砥石作業面トポグラフィに基づく目づまり挙動の評価*

坂本 治久** 清水 伸二** 加藤 大二郎***

Evaluation of Loading Behaviour of Grinding Wheel Based on Working Surface Topography

Haruhisa SAKAMOTO, Shinji SHIMIZU and Daijiro KATO

Loading behaviour of the grinding wheel is investigated based on working surface topography. For on-machine measurement of working surface profile, the laser micrometer is directly fitted on the wheel head of CNC surface grinder. Mild steel (S15C) easy to load is ground with an aluminum oxide grinding wheel (WA60J7V). From the comparison of profile and micro-observation of working surface, the following results are obtained. There are two types of loading, deposition type loading is caused by the chip deposited in the chip pocket and welding type loading is caused by the chip welded on the cutting edge. With the progress of loading, the relative frequency distribution of working surface profile which we newly proposed shows changes in its pattern, firstly whole of the distribution shifts to the plus direction of the amplitude, and secondly the relative frequency of the higher region of the amplitude increases. The shift of the distribution corresponds to the progression of deposition type loading and the profile change of the distribution corresponds to the progression of welding type loading. These changes are distinctive, then qualitative evaluation of the loading is possible.

Key words. grinding wheel, loading, working surface, topography, working surface profile, on-machine measurement

1. 緒 言

研削加工は、精密機械加工の中でも特に高い精度を要求される仕上加工法のひとつである。その加工精度ならびに加工能率を良好な状態に保ち続けるためには、加工中を通して常に研削砥石の作業面を良好な状態に維持し続けなければならない。これを実現するためには、的確に砥石寿命を判定し、適切なドレッシングを行う必要がある。このように砥石作業面状態の制御を適切に行うためには、ドレッシング技術の向上に加え、作業面状態の定性的・定量的評価技術の確立が不可欠である。

研削砥石の作業面状態については、従来、研削抵抗に基づいて監視することが行われている。しかし、研削抵抗は工作物材質や加工条件に大きく左右されるため、これを用いて作業面状態を評価するためには十分に予備的な検討を行っておくことが必要となる。一方、作業面トポグラフィは作業面の形態そのものであるため、これを用いることにより工作物を含めた加工条件に依存しない作業面状態の普遍的な評価を行うことが可能になると思われる。

従来、作業面トポグラフィに関しては、研削プロセスあるいはドレッシングプロセスのメカニズムの解明を目的とした検討が多く、研究者により行われてきた¹⁾。例えば光切断法を用いた検討²⁾やSEMによる作業面形状の観察³⁾⁴⁾、触針法による作業面粗さの測定⁵⁾あるいは引っかき法による測定⁶⁾などがある。また最近では、光学的な非接触形状測定法を応用した超砥粒ホイールの3次元作業面トポグラフィ測定^{7)~9)}についても報告されている。一方、作業面状態のモニタリングへの適用を指向した検討例もある。例えば、光電子増倍管を用いた目づれ切れ刃のインプロセス測定¹⁰⁾、渦電流計を用いた目づまりのインプロセス測定¹¹⁾あるいはレーザ反射光のスペクトルパターンに基づいた砥粒分布の評価¹²⁾などが既に報告されている。

さて、研削の進行に伴い砥石の作業面は目づれ状態、目づまり状態あるいは目こぼれ状態へと変化する。これらの変化のうち、目づまり過程に関する評価はあまり多くない。これに関連する従来の検討例としては、例えば分光分析法を用いた検討¹³⁾、 β 線後方散乱に基づいた検討¹⁴⁾あるいは渦電流計を用いた検討¹¹⁾などがあるが、分光分析法を用いた検討はドレッシングくずに含まれる工作物材料を分析しているため研削の進行に伴う変化を評価できておらず、また β 線の後方散乱を利用した検討および渦電流計を用いた検討は切りくずの残存した面積あるいは残存量は測定しているが、切りくずが作業面の半径方向断面のどこにどのように残存しているかを明らかにできていない。したがって、これらの方法では切りくずの目づまり形態とその研削の進行に伴う変化挙動は明らかにできていないと言える。

そこで本研究では、オンマシン測定した作業面トポグラフィの変化挙動に基づいて目づまりの発生形態を明らかにするとともに、目づまり挙動を従来の方法に比べてより定性的・定量的に評価する方法を提案し、その妥当性を明らかにする。

2. 実験装置および方法

図1は、実験装置の構成を示している¹⁵⁾。研削砥石の作業面プロファイルの変化をオンマシン測定するために、高速レーザ変位計をCNC横軸平面研削盤の砥石頭に取り付けた。このレーザ変位計は、PSDセンサを用いた三角測量式の変位計であり、反射光量の変化に基づいて測定する方式とは異なり、反射光の経路および光量に依存しない。それゆえ、砥粒と結合剤の複合的構造を有する研削砥石の作業面プロファイルおよびその変化を測定することができる。また、表1に示すように、 $\pm 1 \mu\text{m}$ の高い測定精度（繰返し性および直線性）と $\pm 200 \mu\text{m}$ の広い測定範囲をあわせ持っている。なお、本実験で用いたレーザ変位計のスポット径は $15 \mu\text{m}$ であるが、スポット径のより小さな変位計であれば、さらに微粒な砥石の作業面プロファイルの測定が可能であると思われる。研削砥石のフラン

* 原稿受付 平成9年10月28日

** 正会員 上智大学理工学部（東京都千代田区紀尾井町7-1）

*** 学生会員 上智大学大学院（現、キャノン(株)裾野市深良4202）

Fig. 1 Setup for on-machine measurement of working surface profile

Table 1 Specification of the laser micrometer

Measuring range	400 μm ($\pm 200 \mu\text{m}$)
Repeatability	$\pm 0.2 \mu\text{m} + 0.2\%$ FS
Linearity	$\pm 0.2 \mu\text{m} + 0.2\%$ FS
Stability	$\pm 0.4 \mu\text{m} + 0.2\%$ FS (10 h, $\pm 1^\circ\text{C}$)
Work distance	10 ± 1 mm
Response frequency	100 kHz
Laser spot diameter	15 μm (at focus point)

Table 2 Grinding and dressing conditions

Grinding machine type	CNC horizontal surface grinder
Grinding wheel	WA 60 J 7 V (ave. grain dia. = 250 μm)
Workpiece material	Mild steel (S 15 C)
Dressing condition	
Dresser type	Single point diamond
Wheel speed	30 m/s (1 800 m/min)
Dressing lead	0.125 mm/rev (1/2 grain dia./rev)
Depth of cut	20 μm /pass $\rightarrow$ 10 μm /pass $\rightarrow$ 5 μm /pass $\rightarrow$ spark out
Grinding condition	
Grinding type	Wet plunge grinding
Wheel speed	30 m/s (1 800 m/min)
Table feed rate	0.3 m/s (18 m/min)
Depth of cut	2 μm /pass

ジ部には微小金属片を接着し、これを渦電流式変位センサにより検出してトリガ信号を発生させ、砥石の回転に同期した作業面プロファイル測定を可能にした。回転に同期した測定の目的は、作業面上の同一箇所のプロファイルを研削の進行中に継続して追跡することにより、作業面上での砥粒やチップポケットの形状変化を測定するためである。信号処理系は、各測定器の変換器、FFTアナライザおよびパーソナルコンピュータにより構成した。レーザ変位計からの出力信号は、FFTアナライザを介して、パーソナルコンピュータに転送し、パーソナルコンピュータ上ですべての信号処理を行った。

表2は、研削条件およびドレッシング条件を示している。研削砥石は、平均砥粒径が250 μm のWA 60 J 7 Vを用いた。工作物は、硬度が低く目づまりの生じやすい軟鋼(S 15 C)とした。ドレッシングは、単石ダイヤモンドドレッサを用い、送り量は平均砥粒径の1/2に相当する125 $\mu\text{m}/\text{rev}$ とした。最初に切込み量20 $\mu\text{m}/\text{pass}$ でドレッシングを行い前回の研削の影響を受けた作業面を完全に除去し、その後切込み量を10 $\mu\text{m}/\text{pass}$ で4回、5 $\mu\text{m}/\text{pass}$ で4回ドレッシングを行い、最後にス

Table 3 Measuring condition of working surface profile

Sampling interval	43 μm (1/6 ave. grain dia.)
Sampling frequency	128 kHz
Wheel speed	5.56 m/s

パークアウトを3回行った。研削は、ソリューションタイプの研削液を用いて、湿式プランジ研削を行った。砥石周速度は30 m/sとし、テーブル送り速度は0.3 m/s (18 m/min)とした。切込み量は、予備実験により比較的目的ぶれや目こぼれが起きにくかった2 $\mu\text{m}/\text{pass}$ に設定した。

表3は、作業面プロファイルの測定条件を示している。作業面上での砥粒の変化挙動を追跡するために、サンプリング間隔を平均砥粒径(250 μm)の約1/6に相当する43 μm に設定した。また、レーザ変位計の応答周波数を考慮してサンプリング周波数は128 kHzとし、砥石周速はサンプリング間隔およびサンプリング周波数より5.56 m/sに設定した。なおレーザ変位計は、研削開始前に初期の作業面プロファイルの高さが測定範囲の中央にくるように位置決めして振幅の0 μm の位置を定めた。また、研削中はレーザ変位計を固定しておくことにより、砥石摩耗量を含めて測定できるようにした。

研削時には、作業面プロファイルのほかに研削抵抗と加工面粗さを測定した。研削抵抗は圧電式研削抵抗測定器を用いて測定し、また加工面粗さは研削量100 mm^3/mm ごとに算術平均粗さを測定した。さらに、500倍の対物レンズを付けたビデオマイクロスコープをテーブル上に設置して、作業面状態を顕微鏡観察した。

3. 実験結果とその考察

3.1 目づまり形態の観察

図2は、研削開始直後(研削量20 mm^3/mm)、研削初期(研削量100 mm^3/mm)および研削後期(研削量1000 mm^3/mm)における砥石円周上の同一箇所の作業面プロファイルの測定結果を示している。同図によると、谷部は研削の進行に伴って上方にシフトし、浅くなった。また150 μm 近くのピークは、研削の進行に伴い最終的にピーク高さが約150 μm で一定になり、また砥石円周上位置約3.5 mmのピークのように砥石外周に相当するピーク部は砥石円周方向に広がる変化を示した。このような谷底の上昇およびピークの成長は、プロファイルの測定範囲の全域で確認された。

Fig. 2 Profile change of working surface in progress of grinding

Fig. 3 Microphotographs of working surface after grinding mild steel

一方図3は、図2の研削後期（研削量 $1000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ ）に対応する砥石作業面の顕微鏡観察結果を示している。図3(a)は、チップポケット部の様子を撮影した写真である。同写真には、中央の砥粒の周辺にカールした切りくずがからみ合って堆積していることがわかる。この場合、切りくずは砥粒による切削作用時のカールした状態を保ったままで堆積しており、押し潰されたような様子は観察されていない。このことは、チップポケットに堆積した切りくずと加工面との接触は生じていないことを意味している。このようなチップポケットでの切りくずの堆積は、作業面プロファイルの谷部が浅くなる変化に対応している。

また図3(b)は、焦点位置を作業面の最外周の切れ刃高さに合わせた際の作業面の観察結果である。これを見ると、中央の砥粒のやや左よりの切れ刃領域に、筋状の条痕のついた切りくずが溶着していることがわかる。これは、切れ刃として作用する砥粒の微細な凹凸部に切りくずが付着し、加工面と擦れ合うことにより溶着したものと考えられ、目づまりの一形態として定義付けられる。研削量 $1000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ の状態では、切れ刃の多くに切りくずの溶着が観察された。切りくず溶着部では、切りくずが平坦な面を形成している様子が観察されるが、これは溶着した切りくずが加工面と擦れ合ったことに起因していると考えられる。

図2において、ピークが円周方向に広がる変化が示されている。これは、砥粒上で切りくずが加工面との接触により押し潰されて平坦化することに対応するものと思われる。

ところで、砥石作業面上では砥粒切れ刃は空間的にランダムな位置に存在しており、レーザ変位計により測定されるライン上に砥粒切れ刃の頂点が一直線に並ぶ確率は低いと思われる。したがって、レーザ変位計が切れ刃として作用する砥粒上を測定した場合でも、そのピーク高さは切れ刃頂点の高さと等しいとは限らず、むしろ切れ刃頂点より高さの低い位置を測定している場合が多いと考えられる。

図2において、高さが $150 \mu\text{m}$ より若干低いピークは、高さが増加し最終的に約 $150 \mu\text{m}$ でそろって傾向を示している。これは、レーザ変位計が切れ刃頂点近傍を測定しているために、切りくずの溶着により、プロファイル中のピーク高さが砥石外周と等しくなるまで増加することを表している。

3.2 作業面トポグラフィと研削抵抗、加工面粗さの関係

図4は、研削に伴う法線研削抵抗の変化を示している。研削抵抗は、研削量 $100 \text{ mm}^3/\text{mm}$ までは減少し、その後は増加に転じ、研削量 $550 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 以降ではほぼ一定となった。

ここでまず、研削量 $100 \text{ mm}^3/\text{mm}$ までの領域での研削抵抗の減少について考察する。図5は、作業面プロファイル中の

Fig. 4 Variation of grinding force with progress of grinding

Fig. 5 Decrease in peak elimination rate of working surface profile with progress of grinding

ピークの減少率の変化を示している。ピークの減少率は、連続する研削工程に対して測定した2つの作業面プロファイルに対して、研削後に欠落したり高さが低下したピーク数を計数し、その間の研削量および測定長さ 44 mm で除して求めた。なお、ここでピークとは、評価したプロファイルに含まれるすべてのピーク、すなわち砥粒および結合材により形成されるすべてのピークのことである。ピーク高さが低下したりピークそのものが欠落するという現象は砥粒の破砕や脱粒といった現象と対応するものが多く、ピークの減少率が大きいということは砥粒の破砕や脱粒といった現象が多く生じたことに相当するものと考えられる。同図によると、ピークの減少率は研削開始から研削量 $90 \text{ mm}^3/\text{mm}$ までは急激に減少し、その後ほぼ一定の小さな値を示した。これは、研削の初期に砥粒の破砕や脱落などが頻繁に起き、その後安定状態に達することに対応しているものと思われる。すなわち、研削初期の研削抵抗の低下は、初期摩擦耗により有効切れ刃数が減少したことによるものと推定できる。

一方図6は、研削に伴う加工面の算術平均粗さの変化を示している。加工面粗さは、研削量 $600 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 付近までは急速に増加し、その後はほぼ一定値に収束する傾向を示した。なお研削量 $700 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 以降の加工面には研削焼けが観察された。

ここで、溶着形目づまりの進行が研削抵抗および加工面粗さに及ぼす影響について検討する。溶着形目づまりが生じた部分は切れ刃高さに近いピーク高さを示すことから、プロファイルの振幅にしきい値を設定し、それより上にあるピーク数の変化を求めて評価する。図7は、しきい値を砥石最外周から平均砥粒径の約 $1/3$ 下方の $60 \mu\text{m}$ として、研削に伴うピーク数の変

Fig. 6 Variation of surface roughness with progress of grinding

Fig. 7 Increase in higher peak number of working surface profile with progress of grinding

化を求めた結果を示している。同図によると、ピーク数は研削量 $500 \text{ mm}^3/\text{mm}$ までは急速に増加し、その後は一定値に収束する傾向を示した。この変化挙動は、研削量 $100 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 以降の研削抵抗および加工面粗さの変化と良く一致している。このことは、溶着形目づまりの増加が研削抵抗および加工面粗さに影響を与えることを示しており、溶着した切りくずが加工面と擦れ合うことによっていると考えられる。また、切りくずと加工面の擦れ合いは加工面の温度上昇を引き起こすと考えられ、これが研削焼けの原因になったと思われる。

3.3 目づまり挙動の評価法

(1) ピーク数による溶着形目づまりの評価

溶着形目づまりの進行はプロファイル中の高さの高いピークの増加と対応する。先に示した図7は、これに基づいて溶着形目づまりの増加を定量的に評価したものであり、高さの高いピーク数の変化挙動は研削抵抗および加工面粗さの変化と傾向が非常に良く一致している。このことは、適切なしきい値を設定してピーク数を計数することにより溶着形目づまりの増加による砥石寿命を判定できる可能性があることを示している。しかし、この評価法を適用するためには、ピークを選択するためのしきい値の合理的な設定法を確立する必要がある。

(2) 相対度数分布パターンによる評価

作業面プロファイルの振幅に対する相対度数分布を次のように求めた。まず、作業面プロファイルの振幅 $\pm 200 \mu\text{m}$ をクラス幅 $1 \mu\text{m}$ の計 401 個のクラスに分割し、それぞれの振幅クラスに含まれる測定値の度数を総測定点数で割った相対度数を求めた。作業面全体の特性を評価するために砥石外周のほぼ1周

Fig. 8 Profile change of relative frequency distribution with progress of grinding

分に相当する 16 384 点のデータを取り込んだ。

図8は、研削開始前、研削初期（研削量 $100 \text{ mm}^3/\text{mm}$ ）および研削後期（研削量 $1000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ ）の3条件の相対度数分布を示している。同図によると、まず相対度数分布全体が振幅の正方向にシフトしていることがわかる。この変化は研削の初期から生じており、また作業面プロファイルの谷部に対応する振幅領域を含めて生じていることから、堆積形目づまりの進行に相当すると考えられる。

さらに研削の後期では、砥石の外周部に相当する振幅 $100 \mu\text{m}$ 付近を中心とした領域の相対度数が増加して、分布曲線が盛り上がってくるのが分かる。この変化は、作業面プロファイルにおいて高さの高いピークが増加することと対応しており、溶着形目づまりの進行を示す変化パターンと考えられる。なお、この変化は研削量 $500 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 以降に顕在化しはじめた。

以上のように相対度数分布の特徴的なパターン変化は、目づまりの進行とよく対応している。したがって、相対度数分布の変化をパターン認識することにより、定性的に目づまりの進行を把握できるとともに、目づまりに伴う砥石寿命の判定が可能になるものと考えられる。

(3) 相対度数分布変化の定量化による評価

前項の検討より、2種類の目づまり形態は相対度数分布においては異なった変化挙動を示すと考えられる。したがって、この相対度数分布の変化から、それぞれの目づまり形態に対応する変化パターンを抽出して評価することにより、それぞれの目づまり形態の進行度合を定量的に把握できる可能性がある。

まず堆積形目づまりの進行を、相対度数分布の振幅の正方向へのシフト量により評価することを試みる。相対度数分布のシフト量は、作業面プロファイルの平均値の変化より求めることができる。図9は、研削の進行に伴う相対度数分布のシフト量の変化を示している。相対度数分布のシフト量は研削の進行に伴い増加するが、その増加速度は研削が進むにつれて小さくなる。この増加速度の減少は、チップポケットの穴底がすぼまった形状をしているため、時間当たりの切りくず量が一定とすると、目づまりが進行していくにつれて堆積速度が鈍るためと思われる。以上より、相対度数分布のシフト量の変化により堆積形目づまりの進行が評価できるものと考えられる。

一方、溶着形目づまりの増加は、相対度数分布の振幅の大きい領域の相対度数を増加させ、分布形状の変化を生じさせる。そこで、作業面プロファイルから直流成分を除去した後に相対

Fig. 9 Increase in shift of relative frequency distribution with progress of grinding

Fig. 10 Variation in deviation of relative frequency distribution with progress of grinding

度数分布を求め、式(1)により研削前後の相対度数分布の振幅正領域での分布形状の変化量 δ を求めた。

$$\delta = \int_0^{\infty} |P(x) - P_0(x)| dx \quad (1)$$

ここで、 x ：作業面プロファイルの振幅、 $P_0(x)$ ：研削前の作業面プロファイルの相対度数分布、 $P(x)$ ：研削後の作業面プロファイルの相対度数分布。(ただし $P_0(x)$ 、 $P(x)$ ともに作業面プロファイルから直流成分を除去した後に相対度数分布を求める。)

これにより、相対度数分布から堆積形目づまりの影響を除去して分布形状の変化を抽出することができるようになる。

図10は、研削量と相対度数分布の分布形状の変化量 δ の関係を示している。 δ は研削開始から研削量200 mm³/mmまではほぼ一定の値を示し、その後急速に増加し、研削量600 mm³/mm以降はほぼ一定となる。3.2節の検討によると、研削の初期には初期摩耗による砥粒の脱落が生じているが、変化量 δ は研削初期にはほとんど変化していない。したがって、 δ は初期摩耗に対しては感度が低く、影響を受けにくいことがわかる。一方、研削量200 mm³/mm以降では δ が急速に増加する傾向を示しているが、これは δ が溶着形目づまりの進行を感度良く表しているものと考えられる。この研削量200 mm³/mm以降での δ の増加は、研削抵抗および加工面粗さの増加と変化傾向がよく一致し、研削量600 mm³/mm付近ではほぼ収束することも共通している。したがって、この相対度数分布の分布形状の変化量 δ を評価することにより、研削砥石の溶着

形目づまり状態を監視することが可能になるものと考えられる。

4. 結 言

高速レーザ変位計を砥石頭に直接設置することにより、研削砥石の作業面プロファイルをオンマシン測定し、それに基づいて目づまりに伴う作業面状態の変化挙動を評価した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 軟鋼の研削における堆積形目づまりおよび溶着形目づまりの発生形態を顕微鏡観察および作業面プロファイルの変化挙動と対応づけて明らかにすることができた。溶着形目づまり部は、溶着した切りくずが加工面と擦れ合うことにより、研削抵抗および加工面粗さに影響を与える。
- (2) 作業面プロファイル中の高さの高いピーク数の変化により、溶着形目づまりの進行を評価できる。
- (3) 作業面プロファイルの相対度数分布は、目づまりの進行に伴い、(a)分布全体の振幅正方向へのシフト、(b)振幅の高い領域での分布曲線の盛り上がりという2つの特徴的な変化パターンを示す。この分布パターンの変化より目づまりの進行を定性的に評価できる。
- (4) 相対度数分布のシフト量は堆積形目づまりの進行と対応し、相対度数分布の振幅正領域の分布形状の変化量 δ は溶着形目づまりの進行と対応する。

謝 辞

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金(平成9年度、奨励研究A、課題番号09750149)を得て行われた。また、ご協力をいただいたアマダワシノ(株)、(株)アンリツおよび三井研削砥石(株)に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) J. Verkerk : Final Report Concerning CIRP Cooperative Work on the Characterization of Grinding Wheel Topography, Ann. CIRP, **26**, 2, (1977) 385.
- 2) 津和秀夫：研削における砥粒の挙動について(第1報), 精密機械, **26**, 4 (1960) 199.
- 3) Y. Matsuno, H. Yamada, M. Harada and A. Kobayashi : The Microtopography of the Grinding Wheel Surface with SEM, Ann. CIRP, **24**, 1, (1975) 237.
- 4) 武野伸勝, 長岡振吉：精密研削中の砥粒切れ刃の電子顕微鏡による追跡, 精密機械, **30**, 1 (1964) 38.
- 5) M. C. Shaw and R. Konianduri : The Role of Stylus Curvature in Grinding Wheel Surface Characterization, Ann. CIRP, **25**, 1, (1977) 139.
- 6) 松井正己, 庄司克雄：研削砥石の有効切れ刃に関する研究, 精密機械, **34**, 11 (1968) 743.
- 7) I. Inasaki : Grinding Process Simulation Based on the Wheel Topography Measurement, Ann. CIRP, **45**, 1, (1996) 347.
- 8) 垣野義昭, 松原 厚, 山路伊和夫, 松田健嗣, 中川平三郎, 廣垣俊樹, 喜田義宏：砥石作業面トポグラフィのオン・ザ・マシン計測に関する研究(第1報), 精密工学会誌, **63**, 2 (1997) 228.
- 9) 細川 晃, 安井平司, 鐘尾幸久, 佐藤 郁：画像解析による砥石作業面の評価(第1報), 精密工学会誌, **62**, 9 (1996) 1297.
- 10) 須藤徹也, 和井田 徹, 佐田登志夫：研削加工における砥石作業面のインプロセス測定, 精密機械, **36**, 10 (1970) 676.
- 11) 小尾 誠, 辰巳洋二, 佐田登志夫：研削加工における砥石目づまりのインプロセス測定, 精密機械, **39**, 10 (1973) 1062.
- 12) 三好隆志, 北村俊幸, 村上光平, 斎藤勝政：スペクトルパターンを用いた砥石作業面性状のインプロセス測定システムの開発, 精密機械, **49**, 10 (1983) 1428.
- 13) 佐田登志夫, 中島 澄, 吉川弘之：分光分析法による研削砥石の目づまりの測定, 精密機械, **26**, 10 (1960) 607.
- 14) 例えば重松日出見：研削砥石の目づまりの研究(I), 精密機械, **32**, 5 (1966) 364.
- 15) 坂本治久, 清水伸二：砥石作業面状態オンマシン評価システムの試作とその評価, 1997年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (1997) 465.