

# アナログ回路応用技術の修得

第三技術室 システム制御技術班

本堂義記 酒井孝則 林 庄司 辻 正晴 岡井善四郎

## 1. はじめに

自然法則に基づき時間と共に連続的に変化する物理量を各種センサによって電気信号に変換し、これを忠実に信号処理する技術もアナログ回路技術である。最近の高度なデジタル回路化傾向においてもA/D変換までの前処理はアナログ技術が支えており、ますますアナログ技術の重要性が脚光を浴びている。しかしながらアナログ回路技術者は減少の一途をたどっているのが現状である。われわれ技術官が専門技術分野の一つとして回路に習熟しノウハウを蓄積しておくことは前記理由からも有意義であると思われる。昨年度の研修では、アナログ回路の代表的デバイスであるOPアンプの基礎技術を修得した。今回はさらにその応用技術を修得するために、図書の輪講および技術資料の活用による各種アナログ応用回路の知識高揚に努めた。製作実習の課題には各種波形発振回路を選択し、各自が回路設計、製作、実験を行ったので、その一部を報告する。

## 2. 研修実施日程

表. 1 アナログ回路応用技術専門研修実施日程表

	11月	12月	1月	2月	3月
日	15日(金)	2日(月)	13日(月)	3日(月)	3日(月)
時間	13:30~15:00	13:30~16:30	13:30~15:20	13:30~16:00	13:30~16:00
研修内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 研修実施日程調整</li> <li>◇ 研修経費使途検討</li> <li>◇ 使用図書検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 図書の輪講</li> <li>・第3章; 演算回路</li> <li>・第4章; 特殊回路</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 製作回路(発振器)設計仕様検討</li> <li>・三角波 ・ 方形波</li> <li>・正弦波</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 三角波・方形波発振回路の実験</li> <li>・回路特性データ採取</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ ウィン・ブリッジ正弦波発振回路の実験</li> <li>・回路特性データ採取</li> </ul>
日	28日(木)	9日(月)	20日(月)	17日(月)	17日(月)
時間	9:30~11:30	13:30~16:00	13:30~16:00	13:30~16:00	13:30~16:00
研修内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 研修内容・方法検討</li> <li>◇ 製作・実習内容検討</li> <li>◇ 購入部品の手配</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 図書の輪講</li> <li>・第5章; 光センサ回路</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 三角波・方形波発振回路定数決定</li> <li>・周波数特性計算</li> <li>・デューティ比計算</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ ウィン・ブリッジ正弦波発振回路定数決定</li> <li>・周波数特性計算</li> <li>・ゲイン計算</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 研修のまとめ</li> </ul>
日		18日(水)	27日(月)	24日(月)	
時間		13:30~15:10	13:30~16:00	13:30~15:30	
研修内容		<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 図書の輪講</li> <li>・第6章; 温度センサ回路</li> <li>・第7章; 磁気センサ回路</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 三角波・方形波発振回路製作実習</li> <li>・各自が基板に実装</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ ウィン・ブリッジ正弦波発振回路製作実習</li> <li>・各自が基板に実装</li> </ul>	

### 3. アナログ回路応用技術の修得

アナログ回路の基本的能動素子には、トランジスタやFET(電界効果トランジスタ)などがある。しかし、最近是集積回路技術の進歩によりアナログ回路素子=OPアンプと云われるくらいにどの書籍を見てもOPアンプや専用LSIを用いた回路が主流となっている。したがって、我々も基本的技術の修得とともに最新の便利な集積回路素子の知識も蓄積し、これをあらゆる分野に活用できる能力を身につけることが重要と考え、研修内容も基礎から応用へと進展している。

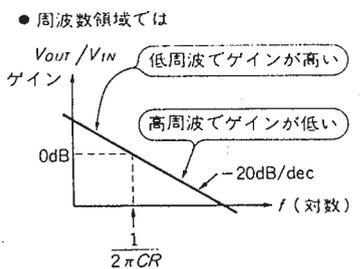
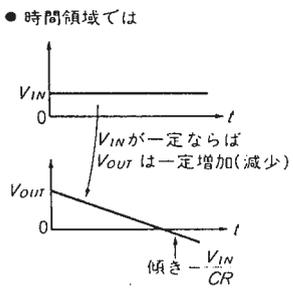
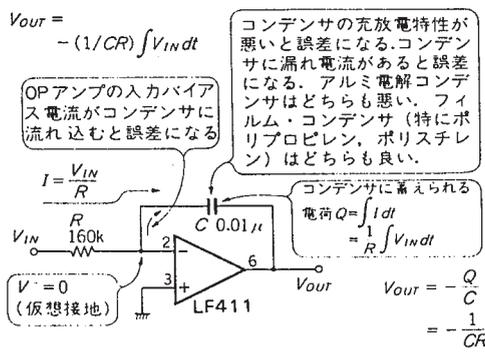
今回、使用した図書は『入門アナログ信号処理』<sup>(1)</sup>で、下記のアナログ回路の応用を中心に技術修得を行った。その内容は以下のとおりである。

- A. 演算回路 1)反転・非反転加算回路 2)減算回路 3)乗算・除算回路 4)対数回路 5)指数回路  
6)微分・積分回路 7)応用演算回路
- B. 特殊回路 1)コンパレータ回路 2)理想ダイオード 3)無安定マルチバイブレータ 4)電流-電圧変換回路
- C. 光センサ回路の設計 1)Cdセル 2)フォトダイオード 3)フォトトランジスタ 4)PSD素子
- D. 温度センサ回路の設計 1)サーミスタ 2)熱電対 3)焦電センサ
- E. 磁気センサ回路の設計 1)ホール素子 2)磁気抵抗素子 3)リードリレ

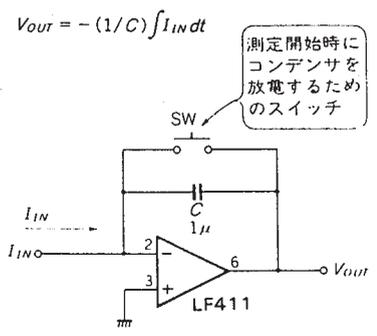
表. 1の実施日程表のように研修前半では、上記内容の輪講とこれに関連する技術資料による補足を行いながら回路知識の向上に努めた。さらに技術資料に掲載されていた下記の簡便な回路例などについては、そのつどユニバーサル基板上に回路を実装し各種計測器を用いて実験検証を行った。

また、今回各種センサの基礎知識を併せて修得したことから今後さらに広い分野にわたってアナログ回路技術の応用が展望できるものと思われる。

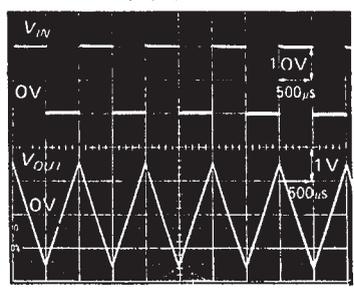
### 積分回路 トランジスタ技術誌 1992年、7月号



(a) 積分回路

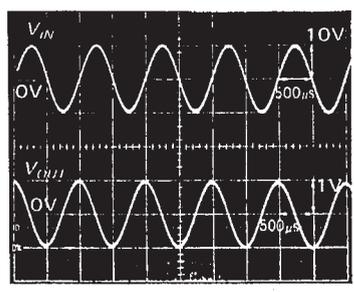


(b) 電流積分回路



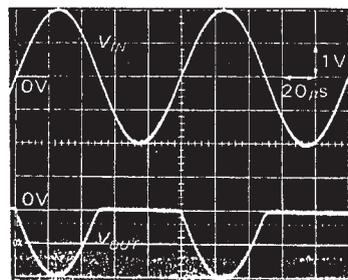
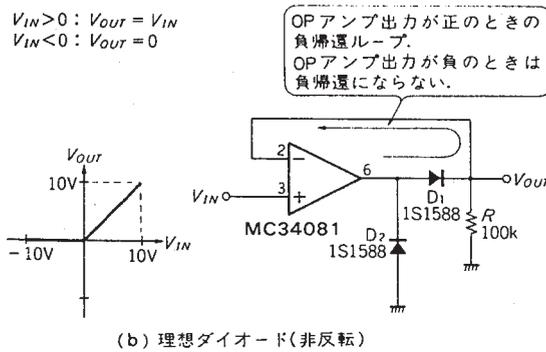
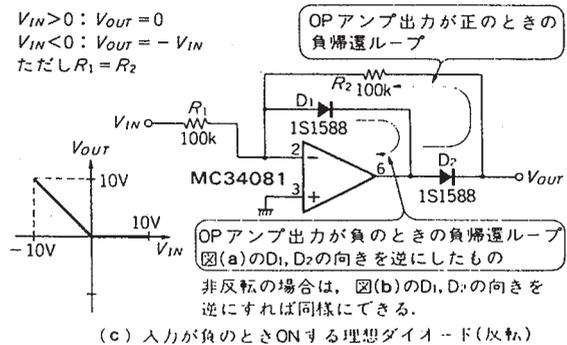
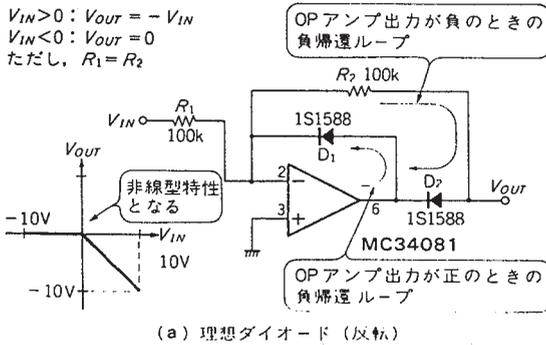
入力一定なら出力は一定傾斜の直線になる(方形波-三角波変換)

(c) 図(a)の回路の入出力波形1



入力がsinならば出力は-cosになる(位相が90°遅れる)

(d) 図(a)の回路の入出力波形2



(d) 図(a)の回路の入出力波形

#### 4. 基本発振回路の設計と試作

アナログ回路応用技術のひとつに、発振回路がある。その回路は、発振波形により弛張型発振回路（方形波、三角波）と調和型発振回路（正弦波）に分類される。今回、これらの簡単な基本回路設計を行い、実際に試作し各回路動作を確認した。その試作発振回路を図. 1に示す。

##### 4. 1 三角波および方形波発振回路

三角波や方形波を発生させるには、基本的に回路上のコンデンサの充放電を利用する。今回は使用するOPアンプ（汎用型、LF356N）の性能より発振周波数20Hz~25kHzでデューティ比可変の三角波と方形波を同時に発生する発振回路を目標に基本設計・試作を行った。その回路を図. 2に示す。

図におけるOPアンプIC<sub>1</sub>で反転型積分器を、OPアンプIC<sub>2</sub>でヒステリシス型コンパレータを構成し、これら二つの回路をループに組み合わせることにより、同じ周波数の三角波と方形波を発生させている。すなわち、三角波はコンパレータの方形波出力を積分することにより発生させ、

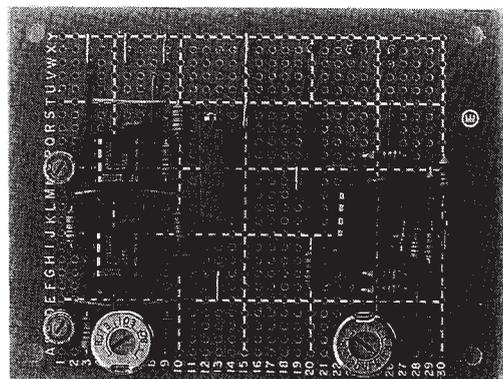


図. 1 試作発振回路

方形波はコンパレータの入力電圧と基準電圧を比較した結果をOPアンプの出力飽和電圧 $V_H$ 、 $V_L$ のどちらかで出力することを利用して、積分コンデンサの充電電圧がしきい値に達した時に反転させることにより発生させている。ただし、コンパレータの回路感度が高いため入力電圧の微少なノイズにより回路動作が不安定になる。そこで、出力を帰還させることでコンパレータにヒステリシス特性を持たせている。

また、方形波振幅は $IC_2$ の出力電圧差( $V_H - V_L$ )で、三角波振幅はヒステリシス幅 $R_2(V_H - V_L) / R_3$ で決まり、発振周波数 $f$ は(1)式で示す積分の時定数とヒステリシス幅で決まる。

発振周波数を可変するには(1)式より時定数かヒステリシス幅のどちらかを調整すればよいが、ヒステリシス幅の調整は三角波の振幅も同時に変化するので、普通は時定数で調整する。また、図中のOPアンプ $IC_1$ の+入力端子に接続されている可変抵抗 $VR_1$ は、 $IC_1$ における $V_H$ と $V_L$ の中心にバイアス電圧を持つてくるためのもので、デューティ比可変のため挿入してある。

試作した回路の発振周波数範囲は15.5 Hz ~ 18.8 KHzで、その観測した実験波形の一例を図. 3に示す。今後の問題としては試作した発振回路のオフセット回路が働かず三角波の18.8 KHz付近、方形波の全帯域で $V_H$ 、 $V_L$ にわずかではあるが電位差が生じているため、このことを考慮した設計方法を修得する必要がある。

#### 4. 2 正弦波発振回路

正弦波を発生するには、図. 4に示す正帰還の閉ループ回路に $A\beta \geq 1$ の条件で、電源ノイズなどの微少信号を与えることにより発振持続動作を行い、その出力を共振回路を通し高調波成分を除去することにより得ることができる。図において、 $A\beta < 1$ の場合、振動波形は正帰還ループを繰り返すことにより次第に振幅が減少し、発振は停止する。また、 $A\beta > 1$ の場合、振幅が無限に増大し、その振幅は発散する。すなわち、持続発振を得るには、発振開始時はOPアンプと帰還回路を一巡するたびに信号が次第に大きくなるように $A\beta > 1$ の条件で動作させ、振幅が飽和点に近づいた時、回路利得を下げ $A\beta = 1$ になるようにすればよい。その時の振幅条件は(2)式で表され、持続発振条件は(2)式より虚数部が零の時で(3)式となる。したがって、発振周波数条件

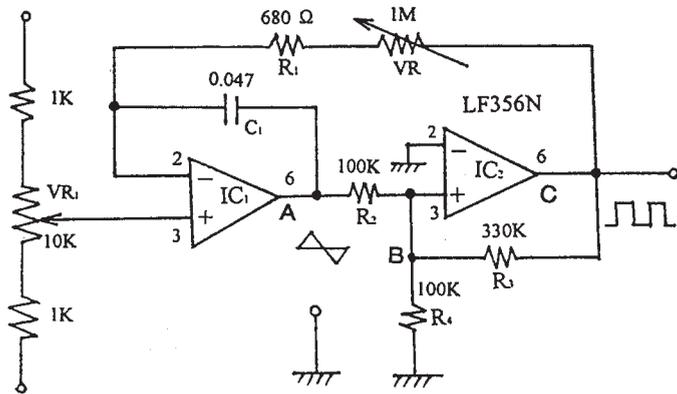


図. 2 三角波・方形波発振回路

$$f = \frac{R_3}{4CR_1R_2} \quad (\text{Hz}) \quad - (1)$$

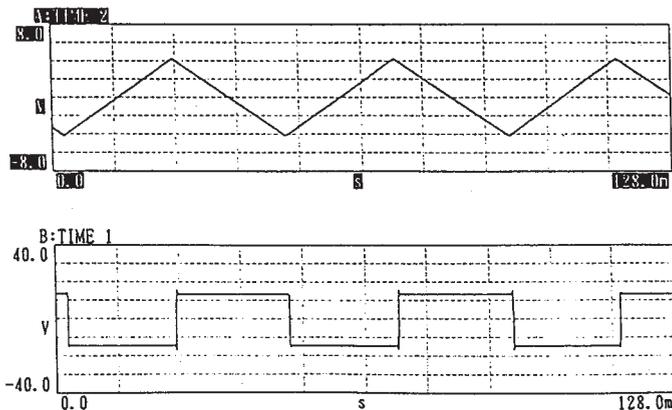


図. 3 試作回路実験波形

は(4)式となる。

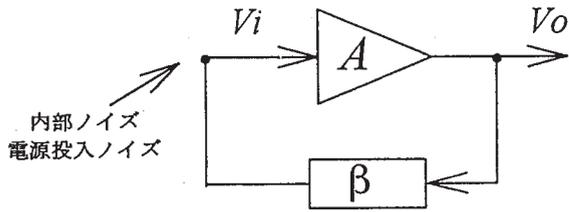


図. 4 自動発振回路の原理

(発振の条件)

・振幅条件

$$A\beta = \text{Re}[A\beta] + j\text{Im}[A\beta] \quad - (2)$$

・持続発振条件

$$A\beta = \text{Re}[A\beta] = 1 \quad - (3)$$

・発振周波数

$$j\text{Im}[A\beta] = 0 \quad - (4)$$

今回は、既に述べた発振条件を基に正弦波発振回路の代表的な回路であるウィーン・ブリッジ発振回路についての基本設計を行った。ただし、周波数については単一周波数に固定した。その回路を図. 5に、発振条件および発振周波数を式(5)、(6)式に示す。また、回路上に挿入したクリッパ回路は $A\beta$ を1に安定させるための回路である。

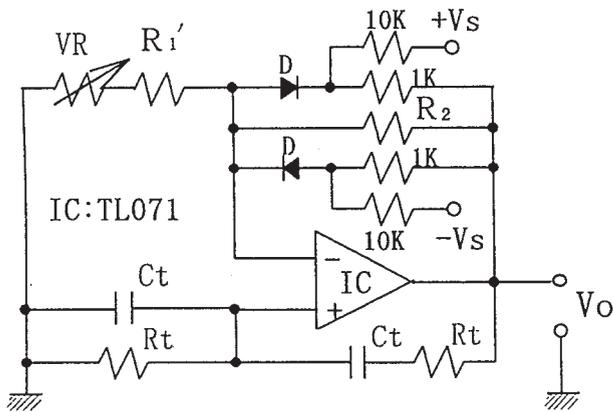


図. 5 ウィーン・ブリッジ発振回路

(発振条件の決定)

・持続発振条件  $A\beta \geq 1$

$$A \geq 3, \beta = 1/3 \therefore R_2 \geq 2R_1 \quad - (5)$$

ただし、 $R_1 = R_1' + VR$

・発振周波数

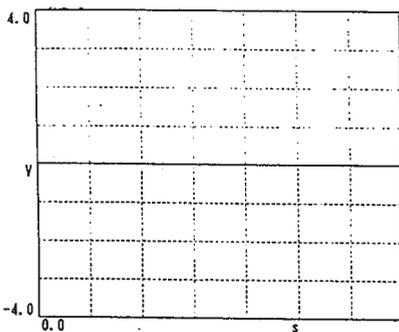
$$f = \frac{1}{2\pi R_t C_t} \quad [\text{Hz}] \quad - (6)$$

・各定数決定

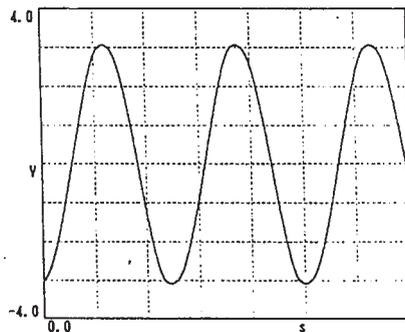
$$R_1' = 2.2\text{K}\Omega, R_2 = 10\text{K}\Omega, VR = 5\text{K}\Omega, \\ R_t = 16\text{K}\Omega, C_t = 0.01\mu\text{F}, V_s = \pm 15\text{V}$$

$$\therefore f = 995 \quad [\text{Hz}]$$

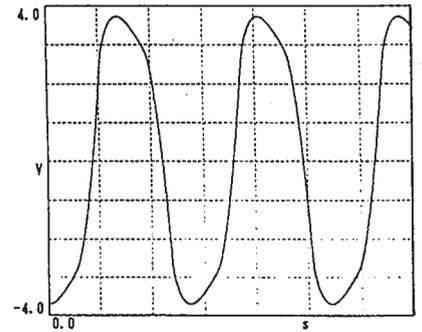
次に、試作した回路の実験観測波形を図. 6に示す。これらの図よりVRの大きさ、すなわち $A\beta$ の条件により発振停止から発散までの自動発振の様子が理解できる。また、設計と周波数が一致しない理由としてはコンデンサーなどの素子定数を正確に測定しなかったためと考えられるが、これは発振周波数を決定する回路上の $R_t$ 、 $C_t$ を可変することを考えればさほど問題でない。



(a) 発振停止  $VR = 2.9\text{K}\Omega$



(b) 発振  $VR = 2.7\text{K}\Omega, f = 928 \text{ [Hz]}$



(c) 発散  $VR = 1.4\text{K}\Omega$

図. 6 ウィーン・ブリッジ発振回路実験波形

## 5. あとがき

昨年度の専門研修「OPアンプ回路の基礎と応用」に引き続き、今年度は標記課題で専門研修を行った。その内容は既に述べたように研修期間を二期に分け、第一期は文献輪講によるOPアンプを用いた各種回路の基本的応用技術についての研修、第二期は三角波・方形波発振回路および正弦波発振回路（ウィーン・ブリッジ型）の基本的設計法と製作実習である。第一期の研修では多種の基本的応用回路について文献すべてを理解することは困難であったが、一般的によく使われる簡単な応用回路についてはある程度理解することができた。第二期の各種発振器の設計・製作実習では各自が実際に回路設計・試作、実験を行ったことにより、発振回路の基本的動作や設計法などについて理解することができた。以上のことより、今回行った専門研修は文献輪講および回路設計・試作、実験を通して経験的にアナログ技術の一部を修得することができ大変有意義であった。しかし、時間的・経費の制約もあり発振器のオフセット回路の問題点解決や周波数可変正弦波発振器の試作およびその他応用回路の試作はできなかった。

## 6. 成果の今後の発展

昨年度はOPアンプ用直流安定化電源を製作し、今年度は三角波・方形波・正弦波発振器を試作した。このような実験用計測器は各メーカーから単品で市販されており、最近は小型、高性能なものが比較的安価で入手できる。しかし、技術者が回路製作や実験を行う時にはそれぞれの計測器を持ち込み、積み上げて行っているのが現状である。このことから我々は普段よく使用する直流電源、各種波形発振器、周波数カウンタなどを一体化し、小スペースで回路製作・実験ができる簡易型計測器を完成する計画をしている。

## 謝 辞

本専門研修は、福井大学教育研究学内特別研究費および福井大学工学部日常・専門研修費補助を基に行ったものであり、関係の方々に深く感謝の意を表します。また、研修のために貴重な時間と実験測定器の借用ご快諾をいただきました研修者派遣先の各先生方に謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 坂井 茂 : 「 入門アナログ信号処理」、オーム社、(1994)
- (2) 清水 茂他 : 「 モジュール化に役立つ実用電子回路集」、CQ出版社、(1996)
- (3) 岡村 勉夫 : 「 OPアンプ回路の設計」、CQ出版社、(1995)
- (4) 宮崎 仁 : 「OPアンプの基本回路と動作」、CQ出版社「トランジスタ技術誌」、(1992)