研削過程のシミュレーションに関する研究 (第1報)*

——シミュレーションの構成と手順——

酒井保男** 柳下福蔵*** 古川勇二†

Study on the Simulation of Grinding Process (1st Report)
- Simulation Algorithm and its Operation -

Yasuo SAKAI, Hukuzo YAGISHITA and Yuji FURUKAWA

Outputs of grinding operations are usually estimated through experiences because of its difficulty to forecast the process. It is well known that the process is much affected by a lot of parameters of grinding condition, workpiece and wheel characteristics, including randomly distributed grains on wheel periphery. The present paper has tried to develop a reliable and practical simulation of the grinding process. Namely, the method is based on replacing an actual grinding process to a computer program as faithfully as possible, where working mode of effective grains, their cutting mechanism, effect of machine rigidity, etc. are taken into account.

Key word : grinding, grinding mechanism, simulation, Monte Carlo simulation, computer simulation.

1. 緒 言

研削結果を予測するには、今日においても経験が決め手になっている。特に、初めての加工の場合には数回あるいは数十回に及ぶ試験研削が必要とされることさえある。最近のように研削盤がCNC化され、砥石もいろいろな性能のものが開発されて、その選択肢が多くなると、どのような条件を選べばこれらの機能をフルに発揮して短時間に、かつ所要の仕上げ面精度が得られるか、従来の経験や研削試験で対応することはもはや限界である。

一般の研削作業は一定量削除する荒研削から始まり所要の工作精度や表面粗さを付与して仕上研削が終わるが、そのトータルの研削時間をいかに短縮し能率的な作業にするかが、現場にとって切実な問題である。

しかし、既に発表されている研削理論は荒あるいは仕上研削に限定したものであり、このような複雑な条件の研削の予測は困難である。

研削試験や理論解析に代えて研削過程を直接、数値シミュレーションしようとの試みが1967年にBaul¹⁾や佐田・吉川²⁾、また1968年には吉川・Peklenik³⁾および松井ら⁴⁾によってなされた。更に1980年に至り松井は実用化に向けて一歩進んだ研究を行った⁵⁾。

しかし、これら従来のシミュレーションでは、いずれも砥石の砥粒先端は摩耗のない理想的な切れ刃と仮定しており、また研削では重要な工作物表層部に対する切れ刃のくい込み・上すべり現象が考慮されていない。このことが研削結果を定量的に予測し得ない主因となっている。

本研究のシミュレーションでは砥粒切れ刃の形状モデルには先端に平坦な摩耗面の設置や砥石半径方向の不ぞろいによる切れ刃分布が設定でき、砥粒の弾性支持、切れ刃の工作物に対する、くい込み・上すべりの判別などの機能を含めるなど、極力、実研削に近い方法を採用している。

更に、本研究は近年におけるコンピュータの飛躍的な進歩を背景にシミュレータとして手軽に実用できるパソコンを選び、研削プロセスに従った数値演算はもちろん、グラフィック機能により仕上げ面の生成状況や研削に関する情報を観察できるものとした。

しかし、現在までに複雑な研削現象がすべて解明されているわけではなく、また解明されていても計算可能なアルゴリズムに仕立てることのできないものがあるために次の仮定をおいた。

- (1) 工作物表面は砥粒切れ刃が通過した形状どおりの仕上げ面が創成される。したがって切れ刃の側方に盛り上がりが発生しないような被削材料、すなわち一般的な高硬度焼入れ材を対象とする。
- (2) 1個の砥粒に存在する切れ刃は1個とし、研削中に切れ刃は破砕などの変化が生じないものとする。
- (3) 砥石の目づまりや砥粒の脱落は生じないものとする。
- (4) 研削熱による研削焼けや研削割れの予測は行わない。
- (5) 振動によるびびり発生の可能性、振動が研削に及ぼす影響などは扱わない。

本稿は本研究によるシミュレーションの方法と構成する諸要素およびその手順について述べる。

2. シミュレーションの方法と構成する諸要素

2.1 シミュレーションの基準断面

本研究によるシミュレーションの方法は図1に示す円筒研削モデルにおいて、工作物表面上、任意の点Pが砥石との接触弧中を移動する間に研削される状況、すなわち多数の砥粒切れ刃の1個1個によって削除され仕上げ面が生成される状況を

* 原稿受付 平成 5 年 1 月 18 日

** 正 会 員 酒井技術士事務所 (沼津市大岡1959 8)

*** 正 会 員 沼津工業高等専門学校 (沼津市大岡3600)

† 正 会 員 東京都立大学工学部 (東京都八王子市南大沢 1-1)

Fig. 1 Cylindrical grinding model

コンピュータにより模擬的に追跡、調査するものである。

点 P を含み、かつ砥石外周の円筒面を底辺とし、他の 1 辺を砥石半径方向にとった微小な正方形を基準断面と定義し、それぞれを横、縦軸とする直角座標に砥粒切れ刃形状や工作物表面の条痕を書き表す方法とした。

1 個の基準断面に平均して 1 個の砥粒モデルを描くために、その 1 辺は砥粒が砥石内に均等に存在するとして、砥粒 1 個が砥石中に占める平均容積と等しい体積を有する正立方体の稜と同じ長さ（以下、基準長さ f_g ）とした（図 2 参照）。

すなわち、基準断面は横軸を m 個に分割し、各分割線の高さ Y_i ($i = 0 \sim m$) によって砥粒切れ刃や工作物表面形状を表現する。そして、砥粒切れ刃による工作物表面部の削除は両者を描いて切れ刃と重なった部分が除去されることにより新しい工作物表面形状が生成されるものとした（図 3 参照）。

図 4 は基準断面における分割数 m と描画する工作物表面の断面曲線との関係を示す。砥粒切れ刃モデルを頂角 2ϕ の円すいとするとき、離散化のために生じる最大形状誤差 h_{max} は波形の頂点が離散間隔の中央に位置する時に生じ、

$$h_{max} = \frac{f_g}{2m} \cot \phi \quad (1)$$

として求まる。 m 及び ϕ を変化させた時の最大形状誤差 h_{max} を図 5 に示す。いま、分割数 $m = 100$ 、切れ刃の頂角 $2\phi = 160^\circ$ 、砥石の粒度 #60、砥粒容積率を 50% とすると、基準長さ f_g は 0.235 mm となり、最大形状誤差 h_{max} は 0.22 mm になる。

したがって、1~2 μm の仕上げを想定した研削加工では、この程度の分解能が限度と考えられる。なお、工作物表面の断面曲線の谷底はこれを創成する砥粒切れ刃先端には一般に次の項で述べる摩耗による平坦部を設定するため形状誤差は小さなものになる。

2.2 砥粒切れ刃分布のモデル

砥粒切れ刃モデルは図 6 に示すように、まず基準断面内に一様乱数を用いて 1 個の砥粒中心の座標位置 O を決め、その砥粒の外接円を描く。座標点 O が基準断面の中央より偏った位置にある時は、これに隣接し、ほぼ等距離にある周囲 6 箇所の砥粒の内、基準断面に現れる砥粒の外接円を描く。

なお、周辺砥粒の点 O に対する分配角度や砥粒の中心間距離は確率分布するものとし乱数により決定した。また、砥粒の直径のばらつきは粉粒体によく用いられる対数正規分布とし⁶⁾、

Fig. 2 Unit volume occupied by one grain in grinding

Fig. 3 Schematic showing working model

Fig. 4 Effect of discretization on geometrical shape accuracy of workpiece

Fig. 5 Maximum shape error related with a vertical angle and division number

Fig. 6 Generation of grain geometry

これにしたがった乱数により直径寸法を決定する。なお、前述の砥粒の平均容積もこの分布の平均として決めた。

基準断面の底辺は砥石外周の作業面に相当するから、この底辺より下部には砥粒やその切れ刃は存在しない。したがって、底辺により砥粒の外接円が分割される場合は底辺に垂直な砥粒の中心線が底辺と交わる位置に、また分割されない場合は砥粒の中心線と外接円との交点に頂点をおいて左右対称に角度 ϕ

で2本の斜線を引き、切れ刃形状モデルとする。なお、 ϕ は一定とした。

砥粒が砥石の作業面である底辺により分割される時、そのはみ出す長さ H が砥粒外接円の直径 D に比べて、ある限度以上大きい場合は砥粒が存在しないものとした。すなわち砥粒切れ刃モデル作成プログラムでは、 H/D を FALL 値と定義し、脱落の程度を加減できるようにした(図8(a)参照)。

次に切れ刃の頂点から、ある高さ Δh で底辺に平行な直線を引き砥粒切れ刃の摩耗面を作図する。プログラムではこの摩耗面を頂点からの高さ、あるいは摩耗面の長さ Δw のいずれかの方法で任意の量をインプットできるものとした(図7参照)。

砥粒切れ刃の砥石半径方向の高さの先端位置は砥石外周面上、微小であるが不ぞろいがあり、これが研削仕上げ面粗さに影響を与えることが知られている。本研究ではこの不ぞろい X_i は正規分布するものとし、任意の標準偏差値 $S.D.$ をインプットして発生する正規乱数により前述の切れ刃モデルを描いた基準断面の位置を 図8(b) のように、わずかに上下にシフトすることにより設定されるものとした。

このようにしてランダムな砥粒切れ刃モデルを描いた基準断面はあらかじめ作成し、コンピュータのメモリーに格納しておくが、その総数は 砥石円周上の切れ刃数(砥石の円周長さ/基準長さ f_g) に合わせた。

2.3 砥粒切入み深さ

円筒研削において砥石外周上の切れ刃が1個通過するごとに工作物は 微小角度回転するが、その幾何学的関係より i 番目の砥粒設定切入み深さ D_i を計算する(図9参照)。すなわち工作物外周が砥石と接する点 P_1 から始まり、点 P_2 の面粗さ H_0 を含めた工作物外周が砥石より離脱するまで砥粒切入みが与えられる。したがって 砥粒切入み深さ D_i の増加分は 工作物・砥石の中心を結ぶ線まではプラスとなり、以降はマイナスとなる。

2.4 砥粒の弾性支持と実切入み深さ

前項で決定した砥粒切入み深さ D_i が与えられた時、実際には発生した法線力 f_{ns} により砥粒自体と 砥石全体とが弾性変形するので、これらを考慮して実切入み深さ D_g を決めなければならない。このために、砥石と工作物間の相対的な接触剛性を求める必要がある。

この接触剛性は工作物のほか、砥石全体および砥粒をそれぞれ均質な弾性体として Hertz の接触理論式より算出し、両者の和より導くことができる⁷⁾⁸⁾。 ついで、シミュレーション・プログラムを簡単にするため近似的に接触剛性が砥粒弾性支持のばね定数 K_b におき代えられるものとし、前述の砥粒切入み深さ D_i が変位として与えられた時の 法線力 $f_{ns}(=K_b \cdot D_i)$ と切れ刃が受ける法線切削力 f_n とのつり合い条件より砥粒実切入み深さ D_g を計算することができる。

図10において、単一の砥粒が D_g 切込んだ時の切削断面積を a_m 、比切削抵抗を k_s とすると、接線切削力 f_t および法線切削力 f_n は一般に次式により算出される⁹⁾。

$$\begin{aligned} f_t &= k_s a_m ; \quad k_s = g a_m^{-\epsilon} \\ f_n &= \lambda f_t \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、パラメータ γ , ϵ は被削材の特性により決まる定数、 λ は単粒切削における法線/接線切削分力比である。

Fig. 8 Generation of cutting edge

Rs : Radius of grinding wheel
Rw : Radius of workpiece
l : Center distance
Di : Setting grain depth of cut
Ho : Roughness of surface on workpiece remained
Vs : Grinding wheel speed
Vw : Workpiece speed
a : Wheel depth of cut

Fig. 9 Geometry of grain depth of cut in cylindrical grinding

Fig. 10 Actual grain depth of cut

砥粒切れ刃先端の頂点から摩耗面までの高さは Δh であるから、砥粒実切入み深さ D_g は、

$$\begin{aligned} D_g &= \frac{-H_2 + \sqrt{H_2^2 + 4H_1 D_i}}{2H_1} \\ H_1 &= \lambda \frac{k_s}{k_b} \tan \phi \\ H_2 &= 2\Delta h H_1 + 1 \end{aligned} \quad (3)$$

により求めることができる。

松井は砥粒切れ刃通過の際、工作物表層部が弾塑性的挙動を生じるものとして 研削シミュレーションを行っている⁵⁾。弾性については前述のように本研究でも同様に扱っているが、塑

性流動については盛り上がり形状を特定することが困難なため、緒言で述べたとおり対象とする被削材は盛り上がりの生じないものに限定した。

2.5 砥粒切れ刃のくい込み・上すべり

研削過程で砥粒切れ刃が工作物の表層部にくい込むか上すべりするかは研削成績を左右する重要なポイントである。砥粒設定切込み深さ D_i が小さい時、あるいは工作物表層部の硬度が高い時はくい込み難く、したがって上すべりとなる傾向にあるが、この関係の定量的な扱いについては明らかにされていない。

そこで本研究では、前述のように砥粒に切込み深さ D_i が与えられると、砥粒を弾性支持するばね特性より切れ刃先端に生じる工作物表層部への押付け力 f_{ns} を計算し、ついで、これを切れ刃先端の摩耗面積で割り 摩耗面に発生する面圧 P_0 を計算する。

面圧 P_0 が工作物の特性値としてインプットしたビッカース硬度値 P_1 より大きければくい込み、小さければ上すべりに移行する判別方法とした。厳密には動的あるいは熱的な挙動を考慮しなければならないが、ここでは単純に静力学的に取り扱うこととした。砥粒切れ刃のくい込みが成立すると、引き続いて前述の砥粒切削が実行される。また、基準断面の砥粒切れ刃モデルとこの中に描いた工作物表面の条痕が干渉しない場合はエアカットとなり、法線・接線切削力 f_n , f_t は共にゼロとなる。判別の結果、くい込みが成立した場合は引き続き前述の砥粒切削のプロセスに入る。

2.6 研削力

多数の砥粒切れ刃の分布はランダムであり、また砥粒切れ刃先端が砥石半径方向に不ぞろいであるため工作物との接触弧中、多数の切削断面積は図 11 のような度数分布をなす。

砥石にかかる接線研削力 F_t および法線研削力 F_n は、それぞれ単一切れ刃による接線切削力 f_t 、法線切削力 f_n と上すべりに関する力の総和として以下のように表すことができる。

$$F_t = \frac{V_w B_s}{V_s f_g} \sum_{i=1}^Q \{ (f_t)_i + \mu (f_{ns})_i \} \quad (4)$$

$$F_n = \frac{V_w B_s}{V_s f_g} \sum_{i=1}^Q \{ \lambda (f_t)_i + (f_{ns})_i \}$$

Q は工作物表面上の 1 点が砥石との接触弧中を通過する間の砥粒の総数であり、 B_s は研削幅、 μ は上すべりの際に生じる砥粒先端摩耗面と工作物表面との間の摩擦係数である。なお、シミュレーションでは、 λ , μ は定数として予め入力しておく。

従来の研削力の算式は、砥粒による切削断面積の度数分布を考慮していないのに対し、本研究では式(2)に示す単粒切削の比切削抵抗 K_s を基礎として、砥粒切削断面積 a_m の分布による現実に近い計算方法としている点に特徴がある。

2.7 砥石実切込みと予備研削シミュレーション

シミュレーションを開始するには、まず砥石実切込み（以下、砥石切込み） a がインプットされなければならない。いま、工作物が i 回転の設定切込みを A_i 、機械系の弾性たわみを e_i 、前回の切り残しを e_{i-1} とすると、 i 回目の砥石切込み a_i は、

$$a_i = e_{i-1} + A_i - e_i \quad (5)$$

である。試みにある荒研削例について研削シミュレーションを行ってみると、砥石切込み a と弾性たわみ e は図 12 に示す

Fig.11 Frequency of grain cutting area in a certain revolution of workpiece when grinding

Fig. 12 Relation between wheel infeed and elastic displacement in grinding system

ように $e \propto a^c$ の関係にある。

そこで、 i 回転目のシミュレーションでは前回までのシミュレーションにより得た知識により弾性たわみ e_i を推定する方法を採った。もっとも、最初にシミュレーションを開始するときはこのような知識がないので、機械系の剛性を無限大として予備研削シミュレーションを実行し、学習により e_i を推測する方法を採った。また途中のシミュレーションでも砥石設定切込み A_i が $\pm 80\%$ 以上に大きく変化する場合は同様に予備研削シミュレーションを実行して C を見直し正確な弾性たわみの予測ができるようにした。

3. シミュレーションの手順

シミュレーションを開始するにはまず、工作物の物性値、使用砥石の仕様諸元および研削条件をインプットする。以降、引き続いて行われるシミュレーションの手順を図 13 のフローチャートに示す。

すなわち、砥粒切れ刃モデルをメモリーより 1 個ずつ呼び出し、砥粒切込み深さ D_i を与えて上すべり・くい込みの判別を行い、後者の場合は砥粒支持の弾性条件から砥粒実切込み D_g を決め、ついで砥粒による切削力 f_t , f_n の計算と新しい工作物表面の創成を行う。

前者の場合は、切れ刃先端の摩擦係数 μ と砥粒の押付け力 f_{ns} の積を接線研削力に、また押しつけ力 f_{ns} を法線研削力に、それぞれ加算する。

このプロセスを工作物表面上の1点が砥石との接触弧中を通過する回数実行し、終了すると次の工作物回転に移り、新たに設定した砥石切込み深さ A でこのプロセスを繰り返す。

このようにして 荒研削から仕上げ研削に至る 一連のシミュレーションを行い、出力情報を新しいファイルあるいはハードコピーとして出力し、シミュレーションを終わる。

計算中は CRT に研削される工作物の表面形状を 画面表示すると共に、その時の研削力 F_t , F_n や 面粗さ R_a , R_{max} , R_z 値を表示し、刻々変化する研削状況を観察することにより、その実態を把握できるようにした。

4. 結 言

研削シミュレーションは研削技術に関する断片的な知識の総合化ができる点、および研削状況の画像観察や計算データの収集により研削の実態を把握できる点に大きな特徴がある。

また、本研究では構成要素として砥粒切れ刃の工作物表面に対する、くい込み・上すべりの判別や砥粒切削断面積の度数分布を考慮した研削力の算出など実際の研削に近い方法を採用したことも特徴として挙げられる。

本稿では円筒プランジ研削を中心に研削シミュレーションの基本構成を述べたが、これを 円筒トラバース研削や内面研削、平面研削についても適用したシミュレーション・プログラムを開発しているが、これらを含めたシミュレーションの使用例については次の機会に報告する予定である。

本稿で述べた計算加工学とも言うべき研削シミュレーションにより経験中心、現場依存から 少しでも脱却していくことが、これからの研削技術を発展に導く一つの道ではないかと思う。

末稿ながら本研究は精密工学会産学協同研究協議会 研削シミュレーション技術の開発 に関する研究協力分科会により支援していただいたことを付記し¹⁰⁾、関係者各位に謝意を表する。

また、本研究遂行にあたり 貴重な資料をご提供いただき、激励を賜った 東北学院大学、松井正己教授に 厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) R. M. Baul and R. Shilton: Mechanics of Metal Grinding with Particular Reference to Monte Carlo Simulation, the 8th Int. M.T.D.R. Conf., (1967) 923.
- 2) 佐田登志夫, 吉川弘之: 研削加工面あらさのシミュレーション, 昭和42年度精機学会秋季大会前刷, (1967) 113.
- 3) H. Yoshikawa and J. Peklenik: Three Dimensional Simulation Technique of the Grinding Process, Ann. of the CIRP, 18, (1970) 361.
- 4) 松井正己, 庄司克雄, 前野了三: 研削加工のモンテカルロシミュレーション, 精機学会山口地方講演会前刷, (1968.12) 49.

Fig. 13 Flow chart of simulation procedure

- 5) 松井正己: 研削機構に及ぼす砥粒-工作物の弾塑性的挙動の影響, 精密機械, 46, 2 (1980) 177.
- 6) 日本粉体工業協会編: 造粒便覧, オーム社, (1975) 23.
- 7) R. H. Brown, K. Saito and M. C. Shaw: Local Elastic Deflections in Grinding, Ann. of the CIRP, 19, (1971) 105.
- 8) 米津栄, 稲崎一郎, 柴田順治, 清水哲: 研削におけるびり振動と形状精度, 日本機械学会, 工作機械の剛性および切削性能の向上に関する研究分科会の成果報告書, (1971.2) 289.
- 9) 小野浩二: 研削仕上, 槇書店, (1962) 21.
- 10) 精密工学会: 研削シミュレーション技術の開発に関する研究協力分科会研究成果報告書, (1992).