統計的解析による正面研削の研究 (第1報)*

—砥石減耗曲線の進展の様子—

谷 泰弘** 岩淵 修*** 長尾高明† 竹中規雄††

A Study on Face Grinding by the Statistical Method (1st Report)

—Analysis of the Wear Process of Grinding Wheel—

Yasuhiro TANI, Osamu IWABUCHI,
Takaaki NAGAO and Norio TAKENAKA

A statistical method is applied to the analysis of face grinding mechanism. The grain dropping ratio is defined and a simulation of the wear process of grinding wheel is made in calculation by a computer. The relation between the grinding condition and the progress of worn surface is analyzed. The results are as follows: (1) The curve of worn surface becomes the shape of "S" whose middle part is nearly straight. (2) A certain relation

between the progressive speed, the slope of the tangent to the curve and the distribution of the dropping ratio is found independently of the grinding conditions. (3) When the progressive speed is very small, it changes stepwise. (4) The strong correlation between the grinding conditions and the progressive speed is observed. As parameters such as the critical depth of cut, the grain size number, the half of apex angle of grain, the rotating speed of the wheel, the depth of cut and the grain volume ratio of the wheel become large, the progressive speed becomes small. And as the feeding speed is reduced, the progressive speed decreases.

Key words: face grinding, statistical method, worn surface, wear process, progressive speed, grinding condition, dropping ratio.

1. 緒 言

単粒研削の目的は研削機構をミクロ的に解明しようとするものであるが、この単粒研削での実験結果を利用して砥粒切れ刃の集合体である砥石の研削機構を解析するにはその間に何らかの統計的手法が必要となる。本報では既報¹⁾²⁾で得られた単粒実験の結果を基にして松井による統計的手法³⁾を応用し、ある大きさの研削抵抗が1砥粒にかかるとその砥粒は1砥粒単位で脱落すると仮定して砥石作用面の減耗曲線及びその進展の様子を求めた。この結果を先に行ったモンテカルロ法による解析結果⁴⁾、砥石での実験結果⁵⁾と比較してみると共に、この減耗曲線及びその進展の様子を種々の変数をかえて解析・考察した。

このように統計的手法を手直して正面研削のシミュレータとして使用できるようにすることは、研削抵抗値の予測をより確実なものとし、計算機による最適な砥石及び研削条件の選択を可能にすることになる。

2. 砥粒脱落率

単粒切れ刃による研削実験の結果を実験の砥石全体の挙動に結びつけるには、その間に統計的处理が必要となる。そこで砥粒切れ刃分布の三次元一様分布等の仮定³⁾により、正面研削で一つの問題点となっている砥石作用面の減耗曲線は次のようにして求められる。

まず、カップ型砥石による正面研削を図1のようにモデル化し、砥石作用面の形状は現在の時点において $z=h(x)$ という関数で表されるものとする。砥石内で砥石外端より半径方向に x 、理想仕上がり面より高さ方向に z の位置に頂点を有する砥粒切れ刃 $P(x, z)$ が基準断面を有効に切削する確率(有効切れ刃率) η は次式のように表される³⁾。

$$\eta = \exp\left(-\frac{W_e(x, z)}{W_0}\right) \quad (1)$$

図1 正面研削モデル

* 原稿受付 昭和54年9月7日。精機学会昭和54年度関西地方定期学術講演会(昭和54年7月12日)にて発表。

** 学生会員 東京大学工学部(東京都文京区本郷7-3-1)

*** 正会員 三菱電機(株)(尼崎市南清水字中野80)

† 正会員 東京大学工学部

†† 名誉会員 日本大学理工学部(東京都千代田区神田駿河台1-8)

ここで W_e は砥粒切れ刃 P が有効切れ刃となるために一つの砥粒切れ刃も存在してはならない砥石内の体積で、

$$W_e(x, z) = \frac{\tan \gamma}{C_w} \int_{h^{-1}(z)}^x (R-x)(z-h(x))^2 dx \quad (2)$$

γ : 研削みぞ断面半頂角 (平均砥粒半頂角), $C_w = v/2\pi N$: 砥石 1 rad 角回転当たりの被削材送り量, v : 被削材送り速度, N : 砥石軸回転数, $D = 2R$: 砥石外径, $W_0 = \pi(45G^{-1.28})^3/6v_g^6$: 砥粒切れ刃 1 個の平均占有体積, G : 粒度番号, v_g : 砥材率 (砥石全体積の内砥材の占める確率), $h^{-1}(x)$: 減耗曲線 $h(x)$ の逆関数, である。

この有効切れ刃率の算出方法と同様にして砥粒切込み深さ g の累積密度関数 P_r は、

$$P_r(g \geq g^*; x, z = \text{const}) = \exp(-W_g/W_0) \\ = \exp(-W_e(x, z+g)/W_0) \quad (3)$$

で表され、 g がある砥粒切込み深さ g^* 以上となる確率は $(x, z+g)$ の位置にある砥粒切れ刃点がある有効切れ刃となる確率に等しい³⁾。

ある研削抵抗値以上の力が 1 砥粒にかかるると脱落を生じると仮定すると、研削抵抗と砥粒切込み深さの間にはある関数関係¹⁾が成立するので、脱落の判定基準として砥粒切込み深さを用いることができる。そこである砥粒切れ刃の切込み深さが臨界切込み深さ g_l (砥粒及び結合剤の強度・研削条件等により決定されるものと考え) 以上になれば、その砥粒切れ刃は 1 砥粒単位で脱落を生じると考え、砥粒切れ刃 P の砥粒脱落率 P_f を次のように定義する。

$$P_f(x, z) = P_r(g \geq g_l; x, z = \text{const}) \quad (4)$$

この砥粒脱落率を用いて、砥粒の脱落による任意の x 断面における z 方向の変位 Δz は、

$$\Delta z = \int_{h(x)}^d \eta \cdot P_f dz \\ = \int_{h(x)}^d \exp\left(-\frac{W_e(x, z) + W_e(x, z+g)}{W_0}\right) dz \quad (5)$$

となる。上式で d は砥石切込み深さである。従って現在の時点の砥石 1 回転後における減耗曲線 $h'(x)$ は、

$$h'(x) = h(x) + \Delta z \quad (6)$$

で示される。

3. シミュレーション

前節で説明した計算式を用いて各時点での減耗曲線を求めるための計算機におけるフローチャートを図 2 に示す。このフローチャートに従い、計算の手順を説明する。

表 1 に示される計算条件のもとで、まず式 (5) により変位 Δz を計算し、次にこの Δz から式 (6) により新しい

図 2 フローチャート

表 1 計算条件

被削材	S 45 C
砥石切込み深さ d	20, 30, 40, 50, 60 μm
砥石軸回転数 N	750, 1 000, 1 250, 1 500 rpm
被削材送り速度 v	1, 2, 4, 6 m/min
砥粒半頂角 γ	60, 70, 80°
臨界切込み深さ g_l	12, 15, 18, 25 μm
砥石	外径 $D=305$ mm 幅 $B=25$ mm 粒度 G 30, 40, 60 砥材率 $v_g=0.4, 0.42, 0.45, 0.5$ WA ビトリファイド砥石

減耗曲線を求める。計算は当初に設定した半径方向に等間隔に分布する点 (この計算では 126 点) においてそれぞれの時点での z 方向変位を求め、その累積値としてその点の減耗曲線の高さを得る。またそのとき積分値の下限として用いる任意の点の減耗曲線又はその逆関数の値は近傍 4 点の補間により求める。減耗曲線の形状が安定したところで収束したとして計算を打ち切った。

4. シミュレーション結果

図 3～図 5 に砥石回転回数による減耗曲線の進展の様子を示す。その曲線の形状は中央ではほぼ直線的で全体として S 字カーブを描いており、この曲線の中央部は最小二乗法によりほぼ二次曲線であることがわかる。この減耗曲線の形状は実験値⁵⁾、モンテカルロ法による解析結果⁴⁾とも定性的によく一致している。この減耗曲線はほ

$N=1250 \text{ rpm}$, $v=4 \text{ m/min}$, $D=305 \text{ mm}$, $G=30$,
 $\gamma=70^\circ$, $g_t=12 \mu\text{m}$

図3 砥石減耗曲線の回転回数による進展の様子 (1)

$N=1250 \text{ rpm}$, $v=4 \text{ m/min}$, $D=305 \text{ mm}$, $G=30$,
 $\gamma=70^\circ$, $g_t=15 \mu\text{m}$

図4 砥石減耗曲線の回転回数による進展の様子 (2)

$N=1250 \text{ rpm}$, $v=4 \text{ m/min}$, $D=305 \text{ mm}$, $G=30$,
 $\gamma=70^\circ$, $g_t=18 \mu\text{m}$

図5 砥石減耗曲線の回転回数による進展の様子 (3)

ば10回転ぐらいで定常の形状に達しており、ドレッシング直後からの砥石の最高摩耗高さの立上がりは条件に

図6 砥粒脱落率の回転回数による変化 (1)

図7 砥粒脱落率の回転回数による変化 (2)

図8 砥粒脱落率の回転回数による変化 (3)

よらずほぼ一定のようである。またこの三つの図の比較により、曲線の進展が早くなる程曲線はなだらかになっていることがわかる。

図6～図8には回転回数による砥粒脱落率の分布を示す。この分布は回転当初を除いてなだらかな山型をしており、最高値はわずかに砥石外側にずれている。この脱

図9 減耗曲線の進展速度と他の要素の関係

落率の分布は現時点の減耗曲線と砥石1回転後の減耗曲線との変位の増分値を砥石切込み深さで除した値に等しいので、この分布からも減耗曲線がほぼ10回転ぐらゐで定常に達していることがわかる。曲線の進展が早い程、分布の頂点は高く、その分布の広がりも大きくなっている。

図9はこれらの結果をまとめ、砥石半頂角と臨界切込み深さをパラメータとして変化させた時の減耗曲線の進展速度と曲線の傾き・砥粒脱落率の分布の様子を示したものである。曲線の進展速度の増大に対して曲線の傾き、砥粒脱落率の分布の最高高さ、広がりは一様に増加しており、特に進展速度に対する曲線の傾き、分布の広がりの変化は定性的にほぼ同一の様相をしている。また分布の最高高さの変化は進展速度が増大するにつれ飽和する傾向がある。更にこの図により、パラメータの種類によらずこれらの関係はほぼ一定で曲線の進展の様子を調べることににより、曲線の傾き、砥粒脱落率の分布の様子がある程度わかることになる。そこで種々の変数を変化させて曲線の進展がいかに変化するか調べてみる。そのため砥石切込み深さの1/1000の高さとなる曲線の点(理想仕上がり面からの高さがほぼゼロと考える)から砥石外周までの距離を有効研削幅と定義し、この有効研削幅の変化により減耗曲線の進展の様子を表すものとする。

図10には有効研削幅の臨界切込み深さによる変化の様子を示す。臨界切込み深さが大きい程有効研削幅の値は小さく、その回転回数による変化もなだらかになっている。またその回転回数による変化は回転当初を除いてほぼ直線的で、その部分の有効研削幅の進展速度は臨界切込み深さのほぼ-2.2乗に比例している。図11には砥石粒度による変化を示す。臨界切込み深さ等による影

図10 有効研削幅の臨界切込み深さによる変化

図11 有効研削幅の砥石粒度による変化

図12 減耗曲線急変時の様子

響に比べて粒度による影響は非常に大きく現れており、有効研削幅の進展速度は砥石粒度番号のほぼ-3.1乗に比例している。砥粒が細くなるにつれてその進展は非常に遅くなると共に、その変化が階段的な傾向を示すようになる。有効研削幅の進展の変化は研削抵抗に大きな影響を及ぼすので、この階段的現象は実際の研削において振動を生じさせる一つの原因になるのではないかと考えられる。そこでこうした階段的現象を示すとき減耗曲線等にはどんな変化を生じているか調べる。図12は

図 13 有効研削幅の砥粒半頂角による変化

図 15 有効研削幅の送り速度による変化

図 14 有効研削幅の砥石回転数による変化

図 16 有効研削幅の砥石切込み深さによる変化

その定常時と急変時の減耗曲線の様子を砥石粒度番号 G が 40 の場合において示したものである。このように減耗曲線は中央ではほぼ同一の形状をしているが、有効研削端付近での形状に違いを生じている。脱落率の分布もそれに従い、多少ずれたものとなっている。また減耗曲線の進展は中央部で常に一定の速度であり、両端の部分で階段的な変化となっている。図 13 には砥粒半頂角による有効研削幅の変化を示す。半頂角が大きくなるにつれて回転回数による変化はなだらかになっており、進展速度は半頂角の正接の値のほぼ 0.96 乗に反比例している。また進展速度が遅い場合にはやはりわずかに階段現象が現れている。図 14 には砥石回転数による変化を示す。進展速度は回転数のほぼ 0.65 乗に反比例しており、回転数が大きくなるにつれ、有効研削幅の変化は小さくなっている。このことは回転回数が小さい程常に砥石に大きな研削抵抗が加わることを意味している。同時にドレッシング直後の砥石への衝撃も大きいわけである。図 15 には被削材送り速度による変化を示す。進展速度は送り速度の 0.96 乗に比例しており、送り速度が小さい程その変化は小さくなっているが、これも研削抵

図 17 有効研削幅の砥材率による変化

抗との関係から理解できることである。また送り速度が小さい範囲では階段的現象が現れている。図 16 には砥石切込み深さによる変化を示す。進展速度は砥石切込み深さのほぼ 0.62 乗に反比例し、砥石切込み深さが小さい程有効研削幅の変化は急激となっているが、研削当初での有効研削幅はほぼ同一となっている。従って砥石切込み深さが小さい程研削当初の立上がりは大きくなっている。図 17 には砥石砥材率による変化を示す。通常用

いられている砥石の砥材率には大きな変化がないため、その影響も非常に小さく、ほとんど無視してよい程度であるが、その進展速度は砥材率のはば0.88乗に反比例しており、砥材率の増大と共に有効研削幅の変化は小さくなっている。

5. 結 論

統計的手法により砥粒脱落率を定義し、正面研削における砥石作用面の減耗状態の進展の様子を計算機を用いてシミュレートさせ、以下のような結果を得た。

- (1) 減耗曲線は定常状態で中央部が直線的なS字カーブを描く。
- (2) 減耗曲線の進展速度と曲線の傾き・砥粒脱落率の分布との間には決まった関係が成立する。
- (3) 進展速度が非常に小さい時には有効研削幅の変化は階段的現象を生じる。
- (4) 種々の研削条件と進展速度の間にはそれぞれ決ま

った関係があり、臨界切込み深さ、砥石粒度番号、砥粒半頂角、砥石回転数、砥石切込み深さ、砥材率が大きい程進展速度は遅くなっており、被削材送り速度が大きい程進展速度は早くなっている。

参 考 文 献

- 1) 竹中規雄, 長尾高明, 福沢順博, 谷 泰弘, 渡辺裕司: 単粒モデル実験による正面研削の研究 (第1報), 精密機械, **45**, 9 (1979) 1113.
- 2) 谷 泰弘, 福沢順博, 竹中規雄, 長尾高明: 単粒モデル実験による正面研削の研究 (第3報), 精密機械, **46**, 3 (1980) 350.
- 3) 松井正己: 正面研削に関する研究, 精密機械, **40**, 11 (1974) 1007.
- 4) 竹中規雄, 長尾高明, 谷 泰弘, 水上陽介: モンテカルロ法による正面研削機構の研究, 精密機械, **45**, 5 (1979) 613.
- 5) 竹中規雄, 笹谷重康: 正面研削機構に関する研究 (第3報), 日本機械学会講演論文集, **720**, 12 (1972) 714.
- 6) 竹中規雄, 笹谷重康: 研削作用に関する研究 (第2報), 日本機械学会論文集 (第3部), **26**, 163 (1960) 403.

情 報

(p.811より続く)

アドホックグループは、こうした活力と創造性の問題を包括的立場から詳細に検討したもので、活力については80年代において国民の志向が多様化、生活における“ゆとり”を重視する傾向が強まる一方、人口構成が高齢化する中で、社会の活力が維持できるかを懸念、日本が先進国病に陥らない新しい概念・活力の確立が必要で、これには教育問題から新たな方向を打ち出すことが不可欠だとしている。

また、創造性については従来の米国を中心とした世界経済システムの中で順調な発展を遂げてきたわが国が、今後はルール・テイカからルール・メーカへと脱皮、先進国間でも利害が対立する中で国益を確保していくには、導入でない創造的な自主技術確立に注力すべきだという基本認識に立っている。

次に提言の内容を掲げる。

▽研究開発投資リスク保証保険制度の創設=わが国には英国のマーチャントバンクのようなリスクの高い資金を貸与する機関が少ない。しかし、最近の研究開発は懐妊期間が長期化し、必要資金規模も巨大化、リスクが大きくなっている状況では、企業が創造的な技術開発を行う環境整備のためにも、ある程度の自己負担とリスク保証を組合わせた研究開発リスク保証保険制度の創設が必要である。また既存の税制の中の技術開発を促進するよ

うな税制、たとえば増加試験研究費税額控除制度の見直し、拡充も重要である。

▽技術開発貢献企業制度の創設=技術開発を推進するにはたとえばノーベル賞にも劣らないような国際的権威と報賞を伴う「技術賞」という報賞制度を設立することが一案である。この技術賞の対象は外国人をも含める必要がある。また、3年なり5年なり一定の伸び率以上の技術開発投資を行い、優れた技術開発に努めた企業および経営者を表彰しようとするものである。経営者を表彰するのは技術開発には優れた技術陣の存在ばかりでなく、技術開発に優れた理解と洞察力を有する経営者の存在が重要なためである。

▽技術戦略の一環としての特許制度の活用=わが国では特許制度について従来「権利の保護」という消極的観点から考えられ、「権益を確保するための戦略手段」として積極的に位置づけられることが少なかった。しかし、諸外国では先進国のみならず今後の市場拡大が予想される発展途上国においても特許を積極的に確保している。わが国としても今後、企業における技術戦略の一環としての特許制度の活用を中心とした技術管理意識の高揚が必要であり、海外出願の促進を図り、特許制度の活用を考えていくことが必要である。

(p.841へ続く)