

# 砥石作業面のインプロセス測定による研削作業の最適化に関する研究

著者	細川 晃
著者別表示	Hosokawa Akira
雑誌名	平成12(2000)年度 科学研究費補助金 基盤研究(C) 研究成果報告書
巻	1998-2000
ページ	13p.
発行年	2001-03
URL	<a href="http://doi.org/10.24517/00053773">http://doi.org/10.24517/00053773</a>



---

砥石作業面のインプロセス測定による研削作業の最適化に関する研究

---

(課題番号・10650117)

平成10年度～平成12年度  
科学研究費補助金 (基盤研究(C)(2))  
研究成果報告書

平成13年3月

研究代表者 細川晃  
(金沢大学工学部助教授)

金沢大学附属図書館



8000-96460-0



KAKEN  
2000  
33

---

砥石作業面のインプロセス測定による研削作業の最適化に関する研究

---

(課題番号：10650117)

平成10年度～平成12年度  
科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）  
研究成果報告書

平成13年3月

研究代表者 細川晃  
(金沢大学工学部助教授)

## は し が き

ファインセラミックスなどに代表される高硬度ぜい性材料の延性モード研削や難削金属材料の高平滑研削などの高品位研削加工を実現するためには、通常、粒度 #2000 以上の超微粒砥石が使用されている。しかし、これらの微粒砥石は砥粒の脱落、摩耗、目づまりなどの発生で砥石作業面が変化しやすく、安定した加工を維持することが難しい。そのため、実際にはインプロセス電解ドレッシング法(ELID)など特殊な加工技術を用いているのが現状で、通常の研削加工手法では適用できない場合が多い。

そこで本研究では、砥粒と工作物の干渉量、すなわち研削状態を直接左右する砥石作業面性状を定量的・定性的に把握することによって常に最適な砥石の状態を維持し、通常の研削形態でも能率的に高品位加工を実現することを目的としている。

ところで、砥石作業面の測定法自体はこれまで多くの研究者によって提案されているが、測定に多くの時間と労力を要する、工作物に特別なセンサを形成する必要がある、微粒砥石に適用できない、など多くの制約があり、通常の研削作業にそのまま利用できるものは少ない。本研究は実用的なレベルで実際の研削工程に適用できることを第一義として、砥石作業面の機上測定システムの構築を行った。本研究の実施計画に基づいて行った研究のアウトラインは以下の通りである。

- (1) 種々の仕様(砥粒材質、粒度、結合剤など)の砥石に対し、その作業面性状を高精度で機上にて測定できるシステムの構築
- (2) 砥石作業面の状態を定量的に評価できるパラメータの導出と定義
- (3) 研削加工に伴う砥石作業面性状の変化をインプロセスで測定・評価し、形直し・目直し状態の良否、加工条件の適正、砥石摩耗の評価、砥石寿命の判定などへの適用性の検討

なお、研究代表者は本研究の開始と時を同じくして所属大学を異動したため、研究経費の一部を当初予定していなかった実験装置の整備に費やしたことを付言する。また、実験当初の目的の一つであった形直し・目直し手法の開発については、後述する本研究の成果を踏まえ、今後の課題としたい。

本研究の研究組織、研究経費および研究発表などは以下の通りである。

### 研究組織

研究代表者：細川 晃 (金沢大学工学部助教授)  
研究分担者：上田 隆司 (金沢大学工学部教授)  
研究分担者：山田 啓司 (金沢大学工学部助手)

## 研究経費

平成10年度	1, 300千円
平成11年度	800千円
平成12年度	800千円
計	2, 900千円

## 研究発表

### ア. 学会誌等

- (1) 細川 晃, 安井平司, 永江昌義, 佐藤 郁, 画像解析による砥石作業面の評価(第2報)—研削過程における砥石作業面変化の追跡測定—, 精密工学会誌, 65巻10号, 平成11(1999)年10月, 1440-1444頁.
- (2) Akira HOSOKAWA, Kunio SAKUMA and Takashi UEDA, In Situ Characterization of Grinding Wheel Surface, Proc. of 14th Amer. Soc. Prec. Engg. Annual Meeting, Vol.20, November 1999, pp.99-102.
- (3) 細川 晃, 画像処理手法による砥石作業面の評価, 砥粒加工学会誌, 44巻, 3号, 平成12(2000)年3月, 107-108頁.
- (4) 細川 晃, 砥石作業面の機上測定法, 先端加工, 19巻1号, 平成12(2000)年9月, 9-14頁.
- (5) Akira HOSOKAWA, Keiji YAMADA and Takashi UEDA, Practical Monitoring System of Grinding Wheel Surface, Proceedings of the VI International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing, August 2000.  
(予定)

### イ. 口頭発表

- (1) 細川 晃, 上田隆司, 佐久間邦郎, 織田正人, 砥石作業面性状のインプロセス測定に関する研究—第1報:ニューラルネットワークによる研削状態の認識—, 1999年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, 平成11(1999)年9月28日, 259頁
- (2) 細川 晃, 上田隆司, 織田正人, 佐久間邦郎, 砥石作業面性状のインプロセス測定に関する研究—第2報:研削音響・振動による砥石作業面性状の識別—, 2000年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, 平成12(2000)年10月7日, 154頁
- (3) 細川 晃, 上田隆司, 織田正人, 佐久間邦郎, ニューラルネットワークによる砥石作業面状態の識別, 日本機械学会第2回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, 平成12(2000)年11月22日, 217-218頁

# 研究成果

## 1. 緒言

研削加工では、砥石作業面上の切れ刃の形状や分布状態、すなわち砥石表面トポグラフィによって加工精度や仕上面性状の良否が直接左右されるため、その測定と定量的な評価は極めて重要な作業である。そのため、これまで触針法、顕微鏡観察法あるいは光電走査法などによって砥石作業面の幾何学的・形態的特徴を抽出する試みがなされている[1]。しかし、その多くは加工現象を観測することを目的として提案されたものが多く、多大の労力と時間を要し、煩雑で特別の操作が必要であるなど、一般の研削作業へは簡単に適用できない。たとえば、加工中に変化する砥石作業面の測定をしようとした場合、砥石の状態はインプロセスで測定できなければならない。また、作業者が容易に理解できるような形で表示することも必要である。

そこで本研究では実際の研削作業への適用性を第一義に考慮し、下記に示す実用的な3種類の砥石作業面の測定システムの構築を試みた[2, 3]。すなわち、(1)触針法；(2)画像処理法；および(3)研削音識別法；である。当然のことながら、各手法によって測定されるパラメータは異なっており、それぞれ特徴がある。したがって、研削加工の最適化のためにはこれらの手法を使い分け、総合的に砥石の状態を評価しなければならない。

## 2. 砥石作業面性状の定量化

砥石作業面の状態は、図1に示すように、砥石表面を直接測定して得られる‘静的評価’と、研削音などの加工中の信号から得られる‘動的評価’に分けられる。前者としては触針法や画像処理法があり、どちらも砥石を静止させた状態でポストプロセスで測定する。一方、後者は砥石と工作物の干渉の結果発生する何らかの信号をインプロセスで解析するもので、本研究では研削音を測定対象とした。以下にこれらの測定方法の詳細とその有効生について実験結果を示しながら説明する。

## 3. 触針法

### 3.1 砥石作業面測定システム

図2に測定装置を示す。研削盤砥石ヘッドに装着した触針式粗さ計の検出器を装着し、砥石の周方向の断面プロフィールを測定する。なお、図に示すように、検出器はイメージスコープとともに精密回転ステージ上に取り

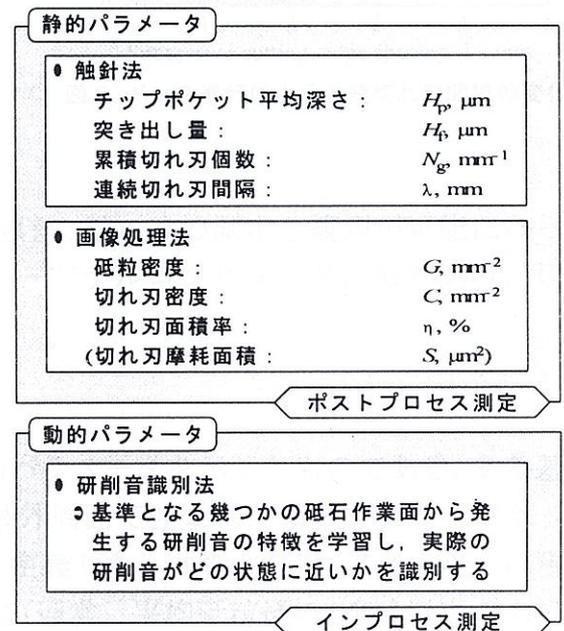


図1 砥石作業面の机上測定法

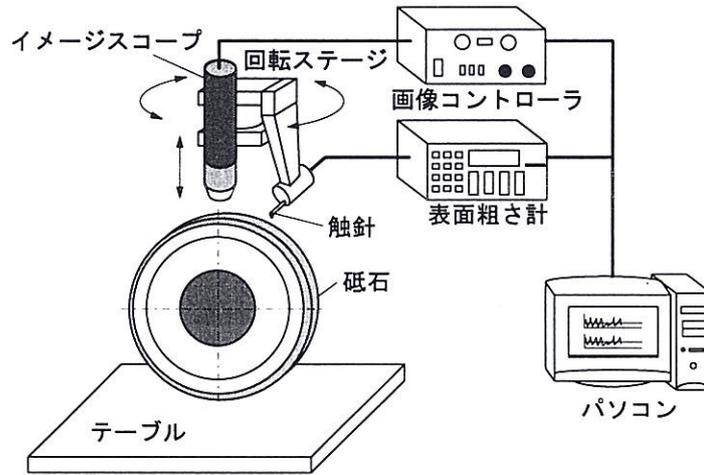


図2 砥石作業面測定システム

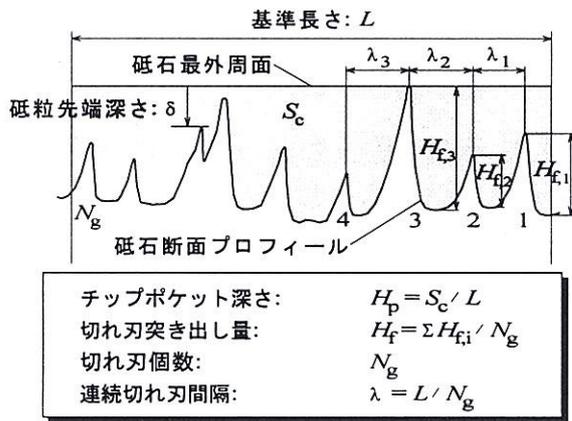


図3 触針法による砥石作業面評価パラメータ

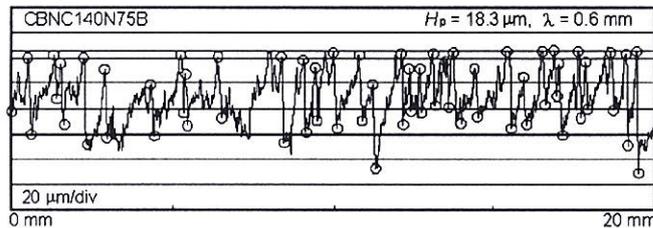


図4 砥石断面プロフィールの測定例

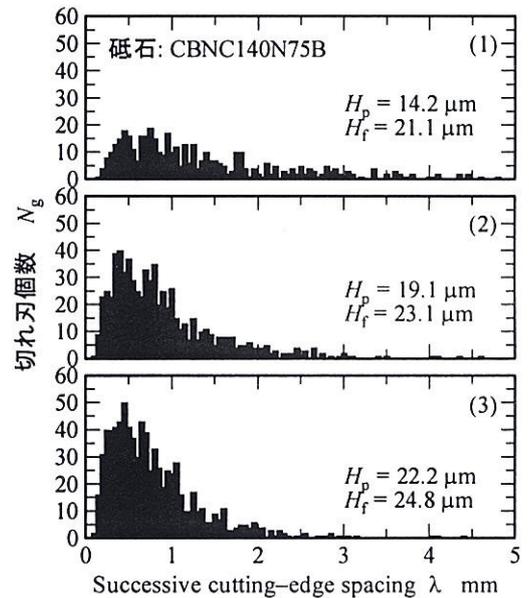


図5 ドレス進行による連続切れ刃間隔の変化

付けられており、砥石表面の同一箇所(位置決め誤差: 数 $\mu\text{m}$ )の測定と観測が可能になっている。検出器からの出力電圧はA/D変換されパーソナルコンピュータに取り込み、切れ刃の認定などの種々の処理を行う。

### 3.2 砥粒および切れ刃の認定

図3は触針法によって得られる砥石作業面評価パラメータを示したものである。ある基準長さ $L$ に対し、砥石断面プロフィールと砥石最外周面で囲まれた領域をチップポケット $S$ とし、 $S/L$ をチップポケット平均深さ $H_p$ と定義した。また、プロフィール上に現れる凸部分について、すくい面側の高さが基準値(通常、平均砥粒径の25%)以上のものを切れ刃と認定し、それらの間隔の平均値を連続切れ刃間隔 $\lambda$ として算出した。

図4に実際に実際に測定したCBN砥石の断面プロフィールの例を示す。図中の○印は認識された砥粒の先端とすくい面側の側のボンド部を示しており、比較的精度よく砥粒を認識できていることがわかる。

図5はCBNC140N75B砥石全周に対し、ドレス進行にともなう連続切れ刃間隔の分布の変化を示したものである。ドレッシングは、ダイヤモンドブロックツールで砥石をフラットにした後、WAスティック砥石で結合剤を除去した。図にみるように、ドレスの進行とともに、切れ刃数が増加し、また、切れ刃間隔が小さくなっていることが確認できる。この他、砥粒先端深さ $\delta$ や切れ刃突き出し量 $H_f$ の分布など種々のパラメータを算出し、パソコンのモニタ画面に表示することができる。このように、触針法では切れ刃の砥石深さ方向の分布が詳細に測定でき、ドレス時など切れ刃の消長が比較的大きい場合に有効と考えられる。

#### 4. 画像処理法

画像計測システムの構成を図2に示す。研削盤砥石ヘッドに装着したイメージスコープで観測した砥石作業面映像をパーソナルコンピュータのフレームメモリに取り込んで種々のデジタル画像処理を行う。画像データは、横640画素、縦480画素、1画素あたりR,G,B(赤, 緑, 青)それぞれ8ビットの階調を持つフルカラー画像である。ここで、カラー画像を用いるのは、モノクロ画像の濃度成分だけでは砥粒や摩耗面を正確に抽出することが難しいためである。

##### 4.1 砥石作業面のキャラクタリゼーション

図6は砥石作業面を模式的に示したものである。図において、摩耗面は研削時に工作物と干渉して生成された平坦部と考え、これを切れ刃とした。このような入力画像に対し、砥石作業面の評価パラメータとして以下のような四つの特性値を算出した。

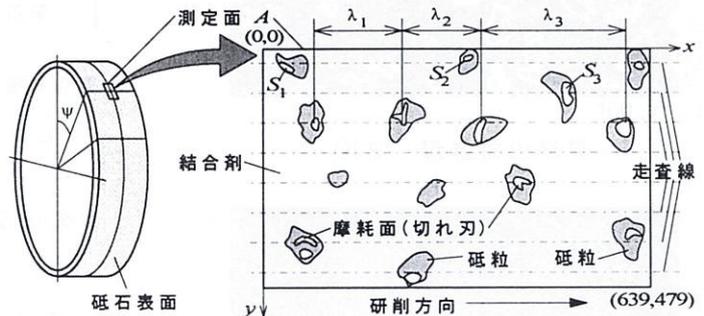
砥粒密度： $G=N_g/A, \text{mm}^{-2}$

切れ刃密度： $C=N_c/A, \text{mm}^{-2}$

連続切れ刃間隔： $\lambda=\sum\lambda_j/j, \text{mm}$

切れ刃面積率： $\eta=\sum S_i/A, \%$

ここに $A$ は観測面積、 $S_i (i=1-N_c)$ は切れ刃摩耗面積、 $N_g, N_c$ はそれぞれ観測面内の砥粒および切れ刃の数である。ここで、砥粒これらの評価パラメータは砥粒の摩滅摩耗、破壊および脱落など砥石性能を直接的に表す重要特性値である。



$N_g$ : 砥粒数	
$G$ : 砥粒密度	$G=N_g/A$
$N_c$ : 切れ刃数	
$C$ : 切れ刃密度	$C=N_c/A$
$\lambda$ : 連続切れ刃間隔	$\lambda=\sum\lambda_j/j$
$\eta$ : 切れ刃面積率	$\eta=\sum S_i/A$

##### 4.2 画像処理手順

画像処理の基本は、まず、砥石表

図6 画像処理法における砥石作業面の評価パラメータ

面の画像から砥粒と切れ刃摩耗面を個別に抜き出すことである。本研究では、画像の持つ色彩情報を定量的・定性的に取り扱うことによって測定対象物の抽出を行った。すなわち、画像内の各画素が持つ RGB 信号から以下の関係式によって色の性質を求め、これらの色彩情報に適切なしきい値処理を行って物体を抽出した。

$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B$$

$$h = \tan^{-1} \left( \frac{R-Y}{B-Y} \right)$$

ここに、 $Y$  は輝度、 $h$  は色相で、それぞれ画像の明るさ、色合いを表している。

図7に画像処理プログラムのフローチャートを示す。砥石の種類や取込み画像の画質などによって個々の処理は多少異なるが、後述するレジンボンドCBN砥石の場合には、基本的には本図の手順に従って砥粒および切れ刃摩耗面を抽出し、 $G$ 、 $C$ 、 $\lambda$  および  $\eta$  を算出した。

#### 4.3 画像処理結果

図8はレジンボンドCBN砥石における砥粒抽出の結果の一例を示したもので、原画像に抽出された砥粒の輪郭線を重ねて表示している。図にみるように、一部の密着した砥粒は分離できていない場合もあるが、全体として砥粒は精度よく抽出されていることがわかる。一方、摩耗面の抽出結果の一例を図9に示す。図において、実線が抽出砥粒の輪郭、白色の部分が摩耗面であり、同一砥粒内に複数の切れ刃が存在することがわかる。

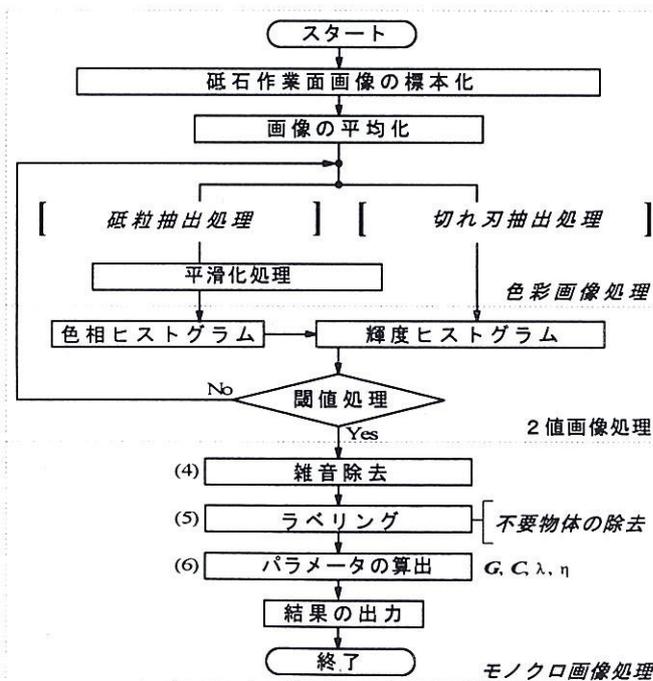


図7 画像処理手順のフローチャート

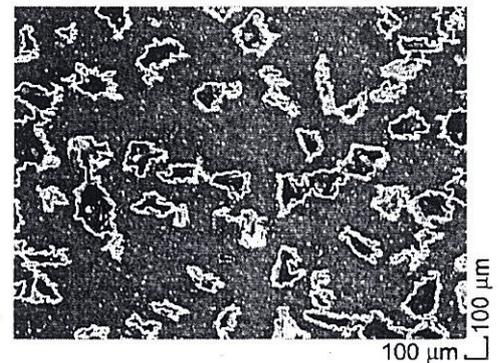


図8 砥粒抽出結果

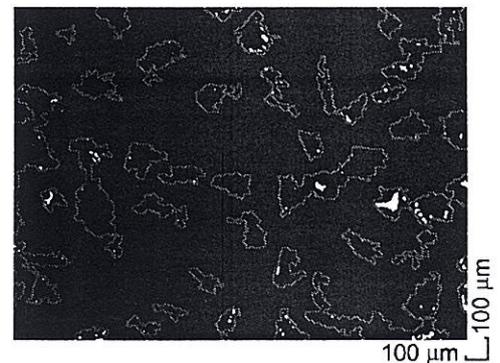


図9 切れ刃抽出結果

以上のような処理手順によって砥粒および摩耗面を抽出した後、前述した砥石作業面評価パラメータを計算する。本手法の有効性を確認するため、研削作業にともなう砥石作業面の変化を測定した。このとき、測定位置は砥石幅の中央部で、砥石周方向に60°ずつ6箇所とし、1箇所につき周方向に連続した4画面をサンプリングしている。

#### 4.4 研削にともなう砥石作業面の変化

研削実験はCBNC140N75B砥石を用いて定切込み湿式プランジ研削方式で行い、工作物には焼入れしたダイス鋼SKD11を使用した。実験条件は、砥石速度 $v_s=25$  m/s、工作物速度 $v_w=10$  m/min、切込み $a=10$   $\mu$ mである。

図10～図12に研削加工にともなう砥石作業面の変化を単位幅研削量 $V_w'$ の関係で示す。図10より、砥粒密度 $G$ はほぼ一定であることから砥粒の脱落は極めて少ないことがわかる。また、図10、図11両図より、切れ刃密度が増加して連続切れ刃間隔が減少していることから、砥粒先端の微小破壊によって切れ刃数が増加していることもわかる。そして、同時に切れ刃面積率 $\eta$ が徐々に増加していることから、砥粒先端の微小破壊によって増加した切れ刃先端が摩滅摩耗していることが推察される。この結果はドレス後の研削初期における砥石作業面の変化を測定したのものであるが、砥石の過渡的な変化を精度よくとらえていることが確認できる。なお、図11において、触針法で得られた値が画像処理法の結果よりも小さくなっているが、これは研削に関与しない無効切れ刃もカウントしているためである。ただし、幾何学的な考察により、砥粒と接触すると考えられる切れ刃のみ算出することも可能である。

以上の結果より、本手法は精度よく砥石作業面上の切れ刃の変化過程を評価することができる。

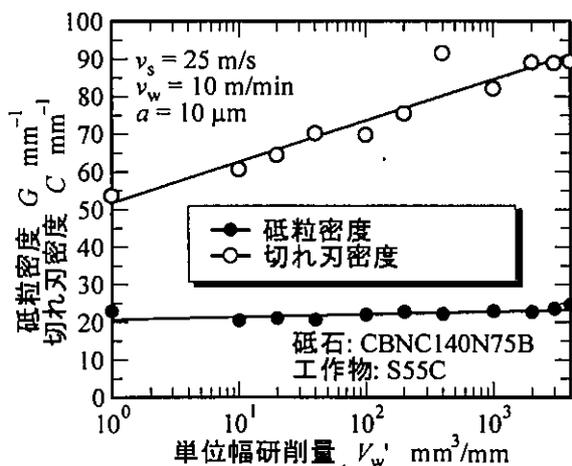


図10 研削における砥粒密度と切れ刃密度の変化

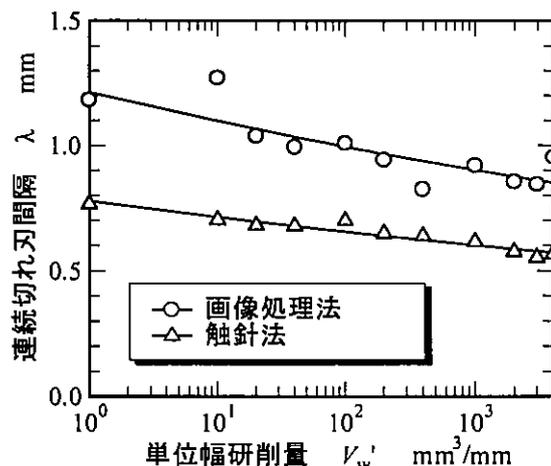


図11 研削における連続切れ刃間隔の変化

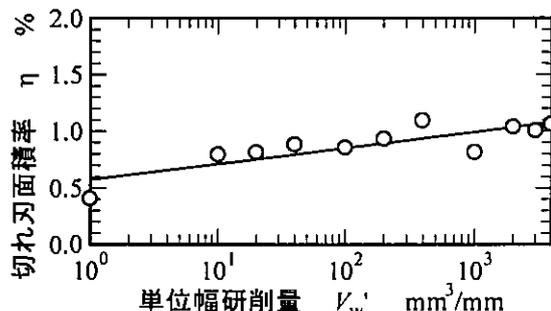


図12 研削における切れ刃面積率の変化

## 5. 研削音による砥石作業面の評価

研削加工中に発せられる研削音は、砥石作業面の状態を反映する重要な情報源であるが、研削音から砥石表面の幾何学的なパラメータ—砥粒形状や切れ刃の高さなど—を直接求めることは難しい。そこで動的評価については、あらかじめ基準となる幾つかの砥石作業面を生成し、それらによって発せられる研削音を基準信号として、実際の研削時の発生音を識別する手法を考案した。

### 5.1 基準となる砥石作業面の生成

基準となる砥石作業面を生成するため、表1に示す5種類のドレス条件で砥石の目直しを行った。図13は表1に示す各ドレス条件に対応した研削抵抗と工作物仕上げ面粗さを示したものである。状態(1)と(2)の仕上げ面粗さについては明確な違いはみられないものの、おおむね段階的に異なった状態の砥石作業面が生成されていることが推察される。

### 5.2 実験手順

図14に実験装置を示す。表1に示す5つの砥石状態の下で、S55Cの1パスプランジ研削を行い、その時の研削音を精密騒音計で、研削抵抗を動力計で測定する。なお、動力計の振動挙動が研削系の振動特性に影響を及ぼすことを考慮して、図14に示すよう

ドレス条件 $N_d$	ドレス送り $s_d$ $\mu\text{m}/\text{rev}$
(1)	10
(2)	20
(3)	50
(4)	100
(5)	200

砥石速度:  $v_s = 25$  m/s  
ドレス: 単石円錐ダイヤモンド

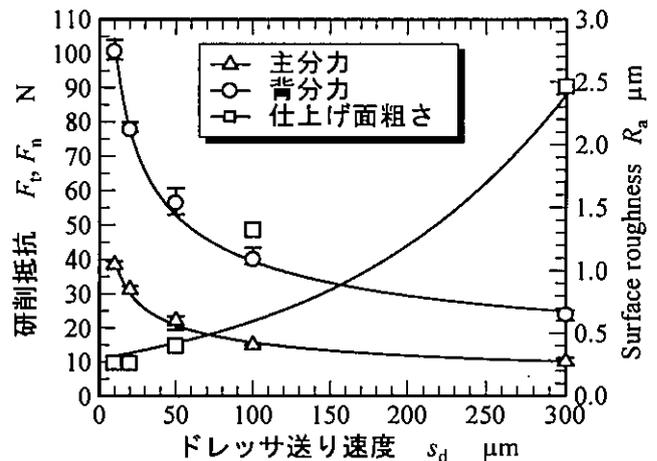


図13 ドレス条件による研削抵抗と仕上げ面粗さの変化

砥石	A60K7V
工作物	JIS S55C
砥石周速度 $v_s$	25 m/s
工作物速度 $v_w$	10 m/min
切り込み $a$	10 $\mu\text{m}$
研削液	ソリューション

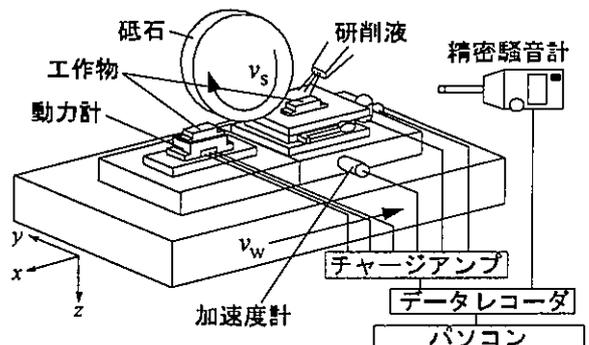


図14 実験装置

に、研削音の収集は動力計とは別の剛性の大きい電磁チャックに固定した工作物を研削して行った。表 2 に実験条件を示す。

### 5.3 ニューラルネットワークによる砥石作業面状態の識別

基準となる砥石作業面状態から発せられる研削音の周波数曲線信号をニューラルネットワークによって学習し、実際の研削音をこれらの状態に識別することを試みた。なお、実際の学習は学術計算ソフト MATLAB®(サイバネットシステム株)を用いて、パーソナルコンピュータ上にソフトウェアネットワークを構築して行った。ニューラルネットワークの構成を図 15 に示す。入力信号は、研削音の周波数成分 6~10kHz の範囲における 20Hz 毎の 201 個の SPL 値と基準状態の数  $k$  (在来砥石では  $k=5$ ) からなる 201 行  $k$  列の行列とし、出力信号は  $k$  行  $k$  列の対角行列とした。出力信号の数字 1 が出力される位置により、研削状態を識別する。ネットワークは階層型とし、学習アルゴリズムは誤差逆伝播法 (EBP 法) とした [4]。

学習比、隠れ層セル数については、実際に学習実験を行うことにより最適な値を見つけただす必要がある。本実験では隠れ層セル数 50~400 (50 毎)、学習比を 0.0005~0.004 と変えてネットワークの収束に必要な学習回数を測定した。ネットワーク収束の目標値は、出力信号と教師信号の平均自乗和誤差が 0.1 (最大学習エポック数を 5000) とした。表 3 にネットワークの諸元を示す。

### 5.4 実験結果

#### 5.4.1 基準作業面の識別

図 16 は研削音の周波数曲線信号を教師信号とするニューラルネットワークの学習結果を示したものである。隠れセル数が約 100 個から学習が収束し始め、200 個を越えると学習比の値に関わらずネットワークは収束している。また、学習比の増加にともない収束に要するエポック数が減少し、0.003 付近で学習回数が最小になり、それ以上大きくするとネットワークは収束しなくなる [4]。全体として、学習比 0.001~0.004、隠れ層セル数 100 以上でネットワークは安定して収束しており、研削音をうまく識別していると言える。

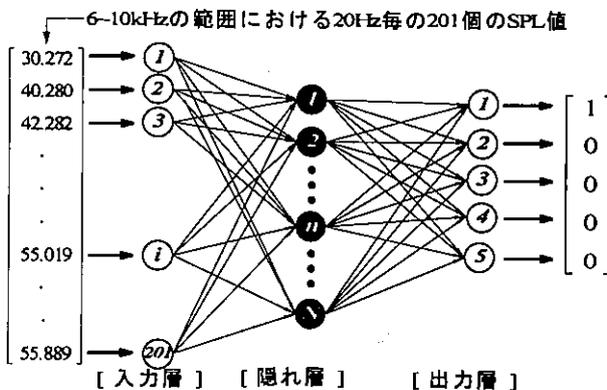


図 15 ニューラルネットワークの構造

表 3 ニューラルネットワークの諸元

ネットワーク構造	階層型
学習アルゴリズム	誤差逆伝播法 (EBP)
隠れ層数	1
セルタイプ	静的アナログモデル
伝達関数	シグモイド関数
入力層セル数	201
隠れ層セル数	50 - 400
出力層セル数	5
学習比	$5 \times 10^{-4}$ - $4 \times 10^{-3}$
最大学習回数	5000
学習目標	平均二乗和誤差 0.1 以下

表4は実際の研削音を識別した結果である。実験は表2に示す条件で再度ドレスを施した砥石を用いて10回の研削を行い、最頻値の結果にはハッチングを施している。すなわち、状態(1)の砥石は10回中9回が状態(1)と正しく識別され、10回中1回が状態(2)と誤って認識されたことになる。識別結果を見ると、どの状態も識別率が6/10以上となっており、精度よく識別ができていることがわかる。ただし、状態(2)の音は状態(1)と識別された。この原因としては、両者の仕上げ面粗さに差がないことから、実際の砥石作業面も大きな違いがないものと考えられる。以上のことから、10回程度研削を行い、その識別結果の最頻値を砥石作業面状態として出力するようなシステムを構築することにより、砥石作業面の識別は十分可能であるといえる。

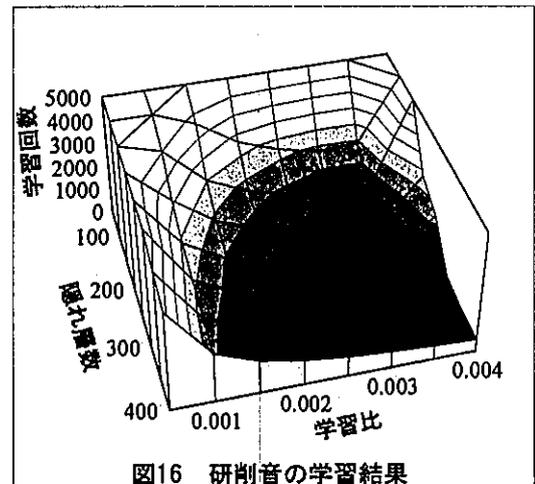


図16 研削音の学習結果

表4 基準砥石作業面の識別結果

入力信号		識別結果 (識別実験10回)				
$N_d$	$s_d(\mu\text{m/rev})$	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
(1)	10	9	1	0	0	1
(2)	20	8	2	0	0	0
(3)	50	0	1	7	2	0
(4)	100	3	0	1	6	0
(5)	300	0	0	0	0	10

#### 5.4.2 摩耗砥石の評価

本節ではネットワークの追従性を検証する。ドレスによって形成した基準状態の砥石作業面は、状態(5)から状態(1)の順に変化するに従って砥粒先端がフラットに変化していると考えられる。一方、研削加工を続けると砥粒摩耗が進行して砥石作業面が徐々にフラットになるであろう。そこで、状態(4)でドレスした砥石を研削して摩耗を進行させ、本ネットワークが砥石作業面の変化をどのように識別するかを確かめた。ここで、砥石の摩耗は焼入れしたS55C(HV900程度)を研削することで進行させた。ただし、研削音を収集する際には、前節と同様に通常のS55Cをプランジ研削して行った。

表5 摩耗砥石作業面の識別結果

入力信号	識別結果 (識別実験10回)				
$V_w(\text{mm}^3)$	(1)(2)	(3)	(4)	(5)	
0 ( $N_d=(4)$ )	0	0	8	2	
845	1	1	8	0	
1690	1	0	8	1	
2535	3	2	5	0	
3380	4	6	0	0	
4225	7	2	0	1	
5070	6	4	0	0	

研削量  $V_w$  とともに変化する研削音をネットワークに入力した結果を表5に示す。なお、ここでは状態(1)と(2)の区別は難しいことから、これらを1つの状態として識別した。表のハッチングは識別結果の最頻値を示している。また、 $V_w=0\text{mm}^3$  は条件(4)でドレスした直後の結果である。表4より、研削量が増加するにしたがって、識別結果は状態(4)→状態(3)→状態(1)/(2)の順にシフトしていることがわかる。これは、砥石作業面が徐々に摩耗してフラットな状態になるために、研削音がドレス送りが低速な場合の研削音と似ていくためと考えられる。このことから、作成したネットワークには、学習した基準状態だけでなく、砥石の摩耗状態をも認識する能力があるといえる。ただし、研削抵抗や仕上げ面粗さは必ずしも識別結果に応じて変化しておらず、今後の課題である。

## 6. 結 言

触針法および画像処理手法によって、ドレス時や研削加工に伴う砥粒切れ刃の変化過程を精度よく測定することができる。一方、在来 A 系砥石を用いた研削加工において、ドレス条件を変化させて異なる作業面を生成した場合、ニューラルネットワークを用いた研削音の解析により、その作業面の状態を識別することが可能である。また、摩耗状態の砥石作業面性状での研削音を入力した時にも、ネットワークは妥当な識別結果を示した。以上のことから、本手法には柔軟性があり、砥石作業面のインプロセス評価に対し有効な手段と言える。測定精度などに課題が残るものの、本手法を用いることによって砥石作業面を常に最適な状態に維持しながら研削加工を行うことが可能であり、研削作業の最適化を図る上で大きな成果が得られたものと言えよう。

今後も本研究を継続して行う予定である。

## 参 考 文 献

- [1] Verkerk, J.: Final Report Concerning CIRP Cooperative Work on the Characterization of Grinding Wheel Topography, Annals of the CIRP, 26/2, 1977, pp.385–395.
- [2] Hosokawa, A., Yasui, H. and Nagae, Y.: Characterization of Grinding Wheel Surface by Means of Image Processing, Proc. IMACS Multiconf. on Computational Eng. in Systems Applications, 1996, pp.428–432
- [3] Hosokawa, A., Sakuma, K. and Takashi, U.: In Situ Characterization of Grinding Wheel Surface, Proc. of 14th Amer. Soc. Prec. Engg. Annual Meeting, 20, 1999, pp.99–102.
- [4] Uesaka, Y.: Fundamental Mathematics for Neurocomputing, Kindaikagaku-sha, 1997.

## あ と が き

本研究の遂行にあたり砥石および研削液の供給をいただきましたノリタケダイヤ株式会社、株式会社ミズホ、ユシロ化学工業株式会社、日本グリース株式会社に感謝いたします。

なお、次頁以降に研究発表(学会誌、口頭発表)の原稿を示す。