研削加工における砥粒切れ刃群の逃げ面摩耗検出器*

—高能率精密円筒プランジ研削の適応制御の研究(第2報)—

須藤徹也** 井上英夫** 和井田 徹*** 野口豊生** 玉高利一高**

A Newly Developed In-process Sensor for Detecting .
Active Grain Wear in Grinding Operation—Research on Adaptive Control of High Efficiency
Cylindrical Plunge Grinding (2nd Report)—

Tetsuya SUTO, Hideo INOUE, Tohru WAIDA, Hohsei NOGUCHI, Kazutaka TAMAKOHRU

A photo-electronic sensor has been newly developed for the real time detection of the collective behaviours of the active grain wear even at 60 m/s wheel speed. With this sensor, the growth of the spacially periodic wear of active grains has been experimentally investigated. When the initial wear land caused uniformly over the wheel working surface grows to a certain level, it changes into a striped pattern consisting of fractured and worn grains arranged alternately, inducing chatter vibration. The stripes decrease in number to a certain value with the progress of grinding, increasing the pitch. However, all pitches are not same even on the same wheel circumference, but are distributed into several different lengths. Through the simultaneous observations of the grain wear and the chatter vibration, the coincidence of their growth and period has been found. Thus, the possibility to identify the wheel surface conditions for the purpose of an adaptive control of grinding process has been verified.

1. ま え が き

研削砥石作業面上の砥粒切れ刃挙動に関しては、これまでの研究で、個々の砥粒切れ刃の追跡を目的としたセンサ¹⁾と、切れ刃挙動を解析するデータ処理システムを開発し²⁾、ドレッシングによる切れ刃の創成、研削中の切れ刃の摩耗や寿命の特性について、砥石粒度、ドレッシング条件、砥石切込み速度などとの関係でそれらの関数形を求出し、研削過程における切れ刃挙動を推定する基礎データを得た³⁾⁴⁾。さらに、その状態が広範囲に変化する砥石作業面の特性を把握し、砥石面状態を制御し、研削条件との最適な組合せが常に保たれるような適応制御研削の実現のために、砥石作業面状態を同定する実用性の高いセンサの開発を行った。それは60 m/sにおよぶ砥石周速のもとでも、砥粒切れ刃群の逃げ面摩耗挙動を検知できるもので、その原理、構成、および研削実験に適用した結果等について報告する。特に、砥石円周上にはほぼ等間隔にしま模様をなすように発生する砥粒切れ刃群の周期的摩耗現象について、その発生から成長、周

期や位相の変化などを追跡した結果を詳述する。

2. 検 出 器

2.1 測定原理と検出器の構成

本検出器は砥石作業面状態を規定する砥粒切れ刃挙動、砥石形状、砥石半径減量などの諸要素のなかで、切れ刃挙動の一表現である砥粒切れ刃群の逃げ面摩耗を検出するものである。砥粒は砥石内に立体的に分布しているが本検出器では研削により工作物と干渉した砥粒の摩耗平坦化部の砥石面への射影群を測定することになる。

検出器の構成および測定の原理を図1に示す。回転する砥石作業面を照射し、砥粒切れ刃先端の摩耗平坦部からの正反射光を顕微鏡、スリットを介して光電子増倍管で受け、光電変換された信号をカウンタ、積分器、周波数分析器などで定量し、砥石面上の摩耗した砥粒切れ刃群の密度、数、周期性などを検知するものである。この際、光電子増倍管の管面に入射する光エネルギーはスリット視野内に存在する切れ刃摩耗面積の総和、すなわちスリット視野内における切れ刃の逃げ面摩耗面積率に比例するので、光電子増倍管の出力もこれに比例したものとなる。したがって、砥石面円周方向に沿った砥粒切れ刃群の逃げ面摩耗面積率が時間進行とともに出力される

* 原稿受付 昭和51年2月12日。昭和50年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和50年11月22日)にて発表。

** 正会員 機械技術研究所(東京都杉並区井草4-12-1)

*** 機械技術研究所

図1 検出器の構成

図2 検出部の写真

光電信号によって表現される。

積分器は最小0.1秒（砥石3～4回転に相当）のゲートを持ち、スライスレベルより高い部分の面積積分（記号 Σa で表示）と、スライスレベルにおける出力信号の時間積分（記号 Σw で表示）を出力する。前者は切れ刃摩耗面積に相当し、後者は摩耗した切れ刃群の存在連続性に関する情報を与える。

砥石周速60 m/sにおいても切れ刃群の摩耗平面を測定できるための条件は、光電子増倍管の感度以上の光量が入射すること、光電変換系を含めた検出器の増幅・定量系が60 kHz程度まで減衰しない周波数応答特性を有することである。そこで、本検出器においては、個々の切れ刃を分解することを目的とせず、数個の切れ刃群

図3 バックグラウンドの強さと光電出力の計算例

を同時にスリット視野内におさめられるようにスリット視野面積を砥石面上で数 mm^2 と比較的大きくして、光電子増倍管への入射光量を確保した。そのため光電子増倍管は受光面の広いヘッドオン形のものを使い、アンプや積分器の周波数応答特性に注意を払った。砥石円周方向のスリット幅を広げるほど光量は増すが、円周方向の分解能は鈍くなるので測定目的に応じて調整する。

図2に検出部の写真を示す。

2.2 検出器の特性

発光ダイオードを周期的に発光させて入力とし、光電変換系・増幅系を含めた総合的な周波数応答特性を調べた。その結果、オペアンプのフィードバック抵抗が50～100 kΩで、砥石周速60 m/sにおよぶ測定速度においても十分な出力と周波数応答特性をもつことがわかった。また、積分器出力 Σa 、 Σw ともに入力信号の増加に対して非常にいい直線性をもっていることを確認した。

現実の砥石面は検出対象である砥粒切れ刃の平坦な摩耗面からの正反射光のほかに、結合剤や砥粒側面からの乱反射光などによりバックグラウンドが一定の明るさをもっていてノイズとして作用する。したがって、現実砥石面からの光電出力は砥粒切れ刃摩耗面からの光による成分と、切れ刃摩耗面以外のバックグラウンドからの光による成分の加算されたものとなる。すなわち、光電出力 $Y(V)$ は、 $A(\text{mm}^2)$ をスリット面積、 ϵ を切れ刃群の摩耗面積率、 $k_c(V/\text{mm}^2)$ を切れ刃摩耗面からの光電出力係数、 $k_b(V/\text{mm}^2)$ をバックグラウンドからの平均光電出力係数として、次式のように表示できる。

$$Y = A\epsilon k_c + A(1-\epsilon)k_b \quad (1)$$

図3は、光電出力係数 k_c と k_b の値により式(1)の出力 Y と面積率 ϵ の関係がどのようになるかを計算したものである。このようにバックグラウンドからの乱反射光が存在する $k_b \neq 0$ の現実砥石面を走査する場合でも、切れ刃摩耗面積率の1次関数として出力 Y を得ること

図4 切れ刃群摩耗面積率と光電出力の実験結果

ができる。

図4は実際の砥石面で切れ刃摩耗面積率 ϵ と光電出力 Y の関係を求めたものである。摩耗面積率 ϵ は顕微鏡の接眼レンズに点算法(JIS G 0555)用の格子をはめこんで摩耗面上の格子点を数えることで測定した。図3の計算値に対応する実験値であるが、光源電圧、しぼりの影響が計算値とよく一致する傾向をみせている。これを校正図として、光電出力電圧 Y を計測して切れ刃の摩耗面積率 ϵ を知ることができる。増幅器のゼロ点調整により図4の直線を原点通過させることは容易である。

3. 研削実験への適用

3.1 実験条件

開発した検出器を使って研削過程における砥粒切れ刃群の挙動をインプロセスで、またはポストプロセスで調べた。円筒プランジ研削で、砥石はWA 46 MmV、外径395 mm、幅40 mmである。工作物は、短時間に切れ刃の摩耗過程の全ぼうを概観するのに好都合な高速度鋼SKH 4 A、外径59 mm、 $H_R C=60$ を使用した。研削幅は23 mm、砥石と工作物の周速度比は100である。ドレッサはブレードタイプの多石ダイヤモンドである。湿式研削の場合は水溶性研削液(JIS W 3種)を使用した。このときの切れ刃摩耗測定は工作物交換(砥石後退)中の研削液が出ていないときにポストプロセスで行った。なおこの種の光学的測定を研削液供給中に行うには、測定箇所を圧縮空気を吹きつける⁶⁾などして、研削液を測定光路から除くことが必要である。その他の条件は各図等に別記する。スリットは砥石面上で、砥石の幅方向2.5 mm、円周方向0.4 mmであり、測定速度はポストプロセス測定を含めてすべて研削速度の約30 m/sのままである。

3.2 摩耗面積の検出

図5はドレッサ送り f_d の差がどれだけ検出できるか

図5 ドレッサ送りの差の検出

WA46MmV, SKH4A, $d=2\mu\text{m}/\text{rev}$, 乾式

図6 インプロセス測定例

を調べたものである。摩耗面積出力 Σa はドレッサ送り f_d の増大とともに減少して、それだけ砥石面が粗になっていることをよく検出している。これは同時測定した研削動力や、工作物仕上面粗さの測定値とよく対応している。図6は研削中にインプロセス測定した結果である。同時測定した研削動力と良く一致した変動をみせ、研削開始後早い時期に摩耗面積がピークに達し、以後は切れ刃の破碎が生じていることをよく検出している。砥石円周上に切れ刃摩耗密度の不均一や周期性が存在する場合に、光電出力波形がそれをよく表現することも確認した。これについては次節で述べる。

3.3 周期的摩耗の成長

図7は切れ刃摩耗の進行状態を示す記録波形で、研削中にインプロセス測定したものである。工作物心押しセンタに固定した圧電素子センサで同時測定した振動加速度波形をあわせて示す。各図の右から左に時間が進行し、砥石の1円周分を砥石の基準位置を合致させて示してある。研削時間の増加とともに、はじめは砥石の全周にほぼ均一な密度で砥粒切れ刃の摩耗が進行する。その

図7 切れ刃群の摩耗進行とびり振動の同時測定記録

後、砥石円周の一部に、切れ刃群の破碎部と摩耗部の周期性があらわれる。その波長 λ はびり振動波長と一致し、やがてこの周期的なしま模様は砥石全周に広がっていく。図では砥石の約半周部分の切れ刃がより早く摩耗し、その部分に他よりも早く周期性が顕著になっているが、この部分で削ったときの振動波形が他の部分で削ったときよりも大きく、うなり現象(振幅変調)を呈している。研削終了により工作物が砥石と離れるので振動はなくなるが、切れ刃センサは砥石カバーに固定されているので出力を続ける。研削終了前後の切れ刃波形に全く変化がみられないことはこの検出器のインプロセス測定 of 優秀さをも示している。図8はこの研削過程における切れ刃および振動波形の周波数分析結果で、大きなレベル変化を示した1450~1400Hz, 1350~1300Hz成分のピークレベルの変化を示したものである。研削前半では1450Hz成分が優勢であるが、途中から1350Hz成分が増加し、最後はこの方が大きくなり、1450Hz成分は減少する。この現象は切れ刃波形についても振動波形についても同様に認められたが、1350~1300Hzという特定の周波数成分が研削進行とともに大きく増加することは注目される。

3.4 周期的摩耗の周波数

次に、研削をさらに続行した場合の切れ刃群の周期的摩耗の進行と周波数(ピッチの逆数)の変化を追跡した

図8 特定周波数成分のレベル変動

結果を述べる。研削液を使用し、砥石切込み量 d を $1\mu\text{m/rev}$, $2\mu\text{m/rev}$, $3\mu\text{m/rev}$ と変えてその影響も調べた。工作物1本の研削しろは半径で 0.25mm 、測定は工

図9 砥粒切れ刃群の周期的摩耗を示す出力波形

図10 研削進行に伴う摩耗切れ刃出力の周波数変化

図11 切れ刃群の摩耗じまのしま数減少(波長増)の実態

作物交換時にポストプロセスで行い、切れ刃の出力波形を記録した。

図9に砥石切込み量 $\Delta=3\mu\text{m/rev}$ の場合の切れ刃波形を工作物の研削本数順に示す。研削前のドレス面と比べると、研削本数の増加とともに切れ刃摩耗が増加し、かつ周期性に盛衰があることもわかる。すなわち、研削1本で場所により若干の周期性が認められ、2本研削後は砥石全周に明りょうな周期性がみられる。3本目でこれがややくずれ、4本研削後にはまた周期性が顕著になっている。図を省略した他の条件の記録波形も含めて総合的に考察すると次のようである。研削開始後、はじめは砥石全円周にわたってほぼ均一的な切れ刃摩耗が発生す

る。それが一定量に達するとびり振動が誘発され、前後して、砥石円周方向にほぼ等間隔をおいてまず切れ刃摩耗面の破砕が生じてその部分の摩耗密度が減少する。その結果、破砕がほとんど起こらずむしろ摩耗が増加する摩耗密度の濃い部分と交互に濃淡のしま模様ができて、周期性が形成される。さらに研削が進行するとこの切れ刃摩耗密度の濃淡がつくるしまのピッチや位相が変化していく。

図10は切れ刃波形の周波数分析結果である。切れ刃摩耗の周波数は研削中一定ではなく、この場合は研削本数の増加とともに減少して一定値に近づいている。また砥石切込みの大小により減少の様相に差が認められる。

研削進行とともにびびり振動数が減少することについてはいくつかの研究^{6)~9)}があるが、びびり振動周波数の減少に切れ刃群の周期的摩耗が介在していることが図7、図8からみて十分に考えられる。

3.5 周期的摩耗の波長と位相

図11は、研削中に大きな周波数減少をみせた砥石切込み量 $d=1\mu\text{m}/\text{rev}$ の2本研削後と3本研削後の切れ刃波形の一部を砥石円周上の位置が一致するようにして、上下に並べたものである。この研削では、2本研削で砥石1円周に57個のしだが、3本研削で44個のしだが存在し、3本目の研削中に13個のしだが減少した。その位相関係は、1円周中に13か所の摩耗部の一致場所(○印)があり、その間ごとにしま数が各一つずつ減少するという形態をとっている。各しまの波長は同長ではなく、砥石円周をしまの個数で割った平均波長に対して $\pm 7\sim 20\%$ のばらつきをもって混在している。この現象は3本目(44個)と4本目(38個)についても、また、砥石切込み量 $d=3\mu\text{m}/\text{rev}$ (図9)の1本目(47個)と2本目(37個)についても同様に認められた。

一般に、与えられた砥石円周長さ L に整数個 n のしまが存在し、すべてのしまが定波長 λ_c であるとするれば、存在できるしまの数は $L/\lambda_c=n$ を満足する不連続な整数のグループ n_c に限定される。長さ L の円周にグループ n_c 以外の任意の整数 n_i 個のしまが存在するためには、少なくとも波長の異なる2種のしまの共存が必要となる。このような任意の整数 n_i, n_j を考えて、同一円周上 L において、しま数が n_i 個から n_j 個 ($n_i > n_j$ として) に変化し、しかも両者の位相関係が、図11のごとく、両者のしま数の差と同数箇所 ($n_i - n_j$) だけしまの摩耗部が一致し、その間ごとにしま数が1個だけ減少するという関係になるためには、 n_i 個と n_j 個のしまのそれぞれについて、次のような数と波長の関係を満たす少なくとも2種ずつのしまが混在すればよい。すなわち、 N_i を $n_i/(n_i - n_j)$ の整数部 $N_i = [n_i/(n_i - n_j)]$ とし、 N_j を同じく $N_j = [n_j/(n_i - n_j)]$ 、 G_{ij}', G_{ij}'' をそれぞれ波長 λ_i', λ_i'' (または λ_j', λ_j'') をもつグループ(種)のしまの個数として以下ようになる。

$$\begin{aligned} N_i \lambda_i' / G_{ij}' + (N_i + 1) \lambda_i'' / G_{ij}'' \\ = N_j \lambda_j' / G_{ij}' + (N_j + 1) \lambda_j'' / G_{ij}'' \\ = L \end{aligned} \quad (2)$$

ただし

$$N_j = N_i - 1 \quad (3)$$

$$G_{ij}'' = n_i - N_i = n_j - N_j \quad (4)$$

$$G_{ij}' = (n_i - n_j) - G_{ij}'' \quad (5)$$

波長はそれぞれの平均波長 (L/n_i または L/n_j) にで

きるだけ近づけるものとする。

たとえば、図11に一部を示した砥石切込み $d=1\mu\text{m}/\text{rev}$ (57個/円周→44個/円周)の場合に式(2)~(5)を使うと、 $N_i=4(\lambda_i'=21.44\text{mm})$ から $N_j=3(\lambda_j'=28.59\text{mm})$ のグループ $G_{ij}'=8$ 組、 $N_i+1=5(\lambda_i''=22.15\text{mm})$ から $N_j+1=4(\lambda_j''=27.69\text{mm})$ のグループ $G_{ij}''=5$ 組となる。しかるに、実験結果は、4個から3個が7組、5個から4個が2組のほかに、さらに3個から2個が2組、6個から5個および7個から6個が各1組と計5グループ(種)が混在している。他の場合の測定例も式(2)から求められる2種を中心として数種のしまが混在した形態となっていた。図9の場合は、2本目と4本目ではしま数は37個と変化ないが、両者の位相を比べると、同相部(●印)と逆相部(×印)、その中間的なものが混在している。

これらのことから、研削中に形成された切れ刃群の周期的摩耗の波長は、砥石円周上同じ長さをもつのではなく、通常は5種程度の少しずつ異なる波長をもつ組が混在しながら、研削条件やびびり振動に対応した変化をなしとげているものと考えられる。

なお、このような切れ刃群の摩耗密度の濃淡じまの凹凸を測定したが、その値はたかだか $1\sim 2\mu\text{m}$ で、摩耗密度の濃淡と砥石面凹凸の明りょうな関係はつかめなかった。

4. ま と め

- (1) 研削速度 60m/s におよぶ砥石周速のもとでも、砥石作業面上の砥粒切れ刃群の逃げ面摩耗面積率に対応する光電出力が得られるセンサを開発した。
- (2) 砥粒切れ刃の逃げ面摩耗は、研削初期には砥石全円周にわたってほぼ均一に生じるが、やがて円周方向に交互に、切れ刃摩耗面の破砕が激しい場所とより摩耗がすすむ場所ができて、切れ刃摩耗密度に濃淡の周期性が形成されるようである。
- (3) 周期的摩耗の周波数(濃淡じまのピッチの逆数)は研削中に変化し、本研究においては、研削進行とともにしだいに減少し、一定値に落ち着く様相を示した。
- (4) この切れ刃群の周期的摩耗の発達は、びびり振動の成長過程と周期や振幅がよく対応することを同時インプロセス測定で確かめた。
- (5) 切れ刃摩耗密度の濃淡は、研削中、その位置、しまの波長が変化し、また砥石1円周内で各しまの波長は均一ではなく、数種の波長のしまが混在している。

- (6) 研削過程において, あるいは研削条件の変化に対して砥石作業面の応答がそれほど鈍くないことがわかったので, 本検出器を砥石面同定用 センサ として, 砥石面の制御とそれへの適応の機能をもつ適応制御研削方式が追求できる。

最後に, 御指導, 御鞭撻をいただきました東京大学工学部の佐田登志夫教授, ならびに機械技術研究所の竹山秀彦生産工学部長に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 須藤徹也: 砥石切れ刃の新しい測定装置, 精密機械, **34**, 9 (1968) 606.
- 2) 須藤徹也, 和井田 徹: 研削砥石の作業面に関する研究 (第2報), 機械技術研究所報, **26**, 6 (1972) 251.
- 3) 須藤徹也, 和井田 徹: 研削砥石の作業面に関する研究 (第3報), 機械技術研究所報, **27**, 1 (1973) 16.
- 4) H. Inoue, K. Tamakohri, T. Sutoh, H. Noguchi, T. Waida & T. Sata: An Adaptive Control System of Grinding Operation, Proc. Int. Conf. Prod. Engg., Tokyo, 1974, JSPE, (1974) 671.
- 5) H. Murray: Exploratory Investigation of Laser Methods for Grinding Research, Ann. CIRP, **22/1**, (1973) 137.
- 6) R. Snoeys: Forced and Selfexcited Vibrations in Plunge Grinding, Int. Conf. Mfg. Technology, ASTME, (1967) 317.
- 7) H. Kaliszzer & P. D. Singhal: Contribution to the Analysis of Waviness Generated during Grinding, Ann. CIRP, **15**, (1967) 245.
- 8) 井上英夫: 研削加工におけるびり振動現象, 機械試験所所報, **23**, 6 (1969) 246.
- 9) 福田理一, 常盤 徹: 研削中の工作物の振動について, 精密機械, **40**, 12 (1974) 1073.

情 報

科技庁の技術予測

科学技術庁ではこのほどデルファイ法による第2回目(第1回は昭和46年)の技術予測を発表した。

これは西暦2005年までに, どんな科学技術が開発されるかを予測したもので, 調査対象は資源・エネルギー, 環境・安全, 健康, 国土利用など7領域, 20分野である。

それによると科学技術に対する期待の大きい分野は保健・医療ライフサイエンス, 食糧資源, 環境, 安全などの分野で, 逆に期待していない分野は余暇, 家庭生活の両分野となっている。

また, 回答者のうち90%以上の人が高重要度と評価している技術開発課題は医療関係(脳卒中, 心臓疾患, ガン治療等), 資源関係(大陸斜面の石油, 食糧開発), 防災安全関係(地震予知, 環境保全, 食品安全)など21である。

これを重要度順にみると「水深200m以深の大陸斜面で石油を経済的に採掘する技術」(実現予想時期1990年), 「脳卒中予防法と治療法の開発」(同1992年), 「心臓疾患による死亡率の低下」(同1997年)がいずれも98%と多く, 次に「安全な化学農業」(同1996年), 「悪性腫瘍の完全な治療」(同2002年)などとなっている。

研究開発の加速時期をみると, 保健・医療, 森林資源, 輸送, 教育, 建設, 宇宙開発の各分野は1985年までは加速されないが, 1985年以降2000年初頭までに急速に加速されるとみられている。

一方, 前回の調査と比較すると, 多くの分野で, 重要度「大」の比率が減少してきており, 重要度が増加した分野は保健・医療, 食料資源, 森林資源, エネルギー, 宇宙開発分野にすぎない。

重要度大の比率増加の著しい課題をみると「深海底の

マンガン団塊を採取する技術」が前回の12%から55%へ, 「南氷洋のオキアミなどを利用した食糧生産」が同22%から61%へ, 「地域トータルエネルギーシステムの実用化」が同23%から63%へ——などとなっている。

逆に「DNA, RNAのような機能をもつ高密度記憶素子の開発」が前回の70%から9%へ, 「酸性性の雰囲気を利用できる発熱体の開発」が同65%から10%へ, 「日本語〜英語の自動同時通訳機の開発」が同66%から17%へとそれぞれ重要度の比率が低下してきている。これらはいずれも「技術的制約のため非現実」とする回答比率が高い。

また「原子力エネルギーによる航空推進システムの開発」, 「架橋による東京湾, 大阪湾等の道路, 鉄道が開通する」は安全環境, 省資源の観点から, それぞれ前回の12%からゼロ, 64%から16%へと重要度を大きく下げている。さらに「制電性合成繊維の開発」, 「洗たく後5分以内で着ることのできる衣料の開発」が同様に前回の77%から3%へ, 30%から3%へと低下している。

一方, 実現時期は, 全体平均で前回調査より6.3年遅れている。分野別に実現時期の遅れをみると, 輸送が平均10.3年, 工業生産が同8.2年, 建設が同9.1年, 安全が9年, エネルギーが7.6年の順となっている。

これを課題別にみると「酸性性の雰囲気で使用できる発熱体の開発」が前回調査より14年遅れ, 実現予想時期は2004年に, 「面制御経路誘導などを組み合わせた総合交通管制システムの確立」が14年遅れ, 1996年に——などとなっている。注目される「完全治療のできる抗ガン剤の開発」は前回の予想より5年遅れ2002年に, 「地震予知技術の確立」が7年遅れ2001年に, 「核融合炉の実現」が10年遅れ2003年に——とそれぞれ大幅に遅れている。(服部 敏夫)