

測定に用いた試料は、 $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ の組成を持つ非晶質合金であり、単ロール法で作成された幅約100mm、厚さ約35 μm の長尺の薄帯^{**}から切り出した直径約7mmの真円度のよい円板である。

3. 実験結果

図-1は誘導磁気異方性定数 K_u の低温加熱に伴う変化の一例を示したものである。図の横軸は加熱温度 $T_a = 240^\circ\text{C}$ における積算加熱時間、縦軸は低温加熱前の K_u の値、 $K_u(0)$ 、に対する t 時間加熱後の値、 $K_u(t)$ 、の割合である。また、図の実線は、この誘導磁気異方性の低温加熱による減少が、単一の緩和時間で表わされる過程によって生ずるとした時の最も確からしい曲線

*) この磁界中熱処理の条件は、出来るだけ低い温度と短い時間の加熱で、誘導磁気異方性の大きさが十分に飽和することを目標に、予備実験を行なって選んだものである。

**) この非晶質合金薄帯は日立金属株式会社より提供されたものである。

液体急冷法による非晶質 $\text{Fe}_{79}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ 合金薄帯
の磁気異方性に及ぼす低温加熱の影響

である。図-2は、このようにして得られた誘導磁気異方性の低温加熱による減少の緩和曲線をまとめて示したものであり、図-3は各加熱温度における誘導磁気異方性定数の飽和減少率を示したものである。また、図-4は、誘導磁気異方性の低温加熱による減少の緩和時間を、加熱温度の逆数に対して描いたもので、これから、この現象を生ずる過程の活性化エネルギーとして、約0.3 eVの値が得られた。

図-5は、低温加熱前の配向磁気異方性定数、 $K_0(0)$ 、に対する t 時間加熱後の値、 $K_0(t)$ 、の割合と積算加熱時間との関係を、各加熱温度についてまとめて示したものである。

これまで磁気異方性の大きさの低温加熱に伴う変化をすべて相対値で表わした。これは磁気異方性の大きさの試料による差異がかなりあるためである。特に配向磁気異方性の差異は著しいので、配向異方性が比較的大きな試料を選んで実験を行なった。それでも図-5に見られるように、

他の試料では配向磁気異方性は低温加熱でほとんど変化しないのに、310℃の加熱を行なったふたつの試料では、かなり大きな変化が観測された。配向磁気異方性が比較的小さな試料では、しばしばこのような大きな変化が観測された。これらについても、次章において考察を行なう。なお、図では示していないが、低温加熱によつて配向磁気異方性が大きな変化を示さない場合には、その磁化容易方向の変化も小さく、たかだか20度程度以下であった。

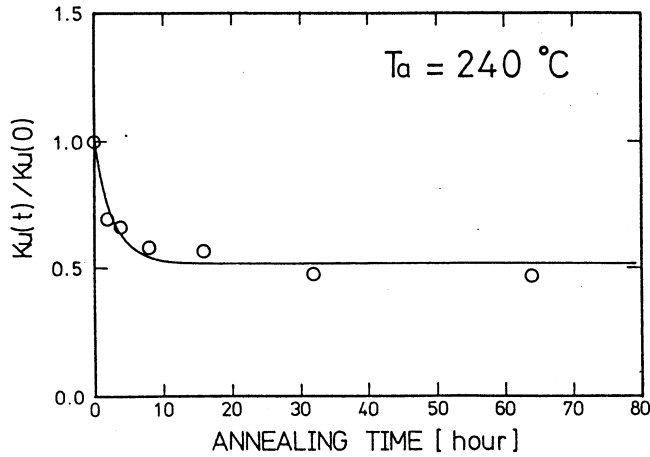


図-1 誘導磁気異方性の低温加熱に伴う変化の一例
(加熱温度 $T_a=240^\circ\text{C}$)

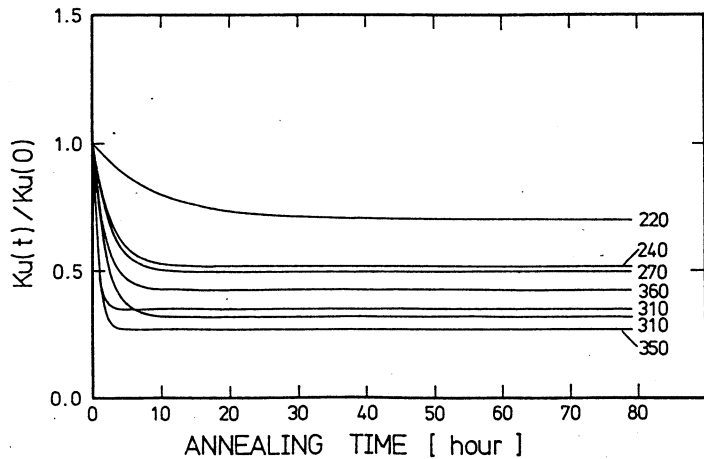


図-2 各加熱温度における誘導磁気異方性の減少緩和曲線
(図中の数値は加熱温度 T_a (°C))

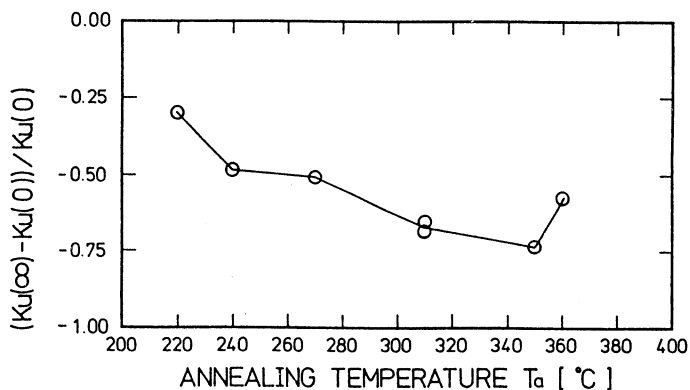


図-3 誘導磁気異方性の各加熱温度における飽和減少率

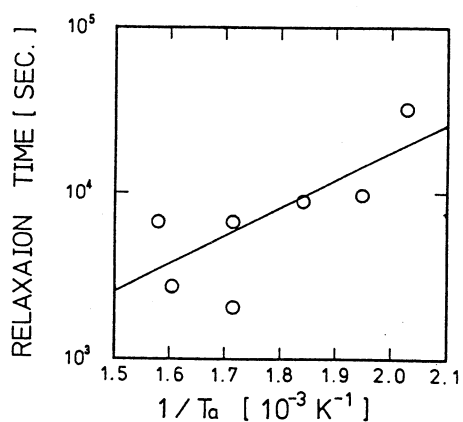


図-4 誘導磁気異方性減少の緩和時間と加熱温度との関係

4. 考 察

4.1 非晶質合金の構造モデル

著者の一人(谷口)は先に、液体急冷法で作成された非晶質 Fe-B 合金は、主として、鎖状に結合したボロン原子に鉄原子が配位した分子状の原子群(以下においては鎖状分子という)からなっており、その隙間をボロン鎖に配位していない鉄原子(以下において自由な鉄原子という)がある割合いで占めている、という構造モデルを提案した⁽³⁾。これとは別に、鉄原子が出来るだけ稠密に無秩序に詰まっていた、その隙間をボロン原子が占め、その無秩序構造を安定にすると

いうモデルがあり⁽⁴⁾、多くの実験結果はこれまで、主として後者によって説明されている。しかしこのモデルでは、本実験のように、低温短時間の磁界中熱処理によって誘起される誘導磁気異方性と、低温ではあるがそれよりもかなり高い温度で長時間加熱してもほとんど変化しない配向磁気異方性とが共存することは、理解しがたい。した

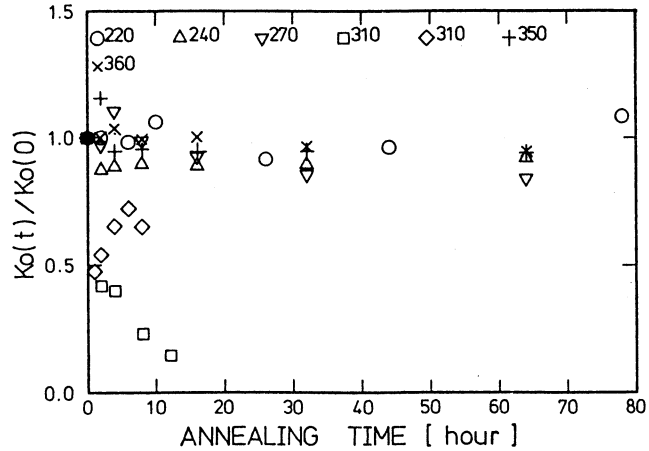


図-5 配向磁気異方性の低温加熱による変化
(図中の数値は加熱温度 Ta(°C))

がって、以下の考察においては前者のモデルに沿って、誘導磁気異方性及び配向磁気異方性の挙動と非晶質合金の内部微細構造の低温加熱に伴う変化との関連について、考察を進めることにする。

4.2 配向磁気異方性の挙動について

上記のモデルにおいては、鎖状分子は合金融液中に既に存在しており、単ロール法などの液体急冷法によって非晶質合金薄帯に凝固する際に、その融液の流れのために流動配向し、それが配向磁気異方性を与えると考えられている。したがって、配向磁気異方性の大きさは鎖状分子の方向分布の異方性の程度を表わしていることになる。また、この鎖状分子は、比較的高温においては、その囲りに存在する自由な鉄原子を吸収して分解したり、自由な鉄原子を放出して互いに結合したりして、非平衡硼化物相を晶出させると考えられている。

これらから、比較的小さな配向磁気異方性を持つ試料では、鎖状分子の方向分布が等方的に近いために、その僅かな分解や結合によつて、方向分布の異方性が大きく変わる、すなわち、配向磁気異方性の大きさが大きく変わる、可能性があり、他方、比較的大きな配向磁気異方性を持つ試料では、当初の配向の程度が大きいために、多少の鎖状分子の分解や結合が起きても、その方向分布はあまりかわらない、すなわち、配向磁気異方性は低温加熱によってほとんど変化しないことになる。

なお、配向磁気異方性の試料間の差異が大きいことは、鎖状分子の等方分布からのズレのみが測定されていることにもよるが、幅約100mm程度の長尺の薄帯を作り得る技術をもってしても、単ロール法で急冷中の合金融液の流れや冷却速度の時間的空間的なゆらぎが完全には阻止されて

いないことを示していると考える。

4.3 誘導磁気異方性の低温加熱に伴う減少について

前記のモデルにおいては、誘導磁気異方性は自由な鉄原子が鎖状分子の集合体の中の隙間を占める占め方の変化によって生ずる。すなわち、自由な鉄原子はその囲りにあるいくつかの隙間の内、熱処理中の磁界の方向を磁化容易方向にするような隙間を選択して占める。本実験における磁場中熱処理条件下においては、隙間の形状や数はほとんど変化しないと考えられるので、誘導磁気異方性の大きさは自由な鉄原子の数に比例することになる。したがって、低温加熱に伴う誘導磁気異方性の減少の様子は、自由な鉄原子の数が低温加熱に伴って減少する様子を示していることになる。

他方このモデルは、自由な鉄原子は非晶質合金の母体である鎖状分子の集合体と二相分離し、鉄結晶の晶出の核となることを予測している。確かに、本実験においても、低温加熱温度範囲で長時間の加熱後の試料で、鉄結晶の晶出がX線回析で認められたが、誘導磁気異方性の減少の挙動の詳細、すなわち、図-1及び2の曲線の形や図-3の飽和減少率の低温加熱温度依存性など、を自由な鉄原子の数の減少の挙動を表わすものとするためには、二相分離した鉄原子集合体が誘導磁気異方性には寄与しないことなど、主として二相分離に関連した多くの問題について、さらに詳細な研究が必要である。

参考文献

- 1) 増本健編著：アモルファス合金の基礎，p.112～118（オーム社，昭57）
- 2) 同上，p.124～128
- 3) 谷口哲：日本金属学会会報19巻6号p.420～429（1980）
- 4) 増本健編著：アモルファス合金の基礎，p.54～60（オーム社，昭57）

色素薄膜を用いた位相共役干渉法

中川一夫・古川弘司*・藤原裕文

Phase-Conjugate Interferometry Using Dye Film

KAZUO NAKAGAWA, KOUZI FURUKAWA, HIROFUMI FUJIWARA

Abstract

Both real-time and double-exposure phase-conjugate interferometries are demonstrated with an eosin-doped gelatin film. A xanthen dye-doped film can generate phase conjugate waves simultaneously or separately through degenerate four-wave mixing (DFWM) and holographic processes. The holographic process differs from the DFWM process in the respect that the xanthen dye-doped film can record spatial information on light like a hologram. The DFWM component has a response time of \sim msec, which is by a factor of 4 faster than that of the holographic component. The difference in their response times in the two processes is important in real-time and double-exposure phase-conjugate interferometries. Of xanthen dyes such as eosin, erythrosin and fluorescein, an eosin-doped gelatin film is most suitable for phase-conjugate interferometries.

1. はじめに

位相共役波は、もとの波に対して波面の形を変えずに、伝播してきた光路を逆に進む性質を持っており、4波混合、3波混合、誘導散乱、フォトンエコー¹⁾²⁾などの物理機構により、非線形光学媒質を用いて発生される。このような特異な性質をもった位相共役波の、光情報処理、光通信、干渉測定、レーザー共振器などの分野への広い応用が期待されている。

位相共役波を利用した干渉は位相共役干渉と呼ばれる。通常の干渉計の鏡を位相共役波を発生させる素子で置き換えることにより位相共役干渉は実現される。位相共役鏡を備えた干渉計は、従来の干渉計に比べ、いくつかの利点をもっている。たとえば、空気のゆらぎや光学素子によって生じた不均一な位相の乱れを除去できること、反射光は自動的にもってきた道に戻ることで、位相共役鏡が高い利得をもつ場合には、物体からの弱い光を増幅してコントラストの高い明るい干渉パターンをつくれること、などが掲げられる。

これまでの位相共役干渉の研究では、位相共役波を発生させる物理機構としては、通常のホログラフィ³⁾のほかに、誘導ブリュアン散乱⁴⁾、3波混合⁵⁾、縮退4波混合⁶⁾⁻¹⁰⁾などが用いられ、その有効性が示された。これらの実験では、位相共役波を発生させる素子として、ホログラフィ乾板³⁾、 CS_2 ⁴⁾、 $\text{LiCHO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ⁵⁾、エオシン⁷⁾、 $\text{BSO}(\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20})$ ^{6),8)}、 BaTiO_3 ⁹⁾、およびNa蒸気¹⁰⁾

* 富士写真フィルム株式会社 (前応用物性学科)

などが使われている。

我々は、フルオレセイン、エオシン Y、エリトロシン B などのキサンテン系色素を分散させたゼラチン膜が、縮退 4 波混合とホログラフィ過程により、同時にまたは独立に位相共役波を発生させることを見出した¹¹⁾。これらの色素含有膜はアルゴンレーザー光に対する強い吸収を示す。縮退 4 波混合成分は、色素の飽和吸収によって発生し、msec 程度の時間応答をもつ。一方、ホログラフィ成分は、色素の吸収あるいは屈折率の非可逆的な光化学変化によって生じ、時間応答は縮退 4 波混合成分よりも 4 桁程度遅い。これらの色素含有膜は光に対する記録作用をもっていると考えるとよい。これらの点から、キサンテン系色素を分散させたゼラチン膜は、写真乾板のような記録特性をもち、同時に時間応答の速い位相共役波を発生させることができる新しい光学材料である。このような色素含有膜を位相共役鏡として用いれば、2つの過程（縮退 4 波混合とホログラフィ過程）を組み合わせることににより、湿式の化学現象を行うことなしに実時間および二重露光位相共役干渉が可能となる。

本研究の目的は、フルオレセイン、エオシン Y、エリトロシン B などの色素のうち、どの色素が位相共役鏡として適しているかを調べるとともに、色素含有ゼラチン膜を位相共役干渉へ使うことの有効性を示すことである。

2. 実験装置

位相共役干渉を行なうための光学系を図-1に示す。光源はアルゴンイオンレーザーを用い、エオシン Y、エリトロシン B の場合は $0.515\mu\text{m}$ の波長を、フルオレセインの場合は $0.488\mu\text{m}$ の波長を使用した。これらの色素はアルゴンレーザー光の波長に対して吸収断面積が大きく、励起準位の寿命も比較的長いので、低い入力パワーで位相共役波を発生させることができる。色素薄膜に対向する平面波ポンプ光 E_1 と E_2 およびプローブ光 E_{pr} をコヒーレント照射する。透過物体をプローブ光路内の O に置き、像面 I に結像する。コントラストの高い干渉パターンを得るためには、2種類の位相共役波の減衰時定数を前もって知る必要がある。プローブ光を遮断するためのシャッター S_1 はこの目的に使われる。色素薄膜にホログラフィ成分を記録するときには、シャッター S_2 によってポンプ光の一方（実験では E_1 ）を遮断する。

色素薄膜は以下のようにして作製する。まず、10wt % のゼラチンを溶解した $40\sim 50^\circ\text{C}$ の水溶液に色素を混合させる。この際、エオシン Y、エリトロシン B は直接混合させるが、フルオレセインはエタノールに溶解してから混合する。つぎに、溶液をガラス基板上に置かれた枠内に注いでいったん冷却し、ジェリー状にした後冷却しながら乾燥させる。本実験では、試料の厚さは $60\mu\text{m}$ 、色素濃度は、エオシン Y では0.2wt %、エリトロシン B では0.4wt %、フルオレセインでは、0.15wt % のものを使用した。これら試料によって発生する位相共役波の縮退 4 波混合成分の効率（入射プローブ光に対する位相共役波の強度比）は 10^{-3} のオーダーである。

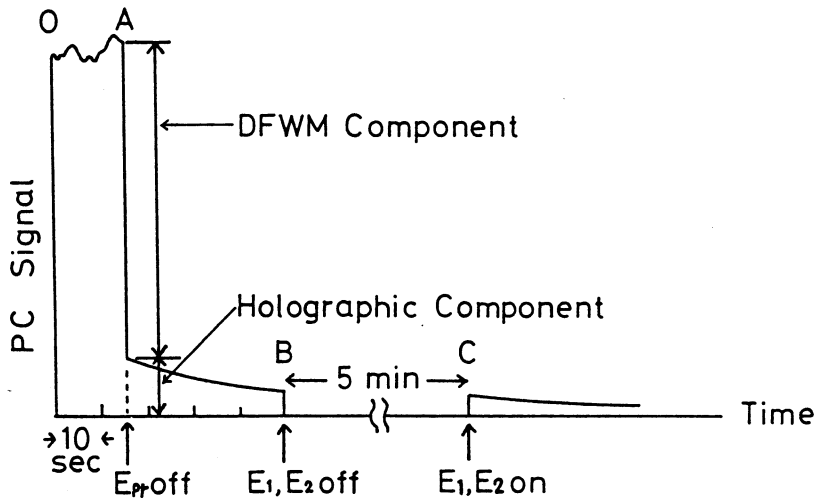


図2 プローブ光を遮断したときの位相共役波の減衰

しては、縮退4波混合成分は初期には強いがしだいに減少する。ホログラフィ成分は、縮退4波混合成分に比べて極端にその立ち上りは遅いことがわかる。両成分とも全体に減衰していくのは色素の光による退色のためである。

位相共役干渉では、物体の初期状態をプローブ光とポンプ光 E_2 によって色素薄膜上にホログラムとして記録し、その後3つの光 (E_1 , E_2 とプローブ光) を照射して縮退4波混合成分とホログラフィ成分を干渉させる。コントラストの良い干渉パターンを得るためには、2つの成分をできるだけ等しくすることが望ましい。そこで、ホログラム記録が時間とともに発達する様子を知る必要がある。このため、プローブ光とポンプ光 E_2 で記録しながら、5秒周期で0.5秒間だけもう一方のポンプ光 E_1 を照射してホログラムを読み出し、ホログラム記録の時間変化を測定した。図-4の実験結果から、エオシンY、エリトロシンB、フルオレセインとともに、時間とともにホログラム記録は発達し、それぞれ、50、40、30秒程度で最大をむかえた後、減衰していくことがわかる。

ホログラム記録後の縮退4波混合とホログラフィ成分の割合を調べるため、ホログラム記録が最大になる時間までプローブ光とポンプ光 E_2 を照射した後、図-3の結果を得たのと同じ手続きでこれら2つの成分を測定した。図-5から明らかのように、2つの成分をできるだけ等しくすることと、色素薄膜の光退色による寿命を考慮すると、エオシンYを含むゼラチン膜が位相共役鏡としては最も適していることがわかる。

色素薄膜を用いた位相共役干渉法

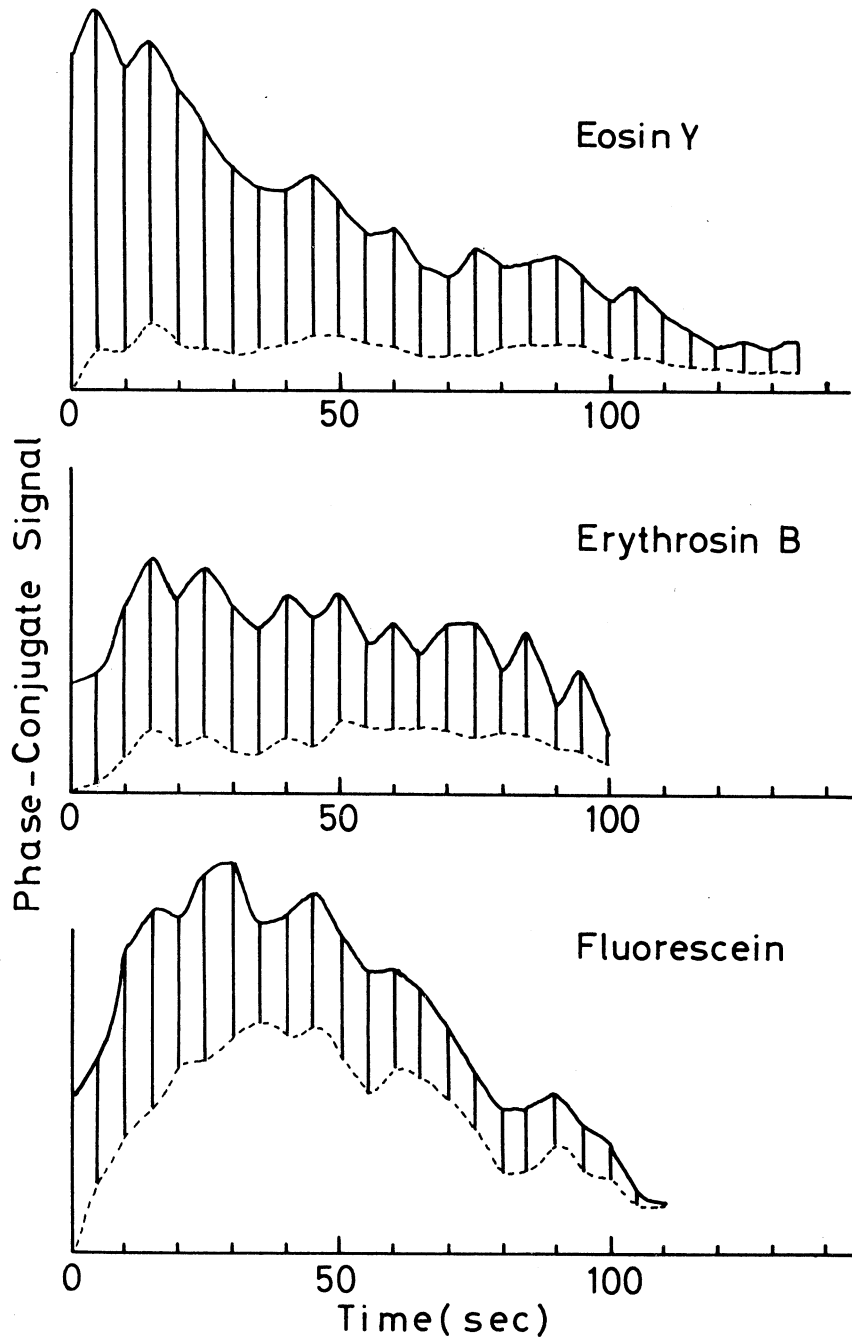


図3 2種類の位相共役波（縮退4波混合成分とホログラフィ成分）の時間変化

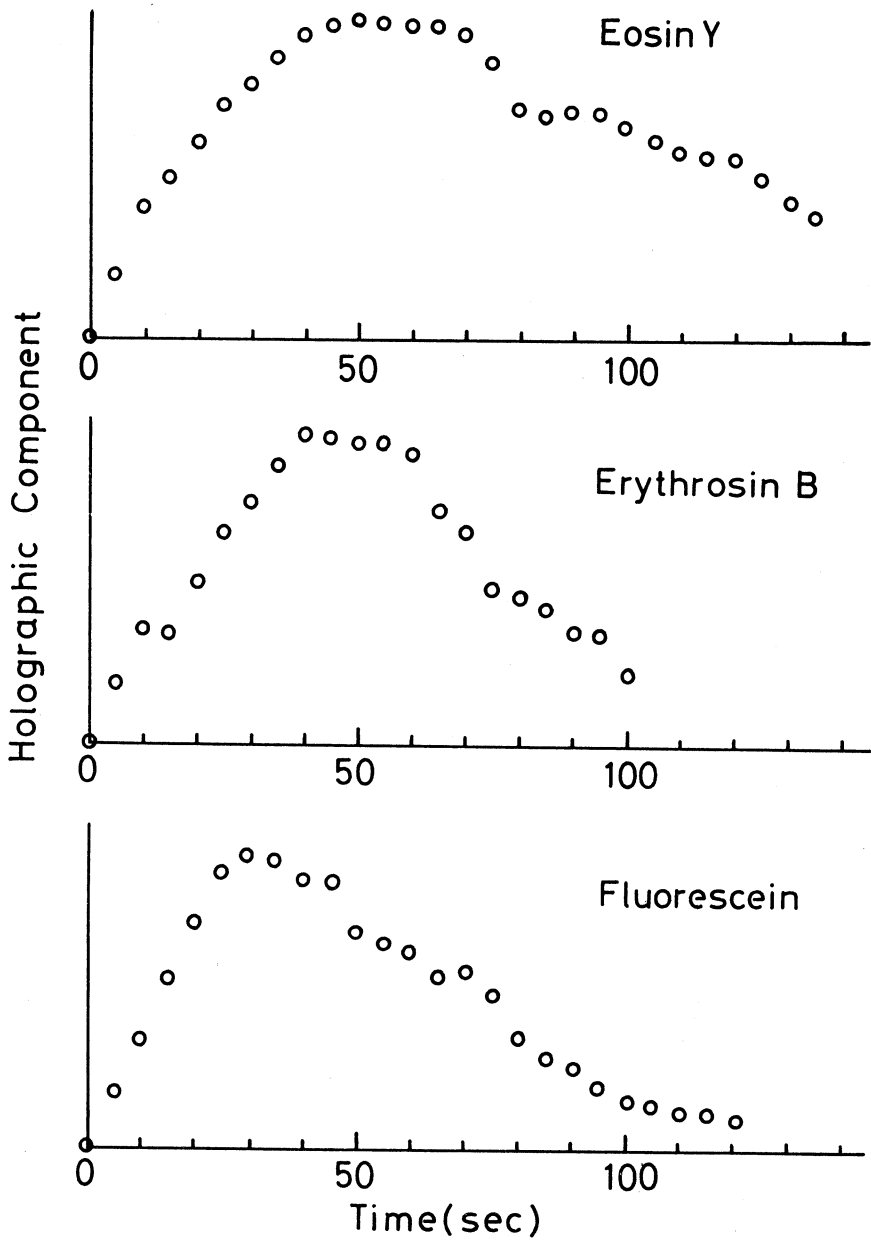


図4 ホログラフィ成分の時間変化

色素薄膜を用いた位相共役干渉法

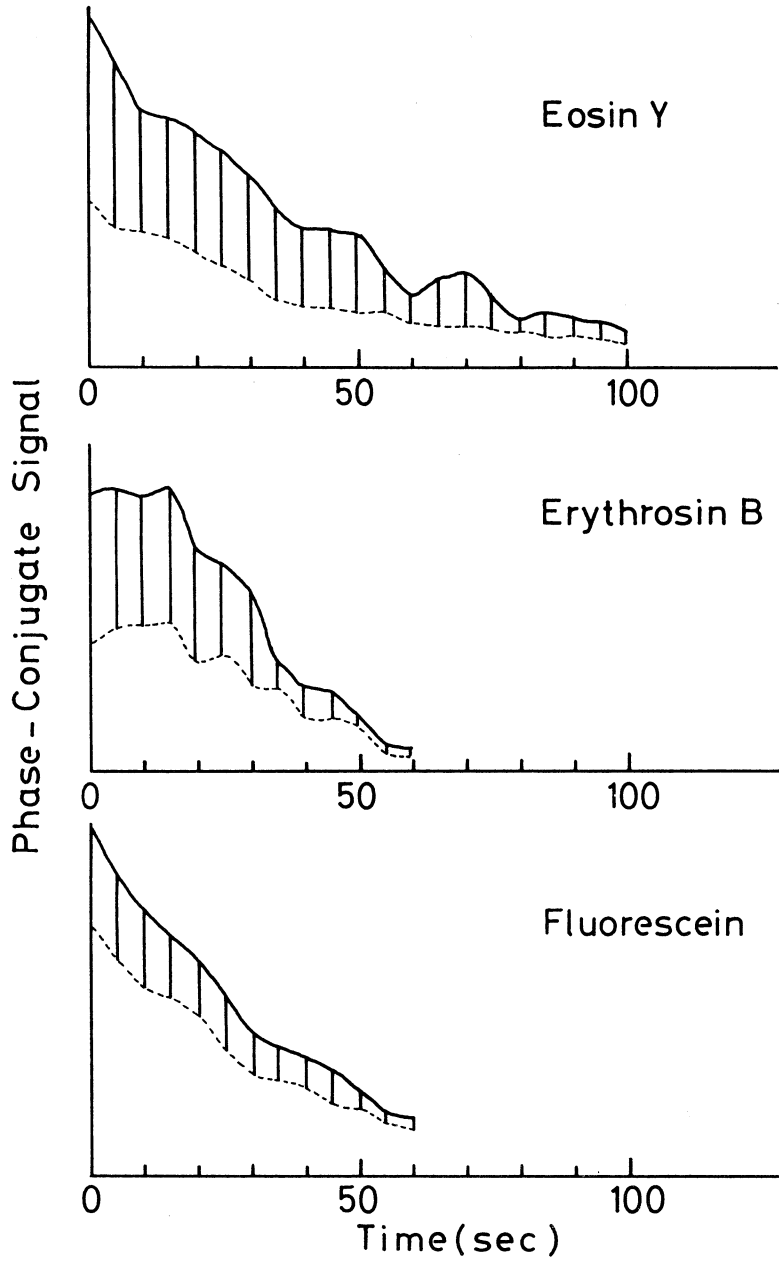


図5 ホログラム記録後の2種類の位相共役波（縮退4波混合成分とホログラフィ成分）の時間変化

4. 位相共役干渉の原理

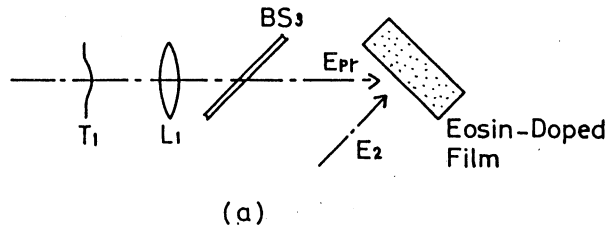
位相共役干渉の原理を図-6に示す。簡単のため、物体は透過物体とする。レンズ L_1 は物体波を色素膜上のポンプ光照射領域に集めるために用いられ、レンズ L_2 は結像のために、半透鏡 BS_3 に関して L_1 と対称的な位置に置かれる。位相共役波の性質上、レンズ L_1 と L_2 は本質的には必要ない。位相共役干渉は次に述べるような2段階の手続きを経て行なわれる。

第一段階では、物体の初期状態のホログラム記録を行なう。物体の複素振幅情報 T_1 を含むプローブ光（これが物体波である）とポンプ光 E_2 の干渉パターンを色素薄膜上に記録して透過型の体積ホログラム¹²⁾とする。このホログラムにポンプ光 E_1 を照射して読み出すと、像面に波面 T^*_1 が生じる。

第二段階は、第一段階で記録したホログラムの再生と、縮退4波混合による物体の位相共役波の発生を同時に行う。2つの段階の間で、物体の複素振幅が T_1 から T_2 に変化するか、または、別な物体 T_2 に置き換えられたとする。第二段階では、 T_2 に関する情報をもつプローブ光と2つのポンプ光を、第一段階と同じ色素薄膜上に同時に照射する。その結果、色素薄膜は、速い応答の縮退4波混合成分とすでに記録されたホログラフィ成分の2つの位相共役波を同時に発生する。この段階で、ポンプ

光 E_1 は、縮退4波混合過程のポンプ光の役目だけでなく、第一段階で記録されたホログラムの読み出し光としての役目も果たす。この結果、 T^*_1 と T^*_2 の干渉パターン $|T^*_1 + T^*_2|^2$ が像面で観察される。 T_2 が時間とともに変化する場合には、実時間で T_1 から T_2 の位相変化分を観察することができるので、実時間位相共役干渉と呼ばれる。

1st Step: Hologram-Recording



2nd Step: Real-Time Interferometry

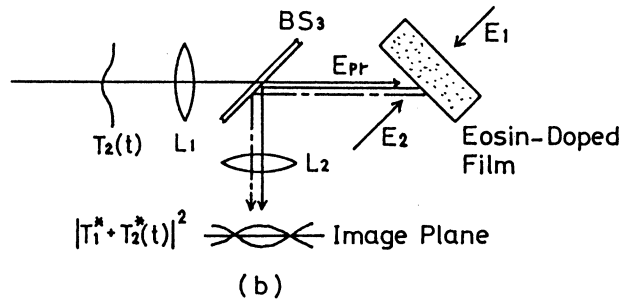


図6 位相共役干渉の原理

5. 実時間および二重露光位相共役干渉

エオシン Y を含むゼラチン膜が位相共役干渉において位相共役鏡として有効であることを実験で示す。そのためにまず、実時間位相共役干渉の実験例を示す。第一段階では、空のガラスセル（振幅透過率を T_1 とする）のホログラムをエオシン膜上に記録する。第二段階では、ガラスセル中に温水を注ぎ、エオシン膜から同時に発生した空のガラスセル (T_1) と温水を注いだガ

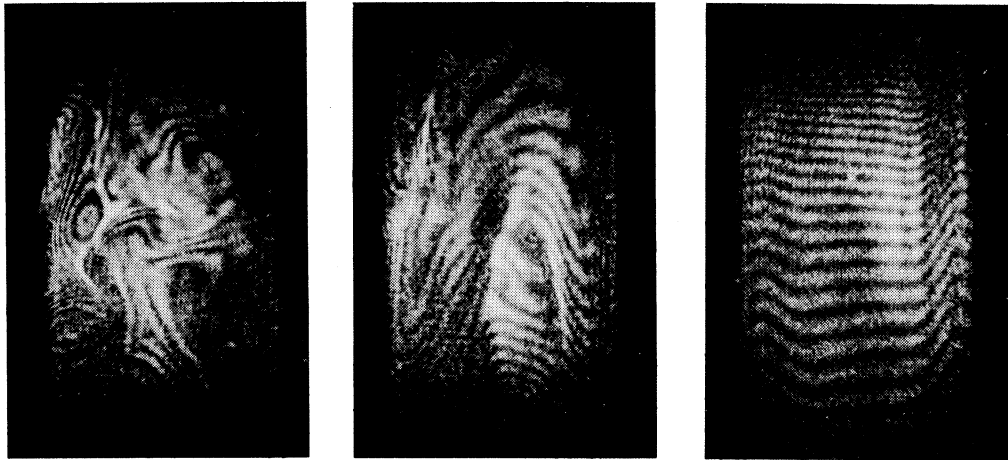


図7 ガラスセルに温水を注いだときの実時間位相共役干渉パターン

ラスセル (T_2) の情報をもつ 2 つの位相共役波（ホログラフィ成分と縮退 4 波混合成分）を像面で重ね合わせる。ホログラフィ成分 (T_1^*) と縮退 4 波混合成分 (T_2^*) の間の干渉パターン $|T_1^* + T_2^*|^2$ を図-7 に示す。これらの干渉パターンの写真は左から右に、ガラスセルに温水を注いだ後 1, 5, 10 秒後に撮影したものである。これらの写真から、ガラスセル内の各点で屈

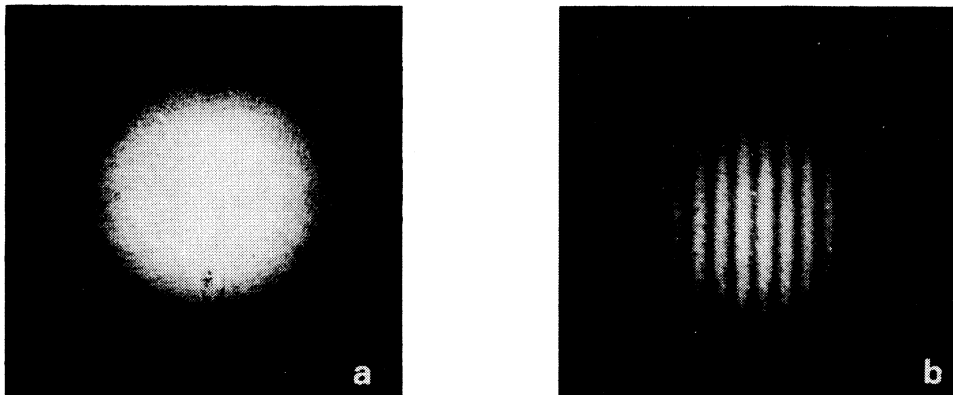


図8 レンズを横ずらししたときの二重露光位相共役干渉パターン

折率が時間とともに変化して、しだいに一様になっていくのがわかる。

つぎに、二重露光位相共役干渉の実験例を示す。焦点距離300cmの平凸レンズの中心部分を透過物体として用いた。第一段階と第二段階の間で、レンズをわずかに横ずらしさせた。図-8aは第一段階で記録された像の位相共役像であり、図-8bは縮退4波混合とホログラフィ成分の干渉パターンである。予想されるように、レンズからの波面は球面なので、等間隔の干渉縞がレンズをずらした方向に垂直に生じている。

6. ま と め

キサnten系色素を含むゼラチン膜により、縮退4波混合成分とホログラフィ成分による位相共役波を同時に又は別々に発生させることができた。また、実時間および二重露光位相共役干渉には、エオシンYを含むゼラチン膜が適していることが確かめられた。

これまで、多くのホログラフィ記録材料が開発されてきた¹³⁾。しかし、1つの材料で同時に異なる機構により速い応答と遅い応答を示す位相共役波を発生する材料は見当らない。この点からも、エオシンYを含むゼラチン膜は新しいタイプの光学材料と考えられる。さらに、エオシン膜は、現像が化学処理を必要とせず光照射によってなされること、大きな面積の試料が容易に得られること、などの利点をもっている。しかし、位相共役波の発生効率は低く、退色し易いなどの欠点をもっている。光に対する堅牢性はアゾ色素を使うと改良される¹⁴⁾。さらに高い発生効率をもつ材料の探索が望まれる。

参考文献

- 1) B. Ya. Zel'dovich, N. F. Pilipetsky and V. V. Shkunov: Principles of Phase Conjugation (Springer-Verlag 1985)
- 2) D. M. Pepper: Laser Handbook p.333 (Elsevier Science Publisher B. V. 1985)
- 3) Y. Fainman, E. Lenz and J. Shamir: Appl. Opt. **20**, 158 (1981)
- 4) N. G. Basov, I. G. Zubarev, A. B. Mironov, S. I. Mikhalov and A. Yu. Okuliv: Sov. Phys. JETP **52**, 847 (1980)
- 5) P. V. Avizonis, F. A. Hopf, W. D. Bomberger, S. F. Jacobs, A. Tomita and K. H. Womack: Appl. Phys. Lett. **31**, 435 (1977)
- 6) J. P. Huignard, J. P. Herriau and T. Valentin: Appl. Opt. **16**, 2796 (1977)
- 7) I. Bar-Joseph, A. Hardy, Y. Katzir and Y. Silberberg: Opt. Lett. **6**, 414 (1981)
- 8) O. Ikeda, T. Suzuki and T. Sato: Appl. Opt. **21**, 4468 (1982)
- 9) J. Feinberg: Opt. Lett. **8**, 569 (1983)
- 10) N. Tan-no, K. Kawachi and K. Yokoto: J. Opt. Soc. Am. **B3**, 60 (1986)
- 11) H. Fujiwara and K. Nakagawa: Optics Comm. **55**, 386 (1985)
- 12) H. Kogelnik: Bell Syst. Tech. J. **48**, 2909 (1969)
- 13) H. M. Smith: Holographic Recording Materials (Springer-Verlag 1977)
- 14) H. Fujiwara and K. Nakagawa: Optics Comm. **66**, 307 (1988) in press

有機色素含有薄膜光導波路における位相共役波の発生

宮 永 滋 己・山 林 智 明*・村 山 勝 宏**・藤 原 裕 文

Generation of a phase-conjugate wave in a saturable-dye-doped planar waveguide

SHIGEKI MIYANAGA, TOMOAKI YAMABAYASHI, KATSUHIRO MURAYAMA, HIROFUMI FUJIWARA

Abstract

A phase-conjugate wave (PCW) by degenerate four-wave mixing (DFWM) in a nonlinear-optical waveguide was observed with a Ar-ion laser. The planar waveguide consists of a transparent poly-vinyl alcohol (PVA) layer partly doped with erythrosin B. The DFWM excitation was performed as follows: two pump waves impinging in the interaction region of the waveguide from the outside and a probe wave was introduced into the guiding layer by a prism coupler. The PCW reflectivity of 6.3×10^{-5} outside the prism coupler was obtained at a pump intensity of 1.2 W/cm^2 in the PVA film having a thickness of about $80 \mu\text{m}$ and the product of a small-signal absorption coefficient and the film thickness of 0.97; the probe intensity was chosen to be 0.2 of the pump intensity. If the prism-outcoupling efficiency is assumed to be 100 percent, this corresponds to the PCW reflectivity of 4.2×10^{-4} inside the waveguide by taking into consideration the prism-coupling efficiency of 15 percent.

1. ま え が き

位相共役波は、入射した光の波面を光の進行方向に対して反転した波面をもつ波であり、実時間ホログラフィー、波面歪の補正、光画像処理、光フィルタリング、パルス波形整形、光コンピューティング、光双安定など多くの分野に応用できる可能性があり、近年盛んに研究されるようになってきた^{1),2)}。位相共役波の発生は、種々の非線形光学効果に基づいており、誘導ブリルアン散乱、誘導ラマン散乱、3光波混合、4光波混合（4光波の周波数が等しいとき、特に縮退4光波混合という）などを用いて行なわれている^{1),2)}。これらのうち、縮退4光波混合による方法³⁾は、広い視野にわたって位相整合条件が満たされるなど応用上非常に有利な特性をもっている。非線形媒質としては、種々の気体、液体、固体が用いられているが、これらのうち、エオシンY、エリトロシンBなどの有機色素を、ゼラチン、ポリメタクリル酸メチル（PMMA）などの高分子に分散させた薄膜試料（膜厚数 $10\mu\text{m}$ ）において、有機色素の飽和吸収にともなう非線形性を利用

* 日立北海セミコンダクター（前応用物性学専攻）

** 富士電機㈱（前応用物性学科）

した縮退4光波混合による位相共役波の研究が行なわれている⁴⁾⁻⁶⁾。エオシン Y, エリトロシン B などの色素は, 比較的低い飽和強度 ($\sim 1 \text{ W/cm}^2$) をもつため, これらの研究では, 連続発振 Ar イオンレーザーを用いて, 比較的低い入射光強度で位相共役波が観測されているが, 4光波の相互作用は薄膜試料の厚さ方向で行なわれているため, 相互作用長は膜厚の程度 (数 $10 \mu\text{m}$) に制限されている。

光導波路は, 導波層より屈折率の低い媒質で導波層を囲むことによって, 全反射により光を導波層に閉じ込めて伝搬させるもので, その構造によって光ファイバーや薄膜光導波路などに分類される。一般に光導波路においては, 1) 光閉じ込め効果により導波路内部で光強度が高くなる, 2) モード分散を利用して位相整合がとれる, 3) 光が導波層に沿って伝搬するため, 相互作用を導波路に沿って行なうことにより相互作用長が大きくとれる, など非線形光学現象の観測に有利となるいくつかの特徴をもっている。光導波路構造を縮退4光波混合系に利用すると, 上記の特徴をいかした高効率な位相共役波の発生を実現できる可能性がある。さらに, 近年発展してきた光集積回路技術と結びつけることにより, 光信号のみによる小型の光情報処理システムを構成できる可能性がある。

これまで, 光ファイバー^{7),8)}や薄膜光導波路^{9),10)}を用いて縮退4光波混合による位相共役波の発生が報告されている。CS₂を導波層に満たした3m長の光ファイバーを用いた実験⁸⁾においては, 連続発振 Ar イオンレーザーを用いて0.45%の発生効率を得られているが, CS₂で覆った薄膜ガラス導波路⁹⁾や Cd S_x Se_{1-x} をドープした薄膜ガラス導波路¹⁰⁾を用いた実験では, 位相共役波を効率的に発生させるためには, 1 MW/cm^2 程度の光強度が得られる高出力のパルス発振レーザーが用いられていた。

本研究では, 色素の飽和強度が低いこと, 光導波路において相互作用長が大きくとれること, などに注目し, エリトロシン B をポリビニールアルコール (PVA) に分散させた薄膜光導波路において, 1 W/cm^2 程度の光強度が得られる連続発振 Ar イオンレーザーを用い, 縮退4光波混合により位相共役波を発生させる実験を行なった。縮退4光波混合においては, 2つの対向するポンプ光は導波路の外部から導波路に垂直に相互作用領域に入射させ, プローブ光はプリズムカップラーを用いて導波光として相互作用領域まで伝搬させた。

2. 色素含有薄膜光導波路の作成

本実験で用いた色素は, 図-1のような分子構造をもつキサンテン系色素のエリトロシン B であり, 可視光域で強い光吸収を起こす。縮退4光波混合における相互作用は, 色素の飽和吸収に基づいている。4光波のうち入射光となるプローブ光およびプローブ光と逆方向に発生する位相共役波は導波路に沿って伝搬するため, 相互作用領域に達するまでのプローブ光の伝搬および相互作用領域で発生した位相共役波の伝搬は吸収を受けないことが不可欠となる。このプローブ

光および位相共役波の吸収を避けるため、本実験では、色素を分散させた領域を透明な PVA 薄膜の一部に作成した。以下、薄膜試料の作成法について説明する。まず、透明な PVA 溶液を洗浄したガラス基板上に滴下し、薄く一様に伸ばしながら余分な溶液を流し落とす。この PVA 膜上に、エリトロシン B を分散させた PVA 溶液を少量滴下し約 40℃ で乾燥させる。色素を分散させた領域は拡散して広がり、乾燥後図-2 に示すような部分的にエリトロシン B を分散させた PVA 薄膜ができた。

作成した PVA 薄膜のエリトロシン B を分散させた領域における典型的な分光透過率特性を図-3 に示す。飽和吸収にともなう非線形性を利用する上で、飽和光強度を低くするという観点からは、吸収のピーク付近を用いる方が有利なので、本実験では、光源として連続発振 Ar イオンレーザーの波長 514.5nm の発振線を用いた。

本実験で使用した PVA 薄膜は、光導波路としては多モード光導波路である。光導波路においては、通常導波層 (PVA 薄膜) の厚さ、膜厚は、プリズムカップラー法¹¹⁾を用いて 1 μm 以下の精度で測定できるが、本実験で使用した薄膜では、膜厚が大き

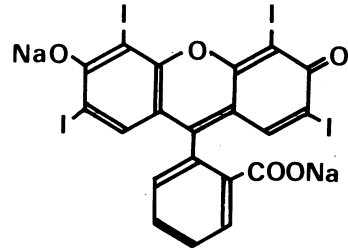


図-1 エリトロシン B の分子構造

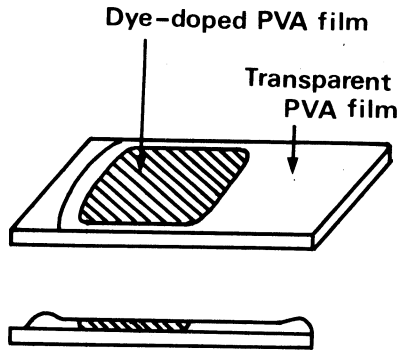


図-2 部分的に色素を分散させた PVA 薄膜

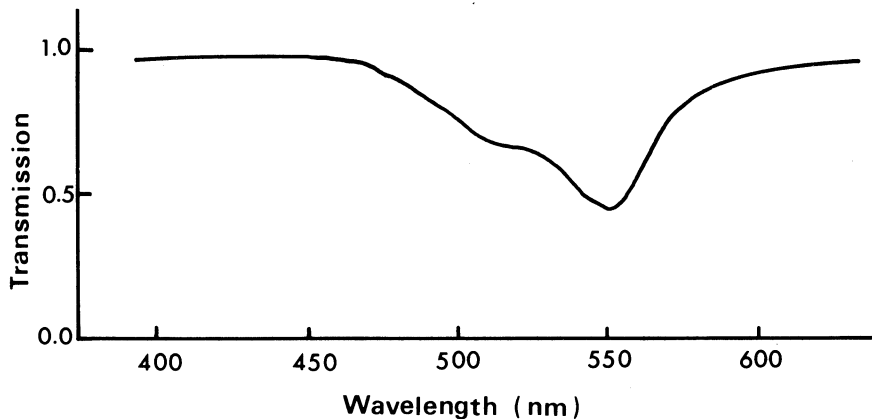


図-3 エリトロシン B を分散させた PVA 薄膜の典型的な分光透過率特性

すぎてこの方法は適用できなかった。マイクロメーターによる測定では、膜厚は約 $80\mu\text{m}$ であった。また、エリトロシン B を分散させた領域での、波長 514.5nm における吸収係数と膜厚の積は 0.97 であった。

3. 実験装置

光導波路を用いる縮退 4 光波混合の光学系を図-4(a), (b)に示す。

Ar イオンレーザーからの光ビームを、ビームスプリッター bs_1 によってポンプ光とプローブ光の 2 つのビームに分ける。ポンプ光ビームを、ビームスプリッター bs_2 によってさらに等しいパワーの 2 つのビームに分け、反射鏡 m によって互いに対向して伝搬する 2 つのポンプ光とする。一方、プローブ光ビームは、レンズ l で絞り、ビームスプリッター bs_3 、反射鏡 m を通して、プリズムカップラー C に入射させる。ポンプ光とプローブ光の相互作用領域では、図-4(b)に示すように、対向して伝搬する 2 つのポンプ光は PVA 薄膜光導波路の外部から薄膜にほぼ垂直に入射し、プローブ光はプリズムカップラー C によって導波路内に導波され、相互作用領域まで伝搬する。2 つのポンプ光とプローブ光の光路長は、3 つの波が相互作用領域で互いにコヒーレントに相互作用するように、Ar イオンレーザーのコヒーレンス長以内で一致するように調整す

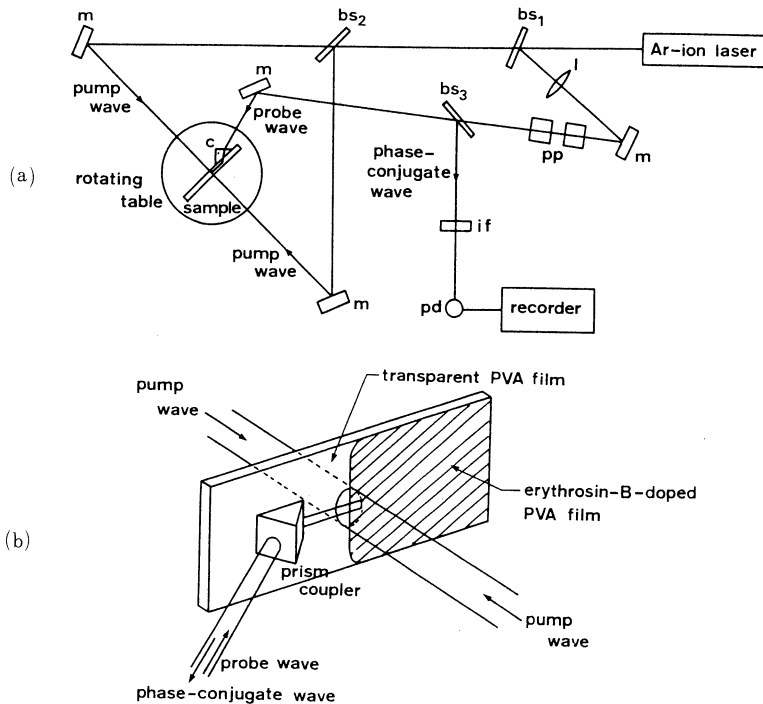


図-4 (a)光導波路を用いた縮退 4 光波混合の光学系と(b)相互作用系。 $bs_1 \sim bs_3$ はビームスプリッター、 m は反射鏡、 l はレンズ、 pp は偏光プリズム、 if は干渉フィルター、 pd は光検出器、 c はプリズムカップラーである。

る。縮退4光波混合によって発生した位相共役波は、プローブ光と反対方向に導波光として導波路内を伝搬し、プリズムカップラーCを通して出射する。さらに反射鏡m、ビームスプリッターbs₃で反射され、干渉フィルターifを通して光検出器pdで検出される。光検出器pdの出力をレコーダーで記録する。

偏光プリズムppは、プリズムカップラーCへのプローブ光の入射パワーを調節すると同時に、プローブ光の偏光方向をポンプ光と等しくするために用いる。すべての波は紙面に垂直な偏光をもつように調整されているので、プローブ光および位相共役波は、TEモードとして導波路内を伝搬する。PVA薄膜光導波路試料は、回転台に取り付けたX-Y微動台に装着され、回転台を回転させることによって、プリズムカップラーCへのプローブ光の入射角を導波路の導波モードの入射角に合うように調整する。

4. 位相共役波の発生

透明なPVA薄膜光導波路中を伝搬する導波光は、導波路表面の凹凸によって散乱され、その一部は導波路外部に放射され、一方、エリトロシンBを分散させた領域では、導波光によって励起されたエリトロシンBが発する蛍光の一部が導波路外部に放射される。したがって、部分的にエリトロシンBを分散させたPVA薄膜光導波路中を伝搬するプローブ光の様子は、これらの散乱光や蛍光によって目で観察することができ、導波路に沿ってビーム状に伝搬していく様子が確認できる。透明な領域を伝搬したプローブ光は、エリトロシンBを分散させた領域に到達すると、エリトロシンBがArイオンレーザー光の波長で強い吸収をもつため、1mm程度伝搬して目で見えなくなる程度に減衰した。ポンプ光ビームの直径は約6mmで、導波路を伝搬するプローブ光のビーム幅は約1mmであったので、ポンプ光は、図-4(b)のように、エリトロシンBを分散させた領域の境界付近の、プローブ光による蛍光を発している部分を照射するように調整した。したがって、相互作用はポンプ光の照射領域で行なわれる。プリズムカップラー用のプリズムは、頂角45°の2等辺3角柱プリズムを用いている。直角のコーナーを用いたプリズムカップラーの配置では、直角コーナーでのプローブ光の反射光や散乱光が位相共役波と同じ方向に戻り、強い背景雑音光となるため、位相共役波の発生は確認できなかったが、プリズムカップラーを図-4(b)のように45°の頂角を用いた配置にすることにより、背景雑音光をかなり減少させることができた。プリズムカップラーの入射結合効率は約15%であった。

プリズムカップラーから出射した位相共役波は、図-4(a)の光検出器pdの代りにアイピースを置くことにより、目ではっきり確認することができた。主な背景雑音光は、プリズムのコーナーで発生する弱い反射、散乱光と、プローブ光とポンプ光によって励起されたエリトロシンBの蛍光の一部が、導波モードとして伝搬してプリズムカップラーから出射する蛍光成分である。これらの背景雑音光は、プローブ光と位相共役波の伝搬経路に適当に開口を置いたり、波長

514.5nm の干渉フィルターを挿入することによって除去した。位相共役波には、ポンプ光とプローブ光の3つの波が同時に相互作用したときのみ速い応答時間（色素の場合はりん光寿命の程度）で発生する4光波成分と、ポンプ光の一方とプローブ光でできる干渉じまが何らかの原因で媒質中に回折格子として記録され、それによってもう一方のポンプ光がブラック回折されるために発生するホログラフィー成分がある⁵⁾。4光波成分の位相共役波は、3つの光のどれか1つでも遮断すると発生しなくなるが、ホログラフィー成分は、どれか1つを遮断しても、回折格子が記録されている間は発生する。本実験で観測された位相共役波は、ポンプ光、プローブ光のうちどれか1つを遮断するか、あるいは、試料を装着した回転台を回転させて、プローブ光の入射角を導波モードに対応する入射角からずらすことによって発生しなくなった。前者の場合には、ど

れか1つの光を遮断した後に弱いホログラフィー成分が観測されたが、後者の場合は、すべての位相共役波が発生しなくなった。これは、回転台を回転した場合には、試料に対するポンプ光の入射角が、記録されている回折格子のブラック条件からはずれるためであると考えられる。以上のことから、観測された出射光が位相共役波であることが確認できた。

図-5は、ポンプ光強度 I_p に対する位相共役波の発生効率（反射率） R の変化を示したものである。ここで、発生効率 R は、プリズムカップラーから出射した位相共役波の全ビームパワーとプリズムカップラーに入射したプローブ光の全ビームパワーの比で定義している。位相共役波の全ビームパワーは、ポンプ光の一方を遮断したときのレコーダー出力の低下から測定

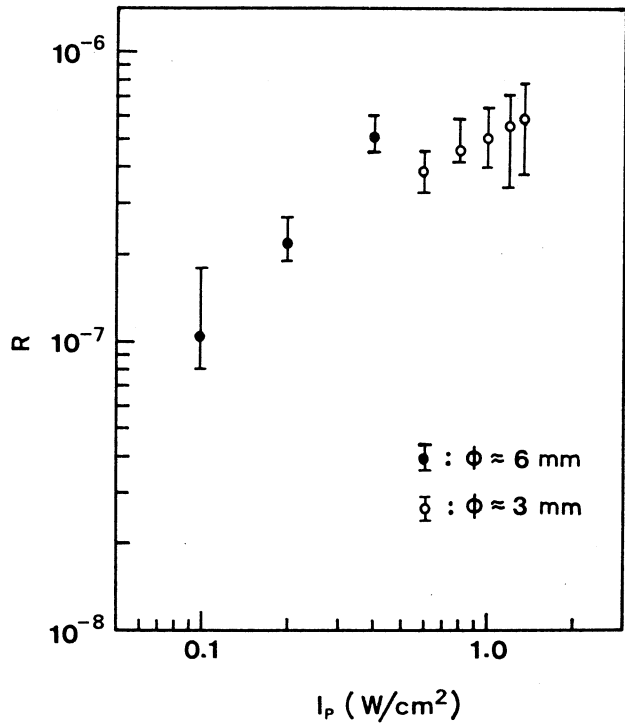


図-5 ポンプ光強度 I_p に対する位相共役波の発生効率 R の変化。黒丸はポンプ光ビーム径 ϕ が約 6 mm、白丸は約 3 mm のときの実験値。

した。図-5の実験では、図-4(a)のビームスプリッター $bs_1 \sim bs_3$ はすべて1対1の分割比のものを用いているが、本実験で使用した Ar イオンレーザーの出力では、ポンプ光ビーム径 ϕ を $\phi \approx 6 \text{ mm}$ 程度に広げると、ポンプ光強度は 0.4 W/cm^2 程度であった(図-5黒丸の実験値)。発生効率 R は、ほぼポンプ光強度に比例して増加しており、 $I_p = 0.4 \text{ W/cm}^2$ で $R = 5.0 \times 10^{-7}$ の発生効率が得られた。そこで、ポンプ光強度を高くするため、ポンプ光ビームをレンズで絞ってビーム径を $\phi \approx 3 \text{ mm}$ 程度にして実験を行なったが(図-5白丸の実験値)、発生効率はむしろ減少し、ポンプ光強度に対する増加率も小さくなった。これは、プローブ光ビーム幅が約 1 mm であるため、ポンプ光ビーム径を 3 mm 程度に絞ると、ポンプ光強度のガウス分布の影響がでるためと考えられる。3つの光の相互作用の強さは、相互作用領域における3つの光の振幅の重なり積分に依存するため、ポンプ光がガウス分布をもつと、相対的に相互作用が低下したのと同じ効果が生じる。位相共役波の発生効率は、 $I_p = 1.3 \text{ W/cm}^2$ で 6.0×10^{-7} が得られた。

ポンプ光とプローブ光の強度比は、位相共役波の発生効率に影響する。導波路構造を利用しない縮退4光波混合の理論的な検討においては、プローブ光強度がポンプ光強度より大きくなると発生効率は減少することが示されている¹²⁾。図-5の実験においては、光導波路の閉じ込め効果を考慮すると、ビーム径が $\phi \approx 6 \text{ mm}$ の場合でプローブ光強度はポンプ光強度の約4倍となっている。そこで、図-4(a)のビームスプリッター bs_1 を反射率-透過率比が1対16のビームスプリッターとし、プローブ光強度がポンプ光強度の0.2倍程度になるように調整し

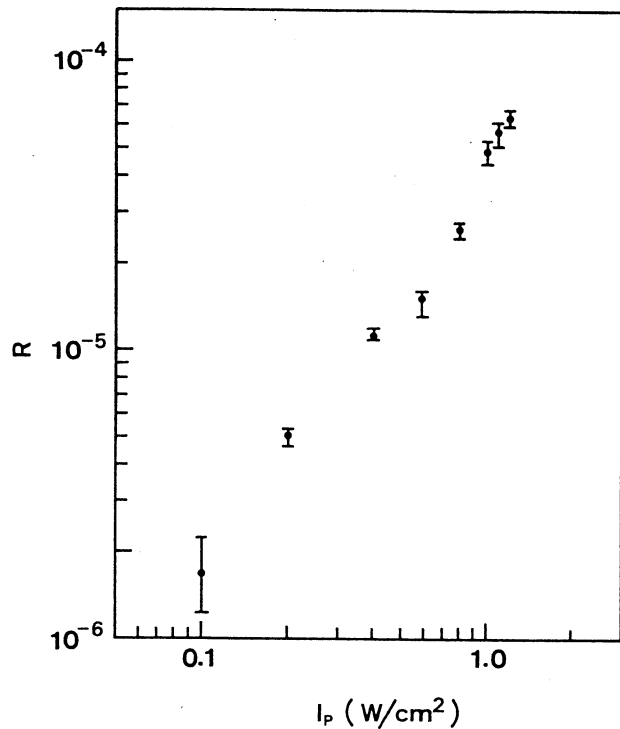


図-6 プローブ光とポンプ光の強度比を0.2としたときの、ポンプ光強度 I_p に対する位相共役波の発生効率 R の変化。

て実験を行なった。結果を図-6に示す。図-5と比較すると、発生効率は1桁以上大きくなっていることがわかる。発生効率は、ポンプ光強度のほぼ3/2乗に比例して増加しており、 $I_p = 1.2 \text{ W/cm}^2$ で $R = 6.3 \times 10^{-5}$ の発生効率が得られた。プリズムカップラーの入射結合効率が15%であることを考慮すると、導波路の内部では発生効率はさらに大きくなっていると考えられる。一般に、プリズムカップラーの結合効率は、入射結合効率より出射結合効率の方が高いので、出射結合効率を100%と仮定すると、導波路外部で $R = 6.3 \times 10^{-5}$ は、導波路内部では $R = 4.2 \times 10^{-4}$ の発生効率に相当する。

可飽和吸収媒質を用いた縮退4光波混合においては、位相共役波の発生効率は、ポンプ光強度が媒質の飽和強度の付近で最大値をとることが理論的¹³⁾、実験的¹⁴⁾に示されている。エリトロシンBの飽和強度は約 2 W/cm^2 であるが、本実験では、ポンプ光強度は 1.2 W/cm^2 までしかとれなかった。したがって、より高出力の Ar イオンレーザーを用いれば、位相共役波の発生効率はさらに増加すると考えられる。

5. ま と め

本報告では、部分的にエリトロシンBを分散させたPVA薄膜からなる非線形薄膜光導波路において、縮退4光波混合による位相共役波発生の実験結果について述べた。これまで報告された薄膜光導波路を用いた縮退4光波混合による位相共役波の発生実験^{9),10)}では、 1 MW/cm^2 程度の光強度が得られる高出力パルス発振レーザーが用いられていたが、本実験では、比較的低出力の連続発振 Ar イオンレーザーを用いて位相共役波を発生させることができた。縮退4光波混合過程においては、対向して伝搬する2つのポンプ光は、相互作用領域を導波路外部から照射し、プローブ光を、結合効率15%のプリズムカップラーを用いて導波路内に入射させ、相互作用領域まで導波光として伝搬させた。プローブ光とポンプ光の光強度比を0.2に調整した実験において、ポンプ光強度 1.2 W/cm^2 で最大 6.3×10^{-5} の位相共役波発生効率が得られた。プリズムカップラーの出射結合効率を100%と仮定し、入射結合効率15%を考慮すると、この値は導波路内部では、 4.2×10^{-4} の発生効率に相当する。より高出力の Ar イオンレーザーを用いること、および相互作用長を大きくして色素濃度などに対する最適条件を検討することなどにより、位相共役波の発生効率はさらに改善することができるであろう。

References

- 1) T. R. O'Meara, D. M. Pepper and J. O. White: Optical Phase Conjugation Chap. 14 (R. A. Fisher ed., Academic, New York, 1983).
- 2) D. M. Pepper: Laser Handbook Vol. 4, Chap. 4 (M. L. Stitch and M. Bass eds., North-Holland, Amsterdam, 1985).
- 3) R. W. Hellwarth: J. Opt. Soc. Am. 67, 1 (1977).

有機色素含有薄膜光導波路における位相共役波の発生

- 4) Y. Silberberg and I. Bar-Joseph: *Optics Comm.* 39, 265 (1981).
- 5) H. Fujiwara and K. Nakagawa: *Optics Comm.* 55, 386 (1985).
- 6) H. Fujiwara and K. Nakagawa: *Optics Comm.* (1988) in press.
- 7) S. M. Jensen and R. W. Hellwarth: *Appl. Phys. Lett.* 35, 404 (1978).
- 8) J. AuYeung, D. Fekete, D. M. Pepper, A. Yariv and R. K. Jain: *Opt. Lett.* 4, 42 (1979).
- 9) C. Karaguleff, G. I. Stegeman, R. Fortenberry, R. Zanoni and C. T. Seaton: *Appl. Phys. Lett.* 46, 621 (1985).
- 10) A. Gabel, K. W. DeLong, C. T. Seaton and G. I. Stegeman: *Appl. Phys. Lett.* 51, 1682 (1987).
- 11) R. Ulrich and R. Torge: *Appl. Opt.* 12, 2901 (1973).
- 12) W. P. Brown: *J. Opt. Soc. Am.* 73, 629 (1983).
- 13) R. L. Abrams and R. C. Lind: *Opt. Lett.* 2, 94; 3, 205 (1978).
- 14) H. Fujiwara and K. Nakagawa: *J. Opt. Am. Soc. B* 4, 121 (1987).

スペクトラム拡散通信方式による電燈線データ伝送に関する研究

一 柳 和 弘・黒 島 利 一・杉 岡 一 郎・秋 山 稔

Application of Spread Spectrum Communication to Data Transmission over Electric Power Distribution Line

Kazuhiro ICHIYANAGI, Toshikazu KUROSHIMA, Ichiro SUGIOKA and Shigeshi AKIYAMA

Abstract

In the construction of a home information system, a electric power distribution line is attracted special interest for the data transmission line. Advantages of the power distribution line are reasonably universal coverage and easy access via a standard wall plug. But, as the data transmission line, its disadvantages are 1) limited communication bandwidth and signal voltage level, 2) relatively high levels of electric noise and impedance fluctuations, and so on.

On the other hand, the spread spectrum communication has some remarkable features against the electric noise and the interference. Therefore, the spread spectrum communication is expected to apply the data transmission technique for the home information system passing through the power distributed line.

This paper describes on a experimental system for analog signals transmission which is applied some ideas of the spread spectrum communication via the power distribution line. In conclusion, from results of the transmission test using its system, we found that the suppressed clock pulse duration modulation technique is useful for the primary modulation in the case of analog signal transmission over the power distribution line applying the spread spectrum communication technique.

1. はじめに

情報化社会の到来により、家庭内においても、照明あるいはエアコン等の遠隔制御や、火災、ガス漏れ、防犯等のモニターなどを行なう HA (ホームオートメーション) に対する要求が高まってきている。このような HA においては通信伝送路の設置が容易で安価な方式が要求される。そこで、近年、電燈線を伝送路とした通信が注目され始めている。

電燈線は100V 商用電源配電用として既に家屋内に敷設されており、コンセントにプラグを差し込むだけで通信システムを構築できる可能性がある。しかしながら、電燈線は信号の伝送用に敷設されていないため、電気機器からの雑音が大きく、インピーダンスの変動が大きい等の理由によって、伝送路としての特性には問題がある。したがって、電燈線を伝送路として用いるためには、伝送方法から検討する必要がある。

一方、スペクトラム拡散 (Spread Spectrum : 以下 SS と記す) 通信方式¹⁾⁻⁷⁾ は、通信路における雑音や狭帯域の干渉に対して強く、電力スペクトラム密度が低いので他の通信装置に妨害を与えにくいという特徴を持っており、電燈線伝送への応用が期待できる通信方式である。

本研究は、HA の基礎的なアプローチとして、SS 通信方式による電燈線伝送装置の設計、製作及び電燈線伝送の実験を行ない、その可能性と問題点などの検討に関するものである。

2. 電燈線伝送^{8),9)}

2.1 使用する周波数と送信器の出力

電燈線伝送は電燈線に高周波電流を流すものであるから、その電界は電燈線の周辺に広く分布していることが予想され、もし使う周波数や送信機の出力に制限がなければ、電燈線の近くの通信機器に著しい妨害を与えるだけでなく、近くに存在する公共の通信施設にも障害を与える可能性がある。そのため使用周波数および送信設備出力はそれぞれ、10K~450KHz および10dbm 以下と電波法規で定められている。なお、周波数10K~450KHz の帯域を、放送周波数帯域535K~1605KHz に対応して電燈線搬送周波数帯域といい、またその中の特定の波を電燈線搬送波という。

2.2 電燈線の伝送特性

電燈線を通信伝送路に用いた場合に、以下のような問題点が考えられる。

第一に、電燈線は多くの分岐を持ち、負荷となる電気、電子機器が接続されている。この分岐は平行二線のインダクタンスと負荷の有するキャパシタンスによって共振回路を形成するため、電燈線は特定の周波数において損失が起こる。

第二に、接続された電気、電子機器はその電力ラインから不要な雑音を流出するため、コンセントより電気電子機器の雑音が電燈線へ流出している。

2.3 電燈線伝送における雑音

- (1) 継続性雑音 : 誘導雑音, 低周波雑音, コロナ雑音
- (2) 瞬時性雑音 : 故障時雑音, 機器の操作による雑音
- (3) 不規則性雑音 : 特殊機器からの雑音, 回路の異常による雑音

これらの雑音のうち継続性雑音が最も重要であり、伝送システムは、この広帯域の雑音に耐え得る性質が必要とされる。

不規則性雑音は、発生原因となるものの状況により、継続的なもの、瞬時的かつ偶発的なもの、間欠的なものなど種々ある。また、その大きさも千差万別で、個々に対策を講じなければならぬ性質のものが多い。

3. システムの概要

3.1 システムの仕様

(1) 伝送信号

本研究では、アナログ情報信号（10kHz以下の音声）を電燈線を伝送路として通信を行なう。

(2) 拡散変調方式

本研究においては、次の2種類の拡散変調方式によって実験システムを製作した。

(a) 情報信号を比較的雑音に強いFMした後に、拡散符号を用いてPSK変調し、SS信号として送出する。このSS信号を受信側では、送信側で用いたのと同じ拡散符号で一次変調信号に復調し、これを情報信号に復調する。(以下FM+拡散型と記す)

(b) 情報信号をデジタル化し、これに拡散符号を加え合わせて新たな符号を得る。この符号で搬送波をPSK変調し、SS信号として送出する。受信側ではSS信号と搬送波を加え合わせて、デジタル信号で変調された拡散符号に復調する。(以下SCPDM+拡散型と記す)

デジタル化のためのA/D変換方法としては、符号クロック速度で量子化を行なうため、SS方式に適しているSCPDM(Suppressed-Clock Pulse Duration Modulation 抑圧クロックパルス幅変調)を用いた。

図-1に(a),(b)それぞれの実験システムのブロック図を示し、表-1にシステムの仕様を

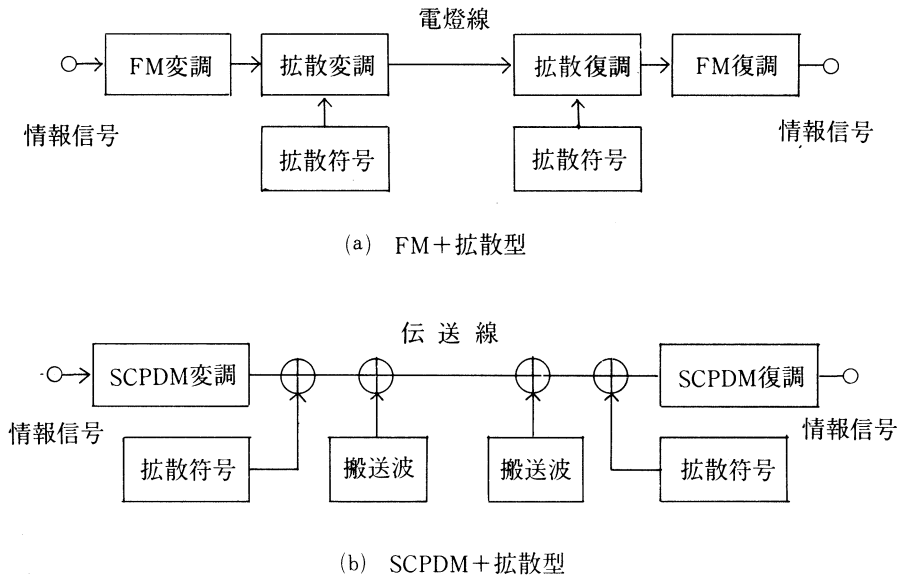


図-1 システムのブロック図

表-1 システムの仕様

スペクトラム 拡散変調方式	直接拡散 (DS)方式
拡散符号	M系列符号
クロック周波数	50 kHz
1次変調方式	FM/SCPDM
伝送信号	アナログ信号 (音声10kHz以下)
伝送路	電燈線

示す。

3.2 FM+拡散型

(1) 送信側

(a)のシステムでは、まず、搬送波を情報信号で一次変調を行なって、使用周波数帯域をRF帯域まで引き上げている。SS信号の周波数スペクトラムは、この搬送波周波数を中心として左右の広い帯域に拡散される。従って、(a)のシステムの一次変調方式として使用したFMの中心周波数と周波数遍移、及び拡散符号のクロック周波数でSS信号のスペクトラムを制御することができる。このFMにはVCO (Voltage Controlled Oscillator 電圧制御発振器)を使用している。中心周波数は200kHzで、周波数遍移は±30kHz程度になるように設計した。電燈線の場合、使用できる帯域は10kHz～450kHzに制限されているから、200kHzはほぼその中央の周波数である。また、周波数遍移は余り小さいと復調が困難になる。また、VCOの入力電圧と発振周波数は必ずしも比例関係にはないため、周波数遍移が大きすぎると線形性が失われる。

VCOから出力されたFM信号は、拡散符号を使って広帯域に拡散される。この拡散変調には、平衡変調器を使用している。また、このときの拡散符号として用いるM系列符号^{10),11)}は、シフトレジスタと排他的論理和素子を用いて発生させている。なお、本研究で製作した実験システムでは5次のM系列符号(周期31ビット)を使用した。

こうして得られたSS信号は電燈線、またはフィルタなどを通した後、受信側に送られる。

(2) 受信側

送信側で出力されたSS信号は、拡散復調過程で再度、拡散符号と掛け合わされることによりFM信号となる。この復調には、送信側と同じ平衡変調器を使用している。実用段階のスペクトラム拡散通信システムならば、この復調は同期の捕捉・保持といった過程を経て達成されるので

あるが、本研究における実験システムではこの部分を省略し、同一の拡散符号発生器から送信側と受信側の双方に供給している。

FM 信号の復調には多目的 PLL IC LM565C を使用した。情報出力は、LPF (Low Pass Filter) を通過した後増幅される。

3.3 SCPDM+拡散型

(1) SCPDM 変復調器

SCPDM+拡散型システムにおける A/D 変換方法である SCPDM のブロック図、並びに各部の波形を図-2 に示す。

入力された情報信号は、サンプル & ホールド回路によってサンプリングされる。このときの

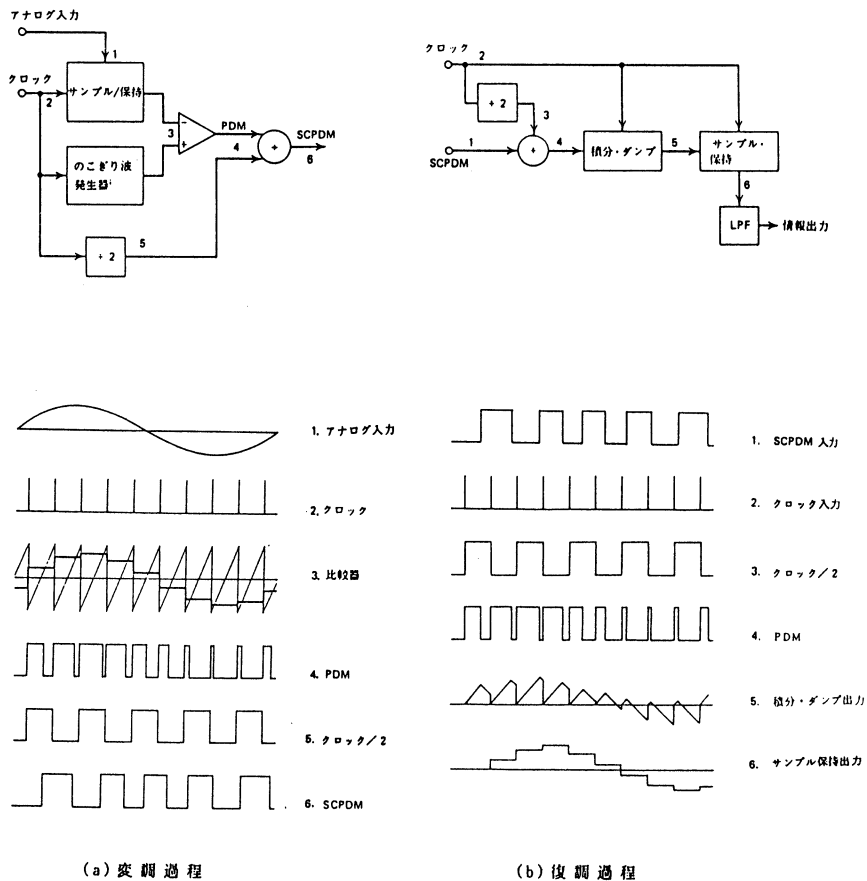


図-2 SCPDM 変復調過程

サンプリング周波数は、標本化定理によればサンプリングする信号の最大周波数の2倍より大きければ元の信号を完全に再現できるので、本システムの場合は $10\text{kHz} \times 2 = 20\text{kHz}$ より大きい周波数が必要である。本システムでは余裕をとって 50kHz とした。SCPDM 変復調器では、このサンプリング周波数はクロックとして他の各部にも供給されて同期がとられている。

SCPDM の変調過程について述べる。サンプリングされた情報信号はこのぎり波発生回路から出力されるのぎり波と、比較器において比較され、サンプリングデータの電圧レベルがこのぎり波の電圧レベルを超えると[1](+5V)、それ以外は[0](0V)が比較器から出力され[1]の長さが可変調のパルス波が生成される。このパルスの[1]の長さは、ホールドされているデータの電圧レベルによって決定されることになる。このパルス波がPDM波であり、これとクロックパルスを1/2に分周したものととの排他的論理和をとったものが抑圧されたSCPDM波である。このSCPDM波とPDM波を比較すると、実行サンプリング周波数が1/2になっていることがわかる。従ってSCPDMにおいて必要な情報帯域幅は、PDMの1/2となる。

次にSCPDMの復調過程について述べる。SCPDMの復調過程は当然、変調過程とは逆の手順で行われる。SCPDM復調器に入力されたSCPDM波は、まず抑圧されているクロック情報が加えられてPDM波に戻される。すなわち、クロックパルスを1/2に分周したものととの排他的論理和がとられる。このときのクロックパルスとSCPDM波は同期が達成されていなければ、正確なPDM波を再生することはできない。この同期過程は、本システムでは省略されており、クロックは送信側、受信側の双方に同一の発振器から供給されている。

このようにして再生されたPDM波は、積分・ダンプ回路に入力される。この回路は基本的には積分回路であるが、コンデンサの電荷を放出するためのスイッチが付加されており、ここにクロックパルスが印加されるごとに電荷を放出する。この回路でできる波は入力されるパルスの[1]の長さに応じて、ピークの電圧が変化するのぎり波になる。この波を送信側で用いたのと同じ構成のサンプル&ホールド回路に入力して、クロック周波数によってサンプリングされた情報波形に再生した後、LPFで波形を整形し元の情報信号を得る。

(2) 送信側

情報信号が入力されたSCPDM変調器は、SCPDM波を発生する。このSCPDM波とM系列符号とで排他的論理和をとり拡散符号を得ることができる。この符号を新たな拡散符号として、搬送波(方形波)を拡散変調することにより帯域拡散を実現している。(b)のシステムと(a)のシステムとの大きな相違点はこの部分である。(a)のシステムでは情報信号で搬送波を変調した後に、拡散符号により拡散変調を行っている。それに対して(b)のシステムでは、情報信号で拡散符号を変調した後にその変調された拡散符号で搬送波の拡散変調を行っている。

(3) 受信側

受信側のSS信号はSCPDM波、M系列符号、搬送方形波三つの波が加え合わされたものである。

復調はこの波を後者から順に2つ、引き去ることにより行なわれる。すなわち変調過程を逆にたどるのである。この復調は、本研究では、SS信号と各波の排他的論理和をとることで実現している。このようにしてSS信号はSCPDМ波に復調され、SCPDМ復調器によってアナログ情報信号に戻される。

4. 伝送実験及び評価

4.1 FM+拡散型送受信システムによる伝送実験

電燈線挿入部の回路で使用したトランスは、約100kHzから300kHzの範囲の周波数のみ伝送できる仕様となっている。FM+拡散型のシステムでは、このトランスの伝送帯域で周波数の制限を行っても十分伝送できる。SS信号の電力を電力増幅器によって増幅した後、5mの長さの電燈線で伝送実験を行った。その結果、アナログ信号は復調された。

図-3に、受信されたSS信号のスペクトラム分布を示す。電燈線による信号減衰、及び雑音の混入が見られるものの、SS信号のスペクトラムのメインローブの概形は認めることができる。

次に電燈線の長さを変えて実験を行っても復調された波形及びSS信号の電力スペクトラムに変化は認められなかった。変化の現われない理由として次の点が挙げられる。

第一に、伝送路として用いた電燈線は同一室内に配線されており、その最高長はさほど長くはないため、電燈線の伝送特性に大きな変化はない。

第二に、本実験で使用した電燈線に接続されている分岐は50ヶ所にもおよんでいるため、実験による数ヶ所の分岐の変化は電燈線の雑音や減衰特性に大きな変化を与えない。

4.2 SCPDМ信号+拡散型受信システムの伝送実験

情報信号で変調された拡散符号の

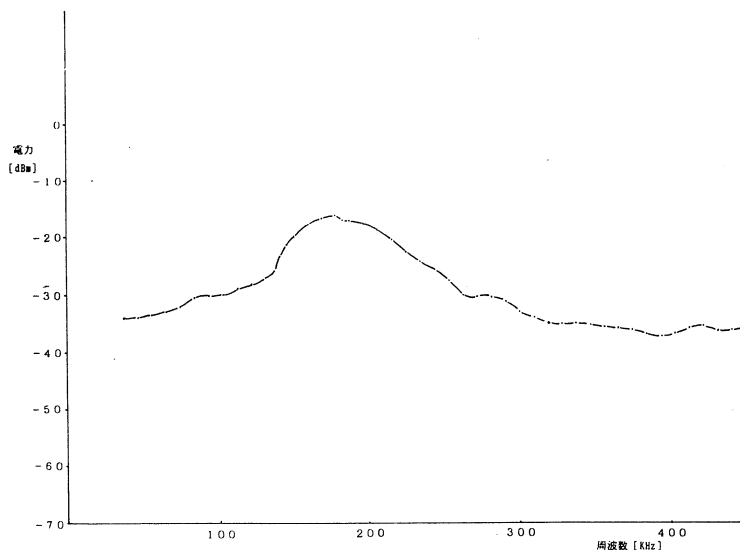


図-3 FM+拡散型SS信号の電力スペクトラム分布

スペクトラム分布の形は、送信された情報によって変化する。ここでは、アナログ信号から生成された SCPDM 信号と、M 系列符号との合成によって得られた SS 信号の帯域制限に対する影響を調べるための実験を行った。

その結果、帯域制限を行わない場合には、アナログ信号の伝送は可能である。しかし、10kHz～450kHz の BPF によって帯域制限を行った場合のアナログ信号の伝送はできなかった。

復調できない理由は以下のように考えられる。新たな符号は、低周波の領域に多くの電力を含んでいる。このため10kHz 以下の周波数を遮断すると、情報の多くが失われて復調できなくなると思われる。

次に、新たな符号のスペクトラムの低周波領域を10kHz～450kHz の範囲に収めるため、200kHz のキャリアをこの新たな符号に挿入し、同じく実験を行った。その結果、情報は復調された。

図-4 は、キャリアを挿入した新たな符号の電力スペクトラム分布である。キャリアの周波数200kHz を中心とし、新たな符号のスペクトラムが対称に分布する様子が確認できる。このため、帯域制限による情報成分の欠落が防止され、アナログ信号が復調できたのである。

なお、アナログ信号の復調波形において振幅の減少が見られるが、その理由は次の通りである。アナログ信号の振幅には PDM 信号のパルス幅が対応している。帯域制限により高周波成分が失われると、新たな符号のパルスの角が丸くなる。復調段においてコンパレータを通った新たな符号は、角の丸みの

影響でそのパルス幅が小さくなる。

したがって、復調された PDM 波のパルス幅も小さくなり、アナログ信号の振幅に影響を与えるのである。

また、復調された PDM 波のすべてのパルスが等しく小さくなるため、帯域制限における

アナログ信号の波形にひずみを生じ

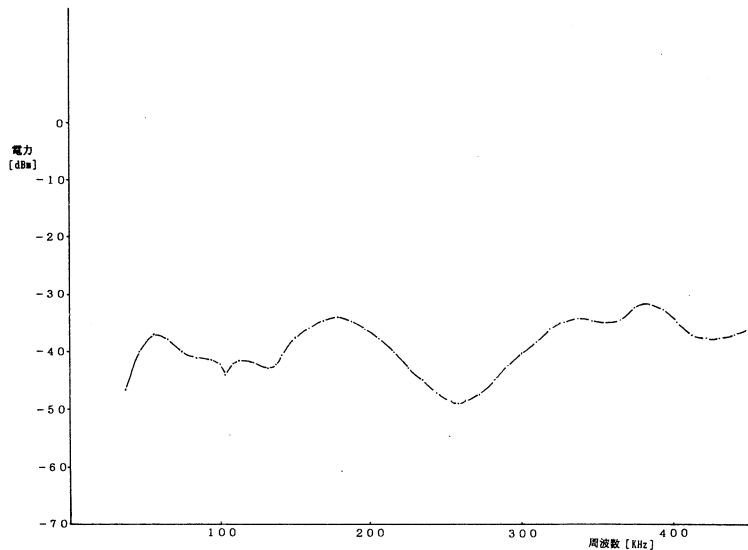


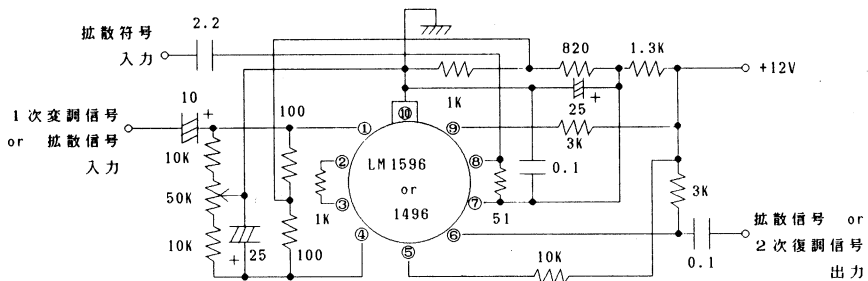
図-4 受信された SS 信号の電力スペクトラム分布

ることではない。

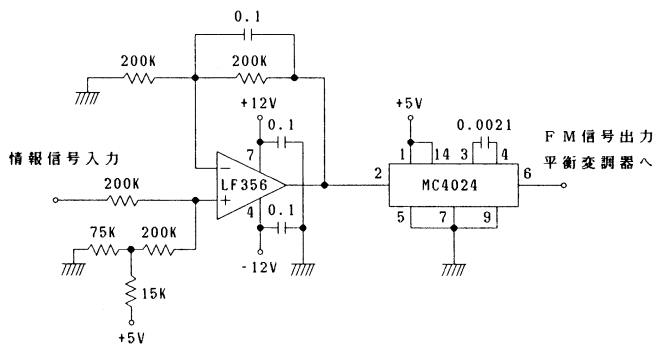
5. おわりに

一次変調に AM や FM を用いると、拡散変調されても、電力スペクトラム密度の一番高い所を追従することにより、第三者による搬送波の傍受が可能である。例えば一次変調に AM を用いた場合には簡単な包絡線検波で情報信号が再生できる。FM+拡散型のシステムにおいて搬送波を再生できるということは、そこから情報信号をも再生できることを意味する。一方、SCPDM+拡散型のシステムでは、搬送波を再生できても搬送波自身にはなんら情報は含まれていない。従ってこのシステムは、FM+拡散型システムに比べ情報が秘匿されるシステムといえる。

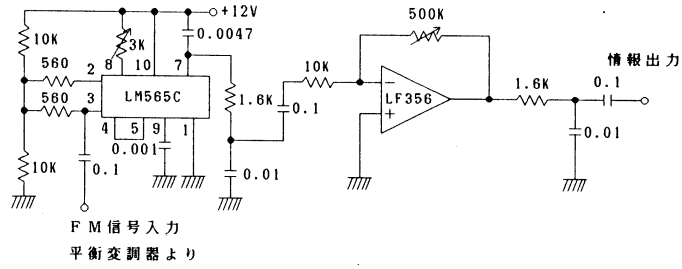
本研究では、SS 通信方式を用いた。アナログデータの電燈線伝送装置の開発を行ってきた。また、近年提案された、SS 通信方式による電燈線通信の標準案、特に送信周波数帯域の制限に主眼を置いた。そして、SS 通信方式が、これらの条件下においても正しい通信をおこなえる事を、



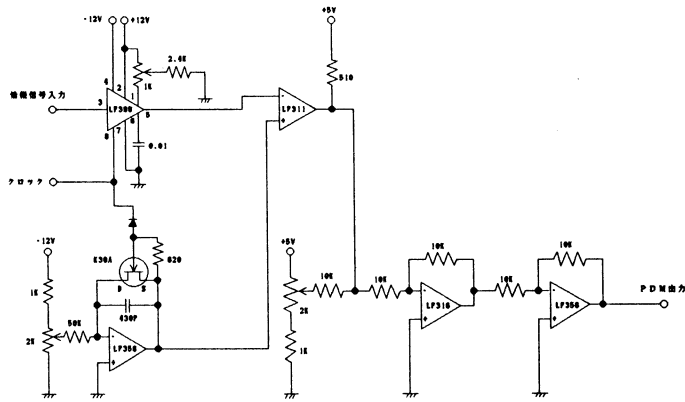
付図-1 平衡変調器



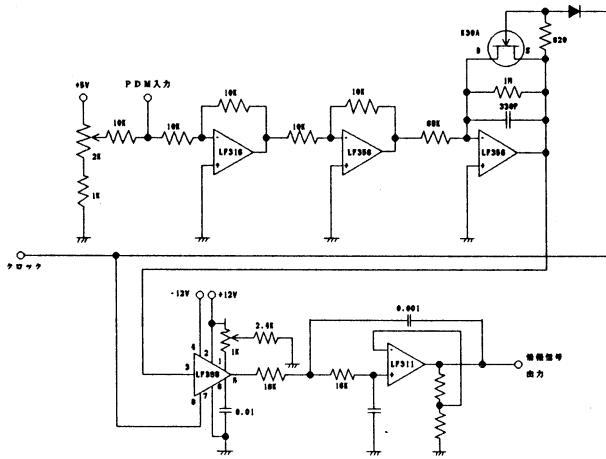
付図-2 FM変調部回路図



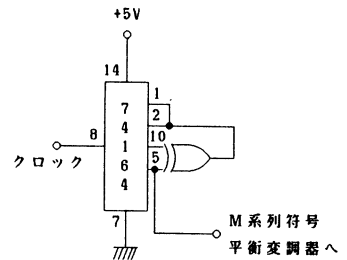
付図-3 FM復調付



付図-4 PDM変調部回路図



付図-5 PDM復調部回路図



付図-6 M系列符号発生部回路図

実際の実験システムで確認した。しかし、SS 通信方式について最も重要な点は、同期捕捉、保持についてであり、この点についての研究は稿を改めて報告する。

なお、本研究の遂行にあたり、ご協力いただいた秋吉貴徳氏(現(株)東芝)、平井政伸氏(現(株)NTT)並びに山川勇喜禎氏(現(株)日立コンピュータエレクトロニクス)に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) R.C. Dixon 著, 立野敏, 片岡志津雄, 飯田清共訳: 最新スペクトラム拡散通信方式, JATEC 出版
- 2) John G. Proakis : Digital Communicatins, p.554~p.597, McGRAW-HILL Book Co. (1985)
- 3) R.L. Pickholtz, D.L. Schilling, L.B. Milstein : Theory of Spread Spectrum Communication-A Tutorial, IEEE Trans, CON-30, p.885~p.884 (1982)
- 4) Charles E. Cook, Fred W. Ellwesick, Laurence B. Milstein, Donald L. Schilling : Spread Spectrum Communications, IEEE PRESS.
- 5) 広崎膨太郎: スペクトラム拡散通信の応用について, 電気学会誌, 105巻, 1号, p.45~p.49 (1985)
- 6) 角川靖夫, 塚本賢一: スペクトラム拡散通信とその応用分野 I, 電子通信学会誌, Vol.65, No. 9, p.967~p.971 (1982)
- 7) 角川靖夫, 塚本賢一: スペクトラム拡散通信とその応用分野 II, 電子通信学会誌, Vol.65, No.10, p.1053~p.1059 (1982)
- 8) 中津弘定: 家庭内情報通信技術, 計測と制御, Vol.23, No.11, p.24~p.36
- 9) 高木昇, 細野敏夫, 中村宏: 電力用通信, オーム社
- 10) 柏木潤: M 系列再発見, 計測と制御, Vol.20, No. 2, p.236~p.245 (1981)
- 11) 吉谷清登: PN 系列一特に M 系列について, 電波研究所季報, p.249~p.263 (1971)

スペクトラム拡散通信方式における符号変調に関する研究

一 柳 和 弘・黒 島 利 一・杉 岡 一 郎・秋 山 稔

Pseude-Noise Code Synchronization in Spread Spectrum Communication

Kazuhiro ICHIYANAGI, Toshikazu KUROSHIMA,
Ichiro SUGIOKA and Shigeshi AKIYAMA

Abstract

The spread spectrum communication include remarkable features. Therefore, it is attempted to apply this technique to many department of communications recently. In spread spectrum communication techniques, the pseude-noise(PN) code synchronization is a very important problem to establish communication channels, so that a great many techniques has proposed concerned with the PN code synchronization. This paper describes on a experimental spread spectrum communication system adopting the PN code snychronization circuit which is combined the delay-locked loop circuit and the phase-sensing circuit. In conclusion, from results of the transmission test using its system, we found that our newly developed PN code synchronization circuit is one of the reliable circuit for the spread spectrum communication system.

1. はじめに

スペクトラム拡散 (Spread Spectrum : 以下 SS と記す) 通信方式¹⁾⁻⁷⁾は, 一般に搬送波を信号波で変調 (一次変調) し, さらに疑似雑音 (Pseudo Noise : 以下 PN と記す) 符号^{8),9)}で変調 (二次変調) し, 広い周波数帯域に拡散する。このため, 雑音や干渉信号に強く, また, 通信内容が第三者によって傍受されることを防ぐことができる。

本研究は, SS 通信方式をパソコン間のデータ通信へ応用することを目的として, 拡散方式の1つである「符号変調方式」に関するものである。また, 「符号変調方式」とコストスループの組み合わせにより PN 符号の同期捕捉・保持が出来たので, ここに報告する。

2. 符号変調と同期

2.1 一次変調

SS 通信の一次変調には従来の変調方式が利用できる。パソコン間データ通信はデジタル信号の通信であるから, 一次変調として, ここでは, ASK (Amplitude Shift Keying)^{10),11)}, PSK (Phase Shift keying)^{10),11)} 及び FSK (Frequency Shift Keying)^{10),11)} の3つの変調方式を考えることにす

る。

ASK は搬送波の振幅を変調信号すなわち、ベースバンド信号に比例して変化させるものである。これを図-1 に示す。無変調搬送波 $\cos\omega_c t$ を図-1 (a) に示す。オン・オフベースバンド信号 $y(t)$ を図-1 (b) に示す。搬送波の振幅を $y(t)$ に比例して変化させると、図-1 (c) に示す被変調信号 $y(t) \cos\omega_c t$ が得られる。被変調信号もオン・オフ信号となる。ASK 信号をさらに PN 符号で BPSK (2 相 PSK) 変調し SS 信号を作る場合、ASK 信号はオン・オフ信号であるから、いくら PN 符号を用いて拡散したとしても、その拡散された信号の有無により第三者の傍受を防ぐことはできない。ここに、SS 信号の特徴の 1 つである秘話性は失われる。また、受信側において、ASK 信号のない状態の時、すなわちオフの時に PN 符号を追従することができなくなり、次にオンとなった時に、はじめから PN 符号の正しい同期を期待することは難しい。以上のような理由により、SS 通信の一次変調として ASK は適さない。

ベースバンド信号 $y(t)$ が図-2 (a) のように + 及び - の信号であると、対応する被変調信号 $y(t) \cos\omega_c t$ は図-2 (b) のような BPSK 信号となる。また、データを周波数変化で変調すると、図-2 (c) に示す FSK 信号となる。0 を周波数 ω_{c0} で、1 を周波数 ω_{c1} で対応させる。図-2 (b) の BPSK 信号のスペクトラムを図-3 (a) に、また、図-2 (c) の FSK 信号のスペクトラムを図-3 (b) に示す。

FSK を一次変調として直接拡散を行い、生じる SS 信号の微小時間を考えると、SS 信号のスペクトラム分布は ω_{c0} および ω_{c1} を中心として、データに対応して移動する。このため、SS 信号の最大信号を監視することにより、第三者による傍受が可能となり、秘話性が失われる。一方、PSK 信号のスペクトラムは ω_c を中心として分布している。従って、PSK を一次変調として PN 符号で拡散変調すれば、SS 信号のスペクトラム分布は安定し、

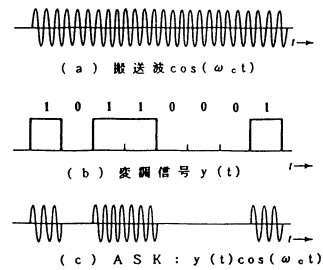


図-1 ASK 信号の生成

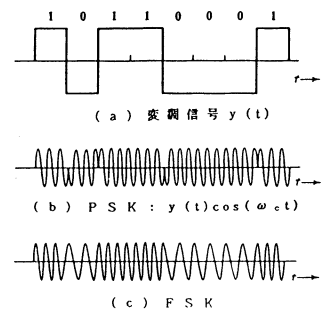


図-2 PSK, FSK 信号の生成

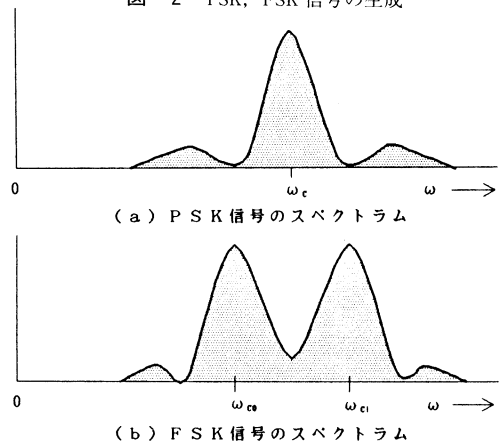


図-3 PSK, FSK 信号のスペクトラム分布

秘話性が高くなる。このような理由により、PSK は FSK に比べ SS 通信の一次変調に適しているといえる。

2.2 符号変調

上で述べた PSK, FSK あるいは ASK 等の一次変調は搬送波を信号で変調するものであった。これを「搬送波変調」と呼ぶとするならば、「符号変調」は PN 符号を情報信号で変調する方法である。図-4 は本研究において採用した「符号変調」の例を示す。図-4(c)のデータ信号は PN 符号発生クロックと立ち上がりをそろえ、図-4(d)となり、さらに図-4(b)の PN 符号との間で排他的論理和をとることにより図-4(e)を得る。これを新たな拡散符号

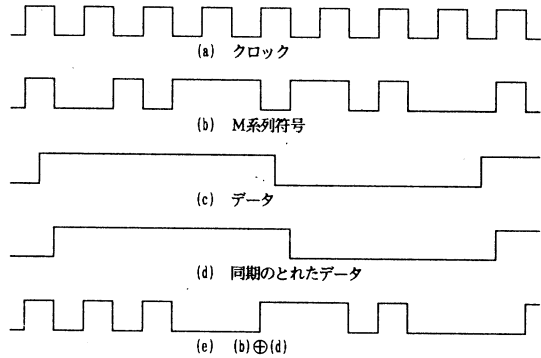
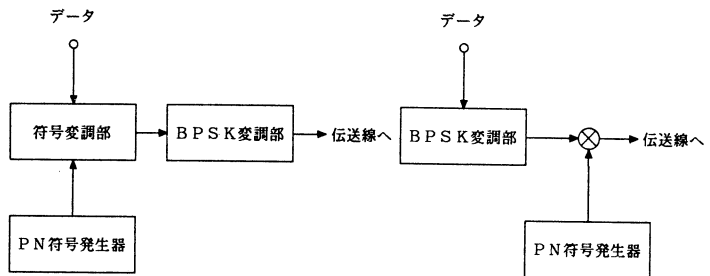


図-4 「符号変調」

として扱い、任意の搬送波と掛け合わせることで BPSK 信号を生成することにより帯域が十分に拡散された SS 信号となる。ここで図-4(c)のデータを加工して図-4(d)にするのは、PN 符号発生クロック以上の高周波成分を抑圧するためである。本実験システムの場合、PN 符号発生クロックはデータ速度のおよそ200倍であるから、データを加工して PN 符号発生クロックと立ち上がりを合わせてもデータの歪による影響はほとんどでない。

また、受信側では、図-4(e)の信号と受信側で生成した図-4(b)の排他的論理和をとることにより図-4(d)のデータ信号の再生ができる。

図-5(a)は「符号変調」を用いた SS 信号変調器のブロック図を示している。また、図-5(b)は一次変調に BPSK を用いた DS 方式によ



(a)符号変調

(b)搬送波変調

図-5 「符号変調」と「搬送波変調」

る SS 信号変調器を示している。この場合、図-5(a)と図-5(b)とは非常に似た SS 信号が得られる。本実験システムで用いる「符号変調」方式の SS 信号は一次変調に BPSK を用いた直接拡散方式と同様の性質を有していると考えられる。

2.3 同期捕捉・保持

PN 符号系列として本研究では M 系列符号系列を採用している。M 系列符号の同期捕捉・保持は SS 通信系を構成する上で最も重要な問題の 1 つである。本研究の特徴の 1 つは、同期捕捉・保持をコスタスループのみで解決している点である。一般の SS 通信系では、同期捕捉・保持のため複雑な回路が必要である。

同期捕捉・保持の機構を説明するために受信側のブロック図を図-6 に示す。

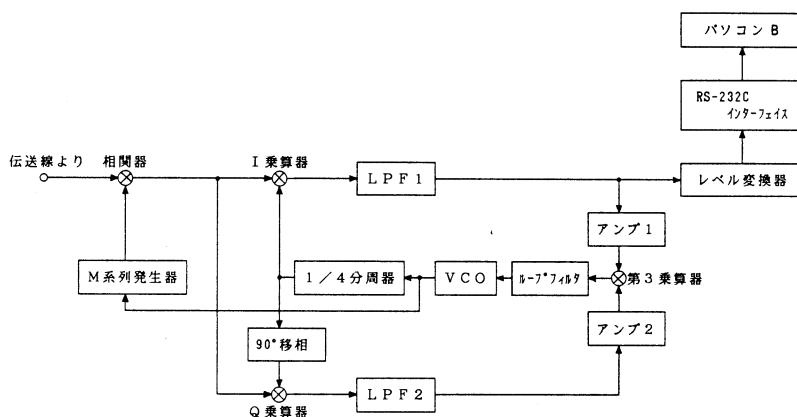


図-6 受信側ブロック図

まず同期保持について説明する。同期保持とは M 系列符号発生クロックを維持することである。そのためには受信側で送信側の M 系列符号発生クロックを追跡すれば良い。送信側と受信側ともに M 系列発生クロックと搬送波の間に正確な関係を保つことで、搬送波を追跡することは M 系列発生クロックを追跡することと同じ意味を持つ。すなわち、コスタスループが搬送波を追跡している限り、M 系列符号の同期を保持していることになる。

次に同期捕捉について説明する。図-6 の VCO の自走周波数を送信側の発振周波数より若干低く設定しておくこと、VCO から信号を供給されている受信側 M 系列発生クロックとコスタスループの I および Q 乗算器への信号は、それぞれ送信側の M 系列発生クロックと搬送波より周波数は若干低くなる。送信側の M 系列符号と受信側の M 系列符号との同期がとれていない場合には、図-6 の相関器出力は高周波成分が多く含まれた信号となる。従って、この信号が I および Q 乗算器に入力されても、コスタスループは働かず、VCO への信号伝達は行なわれないので、VCO は自走を続ける。また、送信側 M 系列発生クロックの周波数と受信側 M 系列発生クロック

の周波数とには若干の周波数差があるように設定しているので、送信側 M 系列符号と受信側 M 系列符号が一致するまで上記の動作は繰り返される。そして、送信側 M 系列符号と受信側 M 系列符号が一致した時のみ I および Q 乗算器に BPSK 信号が入力され、コスタスループの働きとして搬送波に対して VCO の発生周波数がロックされ、同期は捕捉される。同期が捕捉された後は、先に述べたように同期が保持される。このように送信側 M 系列発生クロックの周波数に対し受信側 M 系列発生クロックの周波数との間に差を持たせて相関を検出する方法を一般にスライディング相関方式¹⁾と呼んでいる。

送信側 M 系列発生クロック周波数を f_s 、受信側 M 系列発生クロック周波数を f_R 、M 系列符号を生成するのに使用するシフトレジスタの数を n とすると、スライディング相関を用いた場合の最大同期捕捉時間 T は

$$T = (2^n - 1) / |f_R - f_s| \quad (1)$$

となる。(1)式は M 系列符号が長くなるにしたがって指数関数的に最大同期捕捉時間が長くなることを示している。

3. 実験システム

3.1 仕様

本実験システムの仕様は表-1 の通りである。

3.2 実験システム概要

本実験システムの全体のブロック図を図-7 に示す。図-7 はパソコン A からパソコン B への

表-1 実験システム仕様

項目	仕様
変調方式	スペクトラム拡散方式
拡散方式	直接拡散方式
拡散符号	M 系列符号
中心周波数	50 [kHz]
拡散符号クロック	200 [kHz]
データ伝送速度	1200 [kHz]
相関方式	スライディング相関方式
伝送形態	単方向通信
使用パソコン	富士通 FM11-AD 2 ⁺
端末インターフェイス	RS-232C 準拠
伝送線	有線

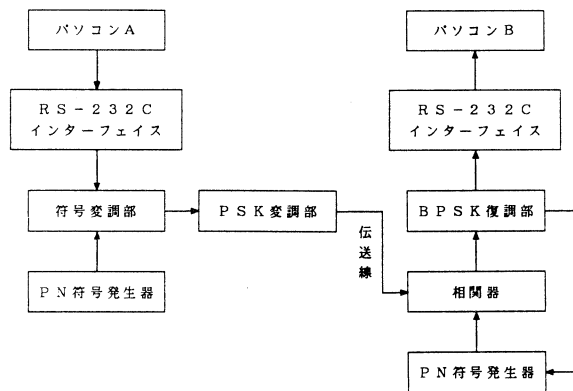


図-7 実験システム全体ブロック図

パソコン間データ通信を実現するものである。パソコン A から RS-232C を通して出力された信号は変調され SS 信号となり伝送線へと出力される。一方、伝送線より受信側へと入力する SS 信号は、相関器、BPSK 復調部を経て TTL レベルの信号となり RS-232C インターフェイスを通して、パソコン B への入力信号となる。

4. 実験及び評価

4.1 M 系列符号独立発生による SS 信号伝送

図-7 のシステムを用い SS 信号の伝送状態を確認するための実験を行った。その際の条件は表-2 の通りである。BPSK 復調部は初期状態において 0 または 1 を判定できないので、手動により送信側と受信側のデータが一致したのを確認した後に測定を開始した。26,000×50文字のデータ伝送実験を 5 回繰り返したがデータの誤りはなかった。このことにより、M 系列符号を送信側と受信側とで独立な

表-2 M 系列符号独立発生による SS 信号伝送実験の条件

項 目	条 件
伝送速度	1200[bps] (パソコン公表値)
搬送波	50.535[kHz]三角波
M 系列符号	7 次 127ビット
M 系列クロック (送信側)	202.140[kHz] 搬送波と同期
M 系列クロック (受信側自走時)	199.443[kHz]
BPSK 復調	コスタスループ
伝送線出力	1.3[V] (振幅)
送信データ	A ~ Z の26種の連続

ものにしても、同期回路が正常に働き、十分なデータ伝送精度を持っていることが判った。

4.2 同期捕捉時間

図-7 のシステムにおいて受信側に SS 信号が入力されてから同期が捕捉されるまでの時間を測定した。同期捕捉時間を測定するためにタケダ理研社製 (モデル TR-5766) のユニバーサルカウンタを使用した。このユニバーサルカウンタは B 端子に信号が入力されてから C 端子に信号が入力するまでの時間 t を測定することができる (図-8 (a)参照)。伝送線を接続するスイッチとユニバーサルカウンタの B 端子に接続するスイッチを連動することにより、受信側に SS 信号が入力される時刻とカウンタの B 端子に入力する信号の立ち上がり時刻を一致させる (図-8 (b)参照)。一方、同期捕捉状態を検出する信号を作るために図-8 (c) の回路を作成した。TTL レベルの送信側 M 系列符号と受信側 M 系列符号を排他的論理和の入力とし出力信号を反転する。この信号は送信側と受信側の M 系列符号が一致していれば +5V の直流信号が出力される。しかし、同期が捕捉されていない時にも高い周波数成分を含んで 0 および +5V 信号が出力され

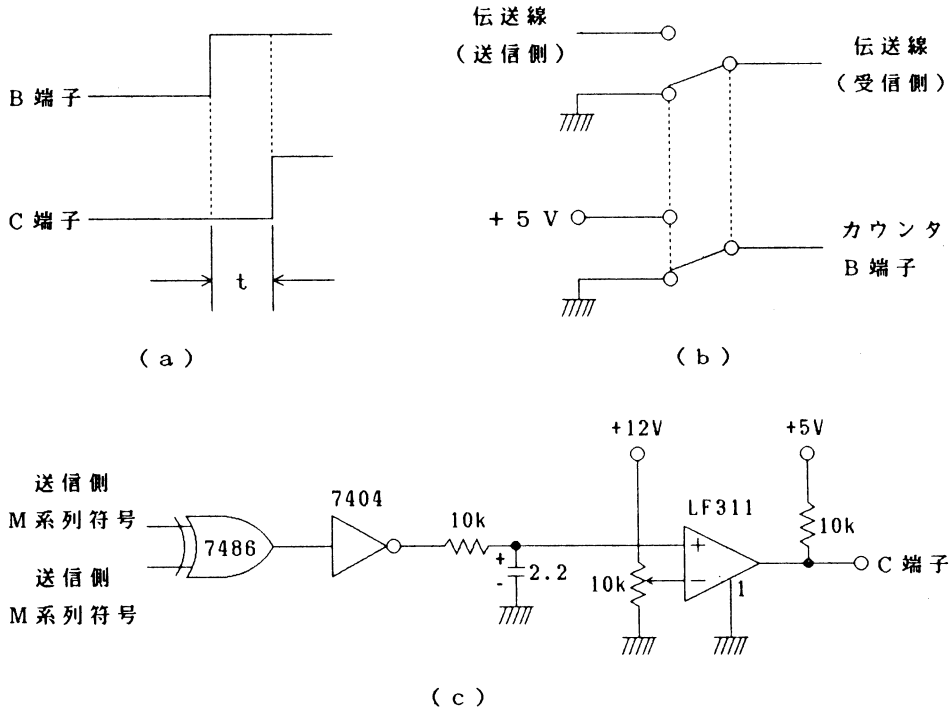


図-8 同期捕捉時間の測定実験

るので、このままではコンパレータの入力としては利用できない。そこで、簡単なローパスフィルタを通過させて同期が捕捉されていない場合の+5Vの信号を除去し、コンパレータの入力としている。コンパレータでは、同期捕捉されていない場合には0Vを出力し、同期が捕捉された場合には+5Vの信号を出力するので、それをユニバーサルカウンタのC端子に入力する。このようにしてユニバーサルカウンタのB端子およびC端子に入力される信号を作り、同期捕捉時間を測定している。

M 系列符号の次数を変えて同期捕捉時間を同一符号について100回測定した平均捕捉時間を図-9に示す。

ここで、7次のM系列符号を用いた場合について理論値との比較を行う。スライディング相関方式を用いた場合の最大同期捕捉時間は(1)式で示した。それをここで適用すると、 $f_s=202.5$ (kHz), $f_r=201.8$ (kHz), $n=7$ であるから最大同期捕捉時間 T は $T=181.9$ (mS)となる。同期のサーチを始める位置はランダムであるから、平均同期捕捉時間は、91.0(mS)となる。一方、実験による平均同期捕捉時間はランダムであるから、平均同期捕捉時間は、91.0(mS)となる。一方、実験による平均同期捕捉時間は113.6(mS)であった。このように実験値が理論値より大きくなるのは、同期を一回のサーチでとらえることのできなかったことによるものと思われる。

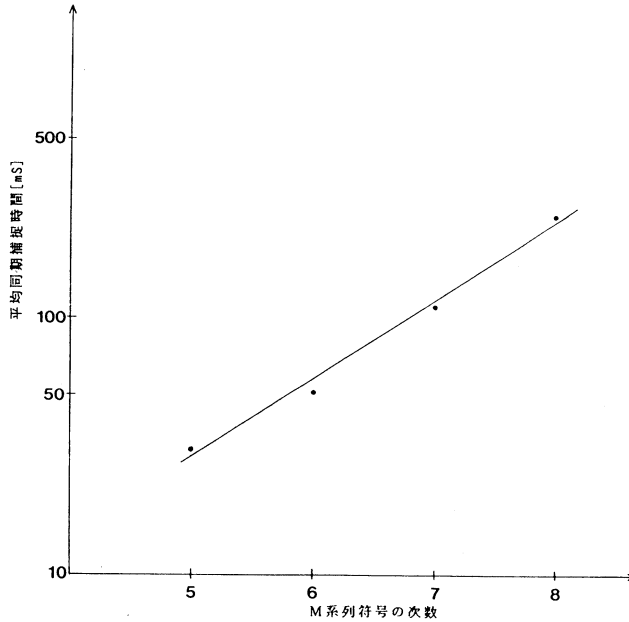


図-9 同期捕捉時間の平均値

各 M 系列符号と同期捕捉時間の関係については、各 M 系列符号を用いて同期捕捉時間を測定する実験において送信側の M 系列符号発生クロックと受信側の M 系列符号発生クロックの自走周波数との差が一定ではないので、一概には言えないが、M 系列符号の次数が増えるにしたがって同期捕捉時間もほぼ 2 倍、4 倍に増えている。したがって、これは理論どりの結果が得られたと考えてよい。

6. おわりに

本研究を通して知り得た点は以下の通りである。

- (1) SS通信方式のうち「符号変調方式」を用いて、パソコン間データ通信が可能である。
- (2) M 系列符号の発生クロックと搬送波をコヒーレントにした上でコストスループを用いて、同期捕捉・保持が簡単にできる。

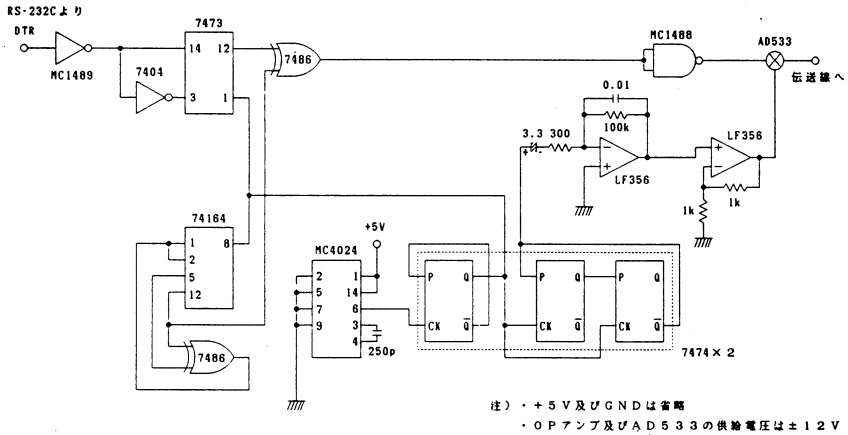
しかし、本実験システムでは解消されていない問題点がある。

本実験システムは同期捕捉及び保持の際、特別な回路を使用していない。コストスループを BPSK の復調のみに利用する場合には、コストスループの VCO の自走周波数は搬送波の周波数と一致するように設計される。しかし、本実験システムでは、送信側と受信側の M 系列符号発生クロックをずらして相関をとるスライディング相関方式を採用しているため、VCO の自走周波数を故意に搬送波よりずらす必要が生じている。このため、相関がとれた場合、VCO は自走

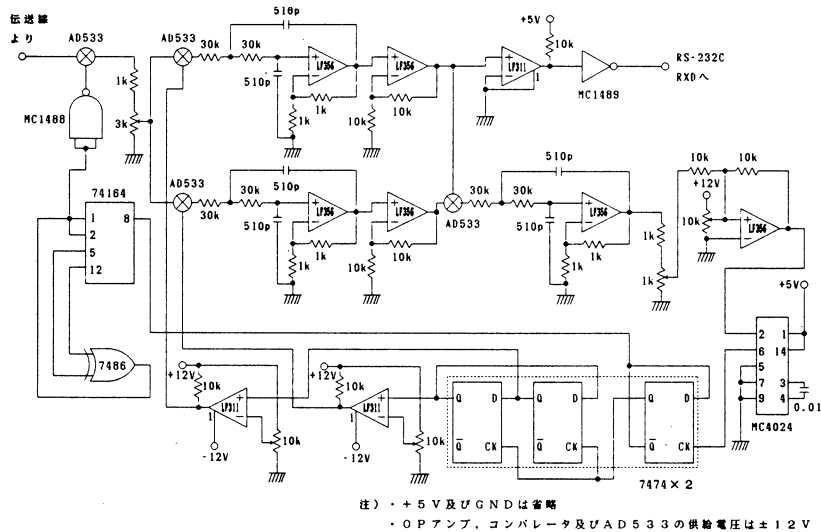
周波数からずれた状態となり、送信側の M 系列符号と受信側の M 系列符号の間にはわずかではあるが位相差が生ずる。本実験システムにおいて位相差による障害は発生していない。しかし、同期捕捉時間を短縮するために送信側と受信側の M 系列符号発生クロックの周波数の差を大きくすると、生ずる位相差も大きくなる。

また、コスタスループは BPSK 信号を受信する際、その信号の始めを 0 または 1 であることを判定できない。すなわち、コスタスループは送信側が 0 を始めに送信しているにもかかわらず、それを 1 と判断して受信を開始し、以後、送信側のデータを反転して受信する可能性を 1/2 の確率で持っているのである。

今後は、上記の問題点を解決し SS 通信方式によるシステムの実用化を図っていきたい。



付図-1 送信側回路図



付図-2 受信側回路図

参考文献

- 1) R.C. Dixon 著, 立野敏, 片岡志津雄, 飯田清共訳: 最新スペクトラム拡散通信方式, JATEC 出版
- 2) John G. Proakis: Digital Communications, p.554~p.597, McGRAW-HILL Book Co.(1985)
- 3) R.L. Pickholtz, D.L. Schilling, L.B. Milstein: Theory of Speread Spectrum Communication-A Tutorial, IEEE Trans, CON-30, p.884~p.885(1982)
- 4) Charles E. Cook, Fred W. Ellwesick, Laurence B. Milstein, Donald L. Schilling: Spread Spectrum Communications, IEEE PRESS.
- 5) 広崎膨太郎: スペクトラム拡散通信の応用について, 電気学会誌, 105巻, 1号, p.45~p.49(1985)
- 6) 角川靖夫, 塚本賢一: スペクトラム拡散通信とその適用分野 I, 電子通信学会誌, Vol.65, No. 9, p.967~p.971(1982)
- 7) 角川靖夫, 塚本賢一: スペクトラム拡散通信とその適用分野 II, 電子通信学会誌, Vol.65, No.10, p.1053~p.1059(1982)
- 8) 柏木潤: M 系列再発見, 計測と制御, Vol.20, No. 2, p.236~p.245(1981)
- 9) 吉谷清登: PN 系列-特に M 系列について, 電波研究所季報, p.249~p.263(1971)
- 10) B.P. Lathi 著, 中山惣之助, 宇佐美興一共訳: 詳解デジタル・アナログ通信方式上巻, CBS 出版 (1985)
- 11) B.P. Lathi 著, 中山惣之助, 宇佐美興一共訳: 詳解デジタル・アナログ通信方式下巻, CBS 出版 (1985)

スペクトラム拡散通信方式における同期捕捉, 保持に関する研究

一 柳 和 弘・黒 島 利 一・杉 岡 一 郎・秋 山 稔

Code Moduration Technique in Spread Spectrum Communication

Kazuhiro ICHIYANAGI, Toshikazu KUROSHIMA,

Ichiro SUGIOKA and Shigeshi AKIYAMA

Abstract

The moduration technique in the spread spectrum communication usually includes the process to modurate the carrier signal by means of ASK, PSK or FSK as the primary moduration, and then primary modurated signals are spreaded by the use of pseudo-noise(PN) code as the secondary moduration.

In spread spectrum communication techniques, the PN code synchronization is a very important problem to establish the communication channels, so that a great many techniques has proposed concerned with it. In the case of digital date transmission system, a moduration technique which is called code moduration may be proposed in this paper. The moduration method include the procedure to multiply the PN code and data signal as the primary moduration, and then carrier signal is spreaded using that newly produced spread signal. The advantage of the code moduration is easy to establish the PN code synchronization.

This paper describes on a experimental system using the circuit to process the carrier and the clock for PN code generator in phase. In conclusion, from results of the transmission test using its system, we found that our newly developed synchronization circuit is reliable for the spread spectrum communication system to transmit digital signals.

1. はじめに

最近, 特に注目されつつある通信方式にスペクトラム拡散 (Spread Spectrum, 以下 SS と略記) 通信方式¹⁾⁻⁷⁾がある。この SS 通信方式は, 従来の通信方式のような狭帯域化指向とは反対に, 情報帯域幅とは独立な拡散符号^{8),9)}を用いて広帯域化することにより, 信号電力が低くても情報伝送を可能とするのである。

SS 通信方式には, 雑音に強く, 秘匿性に優れている等のほかに, 符号分割多重によりランダム・アクセスが可能等の特徴があり, SS 通信方式をパソコン間のデータ通信へ利用したローカル・エリア・ネットワーク (LAN) あるいは電燈線による情報伝送システム等の構築に関する研究がされている。その際, 問題となっていることに同期がある。ここでいう同期とは, SS 通信方式における拡散符号に関する同期のことであり, この同期がとれなければ, 通信内容を伝送することはできず, 安定な同期が必要不可欠である。

本研究は、この同期問題の解決に向け、SS 通信システムにおいて現在では最も多く使用されている相関をとり位相差を検出することで、同期をとる方式について検討、及び回路の作製を行ったので報告する。

2. 同 期

SS 通信では同期がとれないと通信相手と接続ができず単なる雑音となり、又、同期が安定に保持されないと通信内容が伝達されないという弱点を持っている。即ち、与えられた条件下で如何に速く同期を捕捉し、それを保持し続けるかということが、SS 通信において最も重要な問題となる。

2.1 同期捕捉^{10),11)}

非同期状態から送受信間の PN (Pseudo Noise) 符号系列のフレーム (PN 符号パターンの一周期分) の時間ずれを一致させること、即ち、非同期状態から符号の位相を合わせ、同期状態にすることを同期捕捉 (initial synchronization, 又は、初期同期) という。同期捕捉には同期信号挿入方式や整合フィルタを用いる方式等があるが、ここでは本研究で用いたスライディング相関器について述べる。

スライディング相関器 (sliding correlator) は最も単純な同期方式である。図-1 はその動作の流れを示したものである。受信側のクロック周波数にオフセットを与え、受信側の PN 符号系列をスライドさせて送受信間の両方の PN 符号の相対位相をずらし、相関値を調べる。予め設定したしきい値を越えるレベルの相関値が得られると、PN 符号系列の位相が合ったものとしてサーチを停止する。この方法の欠点はしらみつぶしにサーチするので、同期捕捉に最大1フレーム分をサーチする必要がある、長い符号系列を使用すると時間が長くなることである。この克服法として、1フレーム内のスリッピング範囲を幾つもの小区間に分割して並列処理する方法や同期の為にサーチに要する時間が実用的な範囲に収まるようなプリアンブル (preamble) と呼ば

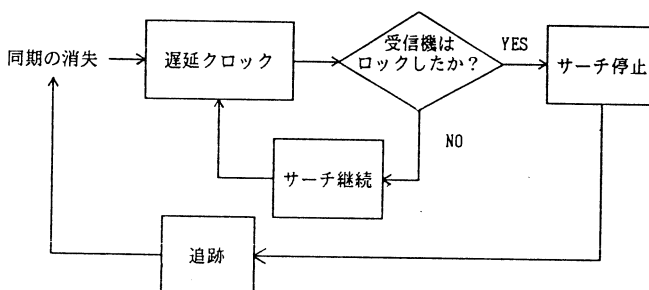


図-1 スライディング相関のフロー・ダイアグラム

れる短い特殊な符号を挿入する方法がある。又、高速同期捕捉用の合成符号系列に関する研究も進められており、JPL 系列や縦列接続系列、非同期線形合成符号等が提案されている。

2.2 同期保持

通信システムにおいて、周波数源の安定性が希望通りに十分であるとは限らず、周波数の不安定性が問題となる。即ち、クロック速度のオフセットは符号位相のオフセットとして累積されてゆく。このような周波数の不安定性を避けることはできず、同期捕捉に成功した後、局部基準信号のクロック速度が入力符号系列のクロック速度を追跡して同期を保持する必要がある。

DLL (Delay Lock Loop) は同期保持の方法として最も代表的なもので、本研究においてもこの方法を使用している。そのブロック図を図-2 に示す。DLL は相等しいが一方が他方よりも遅

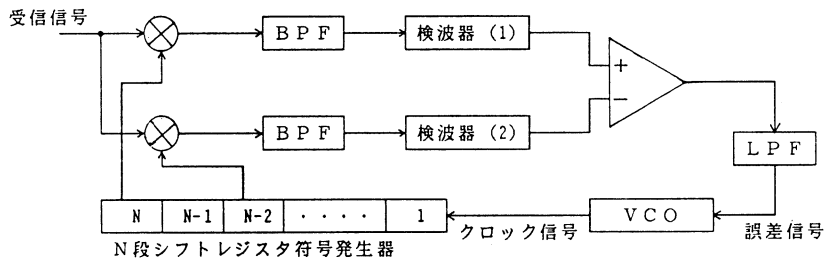


図-2 DLL の構成図

延している局部基準符号系列を2つの相関器に入力し、その相関出力の差を取り、VCOの制御電圧として用いることで符号系列発生速度を変化させ、追跡する方法である。2ビット差のある局部基準符号系列を使用した場合、それぞれの相関検出器は、図-3(a)、(b)に示すように、2ビット幅の三角形の相関出力を持ち、両方とも同じ形ではあるが遅延量だけずれている。その差を取ったものは、

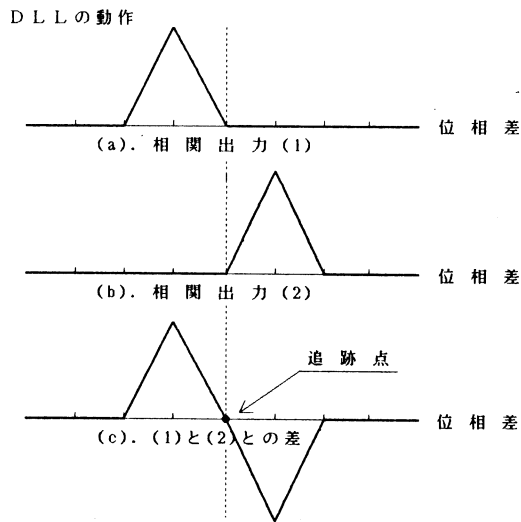


図-3 DLL の動作説明図

図-3(c)に示すような双ピーク三角形状の合成相関関数となり両ピークの中点を挟んで相関関数が線形である部分が存在する。したがって、相関器の出力の差を取って得られた電圧制御発振器の制御信号は、局部基準符号系列と入力符号系列の位相差により、図-3(c)のような形をとることになり、両ピークの中点に追跡点が安定するように働く。ここに挙げたものは遅延量を2ビットとしたものだが、遅延量を1ビットとし、1/2ビットだけ遅延した符号系列を第三の相関器に入力して復調信号を得る方法もある。

3. システムの構成

3.1 システム全体の構成

本システムはパソコンによる通信を目的としており、全体の構成は、図-4に示すように、パソコン2台、モデム2台、及びSS変調器、SS復調器及び同期回路からなっている。SS変調方式は、構成が簡単である直接拡散方式とした。

パソコンは富士通FM-11AD2を用い、RS-232Cインターフェイスを介して通信を行う。パソコンは1台を送信専用、1台を受信専用とし、単方向通信で実験を行い、伝送速度は1200bpsとした。表-1に、実験システムの仕様をまとめた。

3.2 送信側の構成

送信側パソコンから出力されたデータ信号は、一次変調としてFSK(Frequency

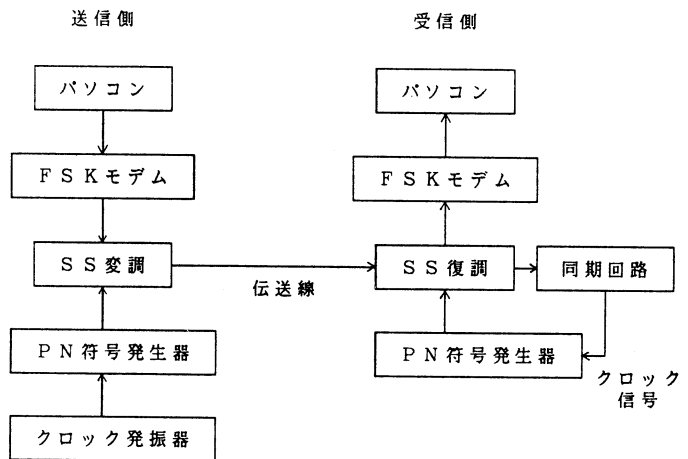


図-4 システム構成図

表-1 実験システムの仕様

項目	仕様
使用パソコン	富士通 FM-11AD2
端末インターフェイス	RS-232C 準拠
変調方式	DS 方式 一次変調/FSK 変調 二次変調/二相位相変調
伝送速度	1200bps
伝送形態	単方向通信
符号クロック周波数	223.721KHz
使用 PN 符号系列	5 ~ 15 次 M 系列
同期方式	DLL 方式

Shift Keying) モデムにより、マーク時1200Hz、スペース時2200HzのFSK信号に変調される。FSKモデムにはモデム用IC・Am7910 (Advanced Micro Devices社)を使用した。図-5にFSKモデム周辺の回路図を示す。

二次変調では一次変調された信号を二相平衡変調器により、PN符号を掛け合わせることで信号のスペクトラムを拡散させる。平衡変調器にはLM1496を使用した。このICは、マルチプライヤ型ICで例えばAM変調の場合、キャリア周波数で10MHzまでフラットなのが特徴である。

PN符号には、N次のシフトレジスタに適切なフィードバックをかけたときに発生する最大符号長系列、M系列符号を使用した。PN符号発生器のクロック信号には、3.579545MHzの水晶発振器を用い、これを分周してクロック周波数を223.721KHzとし、M系列符号の次数は5次~15次で使用した。図-6に平衡変調器の回路構成を示す。

3.3 受信側の構成

受信されたSS信号の復調は、二次変調の復調と一次変調の復調との2段階に分けて行われるのが普通である。二次変調、つまりSS変調の復調は、受信側で発生させたPN符号とSS信号との相関をとることで、広帯域に拡散された信号から、狭帯域の情報信号に逆拡散を行う。本システムでは相関器は、直接拡散変調器と全く同様の動作をする、インライン型相関器とした。実際の回路は、送信側の平衡変調器と同様にLM1496による平衡変調回路を使用した。この平衡変調器の回路は、入力インピーダンスが低いため、入力段にバッファアンプとしてLM318による非反転アンプを付加した。

逆拡散された信号は帯域通過フィルタ (BPF) を通して、雑音成分を取り除いた後に一次変調

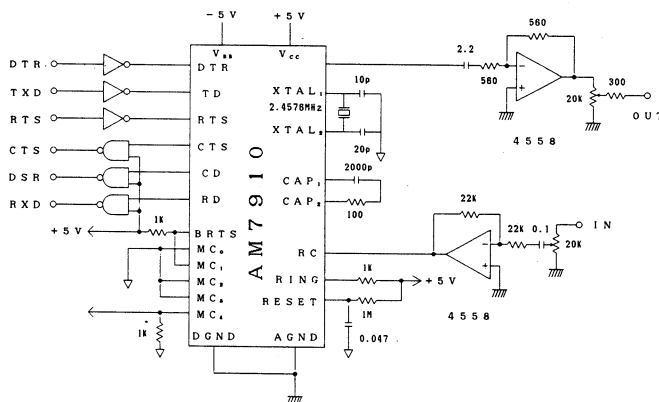


図-5 FSKモデムとその周辺部

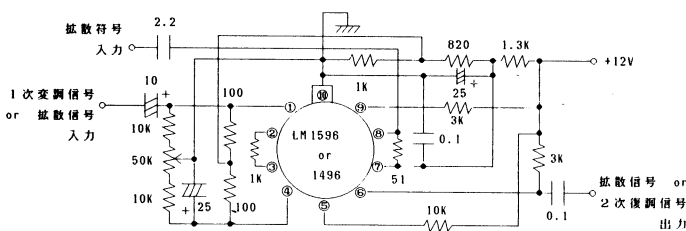


図-6 平衡変調器

が復調（ベースバンド復調）され、情報が取り出される。本システムでは、FSK モデムにより FSK 信号の復調が行われ、デジタルの情報信号となる。情報信号は RS-232C インターフェイスを介して受信側パソコンへ取り込まれる。

3.4 同期回路

(1) 同期回路の構成

図-7 に同期回路にブロック図を示す。この同期回路の構成は DLL による拡散方式をとってお

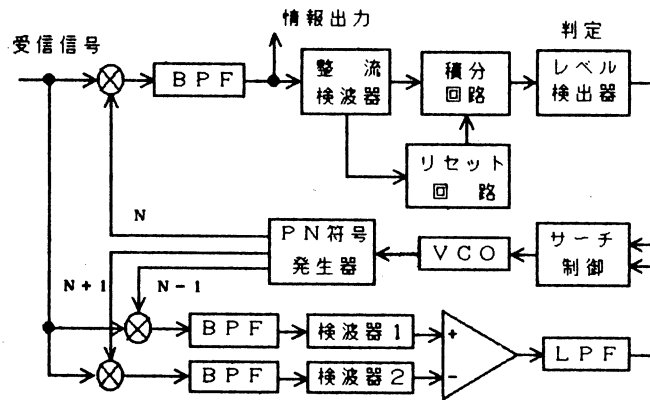


図-7 同期回路構成図

り、同期捕捉部と同期追跡部の二つの部分から成っているものである。同期捕捉部分は、スライディング相関方式を用いたもので、相関器の出力をベースバンド信号の帯域である1.2KHz～2.2KHzの帯域を通す中間周波数1.7KHz、帯域幅1KHzの帯域通過フィルタに通した後に、ダイオードによる整流検波を行って、振幅成分を取り出す。この信号を積分回路により一定時間積分し、スレシホールド検出器により信号のレベル判定を行う。この際、相関器に入力する受信側PN符号発生器のクロック周波数を、送信側のクロック周波数より故意に少しだけずらすことで両方のPN符号系列の相対位相をずらし、サーチを行う。符号系列の位相が合うと、大きな相関出力が得られるため積分器の出力がスレシホールド・レベルを越えることになる。このレベル検出信号により、クロック周波数を送信側と同じ周波数にしてサーチを停止する。受信側クロック発振器にはVCOを用い、VCOの制御電圧をロック時には送信側のクロック周波数と同じ周波数になるように電圧を設定し、サーチ時にはロック時より制御電圧が高くなるようにして、クロック周波数をオフセットさせている。同期捕捉部の回路図を図-8に示す。

VCOには、MC4024を水晶振動子（3.579545MHz）と組み合わせて使用した。

同期捕捉部で符号系列の位相同期が確立される訳であるが、そのままでは送・受信両方のクロック周波数が全く同じ周波数を保ち続けることは難しくクロック信号の位相がずれていくので同

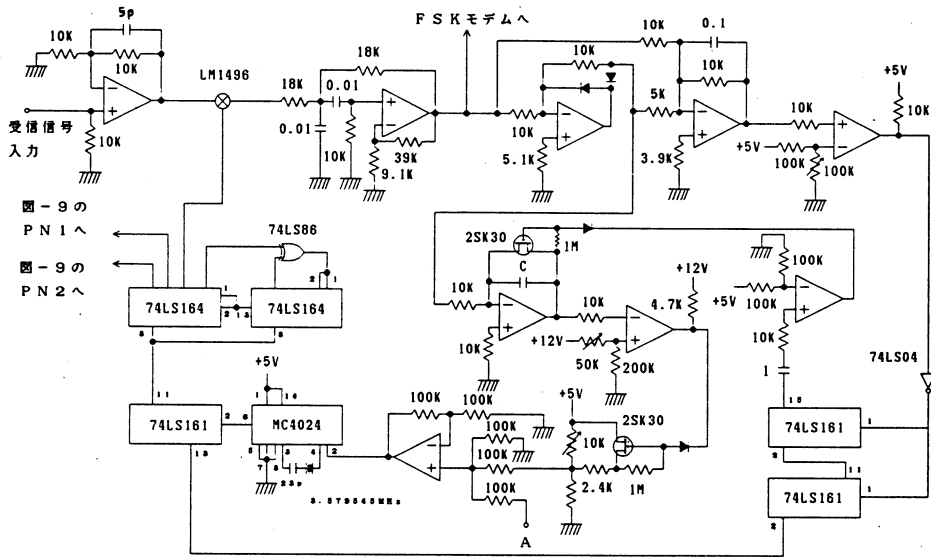


図-8 同期捕捉部の回路図

期が外れてしまう。又、同期捕捉時に符号系列の位相は合うが、クロック信号の位相ずれまでは合わせることができない。このクロック信号の位相ずれを補正し同期状態を保持するための回路が同期追跡部である DLL である。DLL は、図-7に示すように PN 符号発生器のシフトレジスタの $N - 1$, $N + 1$ の出力、即ち、 ± 1 ビット遅延した符号系列を取り出して、それぞれ、受信した SS 信号と相関をとる。その相関出力を帯域通過フィルタで搬送波成分を増幅した後、整流検波器で信号の振幅の大きさを取り出し両方の信号の差を差動増幅器で取り出し、低域通過フィルタ (LPF) を通して雑音を除去して、これを VCO の制御電圧に加えることでクロック周波数の微調整を行い、クロックの位相を補正し、同期を保持する。今、受信側の PN 符号が送信側 PN 符号系列よりも位相が 1 ビット以内で遅れているとすると、検波器(1)の相関出力が大きくなり、二つの検波器の差をとることによりプラスの DLL 出力が得られる。この出力を VCO の制御電圧に加えることで VCO の制御電圧が上がり、その結果 VCO の発振周波数は高くなり、PN 符号の位相ずれが小さくなる方向に移動する。又、逆に位相が進んでいる場合も同様に検波器(2)の相関出力が大きくなり、誤差信号はマイナスとなり VCO の発振周波数を低くする。このようにして、DLL は PN 符号系列の位相がゼロの点を中心に追跡点が常にどちらかに移動し、同期を保持することが出来る。

LPF には遮断周波数 100Hz とし、オペアンプを使ったアクティブフィルタで構成した。同期

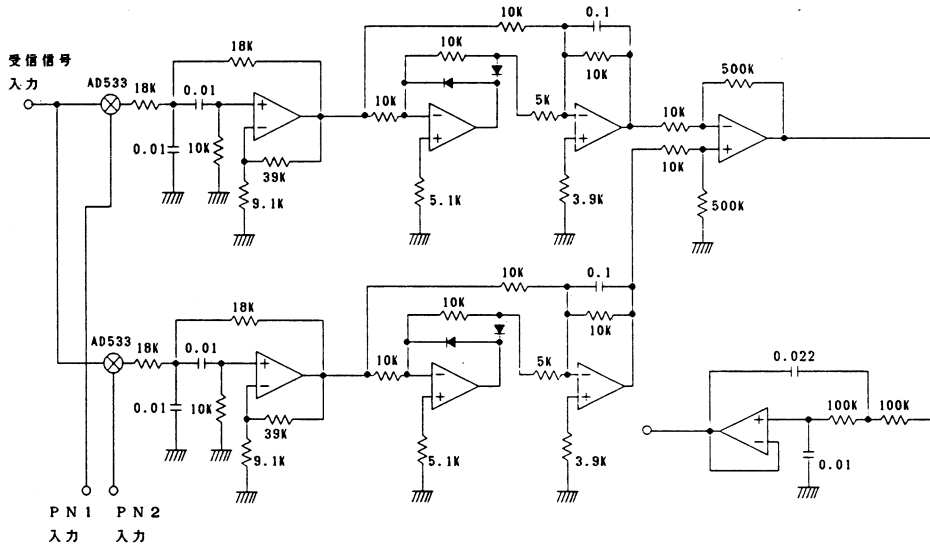


図-9 同期追跡部の回路図

追跡部の回路図を図-9に示す。

(2) 同期捕捉時間

スライディング相関方式による同期捕捉にかかる時間の理論値について考えてみる。サーチ時のクロック周波数を f_s 、ロック時のクロック周波数を f_o で表すと、サーチ速度は、 $|f_s - f_o|$ である。これは1秒間にサーチできるPN符号系列のビット数を表している。同期捕捉には最大で一周期分サーチする必要があるので、PN符号系列の長さを $m = 2^n - 1$ とすると、最大同期捕捉時間 t_m は、

$$t_m = m / |f_s - f_o| \tag{1}$$

で求められる。

又、サーチ速度は同期検出回路の立ち上がり時間よりも速いと判定ができなくなる為、最大のサーチ速度は、積分回路の時定数により制限されることになる。

(3) スレシホールド・レベルの設定

同期の検出の際に設定するスレシホールド・レベルと雑音レベル及び雑音+信号レベルの三者の関係を図-10に示す。

信号と雑音の密度関数及び検出器のスレシホールド・レベル γ が与えられると、この検出器の信号検出確率 P_d は、

$$P_d = \frac{\int_{\gamma}^{\infty} f(S+n) dV}{\int_0^{\infty} f(S+n) dV} \tag{2}$$

であたえられる。又, 信号がなくても雑音によって同期を検出してしまいう同期誤り率 P_f は,

$$P_f = \frac{\int_0^{\infty} (\text{noise}) dV - \int_0^{\gamma} g(\text{noise}) dV}{\int_0^{\infty} g(\text{noise}) dV} \quad (3)$$

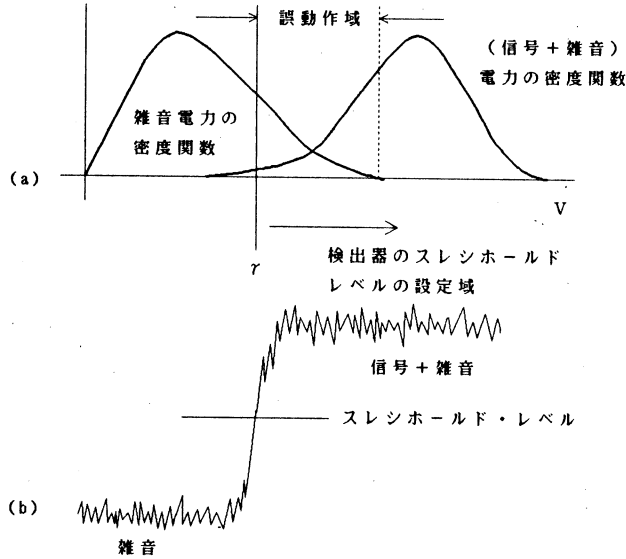


図-10 スレシホールド・レベルと信号及び雑音の関係

となる。

これらの式は, スレシホールド・レベル γ より大きい信号はスレシホールド検出器をトリガし, γ より大きい雑音は誤動作を引き起こすことにより求めることができる。 γ の設定を低くすれば, 信号密度関数のうち, スレシホールド・レベルを越える部分が増大し, 同期検出の確率は高くなるが, その反面, スレシホールドを越える雑音も増大して, 同期誤り率も高くなるのがわかる。

4. 実験方法及び結果

4.1 実験1: 同期捕捉時間の測定

SS 信号が受信機に入力されてから, 同期が捕捉されるまでの時間を測定する実験である。測定回路のブロック図を, 図-11(a)に示す。

送信側の SS 信号の出力されるところにアナログ・スイッチを設けて, これを ON させることで信号を伝送線に出力する。アナログ・スイッチを ON・OFF させるための信号は, スイッチング・パルス発生回路から出力する。受信側で逆拡散された信号のレベルを検出することで同期が捕捉されたことを判定する。スイッチング・パルスを A, レベル検出器の出力を B とすると, A,

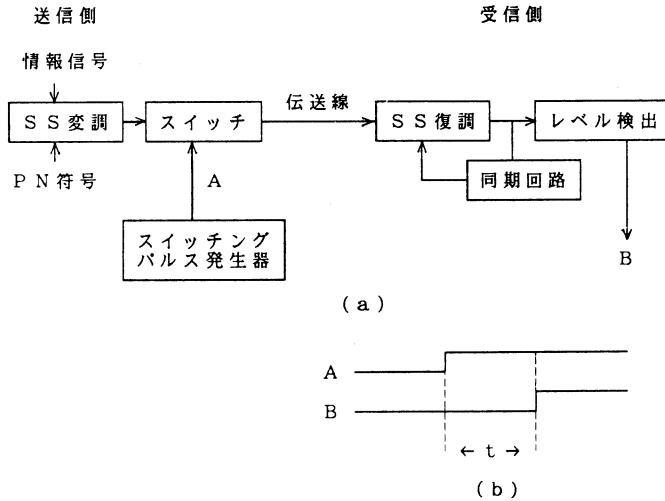


図-11 同期捕捉時間の測定回路

Bは図-11(b)のような関係の信号である。このAの立上からBの立上りまでの時間 t を、時間間隔測定のできるユニバーサル・カウンタ (TR-5766, タケダ理研) により測定した。このカウンタは10マイクロ秒 $\sim 10^{-3}$ 秒の時間間隔の測定が可能である。情報信号は2.2KHzの正弦波信号とし、信号レベルは一定となる様にして、M系列符号の次数を5 \sim 15次までかえて測定した。これは、M系列符号の一周期の長さかわることに相当する。測定値は10回測定して平均値をとったものである。測定結果を図-12に示す。

サーチを始める場所が同期点からどれだけ離れているかにより同期捕捉に要する時間が変わってくる。捕捉に失敗せずに一度で同期がとれるものと仮定すると、同期捕捉のためのサーチには最大で符号系列の一周期分をサーチする必要があるが、当然、M系列一周期の長さが長くなれば長くなるほど、同期捕捉時間は長くなる。実験結果にも測定回数が少なかったためか、多少のばらつきはあったが、この傾向がはっきりと現れている。M系列符号の代わりに1ビットの繰り返しパルスを使用した場合、サーチは1ビット以内となるので、最小の捕捉時間とすることができる。この時間の測定結果の平均値は、約1.36msとなり、この値を一周期分の長さ $m = 2^n - 1$ 倍すると、実験結果の値にそれぞれ近い値となる。この実験においてサーチ時の周波数は、約229KHzとなるように設定したがVCOの発振には水晶振動子を使用しているため、水晶の不安定領域で発振することになり、サーチ時の周波数は一定していないため、理論的に比較することができない。参考までに、サーチ時299KHzとしたときの最大同期捕捉時間の理論値を計算してみたところ、最大値であるにもかかわらず、実験値よりもかなり小さい値 (9次の場合、実験値483.5ms、に対して理論値96.8ms) となってしまう。この原因としては、実験値にはサーチ速度

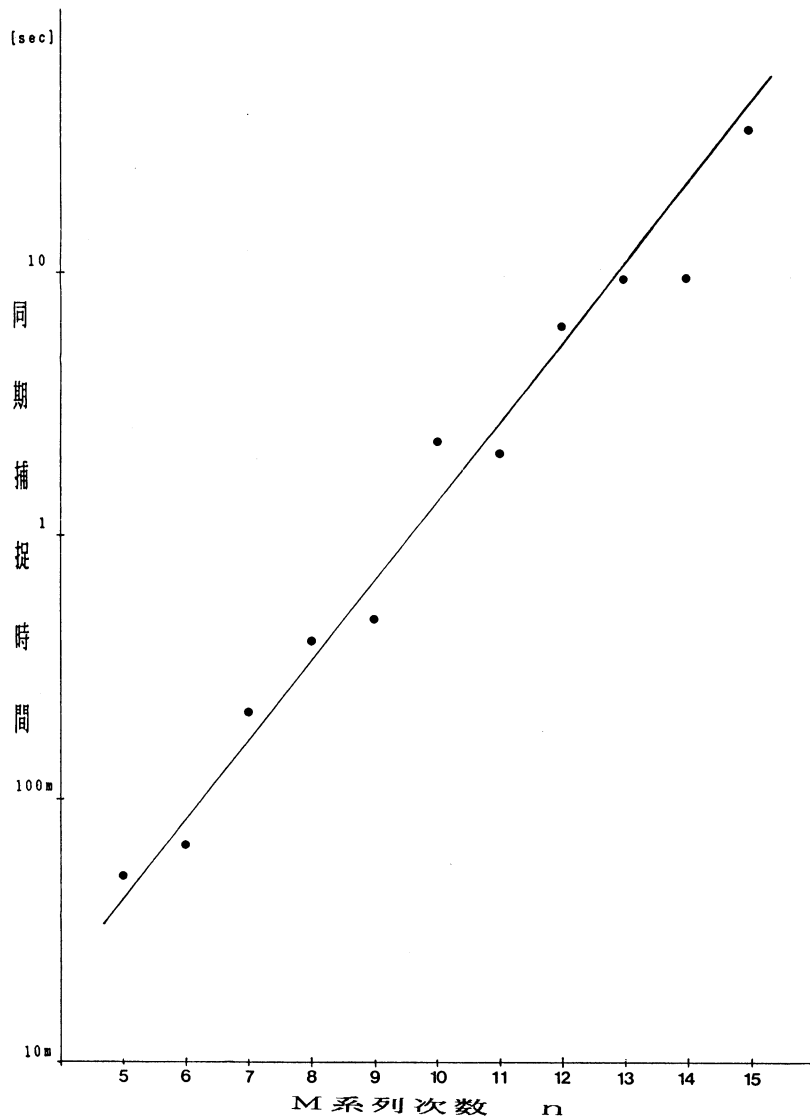


図-12 実験1 同期捕捉時間測定結果

が一定でないこと、フィルタや検波器、積分回路等での時間的な遅れが理論値には含まれていないこと、一度目のサーチで同期を捕捉できない場合があること等が考えられる。

4.2 実験2：誤り率の測定

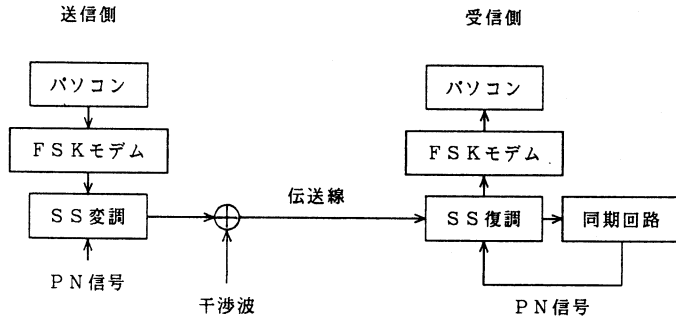


図-13 実験2 回路構成図

図-13に示すように、送受信1組とし、伝送路に干渉波を加えて、伝送路における信号対雑音比に対する文字誤り率の測定を行った。

この際、送信信号出力は一定とし干渉波の大きさを可変して信号対雑音比を変化させた。伝送する情報はA~Z迄の文字とし、10万文字送信した受信側で誤った文字の数を計数する方法で測定した。干渉波として、7次M系列で2.2KHzの正弦波信号をSS変調したものを信号の大きさに変えて伝送路に挿入した。

図-14に実験結果を示す。同期回路を外した状態でPN符号を送信側から受信側のSS復調器に送り、同期のはずれがない状態にして同様の実験を行った。その結果を図-15に示す。

この実験の当初の目的としては、データを伝送し、誤り率を測定することで同期回路の追跡性能を調べ、雑音が増すと同期回路にどのような影響が出てくるかを見ることにあった。しかし、同期回路に影響が出てくる前に復調信号の雑音が多くなり、FSKの復調の際に、モデムにより誤った信号として受信されてしまう。同期回路をはずして受信側と同じPN符号系列を送り、同期のはずれが絶対に生じない状態で測定した結果が図-14である。同期回路を使用した場合の結果、図-14と図-15を比較してみると、僅かではあるが、同期回路を使用している場合の方が予想に反して雑音に対して強いという結果になっている。この原因について考えてみると、送信側で平衡変調されるとき、平衡変調器により出力信号の符号系列に立上りの遅れが生じ、送信側と同じPN符号を使用して復調すると遅れ部分の影響が出て、復調信号の雑音となる。一方、同期回路は送信側とは独立しているので、送信信号の符号系列との相関により位相を検出して、クロック信号の位相を最適に合わせるように努めるので、復調信号の雑音が多少改善されたのではないかと

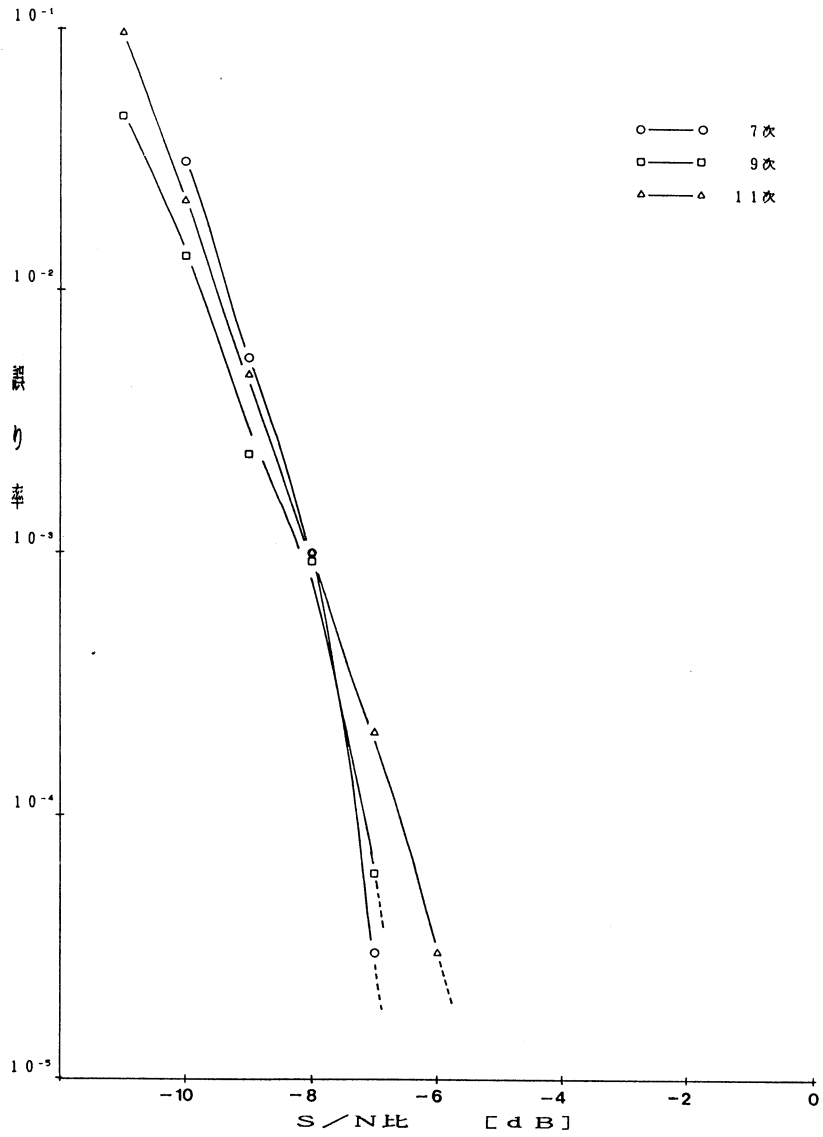


図-14 実験2 誤り率特性(1) 同期回路使用時

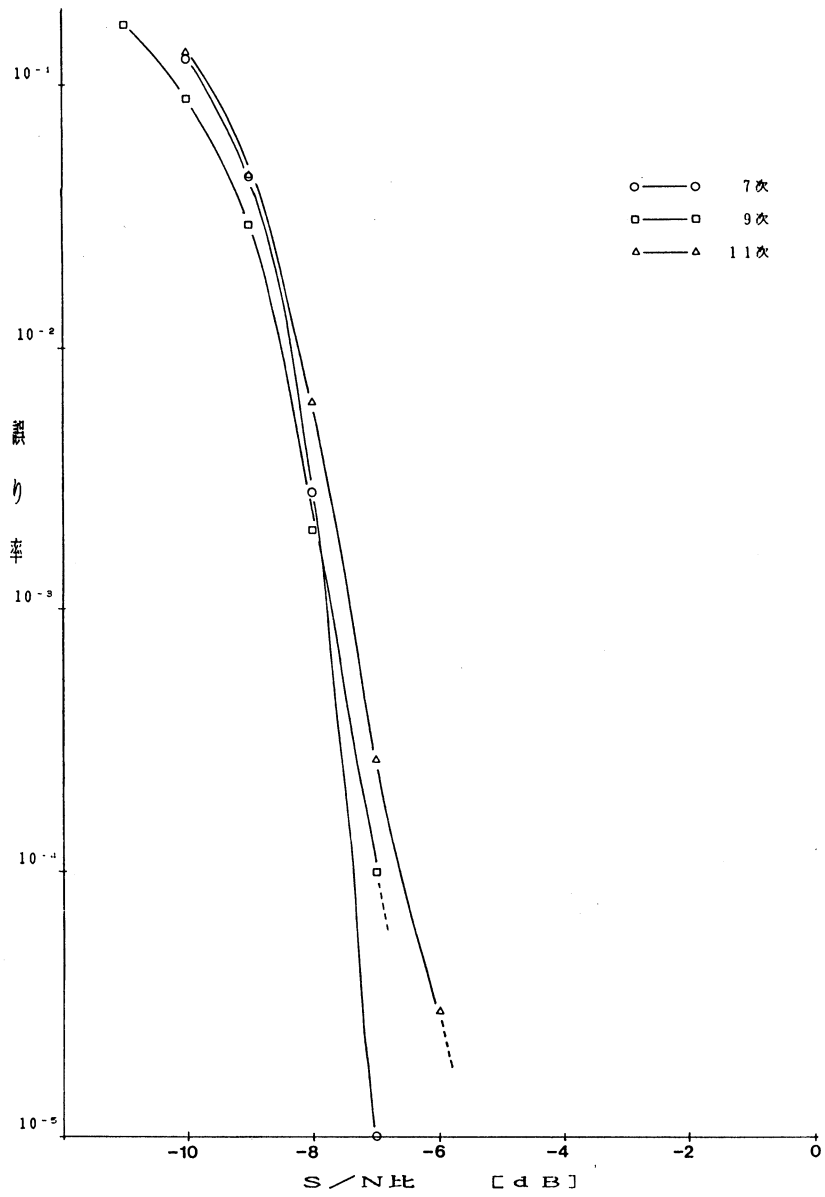


図-15 実験2 誤り率特性(2)

と考えられる。なお、図-14、図-15ともグラフには表示されていないが、 -5 dB 以上の S/N 比に対する誤り率はすべて 10^{-5} 以下である。

5. おわりに

本研究は、SS 通信方式におけるパソコン間データ通信のための同期回路として相関をとり位相を検出することによって同期をとる、スライディング相関及び DLL 方式についての研究を行ってきた。本システムにおいて、この方法を採用したのは、クロックを独立化した場合、符号系列間の位相を相関により検出するの必要があり、スライディング相関は相関方式として構成が単純であり、また DLL による同期追跡は、現在では最も一般的なものとなっているもので、本システムだけでなく搬送波のあるものならば、帯域通過フィルタの中心周波数をかえることで、他のシステムにも利用が可能であると考えたからである。今回作製した同期回路により、ほぼ満足のいく安定な同期を得ることができた。しかし、まだ完璧なものとは言えず、いくつかの問題点がある。

まず第一に、同期の捕捉時間についてである。同期の捕捉時間は、使用する PN 符号系列の長さに大きくかかわってくるものであり、そのシステムでどのくらいの長さの PN 符号系列を使用する必要があるかが問題となる。今回の実験で使用したような短い PN 符号系列を使用する場合は、ほとんど問題はない。例えば、9 次の M 系列符号（長さ511ビット）の場合、実験値によると平均同期捕捉時間は約500msであり、通信を始める際の初期接続のため待ち時間としては、全く問題がないといってよい。しかし、短い符号系列を使用すると、妨害波との相互相関をとると反復性を持つ相互相関パターンが現れる可能性があり、信号の復調に際して同期の誤認やオフセットを生じさせることになる。又、使える符号数が少ないという問題も出てくるので、短い符号系列はあまり好ましくない場合がある。このような場合、長い符号系列を使用する必要があるが、この同期回路のままでは時間がかかり過ぎるという問題が出てくる。この問題の解決法としては、プリアンブル符号等の同期のための短い符号を用いて、捕捉時間を短く抑える方法などがあげられる。

これに関連して、直接拡散方式における最も短い符号長は次の経験則により次のように求められる。

$$\frac{\text{符号ビット速度}}{\text{符号長}} < F_{low} \quad (4)$$

ここで、 F_{low} は復調信号に含まれる最低周波数である。即ち、符号の繰り返し速度が情報の通過帯域に落ち込んではいけないということを意味している。本システムにこれを当てはめると、符号の長さが約186ビットあれば良く、これは8次以上の M 系列であれば良いことになる。しかし実際には、チャンネル数の問題も絡んでくるのでなるべく長い符号を使用した方が良い。

第2に、多重化した場合に全ての局が独立にクロック発振器をもつ非同期システムにおいては、クロック周波数のずれが各局間にあたるため干渉波の影響が無視できない。このような他局間干渉は同期回路において相関特性に歪みを与え、位相誤差を与えるために同期がとりにくくなる可能性がある。

今後は、他局間干渉の除去に関する研究と並行して、より確実な同期回路に関する研究を行ないSS通信方式によるシステムの実用化を図らなければならない。

なお、本研究の遂行にあたり、ご協力いただいた松川昌章氏（現日立ビデオエンジニアリング株式会社）に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) R. C. Dixon 著, 立野敏, 片岡志津雄, 飯田清共訳: 最新スペクトラム拡散通信方式, JATEC 出版
- 2) John G. Proakis: Digital Communicatins, P. 554~P. 597, McGRAW-HILL Book Co. (1985)
- 3) R. L. Pikhnlitz, D. L. Schilling, L. B. Milstein: Theory of Spread Spectrum Communication-A Tutorial, IEEE Trans, CON-30, P. 884~P. 885 (1982)
- 4) Charles E. Cook, Fred W. Ellwesick, Laurence B. Milstein, Donald L. Schilling: Spread Spectrum Communications, IEEE PRESS
- 5) 広崎膨太郎: スペクトラム拡散通信の応用について, 電気学会誌, 105巻, 1号, p. 45~p. 49(1985)
- 6) 角川靖夫, 塚本賢一, スペクトラム拡散通信とその適用分野 I, 電子通信学会誌, Vol. 65, Vol. 9, p. 967~p. 971(1982)
- 7) 角川靖夫, 塚本賢一, スペクトラム拡散通信とその適用分野 II, 電子通信学会誌, Vol. 65, Vol. 10, p. 1053~p. 1059(1982)
- 8) 柏木潤: M 系列再発見, 計測と制御, Vol. 20, No. 2, p. 236~p. 245(1981)
- 9) 吉谷清登: PN 系列一特に M 系列について, 電波研究所季報, p. 249~p. 263(1971)
- 10) 帆保祐一, 黒島利一, 杉岡一郎, 秋山稠: 符号分割を用いたパソコン間多重データ通信について, 電気関係学会北海道支部大会248(1986)
- 10) 山田哲也, 黒島利一, 杉岡一郎, 秋山稠: SS 通信方式を用いたパソコン間データ通信について, 電気関係学会北海道支部大会247(1987)
- 12) B. P. Lathi 著, 中山惣之助, 宇佐見興一共著: 通信方式, マブロウヒルブック(1977)

ヒト型結核菌 *Mycobacterium tuberculosis* 遺伝子のクローニングと 組み換え遺伝子の大腸菌における発現

菊池 慎太郎・Papachan E. KOLLATTUKUDY*

Cloning and Expression of *Mycobacterium tuberculosis* DNA in *Escherichia coli*

Shintaro KIKUCHI and Papachan E. KOLLATTUKUDY*

Abstract

Although *Mycobacterium tuberculosis* is one of the first identified pathogenic bacteria in man, the biochemical and immunochemical characterization of the bacterial antigens have been limited by difficulties in dealing with this bacilli *in vitro*.

As the the cloning and DNA recombination technique have been considered to be an effective strategy to survey the genes encoding protein antigens relevant for such studies, *M. tuberculosis* genomic DNA was isolated and the fragments with randomly generated endpoints were used to construct a lambda gtlI recombinant library. The antigens encoded by the recombinant could be accumulated in *Escherichia coli* strain defective in protein degradation (*lon*), because gtlI permits insertion of foreign DNA in the β -galactosidase structural gene, *lacZ*, and promotes synthesis of hybrid proteins. A very low molecular weight polypeptide, compared with the size of recombinant DNA, was detected by Western blotting with hyperimmune rabbit serum. These results have indicated that mycobacterial DNA could be expressed in *E. coli*, but the transcription-translation apparatus of this enterobacteria would recognize some *M. tuberculosis* amino acid-coding-DNA sequence as the initiation or termination codon.

1. はじめに

Mycobacterium 属細菌はグラム陽性の桿菌で、*Mycobacterium smegmatis* や *M. phlei* などのように土壤中に生息するものから、ヒト型結核菌 *M. tuberculosis* やらい（癩）菌 *M. leprae* に代表される病原菌にいたるまで自然界にひろく分布し、それらの共通の性質である抗酸性にちなんで抗酸菌と総称されている¹⁾。抗酸菌は、また、その生育速度にもとづいて、世代時間が3～4時間の速育菌 fast-grower (*M. smegmatis* や鳥型結核菌 *M. avium* など) と、生育がきわめて緩慢でときとして世代時間が数週間にもおよぶ遅育菌 slow-grower (*M. tuberculosis* あるいは *M. intracellulare* など) とに大別されるが、菌種によって生育速度に差異の生じる原因についてはまだ不明な点が多く、わずかに、その遺伝子サイズが速育菌では平均 4.8×10^9 ダルトン、また遅育菌では平均 3.5×10^9 ダルトンと、前者が後者よりも幾分大きな遺伝子を有していることが報告されているの

* Professor and the Chair-man at Institute of Biological Chemistry, Washington state University, 99163 U.S.A.

みである^{2,3)}。

よく知られているように *M. tuberculosis* は R. Koch によって初めて近代免疫学的、病原細菌学的な見地からの記述のなされた抗酸菌であるが^{4,5)}、かつては猛威をふるったこの病原菌も、その後の抗生物質の発見やイソコチン酸ヒドラジド (INH) などの化学療法剤の発展にともなって減少の方向にある。しかし、今日でもなお全世界で三千万人の人々がこの抗酸菌に感染しているものと推定されており、特に発展途上国においては毎年二百万以上の新たな感染者が発生しているといわれている⁶⁾。わが国においては結核予防法に基づく予防・治療の一貫した方策がとられ、ウシ型結核菌 BCG 株 (*M. bovis* Bacillus Calmette-Guerin) 培養濾液から調製された糖タンパク質を主たる抗原とする予防接種が実施されているが、この抗原は免疫化学的な特異性にとぼしく、その有効性について制限の付与される場合もあった。したがって、この抗原の生化学的、免疫化学的な解析は至急の研究課題とはされながらも、*M. bovis* が運育菌であることや抗酸菌の取り扱いが繁雑であることなどのために有効な研究方法が確立されておらず、その開発のまたれる状況であった。

一般的に、このような抗原タンパク質の解析のためには、それをコードする遺伝子 (デオキシリボ核酸, DNA) のクローニングと、クローニングした遺伝子を生化学的に解析の容易な一般細菌細胞で発現させる、いわゆる遺伝子組み換え技術がきわめて有効なアプローチと考えられている。しかし抗酸菌は他の細菌とは異って、その細胞表面に多量の脂質を含有するため⁷⁻¹⁰⁾ 温和な条件下に細胞を破碎して遺伝子組み換えに使用しうる分子サイズの DNA を抽出することが困難であり、したがって従来の組み換え技術をそのまま抗酸菌に適用することはできないとされてきた。われわれは抗酸菌をシクロセリン存在下で培養するとこの細菌が細胞壁溶解酵素リゾチームに対して感受性となり、その結果一般細菌と同様きわめて温和な条件下に細菌から DNA を抽出しうることを見出した。さらに、こうして得た抗酸菌 DNA を発現ベクターファージ lambda gtlII によって大腸菌 DNA に組み換えたところ、抗酸菌抗原タンパク質をコードしていると推定される遺伝子を検出することができ、その遺伝子構造について若干の知見を得たのでそれらの結果を以下に報告する。

2. 実験材料および方法

使用菌株の培養と DNA の抽出

ITR Biochemical Research (米国シカゴ市) より譲与された *M. tuberculosis* BCG 361 株を Davis らの方法¹¹⁾ に従って PTO 培地、および Sauton 培地で培養した。菌の生育が対数増殖期前期に達した時、あらかじめ濾過滅菌した D-シクロセリンを最終濃度 1 mg/ml となるように培地に添加し、さらに 7 日間培養を続けた。培養後、遠心分離によって集菌した菌体を 50mM エチレンジアミン四酢酸 (EDTA) / 50mM トリス-塩酸緩衝液 (pH8.0) からなる溶菌緩衝液に懸濁し、こ

ヒト型結核菌 *Mycobacterium tuberculosis* 遺伝子のクローニングと組み換え遺伝子の¹²⁾大腸菌における発現

れに最終濃度 1 mg/ml となるように卵白リゾチームを加え 37°C で 90 分間溶菌反応をおこなった。反応後、溶菌液に最終濃度 1 M となるように塩化ナトリウム水溶液を加え、次いで等容のクロロホルム—フェノール混液 (1 : 1, v/v) を加えて室温で 15 分間攪拌した。3,000×g にて 30 分間遠心分離を行って水層を分取した後、これに等容のクロロホルム—イソアミルアルコール混液 (24 : 1, v/v) を加えて 15 分間攪拌した。3,000×g にて 15 分間冷却遠心分離を行って水層を分取し、これに 2.5 倍容の冷エチルアルコールを加えて粗 DNA を析出させた。こうして得た粗 DNA を 0.4 塩化ナトリウム水溶液に懸濁し、1.5% (w/v) セチルトリメチルアンモニウムブロマイド処理による多糖類の除去を行った後、0.5 μg のウシすい臓由来 RNA 分解酵素 (RNase A) によって残存するリボ核酸を除き、再度クロロホルム—フェノール処理、冷エチルアルコール沈澱をおこなって精製 DNA を得た。

DNA ライブラリーの作成

精製 DNA を 0.1 M 塩化ナトリウム / 0.1 μM EDTA / 20 μM トリス—塩酸緩衝液 (pH 7.5) に溶解し、25 ゲージの皮下針を通して平均 5,000 塩基対 (5 kb) の長さに切断した。切断の程度は水平型アガロースゲル電気泳動によってモニターした。次いで DNA 溶液に 50 μl の *Eco* RI メチラーゼ緩衝液 (1 μM EDTA / 50 μM トリス—塩酸緩衝液, pH 7.5) と 5 μl の 10 μM S-アデノシル-L-メチオニン、および過剰量の *Eco* RI メチラーゼを加えて DNA の *Eco* RI 切断をメチル化した後、T₄ DNA ポリメラーによって DNA 末端をプラント化した。この DNA 溶液に等容の冷エチルアルコールを加えて DNA を沈澱回収した後、これを 10 μM 塩化マグネシウム / 10 μM DTT / 50 mM トリス—塩酸緩衝液 (pH 7.5) に溶解して T₄ DNA リガーゼによる *Eco* RI リンカー (8 量体) の接続をおこなった。以上のごとく処理した DNA フラグメントをエチジウムブロマイドをふくむアガロースゲルによって電気泳動的にサイズ別に分離し 1-10 キロ塩基対のフラグメントを Bio-Rad 社製の Bio-Trap 装置を用いて回収した。この DNA フラグメントを 0.01 μM EDTA / 10 μM トリス—塩酸緩衝液 (pH 7.5) に溶解した後、定法に従ってファージ lambda gtl1 (Giga-Pack 社由来株) に *in vitro* でパッケージし、次いで大腸菌 Y-1088 株を宿主として増幅した¹²⁾。

ライブラリーのスクリーニング

ライブラリーのスクリーニングでは *M. tuberculosis* 菌体抽出液を抗原として家兎により作成した抗血清 (ガンマグロブリン画分) を用いて Young と Davis の方法に従っておこなった^{13,14)}。すなわち、0.2% (w/v) マルトース添加培地 (LB) で培養して細胞表面のファージ受容体を誘導した大腸菌 Y-1090 株懸濁液 0.2 ml を約 5×10^4 pfu (プラーク・フォーミング・ユニット) のファージ粒子と混合した。次いでこれを 37°C で 15 分間温置して細菌細胞表面にファージ粒子を吸着させた後、2.5 ml の LB ソフトアガーと混和してプレート上に分散した。プレートには、あらかじめ LB ハードアガーを入れて固化させておいた。プレートを 42°C にて約 4 時間培養したと

ころプラークの形成が認められたので、あらかじめイソプロピルチオオガラクトシド (IPTG) で飽和させておいたニトロセルロースフィルターをプレート表面に重層し、プレートを37°Cに移してさらに3時間培養を続けた。フィルターを取り出してTES緩衝液 (0.1M塩化ナトリウム/0.01mM EDTA/50mM トリス-塩酸緩衝液, pH 8.0) で洗浄した後、5% (w/v) の牛血清アルブミン (BSA) をふくむTES緩衝液 (B-TES) に30分間浸してブロックをおこない、次いでフィルターをTES緩衝液で 10^3 倍に希釈した抗血清をふくむB-TESに移して室温で1時間抗原-抗体反応をおこなわせた。反応後フィルターを、TES緩衝液、および0.05% (w/v) Tween80をふくむTES緩衝液で洗浄し、さらに放射性ヨード標識プロテイン A (NEN社, ^{125}I -Protein A, 比活性25Ci/g) をふくむB-TESに移して抗原-抗体複合物の標識をおこなった。フィルターをTES緩衝液、およびTween80をふくむTES緩衝液で洗浄後、風乾させて医療用レントゲンフィルム (コダック社, RX-グレード) によるオートラジオグラフィーをおこなった¹⁵⁾。

3. 結果と考察

M. tuberculosis DNA のlambda gt 11への組み換えとライブラリー作成の概略を図1に示した。シクロセリン存在下で培養してリゾチーム感受性とした*M. tuberculosis* より分離、精製したDNAの260 μm および280 μm における吸光度比は1.83であり、この結果から精製標品にRNAの夾雑はないものと推定されたので (図2), これを機械的に切断して得られた1-10キロ塩基対のDNA断片にEco RI リンカーを接続しlambda gt11のEco RI サイトに組み込んだ。その後、定法

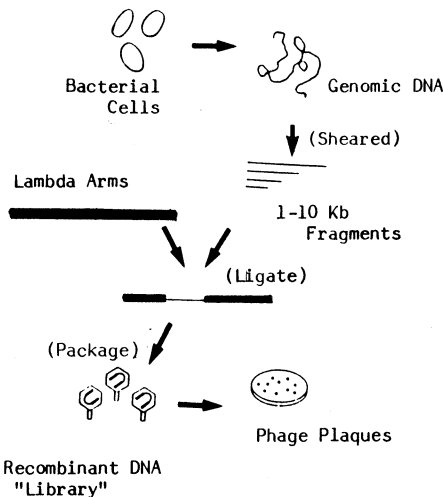


Fig. 1 Strategy of construct a comprehensive recombinant DNA expression library.

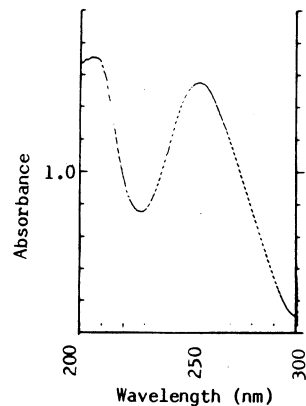


Fig. 2 Absorption spectrum of the purified DNA preparation scanned with a Beckman UV/VIS computing scanner Model DU-8.

ヒト型結核菌 *Mycobacterium tuberculosis* 遺伝子のクローニングと組み換え遺伝子の¹⁵大腸菌における発現

に従って、*in vitro* パッケージを行ってファージ粒子とし、これを大腸菌に感染させライブラリーを作成した。lambda gt11 は、その粒子内にイニシエータ（転写開始領域）をふくむ大腸菌のβガラクトシダーゼ遺伝子（*lac Z*）を有するので、外来遺伝子がこの酵素遺伝子に融合遺伝子として組み込まれると大腸菌のタンパク質合成装置による外来遺伝子からのタンパク質合成がおこなわれる。すなわちファージ粒子内に組み換えられた外来遺伝子がコードするタンパク質はβガラクトシダーゼとの融合タンパク質として大腸菌細胞内で合成されるので、この酵素活性を指標として組み換えの可否を容易にスクリーニングすることができる。この方法によってわれわれは 3×10^4 pfu の一次ファージ粒子を得、さらに大腸菌 Y-1088株を宿主として1 ml 当り 10^{11} pfu にまで増幅した。これら増幅二次ファージ粒子について5-クロモ-4-クロロ-3-インドイル-β-ガラクトシド（X-gal）を基質とするβ-ガラクトシダーゼ活性による組み換え率の測定をおこなったところ、その約66%が *M. tuberculosis* DNA を組み込んでいることが明らかとなった。次いで、*M. tuberculosis* 抽出液を抗原として作成した抗血清をプローブとし、これら組み換え体のスクリーニングを行ったところ4個のプラークに陽性シグナルが認められた。その一例を図3に示した。図3においては強く検出された陽性シグナルと微弱な陽性シグナルとを示してあり、これらはそれぞれ検出される陽性シグナルの上限と下限とを示すものである。シグナルの強

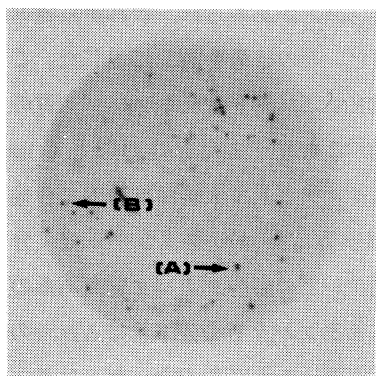


Fig. 3 Arrays of antigens from mycobacterial DNA clones probed with rabbit hyper-immune serum. The arrow (A) and (B) were typical examples of a strong signal and a weak one, respectively.

弱は合成されたタンパク質の大きさ(すなわち、組み換えられた遺伝子の大きさ、あるいは転写・翻訳の効率)、そのタンパク質のもつ抗原決定基の数などによって生じるものと考えられる。これらの結果は、4種の *M. tuberculosis* DNA が lambda gt11のβガラクトシダーゼ遺伝子下流に正当な方向性で組み換えられ、また組み換えられたDNAは大腸菌タンパク質合成装置による読み取りが可能な塩基配列を有していること、したがってその結果、プローブである抗血清と免疫化学的に反応する抗原タンパク質が合成されたことを示すものである。

次いで二次および三次スクリーニングをおこなって、これら4種のファージをそれぞれ単一に精製することを試み、最終的に1種の精製ファージ粒子を得た。このファージ粒子を大腸菌 Y-1088株で増幅した後、定法に従ってファージDNAを抽出し¹⁶⁾、これを制限酵素 *Sac* I、あるいは *Kpm* II、または両者の混合酵素液で切断した。その切断パターンを水平型アガロースゲル電気泳動によって検討した結果を図4に示した。

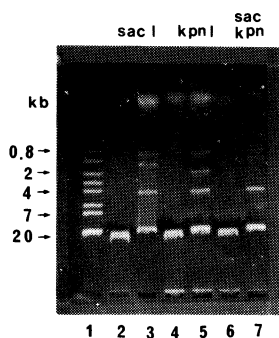


Fig. 4 Agarose gel electrophoresis of DNA from gtl1: *M. tuberculosis* recombinant molecules before (lanes 2, 4, and 6) and after (lanes 3, 5, and 7) digestion with restriction enzymes indicated. Bacteriophage lambda DNA digested with Sty I was used as size marker (lane 1). The sizes of fragments were given, in Kb, to the left of the gel.

約 10^4 に相当する泳動位置に抗血清と反応するタンパク質バンドが認められ、これから組み換えDNAにコードされているタンパク質の分子量が推定された。その結果を図5に示した。ここでアミノ酸の平均分子量を150とすると、2キロ塩基対のDNAにコードされるタンパク質の分子量は約 10^5 であり、また上述のごとく lambda

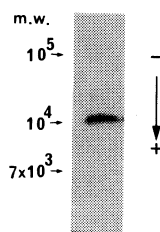


Fig. 5 SDS-polyacrylamide gel electrophoresis and Westernblotting analysis of hybrid protein accumulated. Lysate were loaded on polyacrylamide, subjected to electrophoresis, and blotted on a nitrocellulose filter. The filter was incubated with anti-serum followed by incubation with 125 I-protein-A, and processed for autoradiography.

対照として lambda DNA (全長48.6キロ塩基対)の制限酵素 Sty I 消化物を使用した。図4に示されるごとく、ファージ粒子は約2キロ塩基対の *M. tuberculosis* DNA を組み込んでいた。この精製ファージをタンパク質分解酵素欠損変異株 (*lon*⁻)である大腸菌 Y-1089株に感染させ、37°Cで3時間培養してタンパク質合成を誘起した。次いで培養温度を42°Cにシフトして、ファージ・サイクルを溶原サイクルから溶菌サイクルへ変換しファージ溶菌能の誘導によって大腸菌を溶菌させ、組み換えDNAにコードされているタンパク質をふくむ大腸菌抽出液を得た。この抽出液を定法に従ってポリアクリルアミドゲル電気泳動した後¹⁷⁾、ウエスタン・ブロッティング法によって組み換えDNA由来のタンパク質を解析した¹⁸⁾。その結果、分子量

約 10^5 であり、また上述のごとく lambda gtl1をベクターとして大腸菌細胞内で合成されるタンパク質はβ-ガラクトシダーゼ(分子量約 1.8×10^6)との融合タンパク質であるので、検出されるタンパク質の分子量はこれらの総計と考えられる。しかしながら、ウエスタン・ブロッティングにおいてタンパク質バンドが分子量約 10^4 に認められたことは、組み換えられた2キロ塩基対の *M. tuberculosis* DNA のうちのわずか数百塩基対のみが大腸菌細胞内で転写・翻訳されたにすぎないことを示すものであり、このことから、組み換えられた *M. tuberculosis* DNA 鎖には *M. tuberculosis* にとってはアミノ酸をコードする塩基配列であるが、大腸菌に

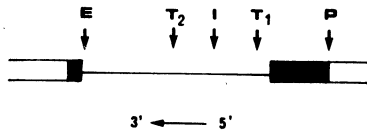


Fig. 6 Molecular map of galactosidase: *M. tuberculosis* recombinant region. ■, β -galactosidase structural gene; —, *M. tuberculosis* DNA inserted; T₁, T₂, base sequences recognized as the termination codon by *E. coli*; I, base sequences recognized as the initiation codon by *E. coli*; E, *Eco* RI cleaving site. The orientation of transcription was indicated by 5' and 3' ends.

よってイニシエーター（開始領域）あるいはターミネーター（終結領域）として認識される配列の存在することが推定された。すなわち、図6に示したごとく、組み換えDNA鎖において、まず、 β -ガラクトシダーゼ遺伝子プロモーターに依存したタンパク質合成が開始され、これは *M. tuberculosis* 由来DNA鎖上に存在すると推定される“大腸菌にとっての終結配列 T₁”によって終了する。ウエスタン・ブロッティングによってこのタンパク質が検

出されないことから、T₁は β -ガラクトシダーゼ遺伝子の下流に位置し、しかもこの酵素遺伝子のきわめて近傍に存在していることが示唆された。その後、開始領域Iからの第二のタンパク質合成がはじまり、終結領域T₂まで継続すると考えられる。IおよびT₂の β -ガラクトシダーゼ遺伝子下流における配位順は図6に示された通りであり、また前述のウエスタン・ブロッティングの結果からこれらふたつの遺伝子領域座の距離は、分子量10⁴のタンパク質をコードする塩基数であることが推定される。

微生物界における一般的な“タンパク合成開始塩基配列”あるいは“終結配列”以外の固有の配列によって、抗酸菌がタンパク質合成の調節をおこなっていることは遺伝子工学的にきわめて興味深く、さらに、この固有の塩基配列の詳細な解析は、抗酸菌タンパク質抗原の生化学的、免疫化学的研究と抗原の生物工学的生産に有意な情報を提供するものと考えられる。

参考文献

- 1) Ratlede, C. and Stantord, J.: The Biology of the Mycobacteria p. 471 (Academic Press 1982)
- 2) Sela, S.: Biochem. Biophys. Res. Commun. 136, 1136 (1986)
- 3) Patel, R.: J. Gen. Microbiol. 132, 1136 (1986)
- 4) Koch, R.: Dtsch. Med. Wochenschr. 17, 101 (1881)
- 5) Koch, R.: Berl. Klin. Wochenschr. 5, 765 (1881)
- 6) Bloom, B. R. and Godal, T.: Rev. Infect. Disease 5, 765 (1983)
- 7) Kikuchi, S. and Kusaka, T.: J. Biochemistry 92, 839 (1982)
- 8) Kikuchi, S. and Kusaka, T.: J. Biochemistry 94, 1045 (1983)
- 9) Kikuchi, S. and Kusaka, T.: J. Biochemistry 96, 841 (1984)
- 10) Kikuchi, S. and Kusaka, T.: J. Biochemistry 99, 723 (1986)
- 11) Davis, J. B. and Kollattukudy, P. E.: J. Biol. Chem. 260, 9695 (1984)
- 12) Glover, D. M.: DNA Cloning p. 49 (IRL Press 1985)

- 13) Young, R. A., Mehra, V., Sweeter, D., Buchanan, T., Clark-Curtiss, J. Davis, R. W. and Bloom, B. R.: *Nature* (London) 316, 450 (1985)
- 14) Young, R. A., Bloom, B. R. and Davis, R. W.: *Pro. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 82, 2583 (1985)
- 15) Kikuchi, S.: *Kawasaki Medical Journal* 13, 99 (1987)
- 16) Beuson, S. A. and Taylor, R. K.: *Bio Techniques* 18, 127 (1984)
- 17) Burnett, W. N.: *Anal. Biochemistry* 112, 195 (1981)
- 19) Gershoni, J. M. and Palade, G. E.: *Anal. Biochemistry* 131, 1 (1983)

本研究の一部は、1985年アメリカ生物化学会（於、ボストン）において発表したものである。

A Procedure for the Analysis of Long-Term Deflection of Reinforced Concrete Members and Its Adaptability

杉野目 章・井野 智・伊藤 正義・駒込 環

Akira SUGINOME^{*1}, Satoru INO^{*2}, Masayoshi ITO^{*3} and Tamaki KOMAGOME^{*4}

Abstract

For deformation analysis of partially cracked floor members of reinforced concrete, a procedure with some modifications to our earlier system is proposed.

Instead of its having relied on that concept of average for the oft-cited effective member stiffness long used thus far at least in ancillary form by the ACI Code, the present system can afford to account for the detail of steel arrangement along a member by treating all its sections assumed attendant on finite difference subdivision for beam analysis.

In a consistent attempt, the whole lengthwise sectional variation is considered as well in the long-time case of analysis. Then, a long standing notion of increased modular ratio is adopted, alternatively to the ACI's time-dependent multiplier which is given also in average form by way of direct inclusion of the effect of the creep resistant compression steel.

Relative adequacy of the proposed procedure is discussed in comparison of many cases of earlier test results in the literature with deflection estimates by our method and commonly available code methods.

1. Introduction

Our earlier proposed procedure¹⁾ for predictive deflection analysis of an r/c floor structure as a whole inclusive of its supporting frame, while taking account of the time-dependency of concrete, depends for post-cracking member stiffness on the effective moment of inertia²⁾, long used so far in the ACI³⁾ or certain major structural design codes, as well as on the auxiliary assumptions to facilitate its practically simplified estimation.

These include assumed average uniform effective stiffness of a linear member over the whole span and considered effects of reinforcement only at mid-span sections for calculating deflections, hence the result being not satisfactorily responsible for the overall crack distribution and the entire reinforcement detail of the member.

*1 Muroran Institute of Technology, Muroran, 050;

*2 Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo, 060;

*3 Hokkaido Institute of Technology, Sapporo.

*4 Graduate Student, Faculty of Engineering, Hokkaido University

006 Japan;

At this time we presents an improved system of procedure being of use for a member with an arbitrary crack distribution or a so-called variable cross-sectioned structure by taking advantage of its finite difference treatment. Initially we explain the fundamentals of the currently adopted procedure and the calculation detail based on iterated elastic analysis to result in immediate deflections due to iteratively modified sectional properties; followed by our formulating a calculation system for time-dependent additional deflection at an arbitrary member age, resorting to modified concrete properties by a traditional method for that long-time case.

Further, we review the degree of adaptability of our procedure by employing available long-time test results on beam or one-way slab models. And we lastly make a systematic calculation of the deflection at infinite years of concrete age (terminative deflection) for a number of calculation model beams with various combinations of sectional size, supporting or other conditions, subsequently to discuss the results respecting the notable inclinations of long-time deflection and the serviceability limits for beam members having customarily practicable demensions.

2. Analytical System

2.1 Formulations for Elastic Deflection

For its succeeding development in difference form, now introduced is a known relation between deflection y of a variably cross-sectioned beam and distance x from its left end to the considered section:⁴⁾

$$\frac{d^2}{dx^2}(I_x \frac{d^2y}{dx^2}) = \frac{q_x}{E} \quad (1)$$

were, as is well known, $\frac{d^2M_x}{dx^2} = -q_x$ and $\frac{d^2y}{dx^2} = -M_x/EI_x$

with $M_x =$ bending moment, $q_x =$ intensity of load of any distribution, $E =$ elastic modulus and $I_x =$ moment of inertia, all respecting this section.

When a beam member is subdivided into m equal parts shown in Figs. 1 and 2 difference expressions for the above bending moment and deflection at section i respectively become:

$$M_i = -EI_i(y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1})/\Delta x^2 \quad (2)$$

$$k_{i-1}y_{i-2} - 2(k_{i-1} + k_i)y_i + (k_{i-1} + 4k_i + k_{i+1})y_{i+1} - 2(k_i + k_{i+1})y_{i+2} + k_{i+1}y_{i+2} = q_i \Delta x^4 / EI_0 \quad (3)$$

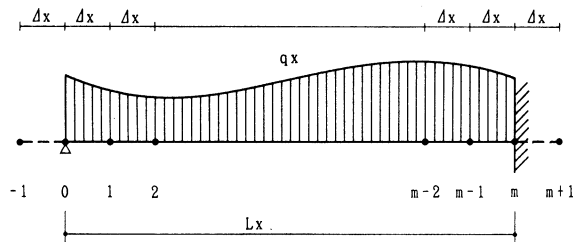


Fig. 1. Difference Subdivision with Numbering System

A Procedure for the Analysis of Long-Term Deflection
of Reinforced Concrete Members and Its Adaptability

where : $k_i = I_i/I_0$ = stiffness ratio for section i; I_0 = moment of inertia for reference section and I_i = that for section i.

With end conditions for a simple beam, $y_0 = 0$ and $y_m = 0$, both difference expressions for $M = dy^2/d^2x = 0$ at its end sections are written as : $(y_{-1} - 2y_0 + y_1)/\Delta x^2 = 0$ as well as $(y_{m-1} - 2y_m + y_{m+1})/\Delta x^2 = 0$, hence $y_{-1} = -y_1$ and $y_{m+1} = -y_{m-1}$.

For a both-end fixed beam the difference expressions for $y = 0$ and $dy/dx = 0$ at both ends are respectively $y_0 = 0$ or $y_m = 0$ and $(y_1 - y_{-1})/2\Delta x = 0$ or $(y_{m-1} - y_{m+1})/2\Delta x = 0$; naturally $y_{-1} = y_1$ and $y_{m+1} = y_{m-1}$.

Assuming the stiffness ratio for any section i as $k_{i(i=1\dots m)} = 1.0$ and solving the resulting simultaneous equation system for deflections $y_{i(i=1\dots m-1)}$, obtained by using Eq. (3) and the boundary conditions above, gives an elastic deflection Δ_e at each section.

2.2 Immediate Deflection

We use the following well-documented equation for member stiffness, proposed by D.E. Branson²⁾ and adopted in a similar form by the design code initially referred to, in which M_a is currently obtained as M_i of Eq. (2) for each section, i, by substituting in the equation the values of suffixed y's i.e., the deflections obtained by solving Eq. (3).

$$I_e = (M_{cr}/M_a)^4 I_{g0} + [1 - (M_{cr}/M_a)^4] I_{cr} \quad (4)$$

provided $I_e = I_{g0}$ for $|M_a| < M_{cr}$

where : M_a = bending moment, M_{cr} = cracking moments both acting on section i, and of this section, I_e = effective moment of inertia, I_{g0} = moment of inertia of gross concrete section ignoring the steel and I_{cr} = that of cracked transformed section.

Involving partial discretion in certain assumptions if immaterial in most cases, specific calculations we depend on for those properties will be affirmed next: i.e., for a rectangular section:

$$I_{cr} = b(cd)^3/12 + bcd(cd/2)^2 + nA'_s(cd-d')^2 + nA_s(d-cd)^2 \quad (5)$$

where: b = beam width, c = relative depth of neutral axis, d = effective depth of section, d' = distance from compression face to centroid of compression steel, n = modular ratio, A_s = tension steel area, A'_s = compression steel area and, when expressed in terms of steel ratios $\rho (=A_s/bd)$ and $\rho' (=A'_s/bd)$:

$$c = \sqrt{2n(\rho + \rho'd'/d) + n^2(\rho + \rho')^2} - n(\rho + \rho') \quad (6)$$

The effective width, B , required in case of counting in the effect of slab panels in positive bending regions is provided by the corresponding Japanese r/c code equations. In this case I_{cr} for a tee-section is as follows when the neutral axis, calculated by Eq. (6), on putting $\rho = A_s/Bd$ and $\rho' = A'_s/Bd$, is inside the flange:

$$I_{cr} = B(cd)^3/12 + Bcd(cd/2)^2 + nA'_s(cd-d')^2 + nA_s(d-cd)^2 \quad (7)$$

When the neutral axis is inside the web, with t flange thickness

$$I_{cr} = Bt^3/12 + Bt(cd-t/2)^2 + nA'_s(cd-d')^2 + nA_s(d-cd)^2 \quad (8)$$

$$\text{where } c = \{t^2/d^2 + 2n(\rho + \rho'd'/d)\}/2\{t/d + n(\rho + \rho')\} \quad (9)$$

On the other hand, for member sections where $|M_a| < M_{cr}$, I_g ($= I_e$) is as follows, taking account of the reinforcement and referring to Fig. 2 for sectional dimensioning:

$$I_g = bh^3/12 + bh(h/2 - cd)^2 + (B-t)t^3/12 + (B-b)t(cd - t/2)^2 + nA_s(d-cd)^2 + nA'_s(cd-d')^2 \quad (10)$$

$$c = \{t^2(1-b/B)/d^2 + bh^2/Bb^2 + 2n(\rho + \rho'd'/d)\}/\{2[t+b(h-t)/B]/d + 2n(\rho + \rho')\} \quad (11)$$

Eqs. (10) and (11) for a tee-section are used with $t = 0$ and $B = b$ when applied to a rectangular section.

Using the I_e obtained by Eqs. (4) through (11) in the course of iterating the calculation explained in the preceding section results in the immediate deflection Δ_i of a beam member, including the effect of concrete cracking.

2.3 Additional Deflection due to Bond-Slip of the Steel

The additional deflection Δ_s due to the bond-slip of a reinforcement anchorage at a member end section can be of relative significance in case of a slab with a larger span/depth ratio, especially when its end top reinforcement is liable to be lowered during construction work, while in beam the bond-slip effect is usually negligibly small¹⁾. Accordingly it will not be considered on beams but on slabs alone.

An angle of rotation θ due to the bond-slip by an amount u in the top steel anchorage at encastered ends of a floor slab may be estimated by the following equation on assuming that the axis

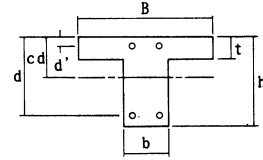


Fig. 2. Sectional Assumptions

of that slab rotation is the neutral axis obtained for a cracked section by Eq. (9).

$$\theta = u/(d - cd) \quad (12)$$

The relevant deflection Δ_s is calculated from the result of solving a slab panel restrained with a forced rotation θ along all its edges, i.e., depending on such a simultaneous set of difference equations in terms of Δ_s as can be formulated by putting $q_i = 0$ in Eq. (3) and eliminating the terms concerning external points of subdivision by making use of either of the relations: $(y_1 - y_{-1})/2\Delta x = \theta$ and $(y_{m-1} - y_{m+1})/2\Delta x = \theta$.

2.4 Long-Time Deflection

Use is made of principal ideas of the increased-n method, referred to as in Ref. 1), whose concepts are given in publications of Large⁵⁾, Branson²⁾, Mayer⁶⁾, Beeby⁷⁾ and others; a method based on an introduced nominal elastic modulus called effective modulus thereby to account for the effect of time-dependent creep strain on a long-time deflection Δ_{i+cp} , earlier being a sum of immediate portion and that affected by creep, which may now be provided in one through a procedure similar to the calculation of elastic or immediate deflections.

In this case, supposed beforehand is a creep coefficient of the concrete, ϕ_t , dependent on concrete age at the start of loading, loading period, atmospheric and other conditions; together with an effective elastic modulus E_{ct} of the concrete and modular ratio n_t of the steel; both put in such forms as:

$$E_{ct} = E_c / (1 + \phi_t) \quad (13) \quad n_t = n(1 + \phi_t) \quad (14)$$

Then we calculate again I_{cr} and I_g respectively of Eqs. (5) and (10). And from the I_e value now obtained for each section i on assuming moment M_i is constant the corresponding stiffness ratio is calculated as k_i of Eq. (3) when putting $E = E_c = E_{ct}$ in it, to decide as a result \bar{y}_i therein for the required solution Δ_{i+cp} .

Next, we calculate $\Delta_{i+cp+sh}$, a long time deflection so far separated into portions, Δ_{cp} and Δ_{sh} , respectively owing to creep and shrinkage, in essentially the same way as the derivation of Δ_{i+cp} , currently in directly combined form. The calculation of effective elastic modulus E'_{ct} and modular ratio n'_t of reinforcing bar is here made by the following equation proposed by Yu and Winter⁸⁾.

$$E'_{ct} = E_c / (1 + 0.93\alpha E_c Y t^{1/3} / a^{1/2.5}) \quad (15) \quad n'_t = E_s / E'_{ct} \quad (16)$$

where: E_c = elastic modulus of concrete, Y = multiplying factor due to years of duration of loading, t = days of duration of loading; provided t is assumed to be 365 in case of t over that

number, a = age in days of loaded member at the start of loading and α coefficient by which to include the effect of concrete slump (or $\alpha = 1.25$ for a customary slump of 1.5 or so)⁹⁾ and E_s = elastic modulus of reinforcing bars.

The second term of the denominator of Eq. (15) is identical with Shank's experimental equation⁵⁾, regarding both creep and shrinkage strain of the concrete, being given by him specific Y -values in year unit, which may alternatively be described by the following polynomial as a result of a pertinent regression analysis thereof³⁾; i.e., with N = years of duration of loading:

$$Y = 1.259 + 0.0592(N-3) - 0.0236(N-3)^2 + 0.058(N-3)^3 \quad (17)$$

3. Procedure

There follows the necessary steps to be taken for the present beam or one-way slab deflection analysis in consideration of the cracking and time-dependency of the concrete and the bond-slip of the anchored steel, i.e. :

- 1) subdivide member lengthways, followed by its elastic analysis, with the difference method in use, to result in elastic deflection Δ_e .
- 2) from that elastic solution work out maximal bending moment (construction load in the majority of cases), and therefrom effective stiffness $E_c I_e$, also $E_c I_g$, for each member section, assuming concrete elastic modulus and modular ratio respectively to be E_c and n ;
- 3) perform deflection analysis for the member with bending stiffness $E_c I_e$ either for cracked regions or $E_c I_g$ including steel effects for those uncracked, to result in M_1 under the maximal load;
- 4) using the end moment given in above step (3), in case that end sections prove to be cracked, obtain additional deflection Δ_s and M_2 , due to slipped anchorage, and add that additional moment to the above M_1 subsequently to modify the member stiffness in the cracked region;
- 5) iterate previous steps (3) and (4) before convergence of the stiffness value at each section of the member;
- 6) depending on member stiffness modified by using effective elastic modulus E_{ct} and effective modular ratio n_t , carry out analysis of step (3) to obtain $\Delta_t = \Delta_{i+cp}$ under long-time loads as sustained for t days of concrete age, provided that the n calculating I_e counts on $M_1 + M_2$ above;
- 7) use E'_{ct} and n'_t in place of E_{ct} and n_t in step (6) so as to provide $\Delta_{i+cp+sh}$ likewise and
- 8) calculate total long-time deflection $\Delta_s + \Delta_t$.

A Procedure for the Analysis of Long-Term Deflection of Reinforced Concrete Members and Its Adaptability

Table 1. Compared Earlier Deflection Measurements with Corresponding Predictions; on R/C Beams and One-Way Strips from Available Long-Time Loading Test Reports, at Home and Abroad.

Workers with Ref. Nos. & Types of Model Structures	Designation of Models	Age of Concr. in Days at :		Properties (kg/cm ²)		Span L _m	Sectional Dimensions & Reinforcement					Impsd. Loads q _u ⁽²⁾ kg/m	Deflections (cm)				Rel. Values $\frac{\Delta_{meas}}{\Delta_{pred}}$	Slumps of Concrete at Placing (cm)
		Load-ing	Meas-urmnt.	F _c	E _c x10 ⁵		B cm	b cm	t cm	h cm	A' _s (2)		Measured		Predicted			
													Δ _i	Δ _t	Δ _i	Δ _t		
Washa-Fluck (5) ⁽¹⁾ Simple Beams (Rectangular)	A1, A4	14	900	255	2.08	6.1	20.3	20.3	-	30.5	A _s	563	1.35	2.36	1.50	2.51	1.06	15.2
	A2, A5	14	900	255	2.08	6.1	20.3	20.3	-	30.5	A _s /2	563	1.57	3.23	1.57	3.23	1.00	
	A3, A6	14	900	255	2.08	6.1	20.3	20.3	-	20.3	-	563	1.70	4.47	1.65	5.88	1.32	
	B1, B4	14	900	212	1.91	6.1	15.2	15.2	-	20.3	A _s	159	2.34	5.11	2.57	4.89	0.96	
	B2, B5	14	900	212	1.91	6.1	15.2	15.2	-	20.3	A _s /2	159	2.49	6.50	2.63	5.95	0.92	
	B3, B6	14	900	212	1.91	6.1	15.2	15.2	-	12.7	-	159	2.64	8.64	2.70	9.58	1.11	
	C1, C4	14	900	208	1.88	6.3	30.5	30.5	-	12.7	A _s	122	4.01	8.00	4.29	7.48	0.94	
	C2, C5	14	900	208	1.88	6.3	30.5	30.5	-	12.7	A _s /2	122	4.34	10.06	4.42	9.27	0.92	
	C3, C6	14	900	208	1.88	6.3	30.5	30.5	-	12.7	-	122	4.78	14.07	4.61	16.00	1.14	
	D1, D4	14	900	205	1.85	3.8	30.5	30.5	-	12.7	A _s	341	1.19	2.77	1.57	3.72	0.93	
	D2, D5	14	900	205	1.85	3.8	30.5	30.5	-	12.7	A _s /2	341	1.42	3.30	1.63	3.37	1.02	
	D3, D6	14	900	226	1.92	3.8	30.5	30.5	-	12.7	-	341	1.78	4.45	1.65	5.83	1.31	
	E1, E4	14	900	210	1.88	5.3	30.5	30.5	-	7.6	A _s	57	5.94	12.40	6.23	10.30	0.83	
	E2, E5	14	900	210	1.88	5.3	30.5	30.5	-	7.6	A _s /2	57	5.59	12.88	5.39	12.40	0.96	
	E3, E6	14	900	210	1.88	5.3	30.5	30.5	-	7.6	-	57	6.30	18.49	5.53	19.35	1.05	
	Yu-Winter (3) Simple Beams (Tee)	A	30	180	259	1.80	6.1	30.5	15.2	6.4	30.5	-	655	3.40	6.73	3.22	5.66	
B		29	180	273	1.76	6.1	30.5	15.2	6.4	30.5	A _s /2	656	3.14	5.66	3.18	4.89	0.86	
C		28	180	248	1.76	6.1	30.5	15.2	6.4	30.5	A _s	653	3.02	5.18	3.15	4.44	0.86	
D		31	180	259	1.80	6.1	61.0	15.2	6.4	30.5	-	1196	3.23	6.71	3.51	5.90	0.88	
E		29	180	299	1.84	4.3	30.5	15.2	6.4	30.5	-	1253	1.30	2.92	1.56	2.83	0.97	
F		34	180	299	1.84	6.1	30.5	15.2	5.1	20.3	-	987	5.59	10.03	5.91	10.80	1.03	
Washa-Fluck (6) Two-Span Continuous (Rectangular)	*X1, X4	14	900	227	1.99	6.1	15.2	15.2	-	20.3	A _s	283	1.42	2.90	1.70	3.20	1.01	10.2-15.2
	*X2, X5	14	900	227	1.99	6.1	15.2	15.2	-	20.3	A _s /2	283	1.45	3.23	1.72	3.60	1.11	
	*X3, X6	14	900	227	1.99	6.1	15.2	15.2	-	20.3	-	283	1.57	3.78	1.75	4.74	1.25	
	*Y1, Y4	14	900	236	2.04	6.3	30.5	30.5	-	12.7	A _s	217	2.26	4.00	2.70	4.73	1.03	
	*Y2, Y5	14	900	236	2.04	6.3	30.5	30.5	-	12.7	A _s /2	217	2.36	4.98	2.75	5.35	1.07	
	*Y3, Y6	14	900	236	2.04	6.3	30.5	30.5	-	12.7	-	217	2.54	5.99	2.81	7.28	1.22	
	*Z1, Z4	14	900	232	2.10	5.3	30.5	30.5	-	7.6	A _s	101	2.64	5.89	3.48	6.60	1.12	
*Z2, Z5	14	900	232	2.10	5.3	30.5	30.5	-	7.6	A _s /2	101	2.87	6.78	3.52	7.38	1.09		
*Z3, Z6	14	900	232	2.10	5.3	30.3	30.3	-	7.6	-	101	3.05	7.93	3.54	9.54	1.20		
Iwahara (7), (8) One-Way Slab Strips	SL-1	35	140	278	2.96	3.0	40.0	40.0	-	13.0	-	297	0.37	1.70	0.37	1.62	0.95	12.5(SL)
	SL-2	35	140	278	2.96	3.0	40.0	40.0	-	13.0	-	140	0.02	0.55	0.07	0.45	0.82	
	SL-3	35	140	278	2.96	3.0	40.0	40.0	-	13.0	-	297	0.20	0.90	0.32	1.28	1.42	19.2(SN)
	SL-4	35	140	204	2.96	3.0	40.0	40.0	-	13.0	-	297	0.68	1.92	0.41	2.06	1.07	
	*SN-1	30	856	204	2.32	4.0	45.0	45.0	-	13.7	-	430	0.14	2.22	0.91	1.94	0.87	
	*SN-2	30	856	204	2.32	4.0	45.0	45.0	-	13.5	-	168	0.37	-	0.53	4.00	-	
	*SN-3	30	856	204	2.32	4.0	45.0	45.0	-	13.5	-	429	0.16	1.57	0.71	1.52	0.97	
	*SN-4	30	856	204	2.32	4.0	45.0	45.0	-	13.3	-	427	0.17	1.78	1.51	2.92	1.64	
Yamamoto (9)	S3	56	350	306	2.42	4.0	40.0	40.0	-	13.0	-	195	-	3.25	0.83	2.78	0.86	18.0
	S4	56	350	306	2.42	4.0	40.0	40.0	-	13.0	-	195	-	3.05	0.83	2.78	0.91	
	*S1	56	350	306	2.42	5.3	40.0	40.0	-	13.0	-	231	-	2.30	1.49	2.61	1.13	
	*S2	56	350	306	2.42	5.3	40.0	40.0	-	13.0	-	231	-	2.00	1.49	2.61	1.31	
Matsuzaki (10)	*A1	30	350	163	1.85	4.2	100.	100.	-	12.0	-	576	0.15	1.60	0.76	1.61	1.00	
	*A2	30	350	163	1.85	4.2	100.	100.	-	12.0	-	468	0.10	1.16	0.47	1.23	1.06	
	*A3	30	350	163	1.85	4.2	100.	100.	-	12.0	-	288	0.06	0.82	0.10	0.54	0.66	
Komori (11)	*S1-A	56	90	205	1.62	5.3	25.0	25.0	-	10.0	-	60	3.10	6.30	3.38	5.61	0.89	
	*S1-B	56	90	205	1.62	5.3	25.0	25.0	-	10.0	-	60	1.30	4.60	3.16	5.46	1.19	

Note (1) Bracketed are Numbers of Reference; * Asterisked being Both-End Fixed Structures, with Spans Measured at Centers of Supports; † Daggered for One-End-Supported, Other Fixed Cases; (2), (3) Small Numerals (2), (3) refer respectively to Mid-Span Compr. Steel and Inclusion of Self-Weight.

4. Review of Calculation Results

Adopted to be set against corresponding calculations for immediate and long-time deflections, afforded by our procedure, are eight case of sustained loading test results, i.e., deflection measurements on either r/c beams or one-way slab strips under uniformly distributed loads, conducted by

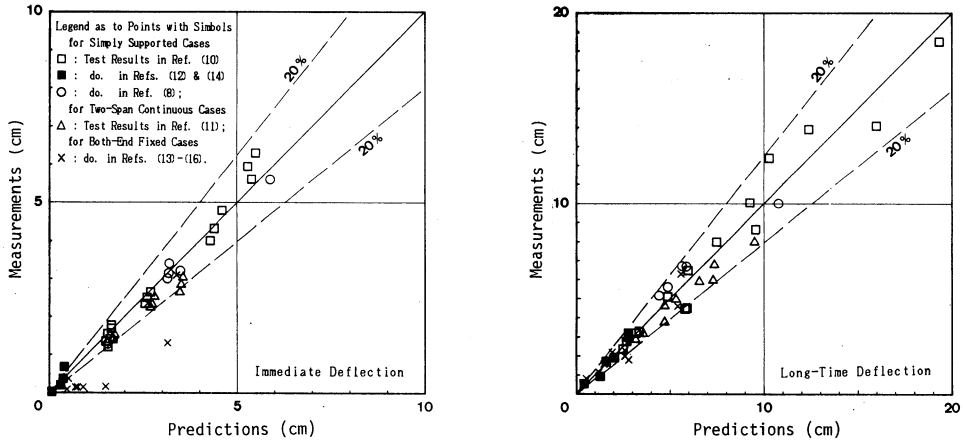


Fig. 3. Examined Degrees of Agreement between Measured and Predicted Deflections

Washa and Fluck,^{10),11)} Yu and Winter,⁸⁾ Iwahara,^{12),13)} Yamamoto,¹⁴⁾ Matsuzaki¹⁵⁾ and Komori.¹⁶⁾

Of these considered test models: 62 were simply supported, consisting of six tee-sectioned and all others rectangular; 18 fixed at one end with the other supported; and the rest of six fixed at both member ends.

The check calculation supposed a concrete strength of $1.8\sqrt{F_c}$ (with F_c = compressive concrete

Table 2. Specific Assumptions for the Authors' Calculation Models

	Girders (One-and Two-Beam-Supporting Types)	Lateral Beams	Note
Span L_x (cm)	450,600,750,800	600,750,900	Flange (Slab) Thickness = 15 cm
Lateral Span L_y (cm)	200,300,400	450,600,750,900	
Member Width	25,30,35 ($L_x=450$) 30,35,40 ($L_x=600,750$) 35,40,45 ($L_x=900$)	30,35,40 ($L_x=600$) 35,40,45 ($L_x=750$) 40,45,50 ($L_x=900$)	Beam Sections: 25×40 ($L_x=450$), 35×60 ($L_x=750$) 30×50 ($L_x=600$), 40×70 ($L_x=900$)
Material Properties	Concrete : Strength F_c	210kg/cm ²	Concrete Modulus of Rupture = $1.8\sqrt{F_c}$ kg/cm ²
	Concrete : Elast. Modulus E_c	210000kg/cm ²	
	Concrete : Effective Mod. E_{ct}	26600kg/cm ²	
	Steel Elast. Mod. E_s	2100000kg/cm ²	
Loads	Materials for Finish	80kg/m ²	Construction Load = 2.1 times R/C Self-Weight
	Design Live Load	300kg/m ²	
	Long-Time Imposed Load	100kg/m ²	

strength) as a rule, provided an alternative of 1.2 is used to the customary 1.8 for domestic cases with relatively small spans and limited degrees of cracking; with a difference subdivision of a span numbering ten. The reported deflection measurements of each test model, along with its overall and sectional dimensioning, are summarized in Table 1 in comparison with our corresponding predictive calculations. Connectedly plotted in Fig. 3 are the above results, i.e., immediate as well as long-time measurements against associated calculations, respectively as abscissas and ordinates. As for each such coordinate pair, while certain immediate deflections in the both-end fixed cases show a considerable difference of a predicted value from its measured correspondent, in most of the other cases sufficiently good agreements are generally seen as to immediate as well as long-time values.

Also, we attempted comparisons in the same context by separately using the methods of Koyanagi et al.¹⁵⁾, about to appear in Appendix 13.2 of the latest revision of the r/c design code by the Architectural Institute of Japan, and the two code methods each from the relevant publications by the European Concrete Committee²⁰⁾, and the British Standard Institution²¹⁾. The result shows a tolerably better adaptation of the current procedure than the others in the majority of the cases of tested structure models reproduced herein.¹⁸⁾

5. Final Deflections

5.1 Outline of Calculation

The trial calculation models here introduced include beams of three types, i.e., cases simply supported; supported at one end with the other fixed; and fixed at both ends. The others comprise both-end-fixed girders, with one or two lateral beams across each of them, having span L_x , effective width L_y , web width b , flange (or slab) depth t and associated material properties as well as load conditions as assumed in Table 2. There, specifically, the whole depth of the girder is stepped down from the largest $0.1L_x + 20$ cm at 5cm intervals, within a feasible range from single to double arrangement of reinforcement by using the main and the lateral deformed steel of respective D19 and D10 of nominal diameter.

5.2 Deflection Limits

Each deflection thus obtained and divided by the corresponding span length, now simply called final deflection ratio, is rearranged with the associated beam depth/span ratio used as index; which effort leads to Fig. 4 for both discussed beams and girders.

For the reason that our throughout assuming respective end and mid-span sections to be rectangular and tee, though additionally affirmed here, the practicable lower limits of beam depth are

considerably low, necessarily causing sharp increases in final deflection factors for depth/span ratios less than 0.0075. Relatedly, assuming say 0.002 of a serviceability limit deflection factor results in permissible depth/span ratios ensured if they exceed 0.08 even for a simple beams. In the other case of end conditions, for beams and girders, capable of reinforcement in the present concerns, final deflection factors seldom exceed 0,0015.

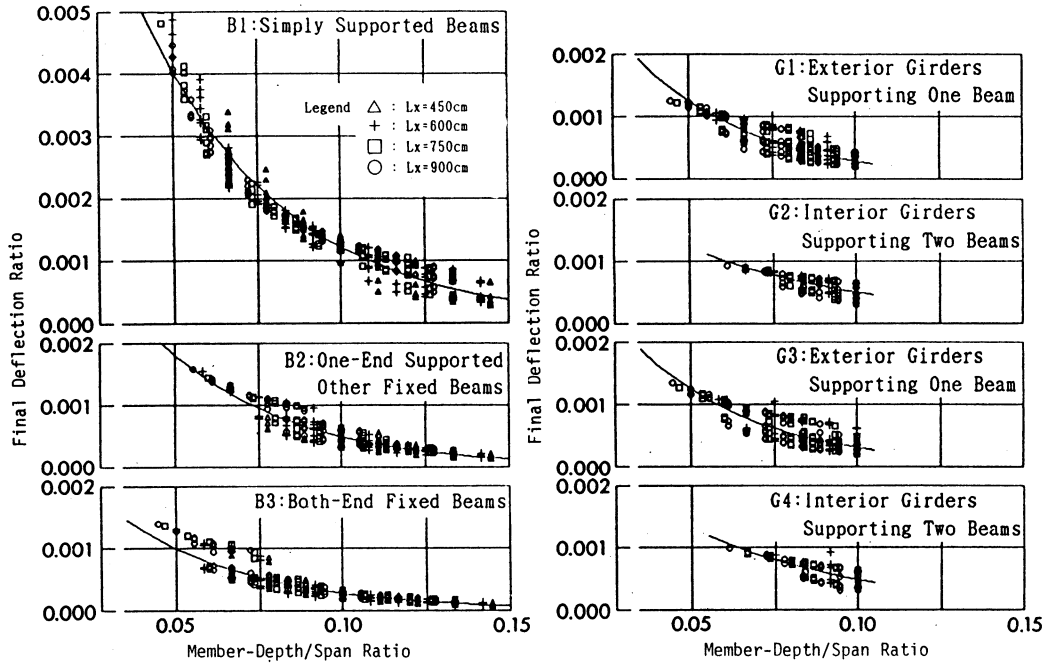


Fig. 4. Member-Depth/Span Ratios vs. Final Deflection Ratios

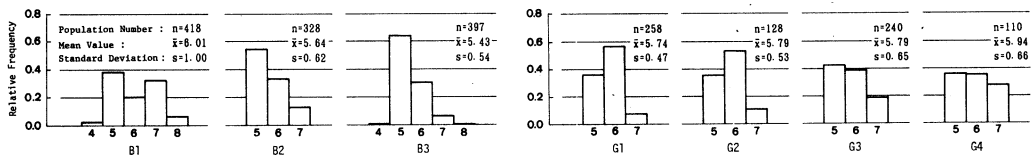


Fig. 5. Relative Frequency Distributions of Final Deflection Factors in terms of Ratios of Final to Elastic Deflections for Cases in Fig. 4

5.3 Estimation of Final Deflections

Fig. 5 shows the distribution of ratio, Δ_f / Δ_e , i.e., the ratio of the final to elastic deflection for all the beams analyzed. Using curves plotted there Δ_f may roughly be estimated by a multiplied Δ_e value by the upper limit of that ratio which generally varies depending on end restraint or other external conditions.

A Procedure for the Analysis of Long-Term Deflection
of Reinforced Concrete Members and Its Adaptability

Also found to be possible is a sufficiently accurate, quartic approximation of final deflection transition of a beam with any definite boundary conditions as its whole depth h only varies with L_x , L_y and b kept constant.

A practical version of the above is illustrated in Fig. 6 where the relations obtained by that quartic between depth/span ratios and corresponding deflection ratios, immediate and final, is shown to be representable by a curve; specifically, as a result of using, by way of example, $L_x = 6.0, 7.5$ and 9.0 m; with b being any of the three central values in Table 2. And using these sets of data the preceding relation of Δ_i/Δ_e may be expressed as well in equation form, which we have found by an appropriate statistical analysis of the foregoing data.

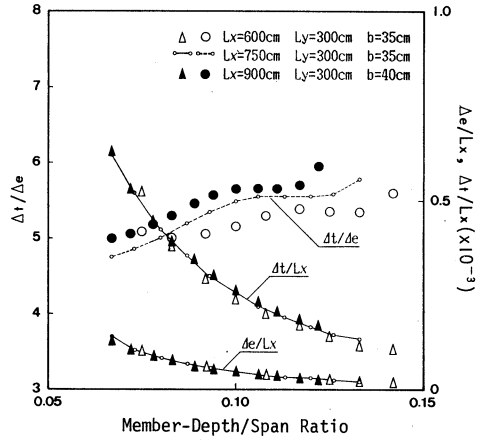


Fig. 6. h/L_x plotted against Δ_i/Δ_e ,
 Δ_e/L_x and Δ_i/L_x

6. Conclusions

Specific items currently clarified by the foregoing facts and figures are: 1) the ratio of elastic Δ_e to final deflection Δ_i ranges from ca. four to eight, averaging six; 2) as far as reinforcing them all is feasible, beams or girders fixed at both ends and those continuous are free from deflection damage; 3) one-span structures have such a possibility even in case their reinforcement is executable. The foregoing findings for one-span members suggest the need for any comprehensive long-time deflection analysis thereof, which is currently under way including the torsion of lateral girders.

A conclusion to serve for a proposal deduced from the calculation results on simply supported members may be that depth/span ratio should be at least 0.08 for one-span beams or girders.

References

- 1) Suginome, A., Ino, S., Dobashi, Y., and Yamamura, A. : Predictive Calculation for Deflections of Reinforced Concrete floor Slabs, pp. 103-113, Transactions of Architectural Institute of Japan (A.I.J.), Jour. of Structural and Constructional Engineering, No. 372, Feb. 1987. (in Japanese)
- 2) Branson, D.E. : Deformations of Concrete Structures, pp. 118-118, 196-120, McGraw-Hill, 1977.
- 3) Neville, G.B. (Ed.) : Notes on ACI standard Building Code Requirements for Reinforced Concrete with Design Applications (ACI-318-83), pp. 7-1 - 7-55, Portland Cement Association, 1984.
- 4) Sakai, T. : Structural Mechanics, pp. 103-104, Gihodo Publishing Co., 1970.

- 5) Large, G.E. : Basic Reinforced Concrete Design/ Elastic and Creep, 2nd Ed., 527 pp., Ronald Press Co., 1957.
- 6) Mayer, H. : Die Berechnung der Durchbiegung von Stahlbeton-Bauteilen, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 194, 73 pp., 1967.
- 7) Beeby, A.W. : Short-Term Deflections of Reinforced Concrete Members, Cement and Concrete Association, Technical Report TRA408, 1968.
- 8) Yu, W.-W., Winter, G. : Instantaneous and Long-Time Deflections of R/C Beams under Working Loads, pp. 29-50, ACI Jour., Jul. 1960.
- 9) Rüsçh, H., Jungwirth, D. and Hilsdorf, K. : Creep and Shrinkage, p.70, Springer Verlag, 1983.
- 10) Washa, G.W. : Effect of Compressive Reinforcement on Plastic Flow of Reinforced Concrete Beams, pp. 89-108, ACI Jour. V. 24, No. 2, Oct. 1952.
- 11) Washa, G.W. and Fluck, P.G. : Plastic Flow (Creep) of R/C Continuous Beams, pp. 549-561, ACI Jour., V. 27., No. 5, Jan. 1956.
- 12) Iwahara, S. and Koda, M. : A Study on Long-Time Deformational Behaviors of Partially Cracked One-Way Floor Slabs, pp. 1953-1954, Struct. Div. Summaries. of Techn. Paps. for Ann. Meet. of A.I.J., Oct. 1983.
- 13) Iwahara, S. : Long-Time Flexural Behaviours of Both-End-Fixed One-Way Floor Slabs, pp. 615-620, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 9, 1987. (Japanese Ed.)
- 14) Yamamoto, T. : Long-Time Deflection Tests on R/C Floor Slabs, Part 2, pp. 71-74, Report of Technical Research Institute of Tokyu Constructon Co., No. 6, 1980.
- 15) Matsuzaki, I., Hatano, H. and Tanaka, H. : Experimental Studies on Long-Time Deflections of R/C Floor Slabs, Part 1, pp. 63-68, Annual Report of Research Institute of Kashima Construction Co., No. 27, 1979.
- 16) Higashi, Y., Komori, S. : An Experimental Study on Long-Time Deflection of R/C Floor Slab Strips, Part 1, pp. 1939-1940, Struct. Div. Summaries of Techn. Paps. for Ann. Meet. of A. I. J., Oct. 1975.
- 17) Koyanagi, M. : Calculation of Long-Time Deflection, Final Draft of Appendix to Japanese R/C Design Code (to be published in revised form), Material Submitted to Long-Time Design Subcommittee of A.I.J., 1987.
- 18) Suginome, A., Ino, S., Komagome, T., Ito, M. and Yamada, H. : Deflections of R/C Beams under Working Loads, A.I.J. Hokkaido Division Research Report, pp. 65-68, No. 61, March 1988.
- 19) Suginome, A., Ino, S. and Komagome, T. : Deflection Analysis of R/C Beams under Working Loads, Parts 1 & 2, pp. 611-615, Struct. Div. Summaries of Tech. Paps. for Ann. Meet. of A. I. J., Oct. 1987.
- 20) CEB (Comité Euro-International du Béton): CEB Manual - Cracking and Deformations - Final Draft, pp. 3-1 - 3-60, Bulletin d'Information N°143, Dec. 1981.
- 21) BSI (British Standard Institution): British Standard / Structural Use of Concrete, Part 2: Code of Practice for Special Circumstances (BS 8110 Part 2: 1985), pp. 3-2 - 3-6., 1985.

プラスチックねじ締結体のエネルギー吸収能に関する一考察

齊 当 建 一・星 野 悟

A Study on Energy Absorption of the Joint with Plastics Screw

Ken-ichi SAITO and Satoru HOSHINO

Abstract

For example, when the bolted Joint in pipe arrangement is subjected to water hammer, its energy is essentially prescribed and the force acted on the bolt is consequently determined, depending on the condition of the joint. This means that the joints with different allowable energy could be designed even if generated external forces are equal.

In this paper, the initial tightening forces (named, "Optimum initial tightencng force F_{opt} ") under which the allowable energy in the joint have maximum value are derived for two different types of bolted joint and compared with the experimental results.

As the result, obtained conclusions are summarized as follows:

- (1) In the range of low residual pressure on the bearing surfaces, the bolted joint with O-ring (Type2) can absorb more energy than the joint with thin clamped cylinder (Type1).
- (2) In the range that required residual pressure exceeds a certain value, Type1 is superior to Type2 in energy absorption.
- (3) Optimum initial tightening force F_{opt} could be predicted fairly well by use of simple calculation method proposed in this article.

1. 緒 言

ねじ締結体の強度設計においては、一般に、作用する外力が規定される場合が多く、そのような場合には、外力によって、ねじ締結体になされた仕事量、すなわちエネルギーは問題の対象外になっている。しかし、一例として配管系にウォーターハンマのようなある限定された衝撃エネルギーが作用する場合、フランジ継手のボルトに作用する荷重は、ボルトおよび被締結体の剛性などその締結体の条件に依存する。言い換えれば、たとえボルトに発生する外力が同一であっても許容エネルギーの異なる締結体を設計することができる。また、ねじ締結部は構造体の中でも変形しやすい部分なので振動や衝撃を積極的に吸収する機能を考えるならば、エネルギー的な検討が重要である。

そのような見地に立てば、プラスチックねじは変形能が大きいことから、エネルギー吸収の大きいねじ締結体を設計し得る。そこで本研究では、プラスチックねじを用いた締結体に外力が作用

するときに許容し得るエネルギーに注目し、このエネルギーが最大となるような初期締付け力（以下、最適締付け力と呼ぶ）について検討する。

以下では、第一にねじ締結体の接合面の分離を基準にした場合の最適締付け力を明らかにし、第二に、接合面の面圧保持を考慮した場合の最適締付け力について検討する。最後に試験法に関する問題として、試験機に固有のエネルギー損失について考察を行っている。

2. 接合面の分離を基準にした場合の最適締付け力

ここでは、吸収エネルギーを大きくするための方法として、被締結体がプラスチック製薄肉円筒とOリングの2種類のねじ締結体を対象にして、接合面の分離を基準にした場合の許容エネルギーおよび最適締付け力について両者の特性を比較する。

2.1 作用するエネルギーと最適締付け力

図1と図2は、本実験に用いた2つのタイプのねじ締結体を示す。ボルトはいずれもポリカーボネート（PC）製で呼び径M12、締付け長さ $L_f=50\text{mm}$ とした。被締結体は、図1ではPC製の薄肉円筒と鋼製のクロスヘッドで構成し（Type1）、図2では鋼製の円筒とOリング付きのクロスヘッドからなる（Type2）。Oリングのつぶし率は、JIS¹⁾で推奨される範囲の最大値（30%）とする。

エネルギーはクロスヘッドを介して締結体に伝達される。

締結体に一定のエネルギーを付与するため、図3に示す振子式の試験機²⁾を設計、試作した。本試験機的主要仕様を表1に示す。衝撃荷重の負荷方式はシャルピ式衝撃試験と同様にハンマの回転によって位置エネルギーを運動エネルギーに変換するもので、設計にあたっては、荷重の方向が本研究と同じであることから、プラスチック薄板の引張り衝撃試験として規定されているANSI/ASTM³⁾を参考にしており、得られる最大の衝撃速度も同規格とほぼ同じになるようにした。

この試験機のハンドル④によってハンマ③の持ち上げ角度 α を設定した

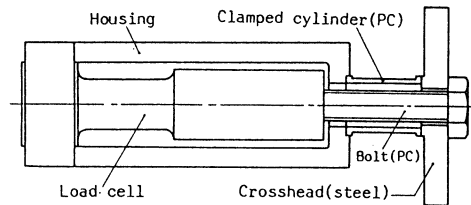


Fig. 1 Type1 (Joint with PC cylinder)

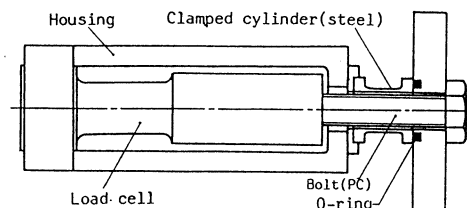


Fig. 2 Type2 (Joint with O-ring)

プラスチックねじ締結体のエネルギー吸収能に関する一考察

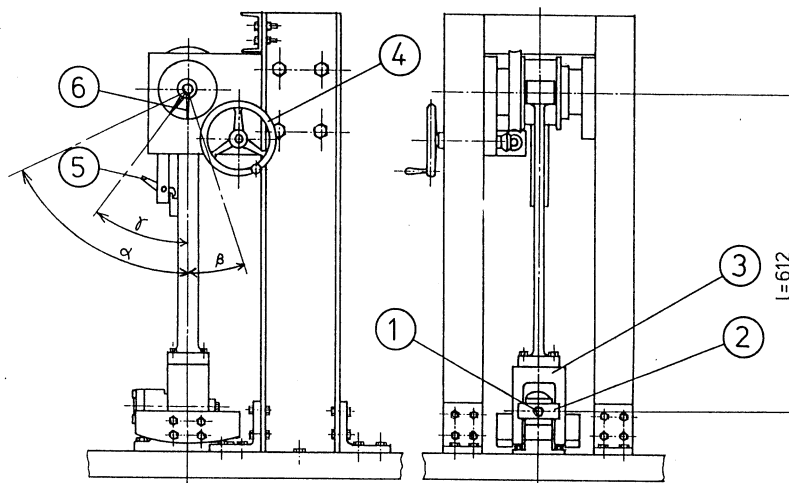


Fig. 3 Schematic diagram of tensile impact testing machine

Table 1 Specification of testing machine

Capacity of impact energy	WL=74.8J(at $\alpha = 90^\circ$)
Distance from the axis of support to the point of impact	l=612 mm
Linear velocity of the point of impact	V=3.7 m/s(at $\alpha = 90^\circ$)
Scale reading	$\alpha = 0 \sim 90^\circ$

後、フック⑤を外してハンマを回転させる。このとき、ハンマは $\alpha = 0^\circ$ の位置において、試験機に固定したねじ締結体のクロスヘッドを打撃する。その結果、ボルトには引張り荷重が作用する。初期締付け力 F_0 とエネルギーによるボルトの追加軸力は、ロードセルによって検出する。

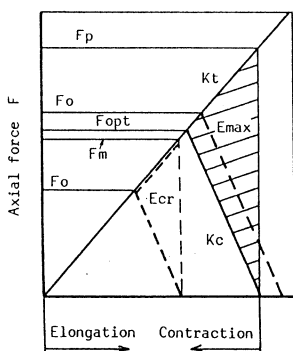


Fig. 4 Joint diagram for Type1

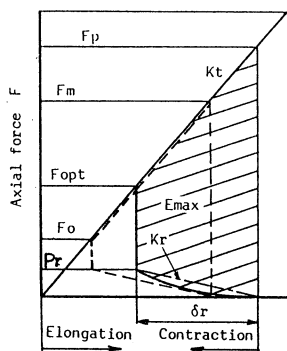


Fig. 5 Joint diagram for Type2

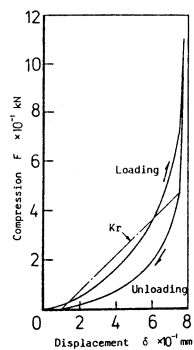


Fig. 6 Characteristic of O-ring

図4には、Type 1の締付け線図を示す。ここで、ねじ締結体の接合面の分離限界に相当するエネルギー E_{cr} は、初期締付け力の関数として次式で表される。

$$E_{cr} = \frac{F_o^2}{2K_c} \left(1 + \frac{K_t}{K_c} \right) \quad (1)$$

ここで、 K_t と K_c はそれぞれボルトの引張ばね定数と圧縮ばね定数を表す。また、この E_{cr} によってボルトに発生する最大軸力 F_m は次式となる。

$$F_m = F_o \left(1 + \frac{K_t}{K_c} \right) \quad (2)$$

しかし、 F_o が増加して F_m がボルトの耐力 F_p に達した後の限界エネルギーは、ボルトの耐力による制約によって次式となる。

$$E_{cr} = \frac{K_t + K_c}{2K_t^2} (F_p - F_o)^2 \quad (3)$$

以上の結果を図7に示す。同図より、 $F_o = F_{opt1}$ において最大のエネルギー E_{max1} となる。

すなわち、最適締付け力 F_{opt1} で締付けると、許容し得るエネルギーは最大となり、このときのボルト軸力はちょうど耐力に等しくなる。なお、 F_{opt1} では許容される外力も最大となる。

図5は、Type 2の場合の締付け線図を示す。ここでは、鋼製の被締付け円筒を剛体に近似する。 F_{cr} と F_o の関係は、 F_o がOリングのつぶししろを圧縮するに要する力 P_r と F_{opt2} によって区分される3つの範囲によって異なるので、ここでは最適締付け力に関する範囲 ($P_r < F_o < F_{opt2}$) の E_{cr} と F_m のみを示す。

$$E_{cr} = \frac{1}{2} \delta r \{ 2F_o + (K_t - K_r) \delta r \} \quad (4)$$

$$F_m = K_t \delta r + F_o \quad (5)$$

ここで、 K_r 、 δr はそれぞれOリングの圧縮ばね定数とつぶししろを表す。また、 K_r は図6に示すように、Oリングの圧縮荷重-変位線図から求める。すなわち、ねじ締結体のエネルギー

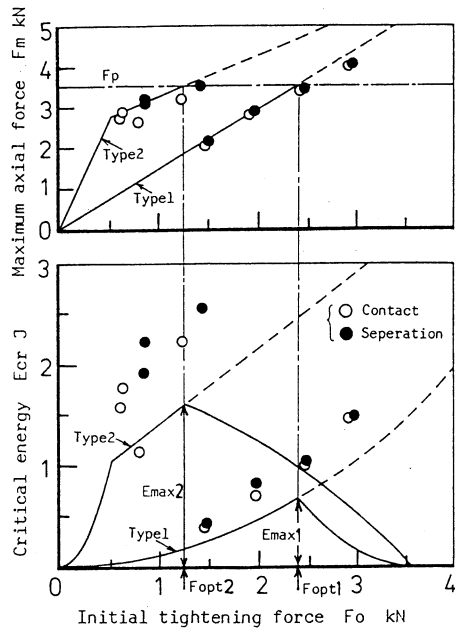


Fig. 7 Comparison of F_{opt} and E_{cr} between two types of joint

ギの吸収は、Oリングの圧縮力が除荷される過程で行われるので、同図の除荷側の曲線を用いてこれを直線で近似する。得られた計算結果を図7に示す。

2.2 実験による検討

ここでは、上述の計算値に対応して、接合面の分離を基準としたときの E_{cr} を実験により求め、これを計算結果と比較する。

Type 1 の場合は被締結円筒の両端の接合面にアルミ箔を貼り両者の間は導通状態にしておく。したがって、締付けて接合面が接触しているときは、ハウジングとクロスヘッドの間は導通しているが、外力が作用して少なくともどちらか一方の接合面が分離すれば、絶縁状態となり分離が判定される。

Type 2 の場合は、このような方法を使えないので、外力によるボルト頭部の伸びを非接触型変位測定器によって検出し、この伸びがOリングのつぶししろに達した場合を接合面の分離と判定する。

以上の方法によって求めた各初期締付け力における分離限界エネルギー E_{cr} と最大軸力 F_m を図7に示す。両タイプとも、実験で得られた E_{cr} は計算値より大きい。これは実験で設定したエネルギーの一部が試験機本体の振動による損失となること、また Type 2 については、 K_r を直線近似したことによる過小評価が考えられる。しかし、 F_{opt} に関しては計算値と良く一致している。この結果より、Type 2 は Type 1 に比べて大きなエネルギーを吸収することが可能であり、またプラスチック製の薄肉円筒を圧縮した場合のように挫屈を考慮する必要がないなどの点で有利といえる。さらに、最適締付け力からのずれに対し E_{max} からの減少率が小さいという利点がある。しかし、Type 2 ではボルトに追加される軸力が大きいので、衝撃エネルギーが繰返し作用する場合には、ボルトの疲労強度の点からの特性把握やOリングのつぶししろの調整によってボルトに作用する応力振幅をある限度に抑える必要がある。

3. 接合面の面圧保持を考慮した場合の最適締付け力

ねじ締結体の設計条件を接合面の面圧という点からみると、先に述べた接合面分離を設計の限界として十分な場合ばかりではなく、たとえ衝撃エネルギーが作用しても接合面にはある一定の残留圧縮力を確保しなければならない締結体も多い。

図8は、残留圧縮力 F_r を確保することによる許容エネルギーの減少を定性的に示す。すなわち、 F_r を確保することによって、Type 1 では E_{max} ($\triangle ABC$) から、Type 2 では E_{max} ($\square ABCD$) からそれぞれハッチングで示す面積に減少する。図9にはこれら2つの締結タイプについて、 F_r による E_{cr} の変化を示す。同図から、Type 2 の E_{cr} は F_r と共に急激に減少し、 F_r が 0.4kN を越えると許容エネルギーは逆転する。

したがって、残留圧縮力 F_r をある一定値以上（この例では 0.4kN 以上）必要とするねじ締結

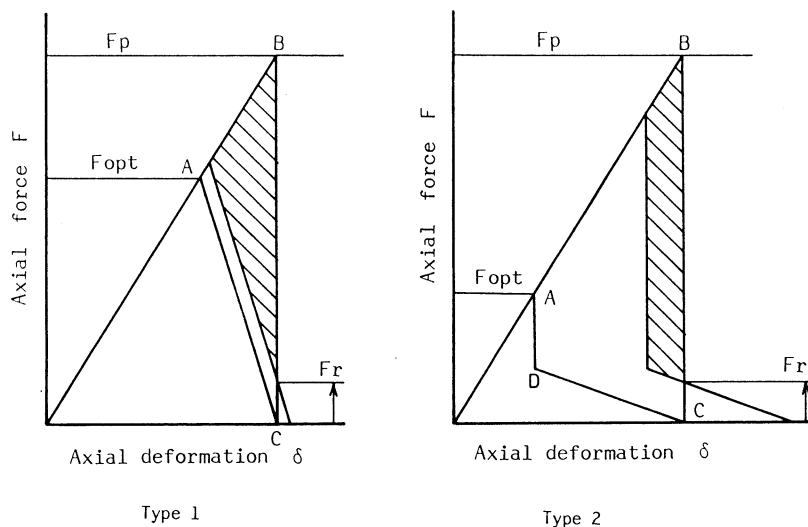


Fig. 8 The decrease in critical energy E_{cr} by residual compression F_r

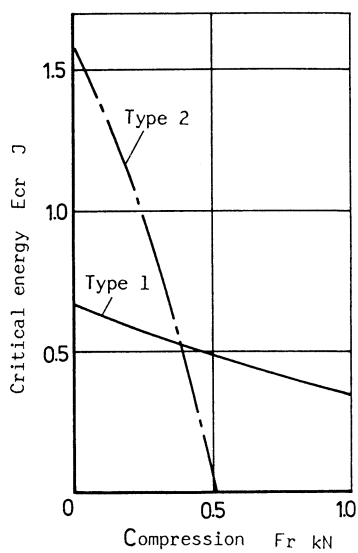


Fig. 9 Relation between F_r and E_{cr}

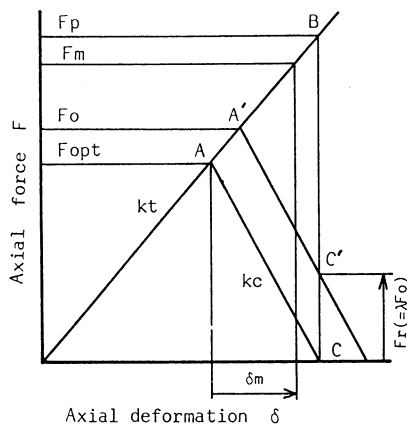


Fig. 10 Joint diagram

体では、Type 1の方が有利となる。そこで、以下ではType 1の形式の締結体に注目して、被締結体のばね定数と接合面の残留圧縮力を考慮した場合の、最適締付け力とそのときの最大吸収エネルギーを明らかにする。

3.1 作用するエネルギーと最適締付け力

図10にねじ締結体の締付け線図を示す。ここでねじ締結体の接合面の分離限界（同図の点C）を基準にした場合の最適締付け力は F_{opt} で示され、このときに締結体は接合面分離までのエネルギー（ $\triangle ABC$ ）が最大値 E_{max} となる。しかし、締結体に衝撃エネルギーが作用しても接合面にある一定の圧縮力 $F_r (= \lambda F_0)$ を残した状態で最大の吸収エネルギーを許容するためには、初期締付け力を同図の F_0 にすることが必要で、結果として吸収エネルギーは $\triangle A'BC'$ となり、 F_{opt} で締付けた場合に比べて減少する。これらの関係は次式となる。

$$F_0 = \frac{F_p}{1 + (Kt/Kc)(1 - \lambda)} \quad (6)$$

$$E_{cr} = \frac{(1 - \lambda)^2 (Kt + Kc) F_p^2}{2 \{Kc + Kt(1 - \lambda)\}^2} \quad (7)$$

ここで、 λ は初期締付け力の残留率、 F_p はボルトの耐力に相当する軸力、 Kt と Kc はそれぞれボルトと被締結体のばね定数を表す。

なお、式(6)と(7)で $\lambda = 0$ の場合が、接合面の分離を基準にした最適締付け力 F_{opt} と最大の吸収エネルギー E_{max} を表す。

3.2 ねじ締結体と実験方法

実験に使用するねじ締結体は図11に示すもので、 F_{opt} と E_{max} に及ぼす Kc の影響を調べるため、 Kc の異なる3種類とする。ここで、 Kc はワイヤカット放電加工によって製作されたループ

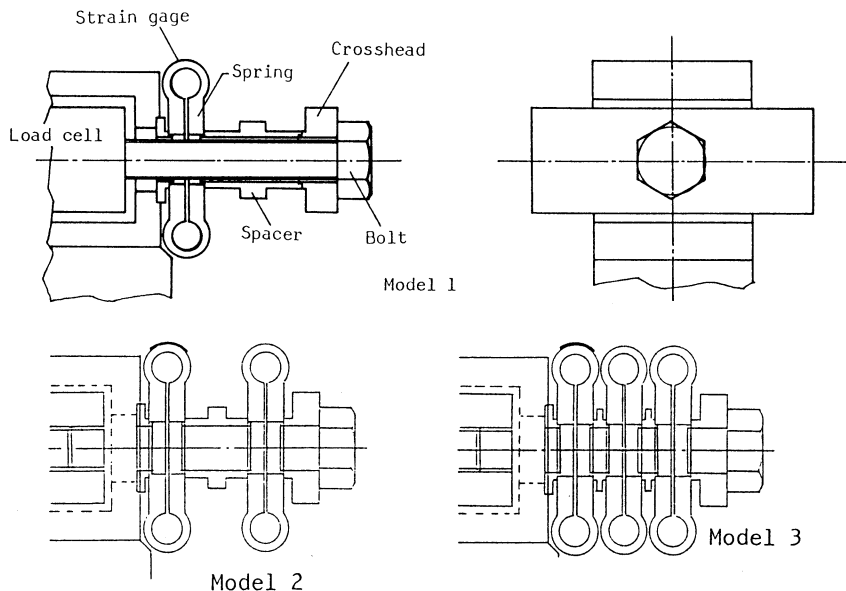


Fig. 11 Three models of bolted joint

型の板ばねの個数によって変化させる。同図の Model 1 は、板ばね 1 個の場合で、このときのばね定数はプラスチック平板を締付けた場合のばね定数にほぼ等しく、この板ばねにひずみケージを貼って残留圧縮力の変動を測定する。また、板ばねが 2 個と 3 個の場合 (Model 2 と Model 3) のばね定数は、Model 1 の場合の約 1/2 と 1/3 となり、Model 3 は先に述べた Type 1 のばね定数にほぼ一致する。また、ボルトは M12 のポリカーボネート製で、締付け長さ $L_f=60\text{mm}$ で一定とした。実験は、2.1 で述べた方法と同様に振子式の試験機を用いる。

3.3 正味エネルギーの推定

図 12 には、一定のエネルギーが作用したときの、ボルト軸力と板ばねの荷重変化を示す。同図(a) は板ばねの圧縮力 F_r が残留している場合で、同図(b) は設定エネルギーが大きいため、接合面が分

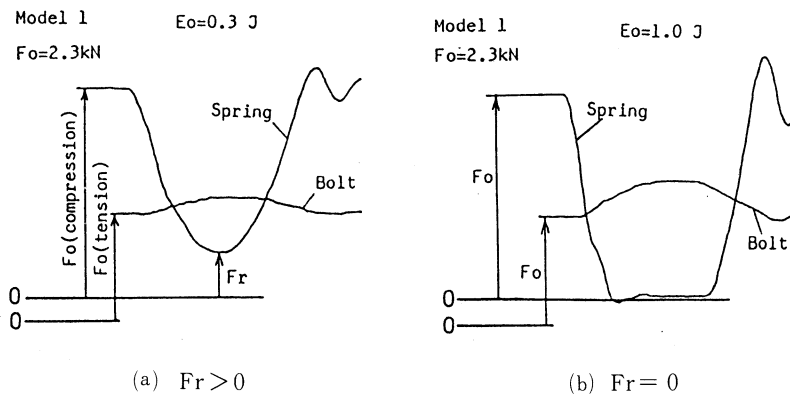


Fig. 12 Examples of experiment

離した場合 ($F_r=0$) を示す。図 13 は、3 つの締結体について初期締付け力を一定にしてエネルギーレベルを変えた試験を行うことにより、ハンマの公称エネルギー E_o と残留率 λ の関係を求めたものである (○印)。また同図には、式(2)で求めた結果を実線で示す。これらの比較から、実験結果のエネルギーは大きめとなる。これは、試験機から与える公称エネルギー E_o のうちかなりの部分が損失エネルギーとして散逸しているためとみられる。

そこで、実際にねじ締結体に吸収される正味エネルギー E_n を、実験で測定された量 (図 10 の F_r , F_m , δm) を用いて求めると、同図の●印のようになり計算値と良く一致する。このことから、公称エネルギー E_o のうち 40~60% 程度は板ばねとスペーサ間の摩擦損失およびハンマがクロスヘッドを打撃する際にねじ締結体以外に消散するエネルギーと考えられる。

3.4 Kc による Fopt および Emax の変化

図14には、 $\lambda = 0$ の場合について Kc による Ecr の変化を示す。Kc および Fo を小さくすることにより、Ecr を大きくすることができ、Model 3 は Model 1 に比べて約 2 倍のエネルギーを吸収できる。

図15には、Model 3 の場合について λ による Ecr の変化を示す。 λ を大きくとりたい場合には、Fopt を大きくする必要があるが、Ecr は $\lambda = 0$ の場合に比べて減少している。さらに図14と15より、同じ吸収エネルギーを必要とする場合には、Kc の小さい方が λ を大きく確保できるので、接合面の面圧保持という点からは、Kc の小さい方が有利といえる。

4. 結 言

ねじ締結体の設計基準として、エネルギー吸収という点からみた場合の最適締付け力について検討した結果は以下のように要約される。

- (1) 被締結体に O リングを介在させたねじ締結体 (Type 2) は、接合面に必要な面圧が低い範囲で、大きなエネルギーを吸収することができる。
- (2) エネルギー吸収能は、残留面圧のある一定値を限界にして、Type 1 の方が有利になる。
- (3) 両タイプの最適締付け力は、ここで提案した簡易な計算方法によってかなり精度の良い予測が可能である。
- (4) ねじ締結体に入力される正味のエネルギーは、エネルギー授受の過程における損失を考慮するこ

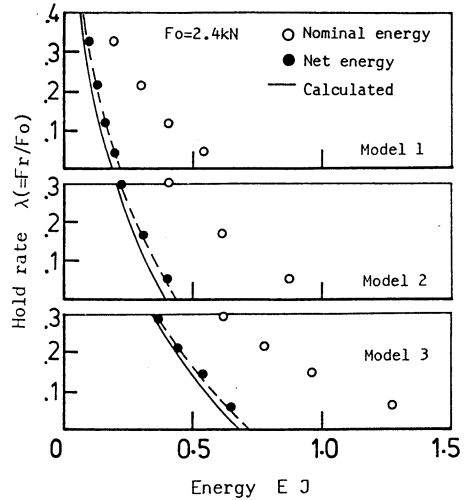


Fig. 13 Estimation of net energy

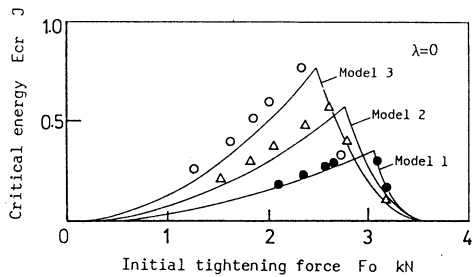


Fig. 14 Influence of joint model on the Ecr

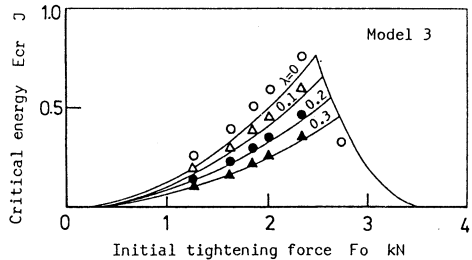


Fig. 15 Influence of hold rate λ on the Ecr

とが必要であり，この問題は個々の対象に即して評価しなければならない。

文 献

- 1) JIS B2401-1977：Oリング解説
- 2) 齊当，星野，井上：プラスチックボルトの引張衝撃試験法に関する研究，精密工学会誌，53，6(1987) 885.
- 3) ANSI/ASTM D 1822-68(1973): Standard Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials.

ロータリ除雪車の負荷制御

久保田 讓・山下 光久・疋田 弘光・渡部 富治

Load Control of Rotary Snow Plow

YUZURU KUBOTA, MITSUHISA YAMASITA, HIROMITSU HIKITA, TOMIJI WATABE

Abstract

Rotary snowplows are widely used for clearing roadways of snow.

In this paper, the automatic load control of the rotary snowplow was investigated to improve the working efficiency of the engine. For that reason, the speed control of the rotary snowplow was introduced to keep the total value of loads due to clearing-snow and car-running constant.

In order to realize the speed control, the following control methods were examined by means of the digital control.

- a) Engine Revolution Control
- b) Load Pressure Control
- c) Load Power Control
- d) Load Torque Control

Those control methods were compared with simulations and experiments. By its results, it are got the load power control method or the load torque control method is better than others.

1. ま え が き

先に報告¹⁾したように、ロータリ除雪車は大型、小型とも最近の普及は著しいものがある。特に、動力が100PS以上のものではその稼働率の向上と効率の改善が望まれる。また、運転も煩雑なので自動化が必要である。本報告では、除雪車にかかる負荷を一定に制御することによって自動的に車速が定められ、そのことによって効率向上もなされることを述べる。

2. 負荷制御方式

ロータリ除雪車の省力化には、第一に所定の原動機の発生する動力をいかに無駄なく投雪と走行の動力に使うかである。従ってここでは原動機それ自体の改善を考えるのではなく、定格の原動機出力を入力としてそれをいかに除雪動力にするかを考察する。その改善の第一が投雪距離を支配するブロワ回転数の無段速度化である。投雪による動力は全体の消費動力の60~70%を占めるので、無段速度化によって除雪場所における最小の投雪距離、すなわちブロワ回転数を設定で

きることは重要である。第二に原動機の出力に過不足なく合う負荷状態で作業を常に続けることである。従来ではこれらの二つとも、前者では有段速度（2～3段階）であり、後者では運転者の能力に依存しており、運転者の差が著しく効率を左右している。

2.1 ブロア回転速度の設定と制御

ブロア回転数の無段階設定のために、エンジン回転数を油圧ポンプ・モータへの入力と歯車入力との分割入力とし、遊星歯車機構として出力軸（ブロア回転軸）側で加え合わせる方式の機械・油圧式無段変速機とした²⁾。これは伝達効率を考慮して、無段回転数設定範囲（250～350r.p.m）の100r.p.mは油圧部分で変速し、定速部分の250r.p.mは効率の良い歯車伝達とするためである。従って、設定および制御入力は油圧ポンプ流量を定めるよう加えることとした。図-1には実際の使用した機器構成を示す。油圧ポンプは斜板形アキシャルピストンポンプ（川崎重工・NV80）で、モータは斜軸形アキシャルピストンモータ（川崎重工・LX120）である。

設定および制御はポンプの斜板角度を変えることにより、油圧流量が変わり油圧モータ回転数が変化することになる。斜板角は油圧ピストン・シリンダによるピストン変位で行う。レギュレータ（川崎重工・R2620）を付け、その圧力を電磁比例パイロット減圧弁（川崎重工・KWRZ6S）で操作する。パイロットは電流で動作するので、ディザー出力をもつ増幅器（油研・SK1006）で与える。また設定および制御を容易に行なわせるため増幅器への入力はマイコンを制御器としてデジタル方式とし、D/A変換器を通して行う。

負荷変動によるブロア回転数の変動をおさえるために、ブロア回転数を制御量とし、それを測定してフィードバックしてブロア回転数一定制御系を構成したのが図-2である。原動機回転数NEは負荷変動によって変化するので、ブロア回転数一定制御系に対して、ブロア回転数定速度分すなわち歯車伝達部と油圧ポンプ・モータ伝達部の可変速度分の両方に外乱として作用する。

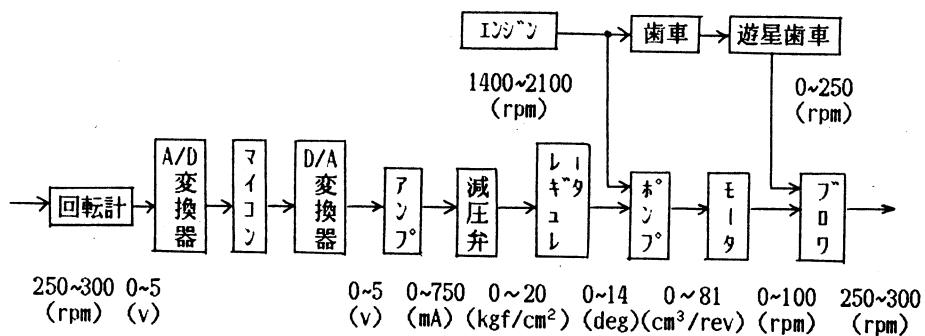
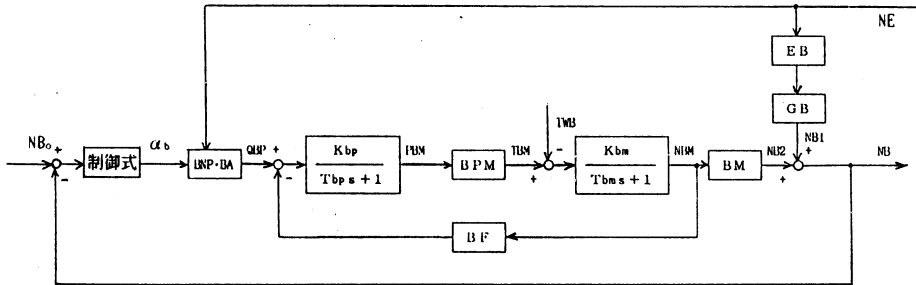


図-1 ブロア回転速度定・制御機器構成図

ロータリ除雪車の負荷制御



図一 2 プロワ回転速度制御系ブロック線図

しかも油圧部では斜板角度 α_b との積になって非線形作用となっている。斜板角度 α_b を設定ブロワ回転速度と測定プロワ回転速度との偏差による制御式によって与える。その出力式は、

$$\theta_b(n) = K_{bp} [e_b(n) + \frac{1}{T_{bl}} \{e_b(n) + e_b(n-1)(\Delta t + Z(n-1))\}] + M \quad (1)$$

$$Z(n) = \frac{1}{2} \{e_b(n) + e_b(n-1)\} \Delta t + Z(n-1)$$

$$e_b(n) = N_{b0} - N_b(n)$$

K_{bp} : 比例ゲイン

T_{bl} : 積分時間

$\theta_b(n)$: n 回時の出力

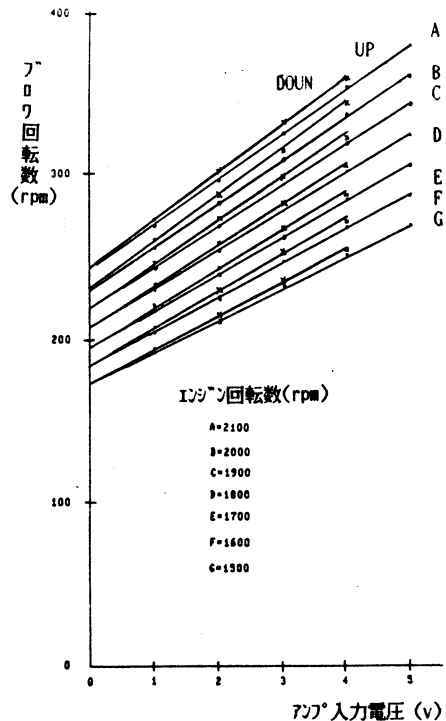
$e_b(n), e_b(n-1)$: n および $(n-1)$ 回時の
回転速度偏差

Δt : 制御サンプリング時間

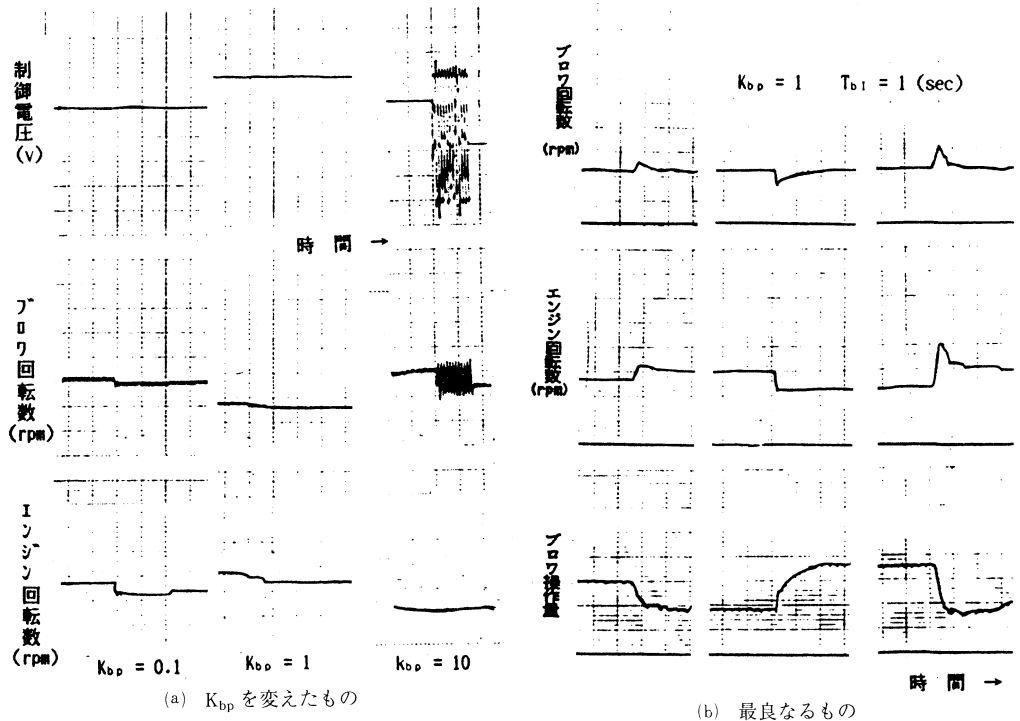
$N_b(n)$: n 回時の測定プロワ回転速度

N_{b0} : 設定プロワ回転速度

M は運転中に設定プロワ回転速度を突変させたときに、迅速に整定するように無負荷時の各プロワ回転速度に対する出力を求め、それを制御出力式に加えてプロワ回転速度一定制御を M で静的動作点として動的に作動させることとした。図一 3 に M を求めるプロワ回転速度と出力の関係を示した。図から明らかのように、エンジン回転速度をパラメータとして出力を増加させた時と減少させたときに多少のプロワ回転速度に差があるが、比



図一 3 プロワ回転速度と出力静時性



図—4 プロペラ回転速度制御実験

例関係であることがわかる。

従って、 M は各エンジン回転数で計算式として与えることができる。また M を動作点とした制御式は比例+積分で与えたが、ゲイン K_{bp} および積分時間 T_{bi} は図—4 に示すように $K_{bp} = 1$ 、 $T_{bi} = 1$ とすればよいことがわかる。制御サンプリング時間は短いことが望まれるが、その限界は制御器であるマイコンの演算速度でさまる。この場合、演算速度に余裕をもって $\Delta t = 0.1$ 程度でよいことがわかった。

2.2 走行車速制御

除雪車原動機の出力を無駄なく除雪に要する仕事に消費させることは非常に効率向上にとって重要である。従来このことは運転者の走行車速の加減によって行なわれており、運転者の技量に負うことが大きく、また負担にもなっている。原動機の定格出力を過不足なく消費することは除雪車にかかる負荷を常に一定に保つことである。負荷は走行に要するもの（走行負荷）と除雪に要するもの（除雪負荷）に大別できる。ここで負荷を一定に制御するには報告した¹⁾ ように、走行負荷、除雪負荷ともに走行車速による関数となるので、結局負荷一定にするには走行車速を制御すればよいことになる。一般のロータリ除雪車では車速が無段階に取れるよう油圧ポンプ・モータ変速にある範囲を限定するために歯車有段変速を連結しているものが多い。実験車の場合

ロータリ除雪車の負荷制御

も同様で（日本除雪機製 HTR-200型）図-5 にその機器構成図を示した。油圧ポンプは斜板形アキシャルピストンポンプ（ダイキン・PV24）で油圧モータは同形式モータ（ダイキン・MF24）であり、このポンプの斜板角度を変えることによってポンプ流量を変えて変速する。斜板角度は油圧ピストン・シリンダで操作するがそれをノズル・フラップ（ムーグ・JO62-521B）で切換

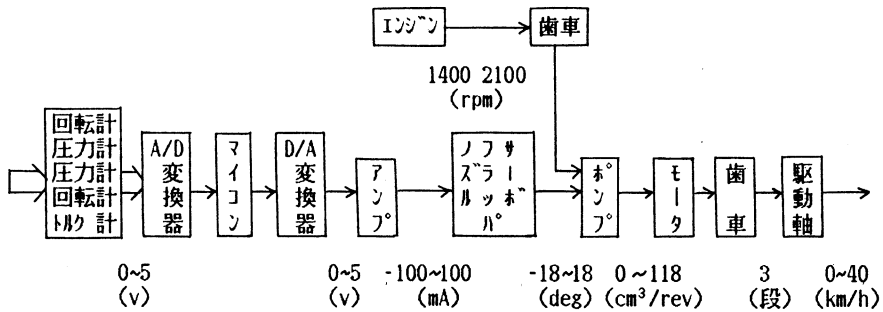


図-5 走行速度制御機器構成図

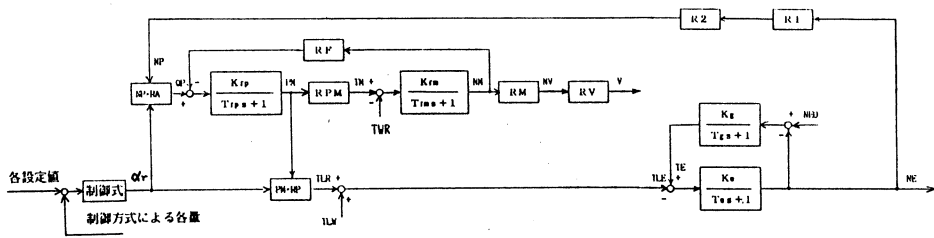


図-6 走行速度制御ブロック線図

え制御する。ノズル・フラップは電流入力で斜板角を負側にかたむけ車をバックさせることも可能である。制御器はマイコンで行い、ブロウ回転速度制御と並行して行う。

さて、ブロウ回転速度制御と異なり走行車速制御は目標値が負荷、制御量が車速であるから追従させることとなる。また制御偏差は負荷一定であるから、除雪車にかかる負荷を測定して原動機の定格負荷との偏差とすることが最も理論的には簡単であるが実用性の点から考えると価格などの点より負荷に相当する他の量を考えたほうが良いとも思われる。代替のものとして、エンジン回転数方式、ポンプ負圧方式、負荷馬力方式と負荷トルク方式を考案した。これらに対応する走行車速制御ブロック線図は図-6である。次にそれぞれの方式の制御式と考察を述べる。

(1) エンジン回転数方式

人間が従来行ってきたのはエンジン回転数の変動、あるいはエンジン音などによって負荷状

態を推定して車速制御してきた。これを自動的に行うことは最も簡単であり、制御式は比例+微分制御式とした。

$$\theta_v(n) = K_{vp} \left\{ e_r(n) + T_{vD} \frac{e_r(n) - e_r(n-1)}{\Delta t} \right\} + \theta_v(n-1) \quad (2)$$

$$e_r(n) = N_e(n) - N_{e0}$$

$\theta_r(n)$, $\theta_r(n-1)$: n および $(n-1)$ 回時の制御出力

K_{vp} : 比例ゲイン

T_{vD} : 微分時間

$e_r(n)$, $e_r(n-1)$: n および $(n-1)$ 回時のエンジン回転速度偏差

$N_e(n)$: n 回時の測定エンジン回転速度

N_{e0} : 設定エンジン回転速度

さらに積分性をもたせるために前回出力値を加えた。その他の方式でも同様とした。

(2) ポンプ負荷圧力方式

ポンプ負荷圧力はエンジン回転数よりも負荷の応答性が速いと考えられるので取り上げ、制御式はより簡単に比例制御式とした。

$$\theta_r(n) = K_{pp} e_p(n) + \theta_v(n-1) \quad (3)$$

$$e_p(n) = P_0 - \{ P_B(n) + R_{BR} P_R(n) \}$$

K_{pp} : 比例ゲイン

$e_p(n)$: n 回時の圧力偏差

P_0 : 設定負荷圧力

$P_B(n)$: n 回時の測定除雪負荷ポンプ圧力

$P_R(n)$: n 回時の測定走行負荷ポンプ圧力

R_{BR} : 除雪と走行負荷ポンプ圧力比

(3) 負荷馬力方式

馬力をとることによって、負荷圧力と回転速度が考慮されるのでより簡単になる。制御式は比例制御式とした。

$$\theta_r(n) = K_{kp} e_k(n) + \theta_v(n-1) \quad (4)$$

$$e_k(n) = H_0 - \{ H_B(n) + H_R(n) \}$$

K_{kp} : 比例ゲイン

$e_k(n)$: n 回時の馬力偏差

H_0 : 設定負荷馬力

$H_B(n)$: n 回時の測定除雪負荷馬力

$H_R(n)$: n 回時の測定走行負荷馬力

除雪、走行負荷馬力の測定についてはそれぞれについて馬力計を設置するのではなく、次のように負荷ポンプ圧力とモータ回転速度によった。

(a) 除雪負荷馬力

ブゴワ回転軸での馬力で考えると、除雪負荷馬力 (PS) H_B = ブロワ回転軸負荷トルク (kgf·m) T_B × ブロワ軸回転数 (n.p.m) N_B × $2\pi / (75 \times 60)$ である。 T_B は通常測定されないのでブロワ軸駆動油圧ポンプ圧力 (kgf/cm²) P_B を測定して、 T_B におきかえる。ブロワ駆動油圧モータトルク T_M (kgf·m) = $q_m / (2\pi \times 100 \times P_B)$ より、この T_M をブロワ駆動軸に換算して、 $H_B = K_{hb} \cdot P_B \cdot N_B$ を計算する。但し、 q_m は油圧モータの1回転当りの吐出流量 (cm³/rev.) であり、 P_B と N_B は測定する。

(b) 走行負荷馬力

走行負荷馬力 (PS) H_R についても、除雪負荷馬力と同様に油圧ポンプ・モータ駆動軸で考える。すなわち、 $H_R =$ 油圧モータ流量 (ℓ / min) Q_H × 油圧負荷ポンプ圧力 (kgf/cm²) $P_R / 450$ で、 $Q_M = q_m \times$ 油圧モータ回転数 (r.p.m) $N_M / 1000$ であり走行速度は通常測定するのでこれを走行車軸回転数 (r.p.m) N_R より換算して、 $H_R = K_{hr} \cdot P_R \cdot N_R$ より計算する。従って、 P_R と N_R は測定した値である。

(4) 負荷トルク方式

負荷トルクを直接測定してやると(1)~(3)の方式よりも、負荷の応答が速くねばりのあるエンジン作動が期待できる。しかし、通常このためにトルク計を設置するとコスト高になるので除雪負荷トルク推定の方法を考察した。そして、トルクは実測して比較も行った。この場合負荷トルクは馬力の場合と同様に除雪負荷トルクと走行負荷トルクに分けられる。制御式は比例制御方式とした。

$$\begin{aligned} \theta_v(n) &= K_{ip} e_t(n) + \theta_v(n-1) \\ e_t(n) &= T_0 - \{T_B(n) + T_R(n)\} \end{aligned} \quad (5)$$

K_{ip} : 比例ゲイン

$e_t(n)$: n 回時のトルク偏差

T_0 : 設定負荷トルク

$T_B(n)$: n 回時の測定または推定除雪負荷トルク

$T_R(n)$: n 回時の測定走行負荷トルク

実際には、走行負荷トルクについては除雪負荷トルクにくらべて小さいので負荷圧力で測定する。

推定除雪負荷トルク T_{BE} については図—6より

$$T_{BE} = BPM \cdot PBM - \frac{T_{mb} S + 1}{K_{bm}} \cdot NBM \quad (6)$$

BPM : 油圧モータ・トルク変換係数

T_{mb} : 油圧モータ時定数

K_{bm} : 油圧モータゲイン

NBM : 油圧モータ回転数

と推定されるが、微分演算は誤差が大きいのでこれを双線形変換すると図—7のように計算する。

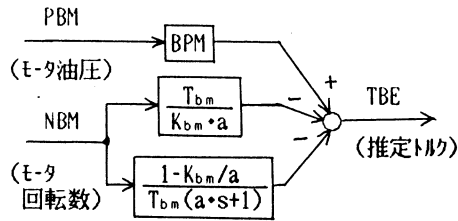


図-7 除雪負荷トルクの推定ブロック線図

3. 実験結果とその考察

各制御式における制御定数は、シミュレーションにより例えば馬力制御方式のとき表-1のシ

表-1 シミュレーション条件

除雪条件	除雪高さ	0.21m
	雪密度	0.41 g/cm ³
制御条件	サンプリング時間	0.1sec
	設定プロワ回転数	300rpm
	制御設定馬力	160PS

ミュレーション条件で図-8(a), (b), (c)のように走行速度, プロワ回転数, エンジン回転数時間応答が得られる。それぞれゲインを0.01, 0.02, 0.05の値で比較したものである。プロワ回転数については、エンジン回転数の変動を強

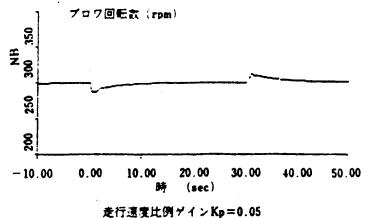
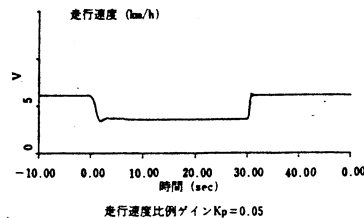
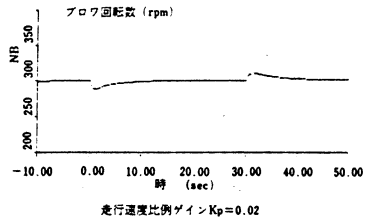
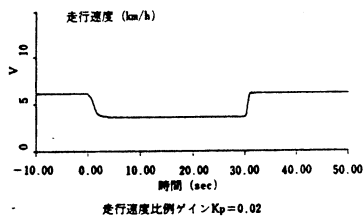
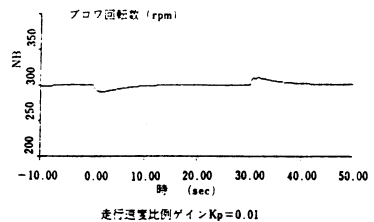
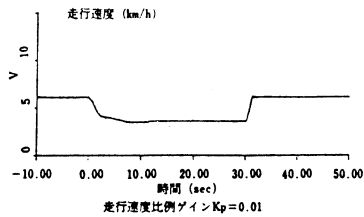


図-8(a) シミュレーションによる走行速度時間応答

図-8(b) シミュレーションによるプロワ回転数時間応答

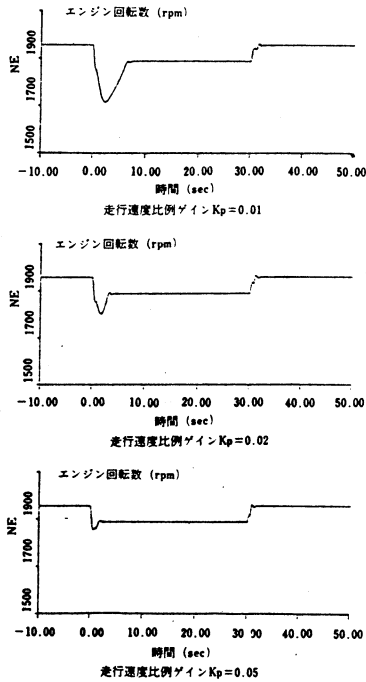


図-8(c) シミュレーションによるエンジン回転数時間応答

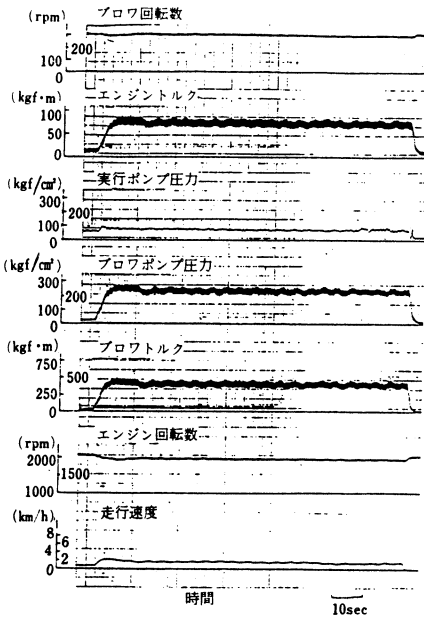


図-9 馬力制御方式による時間応答実験

く受けるが、その変動の大きさにあまり関係なく一定に制御されており、ゲインが大きいほど良好である。これは他の制御方式でも同様で、ブロワ回転速度の制御は(1)式の方法で十分であると思われる。走行速度はゲインが大きいほど速い応答となっている。エンジン回転数も同様にゲインが大きいほど回復が速い。従って、ゲインが大きいほど良好と考えられるが、走行速度においてゲイン0.05でわずかであるが振動がでてくる。これはゲインがこれ以上大きくなると、より振動的になると思われ、雪の性質上振動が一度生じると実車ではそれがそのまま走行速度等はハンチングとなるので、特に速度応答に振動のないゲインを設定する必要がある。この場合、ゲイン0.02が適当であると考えられる。他の制御方式についても同様な観点から、まずシミュレーション実験から定めておくことができ実車実験ではこの附近で検証すれば十分であった。

表-2 実車除雪実験条件

除雪条件	平均除雪高さ	0.68 m
	雪密度	0.25 g/cm ³
制御条件	サンプリング時間	0.1sec
	設定ブロア回転数	300rpm
	制御設定馬力	160PS
	比例ゲイン	0.02

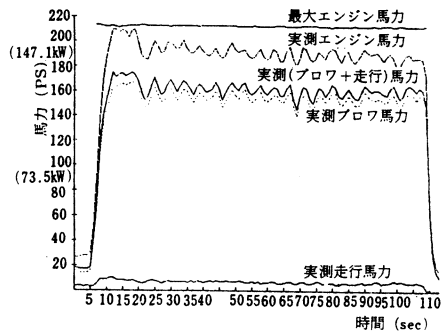


図-10 馬力制御方式による時間馬力応答

さらに、実車実験の1例を同じ馬力制御方式で示したのが図-9である。その除雪条件は表-2であり、図-10は馬力でどのように時間応答しているかを示したものである。図からわかるように、安定した制御が行なわれていると同時に、目的であったエンジンパワーの除雪と走行パワーへの配分も良くバランスされ、エンジン能力の80%程度が除雪に使われ、エンジン出力以後では85%程度となっていることがわかる。人間による運転では60~70%程度であるから、利用効率が向上することがわかる。

もう一つの例として、トルク制御方式の実車実験例を図-11に示す。除雪条件は表-3である。これは、トルク推定方式であるが、対応する実測トルク値と推定トルク値をシミュレーションで比較したのが図-12である。さらに実車実験での比較とトルク時間応答を示したのが図-13である。これらの図よりわかるように推定はほぼ一致し、時間のずれはほとんどないことがわかる。走行制御は図-11よりわかるように、他の方式では実現できない低いエンジン回転数で稼働し、

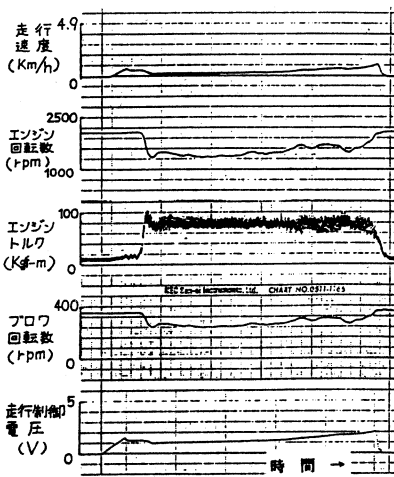


図-11 トルク制御方式による時間応答実験

表-3 トルク方式による除雪条件

除雪条件	除雪高さ	0.3~1.2m	
	雪密度	0.35 g/cm ³	
	除雪幅	0.5~2.6m	
制御条件	サンプリング時間	0.1sec	
	ブロー	ブロー回転数	0 rpm
		比例ゲイン	1
		積分時間	1 sec
	車速	エンジン回転数	2000rpm
比例ゲイン		1/120	
設定トルク		65kgf·m	

ねばりのある運転が実現されている。

4. あとがき

ブロワ回転速度設定と制御については(1)式の制御式で十分である。ただ、車速制御とブロワ回転数制御を並行的に行ったとき、ブロワ制御側が車速制御の負荷となりその応答性を遅らせる原因となる場合が特に積雪高さが早く変動するような時におこり易い。そのような時はブロワ回転速度制御は行なわないで、走行車制御のみでもわずか5～6 r.p.mの落ちこみにすぎないことが実験でたしかめられた。従って、投雪距離がそれほど問題にならない効外などではブロワ回転速

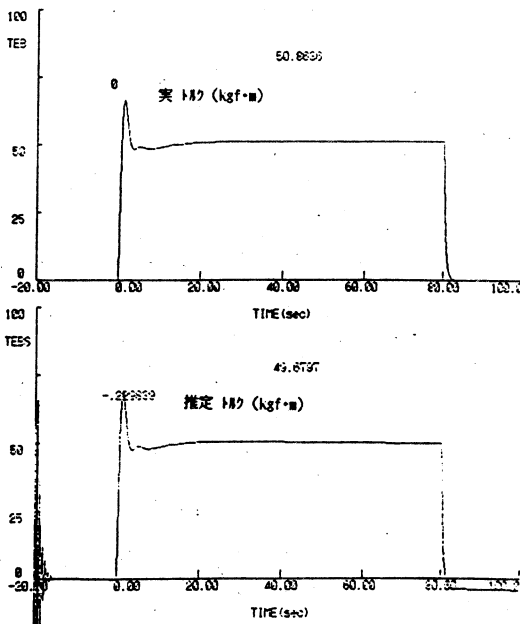
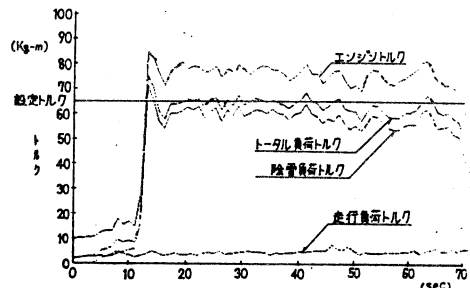
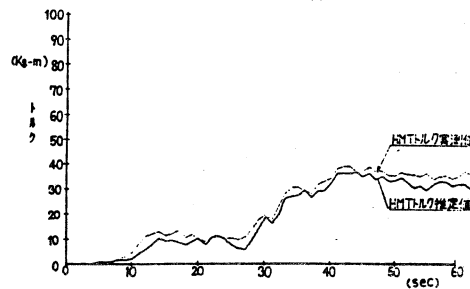


図-12 シミュレーションによるトルクの推定値との比較



(a) トルク時間応答



(b) 推定と実トルク時間応答

図-13 トルク制御方式

度制御なし車速制御するとさらに除雪効率が向上する。

走行車速制御は4つの方式を考察したが、次のように各方式の長所短所をまとめることができる。回転数方式は制御変数が1変数なので最も簡単であるが、負荷の伝達がおそいので不安定となり、ゲイン定数の大きさに敏感である。圧力制御方式は負荷の伝達がはやくより安定であるが、この方法では除雪と走行負荷圧力が同等ではなく道路条件によってその比率が一定でないので実験的に定める必要がある。馬力制御方式では設定馬力が一番簡単に設定でき、安定的であるが、制御変数4変数と多い。トルク制御方式はねばりのあるエンジン運転の制御ができ、より安定的であるが、馬力制御方式と同様に制御変数が4変数である。

以上、各制御方式の長短所をまとめたが馬力制御方式またはトルク推定によるトルク制御方式

久保田 讓・山下 光久・疋田 弘光・渡部 富治

がより安定的に、かつ車速を大きくでき効率的であることがわかった。さらに運転者の負担軽減もこの車速自動化で、人は車の方向のみをすればよいので実現できたといえよう。

最後にこの研究に関係した制御講座の皆様および実験データなど多大な協力をいただいた北海道開発局建設機械工作所の各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 久保田ほか：ロータリ除雪車のシミュレーション 室蘭工業大学研究室報告第37号 昭和62年11月
- 2) 渡部ほか：除雪車用機械油圧式変速機の試作 日本機械学会シンポ 昭和60年8月

機械油圧式変速機的设计

渡部 富治・久保田 譲・柳沢 雄二 (開発局)

The Design of a Hydro-Mechanical Transmission for a Snow Plow

TOMIJI WATABE, YUZURU KUBOTA & YUJI YANAGISAWA

Abstract

The improvement of efficient snow plowing is still a big problem in the heavy snow regions. This paper is concerned with gaining a greater capacity of snow plowing, not by increasing the engine power, but only by using an automatic transmission.

We have studied a hydro-mechanical transmission (HMT) for this purpose. The HMT requires such complicated investigations in design, that it has been seldom used except in military or aviation fields.

A case of an input of 200PS was investigated and the results were shown including a general view of the HMT which is almost the same size as a simple mechanical transmission.

It was proved by 300hrs of snow plowing tests, that the HMT increases the snow plow's capacity 20% more than the one equipped with a manual transmission.

key words: gear, hydraulic transmission, snow plow, hydro-mechanical transmission, split drive, automatic transmission, design engineering

1. 緒 言

多降雪地帯における除雪作業の能率化は、今日なお重要な課題である。積雪深さ1 m以上ではロータリ除雪車が必要となるが、この性能向上と運転合理化を狙った研究が、北海道開発局を中心に進められてきた¹⁾。この一環として、今回の新形変速機を検討し試作した。

ロータリ除雪車の効率を高めるには、状況に応じた最適ブロー回転速度を選択するとともに、常時エンジンの最大出力が利用できる運転に改めることが必要である。さらに自動制御を採用して運転を合理化すれば、操作が容易になり、除雪能率や作業の安全性を向上させることができる。

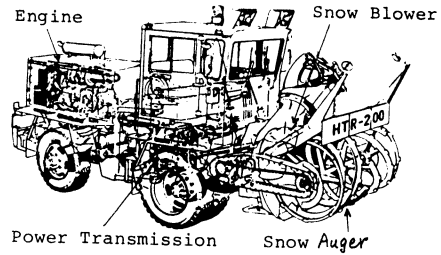
こうした目的に最も適した変速機として、機械油圧式変速機を採りあげ、ブロー駆動用として今回研究した。機械油圧式は、差動歯車機構と静油圧駆動装置の組合せからなり、歯車機構の小形高率性と油圧装置の変速制御性とを兼備する。しかしこの設計は高度の技術を必要とし、主に航空機や戦闘車両の変速機に採用されているに過ぎなかった。幸運にも今回は、比較的容易な条件下にあり、かつこの採用によって除雪能力の向上が十分に期待できた。以下、今回の機械油

圧式変速機的设计について報告する。

2. ロータリ除雪車の構造と課題

(A) 構造

図一は北海道における代表的ロータリ除雪車の例である。エンジン動力は、パワートランスミッションにより、表一の2系統に伝えられる。



図一 ロータリ除雪車の構造

投雪距離を大きくする場合は除雪系を高速に切替え、投雪距離が小さい場合は低速に切替える。除雪量は、車体ごと移動してフィードする際のフィードスピードによってコントロールする。除雪量および負荷の微妙な調節

が重要であり、このため走行系には油圧式による無段変速駆動が採用されている。除雪作業中のエンジン回転速度は一定で、変速機の操作によってフィードスピードが制御される。

以上のような動力伝達方式は、採炭機械やリクレマにおける方式と同じである^{2),3)}。

表一 除雪車の動力系統

系統	作業内容	動力伝達方式	系 路	備 考
(1)除雪系	雪の粉碎・かき込み・投雪	機械式	プロペラ軸(ブローアおよびオーガ)	高・低速2段切替
(2)走行系	走 行	油圧式	油圧ポンプ 油圧モータ 走行車輪	無段変速

(B) 課題

以前からロータリ除雪車に関する検討が重ねられてきた。現在も問題として検討が続けられているものを整理すると、運転の合理化と作業効率の向上に集約される。表二にまとめ示した。

表二によれば、市街地域などでの除雪能力は、公称値の50%以下となっていることが想像

表二 除雪車の問題

課題名	内 容 (対象の望まれている問題点)	対策案など
(1)運転の合理化	現車輛は運転操作が複雑である。このため、安全性、除雪作業能率の確保、異常運転の防止には、高度の技術と細心の注意が必要である。これを改める。	自動化、最適制御の導入
(2)除雪作業効率の向上	作業が苛酷なので、実除雪能力は公称値の約50~80%である。異常負荷による稼働率低下も見逃せない。これらを改め効率向上を図る。	トータルパワーコントロール

される。これらの問題を改めることにより、エンジンパワーの増大を行なわなくても、かなりの除雪能力向上を期待することができる。

3. ブロー用変速機と除雪能力

ブロー回転数 N_b は、投雪距離によって設定される。ブロー軸動力 L_b は式(1)で示されるから、単位動力当り除雪量 G/L_b を高めるには、投雪距離（したがって N_b ）を必要最小値にとどめる必要がある⁴⁾。

$$L_b \doteq C_b G N_b^2 \tag{1}$$

$$\therefore G/L_b \doteq (C_b N_b^2)^{-1} \tag{2}$$

ここで、 L_b =ブロー軸動力、 C_b =定数、 G =単位時間当り除雪量、 N_b =ブロー回転数

図2は雪質が一定と見なせる場合、除雪量 G =一定としたブロー軸トルク T_b である。除雪系が2段変速のとき、ブロー軸上に換算したエンジントルクは点線で示される。図より、 $N_b=230$ または 350 rpmのときエンジン出力が最大になり、これ以外の速度では出力が低下することになる。

除雪系を無段変速にすれば、エンジン回転数を最大出力状態に固定したままでブロー速度の加減ができる。したがって、投雪距離が小さくかつ頻繁に調節せざるをえない市街区域での運転においても、エンジンパワーは常に最大値が活用される。 $G \propto L_b$ だからゆ結果的に除雪量 G を増すことになる。

今回の機械油圧変速機は、パワーコンスタント制御も可能であるから、オーバートルク状態に入った場合でもエンジnstールを避けることができる。この特性は実際の作業性を著しく向上させる⁵⁾。

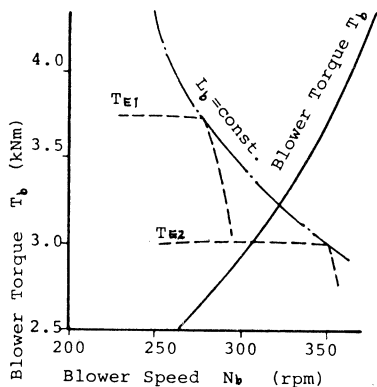


図-2 ブロー軸トルク

表-3 ブロー用変速機の基本仕様³⁾

入力	=200PS/1241rpm
出力	=180PS/250~350rpm
速度比 e	=0.201~0.282
寿命	=3500h (耐用10年)
搭載車輛	=HTR-200
エンジン	=213PS/2000rpm (定格)

4. 機械油圧方式の検討

今回の研究対象では、表一3に示した仕様の変速機とした。出力180PS、250~350rpmである。変速範囲から単式遊星歯車1段減速の出力分割形が適当である⁶⁾。電気式、流体式、摩擦式などの変速機に比較して、機械油圧式の優位性が現われる領域にあると考えられる。

これを、現在の動力分配機（除雪・走行2系統歯車を1つの歯車箱に組込んだもの）内に収容し、かつ遊星歯車の減速比をブローア最終段減速比に一致させれば、減速機1組が不用になり合理化する。これは車輛前部重量軽減にもなり、これまでの走行安定不良問題が解決することになる。ただし、油圧ポンプ・モータ1組とこの制御系が追加になっている。

図一3は、以上の動力伝達系をスケルトン図として示したものである。従来の動力分配機では、低速、高速の2段切替歯車が含まれていた。図一3ではこれが遊星歯車に入れ替ったが、最終段減速機はない。

5. ブローア用機械油圧変速機的设计

今回は、図一3の構造を対象として、表一3の仕様を満足する機械油圧式変速機的设计を行った。

(A) 設計式（記号は図一4参照）

リングを固定した場合の遊星歯車の減速比（基準速度比 e_c はつぎに示される。

$$e_c = Z_s / (Z_s + Z_r) \quad (3)$$

内・外接歯部の強度と動力等配との整合性をうるため、リングギヤ歯数を標準より1枚多くする。またプラネットピニオン3個を等配する⁷⁾。

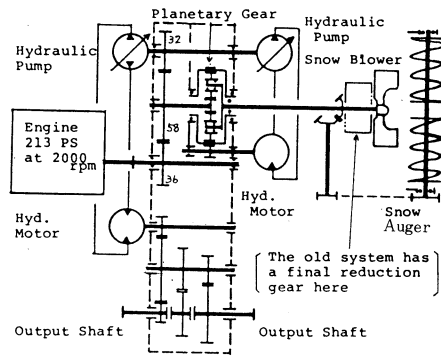
$$Z_r = Z_s + 2Z_p + 1 = 3B - Z_s \quad (4)$$

ただし、B=任意の整数

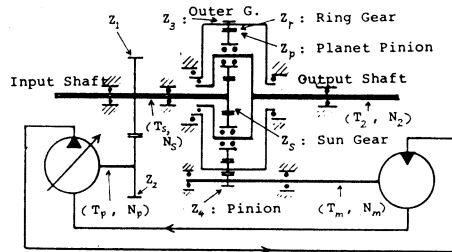
必要な油圧モータトルク T_m は、遊星歯車の出力軸トルク T_2 より求まる。

$$T_m = \frac{Z_4 T_2}{(1 + Z_s/Z_r) Z_3 \eta_g} \quad (5)$$

ここで、 η_g = 歯車効率



図一3 ブローア用機械油圧変速機と動力伝達系



図一4 対象変速機の構造と記号

T_m の値から油圧モータの押しのけ容積 D_m の大きさが定まる。

$$D_m = \frac{2\pi T_m}{\Delta p \eta_s \eta_{mt}} \quad (6)$$

ここで、 Δp =圧力差、 η_s =回路効率、 η_{mt} =トルク効率

遊星歯車の入出力軸速度から油圧モータ回転速度 N_m が決まり、油圧ポンプの仕様も定まる。

$$N_m = (N_2 - e_c N_s) (1 + Z_s/Z_r) (Z_3/Z_4) \quad (7)$$

$$D_p N_p \eta_{pv} = D_m N_m / \eta_{mv} = Q \quad (8)$$

ここで、 D_p =油圧ポンプの押しのけ容積、 η_{pv} =油圧ポンプの容積効率、 η_{mv} =油圧モータの容積効率、 Q =流量

(B) 遊星歯車装置

リングギヤとプラネットキャリアとを非浮動、サンギヤを浮動支持にした場合を検討する。このように、構成歯車の一部を浮動支持することにより、寸法誤差によって発生する荷重の不等配が防止される⁸⁾。今回リングギヤを非浮動にしたのは、リングギヤが回転するので、構造の複雑化を嫌ったからである。

歯車中心距離 a は、2組の噛合において同一値をとる。

$$a = \{(Z_s + Z_p)/2 + y_1\}m = \{(Z_r - Z_p)/2 + y_2\}m \quad (9)$$

したがって、式(4)および(9)よりつぎが導かれる。

$$y_1 = y_2 + 0.5 \quad (10)$$

ここで、 y_1 =外接噛合の中心距離増加係数、 y_2 =内接噛合の中心距離増加係数

Z_r 歯車の転位係数 $x_r = -0.4$ として y_2 を仮定すると⁹⁾、式(10)から y_1 が決まる。さらに噛合圧力角 α_b および $(x_s + x_p)$ が求められる。

$$y_1 = \frac{Z_s + Z_p}{2} \left(\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_b} - 1 \right) \quad (11)$$

$$x_s + x_p = \frac{1}{2} (Z_s + Z_p) \frac{\text{inv} \alpha_b - \text{inv} \alpha_0}{\tan \alpha_0} \quad (12)$$

ここで、 α_0 =工具圧力角、 $x_s = Z_s$ 歯車の転位係数、 $x_p = Z_p$ 歯車の転位係数

同じく y_2 から $(x_r - x_p)$ を求め、 $x_r = -0.4$ として x_p を決定し、ついで $(x_s + x_p)$ から x_s 値が定まる。各転位係数の値が、強度・噛合率などの点で不適當ならば、 y_2 値を変え計算を繰返す。その結果、式(9)により中心距離を決定する。

(C) 油圧駆動装置

機械油圧式変速機はすぐれた特徴を持ちながら、ほとんど普及することがなかった。その主な原因は、このシステムに組込まれるべき油圧駆動装置には、極めて苛酷な条件が課せられるからである。したがって、これに耐えられる油圧駆動装置の開発と、条件緩和方策の探究が鍵とされていた。

機械油圧式変速機に用いられる油圧駆動装置には、つぎの事項が求められる¹⁰⁾。

- (1)許容速度範囲や負荷トルク範囲が極めて広いものであること。
- (2)低速安定性がすぐれていること。
- (3)部分負荷運転の動力伝達効率低下が小さいものであること。

今回の変速範囲は $(350-250)/350=0.286$ に過ぎない。図—3～4 に示したが、ポンプだけを可変形にした。上記事項から、油圧ポンプはアキシャルピストン形（斜板式）、油圧モータにはアキシャルピストン形（斜軸式）を組合せることにした。現在では最もすぐれた組合せの一つと考えられている*。また実用性から、既に市場にある油圧ポンプ・モータから適当なものを選択し、この特性に合わせて遊星歯車装置の設計を行うことにした。

一般的には、与えられた速度比 e に対し、基準速度比 e_c を選ぶ程、全動力中に占める油圧動力（油圧動力比）が増し、油圧系は苛酷になる反面、歯車系が楽になる。油圧モータの低速安定性の難しさも減る。

また Z_3 の歯数を小さくする程、油圧モータは高速低トルク負担になり、低速安定性が増す。一方で Z_3 歯車の負荷条件は厳しくなる。

(D) 油圧ポンプ・モータの選定と歯車仕様

油圧ポンプ・モータは表—4 により選定した。これらの機器は一般産業用であるが、 C_p 値⁶⁾ および単位質量当りの出力¹¹⁾ が高く、 -40°C の低温試験による耐寒候性も確認されている。航空用の水準に接近しており、一頃に比較し著しく進歩している。今回の目的に適した機器の一つであると判断した¹²⁾。

表—4 の仕様を基準にして検討し、遊星歯車の仕様を後

表—4 油圧ポンプ・モータの選定基準と選択機器

	選定基準	選択機器
ポンプ	可変容量形, 小形軽量, 高信頼性, 電子機器との適合性, 耐寒候性, 高効率, 低価格……	形式 NV80—100R $D_p = 0 \sim 81\text{ml/rev}$ 定格 34.3MPa 2200rpm $C_p = 13000, 2.2\text{kW/kg}$ (川崎重工)
モータ	定容量形, 小形軽量, 高信頼性, 低速安定性, 耐寒候性, 高効率, 低価格……	形式 LX—120 $D_m = 124\text{ml/rev}$ 定格 34.3MPa 1800rpm $C_p = 16000, 3.4\text{kW/kg}$ (川崎重工)

*例えば、NATO 軍の戦車用操向変速機には、この組合せが採用されている。

述の表—6 のように決定した。この場合の検討項目を表—5に整理した。この条件はかなり複雑であるといえる。

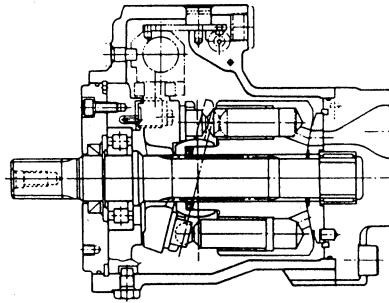
図—5～6は、油圧ポンプおよびモータの構造を示す。油圧ポンプおよびモータは、いずれも球面弁板を使用しておるから、キャビテーション限界が高く高速運転に適している。球面に働く油圧によって、シリンダブロックにはモーメントが作用するが、その方向はピストンによるモーメントを打消すから、全体として設計が有利になる。ポンプの斜板は、ピストン反力をその背面で支える構造である。小形になるが斜板を操作する際の摩擦モーメントが大きく、このため主回路圧力で働くサーボ装置を備えている。これからは主流になる構造と思われる。

図—5のポンプは、外部からの油圧アナログ信号で押し入れの容積が制御される。電気油圧サーボ弁を利用すれば電子制御システムとの組合せが容易である。

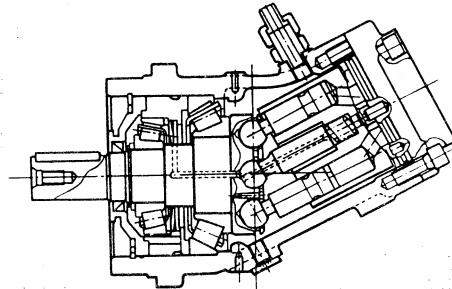
図—7は今回のポンプ特性を示す。 $N_p = 2200\text{rpm}$ の場合であり、効率的に厳しい高速

表—5 仕様決定のための検討項目

	検 討 項 目
油 圧 系	(1) $N_p \leq 2200\text{rpm}$, $D_p \leq 0 \sim 81\text{ml/rev}$ のこと。 (2)最大圧力 \leq 定格圧力の90% $\approx 30.9\text{MP}_a$ のディレイトイティング値を用いること。 (3)油圧動力比 ξ を小さくするため、 N_m の最小値を300rpm以下に選ぶこと。 (4)低速安定性から、 N_m の最小値 $>200\text{rpm}$ のこと。
歯 車 系	(1)基本仕様表3を満足すること。 (2)プランネットピニオンの数=3 (3)現在の歯車箱寸法内に収容できること。 (4)軸受が苛酷な条件下に置かれぬこと。



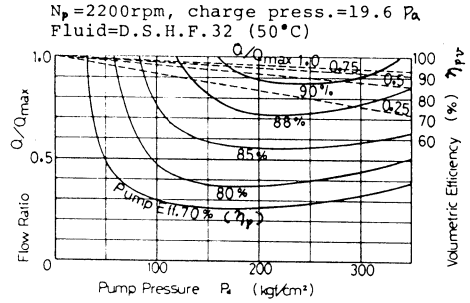
図—5 油圧ポンプの構造 (NV80—100R)



図—6 油圧モータの構造 (LX—120)

運転といえるが、部分負荷時を含め高い効率を示している。最高効率は、 $\eta_p \doteq 90\%$ である。

表一6の内容は、歯車系と油圧系の苛酷さが、ほぼバランスしたもになっている。歯車系の歯面荷重は、滲炭焼入研磨仕上げなどの処置を施した歯車によって支えられる。各歯車の歯数の選択、転位係数の値は適正レベルにある。したがって強度・性能面から妥当な歯形になっている。油圧ポンプに対しては、定格の102%速度、



図一7 油圧ポンプの特性 (NV80-100R)

表一6 検討結果の変速機・設計仕様

歯車番号	歯数	歯幅 mm	モジュール	ピッチ円直径 mm	ねじれ角 °	転位係数	中心距離 mm	速度比	接線荷重 kN	ヘルツ応力 N/mm ²	熱処理	噛合圧力角 °	
歯車系	Z _s	20		65.00		0.457		e _c = 0.18018	11.0× 3箇所	1000	滲炭焼入	23.3	
	Z _p	35	37	113.75	0	0.250	91.500				滲炭焼入		
	Z _r	91		295.75		-0.400					窒化		
	Z ₃	83	60	4.5	381.844	12	-0.60	216.225	Z ₄ /Z ₃ =	22.9	1030	滲炭焼入	20.4
	Z ₄	11		50.606		0.60		0.13253			滲炭焼入		
油圧系		運転速度rpm		運転油圧MP _a		備考		*印は、表一5の条件をわずかに超えた値になっている。					
	ポンプ	2250*		max. 31.6*		D _p = 18.3~68.8ml/rev							
	モータ	243~1163				T _{m(max)} = 5.54kNm							

ポンプ・モータに対しては定格の92%油圧になっているから、表一5の条件をわずかながら超えている。全体のバランスから考慮し、油圧系でこの苛酷さを負担させた。歯車系ではZ₄ピニオンのヘルツ応力、ピニオン軸の曲げ剛性を適性レベル内に保つため、2~3の試行設計を要した。

表一6に基づき、つぎにより変速機特性を推定した。

N₂ および T₂ が与えられれば、式(5)~(8)により N_m、T_m、Q および Δp が求まる。ただし、 η_{mv} 、 η_{mt} は油圧モータ単体試験よりえた値を用いる。

Q および Δp が与えられると、図一7の η_{pv} を用い式(8)より D_p が求まる。ただし N_p = 2250rpm である。図のポンプ効率 η_p からポンプ駆動動力も計算できる。したがって、変速機全入力 L_t による L_p の割合 (油圧動力比 ζ) も判る。

$$L_p = \Delta p Q / \eta_p \tag{13}$$

$$\zeta = L_p / L_t \tag{14}$$

以上により理論的に変速機特性を求めた結果を図-8に示す。ただし $L_1=200PS$ としてある。
 $N_2=250\sim 350rpm$ において、総合効率 $\eta \approx 89\sim 91\%$ であり、電気式、流体式、摩擦式変速機などに比較して高い値になる。

図-9は、動力分配機歯車箱に今回の変速機を組み込んだ場合の構造図である。現除雪車の動力分配機と主要寸法は同じであり、従来の動力分配機に替え搭載できるよう配慮されている。

図-9では、一部に非標準軸受が用いられた。直径寸法に比較し荷重が極めて小さい箇所が存在するからである。プラネットピニオンの軸受は標準形である。

組立方法を考え、軸受や歯車構造が決定された。一方向からの挿入組立が可能であり、位置決めおよびスラスト荷重の処理ができる。サンギヤは軸心でスプライン嵌合している。これはルー

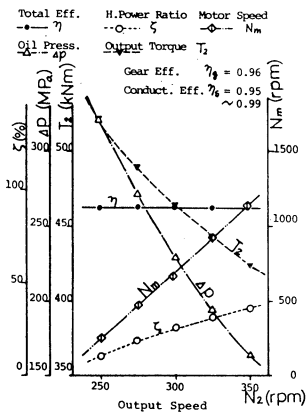


図-8 機械油圧変速機の理論特性

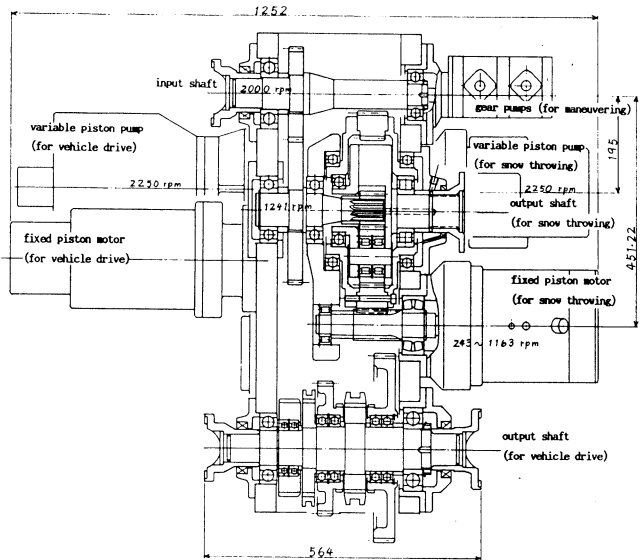


図-9 機械油圧変速機を組み込んだ動力分配機の構造

ズフィットであり、歯車ピッチ誤差などによる偏荷重に対しては、容易に軸心移動を許容するので、3 噛合点の荷重はほぼ等しく分配される。

6. 考 察

表-6の結果は、油圧モータの高速側運転速度に余裕があり、これを改めれば、 ζ が低下するのでさらに総合効率は上昇すると思われる。

この手段は、歯数比 $Z_4/Z_3=11/83 \approx 0.133$ をさらに小さくすることである。しかし全体構造から1段減速に限定せざるをえない。

今回の検討では、ピニオン強度とその軸剛性とから、 $Z_4 < 11$ の範囲は実用できないと結論した。

また歯車箱内のスペースから、歯末高さの修正を行ったうえで、 $Z_3 \leq 83$ が実現可能範囲であることが判った。

しかし、 $D_m \doteq 50 \text{ml/rev}$ クラスの油圧モータ2台により、 Z_4 ピニオン2個を用いて Z_3 歯車を駆動するように変更すれば解決する。当然ながら、構造は複雑化し製造コストが著しく上昇するであろう。特別用途を除き適当ではない。

これから、表一6、図一8～9の結果は、実用的観点からの限界に近いものと思われる。

今回は、この検討結果に基づいて変速機を試作し、この変速機を搭載した除雪車による試験が実施された。この試験では、除雪能力を向上させる目的の自動制御方式の研究に主眼が置かれた。この実車試験は延300時間行われた。この結果、除雪能力（単位時間当りの除雪量）は20%増加することが確められた。エンジンパワーとしては、20%以上の増加が可能であったが、現在の投雪機構では雪詰まり状態になり、これが能力限界を決める原因になった¹³⁾。

これらの試験期間中、今回の変速機に対する性能測定は定施できなかった。しかし全期間を通して、異常状態（振動、騒音、軸受過熱、油温上昇……など）は全く生じなかった。この除雪車は現在も正常運転ができる状態を保っている。したがって、今回の設計の妥当性がほぼ認められたものと考えている。

7. 結 言

以上の研究により、つぎのように結論できる。

- (1) 基準速度比 $e_c \doteq 0.18$ の遊星歯車と、 $D_p \doteq 18 \sim 70 \text{ml/rev}$ 、 $D_m \doteq 120 \text{ml/rev}$ の適切な油圧ポンプ・モータを和動的に組合せ、目的の変速機を設計することができた。
- (2) 200PS入力で運転中、歯車および油圧系に生ずる応力や圧力は、妥当な水準に収まる。
- (3) 総合効率は89～91%であり、他の可変速動力伝達方式よりもかなり高い。
- (4) 今回の設計は、現在稼働中の除雪車輛に搭載できる寸法・形状である。
- (5) 実車に搭載し300時間の除雪運転を実施した結果、何ら異常が認められていない。
- (6) これらより実用性の高い変速機であると考えられる。

この研究は北海道開発局建設機械工作所を中心にして実施された。これに関連し、三井三池製作所、川崎重工業および日本除雪機製作所の協力をえた。

参考文献

- 1) 柳沢, 除雪機械に関する調査試験, 建設機報, 61 (昭58)
- 2) 青木, 200kWドラムカッターローダー, 日立評論, Vol. 48, No. 12, 1966
- 3) 渡部, 石原, リクレーマの油圧駆動, 日立評論, Vol. 48, No. 12, 1966
- 4) 北海道開発局, 除雪機械に関する調査試験報告書 (昭57)
- 5) 渡部・ほか, 除雪車用機械油圧式変速機の試作, 日機講論集, 22回シンポジウム No. 850—3 (昭60)

機械油圧式変速機の設計

- 6) 石原・ほか, 油圧工学, 朝倉書店 (昭43)
- 7) 中田, 機械の数学解析 (昭26)
- 8) 山下, 遊星歯車装置の機構と応用, 機械設計, Vol. 22, No. 5 (昭53)
- 9) 日本機械学会, 機械工学便覧, 7編 機械の要素, 6章歯車, 転位係数の選び方, (昭52)
- 10) 宮尾, 自動車用油圧変速開発の技術的動向, 油圧と空気圧, Vol. 5, No. 2 (昭49)
- 11) 渡部, 産社機械における油圧と空気圧の応用, 油圧と空気圧, Vol. 4, No. 1 (昭47)
- 12) 渡部・ほか, ロータリ除雪車における HST の寒冷対策, 油圧技術, Vol. 20, No. 1 (昭56)
- 13) 久保田・ほか, パワーコントロールによる除雪能力の向上, 油圧技術, Vol. 26, No. 2 (昭62)

小形流量調整弁の試作・研究

渡 部 富 治・Jason R. TIMM・齊 藤 図

Abstract

This development project in hydraulics Race resulted in a very small flow limiting valve with reasonable control precision. A structural departure from previous flow control valves was made in the basic design. An internal shape found to be critical in influencing internal flow conditions was altered and the control characteristics were tested up to pressure differentials as high as 23 MPa at 400 and 500 cm³/s flow rates. One application is the authors, ocean wave electric generator. The design is now proving its effectiveness at 700 cm³/s in protecting the power conversion machinery from overspeed due to high waves.

1. 緒 言

本研究で取り扱う波力発電装置の概要を図1に示す。この装置は、入射波のエネルギーで振子を加振し、油圧変速回路を介してその揺動運動を発電機に伝えることにより電力を取り出すものである。このようなシステムで振子の受波板により直接波力を吸収するので、空気タービン式¹⁾などに比較してはるかにエネルギー取得効率が高い。しかし、たとえば台風時には定格の10倍前後のパワーを吸収してしまい、容量オーバーによる故障が生じやすい欠点があった。

この対策として、流量調整弁を用い、発電機を駆動する油圧モーターの最高速度を制御することにより、台風時のオーバースピードを防止することにした。しかし、市販の流量調整弁は大型

で使いにくいので、今回この小型化を試みた。

制御量が一定であること、その定常偏差は±10%位まで許されることを考慮し、この目的に最適と思われる弁を考案した。工学的検討の上設計・試作した結果、目標性能を満足する小形流量調整弁が得られた。現在図1の回路に組み込み試用を続けているが、これまでのところ、オーバースピードによるトラブルの発生はなく、十分実用に

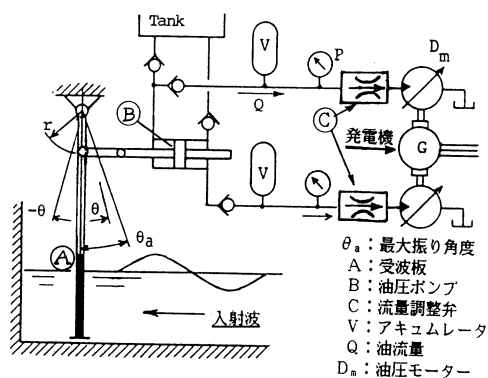


図1 振子式波力発電装置

供しうるものと考えられる。以下これらについて報告する。

2. 小形化の方法

流量調整弁は、オリフィスと、このオリフィス前後の差圧を一定にする差圧制御弁との組合せから成る。図2は従来形を示し、オリフィスの上流に差圧制御弁がある。この弁はオリフィス前後の差圧信号を利用して、オリフィス上流側圧力を調節して流量を一定にする。操作力を大きくするため、スプールには大径のピストンがついている。

図3は筆者らが検討した小形化の方法例である。

これは、つぎのような考えによる。(1)差圧弁のスプールだけで、信号受信と操作ができるようにする。(2)オリフィスをスプール軸上に近づけて設置する。(3)弁の安定性低下や、定常偏差の増大が生じたとき対策

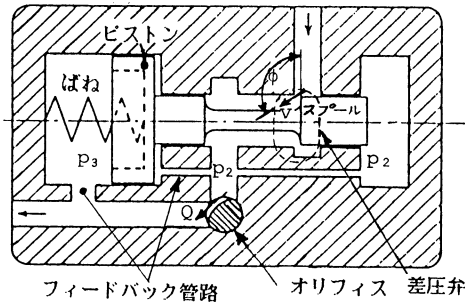


図2 従来流量調整弁

が可能であるようにする。

これらにつぎの特長がある。

まず、従来形のピストン径は大きいので全てのタイプでは変更点はピストン径をスプール端面で代用する構造にしたことである。

Type B：この場合には、ただの従来のピストン径を小さくしたものである。

Type C：Type Bのスプールはダンピングレングスが負

でピストン径は小さいと安定が悪い。これを正值に変え、かつオリフィスを軸心上に設ける。

以上の3例のうち、type Cが最も適した構造であると判断し、弁を製作した。しかし、この弁の構造にさらに改良を加えて、フィードバック管路をスプールとオリフィスの軸心に付けることにすればType Dのようなさらに小さい弁が可能である。

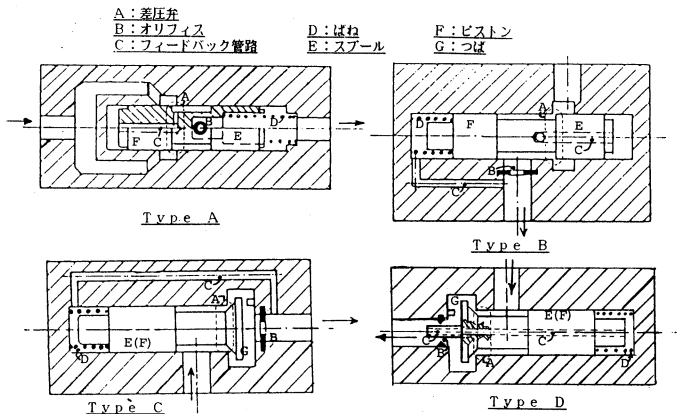


図3 小型化の方法例

3. 設 計

3.1 理 論

実際に試作した弁の詳細を図4に示す。スプールには、いろいろな軸力が働き、これらの平衡からつぎの運動方程式が成立する²⁾。

$$\frac{md^2x}{dt^2} + C_f \frac{dx}{dt} + kx = (p_2 - p_3) A_v + F_{s0} - \rho Q u \cos \phi \pm F_h \quad (1)$$

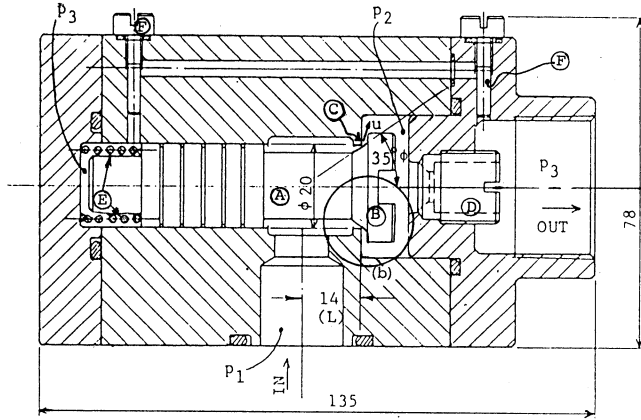


図4 (a)試作した小形流量調整弁

- A. スプール
- B. つば
- C. 差圧弁 (弁座)
- D. オリフィス
- E. ばね
- F. ダンピングピン

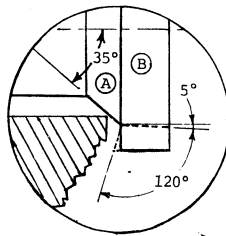


図4 (b)弁座とつばの細部図

m = スプール質量, x = スプール変位, k = ばね定数, p = 圧力 (図4), A_v = スプールの面積 = $\pi d^2/4$, F_{s0} = ばね力 (初期値), ρ = 油の密度, Q = 流量, u = 噴出速度, ϕ = 噴出角度, L = ダンピングレングス, C_f = ダンピング係数, F_h = ハイドロリックロックによる摩擦力

定常状態では式(1)はつぎのようになる。

$$p_2 - p_3 = (F_{s0} - kx - \rho Q \cdot u \cdot \cos \phi \pm F_h) / A_v = \Delta p \quad (2)$$

ここでは, $u = f(p_1 - p_2)$, $F_h = f(p_1 - p_2)$

である。したがって Δp を一定にするには、これら変動要因を何らかの方法で除くことが必要である³⁾。今回は、ハイドロリックロックを小さくするための対策と、噴出角度 $\phi = 90^\circ$ することによって、できるだけ $\Delta p_1 = \text{一定}$ となるように試みた。この結果、図4の弁を設計したが、FCD50の本体と、表面硬化SCM4のバランス溝付スプールを組合せ、流出面の半頂角 $\phi = 35^\circ$ から外周に向かって半頂角 $5 \sim 120^\circ$ の範囲で再度曲がる面をもつスプール構造を採用してある。弁座を面取り無しにした。

3. 2 設 計

図4の小形流量調整弁の仕様をつぎに示す。

制御流量 $Q = 700 (\text{cm}^3/\text{s})$, 圧力差 $\Delta p = p_2 - p_3 = 390 \text{kPa}$, スプールの径 $d = 2 \text{cm}$, ばね力 $F_{s0} = 62 \text{N}$,

ばね定数 $k=82(\text{N/cm})$, オリフィス径 $=0.78(\text{cm})$, 寸法 $=6.8(\text{cm}) \times 7.4 \times 13.5$, 質量 $=4.45(\text{kg})$

この設計では, つぎのことを考慮した。

- (1) つばの形状を変え, 弁に働く流体力を変化可能にした。
- (2) 流量にみあった大きさにオリフィスの取り付けを容易にした。図5は試作した小形流量調整弁の写真である。

4. 実験および結果

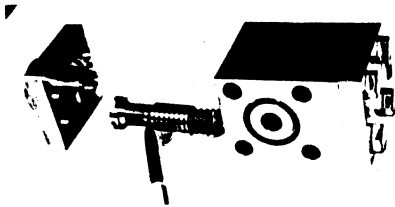


図5 調整弁

4.1 実験方法

試作弁に油を流し, 流量制御特性について実験した。図6は使用した実験回路である。ここでは, 供試弁前後の圧力差を変え, この場合の弁を通過する流量特性について調べた。

試作弁にはポンプの吐出油が送り込まれる。この流量 Q は, ポンプ回転速度 n を増減させることにより, 調節する。試作弁下流には流量計測用オリフィスを設けてある。試作弁の上流圧力 p_1 が一定限界 (この場合約 $245(\text{MPa})$) 以上にならぬよう安全弁が並列に組込まれる。今回のポンプ容量では, 仕様流量 $Q=700\text{cm}^3/\text{s}$ に達したか

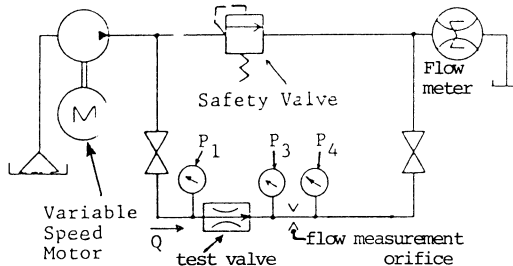


図6 実験の回路

たので, 実験は $Q=400\sim 500(\text{cm}^3/\text{s})$ で行った。このためオリフィス径はそれぞれ 0.48 および 0.62cm にした。油温は $45\sim 50^\circ$ で実験を行った。使用油は, ダフニー・ハイドロリックフルード WR33, その油温で動粘度 ν は約 $30\sim 24\text{cst}$, $\rho=0.862\text{g}/\text{cm}^3$ である。

実験方法としては, 最初に弁の振動の有無を確かめ, 安定であるものについてのみ静特性 (上下流圧力 Δp_1 の変化に対する弁出力の流量 Q の測定) を行った。流量

Q は, オリフィス前後の圧力差 $=p_3-p_4$ を実測し, これにより計算した。この場合のオリフィス係数は, あらかじめ積算流量計により較正した。

4.2 実験結果と考察

フィードバック管路のダンピングピンを外し, 振動発生のない状態で実験した。また, スプールの摺動面を $1\mu\text{m}$ 程度に研磨した結果, $3\mu\text{m}$ 程度の研磨仕上の場合より F_1 が減少し図8に示したように圧力/流量ヒステリシスは小さくなった。ただし, ヒステリシスの原因に対し決定的

な影響を与えたのは、むしろつばの形状であった。

図4には弁のつば形状が90°の場合を示してあるが、今回は、このつば形状を5°~120°の範囲で変えて実験した。実験に用いたつば形状の種類は、それぞれ $Q \approx 400 \text{ cm}^3/\text{s}$ のとき11種類、 $Q \approx 500 \text{ cm}^3/\text{s}$ のとき4種類である。

図7は $Q \approx 400 \text{ cm}^3/\text{s}$ および $Q \approx 500 \text{ cm}^3/\text{s}$ の下での代表的な実験結果例で、つば形状62°および60°の場合である。図6のポンプ回転速度の調節により、弁上流の圧力を0

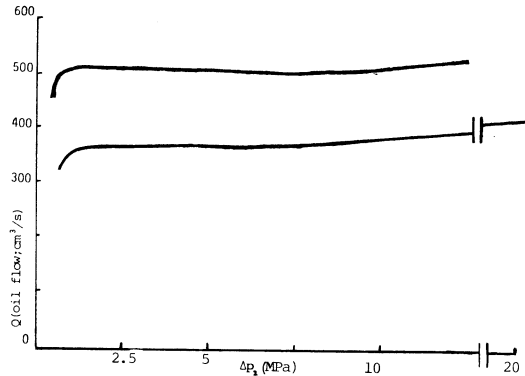


図7 代表的な結果

から23MPaまで徐々に上昇させ、この場合に弁を通過する流量を測定し、つぎに23MPaから0までゆっくり降下させながら流量を測定した。弁下流圧力は0~1MPaである。図7では、横軸に弁上下流の圧力差 $\Delta p^1 = p^1 - p^3$ をとり、縦軸に流量 Q をとって示してある。 $Q \approx 400 \text{ cm}^3/\text{s}$ では $\Delta p^1 \geq 1.5 \text{ MPa}$ において弁の制御作用が現れている。 Δp^1 の上昇により Q は増加していて、 $\Delta p^1 = 23 \text{ MPa}$ のときの Q は、 $\Delta p^1 = 1.5 \text{ MPa}$ のときの Q に対し+17%、 Q の定常偏差は、 $\Delta p^1 = 10 \text{ MPa}$ 当り8%になる。 $Q \approx 500 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合の定常偏差は、同じく2.8%である。いずれの場合もヒステリシスはなかった。

このように流量の偏差が正になるのは、スプールに働く流体力が弁を開く側に作用する場合に相当する。これについては後で詳しく触れる。

図8は流体力の弁を閉じる側に作用した例で、この場合のつば形状は5°である。図8は $\Delta p^1 = 0.5 \text{ MPa}$ のとき $Q \approx 570 \text{ cm}^3/\text{s}$ に達し、そこから Δp^1 の上昇に対し急速に流量が減少する。すな

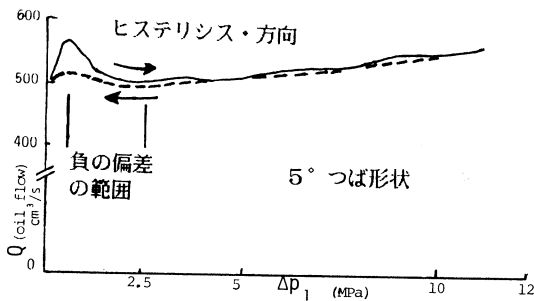


図8 不安定性の場合

わち、流量の偏差は負になる。 $\Delta p^1 \geq 2.5 \text{ MPa}$ では偏差は正に移る。

このようにつば形状を変えることにより、定常偏差の正負及び大きさが変化した。この関係を図9に示した。

図9では、相互関係が見出すため、横軸につば形状の角度を、縦軸に定常偏差をとって示した。

図9からつぎのようなことがわかる。すなわち、つば形状の角度が小さい範囲(5

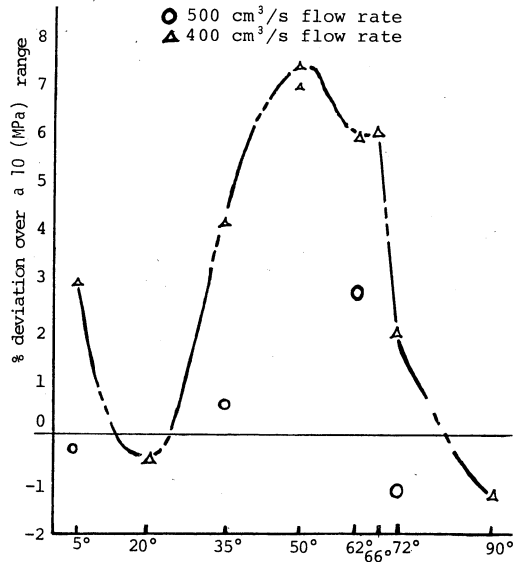


図9 角度と定常偏差関係

偏差が小さくなる。そして、つば形状の角度66°では定常偏差=7%であるが、角度70°になると突然定常偏差=2%に変わり、角度=120°までの範囲では、角度=5~35°の範囲と同様の定常偏差値になる。

般らは、今回の噴出部形状となっているポペット弁における流体力補償に関する研究について報告している^{4),5)}。

これによれば、つば形状が90°のとき、弁座からつば面までの距離が近いと、噴出部は激しいキャビテーション状態を呈し、流体力補償は得られない。すなわち流体力補償を期待するには、流体力を生みだそうとする場所は、できる限りキャビテーションが生じないようにすることが必要である。

今回の弁は、弁座からつば面までの距離が1mm程度であり、噴出方向を大きく曲げればキャビテーションが生じ易い形状である。このため、つば形状70°120°はキャビテーションのため流体力補償が得られなかったものと推測される。

したがって、つば形状60°のところは、キャビテーション現象が激しくなく、かつ流体力補償効果が、今回の実験の中で最も効果的に得られたところと考えられる。このつば形状のスプールを、波力発電の台風対策に用いた。

図10は、今回の流量調整弁を、振子式波力発電装置の回路に組込んだところの写真である。管

°~35°)の定常偏差は比較的小さい。しかし負の偏差領域をもつため、この弁を流量制御回路に組込むときは、回路が不安定になる危険性をもつ。例えば、今回の実験回路(図6)では、電動機および油圧ポンプの特性と弁の負性特性との相互作用により、ある Δp^1 の範囲では、電動機速度をわずかに変えただけでも、 Δp^1 には急激な変化が生じた。

つば形状の角度を大きくすると、スプールからの噴出流がつば面で軸直角方向に曲げられるため、スプールに開き方向の流体力を加えることになる。この働きで閉じ方向の流体力が補償され負の

路のエルボを取除き、その部分に新たな流量調整弁を組込んだ。弁の大きさは、継手を少し大きくした程度である。比較のため、これまでの流量調整弁(今回の試作弁と同一容量のもの)をあわせて示した。

昭和63年4月に組込んで以来、室蘭港外における振子式波力発電装置の運転が再開されている。現在まで約1月が経過し、この間に低気圧通過による荒天を経験したが、オーバースピードによるトラブルは生じていない。これより、今回試作した流量調整弁は、一応実用できるものと考えられる。

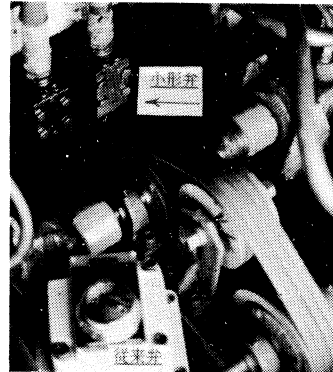


図10 従来弁との比較

5. 結 言

以上により次のように結言することができる。

- (1) スプールに働く流体力の補償を行うことにより、定常偏差の小さい小形流量調整弁の試作に成功した。
- (2) 流体力の補償を行うには、噴出部でのキャピテーション防止が重要である。今回の弁では、つば形状60°のとき最もよい流体力補償が得られた。
- (3) つば形状60°のとき、流量の定常偏差は $Q \approx 400 \text{cm}^3/\text{s}$ および $500 \text{cm}^3/\text{s}$ のとき、それぞれ8% / 10MPa, 2.5% / 10MPaであった。
- (4) 発振の心配はない。

なお、キャピテーション防止を目的として、さらに噴出部形状研究をすれば、一層すぐれた流体力補償が得られるように思う。今後の課題である。

今回の流量調整弁は、株式会社永沢機械において加工が行われた。また、スプールのラッピング作業において、本学実習工場三品氏の協力を得た。

感謝します。

参考文献

- 1) 渡部 波力発電の現状と将来、油圧と空気圧 Vol.17, No.7 (昭61.11)
- 2) 市川・日比 油圧工学, 朝倉書店
- 3) 石原・他 油圧工学, 朝倉書店
- 4) 殷・大島・市川 ポベット弁の流体力補償に関する研究(第一報, つばによる効果)
- 5) 大島・殷・市川 ポベット弁の流体力補償に関する研究(第二報, 反割モデルによる考察)

分数の教授学的研究

山口 格

Didactical study of fractins

KAKU YAMAGUCHI

Abstract

The aim of this paper is to discuss new methods of teaching fractions in mathematics. E. Landau's mathematical theory of fractions are compared with Toyama's methods of teaching fractions.

1. はじめに

数学教育というものは、たとえそれがどの学校段階においてであっても、学問としての数学を教えることを目的とするという立場を、われわれはかねてから表明してきた¹⁾。現在おこなわれている数学教育のそれぞれの実践が、はたしてその意味で目的にかなっているものであるかを検討することは、学問としての数学を教えることを目的とするという立場がどのように可能であるのかを具体的に示す端緒になるであろう。

小論においては、戦後の民間教育運動（民教運動）の中心的存在であった数学教育協議会（数教協）のとなえた「量にもとづく数学教育」という観点に立った、分数の実践プログラムの代表例の一つを取りあげ、学問としての数学を教えるという立場から検討してみたものである。

分数については既に1951年および1958年の文部省の指導要領以降所謂「割合分数」にかかわって論議がおこなわれてきた。そのことについてははじめに簡単に総括し、次に分数の数学的理論の概要を提示する。最後に現行の代表的実践プログラムを分数の数学的理論の内容と対比検討することにした。

2. 分数の数学論

分数とは何かということについて、様々な見方がある。1958年（昭和33年）の文部省指導要領では分数について次のようになっていた。

2年 A. 数と計算の(9)

具体的な事物の取り扱いを通して、割合の考え方の基礎となることが

らについて理解させる。

ア. ……の2ばい

……の $\frac{1}{3}$ (三ぶんの一) などの意味を知ること。

3年 A. 数と計算の(11)

簡単な場合について、等分してできる大きさまたは端数部分などを表すのに、分数および小数を用いることを知らせる。

4年 A. 数と計算の(12)

分数の意味について理解させるとともに、分数についても加法・減法などの計算ができることを知らせる。

C. 数量関係の(1)

二つの数量の割合について理解を深める。

ア. たとえば、二つの量A, BについてAの大きさを2とみるとき、Bの大きさが3とみられるという考え方や、またそのとき、AはBの $\frac{2}{3}$ であり、BはAの $\frac{3}{2}$ であることなどを知ること。

この1958年の指導要領では「割合」という言葉が出て来るので、割合分数という概念を小学校の数学教育の内容としていっていると考えられる。この割合という考え方は、上にもあるように、A, Bという二つの自然数があたえられたとき、それを比という立場からみているのである。任意に与えられたAという量(数)を2とみるということは、子どもにとってはたいへん困難なことである。1は1, 2は2…と自然数を習っている時期にAを2とみよ(このことのなかには当然、与えられたものを1としたらという考え方がはいっている)というのはむづかしいのである。

遠山啓はこの割合分数を批判して、量分数で教えることを主張した²⁾。この量分数という言葉は遠山の作った言葉のようであるが次のように説明される。「まず連続的な外延量の抽象的な表現として分数を定義する。それは加法や乗法の演算から切り離して分数を一つの実体概念としてとらえさせる。つまり、 $\frac{2}{3}$ は $\frac{2}{3}m$ や $\frac{2}{3}l$ から抽象されたものとみなすのである。そのさい、量としては外延量だけをとりあつかっておけばよいのである。そうすれば、合併から加法がでてくるので、分数の加法や、その逆としての減法は容易に理解できる。そこには乗除はまだ介入してこないし、その必要もない。数としては加法群としての分数だけを考えていくことができる³⁾。」

遠山啓の言う、連続的な外延量の抽象的な表現として分数を考えるという考え方は、遠山だけでなく、多くの人が以前から主張している。たとえばクラインは次の様に述べている。「学校教育における分数の取り扱いから説明をはじめよう。整数の直観的なモデルにくらべて、ただ土台がかわっただけである。すなわち、物の個数からその分量に、数えられるものの考察から、測られるものの考察へとうつったのである。貨幣とか重量の体系は、ある条件つきで、また長さの体

系は完全に可測な集合の例を与える。これらは分数の概念を生徒に与える実例である⁴⁾。」ここでクラインのいう測られるものというのが遠山の連続的な外延量に相当していることは明らかである。またアレクサンドロフは次のように述べている。「ところで量をはかる場合には、一般的にいて、選ばれた単位ではかられる量が整数回で割切れず、しかも単位をただ数えただけでは間に合わないことがあるのである。こういう場合には、単位を割ったもの、すなわちもはや整数ではなく分数によるほうがより正確に量をあらわすことができるから、単位を分割することが必要になる。分数はつぎにあげる歴史上またはその他の事実の分析がしめしているように、実際的なものとして生まれたのである。分数は、連続量の分割と比較から、すなわち、計量から生まれた。人間が計量した最初の量は、長さ、播種面積、液体や粉体の体積などの幾何学的量であった。したがって分数の発生そのもののなかに、算術と幾何の相互作用が見られるのである。この相互作用が分数という新しい重要な概念を出現させ、整数から分数への数概念の拡張をもたらした⁵⁾。」

遠山啓は割合分数を批判するのに次の観点を出している。分数を二つの分離量の割合とみる、割合分数の考え方は、クロネッカーの数え主義に源をもっている。クロネッカーが自然数だけを数とみて、他の数を自然数から人工的に作られたものとみたことはよく知られているが、この考え方が黒表紙教科書以来の日本の数学教育の中心的潮流として、割合分数という姿をとって現れたのである。この考え方で分数をみると、分数は分子と分母の二つの自然数の対とみられる。これは代数学における商体の考え方である。たとえば $\frac{2}{3}$ は(2, 3)という二つの自然数の対とみて、それらの対のあいだに加減乗除の演算を形式的に導入する。そして $\frac{2}{3}$ がどのような大きさであるかを問題にしない。つまり抽象代数的考え方で、演算の形式(規則)のみが問題にされて、量の観点はない。量の追放を云ったのは黒表紙教科書を作った藤沢利喜太郎であるが、割合分数はクロネッカー、藤沢の流れをくんで量を追放しているのである。遠山啓は以上のような論旨で、割合分数を批判しているのであるが、この遠山の考え方の中に現代数学の商体という概念に言及したところが出て来る。その部分を遠山啓の文章から引用してみよう。「分数や小数は歴史的にも連続量の抽象化として出現したことは疑問の余地のないところであるが、〈クロネッカー——藤沢利喜太郎〉の“量を放逐すべきだ”という立場からすれば、分数・小数をまったくべつの方法によって導入するほかはない。そのようにして考えられたのが、分数を一つの量ではなく、二つの整数の組として定義する方法である。その方法は、たとえば、ファン・デル・ウェルデンの「現代代数学」の第1巻で展開されているような整域から商体を構成する形式的方法である。分数は二つの整数 a, b の組 (a, b) として定義される。それは一つの量ではなく、あくまで二つの整数の組にすぎない。クロネッカーによれば、 a, b という整数は愛する神がつくり給うたのであるが、 $\frac{2}{3}$ という分数は『人間業 (Menschenwerk) で、神ならぬ人間のデッチあげたつくりもの』で、つまらぬものであるから、(2, 3) という二つの整数の組と考えれば、人は手を

汚さずにすむ，というわけである⁶⁾。」遠山啓は今みたように，割合分数を推進する人々は，量を追放する為に，商体という概念をとりあげたと述べている。遠山は割合分数が量に依拠していないのを非難するあまり，現代数学の分数の理論である商体までを否定してしまったように見える。つまり，割合分数＝商体という図式で，割合分数を葬るついでに，「学問としての数学を教える」という道を問うべき現代数学の概念をそまつに扱ってしまったのではなかろうか。

3. 分数の定義について

そこでこれから，遠山啓の量分数の理論にもとづく，実践プランを現代数学の立場から検討してみよう。量分数の実践プランとしてとりあげるのは「わかるさんすう」4および5の分数の部分である⁷⁾。はじめに「わかるさんすう」4の分数の導入の部分のみをみよう（図版1参照）。底面が1辺10cmの正方形になっている直方体の水そうに水を入れておいて，何ℓはっているか水の量をはかることから始める。高さ20cmと小々の水量である。水そうの側面に水の高さまで，はば10cmのテープをはったと考えて，そのテープを10cm×10cmの正方形の紙タイルで折り紙をしてはかる。正方形タイル（10cm×10cm）2枚とはんぱがでる。次にそのはんぱを単位にして，正方形をおりかえすと，ちょうどはんぱが3つ分でタイル1枚になる。このはんぱは3つ分で1ℓを表すタイル1枚になるから，1を3等分した大きさである。このはんぱの大きさを $\frac{1}{3}$ と定義し「3分の1」という。テープ全体の大きさは1辺10cmの正方形2つとはんぱの $\frac{1}{3}$ だから「2と3分の1」とか「2か3分の1」といって， $2\frac{1}{3}$ と書くというふうに帯分数の定義をする。そして「はじめの水の量は $2\frac{1}{3}$ ℓです。」と量を表現する量分数として分数の導入を行っている。次に資料1の196頁では，長方形の紙⑦の大きさを求めている。ここでは水の量ではなく，紙の大きさを長方形のたての長さを一辺とした正方形ではからせる。1のタイル（正方形）が3つとはんぱがでる。はんぱのタイル④で1のタイルをはかると，2個分と⑤のはんぱがでる。⑤で④をはかるとちょうど2個分で④になる。④の大きさを a ，⑤の大きさを b とすると，

$$1 = 2a + b$$

$$a = 2b$$

となる。これより

$$1 = 5b$$

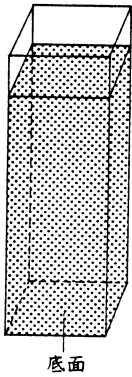
つまり⑤の大きさは1を5等分した大きさである。従って⑤は $\frac{1}{5}$ となる。④は $\frac{1}{5}$ が2つぶんであるがこれを「5分の2」と定義し， $\frac{2}{5}$ と書く。⑦の大きさは3と $\frac{2}{5}$ で， $3\frac{2}{5}$ となる。そしてこのあとに「 $\frac{2}{5}$ の下のを分母，上の数を分子といいます。分母は1を等分した大きさ，分子はそれがいくつあるかを表わします。 $\frac{1}{2}$ ， $\frac{1}{3}$ ， $\frac{2}{5}$ ，…のような $\frac{\text{分子}}{\text{分母}}$ になっている数を分数といいます。」と分数の定義をしている。

この導入の部分の特徴は，(1) 量の測定から，連続量のはんぱを表すものとして分数を導いて

いる。(2) 帯分数から入っている。(3) 1のタイルを等分した単位分数(分子が1の分数)と、そのいくつかという形に分母、分子を意味づけている。(4) 互除法を用いている、などである。

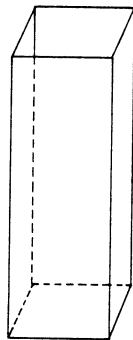
8. 分 数

1) 分数のおいたち



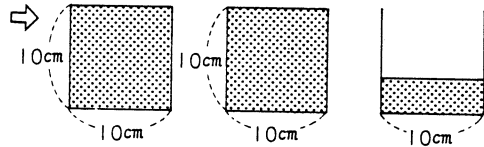
底面が1辺 10 cmの正方形になっている直方体の水
そうに、水がはいっています。

水は何とあるでしょう。

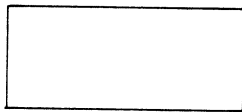


水そうに水が何とはいっているか、
はかりました。

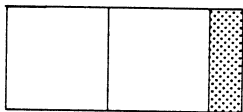
2とすこしです。



はんばの量はいくらになるか、横 10 cm、たては水そうの水の高さと同じ

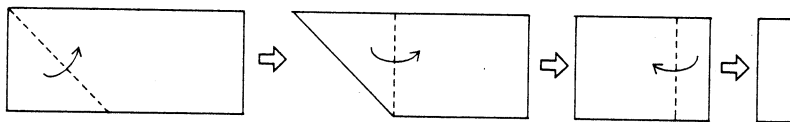


長方形の紙を使って調べましょう。1辺 10
cmの正方形で水1とを表わすことにします。

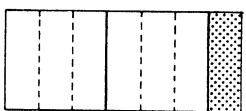


この紙タイルを下の図のようにおります。

はんばの大きさがわかれば、水の量がわか
ります。



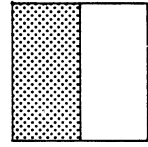
はんばの大きさでおりかえすと、ちょうど3つぶんで1になります。



おり目をつけて、ひろげてみると、はんばの
大きさは1を3等分した大きさです。この大き
さを「3分の1」といい、 $\frac{1}{3}$ と書きます。

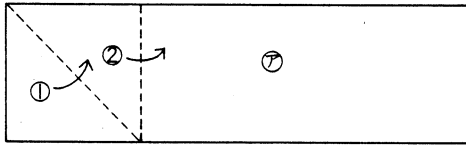
長方形の紙の大きさは2と $\frac{1}{3}$ です。これを「2か3分の1」とか、「2と

3分の1」といいます。2 $\frac{1}{3}$ と書きます。はじめの水の量は2 $\frac{1}{3}$ ℓです。

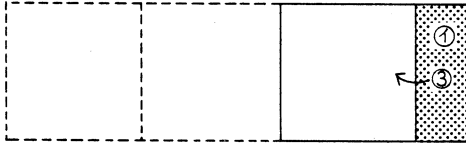


2つぶんで1になる大きさ、つまり、1を2等分した1つぶんを「2分の1」といい、 $\frac{1}{2}$ と書きます。

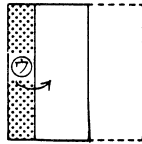
1. 紙タイルをおって、 $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ のタイルを作りなさい。



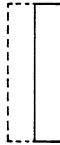
左のような長方形の紙①の大きさは、いくらでしょう。



1のタイルが3つとちょっとです。はんばでおりかえました。



はんばのタイル①では、2個ぶんとれて、1にちょっとたりません。②があまります。



②でおりかえました。ちょうど2個ぶんで①になりました。



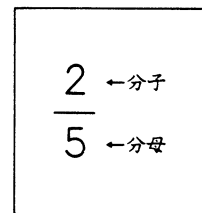
③の大きさは、1を5等分した大きさです。③は $\frac{1}{5}$ です。①は $\frac{1}{5}$ が2つぶんです。 $\frac{1}{5}$ が2つぶんの大きさを

「5分の2」といい、 $\frac{2}{5}$ と書きます。④の大きさは3と $\frac{2}{5}$ です。これを

「3か5分の2」または「3と5分の2」といい、

3 $\frac{2}{5}$ と書きます。

$\frac{2}{5}$ の下の数を**ぶんぼ**、上の数を**ぶんし**といいます。分母は1を等分した大きさ、分子はそれがいくつあるか



を表わします。 $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5}, \dots$ のような $\frac{\text{分子}}{\text{分母}}$ になっている数を分数といひます。

この方法を短く表現すると「量の分割分数」とでも云うべき内容である。

ここで上にあげた特徴の(4)互除法を用いていることについて検討してみよう。互除法は次の割り算定理に基づいている。

定理 (割り算定理) 任意の整数 a と $b > 0$ に対して

$$a = qb + r \quad (0 \leq r < b)$$

となる整数 q, r がただ一組存在する。

この定理は、整数 a を整数 $b > 0$ で割ると、商 p が立って余り r ($0 \leq r < b$) がでるという内容であるから、割り算定理と呼ぶことにする。この割り算定理を用いて互除法 (Euclid の互除法とも云う) を説明しよう。 \mathbf{R} を実数全体の集合、 \mathbf{Z} を整数全体の集合とする。いま $a, b \in \mathbf{R}$, ($a, b > 0$) が与えられたとき、

$$x_0 = a, \quad x_1 = b$$

とおき、以下順次に $x_2, x_3, \dots \in \mathbf{R}$ を次のように定める。

$$(1) \begin{cases} x_0 = k_0 x_1 + x_2 & (0 < x_2 < x_1, k_0 \in \mathbf{Z}, k_0 \geq 0) \\ x_1 = k_1 x_2 + x_3 & (0 < x_3 < x_2, k_1 \in \mathbf{Z}, k_1 > 0) \\ \dots\dots\dots \\ x_{m-2} = k_{m-2} x_{m-1} + x_m & (0 < x_m < x_{m-1}, k_{m-2} \in \mathbf{Z}, k_{m-2} > 0) \\ x_{m-1} = k_{m-1} x_m & (k_{m-1} \in \mathbf{Z}, k_{m-1} > 0) \end{cases}$$

もし $a, b \in \mathbf{Z}$ であれば、 $x_2, x_3, \dots \in \mathbf{Z}$, $x_1 > x_2 > \dots > x_m > \dots \geq 0$ であるのである m に対して、 $x_m = (a, b)$, $x_{m+1} = 0$ となる。 $a, b \in \mathbf{Z}$ のとき、この操作は割り算定理を有限回くりかえすことになる。 $a, b \in \mathbf{Z}$ のとき、 x_m は (a, b) すなわち a と b の最大公約数となることはよく知られている。

例 1. $a=42, b=11$ とすれば

$$42 = 3 \times 11 + 9$$

$$11 = 1 \times 9 + 2$$

$$9 = 4 \times 2 + 1$$

$$2 = 2 \times 1$$

となる。この場合 $k_0 = 3$, $k_1 = 4$, $k_2 = 2$ となり, $(42, 11) = 1$ である。

さて Euclid の互除法は次に述べる連分数と深く関っている。 a, b を正の整数として, 有理数 $\frac{a}{b}$ を連分数で表してみる。

$x_0 = a, x_1 = b$ として Euclid 互除法を行い

$$\omega = \frac{x_0}{x_1}, \quad \omega_1 = \frac{x_1}{x_2}, \quad \dots, \quad \omega_{m-1} = \frac{x_{m-1}}{x_m}$$

とおく。ここで

$$\omega > 0, \quad \omega_1 > 1, \quad \dots, \quad \omega_{m-1} = k_{m-1} > 0$$

であって

$$(2) \left\{ \begin{array}{l} \omega = \frac{x_0}{x_1} = k_0 + \frac{x_2}{x_1} = k_0 + \frac{1}{\omega_1} \\ \omega_1 = \frac{x_1}{x_2} = k_1 + \frac{x_3}{x_2} = k_1 + \frac{1}{\omega_2} \\ \dots\dots\dots \\ \omega_{m-2} = \frac{x_{m-2}}{x_{m-1}} = k_{m-2} + \frac{x_m}{x_{m-1}} = k_{m-2} + \frac{1}{\omega_{m-1}} \\ \omega_{m-1} = k_{m-1} \end{array} \right.$$

となる。

したがって

$$\begin{aligned} \omega &= k_0 + \frac{1}{\omega_1} \\ &= k_0 + \frac{1}{k_1 + \frac{1}{\omega_2}} \\ &= \dots\dots\dots \\ &= k_0 + \frac{1}{k_1 + \frac{1}{k_2 + \dots\dots\dots}} \\ &\qquad\qquad\qquad + \frac{1}{k_{m-2} + \frac{1}{k_{m-1}}} \end{aligned}$$

の形に表わされる。この形を連分数 (continued fraction) といい

$$(3) \quad \omega = k_0 + \frac{1}{k_1 + \frac{1}{k_2 + \frac{1}{\dots + k_{m-1}}}}$$

5

と書く。あるいはもっと簡単に

$$(4) \quad \omega = [k_0, k_1, \dots, k_{m-1}]$$

とも表す。

例2 前の例1を用いると $\frac{42}{11}$ は

$$42 = 3 + \frac{1}{1 + \frac{1}{4 + \frac{1}{2}}}$$

$$\frac{42}{11} = 3 + \frac{1}{1 + \frac{1}{4 + \frac{1}{2}}} = [3, 1, 4, 2]$$

と連分数で表される。

「わかるさんすう」4の分数の導入の部分の2番目の例(資料1, p.196)では、互除法で k_0, k_1, k_2 を出している。すなわち

$$k_0 = 3, k_1 = 2, k_2 = 2$$

である。したがって連分数で表すと

$$3 + \frac{1}{2 + \frac{1}{2}}$$

となる。 $2 + \frac{1}{2}$ を $\frac{5}{2}$ と計算して

$$3 + \frac{1}{\frac{5}{2}} = 3 + \frac{2}{5} = 3\frac{2}{5}$$

を得ることになるが、もちろん「わかるさんすう」では連分数は出していない。ここでは

$$x_0 = 3x_1 + x_2 \quad \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

$$x_1 = 2x_2 + x_3 \quad \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

$$x_2 = 2x_3 \quad \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

として③式を②式に代入してみる。

$$x_1 = 4x_3 + x_3 = 5x_3$$

すなわち

$$x_1 = 5x_3$$

を得る。この5を分母に用いる単位分数 $\frac{1}{5}$ を得るために行った

$$x_1 = k_1 k_2 x_3 + x_3 = (k_1 k_2 + 1)x_3$$

という計算は、 x_1 と x_3 を測りきる量を導くために、互除法を逆にたどっているのである。このあたりの事情を現場の教師は実践者の立場から例えば次の様に述べている⁸⁾。「互除法そのものに深入りする必要はない。要は分数は単位と未測量の共通尺度をはんばで測ることのくり返しの中でみつけていくという分数の考え方と手続きの理解が重要である。」

4. 分数の数学的理論

1930年にE. Landauは「Grundlagen der Analysis」という書物を出した。この本はランダウのゲッティンゲン大学における講義を本にしたものであるが、ペアノの公理からはじめて、自然数から実数、複素数までの構成を、ランダウ独特の簡明な方法で述べている。半世紀も前の本であるが、数の体系を問題にするときはこの本を参照しなければならないとされている。ここで分数の数学的理論として、ランダウの上記の本「解析の基礎」から分数の部分を抄訳する⁹⁾。

定義1 分数 $\frac{x_1}{x_2}$ (x_2 分の x_1 と読む)とは、自然数 x_2 , x_2 の(この順序での)対のことである¹⁰⁾。

定義2 $\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{y_1}{y_2}$ (\sim は同値であると読む)とは、 $x_1 y_2 = y_1 x_2$ のときである。

このように定義すると次の一連の定理が成り立つ。

定理1 $\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{x_1}{x_2}$

証明 $x_1 x_2 = x_1 x_2$

定理2 $\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{y_1}{y_2}$ なら、 $\frac{y_1}{y_2} \sim \frac{x_1}{x_2}$

証明 $x_1 y_2 = y_1 x_2$ より $y_1 x_1 = x_1 y_2$.

定理3 $\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{y_1}{y_2}$ 且つ $\frac{y_1}{y_2} \sim \frac{z_1}{z_2}$ なら $\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{z_1}{z_2}$

証明 $x_1y_2=y_1x_2$, $y_1z_2=z_1y_2$ であるから

$$(x_1y_2)(y_1z_2)=(y_1x_2)(z_1y_2)$$

積について $(xy)(zu)=(xu)(zy)$ が常に成り立つから

$$(x_1y_2)(y_1z_2)=(x_1z_2)(y_1y_2)$$

且つ

$$(y_1x_2)(z_1y_2)=(y_1y_2)(z_1x_2)=(z_1x_2)(y_1y_2)$$

従って

$$(x_1z_2)(y_1y_2)=(z_1x_2)(y_1y_2)$$

$$x_1z_2=z_1x_2$$

定理1から定理3までによって、すべての分数は類別されることがわかる。つまり

$$\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{y_1}{y_2}$$

のとき、そのときにかぎり $\frac{x_1}{x_2}$ と $\frac{y_1}{y_2}$ は同じ類に属するとすることによってである。

定理4 $\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{x_1x}{x_2x}$

証明 $x_1(x_2x)=x_1(xx_2)=(x_1x)x_2$

分数の順序については次のようにする。

定義3 $x_1y_2 > y_1x_2$ のとき、 $\frac{x_1}{x_2} > \frac{y_1}{y_2}$ とする。

定義4 $x_1y_2 < y_1x_2$ のとき、 $\frac{x_1}{x_2} < \frac{y_1}{y_2}$ とする。

定理5 $\frac{x_1}{x_2}$, $\frac{y_1}{y_2}$ を任意の分数とするとき、

$$\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{y_1}{y_2}, \frac{x_1}{x_2} > \frac{y_1}{y_2}, \frac{x_1}{x_2} < \frac{y_1}{y_2}$$

のうち、ちょうど一つが成り立つ。

証明 与えられた x_1 , x_2 , y_1 , y_2 に対して

$$x_1y_2=y_1x_2, x_1y_2 > y_1x_2, x_1y_2 < y_1x_2$$

のうち、ちょうど一つが成り立つから。

定理 6 $\frac{x_1}{x_2} > \frac{y_1}{y_2}$ なら, $\frac{y_1}{y_2} < \frac{x_1}{x_2}$ である。

証明 $x_1y_2 > y_1x_2$ なら $y_1x_2 < x_1y_2$ である。

定理 7 $\frac{x_1}{x_2} < \frac{y_1}{y_2}$ なら, $\frac{y_1}{y_2} > \frac{x_1}{x_2}$ である。

証明 $x_1y_2 < y_1x_2$ なら, $y_1x_2 > x_1y_2$ である。

定理 8 $\frac{x_1}{x_2} > \frac{y_1}{y_2}$, $\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{z_1}{z_2}$, $\frac{y_1}{y_2} \sim \frac{u_1}{u_2}$ なら

$$\frac{z_1}{z_2} > \frac{u_1}{u_2}$$

である。

証明 $y_1u_2 = u_1y_2$, $z_1x_2 = x_1z_2$, $x_1y_2 > y_1x_2$

より

$$(y_1u_2)(z_1x_2) = (u_1y_2)(x_1z_2)$$

自然数 x, y, z には $x > y \Leftrightarrow xz > yz$ という性質があるから, それを用いて

$$(y_1x_2)(z_1u_2) = (u_1z_2)(x_1y_2) > (u_1z_2)(y_1x_2)$$

自然数 x, y, z に対して $xz > yz \Leftrightarrow x > y$ が成り立つことから

$$z_1u_2 > u_1z_2$$

この定理から分数の類の間の大小が, 類の代表元の大小として考えられることがわかる。

定理 9 $\frac{x_1}{x_2} < \frac{y_1}{y_2}$, $\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{z_1}{z_2}$, $\frac{y_1}{y_2} \sim \frac{u_1}{u_2}$ なら

$$\frac{z_1}{z_2} < \frac{u_1}{u_2}$$

である。

証明 定理 7 によって, $\frac{y_1}{y_2} > \frac{x_1}{x_2}$ である。 $\frac{y_1}{y_2} \sim \frac{u_1}{u_2}$, $\frac{x_1}{x_2} \sim \frac{z_1}{z_2}$ より定理 8 から, $\frac{u_1}{u_2} > \frac{z_1}{z_2}$ をうる。定理 6 より $\frac{z_1}{z_2} < \frac{u_1}{u_2}$ となる。

定義 5 $\frac{x_1 \geq y_1}{x_2 \ y_2}$ とは, $\frac{x_1 > y_1}{x_2 \ y_2}$ または $\frac{x_1 \sim y_1}{x_2 \ y_2}$ を意味するものとする。

定義 6 $\frac{x_1 \leq y_1}{x_2 \ y_2}$ とは, $\frac{x_1 < y_1}{x_2 \ y_2}$ または $\frac{x_1 \sim y_1}{x_2 \ y_2}$ を意味するものとする。

定理 10 $\frac{x_1 \geq y_1}{x_2 \ y_2}, \frac{x_1 \sim z_1}{x_2 \ z_2}, \frac{y_1 \sim u_1}{y_2 \ u_2}$ なら

$$\frac{z_1 \geq u_1}{z_2 \ u_2}$$

である。

証明 仮定で $>$ が成り立つときは, 定理 8 から, そうでないときは

$$\frac{z_1 \sim x_1 \sim y_1 \sim u_1}{z_2 \ x_2 \ y_2 \ u_2}$$

である。

定理 11 $\frac{x_1 \leq y_1}{x_2 \ y_2}, \frac{x_1 \sim z_1}{x_2 \ z_2}, \frac{y_1 \sim u_1}{y_2 \ u_2}$ なら

$$\frac{z_1 \leq u_1}{z_2 \ u_2}$$

である。

証明 仮定で $<$ が成り立つときは, 定理 9 から明らかである。そうでないときは

$$\frac{z_1 \sim x_1 \sim y_1 \sim u_1}{z_2 \ x_2 \ y_2 \ u_2}$$

である。

定理 12 $\frac{x_1 \geq y_1}{x_2 \ y_2}$ なら, $\frac{y_1 \leq x_1}{y_2 \ x_2}$ である。

証明 定理 2 と定理 6 から。

定理 13 $\frac{x_1 \leq y_1}{x_2 \ y_2}$ なら, $\frac{y_1 \geq x_1}{y_2 \ x_2}$ である。

証明 定理 2 と定理 7 から。

定理 14 (順序の推移性) $\frac{x_1 < y_1}{x_2 \ y_2}, \frac{y_1 < z_1}{y_2 \ z_2}$ なら, $\frac{x_1 < z_1}{x_2 \ z_2}$ である。

証明 $x_1y_2 < y_1z_2$, $y_1z_2 < z_1y_2$ だから,

$$(x_1y_2)(y_1z_2) < (y_1x_2)(z_1y_2)$$

$$(x_1z_2)(y_1y_2) < (z_1x_2)(y_1y_2)$$

$$x_1z_2 < z_1x_2$$

定理15 $\frac{x_1}{x_2} \leq \frac{y_1}{y_2}$, $\frac{y_1}{y_2} < \frac{z_1}{z_2}$ または, $\frac{x_1}{x_2} < \frac{y_1}{y_2}$, $\frac{y_1}{y_2} \leq \frac{z_1}{z_2}$ ならば

$$\frac{x_1}{x_2} < \frac{z_1}{z_2}$$

証明 仮定で同値の記号が成り立つ場合は定理9から, その他の場合は定理14から従う。

定理16 $\frac{x_1}{x_2} \leq \frac{y_1}{y_2}$, $\frac{y_1}{y_2} \leq \frac{z_1}{z_2}$ なら, $\frac{x_1}{x_2} \leq \frac{z_1}{z_2}$ である。

証明 仮定で2つとも同値の記号が成り立つ場合は定理3から, その他の場合は定理15から。

定理17 $\frac{x_1}{x_2}$ が与えられたとき, $\frac{z_1}{z_2} > \frac{x_1}{x_2}$ なる $\frac{z_1}{z_2}$ が存在する。

証明 $(x_1+x_1)x_2 = x_1x_2 + x_1x_2 > x_1x_2$

$$\frac{x_1+x_1}{x_2} > \frac{x_1}{x_2}$$

定理18 $\frac{x_1}{x_2}$ が与えられたとき, $\frac{z_1}{z_2} < \frac{x_1}{x_2}$ なる $\frac{z_1}{z_2}$ が存在する。

証明 $x_1x_2 < x_1x_2 + x_1x_2 = x_1(x_2+x_2)$

$$\frac{x_1}{x_2+x_2} < \frac{x_1}{x_2}$$

定理19 $\frac{x_1}{x_2} < \frac{y_1}{y_2}$ のとき, $\frac{z_1}{z_2}$ が存在して, $\frac{x_1}{x_2} < \frac{z_1}{z_2} < \frac{y_1}{y_2}$ である。

証明 $x_1y_2 < y_1x_2$ だから

$$x_1x_2 + x_1y_2 < x_1x_2 + y_1x_2$$

$$x_1y_2 + y_1y_2 < y_1x_2 + y_1y_2$$

$$x_1(x_2+y_2) < (x_1+y_1)x_2$$

$$(x_1+y_1)y_2 < y_1(x_2+y_2)$$

$$\frac{x_1}{x_2} < \frac{x_1+y_1}{x_2+y_2} < \frac{y_1}{y_2}$$

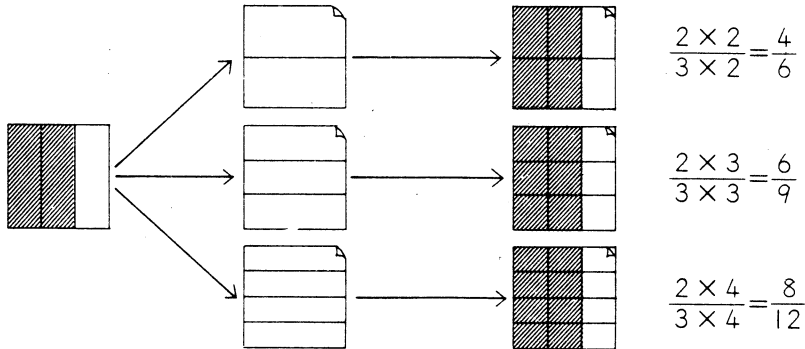
5. 分数の同値と順序について

分数の同値については「わかるさんすう」5に「分数の形を変える」という項で扱われている。そこでは「分数の分母と分子に同じ数をかけても、分数の大きさは変わりません。分数の分母と分子に同じ数をかけて、分数の形を変えることを倍分といいます。」となっていて次の図が入っている。

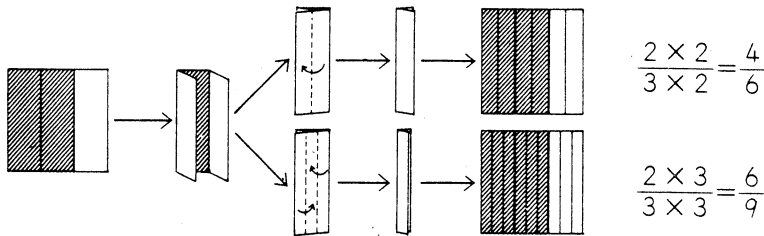
「わかるさんすう」では分数の同値という言葉や前節定義2の同値の定義 $x_1y_2=y_1x_2$ という関係式は出ていない。同値にかわる概念として倍分・約分の定義にあらわれる「分数の大きさ」という概念を用いている。「分数の分母と分子に同じ数をかけても、分数の大きさは変わりません。分数の分母と分子に同じ数をかけて、分数の形を変えることを倍分といいます。」という倍分の定義の中にある「分数の大きさは変わりません」という言葉と「分数の形を変えることを」という言葉に注目したい。「わかるさんすう」の分数の定義は「はんぱの大きさは1を3等分した大

1) 分数の形を変える

1のタイルに
 $\frac{2}{3}$ だけ色をぬり
 ました。
 ひとしいかんかく
 で横に線のはいった
 セロハンがあります。
 タイルの上
 にセロハンを
 かぶせました。



紙で作った正方形のタイルを折ってみました。そして広げました。

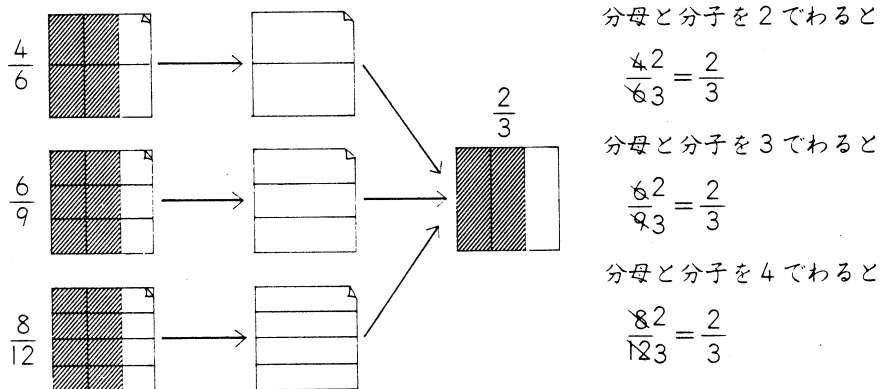


- 分数の分母と分子に同じ数をかけても、分数の大きさは変わりません。
- 分数の分母と分子に同じ数をかけて、分数の形を変えることを**倍分**といいます。

つづいて「分数の分子と分母を同じ数でわって、分数の形を変えることを**約分**といいます。」として、前の図の反対の矢印の図が入っている。

<約分>

タイルに、ひとし セロハンを タイルだ
 いかんかくで横に線 取りました。 けになりま
 のはいったセロハン した。
 がかぶせてあります。



- 分数の分子と分母を同じ数でわっても、分数の大きさは変わりません。
- 分数の分子と分母を同じ数でわって、分数の形を変えることを**約分**といいます。

きさです。この大きさを「3分の1」といい、 $\frac{1}{3}$ と書きます（図版1）」とあるように、分数を（はんばの）大きさとして定義している。従って上の倍分の定義の中にある「分数の大きさは変わりません」という言葉は、分数が変わらないという意味である。つまり倍分によって分数は変わらないが分数の形は変わると述べている。倍分や約分を行った結果の分数は、行う前の分数と Landau の意味で同値となるのは明らかであるが、倍分や約分があることによって、「わかるさんすう」に分数の同値の概念があるということにはならない。同値の概念は何よりもまづ前節定理1、定理2、定理3が中心となる概念である。この同値律の意識（定理1、定理2、定理3）は

「わかるさんすう」には全然ふれられていない。

分数の順序について「わかるさんすう」では分数の大きさを考えている。「わかるさんすう4」で同分母分数の大小、「わかるさんすう5」で異分母分数の大小比較を通分することによって、同分母分数の大小に直して考えさせている。前節定義3、定義4の関係性は意識されていない。それどころか前節に述べた分数の数学的理論のどの部分にも「わかるさんすう」はふれていない。初等数学と高等数学のこの顕著な乖離は分数にかぎったことではないのであるが。

6. 分数と有理数

「わかるさんすう」の分数の記述は、数学的にみるといろいろ不足するところがある。その一つは集合としての「分数全体の集合」が「わかるさんすう」では確立していないことである。「わかるさんすう」の分数の定義は3節に述べたように、量の分割分数とも云うべき内容であるが、「はんぱの大きさ」の全体がどのような集合になるのかは、定かではない。考えている数学的概念が集合論的につかみがたいということは、数学教育としては欠陥と考えられる。次に「わかるさんすう」には同値の概念がない。これは集合論的な考えを考慮していないから必然的にそうになってしまうのである。 N を自然数の全体の集合とすると、 $N \times N$ という直積が分数の全体の集合、4節定義2の同値関係を ρ と表すと、 $N \times N / \rho$ という商集合を考えることになる。同値という概念は $N \times N$ という集合を前提にはじめて考えられるのである。分数の全体という概念が集合論的に確立していないのでは、同値の扱いはむずかしくなる。このことは必然的に有理数の概念が無視されるという結果をうむ。有理数についての数学的定義は次の様になる。

定義7¹¹⁾ ある固定された分数に同値なすべての分数のつくる集合を、一つの有理数という。

斜体の大文字で有理数を表わすことにする。

定義8 2つの有理数 X, Y に対して、

$$X=Y$$

というのは、この2つの集合が同じ分数から構成されているときである。そうでないときは

$$X \neq Y$$

という。

このように有理数にとっては、集合と同値は本質的な概念になるのである。同値や同値類は小学校ではこれまでに扱われたことのない概念である。このような概念を小学校の生徒に数えることは可能なのだろうか。同値と同値類の実践報告は最近井出賀津雄によって試みられている¹²⁾。

井手は小学校5年の授業で整数の剰余類とデザインの話を行っている。これをみると井手は剰余類間の演算まで行っているのである。同値と同値類の概念が小学校5年で可能なことが井手の実践によってわかったので、分数の同値と同値類のプランも道が開ける。分数と有理数の本質が、同値と同値類をその内容として含む以上これを教えることを避けるべきではない。Landau の定義1, 定義2による分数と同値の定義を行い, その量的意味づけを別途行えばよいであろう。

7. 結語——分数の教授プラン作製の為に

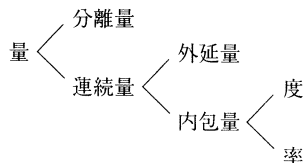
ここで考察する分数の新しい教授プランは考え方の骨組みとして次の特徴をもつ。第一に「わかるさんすう」などで使われている量分数の考え方を継承する。第二に分数の同値（とりわけ定義2の形）についてしっかり教える。第三に同値類と順序, 同値類と演算について教える。第四に有理数の概念を導入する。

もうすこしくわしく云えば, 分数の定義は4節定義1のように自然 x_1, x_2 のこの順序で対を $\frac{x_1}{x_2}$ とする。これは形式的な定義であるが, 分数の意味と大きさを「わかるさんすう」の分数の定義の形で与えることを別途行えばよい。すなわち分数は次の量の大きさを表すというような意味づけを行って, はんばの量と対応させる。従って分数と分数の大きさを区別する。この方がやがて負の分数を扱うときにも合理的になる。同値についても, 4節定義2で同値の定義を与えておき, 同値の分数は同じ大きさをもつことを知らせる。倍分, 約分は計算の為の現則（演算の為の）と位置づける。順序についても, 4節定義3, 定義4で順序を定義し, 大きさと順序の関係を数える。順序と算法は同値関係と両立することを教える。これは例えば順序と同値関係の両立とは4節定理8の内容をさしている。

注

- 1) 山口格, 須田勝彦: 「数学教育の観点から見たアルキメデスの公理」北海道大学教育学部紀要49(1987)
- 2) 遠山啓: 「量の分数」 数学教室 (1959) 3月, 7月号, 遠山啓著作集, 数学教育論シリーズ 5, 量とはなにかI (1978) 太郎次郎社
- 3) 遠山啓: 「数学教育における量の問題」, 数学セミナー (1962) 8月号, 遠山啓著作集, 数学教育論シリーズ, 5, 量とはなにかI (1978) 太郎次郎社

遠山は量を次の様に分類した。



外延量とは体積, 重さ, 長さ, 時間のように加法性がなりたつものを指している。

- 4) F. Klein: 「Elementarmathematik vom hören Standpunkte aus I」Berlin. Springer (1933) p. 31.
- 5) アレクサンドロフ: 「数学とはどのような学問か」遠山啓編「数学の世界」大月書店 (1974)
- 6) 遠山啓: 「集合と量および数」(1978) 遠山啓著作集, 数学教育論シリーズ5, 太郎次郎社

分数の教授学的研究

- 7) 遠山啓監修「わかるさんすう」むぎ書房(1987)
- 8) 堀岡武 1987年合同教育全道集会報告
- 9) Edmund Landau 「Grundlagen der Analysis」(1930), Chelsea 版あり。
- 10) 自然数については既知としている。
- 11) Landau の同上書 §5 より
- 12) 井手賀津雄：数学教室409 (1986)

学 術 研 究 発 表 集 録

理 工 編

(昭和62. 4. 1~63. 3. 31)

応用物性学科

安 達 洋	ZrO/W (100)熱電界放射陰極の酸素分圧による放射パターンの変化	第48回応用物理学会 学術講演会	1987年10月
加 藤 達 幸 安 達 和 洋 鈴 木 和 郎	絶縁性液体中でのトンネル電流の観測	第48回応用物理学会 学術講演会	1987年10月
安 達 洋	STMの諸問題と展望	「トンネル現象の物理と応用」武内, 御子柴共編 培風館	1987年12月 311頁
安 達 洋 加 藤 達 幸 鈴 木 和 郎	流動パラフィン中での STM	第23回応用物理北海道支部学術講演会	1988年 1 月
安 達 洋 加 藤 達 幸	液体封止走査型トンネル顕微鏡の可能性	第35回応用物理関係 連合講演会	1988年 3 月
S. Nagata S. Ebisu E. Fujita M. Miyazaki S. Taniguchi	Low Temperature Magnetization and Spin-Wave Excitations in Gd	第18回低温物理学国際会議 (於：京都国際会館)	1987. 8 .21
S. Nagata S. Taniguchi	Thermal Fluctuations in Magnetic Field and the Josephson Supercurrent in Pb-Ag-Pb (SNS) Junctions	第18回低温物理学国際会議 (於：京都国際会館)	1987. 8 .24
S. Nagata S. Ebisu E. Fujita S. Taniguchi	ガドリニウム (Gd) におけるスピン波励起	日本物理学会 1987年秋の分科会 (於：東北大学)	1987. 9 .29
S. Nagata E. Fujita S. Ebisu S. Taniguchi	振動試料型磁力計の信号検出コイルの最適配置	第48回応用物理学会 学術講演会 (於：名古屋大学)	1987.10.18
M. Ogino S. Nagata S. Taniguchi	低温蒸着法による金属薄膜の電気抵抗	第48回応用物理学会 学術講演会 (於：名古屋大学)	1987.10.19
Y. Hodosawa S. Nagata S. Taniguchi	TaSe ₃ の常伝導状態での電気抵抗	第23回応用物理学会 北海道支部学術講演会 (於：北海道大学)	1988. 1 .29
E. Fujita M. Yokoyama S. Nagata S. Taniguchi	非晶質合金 Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉ の低温における磁化の温度依存性	第23回応用物理学会 北海道支部学術講演会 (於：北海道大学)	1988. 1 .29

S. Ebisu E. Fujita S. Nagata S. Taniguchi	ガドリニウムのスピン波励起	第23回応用物理学会 北海道支部学術講演 会(於:北海道大学)	1988. 1. 29
S. Nagata Y. Hodosawa S. Taniguchi K. Yamaya	Normal-State Electrical Resistivity in Quasi-One-Dimensional Conductor TaSe ₃	J. Phys. Soc. Jpn	56, 2225- 2226 (1987)
S. Nagata S. Ebisu E. Fujita M. Miyazaki S. Taniguchi	Low-Temperature Magnetization and Spin- Wave Excitations in Gd	Proc. 18 th Int. Conf. on Low Temp. Jpn. J. Appl. Phys.	26-3, 825 826 (1987)
S. Nagata S. Taniguchi	Thermal Fluctuations in Magnetic Field and the Josephson Supercurrent in Pb-Ag-Pb (SNS) Junctions	Proc. 18 th Int. Conf. on Low Temp. Jpn. J. Appl. Phys.	26-3, 1593 1594 (1987)
S. Nagata M. Ogino S. Taniguchi	Electrical Resistivity of Thin Metal Films Vapor-Quenched at 77 K: Cu, Ag, Au, Ni, Pd and Pt	Phys. Status Solidi (a)	102, 711- 717 (1987)
藤原 裕 文 中川 一 夫	可飽和色素による位相共役波の過渡特性 (I)	第47回応用物理学会 学術講演会	1986年 9月
中川 一 夫 藤原 裕 文	可飽和色素による位相共役波の過渡特性 (II)	第47回応用物理学会 学術講演会	1986年 9月
中川 一 夫 藤原 裕 文	メチルレッド薄膜による位相共役波の発生 (薄膜材料依存性)	第47回応用物理学会 学術講演会	1986年 9月
H. Fujiwara and K. Nakagawa	Transient Phase Conjugation by Degenerate Four-Wave Mixing in Saturable Dyes.	J. Opt. Soc. Am. B	Vol. 4, No. 2, pp. 121-128 (1987)
S. Miyanaga and H. Fujiwara	Effects of Absorption on the Propagation Constants of Guided Modes in an Asymmetric Slab Optical Waveguide.	Optics Comm.	Vol. 64, No. 1, pp. 31- 35 (1987)
藤原 裕 文	有機色素含有	高分子	36巻 7月号 p. 509 (1987)
H. Fujiwara and K. Nakagawa	Phase Conjugation by Methylred Fixed in Geratin or PMMA Matrix.	Proc. SPIE	Vol. 813, pp. 193- 194 (1987)
K. Nakagawa and H. Fujiwara	Real-Time Interferometry by Degenerate Four-Wave Mixing and Holography in Eosin Film.	Proc. SPIE	Vol. 813, pp. 527- 528 (1987)
新崎 卓 藤原 裕 文 中川 一 夫	可飽和色素による位相共役波の過渡特性 (III)	第48回応用物理学会 学術講演会	1987年10月
宮永 滋 己 藤原 裕 文	吸収をもつ非対称薄膜光導波路における導波 モードの伝搬定数	第48回応用物理学会 学術講演会	1987年10月
山林 智 明 宮永 滋 己	色素含有薄膜光導波路における位相共役波の 発生	第23回応用物理学会 北海道支部学術講演 会	1988年 1月
中川 一 夫 藤原 裕 文	メチルレッド含有アクリル膜による位相共役 波の発生	第35回応用物理学関 係連合講演会	1988年 3月

宮山村藤	永林山原	滋智勝裕	己明宏文	色素含有高分子薄膜光導波路における位相共役波の発生	第35回応用物理学関係連合講演会	1988年 3月
宮藤中新	永原川崎	滋裕一	己文夫卓	可飽和色素による位相共役波の過渡特性(IV)	第35回応用物理学関係連合講演会	1988年 3月
川平内松宮	島井海田島	利克豊竹浩	器幸博善光	硝酸化合物結晶の相転移領域での電気的性質(硝酸ルビジウム, 硝酸セシウム, 硝酸サマリウム)	日本物理学会	1986
R. Kawashima T. Uchiumi				Ionic conductivity near the successive phase transition points of Rubidium nitrate crystal.	Solid State Communications	58(1986) 625
R. Kawashima T. Uchiumi				Electric properties near the first order phase transition points of Rubidium nitrate crystal.	J. Phys. Soc. Jpn.	55(1986) 3143
R. Kawashima				The temperature dependence of optical absorption near the successive phase transition points of RbNO ₃ crystal.	J. Phys. C. Solid State Physics.	19(1986) L 759
R. Kawashima				Electric and optical properties of samarium nitrate crystal.	J. Phys. Soc. Jpn	57(1987) 415
川平福勝	島井田木	利克明喜一	器幸治郎	硝酸セシウム結晶の相転移領域での電気的性質	応用物理学会	1987
松川勝福	田島木田	竹利喜明	善器郎治	硝酸サマリウム結晶の相転移と電気的性質	応用物理学会北海道支部会	1988
佐川勝福	藤島木田	利喜明	充器郎治	誘電体結晶に於る AC Impedance の計測と解析システム	応用物理学会北海道支部会	1988
延佐福	与々木田	篤直明	志樹治	骨の力学的性質と吸着水	応用物理学会北海道支部会	1988
金属工学科						
田平	中岡	雄一武		B-Mg-Ce 合成剤による CV 黒鉛鑄鉄の製造	鑄物	59, 11, 676-681 (1987)
Y. Tanaka T. Goto T. Kawai K. Ikawa				Quantitative Study on Grain Refining Process for Two-Phase Mixed matrix Structure for Spheroidal Graphite Cast Iron	Transactions of Japan Foundrymen's Society	Vol.7 19-23 (1988)
田井	中川	雄一也		球状黒鉛鑄鉄の基地組織微細化過程の定量的観察	日本鑄物協会第111回全国講演大会	1987. 5. 23
田山佐々木	中本喜	雄一強章		窒化けい素セラミックス鑄ぐるみ鑄鉄の接合組織	日本鑄物協会第111回全国講演大会	1987. 5. 23

田中雄一 石坂安義 沢崎義久	TIG再溶融法により表面硬化した鑄鉄の耐ころがり疲れ特性	日本鑄物協会第111回全国講演大会	1987.5.23
田中雄一 斉藤徹	オーステンパー処理した球状黒鉛鑄鉄の疲れ特性に及ぼすマトリックス組織の影響	日本鑄物協会第111回全国講演大会	1987.5.24
石坂三成 田中雄一	窒化けい素セラミックスのアルミニウムによる鑄ぐるみ	日本鑄物協会北海道支部研究発表講演会	1986.6.6
田中雄一 関堂修	オーステンパー球状黒鉛鑄鉄破壊靱性に及ぼす残留オーステナイトの影響	日本鑄物協会第112回全国講演大会	1987.10.6
田中雄一	オーステンパー球状黒鉛鑄鉄の機械的性質に及ぼす残留オーステナイトの影響	日本鑄物協会高品位球状黒鉛鑄鉄部会, 日本鑄物協会北海道支部鑄鉄鋼研究会	1987.11.15 1987.11.22
C.F.LO (Rutgers)			
H. KAMIDE W.E. MAYO (Rutgers)	X-Ray Determination of Strain Distribution in Inconel Alloy 600 C-Ring.	Fourteenth International Congress of Crystallography.	13. August. 1987
S. WEISSMANN (Rutgers)			
藤原論 (大学院)			
鎌田隆吉 嶋影和 片山博	直接環元法による金属 Eu の製造に関する基礎研究	昭和62年度日本鉱業会春季講演会	1987.4.1
嶋影和宜 江島辰彦 (東北大学)	β -アルミナ固体電解質を隔膜に用いる Na/S(IV) 溶融塩電池の特性	第100会日本金属学会春期講演会	1987.4.2
Gleb Mamantov (テネシー州立大学)			
嶋影和宜 山本裕司 (東北大学大学院)			
江島辰彦 (東北大学)	偏析法による溶融 Al-Mg 合金の高純度化	第72回軽金属学会春期講演会	1987.5.13
嶋影和宜 星政義 (東北大学)			
江島辰彦 (東北大学)	CVD法によるレア・アース酸化物の低温塩素化	日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同春季講演会	1987.6.18
金基浩 (東北大学大学院)			
佐藤謙 (東北大学)	溶融 $\text{LaCl}_3\text{-MCl}$ (M: Li, Na, K および Cs) 2成分系の密度	日本金属学会誌	51巻, No 7 p. 630-636 (1987)
嶋影和宜 江島辰彦 (東北大学)			
嶋影和宜	レア・アース金属による酸化ユウロピウムの真空環元	日本鉱業会 昭和62年度分科研究会報告書	(1987) A-10
嶋影和宜 藤一彦 (東北大学)			
片山博	真空下における酸化ユウロピウムと希土金属の反応	日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同秋季講演会	1987.11.20

桃宮圓	野坂元敏 (阪大)	正博男	チタン箔インサートによる6063アルミニウム合金と S 20 C 鋼の拡散溶接	軽金属学会誌	(37) ,6 413-418 (1987)
桃園池	野城敏建 (阪大)	正男 (二)	鉄鋼のチタンとの拡散接合性に及ぼす炭素の影響	鉄と鋼	(73) ,11 1590-1597 (1987)
T. Momono T. Enryo and K. Ikeuchi			Effect of Carbon Content on the Diffusion Bonding of Iron-based Alloy to Titanium	Trans. ISI of Japan	(27) ,5 B-171 (1987)
桃遠園池	野藤一敏建 (阪大)	正彦男 (二)	各種インサート材を用いた SiC/Al 繊維強化複合材料の拡散溶接	軽金属学会第72回春期講演大会	1987. 5 .13
桃藤小井	野原林川 (東北大)	正男之也	拡散接合法による鉄と他の金属の複合化について	日本鋳物協会北海道支部研究発表講演会	1987. 6 . 6
桃野		正	金属基複合材料の発展と応用 — 金属と異種材料の複合化に関する最近の研究 —	日本鋳物協会北海道支部、銅合金・アルミ合金鋳物研究会	1987. 6 .16
鈴桃	木野	貴正	Al-Cu 合金鋳塊の逆偏析について	日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同春季講演大会	1987. 6 .19
桃小	野林雅	正之	異種金属の拡散接合性に及ぼす母材中酸素の影響	日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部研究会	1987. 7 .29
桃小及井	野林川川 (東北大)	正之俊也	拡散接合法による鉄と異種金属との複合化について	日本鋳物協会・第112回全国講演大会	1987.10. 5
小桃園	林野城敏 (阪大)	雅之正男	チタン及びチタン合金と S 20 C 鋼の拡散接合	日本金属学会・日本鉄鋼協会両北海道支部合同秋季講演大会	1987.11.20
桃小	野林雅	正之	拡散接合法による鉄鋼とチタンの複合化	日本鉄鋼協会北海道支部・素材製造技術分科会	1988. 1 .13
桃野		正	拡散接合法による鉄と異種金属との複合化について — 接合界面の諸問題 —	日本鋳物協会・鋳造複合材料研究部会	1988. 2 .29
菅原英夫			Al-Li 系合金の腐食機構	日本鉄鋼協会北海道支部鋼材・新素材分科会	1988. 3 .18
菅原英夫			ステンレス鋼 — “ひび割れ” で泣いているお話 —	防錆時代	6・7,20- 7 (1987)

三菅濱小野寺	沢原俊英由隆二	平夫和郎	小型パンチ試験法によるフェライト鋼微小試験片水素脆性感受性評価	日本金属学会春期(第100回)大会	1987.4.2
三菅鈴澤奥	沢原俊英野(新日鉄嘉新日鉄)	平夫賢巖雄	高炭素鋼の接着引張強度—加熱温度—加熱時間(TTS ₁)線図(高炭素鋼の接合法の研究—I)	日本鉄鋼協会第113回講演大会	1987.4.1
三	沢俊平		鉄鋼の海洋環境破面写真集 Vol. 2 (分担執筆)	日本鉄鋼協会・鉄鋼の環境強度部会発行	1987年4月
三柴	沢俊平(阪大)	平夫	海水中腐食現象と腐食の機構	日本鉄鋼協会・鉄鋼の環境強度部会第3回シンポジウム	1987.5.19
三	沢俊平		人工海水中腐食疲労き裂進展とカソード防食効果	日本鉄鋼協会・鉄鋼の環境強度部会第3回シンポジウム	1987.5.20
三菅斎横	沢原俊英藤井(東伸工業)	平夫弘顕	水冷却型核融合炉用ステンレス鋼の微小SCC試験および微小水素脆性試験	腐食防食'87講演大会	1987.5.21
斎菅三	藤原雅英俊	弘夫平	微小試験片による核融合炉構造用フェライト鋼のDBTTおよび水素脆性感受性評価	日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同春季講演大会	1987.6.18
澤奥鈴三菅	井野木沢原	巖雄賢平夫	高炭素鋼の接着強度のワイブル統計およびラソン・ミラー因子による評価	日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同春季講演大会	1987.6.19
三斎濱	沢藤俊雅由	平弘和	構造材料用ステンレス鋼の照射環境強度(DBTT, HE, SCC)および耐食性評価のためのSP微小試験	「核融合炉材料及びプラズマ壁相互作用」科研費第一班若手短期研究会	1987.8.7
Toshihei MISAWA			Application of Small Punch Test to Evaluate DBTT, Fracture Toughness, Corrosion Resistance and SCC Susceptibility of Structural Steels Using Miniaturized Specimens	U.S./Japan FFTF/MOTA Experimenters' Workshop, Tokyo	1987.8.25
三	沢俊平		主題「材料科学の基礎とその腐食への応用」における講義: ステンレス鋼の組織と腐食	第14回コロージョン・セミナー(腐食防食協会)	1987.9.4
三	沢俊平		「鉄はなぜさびるか」心を揺る楽しい授業話題源 化学(分担執筆)	東京法令出版	1987年9月 p. 241
T. MISAWA T. ADACHI M. SAITO Y. HAMAGUCHI			Small Punch Tests for Evaluating Ductile-Brittle transition Behavior of Irradiated Ferritic Steels.	Journal of Nuclear Materials	150,194-202(1987)
T. MISAWA Y. HAMAGUCHI M. SAITO			Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement Studies of Austenitic and Ferritic Steels by Small Punch Test.	3rd Int. Conf. on Fusion Reactor Materials, Karlsruhe	1987.10.5

T. MISAWA H. SUGAWARA M. YOKOI (東伸工業)	Electrochemical and SCC Studies for Water-Cooled Fusion Reactor Structural Steels using Small Specimens	172nd Meeting of the Electrochemical Society, Honolulu	1987.10.20
青木信道 岩崎俊実 古沢淳平 三石坂 (日鋼)	構造材料の特殊環境強度評価のための小型パンチ微小試験法	日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同秋季講演大会	1987.11.19
三小笠原平 森山真樹 菅原悦郎 菅原英夫	高張力鋼の人工海水中腐食疲労き裂進展に及ぼすカソード防食電位の影響	防食技術	36,(12) 767-773 (1987)
斎藤雅弘 三藤俊平 菅原英夫	高温高压水中の304鋼微小 SCC 感受性評価試験に及ぼすひずみ電極挙動と皮膜性状	第23回北海道腐食防食研究会	1988. 1 .22
T. OGAWA (日鋼) K. OHNISHI (日鋼) T. MISAWA	Manufacture and Hydriding Characteristics of Unidirectionally Solidified LaNi ₅ -Ni Eutectic Alloys with Disintegration Resistance	Journal of Less-Common Metals	138,143-154(1988)
三 沢 俊 平	ニューコロージョン	日本会属学会会報	27,(2)118 (1988)
Toshihei MISAWA	Application of Small Punch Test to Irradiation Assisted Stress Corrosion (IASCC) Researches in Japan	US-Japan Workshop on Small Specimen Test Technology (SSTT), Tokyo	1988. 2 .17
三 沢 俊 平	スモールパンチ試験法による特殊環境下の材料特性評価	日本会属学会分科会シンポジウム「マイクロメカニカルテスト」	1988. 3 .30
三 沢 俊 平	加速粒子による材料照射効果の評価法標準化に関する研究	昭和62年度科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書	1988年 3 月
三小笠原平 森山真樹 菅原悦郎 菅原英夫	高張力鋼の人工海水中腐食疲労き裂進展におよぼすカソード防食電位の影響	防食技術	36,767-73 (1987)
山上田豊 三沢勇治 菅原俊平 菅原英夫	液体急冷 Al-Li 系合金の腐食挙動	日本鉄鋼協会, 日本金属学会両北海道支部春季講演大会	1987. 6 .19
菅三原夫 山沢俊平 山田豊	Al-Li 合金の腐食挙動	日本金属学会秋季大会	1987.10. 9
田中久則 古沢俊実 菅原英夫	アモルファス Fe-Ni-Cr-P-C 系合金の結晶化と電気化学的性質の関係	北海道腐食防食研究会	1988. 1 .22
Hiroshi G. KATAYAMA	Reduction and Desulphurization of Chromium Ore Pellet Containing Carbonaceous Material in the Flowing Atmosphere of H ₂ -CO	Trans. Iron Steel Inst. Jpn.	27(1987) p. 545-551

片山 博	N_2-CH_4 および N_2-H_2 雰囲気中の炭材内装クロム鉄ペレットの還元挙動	鉄と鋼	73(1987) p. 1512-1518
片山 博 曹佐々木 健 高塚 健 司	炭素飽和フェロクロムと $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ 系スラグ間のクロムおよび硫黄分配	鉄と鋼	73(1987) p. 2138-2144
Hiroshi G. KATAYAMA Ting TSAO Naoshi MATSUSHIMA	Chromium and Sulphur Distributions between Liquid Fe-Cr Alloy and Calcium Aluminate Based Slag for Ladle Refining	Trans. Iron Steel Inst. Jpn.	28(1988) p. 186-191
片山 博 佐藤 雅幸 数野 雅則	各種合成クロマイトのスラグ中における溶融還元挙動	日本金属学会日本鉄鋼協会 両北海道支部合同春季講演大会	1987. 6. 19
佐藤 雅幸 数野 雅則 片山 博	各種合成クロマイトのスラグ中における溶融還元挙動	日本鉄鋼協会第114回講演大会	1987. 10. 10
片山 博 曹松 島 直	溶融 Fe-Cr 合金と $CaO-Al_2O_3$ 基スラグ間のクロムおよび硫黄分配	日本鉄鋼協会第114回講演大会	1987. 10. 11
平上 治朋 田重朋 (早稲田大学)	炭化珪素粉を用いた鋼の無孔珪素拡散被覆	日本金属学会誌	第51巻11号 (1987) 1023
平上 治朋 田重朋 (早稲田大学)	鋼のチタン拡散被覆における拡散剤中の活性剤と Al_2O_3 の効果	日本金属学会誌	第51巻11号 (1987) 1030
平上 治朋 田重朋 (早稲田大学)	二酸化チタン粉を用いた鋼のチタン拡散被覆	日本金属学会誌	第51巻11号 (1987) 1039
平上 治朋 田重朋 (早稲田大学) 鶴田 淳人 (神戸製鋼)	ニッケル基超合金へのアルミニウム-珪素複合拡散被覆	日本金属学会誌	第51巻12号 (1987) 1180
平上 治朋 田重朋 (早稲田大学)	二炭化珪素による鋼への無孔珪素拡散被覆	熱処理	第28巻 1号 (1988), 4
平上 治朋 田重朋 (早稲田大学)	ニッケルへの Al-Cr 複合拡散被覆の研究(第2報)	第24回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集	(1987), 53
平上 治朋 田重朋 (早稲田大学) スバルマン・ジュハンダ (早稲田大学大学院)	鉄鋼材料へのアルミニウム-クロム複合拡散被覆	第25回日本熱処理技術協会講演大会講演概要集	(1987), 13
谷口 年史 都 福仁 (北海道大)	交流磁場中のスピングラス転移	日本物理学会 第42回年会	1987. 3. 27
谷口 年史 都 福仁 (北海道大)	原子短距離秩序の非線形帯磁率への影響	日本物理学会秋の分科会	1987. 9. 27

谷口年史 都福仁 (北海道大)	スピングラスの臨界現象	京都大基礎物理学研究所研究会「スピングラスを中心とした新しい秩序相」	1987.12.14
-----------------------	-------------	------------------------------------	------------

電気系 (電気工学科, 電子工学科, 第二部電気工学科)

望月定 丹治男 沖野辰典	室蘭における大気中ラドン濃度の変動特性	大気電気研究	(29)95 (1986)
望月義春 五十五嵐協 (日本気象会) 丹治辰典 沖野辰典	室蘭地域の大气中に出現する Rn-222 とその娘核一名古屋地域で観測された変動パターンとの比較	Research Letters on Atmospheric Electricity	6, (2)77-81 (1986)
望月定 沖野辰典	大気イオンスペクトラムと放射性イオンスペクトラムの同時測定 (I)	大気電気研究	(30)23 (1987)
丹治辰男	新しい雨量計の開発	日本気象学会1987年 春季大会講演予稿集	1987, 184
望月定 下道国 (名古屋大学)	屋内ラドンの挙動特性	空気清浄	25, (1)2-40 (1987)
望月定 丹治辰男	室蘭市における大気環境の推移	大気電気研究	(31)17 (1987)
丹治辰男	新しい雨量計	大気電気研究	(31)37 (1987)
望月定 沖野辰典	大気イオンスペクトラムと放射性イオンスペクトラムの同時測定 (II)	大気電気研究	(31)40 (1987)
望月定 丹治辰男 沖野辰典	フリー RaA の測定 (II)	大気電気研究	(32)19 (1987)
望月定 丹治辰男 沖野辰典	室内空気中での大気イオンと放射性イオンの移動度分布同時測定 (方法と装置)	Research Letters on Atmospheric Electricity	7, (2)59-64 (1987)
Tatsuo TANJI	RAINFALL INTENSITY GAUGE WITH WIDE RANGE, SHORT RESPONSE TIME AND LINEAR RESPONSE CHARACTERISTICS	Research Letters on Atmospheric Electricity	7, (2)71-73 (1987)
天野功 木下村俊 山田淳 南野條村 南野條村	温度勾配凝固法による InP 結晶の成長	電気関係学会北海道 支部連合大会講演論 文集 232	1987.10. 3
相伊明 鈴藤人 南野誠 南野條村 南野條村	Pd を蒸着した TiO ₂ / Si 電極の光電気化学的挙動	電気関係学会北海道 支部連合大会講演論 文集 237	1987.10. 3
出彦 荒智 山正 南野淳 南野條村 南野條村	陽極酸化法による薄膜 SiO ₂ の形成とその評価	電気関係学会北海道 支部連合大会講演論 文集 238	1987.10. 3

石水北南野	部谷村條村	真和直淳	三宏子二滋	AES, SIMS 法による Si 陽極酸化膜の分析	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集 239	1987.10.3
源小斉吉南野	島沼藤野條村	誠 公正淳	次秀史樹二滋	EBIC 法によるシリコン陽極酸化 MIS 型及びショットキー障壁型太陽電池の測定	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集 240	1987.10.3
南水吉野	條谷野村	淳和正	二宏樹滋	シリコン陽極酸化膜の Si /SiO ₂ 界面の改善に関する研究	室蘭工業大学研究報告	,37, p. 81 (1987)
石北吉南野	部村野條村	真直正淳	三子樹二滋	熱処理によるシリコン陽極酸化膜の膜質改善機構に関する一考察	電気化学協会北海道支部第14回研究発表会講演要旨集 11	1988.1.21
天木木南野	野下村條村	俊淳	功聡憲二滋	陽極酸化法による MIS 型 InP 太陽電池の試作	電気化学協会北海道支部第14回研究発表会講演要旨集 12	1988.1.21
相鈴伊南野	澤木藤條村	克 和淳	明誠人二滋	TiO ₂ / Si 電極の光電気化学的挙動とその特性改善	電気化学協会北海道支部第14回研究発表会講演要旨集 24	1988.1.21
源小遠南斉吉野	島沼藤條藤野村	誠 敏淳公正	次秀明二史樹滋	EBIC 法による陽極酸化 MIS 型太陽電池のキャリア輸送機構に関する一考察	応用物理学会北海道支部第23回学術講演会講演予稿集 A-6	1988.1.28
天木木吉山遠南野	野村下野田藤條村	俊 正 敏淳	功憲聡樹進明二滋	温度勻配凝固法による InP 結晶成長とその評価	応用物理学会北海道支部第23回学術講演会講演予稿集 A-20	1988.1.28
相伊鈴吉遠南野	澤藤木野藤條村	克和 正敏淳	明人誠樹明二滋	TiO ₂ / Si 電極の光電気化学的挙動とその特性改善	応用物理学会北海道支部第23回学術講演会講演予稿集 A-25	1988.1.28

Hideki HASEGAWA Satoru ARIMOTO Junji NANJO Hidekazu YAMAMOTO Hideo OHNO	Anodic Oxidation of Hydrogenated Amorphous Silicon and Properties of Oxide	J. Electrochem. Soc. : Solid-State Science and Technology	Vol. 135 No. 2, pp 424-431 (1988)
Hiroshi WAKAYAMA Hiroshi TAZAWA	The analysis of P_{O_2} difference between air space and arterialized blood in chicken eggs with respect to widely altered shell conductance.	International Symposium on Oxygen Transport to Tissue (Sapporo)	7月 (1987)
Hiroyuki MUSASHI Yukinori SUZUKI Hiroshi TAZAWA	Simultaneous acquisition of ECG, BCG and arterial blood pressure from chick eggs.	38th Annual Fall Meeting of the American Physiological Society (San Diego)	10月 (1987)
Atsushi OKUDA Hiroshi TAZAWA	Oxygen consumption and growth of chick embryos with shell conductances altered widely from the beginning of incubation.	38th Annual Fall Meeting of the American Physiological Society (San Diego)	10月 (1987)
Shinichi NAKAZAWA Hiroshi TAZAWA	Short term effects of widely altered shell conductance on O_2 consumption and hematological variables of chick embryos.	38th Annual Fall Meeting of the American Physiological Society (San Diego)	10月 (1987)
Hiroshi TAZAWA Kijell JOHANSEN (オーフス大学)	Comparative model analysis of central shunts in vertebrate cardiovascular systems.	Comparative Biochemistry and Physiology	86 A, 595-607 (1987)
Hiroshi TAZAWA Hermann RAHN (ニューヨーク州立大学)	Temperature and metabolism of chick embryos and hatchlings after prolonged cooling.	Journal of Experimental Zoology	Suppl. 1 105-109 (1987)
Hiroshi TAZAWA	Embryonic Respiration. In: Bird Respiration	CRC Press	3-41 (1987)
Hiroshi TAZAWA Hiroshi WAKAYAMA J. Scott TURNER (ケープタウン大学) C. V. PAGANELLI (ニューヨーク州立大学)	Metabolic compensation to gradual cooling in developing chick embryos.	Comparative Biochemistry and Physiology	89 A, 125-129 (1988)
Shinichi NAKAZAWA Hiroshi TAZAWA	Blood gases and hematological variables of chick embryos with widely altered shell conductance.	Comparative Biochemistry and Physiology	89 A, 271-277 (1988)

A. J. OLSZOWKA (ニューヨーク州立大学)	A blood-gas nomogram of the chick fetus : Blood flow distribution between the chorioal- lantois and fetus.	Respiration Physio- logy	71,315- 330(1988)
Hiroshi TAZAWA Hermann RAHN (ニューヨーク州立大学)			
Ichimin Shirotani Haruki Kawamura (姫路工大)	Superconductivity of phosphorus and phos- phorus-Arsenic Alloy under High pressures	Jpn. J. Appl. phys.,	supplement 26-3, 921 (1987)
Kazuhiko Tsuburaya Kyoji Tachikawa (金材研)			
A. Yoshihara (東北大)			
T. Fujimura (東北大)	Brillouin Scattering Studies on Low Frequen- cy Surface Dynamics in Black Phosphorus	J. Phys. Soc. Japan	56, 1223 (1987)
Y. Oka (東北大)			
H. Fujisaki (東北大)			
I. Shirotani			
T. Kikegawa (高エネルギー物理研)			
H. Iwasaki (高エネルギー物理研)			
T. Fujimura (東北大)	Synchrotron-Radiation study of Phase Tran- sitions in phosphorus at High pressures and Temperatures	J. Appl. Cryst.	20, 406 (1987)
S. Endo (大阪大)			
Y. Akahama (大阪大)			
T. Akai (大阪大)			
O. Shimomura (無機材質研)			
T. Yagi (東大物性研)			
S. Akimoto (東大物性研)			
I. Shirotani			
城 谷 一 民	圧力で色の変る不思議な化合物 (圧力インジ ケーターへの熱い視線)	化学	42, No. 11 (1987)
I. Shirotani			
K. Tsuji (慶大)			
H. Kawamura (姫路工大)			
O. Shimomura (無機材質研)			
K. Tsuburaya	Phase Transition of Black Phosphorus and Black Phosphorus-Arsenic Alloy at Uery Low Temperatures and High Pressures	Photon Factory Activity Report	5, 160 (1987)
K. Okuyama			
S. Shiba			
O. Endo (慶大)			
T. Kikegawa (高エネルギー物理研)			
T. Nakajima (高エネルギー物理研)			

I. Shirotani H. Kawamura (姫路工大) K. Tsuji (慶大) K. Tsuburaya O. Shimomura (無機材研) K. Tachikawa (金材研)	Pressure-Induced Phase Transition and Superconductivity in Phosphorus	Bull. Chem. Soc. Japan	61,211 (1988)
城 谷 一 民	一次元 d ⁸ 錯体を用いた圧力インジケータ	昭和62年度科研費補助金(試験(1))研究成果報告書	1988. 3
杉 岡 一 郎 黒 島 一 利 秋 山 一 稠	パーソナルコンピュータによる成績管理・処理システム	電子情報通信学会教育技術研究会	ET 87-2 1987. 5. 23
杉 岡 一 郎 黒 島 一 利 秋 山 一 稠	エキスパートシステム構築ツールを用いた教育用 FORTRAN エラー相談システム	電子情報通信学会教育技術研究会	ET 87-2 1987. 5. 23
下 田 希 紀 黒 島 希 一 杉 山 一 稠	三面図からのソリッドモデル生成の一手法	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	1987.10. 2
杉 黒 裕 吾 黒 山 一 稠	SS 通信における標準電波を用いた同期捕捉	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	1987.10. 2
山 田 哲 也 黒 島 希 一 杉 山 一 稠	SS 通信法式を用いたパソコン間データ通信について	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	1987.10. 2
杉 岡 一 郎 帆 保 裕 一 黒 山 一 稠	スペクトル拡散通信方式のデータ多重伝送への応用	室蘭工業大学研究報告(理工編)	Vol. 37 1987.11
杉 岡 一 郎 黒 島 一 利 秋 山 一 稠	教育用グラフ描画サブルーチンパッケージ	CAI 学会誌	Vol.5, No.3 1988. 2
杉 岡 一 郎 黒 島 一 利 秋 山 一 稠	パーソナルコンピュータによる成績管理・処理システム	CAI 学会誌	Vol.5, No.3 1988, 2
倉 重 龍 一 棚 田 一 郎	室蘭工大式改良型 CAI システム (ホスクル) の開発	電子情報通信学会教育技術研究報告	1987. 5
倉 重 龍 一 棚 田 一 郎	ホスクル管理システムの開発	電子情報通信学会教育技術研究報告	1987. 5
棚 田 一 郎 倉 重 龍 一	VTR と LAN を利用した電気工学実験自動化システムの開発について	電子情報通信学会教育技術研究報告	1987. 5
倉 重 龍 一 棚 田 一 郎	ホスクルにおけるオーサリングシステムの開発	CAI 学会第12回研究発表大会論文集	1987. 8
倉 重 龍 一 棚 田 一 郎	ホスクルにおける教材「電気回路」の開発	日本教育工学会第3回大会論文集	1987.10

倉棚	重田 龍一郎	ホスクリにおける誤答解析システムの開発	日本教育工学会第3回大会論文集	1987.10
棚倉	田重 龍一郎	エキスパートの概念を導入した電気工学実験自動化システムの開発	日本教育工学会第3回大会論文集	1987.10
倉重	龍一郎	室蘭工大式オーサイニングシステム	(雑誌)マイコンレーダー	1987. 8
斉重西松坂	藤野 善夫 辻浦 俊 口 威	探針法による電子エネルギー分布測定における空間電位推定法	放電研究会資料 ED-87-48	1987. 8. 5 p. 89-98
重西松坂	野藤 俊浩 辻浦 善夫 口 威	Ar グロー放電陽光柱の電子エネルギー分布の測定	放電研究会資料 ED-87-51	1987. 8. 5 p. 119-126
重西松坂	野藤 俊浩 辻浦 善夫 口 威	探針法による Ar グロー放電プラズマの電子エネルギー分布の測定	電気学会北海道支部連合大会講演論文集	1987.10. 3 p. 229
斉重西松坂	藤野 善夫 辻浦 俊 口 威	電子エネルギー分布上に現われた衝突機構の位置からの空間電位推定法	電気学会北海道支部連合大会講演論文集	1987.10. 3 p. 230
松坂銚斉重西	浦口 二威 館藤 俊善 野辻 俊浩	ヘリウムグロー放電陽光柱の解析—封入気体の圧力を変えた場合—	電気学会北海道支部連合大会講演論文集	1987.10. 3 p. 231
坂松銚斉重西	浦口 威二 館藤 俊善 野辻 俊浩	ヘリウムグロー放電陽光柱のプラズマインピーダンス	電気学会北海道支部連合大会講演論文集	1987.10. 3 p. 231
斉西松坂銚	藤辻 善夫 浦口 威二 館 俊之	グロー放電の電子エネルギー分布を用いた衝突機構の検証法	電気学会論文誌 A-108巻-1号	1988. 1 p. 31-38
銚斉西松坂	館藤 俊善 辻浦 俊 口 威	電子エネルギー分布の測定に関する考察(I)	第4回プラズマプロセッシング研究会資料 2-6	1987. 1. 29 p. 76-79
松坂斉銚西	浦口 二威 藤館 俊夫 辻 昭	低圧ヘリウムグロー放電陽光柱のモデル化について	第4回プラズマプロセッシング研究会資料 4-17	1987. 1. 30 p. 214-217

Y. Saito T. Shigeno A. Nishitsuji Y. Matsuura T. Sakaguchi	THE INFLUENCE OF THE FLUCTUATED PLASMA FOR THE MEASUREMENT OF THE ELECTRON ENERGY DISTRIBUTIONS	第5回プラズマプロセス研究会資料 3-8	1988. 1 .28 p. 82-85
Y. Matsuura T. Sakaguchi T. Hokodate Y. Saito T. Shigeno A. Nishitsuji	THE IMPEDANCE OF POSITIVE COLUMN IN GLOW DISCHARGE	第5回プラズマプロセス研究会資料 3-13	1988. 1 .28 p. 102-105
Yuji Ueda Minoru Takahashi	Structure and Magnetic properties of Fe-Ni alloys in the Region of α - γ Phase Boundary	Proceeding of the International Symposium on Physics of Magnetic Materials	1987. 4 . 8
Yuji Ueda Minoru Takahashi	Structure and Magnetic properties in Single Iron Film Electrodeposited on a (110) Copper Crystal	Journal of Magnetism and Magnetic Materials	1988. 4 . 1
上田 勇 治 丸山 浩 平	電着法による多層膜の作成とその磁性	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	1987.10
上田 勇 治 佐藤 裕 也 小 藤 達 也	Fe-B 系非品質合金の内部構造と磁性	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	1987.10
化学系 (化学, 工業化学科, 化学工学科)			
武田 義 幸 富士川 計 吉 魚 崎 浩 平 喜 多 英 明 (北海道大)	n-InSe 電極の挙動—種々のレドックス剤溶液と InSe の接触界面構造の考察	日本化学会北海道支部1987年研究発表会	1987. 7 .24
H. Nakajima (Hokkaido Univ.)			
Y. Takakuwa (Hokkaido Univ.)	Metal Electrodes Bonded on Solid Polymer Electrolyte Membrane (SPE) - IV. Morphological Features and Electrochemical Resistance of Pt- and Au-SPE Electrodes	Electrochim. Acta	32(5), 791-798 (1987)
H. Kikuchi K. Fujikawa H. Kita (Hokkaido Univ.)			
富士川 計 吉 石 川 英 彦 成 田 和 之 山 中 厚 石 田 良 一	両面・デュアル構造を有する白金-SPE膜電極の水素の酸化および酸素の還元における内部抵抗と電極構造	電気化学および工業物理化学	55(8), 621-626 (1987)
富士川 計 吉 荒 又 明 子 喜 多 英 明 (北海道大)	Pt-Sn 錯体溶液中で処理した金電極でのメタノール酸化(1)	電気化学協会北海道支部第14回研究発表会	1988. 1 .21

武田義幸 富士川計吉 魚崎浩平 喜多英明 (北海道大)	n-InSe 電極のアノード溶解とその制御(1)	電気化学協会北海道 支部第14回研究発表 会	1988. 1. 21
富士川計吉 荒又明子 喜多英明 (北海道大)	Pt 系微粒子流動浴中でのメタノール酸化	日本化学会北海道支 部1988年冬季研究発 表会	1988. 2. 5
武田義幸 富士川計吉 魚崎浩平 喜多英明 (北海道大)	n-InSe 電極のアノード溶解とその制御(2)	日本化学会北海道支 部1988年冬季研究発 表会	1988. 2. 5
山崎忠良 小寺琢朗 升田真木彦 大西隆一郎 (北海道大)	H ₂ の陽極酸化中の電位振動 (4)速度論的解析	電気化学協会第54回 大会講演要旨集(202 頁)	1987. 4. 5
山崎忠良 小寺琢朗 升田真木彦 大西隆一郎 (北海道大)	H ₂ の陽極酸化中の電位振動 (5)シュミレーションの結果	電気化学協会第54回 大会講演要旨集(202 頁)	1987. 4. 5
山崎忠良 小寺琢朗 富士川計吉 (北海道大)	H ₂ の陽極酸化中の電位振動 (6)CO 共存系	日本化学会北海道支 部1987年夏季研究発 表会講演要旨集 (8頁)	1987. 7. 24
山崎忠良 小寺琢朗 富士川計吉 (北海道大)	H ₂ の陽極酸化中の電位振動 CO 共存系の理論解析	第14回電気化学協会 北海道支部研究発表 会講演要旨集(5頁)	1988. 1. 21
Takuro Kodera Tadayoshi Yamazaki (Hokkaido Univ.)	Limit Cycle in Electrochemical Oscillation- Potential Oscillation during the Anodic Ox- idation of H ₂	Electrochimica Acta	33, 537-540 (1988)
Makihiko Masuda (Hokkaido Univ.)			
Ryuichiro Ohnishi (Hokkaido Univ.)			
小寺琢朗	金の舞台と白金の舞台(白金の触媒作用)	話題源化学(203頁) (東京法令出版 KK)	1987. 9. 26 刊行

村岡 薰 富士川 計 小喜寺 琢 喜多 英 (北海道大)	Au 及び Au-SPE 電極上の CO 酸化	日本化学会北海道支部1987年夏季研究発表会	1987. 7. 24
Keikichi Fujikawa Kaoru Muraoka Takuro Kodera Hideaki Kita (Hokkaido Univ.)	Co Oxidation on Au and Au-SPE Electrodes with and without modification by foreign Metals	172 nd Meeting of the Electrochemical Society, Inc. (in Honolulu) Lecture No. 1390	1987.10.21
村岡 薰 富士川 計 小中 寺 琢 喜 島 弘 多 英 (北海道大)	CO 酸化における Au-SPE 電極の調整法と触媒活性	第14回電気化学協会北海道支部研究発表会講演要旨集(4頁)	1988. 1. 21
村岡 薰 富士川 計 小中 寺 琢 喜 島 弘 多 英 (北海道大)	CO 酸化反応における Au-SPE 電極の金属イオンによる修飾効果	日本化学会北海道支部1988年冬季研究発表会講演要旨集(29頁)	1988. 2. 5
小松 藤 男 浅川 久 紀 佐 藤 守 之	サーモトロピック液晶ポリカーボネートとポリスチレンとのポリマーブレンドの粘弾性	第36回高分子学会年次大会要旨集 Vol. 36. No. 4. VI-16-26, 1206頁(1987)	昭和62年 5月29日 講演 (国立京都 国際会館)
小松 藤 男 八幡川 寿 紀 浅川 久 守 之 佐 藤 守 之	サーモトロピック液晶ポリカーボネートとポリスチレンとの粘弾性[第2報]	日本化学会, 日本分析化学協会, 高分子学会, 各支部(北海道)窯業協会, 東北・北海道支部 B 16-38 頁(1987)	昭和62年 7月24日 講演 (苫小牧市)
小松 藤 男 浅川 久 守 之 佐 藤 守 之	サーモトロピック液晶ポリカーボネートとポリスチレンとのポリマーブレンドの粘弾性	高分子学会第36回, 高分子討論会(1987), Polymer preprints, Japan. Vol. 36. No. 10, G III L -05, 3626 ~3628(1987)	昭和62年 10月23日講演 (日本都市 センター)
小松 藤 男	サーモトロピックエーテルポリカーボネート液晶による材質強化	機能材料(レビュー) 1987 Vol. 17. No. 12 55-64頁(株C.M.C)	昭和62年 発刊
小松 藤 男 駒田 達 彦	30%直鎖状低密度ポリエチレン並びに30%無水マレイン酸直鎖状低密度ポリエチレンを含む超高分子量ポリエチレンの filler による粘弾性	高分子学会北海道支部講演要旨集 Vol. 22 45-46頁(1988)	昭和63年 2月6日
八幡 雄 小松 寿 男 秋吉 藤 亮 安 藤 公 二	二段タービン翼攪拌槽内の翼の混合領域に及ぼす隣接翼の影響	化学工学協会. 化学工学論文集第13巻第5号691-693(1987)	昭和62年 発刊

八幡壽雄 五十一番 島崎一 小安藤公 藤松公 藤松公	多段攪拌槽の攪拌所要動力	室蘭工業大学研究報告(理工編) Vol. 37. Nov. 1987	昭和62年 発刊
Fujio Komatsu	Polystyrene Strengthened by Addition of Liquid Crystal	Comline International Corporation, Comline News Service Japanese Technology Review	Date 870730 No. 002 昭和62年 10月16日
小松藤男	複合材料の射出成型技術	室蘭地域加速的技術開発支援事業. 財団法人室蘭テクノセンター(北海道立工業試験場)	昭和62年 11月5日講演
杉岡正敏	固体表面に吸着した硫化水素が促進する触媒反応	表面	25(9), 522-532 (1987)
谷井和裕 杉岡正高 金塚敏次	管理図法による化学工程管理(13)連の見方を使用した X 管理図の特性	日本化学会北海道支部1987年冬季研究発表会	1987. 2. 6
森岡俊弘 杉岡正高 金塚敏次	酸化プロピレン合成用 Ag-NaCl 系触媒の酸化特性	日本化学会北海道支部1987年冬季研究発表会	1987. 2. 6
三上国景 杉岡正高 金塚敏次	遷移金属触媒による炭素質のメタン化	日本化学会北海道支部1987年冬季研究発表会	1987. 2. 6
斉藤隆広 杉岡正高 金塚敏次	ゼオライト担持 Ni 触媒による CO ₂ のメタン化	日本化学会北海道支部1987年冬季研究発表会	1987. 2. 6
浦口雅弘 杉岡正高 金塚敏次	アルミナ担持パラジウム触媒を用いたメタン水蒸気改質反応の特性	日本化学会北海道支部1987年冬季研究発表会	1987. 2. 6
長屋賢司 杉岡正高 金塚敏次	担持モリブデン触媒によるシクロヘキサン脱水素反応に対する CS ₂ の活性促進効果	日本化学会北海道支部1987年冬季研究発表会	1987. 2. 6
長谷川歩 杉岡正高 金塚敏次	メタノール分解反応に対する MoS ₂ 触媒の前処理の影響	日本化学会北海道支部1987年冬季研究発表会	1987. 2. 6
土門稔 杉岡正高 金塚敏次	ウルトラマリン(群青)を触媒とするメタノールの分解反応	日本化学会北海道支部1987年冬季研究発表会	1987. 2. 6
広川真夫 上道芳真 杉岡敏次	活性炭触媒による芳香族炭化水素の反応	日本化学会北海道支部1987年冬季研究発表会	1987. 2. 6
土門稔 杉岡正高 金塚敏次	ウルトラマリン触媒による 2-プロパノールの分解反応	日本化学会北海道支部夏季研究発表会	1987. 7. 24
小谷誠裕 杉岡正高 金塚敏次	管理図法による化学工程管理(第14報) モンテカルロ法による管理状態の判定について	日本化学会北海道支部夏季研究発表会	1987. 7. 24

杉岡正敏	モリブデンオキシサルファイドの触媒作用 — MoS ₂ の酸化処理効果と酸性発現機構 —	触媒学会小討論会 “硫黄が関与する触媒反応”	1987. 9 . 18
杉長岡正賢 金塚高敏 次	シクロヘキサン脱水素反応に対する MoO ₃ / Al ₂ O ₃ 触媒の硫化処理効果	第17回石油化学討論 会	1987.10.17
鎌田弘毅 武野新信 高野一 竹昇	NAD ⁺ モデル化合物の電解環元反応	日本化学会北海道支 部1988年冬季研究発 表会	1988. 2 . 6
伊藤誠志 武藤新信 高野一 竹昇	電解環元によるアゾベンゼン類の塩基性中間 体の生成と有機合成への応用	日本化学会北海道支 部1988年冬季研究発 表会	1988. 2 . 6
松原洋一 武野新信 高野一 竹昇	イソクマリン類の加水分解反応	日本化学会北海道支 部1988年冬季研究発 表会	1988. 2 . 6
高橋洋志 小内英隆 竹男	マスフローホッパ内の粒子群の速度不連続性 とその特性線解析	化学工学論文集	13, (3) 340 (1987)
高橋洋志 小内英隆 竹男	ファンネルフローホッパを流れる粒子群の速度 場の発達過程	化学工学論文集	13, (3) 379 (1987)
高橋洋志	自然発火を起さない石炭堆積物の限界サイズ に関するシュミレーション	日本学術振興会石炭 利用技術第148委員 会第16回研究会資料	1987. 7 . 16
高橋洋志 竹内隆志 田中達夫 (北海道大学)	自然発火を起さない石炭堆積物の限界サイズ に関するシュミレーション	化学工学協会北海道 大会	1987. 7 . 27
H. TAKAHASHI T. TAKEUCHI	Velocity Discontinuity in Gravity Flow of Granular Materials in Hoppers	The paper for 9 th International Cong- ress of Chemical Engineering, Chem- ical Equipment De- sign and Automation (Praha)	H 7, 588 (1987), September 1
高橋洋志 林哲夫 竹内隆正 九島行正 (新日鉄)	高炉型移動層における粒子フローバタンと壁 面応力分布の解析	化学工学協会第20回 秋季大会	SB 101 (1987), 10月9日
高橋洋志 竹内隆志	直交流式移動層における粒子と流体の挙動	化学工学協会第20回 秋季大会	SB 102 (1987), 10月9日
高橋洋志	化学工学シンポジウムシリーズ15 移動層技術の現状と新展開 — 移動層の粒子 流動	化学工学協会, 移動 層の装置設計に関す る研究会編	1987. 2 . 25 発行 p. 8 - 15
高安橋洋志 竹内隆志 前河浦典 (北開試)	環状路型流通式石炭懸濁気泡塔におけるガス ホールドアップ	化学工学論文集	14, (2)256 (1988)

八小秋安	幡松吉藤	壽藤公	雄男亮二	二段タービン翼攪拌槽内の翼の混合領域に及ぼす隣接翼の影響	化学工学論文集	13(5), 691-693 (1987)
安秋向小	藤吉田井端	公健英	二亮二二	乳化型液体膜によるクロムの抽出(Ⅱ) — エマルションの平均液滴径 —	工業用水	(348), 17-21 (1987)
小高秋安渡	端橋吉藤	英洋公治	二志亮二夫	空塔速度と液流動層の層高間圧力損失に基づく粒径分布の測定法	化学工学論文集	14(1), 103-106 (1988)
安中小秋杉	藤村端吉田	公英治	二充二亮八郎	硫酸カリウムの二次核発生速度	化学工学協会北海道大会	1987. 7. 28
小岩安	端谷藤	英道公	二代二二	単一粒子の溶解にともなう形状変化のシュミレーション	化学工学協会北海道大会	1987. 7. 27

開 発 工 学 科

後佐川	藤島(日特建設)	龍干聖	彦城司	2, 3 の岩石に対する間隙ガス圧試験について	昭和62年度日本鉱業会春季大会	1987. 4. 2
藤佐	井藤	義一	明彦	採炭切羽周辺岩盤の AE 挙動について	昭和62年度日本鉱業会春季大会	1987. 4. 3
佐後藤南	藤井部(大成建設)	干龍義泰	城彦明生	長壁式切羽周辺の応力分布 — 地層模型試験と数値解析結果について —	昭和62年度日本鉱業会北海道支部春季講演会	1987. 6. 18
後藤佐八	藤井藤島(旭川市役所)	龍義干	彦明城剛	炭層ボーリングに関する実験的研究	昭和62年度日本鉱業会北海道支部春季講演会	1987. 6. 18
後藤佐細	藤井藤貝(本学大学院)	龍義干貴	彦明城生	ロゼットジャッキによる地圧変化計測の可能性について	昭和62年度日本鉱業会北海道支部春季講演会	1987. 6. 18
後佐	藤藤	龍干	彦城	岩石の変化に伴う間隙水量変化の計測 — 封圧下における岩石の力学的性質に関する実験的研究 —	日本鉱業会誌	Vol. 103, No. 1194, pp. 485- 491, 1987
Sato, K. and Fujii, Y.				Seismicity Associated with a Large Scale Gas Outburst	Fred Leighton Memorial Workshop on Mining Induced Seismicity at Queen Elizabeth Hotel	August 30, 1987

Ishijima, Y. (北海道大学) Fujii, Y. and Sato, K.	Microseismicity Induced by Deep Coal Mining Activity	6 th. ISRM International Congress	September 3, 1987
藤井 義明 佐藤 龍彦 後南 泰生 (大成建設)	長壁式切羽周辺の地圧変化挙動 — 地層模型試験と数値解析の比較 —	昭和62年度資源・素 材関係学協会合同秋 期大会分科研究会	1987. 9 .21
後藤 龍彦 佐藤 干義 藤井 義明	石炭の破壊挙動に関する実験的考察	昭和62年度資源・素 材関係学協会合同秋 期大会分科研究会	1987. 9 .21
石島 洋二 藤井 義明 (北海道大学)	三次元変位くい違い法 — その原理と板状介在物ならびに近接累層 問題への応用 —	日本鉱業会誌	Vol. 103, No. 1198, pp. 835- 840, 1987
後藤 龍彦 佐藤 干義 藤井 義明 吉藤 龍彦	石炭の突出型破壊に関する実験的研究	日本鉱業会誌	Vol. 104, No. 1199, pp. 17-22, 1988
細貝 貴生 後藤 龍彦 藤井 義明 佐藤 干義 (本学大学院)	ロゼットジャッキによる地圧変化計測の可能 性について	開発技報	第30号, pp. 28-31, 1988
後藤 典俊 河武 藤英 小宮山 章明	高密度震度調査の実施 — 1985年10月4日茨城県南部の地震 —	地震学会	1987. 4 .10
後藤 典俊 小宮山 章明 河武 藤英	関東地方のやや深い地下構造とアンケートに よる高密度震度分布の関係について	物理探査学会学術講 演会講演論文集	76, 18-19 (1987)
鏡味 洋史 岡田 成幸 後藤 典俊 (北海道大学)	1987年1月9日岩手県沿岸部の地震のアン ケートによる震度分布	地震学会	1987.10. 7
太田 裕 後藤 典俊 石原 享 (マークランド株)	地震防災対策支援即時情報システム(1) — 基本構想 —	地震学会	1987.10. 7
後藤 典俊 太田 裕 石原 享 (北海道大学)	地震防災対策支援即時情報システム(2) — プロトタイプの実現 —	地震学会	1987.10. 7
河内 邦夫 後藤 智弘 鈴木 義幸 平塚 幸二 浅井 章	登別市海岸平野の地盤特性(1) — 登別市若草町周辺の軟弱地盤の例 —	土質工学会北海道支 部技術報告集	28, 181-190 (1988)

板倉賢一 佐藤一彦	炭鉱坑内でのボーリング・トルク検層試験について	日本鉱業会昭和61年度春季大会	1986. 4. 3
板倉賢一 佐藤一彦	岩石の巨視的破壊に先行する AE エネルギー分布と局所ひずみの挙動について	日本鉱業会昭和61年度春季大会	1986. 4. 4
佐藤一彦 板倉賢一 中垣薫	採炭切羽周辺岩盤の破壊挙動について	日本鉱業会昭和61年度春季大会	1986. 4. 4
佐藤一彦 板倉賢一	採炭に伴う岩盤破壊挙動の計測	第7回保安計測シンポジウム	1986. 7. 17
佐藤一彦 板倉賢一 井達哉	微小地震の P 波初動の自動検出	日本非破壊検査協会006特別委員会資料	(79)16-20 (1986)
板倉賢一 佐藤一彦	岩石の巨視的破壊に先行する AE の特徴	日本非破壊検査協会006特別委員会資料	(79)71-75 (1986)
佐藤一彦 板倉賢一	採掘域で発生する微小地震の震源過程	日本鉱業会誌	102, (1183) 561-566 (1986)
Tatsuhiko GOTO Tateki SATO Kazuhiko SATO Takashi TAKASAKI (太平洋炭鉱)	Liner Tailgate System in Mechanized Long-wall Mining	International Symposium on Modern Coal Mining Technology, at Fouhsin	1986. 9. 15
Kenichi ITAKURA Kazuhiko SATO	Clustering and Migration of AE prior to Main Faulting	Progress in Acoustic Emission	3, 318-325 (1986)
Kazuhiko SATO	Stability of Underground Productive Excavation	Workshop on Acoustic Emission and Rock Fracture Mechanics	1986.10.29
佐藤一彦 板倉賢一	線形ひずみ軟化特性を有する岩盤の構成方程式と円孔の軸対称問題	日本鉱業会誌	102, (1185) 763-768 (1986)
佐藤一彦 板倉賢一 谷智幸 (ダイヤコンサルタント) 中垣薫	採掘跡天盤の崩落, 沈下に関する模型実験	日本鉱業会誌	103, (1187) 17-22 (1987)
藤井義明 佐藤一彦	採炭切羽周辺岩盤の AE 挙動について	日本鉱業会昭和62年度春季大会	1987. 4. 3
長井達哉 佐藤一彦	山鳴りの自動震源標定について	日本鉱業会昭和62年度春季大会	1987. 4. 3
佐藤一彦 板倉賢一 山直一	貫層ボーリングにおけるトルク検層について	日本鉱業会北海道支部昭和62年度春季講演会	1987. 6. 18
佐藤一彦 板倉賢一 山直一	PDC ビットを用いたボーリングにおける掘削能率について	日本鉱業会北海道支部昭和62年度春季講演会	1987. 6. 18

板倉賢一 佐藤一彦	2組の3成分 AE センサによる震源標定法について	日本鉱業会北海道支部昭和62年度春季講演会	1987.6.18
佐藤一彦	地下掘削に伴う地圧現象について	北海道炭鉱技術会保安技術交流会	1987.8.28
Kazuhiko SATO Yoshiaki FUJII	Seismicity Associated with a Large-scale Gas Outburst	Fred Leighton Memorial Workshop on Mining Induced Seismicity, at Montreal	1987.8.30
Yoji ISHJIMA (北海道大学) Yoshiaki FUJII Kazuhiko SATO	Microseismicity Induced by Deep Coal Mining Activity	Proceedings of the ISRM 6th International congress on Rock Mechanics	II-4, 987-990 (1987)
佐藤一彦 長井達哉	山鳴りの自動震源標定システムについて	資源・素材 '87 (札幌) 分科研究会資料	0-6, 17-20 (1987)
板倉賢一 佐藤一彦	岩石の最終破断に先行する AE 挙動について	第7回岩の力学国内シンポジウム	1987.12.7
佐藤一彦 板倉賢一	AE 法による山はねの局所的予知に関する研究	昭和62年度科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書	1988.3
吉田豊彦 佐藤龍干 藤山純 西昭 (光明理化学) 昭 (北大応電研)	レーザー音響効果を用いたガスの定量化に関する研究	日本鉱業会昭和62年度春季全国大会	1987.4.1 1205
吉田豊彦 佐藤龍干 藤山純 西昭 (北大応電研)	CO ₂ レーザーによるエチレンガス測定に関する基礎的研究	日本鉱業会道支部昭和62年度春季講演会	1987.6.12 B-15
吉田豊彦 西昭 (北大応電研)	光波減衰理論による液中懸濁粒子の質量濃度と粒径分布の同時計測について	日本鉱業会道支部昭和62年度春季講演会	1987.6.12 B-16
王受路 (中国株州) 吉田豊彦 徳田昭八郎	石炭のボールミル粉碎における粉碎挙動についての考察	日本鉱業会道支部昭和62年度春季講演会	1987.6.12 B-17
吉田豊彦 恒川昌昭 西重教 (北大応電研) 昭 木下重教 (北大)	レーザーを利用した液中懸濁粒子の質量濃度と粒径分布の同時計測について	第25回粒体に関する討論会	1987.9.26 No. 55 p. 215-218
吉田豊彦	レーザー利用の粒度測定技術	粒体工学・北海道セミナー	1987.11.4
吉田豊彦 大徳森田昭八郎	河川水および海水中懸濁粒子のレーザー光減衰特性について	開発技術研究会研究発表会	1987.11.20

吉 田 豊 笠 井 樹 後 藤 彦 徳 田 昭 佐 藤 干 八 城	エチレンガスの光音響計測システムについて	開発技術研究会研究 発表会	1987.11.20
恒 川 昌 美 吉 田 (北大) 高 森 隆 豊 勝 (北大)	振動ボールミル粉碎における被粉碎粒子の挙動に関する実験的研究	粉体工学会誌	25,(2),88-93(1988)
大 森 稔 吉 田 昭 徳 田 八 郎	河川水および海水中懸濁粒子のレーザ光減衰特性計測に関する理論的考察	開発技報	1988. 3 No. 30 p. 15-19
平 沼 雅 英 吉 田 俊 豊 笠 井 龍 樹 後 藤 干 彦 徳 田 昭 八 郎 城	CO ₂ レーザを用いたエチレンガス濃度計測システムについて	開発技報	1988. 3 No. 30 p. 24-27

土木工学科

杉 本 博 之 吉 岡 修 治 (横河橋梁) 菅 田 紀 之	板厚を離散変数とする格子構造物の最小重量設計について	構造工学における数値解析法シンポジウム	第11巻 117-182 (1987)
Yutaka MIYAMOTO (岩手大学) Hiroyuki SUGIMOTO Shoji IWASAKI (岩手大学)	On Shape Optimization Study of 2-Dimensional Elastic Bodies by BEM	Inter. Conf. on Modelling and Distributed Parameter Systems	(1987)
Hiroyuiki SUGIMOTO Yasuo KAJIKAWA (金沢大学)	On Minimum Weight Design of Pedestrian Bridges Taking Vibration Serviceability into Consideration	Proc. of the Japan Society of Civil Engineers	No.386 / I-8, 105-133 (1987)
杉 本 博 之	板厚を離散変数とするトラス構造物の最小重量設計について	土木学会第42回年次学術講演会講演概要集	1987. 9
Kouhei FURUKAWA (山口大学) Hiroyuki SUGIMOTO Taku EGUSA (三菱重工) Kouiti INOUE (三菱重工) Yoshikazu YAMADA (京都大学)	Studies on Optimization of Cable Prestressing for Cable-Stayed Bridges	Inter. Conf. on Cable-Stayed Bridges	723-734 (1987)
杉 本 博 之	板厚を離散変数とするトラス構造物の最小重量設計に関する研究	室蘭工業大学研究報告(理工編)	No.37, 183-198(1987)

杉山 博之 (新日本製鐵)	数理最適設計における初期処理に関する研究	土木学会北海道支部 論文報告集	No.44, 171- 176 (1988)
杉 本 博 之	長支間歩道橋の振動使用性設計規準に関する研究	構造工学論文集	Vol.34 A, 739-749 (1988)
菅 田 紀 之 杉 本 博 之	直線テーバ付部材を含む平面骨組構造物の近似解析法と最小重量設計	土木学会第42回年次 学術講演会講演概要 集 第1部	1987. 9
菅 田 紀 之 尾 崎 一 詔	論理型言語 PROLOG の RC 橋設計への応用	土木学会北海道支部 論文報告集	第44号 1988. 2
尾 崎 一 詔 菅 渡 紀 洋	シリカフェームを用いたコンクリートの水中疲労について	コンクリート工学年 次論文報告集	第9巻第1号 1987. 6
渡 尾 洋 一 菅 田 紀 之	シリカフェームを用いたコンクリートの水中疲労強度について	土木学会第42回年次 学術講演会講演概要 集 第V部	1987. 9
Sinobu OZAKI Noriyuki SUGATA Yoichi WATANABE	Fatigue of Silica Fume Concrete under Submerged Condition	Transactions of the Japan Concrete In- stitute	Vol. 9 1987.12
渡 尾 洋 一 菅 田 紀 之	水中におけるコンクリートの曲げ疲労強度に関する研究	土木学会北海道支部 論文報告集	第44号 1988. 2
細 川 潮 詔 尾 崎 紀 之	真空処理を施したコンクリートに関する研究	土木学会北海道支部 論文報告集	第44号 1988. 2
榎 谷 有 三 育 藤 和 夫	道路交通容量から見た土地利用活動の立地分析	交通工学, 第22巻, 第 4号	第22号, 第4 号, pp. 9 - 20, 1987.7
育 藤 和 夫 榎 谷 有 三	港湾都市における市民の港に対する意識構造分析	北海道都市	第24号 1987. 8
志 水 義 彦 阿 藤 幸 和 夫	車両単独事故の解析と死亡確率の推定モデル	土木学会第42回年講	第 4 部, pp. 42-43 1987. 9
小 林 英 一 育 藤 和 夫	アイマークレコーダーによる運転者の視点解析	土木学会第42回年講	第4部, pp.438-439 1987. 9
育 藤 和 夫 阿 藤 幸 和 夫	道路区間の機能特性評価方法に関する研究	土木計画学研究講演 集	No. 10, pp.199-205 1987.11
育 藤 和 夫 志 水 義 彦	路側構造物衝突事故の解析と死亡確率推定モデルに関する研究	土木計画学研究講演 集	No. 10, pp.561-568 1987.11

梶谷有三 (苫高専) 斉藤和夫 加藤俊 来照俊 (北大)	フロー特性と道路網容量の関係について	土木計画学研究講演集	No. 10, pp.391-398 1987.11
J.F. Morral C.J. Hoban (斉藤和夫訳)	追越車線の設計指針(翻訳)	高速道路と自動車	第30巻第11 号, pp.70- 82, 1987.10
斉藤和夫 小林英一 小椋有三 谷有(苫高専)	運転者の視点分布に関する研究	土木学会北海道支部 論文報告集	第44号, pp.457-460 1988. 2
斉藤和夫 山廣孝之 阿部幸夫	道路区間の機能特性と類型化に関する研究	土木学会北海道支部 論文報告集	第44号, pp.483-488 1988. 2
梶谷有三 (苫高専) 斉藤和夫	LP問題のT-領域の立地配分問題への応用	土木学会北海道支部 論文報告集	第44号, pp.479-482 1988. 2
斉藤和夫	積雪地域都市部における冬期交通に起因する 環境要因の影響評価	文科研重点領域N3 「都市圏の環境計画 の体系化」シンポジ ウム	1988. 2
Kazuo SAITO J.J. Henry (Penn State Univ.)	Development of the Relationships Between Skid Resistance and Pavement Surface Tex- ture	室蘭工業大学研究報 告(理工編)	第37号, pp.293-305 Nov. 1987
N. Kishi S. Nomachi K. Matsuoka T. Kida	Natural Frequency of a Fill Dam by Means of Two Dimensional Truncated Wedge Taking Shear and Bending Moment Effects into Account	Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers	No.386 /I- 8, 1987.10
N. Kishi W.F. Chen K.G. Matsuoka S.G. Nomachi	Moment-Rotation of Top-and Seat-Angle with Double Web-Angle Connections	Proceeings of Inter- national Workshop on Connections and Strength of Steel Structures	1987.10
N. Kishi W.F. Chen K.G. Matsuoka S.G. Nomachi	Moment-Rotation Relation of Single/Double Web-Angle Connections	Proceeings of Inter- national Workshop on Connections and Strength of Steel Structures	1987.10
松岡健一 岸徳光 吉田紘一 (北海道開発局) 能町純雄 (日本大学)	斜め入射せん断波を受ける埋設管の過渡的応 答解析	構造工学論文集	Vol.34A, 1988. 3
岸徳光 吉田紘一 (北海道開発局) 松岡健一 能町純雄 (日本大学)	層状弾性体にモデル化した覆工敷砂部の衝撃 応答解析	構造工学論文集	Vol.34A, 1988. 3

澤田知之 (苫小牧高専)	二宮正明 (広島工大)	岡健純 (日本大学)	松能	フーリエ定和分変換を用いた鋼管矢板円筒形 構造物の解析	構造工学論文集	Vol.34A, 1988. 3
三上敬司 (専修短大)	吉田紘一 (北海道開発局)	岡健純 (日本大学)	松能	低速度衝撃力によるコンクリート床版の動的 応答	構造工学論文集	Vol.34A, 1988. 3
松岡健一 (開発局)	沼秀蘭 (室蘭開建)	針憲司 (株)メイセイ エンジニアリング)	松能	鋼管矢板人工島の動的解析	土木学会北海道支部 論文報告集	No. 44, 1988. 2
岸松能	岡健純 (日本大学)	野博 (電力中研)	高	完全弾塑性型緩衝材付円柱体の落下衝撃挙動	土木学会北海道支部 論文報告集	No. 44, 1988. 2
伊藤久光 (Purdue 大学)	藤和徳 (Purdue 大学)	岡健純 (日本大学)	W.F. Chen 松能	鋼梁一柱の接合部剛性評価に関する実験結果 の集積	土木学会北海道支部 論文報告集	No. 44, 1988. 2
磯田正勝 (日本大学)	岡健純 (日本大学)	田知之 (苫小牧高専)	磯松能 澤	大型円形鋼管矢板構造の力学的挙動	土木学会北海道支部 論文報告集	No. 44, 1988. 2
永沢親兼 (北海道電力(株))	沢村哲光 (北海道電力(株))	岡健純 (日本大学)	永西 岸松能	静水圧を受け矩形状谷に位置するフィルタイ プダムの応力解析	土木学会北海道支部 論文報告集	No. 44, 1988. 2
天岸沼宇雄 (日本大学)	松岡徳光 (日本大学)	岡健純 (日本大学)	天岸松能	有限プリズム法による RC 部材の位相速度分 散曲線	土木学会北海道支部 論文報告集	No. 44, 1988. 2

竹松岸能吉 (北海道開発局)	内岡健徳純一 (日本大学)	徹光雄	二層同心円柱の波動伝播問題における接触面の影響	土木学会北海道支部 論文報告集	No. 44, 1988. 2	
大澤松能	島田知高専 (北海道)	俊之雄	中詰の掘削を考慮した鋼管矢板構造の安定解析	土木学会北海道支部 論文報告集	No. 44, 1988. 2	
三能吉松	上岡健一 (専修道短大)	敬純雄	コンクリート床版の動的応答について	土木学会北海道支部 論文報告集	No. 44, 1988. 2	
松岸能	岡健徳純一 (日本大学)	一光雄	入射弾性波を受ける埋設管の動的応答解析	土木学会第42回年次 学術講演会講演概要 集 第1部	1987. 9	
岸松能吉	岡健徳純一 (日本大学)	光一雄	サンドクッション材を伝わる弾性波特性	土木学会第42回年次 学術講演会講演概要 集 第1部	1987. 9	
三能吉松	上岡健一 (専修道短大)	敬純雄				
伊岸能松	藤岡健一 (日本大学)	和徳純一	久光雄	ウェブアングル付き上下フランジアングル接合の $M-\theta_r$ 曲線の評価式	土木学会第42回年次 学術講演会講演概要 集 第1部	1987. 9
三能吉松	上岡健一 (専修道短大)	敬純雄	コンクリート床版へのソフト衝撃力に関する評価	土木学会第42回年次 学術講演会講演概要 集 第1部	1987. 9	
大松岸能小	沼秀次 (開発局室蘭開建)	岡健徳純一	円形に配置された鋼管矢板の継手剛性の評価	土木学会第42回年次 学術講演会講演概要 集 第1部	1987. 9	
	針憲司 (株)メイセイエ ンジアリング)					

尾崎晃 (北海道工業大学) 八功 (北海道大学) 村木義男 (北海道工業大学) 近藤倭郎 佐伯浩 (北海道大学)	概説 海岸工学	森北出版	1987. 6
児近 玉藤 幸博 藤 倭 郎	水室付き突出孔型透水壁堤の反射率	第42回土木学会年次 学術講演会概要集 2	1987. 9 536-537
近平 藤田 倭郎 田 佳 嗣	一点繫留された海潮流発電用潜水体の水理特性	第42回土木学会年次 学術講演会概要集 2	1987.11 608-609
倉近藤 内藤 公嘉 藤 間 倭 郎 聡	水室付き直立透水層堤の反射率推定理論に関する線形化抵抗係数について	第34回土木学会海岸 工学論文集	1987.11 467-471
近谷藤 藤野 倭郎 渡部 賢 二 松田 敏富 治 土奥 康彦 彦 手田 康海	室蘭工業大学における波浪エネルギー利用研究(1976-1986)の総括	室蘭工大研究報告 (理工編)	(37) 251-265 1987.11
児近 玉藤 幸博 藤 倭 郎	半円管列の消波性能について	土木学会北海道支部 論文報告集	(44)207- 210 1988.2
平近 田佳 嗣 藤 倭 郎 A. Mendes	海・潮流発電用潜水体に作用する波力特性	土木学会北海道支部 論文報告集	(44)215- 218 1988.2
谷近藤 野藤 賢二 渡 部 敏富 治	沿岸固定方式による波浪エネルギー吸収量の推定法	第2回波浪エネルギー 利用シンポジウム 論文集	67-72 1987. 6
浦島三朗 (苫小牧高専) 近藤 倭 郎	スリットの壁波力係数に関する基礎的実検	土木学会北海道支部 論文報告集	(44)211- 214 1988.2
建築工学科・図学			
荒賀川 卓 荒井 明 溝口 康幸 光 幸男	らせん鉄筋補強コンクリート柱の終局せん断強度について	日本コンクリート協 会コンクリート工学 年次論文報告集	Vol.9, No.2 1987.7 p. 229-304
Takashi ARAKAWA Ming-Xuan HE Yasuyuki ARAI Mitsuo MIZOGUCHI	Ultimate Shear Strength of Spirally-Confined Concrete Columns	Transaction of the Japan Concrete In- stitute	Vol. 9, 1987, p. 305-312
五十石 浩 (建設省建築研究所) 小竹 龍一 溝口 光男 荒井 康幸 荒川 卓	高強度太径異形鉄筋を用いた RC 梁の曲げ性状について	日本建築学会大会学 術講演梗概集(近畿) C 構造 II	1987.10 p. 65-66

荒 荒 溝 近 早	井 川 口 藤 川	康 光 智 幸	幸 卓 男 則 孝	鉄筋コンクリート耐震壁の曲げせん断実験 (その1. 破壊状況と荷重—変形曲線)	日本建築学会大会学 術講演梗概集(近畿) C構造Ⅱ	1987.10 p. 409-410
荒 荒 溝 近 早	井 川 口 藤 川	康 光 智 幸	幸 卓 男 則 孝	鉄筋コンクリート耐震壁の曲げせん断実験 (その2. 各種強度と変形性状)	日本建築学会大会学 術講演梗概集(近畿) C構造Ⅱ	1987.10 p. 411-412
荒 賀 荒 溝 小	川 井 口 竹	明 康 光 籠	卓 玄 幸 男	らせん鉄筋補強コンクリート柱の終局剪断強 度について (その1. 実験概要と破壊状況)	日本建築学会大会学 術講演梗概集(近畿) C構造Ⅱ	1987.10 p. 491-492
荒 賀 荒 溝 小	川 井 口 竹	明 康 光 籠	卓 玄 幸 男	らせん鉄筋補強コンクリート柱の終局剪断強 度について (その2. 諸強度)	日本建築学会大会学 術講演梗概集(近畿) C構造Ⅱ	1987.10 p. 493-494
溝 荒 荒 山 小	口 井 川 口 坂	光 康 淳 英	男 幸 卓 也 之	鉄筋コンクリート造有壁立体骨組のオンライ ン捩れ応答実験 (その1. 亀裂状況および層剪断力と重心変 位の関係)	日本建築学会大会学 術講演梗概集(近畿) C構造Ⅱ	1987.10 p. 687-688
溝 荒 荒 山 小	口 井 川 口 坂	光 康 淳 英	男 幸 卓 也 之	鉄筋コンクリート造有壁立体骨組のオンライ ン捩れ応答実験 (その2. 時刻歴応答と最大応答実験値)	日本建築学会大会学 術講演梗概集(近畿) C構造Ⅱ	1987.10 p. 689-690
溝 山 荒 荒	口 井 川	光 淳 康	男 也 幸 卓	鉄筋コンクリート造立体骨組のねじれ応答に ついて (柱の二軸曲げ部材モデルの違いによる検討)	日本建築学会北海 道 支 部 研 究 報 告 集 構 造 系 No.61	1988. 3. p. 53-56
小 溝 荒 荒 小	竹 口 井 川 原	龍 光 康	一 男 幸 卓 将	高強度太径異形鉄筋を用いたRC梁の曲げ性 状について (その2. 追加実験結果)	日本建築学会北海 道 支 部 研 究 報 告 集 構 造 系 No.61	1988. 3. p. 113-116
荒 荒 溝 近 早 大	井 川 口 藤 川 高	康 光 智 幸 重	幸 卓 男 則 孝 信	曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート耐震 壁の耐力と変形性状 (その1. 実験概要, 破壊性状, 荷重変形関 係, 亀裂発生荷重)	日本建築学会北海 道 支 部 研 究 報 告 集 構 造 系 No.61	1988. 3. p. 125-128
荒 荒 溝 近 早 大	井 川 口 藤 川 高	康 光 智 幸 重	幸 卓 男 則 孝 信	曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート耐震 壁の耐力と変形性状 (その2. 終局耐力と変形性状)	日本建築学会北海 道 支 部 研 究 報 告 集 構 造 系 No.61	1988. 3. p. 129-132
泉		清	人	ヨーロッパ共同体の衝撃音研究	音響技術	1986. 9
Kiyoto IZUMI				On the measurement of annoyance in the laboratory—5 case studies to validate the simulated environment method	日本音響学会 騒音研究会	1986.10

泉 滴 細	草 谷	清 久 俊	人 人 人	自動車と鉄道の複合騒音の不快感に関する実験(2)―騒音の不快感の評価に関する研究(36)	日本建築学会北海道支部研究報告集	1987. 3
泉 佐 工	藤 藤	清 蔵	人 人 人	自動車と鉄道の複合騒音に関する社会調査―室蘭地区(1)―騒音の不快感の評価に関する研究(37)	日本建築学会北海道支部研究報告集	1987. 3
Kiyoto IZUMI				Cross-cultural comparison of traffic noises in the simulated environment	Internoise '88 Proceedings	1988.10
Kiyoto IZUMI				Annoyance due to mixed source noises—A laboratory study and a field survey on the annoyance of road traffic and railroad noises	Japan/Swedish Symposium on Noise Effects Proceedings	1987.10
泉		清	人	ラウドネスのマスタースケールについて―聴覚・騒音合同研究会における Berglund, Berglund, and Lindvall の所論	日本音響学会誌	1987.10
Toshio SONE Kiyoto IZUMI et al.				Loudness and noisiness of a repeated impact sound: Results of round robin tests in Japan (Ⅱ)	Journal of Acoustical Society of Japan (E)	1987.11
泉		清	人	サウザンプトン大学における音響研究	日本音響学会誌	1987.11
矢 小 泉	野 林	朝 清	隆 人 人	繰り返し衝撃音の継続時間がやかましさに及ぼす影響	電子情報通信学会技術研究報告	1987.12
泉		清	人	デシベルのはなし	音響技術	1988. 3
泉 佐	藤	清 蔵	人 人	実験および調査による鉄道と自動車の複合騒音の評価に関する研究―騒音の不快感の評価に関する研究(38)	日本建築学会北海道支部研究報告集	1988. 3
泉 細 竹	谷 下	清 俊	人 人 人	実験および調査による鉄道と自動車の複合騒音の評価に関する研究―騒音の不快感の評価に関する研究(39)	日本建築学会北海道支部研究報告集	1988. 3
窪 石 位 石	田 谷 下 尾	英 裕 和	樹 二 功 央	手指の温感に着目した暖房室温の評価	日本建築学会論文集	No. 384, p. 12-19, 1988. 2
窪	田	英	樹	人工気候における快と不快そして雰囲気	日本建築学会北海道支部研究報告集	No. 61, p. 29-32 1988. 3 .26
窪 岸 安	田 下 田	英 浩 吉	樹 治 孝	チセの温熱環境	空気調和・衛生工学第22回学術講演会論文集	p. 43-46 1988. 3 .24
窪 鎌 鈴	田 田 木	英 紀 大	樹 彦 隆	室温変動解析における集中定数近似(続報)	空気調和・衛生工学第22回学術講演会論文集	p. 51-54 1988. 3 .24
窪 岸 安	田 下 田	英 浩 吉	樹 治 孝	暖房室温の過渡的评价	空気調和・衛生工学第22回学術講演会論文集	p. 55-56 1988. 3 .24
窪 川 武 奈	田 岡 田 良	英 真 収 禎	樹 之 司 己	室内微弱気流の爽涼感効果	空気調和・衛生工学第22回学術講演会論文集	p. 61-64 1988. 3 .24

窪川武奈	田岡田良	英真収禎	樹之司己	自然対流域におけるグローブ温度計の対流熱伝達率	空気調和・衛生工学第22回学術講演会論文集	p. 67-68 1988. 3. 24
内土大	田屋築	哲和	也勉夫	施工進展を考慮した有限要素法による建築構造物の沈下過程解析	日本建築学会大会学術講演梗概集 B 構造 I	1986. 8
鈴土大	木屋築	和	宏勉夫	軟弱地盤に支持された建築構造物の即時沈下および終局沈下の解析	日本建築学会大会学術講演梗概集 B 構造 I	1986. 8
土大	屋築	和	勉夫	ネガティブフリクションを受ける建築構造物の沈下過程解析(支持層の起伏の影響)	日本建築学会大会学術講演梗概集 B 構造 I	1986. 8
吉大土	田築屋	光和	徳夫勉	鉛直荷重を受ける7本杭支持独立フーチングの有限要素法解析(解析結果に基づく板底面の引張主応力度の推定式について)	日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 II	1986. 8
北大土	沢築屋	美和	穂夫勉	鉛直荷重を受ける4本杭支持独立フーチングの有限要素法解析(その1. 板底面の引張主応力度について)	日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 II	1986. 8
大土橋	築屋本	和	夫勉論	鉛直荷重を受ける4本杭支持独立フーチングの有限要素法解析(その2. 引張主応力度に基づく亀裂荷重について)	日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 II	1986. 8
土屋	屋		勉	ネガティブフリクションを受ける建築構造物の三次元有限要素法解析	室蘭工業大学研究報告理工編第36号	1986. 11
橋大土加	本築屋藤	和	諭夫勉聡	水平荷重を受ける腰壁・垂壁付き柱の有限要素法解析(その1. 両側壁付柱の場合)	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 60	1987. 3
橋大土	本築屋	和	諭夫勉	水平荷重を受ける腰壁・垂壁付き柱の有限要素法解析(その2. 片側壁付柱の場合)	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 60	1987. 3
北大土熊	沢築屋谷	美和光	穂夫勉祐	偏心荷重を受ける4本杭支持独立フーチングの有限要素法解析	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 60	1987. 3
神土鈴大	田屋木築	道	和	建築構造物の沈下過程におよぼす隣棟間隔の影響	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 60	1987. 3
鈴土神大	木屋田築	道	和	摩擦杭基礎で支持される建物の相対沈下算定における軟弱地盤の有効層厚	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 60	1987. 3
土鈴大	屋木築	和	勉夫	軟弱地盤に支持された建築構造物の沈下過程に関する実用算定法	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 60	1987. 3
内小土斉	山幡屋藤	久	学守勉和	軟弱地盤における RC 建物の沈下過程解析	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 60	1987. 3

土大小	屋築幡	和	勉夫守	建築構造物の施工進展を考慮した沈下過程解析(軟弱地盤における建築構造物の即時沈下および圧密沈下の三次元有限要素法解析その2)	日本建築学会構造系論文報告集第376号	1987.6	
土大小	屋築幡	和	勉夫守	軟弱地盤に支持された建築構造物の沈下過程に関する実用算定法	日本建築学会構造系論文報告集第383号	1988.1	
土鈴大	屋木築	和	勉宏夫	軟弱地盤に支持されたRC骨組構造物の沈下過程に関する実用算定法	日本建築学会大会学術講演梗概集	1987.10	
神土鈴大	田屋木築	道	宏勉宏夫	建物の相対沈下算定における軟弱地盤の有効層厚	日本建築学会大会学術講演梗概集	1987.10	
北大土	沢築屋	美和	穂夫勉	偏心荷重を受ける4本杭支持独立フーチングの有限要素法解析	日本建築学会大会学術講演梗概集	1987.10	
大橋土	築本屋	和	夫諭勉	腰壁・垂壁付き柱の有限要素法解析	日本建築学会大会学術講演梗概集	1987.10	
土神大	屋田築	道	和	勉宏夫	軟弱地盤に支持された建築構造物の沈下過程に関する実用算定法(その2. 有壁骨組構造物の場合)	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 61	1988.3
岸土大河	田屋築野	和	達	了勉夫也	ネガティブフリクションを受ける建築構造物の沈下過程解析(その3. 地下水位低下速度および上部構造層数の影響)	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 61	1988.3
北大土花	沢築屋輪	美和	智恵子	穂夫勉子	柱脚モーメントを受ける4本杭支持独立フーチングの有限要素法解析(亀裂荷重およびパンチング耐力について)	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 61	1988.3
土	屋		勉		長尺摩擦杭で支持されたRC壁式構造物の沈下過程解析	第32回土質工学シンポジウム発表論文集	1987.11
後橋高宮	藤田木野村	知	以獎也治彦	雅伸克	日本各地の月別平均気温の推定式	日本建築学会北海道支部研究報告集構造系 No. 61	1988.3
入江	正	之			19世紀末のCataloniaの建築思潮— Antoni Gaudiの建築思想Ⅶ —	昭和62年度学術研究発表会講演梗概集(日本建築学会)	1987.9
入江	正	之			建築における〈内〉と〈外〉に関する空間論的考察— 建築空間論研究Ⅰ —	日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 61	1988.3
入江	正	之			Catalonia Renaixensaの建築家について— 19~20世紀初頭に亘るCatalonia建築思潮に関する研究—	日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 61	1988.3
サビエル・グエル著 入江正之訳					ガウディの世界	彰国社	1988.4

杉野目 井土野 橋由	章 智造	ある RC 事務所建築の全使用期間にわたる床たわみ障害に関する長期挙動性状調査	日本建築学会論文報告集 No. 376	1987. 6
土橋由 坂尻公 杉野目 日野倉 日松田 岡克	造也 章熙 智也	鉄筋コンクリート床組の終局撓みの一概算法について(その1 終局撓み算出のための基礎事項)	日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)	1987.10
日野正 土橋由 坂尻公 杉野目 松倉田 岡克	熙造也 章子也	鉄筋コンクリート床組の終局撓みの一概算法について(その2 実例計算)	日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)	1987.10
高橋弘 井野智 杉野目 川田孝 野之 目孝	之 智章 弘	床スラブの振動性状に及ぼす集中荷重の影響について(その1 長方形平板の場合)	日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)	1987.10
川田孝 井野之 杉野目 高橋弘	之 智章 弘	床スラブの振動性状に及ぼす集中荷重の影響について(その2 小梁付床スラブの場合)	日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)	1987.10
杉野目 井野達 駒込 杉野	章 智環	使用荷重下における鉄筋コンクリート梁の撓解析(その1 解析方法)	日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)	1987.10
駒込達 杉野目 井野	環 章智	使用荷重下における鉄筋コンクリート梁の撓解析(その2 解析結果及び考察)	日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)	1987.10
Akira SUGINOME Satoru INO Yoshizo DOBASHI		Predictive Calculation for Deflections of Reinforced Concrete Floor Slab Systems — Part 2 : Applcation of the Proposed Prediction System	Memoir of Muroran Institute of Technology No. 37 Vol. for Natural Science and Engineering	1987.12
井野智 井畑目 杉野田 内田 上鳥 長川	智夫 章司 生弘 之	基準課程 図学	単行本(教科書)	1988. 2
杉野目 井野正 伊藤修 野義 野司	章 智義 環義 司	使用荷重下における鉄筋コンクリート梁のたわみについて	日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 61	1988. 3
杉野目 井野正 駒込修 伊藤義 野義 野司	章 智環義 義司	使用荷重下における床スラブの長期たわみ解析	日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 61	1988. 3
高橋弘 井野智 杉野目	弘 智章	小梁付き床スラブの振動評価資料/特に高次振動について	日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 61	1988. 3

機械系 (機械工学科, 産業機械工学科, 第二部機械工学科)

臺丸谷 政 志 内 藤 正 鄰 谷 村 真 治 (大阪府立大) 佐々木 一 之	塑性衝突する丸棒の衝突時間(第2報, 構成式および衝突時間測定法の検討)	日本機械学会論文集 (A編)	53, (489) 970-974 (1987)
臺丸谷 政 志 内 藤 正 鄰	平板を伝播する熱弾性波の分散と減衰	日本機械学会論文集 (A編)	53, (489) 954-958 (1987)
臺丸谷 政 志 内 藤 正 鄰 谷 村 真 治 (大阪府立大) 千葉 正 師	縦衝撃を受ける有限長棒の動的挙動 (第1報, ひずみプラトー形成の条件)	日本機械学会論文集 (A編)	53, (489) 975-979 (1987)
劉 凱 欣 谷 村 真 治 (大阪府立大) 臺丸谷 政 志	縦衝撃を受ける円柱の動的挙動 (脆性材料の場合の衝撃破壊機構)	日本機械学会論文集 (A編)	53, (491) 1239-1245 (1987)
臺丸谷 政 志	連性熱弾性問題の検討	日本機械学会調査研究分科会 P-SC84報告集	(362), 26- 45(1987)
Masashi DAIMARUYA Masachika NAITOH	Dispersion and Energy Dissipation in a Thermoelastic Plate	Journal of Sound and Vibration	18, (1)511- 518(1987)
臺丸谷 政 志 内 藤 正 鄰 小野崎 秀	剛体壁に縦衝突する変断面棒の動的挙動	日本機械学会論文集 (A編)	53, (496) 2324-2330 (1987)
臺丸谷 政 志 内 藤 正 恒 浜 田 一 之 佐々木 一 之	弾塑性衝突する物体の衝突端応力変動	材料	36, (411) 1314-1319 (1987)
臺丸谷 政 志 内 藤 正 恒 浜 田 恒 平	応力棒による切欠き材の衝撃強度測定	日本材料強度学会誌	121, (1)105- 115(1988)
Masashi DAIMARUYA Masachika NAITOH Shinji TANIMURA (Univ. Osaka Prefecture)	Impact End Stress and Elastic Response of a Finite Length Bar with a Variable Cross Section Colliding with a Rigid Wall	Journal of Sound and Vibration	121, (1)105- 115(1988)
Hideaki YAMAGISHI Ryoji ISHIGURO (Hokkaido Univ.) Toshiaki Kumada (ibid) Yutaka HANAOKA	Heat transfer mechanism of open thermosyphon (1st report: Visual observation of flow pattern using water as a working fluid)	HEAT TRANSFER Japanese Reserch	Vol. 15, No. 6 (1986/87)

山石 岸 英 明 熊 田 俊 明 丸 子 洋 一 (北海道松下電器) 杉 山 弘	密閉形円管熱サイホンの流動様式と伝熱機構	日本機械学会第948回講演会, 熱工学講演概要集	1987.11
山石 岸 英 明 熊 田 俊 明 丸 子 洋 一 (北海道松下電器) 杉 山 弘	密閉形円管熱サイホンの流動様式と伝熱機構	日本機械学会論文集 (B編)	54巻499号 (1988) p. 681-687
小林 秀 敏 Bradley DODD (Reading 大学)	旋盤を用いた高速ねじり試験	第38回塑性加工連合講演会	1987.10. 8
西田 公 至 吉 田 有 宏	球面入射波による多角柱周囲の音場	日本機械学会論文集 (C編)	53巻489号 1053-1058 (1987. 5)
藤 枝 公 誠 西 田 公 至	音響インテンシティ法による放射パワーの測定に及ぼす外部音の影響	精密工学会昭和62年度北海道支部学術講演会講演論文集	1987. 9
玉 置 隆 二 西 田 公 至	多角柱による多重回折音場の解析方法	精密工学会昭和62年度北海道支部学術講演会講演論文集	1987. 9
Kohshi NISHIDA Takashi TOMITA	Automatic Measurement of Spatial Acoustic Intensity	JSME International Journal	Vol. 30, No. 259
西 田 公 至 富 田 隆 士	音響インテンシティの自動計測法による音の伝搬方向の測定誤差	日本機械学会山梨地方講演会講演概要集	No. 870-8 1987.10
西 田 公 至 藤 塚 桂 男	円孔を有するエンクロージャ周囲の音場の境界要素解析	日本機械学会北海道支部第29期総会講演会	No. 882-1 1988. 3
西 田 公 至 富 田 隆 士	音響インテンシティの自動計測法による音の伝搬方向の測定誤差	日本機械学会論文集 (C編)	54巻498号 410-416 (1988. 2)
杉 山 弘 樹 武 田 英 堅 平 張 (中連雲港化学工業専門学校) 関 山 雅 人 奥 田 教 海	直管路内の擬似衝撃波の発生位置と振動現象 (第1報, 高速度シュリーレンフィルムによる観察)	日本機械学会論文集 (B編)	53巻490号 p. 1659-1665 (1987. 6)
杉 山 弘 樹 武 田 英 堅 平 関 山 岸 雅 英 人	直管路内の擬似衝撃波の発生位置と振動現象 (第2報, 擬似衝撃波内の壁面圧力変動のスペクトル解析)	日本機械学会論文集 (B編)	53巻490号 p. 1666-1671 (1987. 6)

杉山 弘 田中 徹 小原 哲 干場 紀 奥田 教	衝撃波による複数空気泡の崩壊に関する一実験	日本機械学第65期全国大会講演会講演概要集	No. 870-4 p. 143 1987. 8. 20
Hiromu SUGIYAMA Hideki TAKEDA Jianping ZHANG Fukuyasu ABE	Multiple shock Wave and Turbulent Boundary Layer Interaction in a Rectangular Duct	Proc. of 16th Int. Symp. on Shock Tubes and Waves, Aachen, West Germany	p. 185-191 1987.7.26-31
杉山 弘 阿部 福 億	直管路内の擬似衝撃波の構造と振動現象について	衝撃工学シンポジウム, 宇宙科学研究所	p. 5-6 1987.9.25-26
杉山 弘 阿部 福 億 武田 樹海 (トヨタ自動車KK)	流路内の擬似衝撃波の内部構造	流れの可視化学会誌	Vol. 7, Suppl. p. 55-58 (1987.10)
杉山 弘 土居 和 喜 高田 隆 大 代田 隆 大 (日産自動車KK)	円柱まわりの高速微粒子—気体非定常流れの可視化	流れの可視化学会誌	Vol. 7, Suppl. p. 65-68 (1987.10)
奥田 教 海 杉山 弘 西條 政 明 坂元 克 己	沿岸固定形振り子式波浪エネルギー変換装置まわりの波動粒子の流跡について	流れの可視化学会誌	Vol. 7, Suppl. p. 123-126 (1987.10)
杉山 弘 阿部 福 億	流路内の衝撃波と乱流境界層の干渉に関する実験	第31回宇宙科学技術連合講演会講演集	p. 722-723 1987.10.28-30
杉山 弘 土居 和 喜 高田 隆 大 (東北大学高速力学研究所)	鈍頭物体を過ぎる微粒子—気体超音速流の実験	第31回宇宙科学技術連合講演会講演集	p. 724-725 1987.10.28-30
杉山 弘 高代田 隆 大 土居 弘 典	微粒子—気体衝撃波管内におかれた円柱を過ぎる衝撃波背後の流れ	日本機械学会創立90周年記念東北支部仙台地方講演会講演概要集	No. 871-2 p. 35 1987.10. 3
杉山 弘 田中 徹 小原 哲 干場 紀 奥田 教	衝撃波による複数空気泡の崩壊に関する一実験	日本機械学会論文集 (B編)	53巻495号, p. 3141-3145 (1987.11)
杉山 弘 高代田 隆 大 土居 弘 典	微粒子—気体衝撃波管内におかれた円柱を過ぎる衝撃波背後の流れ	日本機械学会論文集 (B編)	53巻496号, p. 3533-3538 (1987.12)

Kyokai OKUDA Hiromu SUGIYAMA Hideaki YAMAGISHI	Estimation Methods for Characteristics of a Small Type of Wind Turbine, Operating in Fluctuating Winds	Proc. of the 2ed China-Japan Joint Conference on Fluid Machinery, XI'AN, China	p. 391-398 1987.10
Hiromu SUGIYAMA Hideki TAKEDA Jianping ZHANG Kyokai OKUDA Hideaki YAMAGISHI	Locations and Oscillation Phenomena of Pseudo-Shock Waves in a Straight Rectangular Duct	JSME International Journal	Vol. 31, No.1 Series II p. 9-15 (1988. 2)
杉山弘 高山和喜 阿部福徳 南須原基成	擬似衝撃波の内部構造	日本航空宇宙学会北部支部1988年講演会前刷集	p. 35-36 1988. 3. 1
阿部福 杉山弘 高山和喜 南須原基成 下田康之	正方形管および円管内の擬似衝撃波	日本機械学会北海道支部第29期総合講演会講演概要集	No. 882-1 p. 49-50 1988. 3. 12
小杉原哲郎 奥山田教海	複数気泡と衝撃波の干渉に関する研究	日本機械学会北海道支部第29期総合講演会講演概要集	No. 882-1 p. 51-52 1988. 3. 12
杉山弘	流路内の擬似衝撃波の内部構造と振動メカニズムに関する研究	昭和62年度文部省科学研究費補助金実績報告書	1988. 3
杉山弘	衝撃波を利用した薄膜形成および表面処理技術に関する研究	昭和62年度文部省特定研究経費実施経過報告書	1988. 3
奥田教海 杉山岸英明	自然風における小形風車の特性評価法について	第9回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集	1987.11.27
奥田教海 山岸英明	自然風における小形風車の特性に関する実験的研究	日本機械学会第65期全国大会講演会講演概要集	No. 870-4 1987. 8
岸浪紘機 斉藤 関	凸面あるいは凹面部が加熱される垂直波状面からの自然対流熱伝達	日本機械学会論文集 (B編)	Vol. 53, No. 486 1987
H. Saito M. Sugawara (秋田大)	Freezing Fracture of Water Pipes in Low Temperature	Proc. of The 1987 Int. Symp. on Cold Regions Heat Transfer	1987
I. Tokura K. Kishinami N. Seki (道職訓短大)	Natural Convective Heat Transfer From Convector with Wavy Surface	Proc. of The 1987 Int. Symp. on Cold Regions Heat Transfer	1987

M. Sugawara (秋田大)	Snow Melting by Showering Aqueous Solution with Low Solidification Temperature	Proc. of The 1987 Int. Symp. on Cold Regions Heat Transfer	1987
H. Inaba (北見工大)			
H. Saito			
稲葉英男 (北見工大)	円筒内流動水の凍結挙動に関する研究	日本冷凍協会論文集 Vol. 4, No. 2	1987
福田武幸 (北見工大)			
斉藤 聡 戸倉 郁夫			
I. Tokura H. Saito K. Kishinami	Prediction of growth rate and density of frost Layer developing under forced convection	Wärme-und Stoff-übertragung 22, 285-290	1988
H. Inaba (北見工大)	Transient Behavior of Heat Removal from a Cylindrical Heat Storage Vessel Packed with Spherical Porous Particles	Wärme-und Stoff-übertragung 22, 325-333	1988
T. Fukuda (北見工大)			
H. Saito			
F. Mayinger (ミュンヘン工大)			
Kazuo MAENO Manabu HIROSE Yutaka HANAOKA	Gain Characteristics of CO ₂ Supersonic Mixing Laser With N ₂ Axial Glow Discharge	AIAA Paper No. 87-1403	June, 1987, pp. 1-8.
前野 一夫 志裕	低温気体中を伝播する衝撃波とその反射に関する基礎実験	宇宙研昭和62年度衝撃工学シンポジウム講演集	1986.9.25, 26, pp. 70-71
前野 一夫 志裕			
前野 一夫 志裕	低温 R-12 液体中の蒸発気泡崩壊と衝撃波の伝播	流れの可視化	Vol.7, Suppl (1987.10) pp. 81-84
前野 一夫 裕	姿勢制御推進器に用いられる曲り細管の流れ特性	第31回宇宙科学技術連合講演会講演集	1987.10. 28-30, pp.650-651
前野 一夫 喜裕	CO ₂ 超音速放電レーザーと出力特性	第31回宇宙科学技術連合講演会講演集	1987.10. 28-30, pp.708-709
前野 一夫 浩喜裕	CO ₂ 超音速放電混合レーザーの基礎実験	第19回流体力学講演会講演集	1987.11. 12,13, pp. 70-73
Kazuo MAENO Kohki SHIMIZU Hiroshi AOYAMA Akihiro SAKASHITA Yutaka HANAOKA	Basic Experiment on CO ₂ Supersonic Mixing EDL (Pressure and Mach Number in Laser Channel)	Proceedings of Institute of Laser & Chemical Technology	No. 25, (Dec.1987) pp. 95-99.

Kazuo MAENO Yasushi SHIZUKUDA Yutaka HANAOKA			Experiment of Vapor Bubble Collapse in Low Temperature R-12 under Shock Compression	Shock Tubes and Waves (Proc. of 16th Int. Symp. on Shock Tubes and Waves), VCH Publishers.	1988 (Symp. July 1987) pp.273-279	
前清花	野水岡	一幸	夫喜裕	CO ₂ 超音速放電レーザーの特性とレーザー推進の考察	宇宙研昭和62年度宇宙輸送シンポジウム	1967.12. 24,25
清前青坂花	水野山下岡	幸一	喜夫浩浩裕	CO ₂ 超音速放電レーザー特性とレーザー推進について	日本航空宇宙学会北部支部1988年講演会前刷集	1988. 3. 1 pp. 41-42
花清前	岡水野	幸一	裕喜夫	容器内の定常渦流れに関する研究 (第1報 剛体回転する流れの数値解析)	日本機械学会論文集	第53巻 第 485号(B) (1987) pp. 1521- 1526
花石前	岡川野	貴一	裕幸夫	容器からの定常排水うず流れの可視化実験	流れの可視化学会誌	Vol. 7, Suppl., (1987) pp. 41-44
花前永	岡野田	一秀	裕夫一 (東芝)	高速比で混合する凝縮気液二相流の可視化について	流れの可視化学会誌	Vol. 7, Suppl., (1987) pp. 85-88
花永前	岡田野	秀一	裕一夫 (東芝)	高速度比で混合する凝縮気液二相流に関する研究 (矩形断面混合部の圧力変動特性について)	第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集	1987. 5. 27 p. 197
花前中	岡野村	一浩	裕亮夫 見 (中国大連鉄道学院 三菱重工)	急減圧時の液体フラッシング現象に関する研究 (沸騰開始条件と沸騰の激しさについて)	日本機械学会第65期全国大会講演会講演概要集 No. 870-4	1987. 8. 20 p. 286
花石藤前	岡川本野	貴光一	裕昭夫	容器からの排水に伴う空気吸込み量に関する実験的研究	空気調和衛生工学会北海道支部第22回学術講演論文集	1988. 3. 24 p. 65
前花	野岡	一	夫裕	低温流体における衝撃波と蒸気泡崩壊	日本伝熱研究会北海道研究グループ講演会	1987.12.19
岸戸坂	浪藤倉東	紘郁	機因夫 仁 (小松メック株)	垂直波状板からの自然対流熱伝達の可視化 (凹面あるいは凸面半円筒部が等温加熱条件にある場合)	流れの可視化学会誌	Vol. 7, Suppl., 1987
岸戸	浪藤	紘	機因	積寒地の建築構造物への冷熱浸透と、その障害について	日本機械学会 P-SC 102積寒地の構造物への冷熱浸透と、その障害に関する分科会報告書	1987.11

岸浪 紘 機 斉藤 図	積寒地の鉄道関係車両・構造物への冷熱浸透と、その障害について	日本機械学会 P-SC 102 積寒地の構造物への冷熱浸透と、その障害に関する分科会報告書	1987.11
斉藤 紘 機 岸浪 図	積寒地の電力構造物への冷熱浸透と、その障害について	日本機械学会 P-SC 102 積寒地の構造物への冷熱浸透と、その障害に関する分科会報告書	1987.11
斉藤 紘 機 岸浪 図	積寒地の農業・土壌関係構造物への冷熱浸透と、その障害について	日本機械学会 P-SC 102 積寒地の構造物への冷熱浸透と、その障害に関する分科会報告書	1987.11
Ikuo TOKURA Kozo SAITO Robert A. ALTENKIRCH David D. EVANS	A Study of Crude Oil Combustion: Thermal Conductivity of the Condensed Phase	Proceedings of The Combustion Institute, Central States Section, 1987 Spring Technical Meeting, Argonne, Illinois	May 11-12, 1987
川島 祥 信 正田 弘 光 久保田 久 山下 光	すべり状態サーボ系と型の実現	計測自動制御学会第16回制御理論シンポジウム	1987. 6 . 4
正田 弘 光 久保田 久 山下 光	ハイゲインフィードバック制御系の構成	日本機械学会論文集	第53巻 第491号 (1987)
H. Hikita	Block-decoupling and Arbitrary Pole Assignment for Linear Right Invertible System by Dynamic Compensation	International Journal of Control	Vol. 45, No.5 (1987)
正田 弘 光 川島 祥 信	多変数系に対するすべり状態サーボ系の構成	日本機械学会論文集	第53巻 第496号 (1987)
正田 弘 光	ブロック非干渉制御における拡張型 Howze-Pearson Compensator	日本機械学会論文集	第53巻 第496号 (1987)
正田 弘 光 久保田 久	内部モデル原理を満足するすべり状態サーボ系	計測自動制御学会論文集	第24巻第1号(1988)
正田 弘 光 川島 祥 信	型を考慮したすべり状態サーボ系	日本機械学会論文集	第54巻 第497号 (1988)
木村 哲 也 正田 弘 光 久保田 久 山下 光	繰返し制御の高精度化	第20回計測自動制御学会北海道支部学術講演会	1988. 2 . 2
山下 光 久 久保田 久 正田 弘 光	数式処理システムを用いた制御系のCADの開発	第20回計測自動制御学会北海道支部学術講演会	1988. 2 . 2

川正久 山	島田下 保田下	祥弘 光	信光 譲久	可変構造制御を用いたサーボ系の設計	第4回計測自動制御学会北海道支部主催シンポジウム「デジタル信号処理と数値解析」	1988. 2. 3
佐久正	藤下保田 田	光 弘	等久 譲光	数式処理システム MACSYMA を用いた制御系のCAD	日本機械学会北海道支部第29期総会講演会	1988. 3. 12
宮横菊 津	本内地坂 (東芝)	克弘 千英	己宇之夫 (アイ)	GFRP 配線板の穴あけ模擬試験(第2報) — 転削による方法の提案 —	昭和62年度精密工学会春季大会講演論文集(第3分冊)	1987. 3. 29
横田菊	内丸地	弘幸 千	宇也 之	スナッキング研削に関する研究(第9報) — 打撃研削する砥石の振れまわり挙動の数値解析 —	昭和62年度精密工学会北海道支部講演会	1987. 9. 13
横田菊	内地	弘千	宇之	三次元座標測定のための非接触距離センサ(第二報) — 検出再現性について	昭和62年度精密工学会春季大会講演論文集	1987. 3. 27
岸金 横 伯野早	浪井 内 田村川	建弘 (大) 宇 (室工大) 賢 英	史理 大宇 司雄保 (日本製鋼)	大型鋳鍛造品の自動ケ引きシステムの開発(第5報) — 自動ケ引きシステムの総合評価試験結果について —	昭和62年度精密工学会北海道支部講演会	1987. 9. 13
T. KISINAMI S. KANAI H. YOKOUCHI K. KIKUCHI H. NOMURA T. HAYAKAWA				Computer-Aided Marking System for Large Castings and Forgings	Proc. of Second International Conference on Computer-Aided Production Engineering (Edinburgh, Apl. 1987)	Apl. 1987
T. KISINAMI S. KANAI H. YOKOUCHI H. NOMURA T. HAYAKAWA				Automatic Recognition System for Relative Position of Required Shape in Workpiece Space	Annals of the CIRP	Vol. 36/1/ 1987
H. YOKOUCHI K. KIKUCHI T. KISINAMI S. KANAI H. NOMURA T. HAYAKAWA K. HAKUTA M. OHTO				Computer-Aided 3-D Shape Measuring System Installed with a Non-Contact Distance Jensor	Proc. of the 6th International Conference on Production Engineering	Nov., 1987
世種田	利田頭	修正 孝	美美 介	Al-Fe 合金の腐食分布パターンとその評価	軽金属	37, 332-337 (1987)
世田	利田頭	修孝	美介	腐食生成物としての水酸化アルミニウムの性質	軽金属	37, 603-307 (1987)
世田	利田頭	修孝	美介	塩化アルミニウム水溶液中における Al-Fe 合金の腐食電位の検討	軽金属	37, 535-541 (1987)

世利修美 田頭孝介	硫酸ナトリウム水溶液中における Al-Fe 合金の分極曲線に現れるアノード極大電流の解明	軽金属	37,748-753 (1987)
世利修美 田頭孝介	Al-Fe 合金の分極曲線に表れるアノード極大電流の解析	第72回軽金属春期大会講演集	(1987), 185 (長岡)
世利修美 田頭孝介	アルミニウム局部腐食における鉄の役割と食孔内塩素イオン濃度の推定	第34回腐食防食討論会予稿集	(1987), 203 (大阪)
世利修美 田頭孝介	Al-Fe 合金の腐食挙動に及ぼすバルク溶液中の塩素イオン濃度の影響	第73回軽金属秋期大会講演集	(1987), 53 (東京)
Masayoshi KOBAYAMA	HIMURO Type Storage shed Using the Ice Stored in Winter Season	International Symposium on Cold Region Heat Transfer	June 4-6, 1987
媚山政良	HOKKAIDO Island の「氷室」	伝熱研究	Vol. 26, No. 103, pp.131-134 (1987.10)
媚山政良	冬期間の自然冷熱エネルギーの利用に関する研究(氷室形農産物長期保冷库の開発と実証実験)	日本機械学会論文集 (B編)	第 53 巻 第 495 号, pp. 3358-3362 (1987.11)
媚山政良 福小村佐藤 山島敏上藤 清太郎弘幸一 敏忠雄	冬期冷熱の長期・大規模貯蔵施設の開発(貯蔵能力の理論予測)	日本機械学会創立90周年第25回シンポジウム講演論文集	870-10, pp. 52-56 (1987.11)
媚山政良	「氷室計画」大規模貯雪永施設に関する研究	寒地技術シンポジウム '87講演論文集	第 3 回, pp. 31-34 (1987.11. 18-20)
媚山政良 小林尚良 小松本敏 橋山敏耕 小谷藤耕	「氷室計画」北海道における利雪・親雪・克雪プログラムの開発	北海道における '88 自然エネルギー有効利用公開講演会論文集	pp. 79-86 (1988. 2)
田頭孝介	低炭素鋼板研究委員会報告書	日本鉄鋼協会	April (1987) 刊行
Kohsuke TAGASHIRA Syuuichi KAMOTA (道立工試) Tatsuya HASHIMOTO (芝浦工大)	The Effects of Postheating on the Structures of Electron Beam Welded Joints in Spheroidal Graphite Cast Irons,	Bull. of Japan Soc. of Precision Engineering	Vol. 21, No.3 (1987) p. 198-202
Kohsuke TAGASHIRA Syuuichi KAMOTA Tatsuya HASHIMOTO	The Effects of Inset Sheet Thickness and Postheating Temperature on Mechanical Properties of Electron Beam Welded Joints in Spheroidal Graphite Cast Irons	Bull. of Japan Soc. of Precision Engineering	Vol. 21, No.4 (1987) p. 265-268

鴨田秀一 (道立工試)	溶射皮膜を介した鋼の接合	日本金属学会誌	52巻,3号 (1988), p. 348-354
酒井昌宏 (道立工試)			
田頭孝介 五十嵐正 (道立工試)			
赤沼正信 (道立工試)			
田頭孝介 早川正敏 大菊地千之	Fe-Mn-N 合金の焼入れ時効過程における Mn-N dipole の分解	日本金属学会秋期大会(熊本)	1987.10.10
鴨田秀一 酒井昌宏 田頭孝介	溶射皮膜を介した鉄と鋼の接合	日本金属学会秋期大会(熊本)	1987.10.11
早大田菊 川西尚敏 頭地正孝 地千之	低炭素鋼中の Mn-N ダイポール量に及ぼす Mn, N の影響	日本金属学会道支部 講演会(札幌)	1987.11.20

エネルギー工学専攻

H. Tanabe and K. Ohno	Electro Catalysis of Metal Phthalocyanine Thin Film Prepared by the Plasma-Assisted Deposition on a Glassycarbon in the Reduc- tion of Carbon Dioxide	Electrochim. Acta,	32,1121 (1987)
大野和徳 田辺博義	有機金属錯体で修飾されたグラッシーカーボ ン電極上での炭酸ガスの還元	日本化学会北海道支 部1987年夏季研究発 表会	1987. 7
大野和徳 田辺博義	金属フタロシアニン薄膜/グラッシーカーボ ン電極上でのレドックス反応	電気化学協会北海道 支部第14回研究発表 会	1988. 1

数物系 (数学, 物理)

Takanori IGARASHI	On characteristic bivectors in submetric areal spaces.	TENSOR(New Series)	45,(1),70- 72,(1987)
Hidenori KATSURADA	On etale $SL_2(F_p)$ -coverings of algebraic curves of genus 2	Journal of the Mathematical Socie- ty of Japan	Vol. 39, No.3,397- 434(1987)
Hidenori KATSURADA	On representations of the maximal unramified Galois extension of a field of positive charac- teristic	Hokkaido Methema- tical Journal	Vol. 16, No.2,127- 134(1987)
葛西聡明 早川淳一 (北大)	インバー合金 $Fe_{70}Ni_{30}$ のマルテンサイト変 態温度に及ぼす圧力効果	日本鉄鋼協会, 日本 金属学会, 両北海道 支部合同秋季講演大 会	1987.11.20
巨海玄道 (熊本大)			
保志賢介	Fe ₇₂ (Pt _{1-x} Ni _x) ₂₈ インバー合金の磁気体積効 果	日本鉄鋼協会, 日本 金属学会, 両北海道 支部合同秋季講演大 会	1987.11.20
早川淳一 (北大)			
巨海玄道 (熊本大)			
保志賢介			

山 中 厚
富 士 川 吉
小 喜 寺 朗
多 英 明
(北大理)

Nafion 膜の感湿基本特性

日本化学会支部夏期
研究発表会

1987. 7. 24

山 中 厚
富 士 川 朗
小 喜 寺 吉
多 英 明
(北大理)

ナフイオン膜の感湿電導特性

電気化学および工業
物理化学

56,(3)
200-201
(1988)

CONTENTS

Science and Engineering

Nov., 1988

Whole No. 38

Energies of dissociated dislocations in ice	Akeharu Fukuda	1
Report on the optical and electric properties of the nitrate compound crystals	Riki Kawashima, Akeharu Fukuda, Kiichiro Katsuki, Kazuo Suzuki	9
Carburization of metal needles by using a field ion microscope.	Hiroshi Adachi, Keiji Mikami, Takashi Matsuda, Kazuo Suzuki	27
Spin-Wave Excitations in Gd at low Temperatures	Syoh-ichi Nagata, Masatoshi Miyazaki, Eiji Fujita, Syuji Ebisu, Hidemi Yamamura, Satoshi Taniguchi	37
Effects of Low Temperature Annealing on the Ferromagnetic Anisotropies in Amorphous $Fe_{78}B_{13}Si_9$ Alloy Splat-Quenched by the Single Roller Method	Yoshihiko Miyawaki, Susumu Chikazawa, Satoshi Taniguchi	59
Phase-Conjugate Interferometry Using Dye Film	Kazuo Nakagawa, Kouzi Furukawa, Hirofumi Fujiwara	65
Generation of a phase-conjugate wave in a saturable-dye-doped planar waveguide	Shigeki Miyanaga, Tomoaki Yamabayashi, Katsuhiko Murayama, and Hirofumi Fujiwara	75
Application of Spread Spectrum Communication to Data Transmission over Electric Power Distribution line	Kazuhiro Ichianagi, Toshikazu Kuroshima, Ichiro Sugioka, Shigeshi Akiyama	85
Pseudo-Noise Code Synchronization in Spread Spectrum Communication	Kazuhiro Ichianagi, Toshikazu Kuroshima, Ichiro Sugioka, Shigeshi Akiyama	97
Code Modulation Technique in Spread Spectrum Communication	Kazuhiro Ichianagi, Toshikazu Kuroshima, Ichiro Sugioka, Shigeshi Akiyama	107
Cloning and Expression of Mycobacterium tuberculosis DNA in Escherichia coli	Shintaro Kikuchi, Papachan E. Kollattukudy	123
A Procedure for the Analysis of Long-Time Deflection of Reinforced Members and Its Adaptability	Akira Sugimoto, Satoru Ino, Masayoshi Ito, Tamaki Komagome	131
A Study on Energy Absorption of the Joint with Plastics Screw	Ken-ichi Saito, Satoru Hoshino	143

Load control of Rotary Snow Plow	Yuzuru Kubota, Mitsuhisa Yamashita, Hiromitsu Hikita, Tomiji Watabe	153
The Design of a Hydro-Mechanical Transmission for a Snow Plow	Tomiji Watabe, Yuzuru Kubota, Yuhji Yanagisawa	165
Reserch on a Small-Type Flow Control Valve	Jason R. Timm, Tomiji Watabe, Hakaru Saitoh	177
Didactical study of fractins	Kaku Yamaguchi	185
Other Achievements Studies for 1987 by Professor in this Institute		205

昭和63年11月10日 印 刷 (非売品)
昭和63年11月10日 発 行

編 集 室 蘭 工 業 大 学
発 行

印 刷 室 蘭 印 刷 株 式 会 社
室 蘭 市 本 町 2 丁 目 5 番 1 号
T E L (代) 2 4 - 5 1 4 1