研削における砥粒破碎のマルコフ過程的解析 (第2報)

——破碎過程のマルコフ性の検討——

白井英治** 帯川利之** 萩原親作***

Study on Edge Fracture of Abrasive Grain during Grinding with Applying
the Theory of Markov Process (2nd Report)
—Fracture Characteristics as Markov Process—

Eiji USUI, Toshiyuki OBIKAWA and Shinsaku HAGIWARA

In order to examine the fracture characteristics as Markov process, a fracture test of WA single grain in a modified form of surface grinding is carried out. Using the instrument reported in the previous paper, created topography of grain cutting edge by the fracture is identified into the 10 representative models proposed and the transition probabilities between the models are obtained. The probability is found to be homogeneous and to satisfy the elementary Markov property. Concerning the fracture onset, it is found that exponential distribution always conforms with variation of the onset probability with number of the cutting, though the parameter value of the distribution depends upon the edge models. The fracture onset thus appears to also satisfy the requirements as Markov process. A formulation of analysis as Markov process to obtain variation of the edge shape distribution during grinding is proposed and some preliminary results of the analysis are discussed.

Key words : edge fracture of abrasive grain, Markov process, transition probability, fracture onset probability, exponential distribution, formulation of analysis

1. ま え が き

前報¹⁾ではマルコフ過程を応用した砥粒破碎の解析法の大略を述べるとともに、レーザ光の反射を用いる砥粒切れ刃の形状測定機を試作し、学習機能をもつパターン認識技法と組み合わせて切れ刃形状を10種類のモデルに自動識別する計測・処理システムを得たことを報告した。本報では単粒研削による破碎実験を行い、このシステムを用いて各モデル間の推移確率、破碎確率を求め、砥粒破碎が単純マルコフ過程であることをまず検証する。次いでこれらの結果を用いて予備的解析を行い、本研究の手法により有用な破碎過程の情報が得られることを示す。

2. 単粒破碎実験

研削砥石から採取したWA 24番の砥粒(粒径約0.85 mm, 多結晶)を黄銅製小円柱の端面に接着剤アラライトで固定し、この円柱を図1に示す直径240 mm, 厚さ20 mmのアルミニウム円板に取り付ける。この円板を砥石として平面研削盤に装着し、単粒研削実験を行った。被削材は構造用炭素鋼S 50 C(水焼入れ, 硬度HRC=52)であり、切削速度は22.6 m/s(1900 rpm), テーブル送り速度は0.12 m/s, 砥粒最大切込みは10 μ m, 乾切削である。被削材の幅は10 mmであり、テーブル1ストロークでこの間に3回の切削が行われる。各回の切削は切削痕の干渉しない、Shawら²⁾の分類による[V]型である。1ストロークの切削ごとに被削材の長手方向に切削位置を移動して次の10 μ mの切込みが与えられるが、この時前回の切込み開始時と比較して破碎発生の有無、破碎高さが検出できる。破碎が生じなければ切削を続け、破碎が生じれば前報¹⁾の方法で切れ刃形状を測定する。1砥粒

* 原稿受付 昭和59年3月23日, 昭和58年度精機学会春季大会学術講演会(昭和58年3月28日)にて発表

** 正会員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 正会員 山梨大学工学部(甲府市武田4-4-37)

Fig. 1 Setup for fracture experiment with single abrasive grain

につき5回破碎が生ずるまで実験を行い、初期形状も含めて計6個の切れ刃形状データを得た。なお図1のチャージ増幅器とオシロスコープは前報¹⁾で述べた砥粒先端の「スス」からの露出操作に使用されるものであり、被削材上に置かれた鉛板に砥粒を押し込む際の押込み深さの検出用である。

3. 切れ刃形状の推移確率

前報¹⁾で砥粒切れ刃の形状モデルとして図2に示す10種類を提案した。破碎回数を m としてこれらのモデルを確率変数 X_n と考えると、 X_{n+1} がモデル k である確率 P は一般には次式の条件つき確率となる。

$$P = P(X_{n+1} = k | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_{n-1} = i_{n-1}, X_n = j) \quad (1)$$

しかしこの確率過程が単純マルコフ性を持てば、 P は現在の状態 $X_n = j$ のみに支配されて、

$$P = \begin{bmatrix} \boxed{0.357} & 0.089 & 0.036 & \boxed{0.232} & 0.036 & 0.018 & 0.071 & 0.054 & 0.054 & \boxed{0.054} \\ 0.263 & 0.105 & 0.053 & 0.000 & 0.053 & 0.263 & 0.158 & 0.000 & 0.000 & 0.105 \\ 0.286 & 0.071 & 0.071 & 0.143 & 0.143 & 0.071 & 0.071 & 0.000 & 0.000 & 0.143 \\ \boxed{0.250} & 0.050 & 0.050 & \boxed{0.325} & 0.000 & 0.025 & 0.075 & 0.075 & 0.075 & \boxed{0.075} \\ 0.167 & 0.167 & 0.000 & 0.083 & 0.250 & 0.083 & 0.083 & 0.083 & 0.000 & 0.083 \\ 0.333 & 0.167 & 0.000 & 0.278 & 0.000 & 0.056 & 0.056 & 0.056 & 0.056 & 0.000 \\ 0.250 & 0.000 & 0.000 & 0.250 & 0.050 & 0.050 & 0.150 & 0.050 & 0.050 & 0.150 \\ 0.231 & 0.000 & 0.077 & 0.231 & 0.077 & 0.231 & 0.000 & 0.077 & 0.000 & 0.077 \\ 0.125 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.063 & 0.000 & 0.000 & \boxed{0.813} & 0.000 \\ \boxed{0.136} & 0.023 & 0.068 & \boxed{0.091} & 0.023 & 0.068 & 0.045 & 0.068 & 0.023 & \boxed{0.455} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$P = P(X_{n+1} = k | X_n = j) = p_{jk} \quad (2)$$

となる。 p_{jk} はモデル j から k に移る推移確率である。更にこの確率が定常的、すなわち h を0でない任意整数として

$$P(X_{n+h+1} = k | X_{n+h} = j) = P(X_{n+1} = k | X_n = j) \quad (3)$$

であれば推移過程は単純斉時マルコフ連鎖として扱えることになる。 $x_{n+h} = j$ と $x_n = j$ とは同じくモデル j でも前歴が異なるはずであるから、結局式(3)が成り立つことを前項の破碎実験の結果から示せば破碎の単純斉時マルコフ性を検証できる。

供試砥粒数72個について各切れ刃モデルの初期の存在確率すなわち切れ刃形状分布は次式となった。左から右に向かってModel 1, 2, ..., 10の順に存在確率を示してある。

$$P_0 = [0.222, 0.083, 0.097, 0.153, 0.042, 0.083, 0.083, 0.000, 0.014, 0.222] \quad (4)$$

未使用、未ドレッシングの砥石から任意に採取した砥粒であり、方位を考えずに台座に接着した結果であるが、緩斜面の1枚切れ刃(Model 1)、緩斜面の2枚切れ刃(Model 4)、平坦部のない鋭切れ刃(Model 10)が多い分布となっている。じん性が比較的高く、球状多面体が多いとされるA系砥粒の特徴³⁾がでているようである。なおドレッシングによってこの初期分布がどのように変化するかはまだ検討していない。

式(2)、(3)が成り立つとして合計328個の切れ刃形状測定例から得た推移確率 p_{jk} を行列表示すると式(5)となる。ただし1ストローク中の連続する3回の切削で複数回の破碎は生じないと仮定しているが、この仮定は後述の平均破碎生起数から考えて妥当と思われる。式(5)の第1行から第10行までのそれぞれはModel 1からModel 10に対応し、右下がりの対角線上の値は p_{ii} 、すなわち破碎後に再び同じModelになる確率を示している。また当然ながら各行の確率の和は1である。

既述の Model 1 と 4 に着目すると、両者とも p_{ii} が大きいと同時に互いに推移しあう確率 p_{14} , p_{41} も大きいことがわかる。また両モデルともほかのモデルからこれに推移する確率 p_{i1} , p_{i4} が大きい。これらの事実は両モデルの存在確率が破碎の繰返しとともに次第に増大する、あるいは存続して消滅しないことを示すものといえる。ただし後述のように別の影響因子として破碎発生の間隔が各モデルで異なることがあり、これを考慮しなければ定量的には論じられない。例えば尖鋭切れ刃の Model 10 は $p_{10,10}$ が著しく大きくほか

へ推移する確率は小さいが、後述のように破碎の発生は頻繁であり、ほかからこのモデルに推移する確率も小さいので結局は短時間で消滅してしまう。次に切れ刃先端が平坦な Model 9 に着目すると $p_{99}=0.813$ と 1 に近い大きな確率であり、Model 9 はいわゆる吸収状態に近いことがわかる。すなわちいったんこのモデルになればほかのモデルに転ずることはほとんどない。

式 (5) 中の四角枠で囲んだ確率値は後述の切れ刃形状分布の時間変化に大きく影響する成分である。これ

Fig. 2 Proposed edge models of abrasive grain and some typical examples of their topography and photodiode output

に対し式(6), (7)はそれぞれ各砥粒の第1回と第2回の破碎時および第3回と第4回の破碎時のデータから

求めた推移確率行列であり、同じく重要成分値を四角枠で囲んである。

$$P_{1,2} = \begin{bmatrix} \boxed{0.336} & 0.107 & 0.038 & \boxed{0.116} & 0.036 & 0.038 & 0.145 & 0.074 & 0.036 & \boxed{0.074} \\ 0.333 & 0.056 & 0.056 & 0.000 & 0.083 & 0.278 & 0.083 & 0.000 & 0.000 & 0.111 \\ 0.568 & 0.000 & 0.072 & 0.072 & 0.072 & 0.072 & 0.072 & 0.000 & 0.000 & 0.072 \\ \boxed{0.291} & 0.111 & 0.056 & \boxed{0.250} & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.056 & 0.125 & \boxed{0.111} \\ 0.000 & 0.333 & 0.000 & 0.000 & 0.375 & 0.167 & 0.125 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.300 & 0.100 & 0.000 & 0.200 & 0.000 & 0.100 & 0.100 & 0.100 & 0.100 & 0.000 \\ 0.100 & 0.000 & 0.000 & 0.283 & 0.000 & 0.083 & 0.184 & 0.083 & 0.083 & 0.184 \\ 0.050 & 0.050 & 0.175 & 0.300 & 0.050 & 0.175 & 0.050 & 0.050 & 0.050 & 0.050 \\ 0.167 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & \boxed{0.833} & 0.000 \\ \boxed{0.140} & 0.038 & 0.077 & \boxed{0.062} & 0.031 & 0.070 & 0.000 & 0.108 & 0.031 & \boxed{0.443} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$P_{3,4} = \begin{bmatrix} \boxed{0.350} & 0.050 & 0.050 & \boxed{0.400} & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.050 & 0.050 & \boxed{0.050} \\ 0.250 & 0.250 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.167 & 0.333 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.167 & 0.167 & 0.000 & 0.000 & 0.167 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.500 \\ \boxed{0.292} & 0.000 & 0.063 & \boxed{0.299} & 0.000 & 0.000 & 0.063 & 0.110 & 0.110 & \boxed{0.062} \\ 0.333 & 0.000 & 0.000 & 0.167 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.250 & 0.250 \\ 0.125 & 0.125 & 0.000 & 0.750 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.167 & 0.000 & 0.000 & 0.500 & 0.167 & 0.000 & 0.167 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.375 & 0.000 & 0.000 & 0.125 & 0.125 & 0.125 & 0.000 & 0.125 & 0.000 & 0.125 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.125 & 0.000 & 0.000 & \boxed{0.875} & 0.000 \\ \boxed{0.195} & 0.000 & 0.125 & \boxed{0.000} & 0.000 & 0.074 & 0.195 & 0.000 & 0.000 & \boxed{0.411} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(6), (7)の場合データ数が少ないので低確率の成分値は一致しないが、四角枠で囲んだ成分値は式(5), (6), (7)の3式ともかなりよく一致していることがわかる。データ数の不足から十分な検証でないが、上記の結果から切れ刃モデル間の推移は単純斉時マルコフ過程とみてよいと思われる。

4. 破碎の発生確率

推移確率について単純斉時マルコフ性が成り立てば、破碎の発生確率についても同様と考えるのが自然であろう。すなわち各回の切削を確率の独立性、定常性が保証されたベルヌーイ試行、破碎の発生をその結果とみれば試行数が多い場合、時間 t 内の破碎生起数 k の確率分布はよく知られているようにパラメータ λt の次式のポアソン分布となる。

$$P_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (8)$$

ただし λ は単位時間内の平均破碎生起数である。また破碎の生起時間間隔を確率変数 L とすれば時間 t までに破碎が生ずる確率 $F(L < t)$ は式(8)を用いて

$$\begin{aligned} F(L < t) &= 1 - F(L > t) \\ &= 1 - e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (9)$$

なる指数分布になる。また時間 t の単位として1回の切削に要する時間を選べば、式(9)は切削回数 t まで

に破碎が生ずる確率、 λ は1回の切削あたりの平均破碎生起数となる。従って既述の破碎実験の結果から各切れ刃形状モデルについて破碎確率が式(9)の指数分布になることを示せば、破碎の生起についても単純定常マルコフ性を検証できることになる。

式(9)の λ を求めるには破碎生起までの切削回数を知らねばならないが、既述のように本報告の実験では研削盤テーブルの1ストロークに3回の切削が行われており、この間の何回目の切削で破碎が生じたかは識別できない。そこで指数分布を前提とする次の補正を行って λ を求めることにした。実際の切削回数と破碎生起までの切削回数の差が平均 Δn であるとする

$$\lambda = \frac{\sum_i k_i}{\sum_i \{(n_c N_i - \Delta n) k_i\}} \quad (10)$$

ただし、 N_i は破碎生起までのテーブルストローク数、 k_i は N_i 回のストロークで破碎した砥粒数、 n_c は1回のストローク中の切削回数（本報告の実験では3回）である。また切削回数0から n_c までの破碎発生時の期待値は

$$n_c - \Delta n = \frac{\int_0^{n_c} \lambda e^{-\lambda t} \cdot t dt}{\int_0^{n_c} \lambda e^{-\lambda t} dt} \quad (11)$$

Table 1 Dependence of friability parameter λ upon edge models of abrasive grain

Stinger (Model 10)	$\lambda_{10} = 0.356$
Cliff (Model 3)	$\lambda_3 = 0.274$
Steep slope and cliff (Model 8)	$\lambda_8 = 0.260$
Double steep slope (Model 5)	$\lambda_5 = 0.206$
Gentle slope and cliff (Model 7)	$\lambda_7 = 0.190$
Single steep slope (Model 2)	$\lambda_2 = 0.188$
Gentle slope and steep slope (Model 6)	$\lambda_6 = 0.187$
Double gentle slope (Model 4)	$\lambda_4 = 0.164$
Single gentle slope (Model 1)	$\lambda_1 = 0.163$
Plateau (Model 9)	$\lambda_9 = 0.059$

Fig. 3 Variation of probability density of breakage onset with number of cut showing difference due to edge model

したがって式 (10), (11) より λ は次式で求められる。

$$\lambda = \frac{1}{n_c} \ln \left[\frac{1}{1 - \sum_i k_i / \sum_i (N_i k_i)} \right] \quad (12)$$

表 1 に各切れ刃形状モデルについて得られた λ の値を大きさの順に示す。また図 3 は実験結果の指数分布への適合性を示す数例であり、各モデルともよく適合していることがわかる。したがって破砕の生起についても単純斉時マルコフ性が成り立つと言える。

表 1, 図 3 をみると尖鋭切れ刃の Model 10 では破砕確率が非常に大きく、逆に平坦切れ刃の Model 9 では

Fig. 4 Variation of probability density of breakage onset with number of cut obtained for all specimens by disregarding edge model

非常に小さいことがわかる。明らかにほかのモデルとはかけ離れており、このため前報¹⁾では切れ刃面構成とは無縁に両モデルを独立モデルとした。Model 1 から Model 8 については、緩斜面の 1 枚切れ刃 (Model 1), 同 2 枚切れ刃 (Model 4) の破砕確率が低く、絶壁や急斜面で構成されるモデルほど破砕確率が高い常識の結果になっている。また同程度の斜面なら 1 枚切れ刃より 2 枚切れ刃の方が破砕しやすい傾向がある。なお同じ切れ刃形状モデルでも、例えば図 2 の Model 1 にみるように、切れ刃面の面積・傾き角 i (前報¹⁾ 参照), 切れ刃面の背後の面構成などはかなり異なるにもかかわらず、モデルに固有な推移確率、破砕確率が定常的に得られることは、切れ刃内応力や破壊応力条件を考える力学的立場からすればかなり奇異である。切れ刃形状モデルの選定が妥当であったこと、大づかみな統計的解析の妙味であること以外、著者自身にも理由は明らかでない。なお切れ刃形状を区別せず、全供試砥粒について破砕確率分布を求めると図 4 のようになり、同じく指数分布となる。分布のパラメータ λ は切削速度や砥粒切込みなどの切削条件に対する WA 24 番砥粒自体の破砕性の尺度として使用できると思われる。

5. 切れ刃形状分布の推移

本報告の実験は砥粒切込みが $10 \mu\text{m}$ という巨大値で全砥粒について一定、しかも [V] 型切りくずを生ずる研削条件という状況下のものであるから、得られた推移確率、破砕確率をもとに切れ刃形状分布の推移を求めても実際の意義に乏しい。しかし定性的傾向は明らかにできるので以下に検討を試みる。式 (9) の破砕確率を各切れ刃形状モデルについて次式で行列表示する。

$$F = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & f_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & f_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.150 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0.171 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0.240 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0.151 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0.186 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0.171 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0.173 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0.229 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0.057 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0.300 \end{bmatrix} \quad (13)$$

ただし f_i は i 型切れ刃モデルの1回の切削における破碎確率 $f_i = 1 - e^{-\lambda_i}$ である。1回切削後の形状分布は式(4), (5), (13)を用いて

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0(E - F) + P_0FP \\ &= P_0\{E + F(P - E)\} \end{aligned} \quad (14)$$

ただし E は 10 行 10 列の単位行列である。初めの式の右辺第 1 項は破碎を生じなかったもの、第 2 項は破碎を生じて自身あるいは他のモデルに推移したものを ρ

表している。同様に 2 回切削後の形状分布は

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1(E - F) + P_1FP \\ &= P_1\{E + F(P - E)\} \\ &= P_0\{E + F(P - E)\}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

したがって n 回切削後の形状分布は

$$\begin{aligned} P_n &= P_{n-1}(E - F) + P_{n-1}FP \\ &= P_0\{E + F(P - E)\}^n \\ &= P_0\bar{P}^n \end{aligned} \quad (16)$$

$$\bar{P} = [\bar{p}_{ij}] = \begin{bmatrix} 0.903 & 0.013 & 0.005 & 0.035 & 0.005 & 0.003 & 0.011 & 0.008 & 0.008 & 0.008 \\ 0.045 & 0.847 & 0.009 & 0.000 & 0.009 & 0.045 & 0.027 & 0.000 & 0.000 & 0.018 \\ 0.069 & 0.017 & 0.778 & 0.034 & 0.034 & 0.017 & 0.017 & 0.000 & 0.000 & 0.034 \\ 0.038 & 0.008 & 0.008 & 0.898 & 0.000 & 0.004 & 0.011 & 0.011 & 0.011 & 0.011 \\ 0.031 & 0.031 & 0.000 & 0.015 & 0.863 & 0.015 & 0.015 & 0.015 & 0.000 & 0.015 \\ 0.057 & 0.028 & 0.000 & 0.047 & 0.000 & 0.838 & 0.010 & 0.010 & 0.010 & 0.000 \\ 0.043 & 0.000 & 0.000 & 0.043 & 0.009 & 0.009 & 0.852 & 0.009 & 0.009 & 0.026 \\ 0.053 & 0.000 & 0.018 & 0.053 & 0.018 & 0.053 & 0.000 & 0.787 & 0.000 & 0.018 \\ 0.007 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.004 & 0.000 & 0.000 & 0.989 & 0.000 \\ 0.041 & 0.007 & 0.020 & 0.027 & 0.007 & 0.020 & 0.013 & 0.020 & 0.007 & 0.838 \end{bmatrix} \quad (17)$$

となる。

図 5 は切削回数 $n=140$ 回までの切れ刃形状分布の推移を示したものである。また $n=400 \sim 500$ 回程度で分布は定常的となり、次式で示すものになる。

$$\begin{aligned} P_\infty &= [0.203, 0.042, 0.017, 0.143, 0.023 \\ &\quad 0.047, 0.045, 0.025, 0.410, 0.045] \end{aligned} \quad (18)$$

図 5 をみると、切れ刃先端が平坦な Model 9 が初期分布としては少ないにもかかわらず、急速に増加し続けて支配的になることがわかる。推移確率 p_{99} が大きくほかのモデルに転じにくいと同時に破碎確率が著しく低い $\bar{P}_{99} \cong 1$ となり、吸収マルコフ連鎖的に推移するので、ほかのモデルがこれに吸収されるからである。またこのモデルについて特筆すべきは図示の結果が破碎のみによることである。従来の諸報告⁴⁾⁵⁾では研削の継続とともに砥粒の逃げ面摩耗面積が増し、研削焼けやびびり振動などの砥石面寿命の症状が生ずるとしているが、破碎によっても砥粒先端は次第に平坦

化するのである。次に Model 1 と Model 4 に着目すると、既述のようにほかからこの両モデルに推移してくる確率が高いため、他モデル切れ刃の破碎が頻繁な初期には存在数が増す。しかし Model 9 を除いた他モデル切れ刃の数が少なくなると次第に他モデル（特に Model 9）への推移が優勢になるため存在数は減少しだす。ただし Model 1 と 4 は既述のように相互に推移しあう確率が高く、破碎確率も Model 9 に次いで低い $\bar{P}_{11}$ ため存在数は容易に減少せず、有効な切れ刃として存続するわけである。これに対し尖鋭切れ刃の Model 10 は初期分布としては多く、また破碎に際して自身へ再生する確率もかなり高いにもかかわらず、破碎確率が極めて大きいため急速に存在数が減少する。また同図より Model 3, 5, 8 および Model 2, 6, 7 はそれぞれ同程度の存在数に落ちつくことがわかるが、この結果は表 1 の破碎確率の相違によるように思われる。

以上の諸結果を通観すると、異形切れ刃は研削の開

Fig. 5 Variation of existence probability of edge model with number of cut calculated with equation (16)

始とともに急速に減少し、緩斜面1枚切れ刃 (Model 1) と緩斜面2枚切れ刃 (Model 4) が安定な有効切れ刃として存続して切削を続ける。また先端が平坦な切れ刃 (Model 9) の数が次第に増して40%程度に達し、砥石面寿命の諸症状に寄与するといった変化であり、実際の状況によく対応していると思われる。上述の計算はもちろん、砥粒切込みの効果や切削断面形状の効果など実際の研削過程における諸要因をほとんど無視した架空のものであり、例えば式(18)の定常分布には砥石回転数1900 rpmでは約15 s程度の研削時間で到達してしまう。しかしながらこの所要時間は砥粒切込みを10 μm から減少させれば容易に実情に近づけられるものであり、本報告のマルコフ過程的解析から破碎過程の有用な情報が得られるのは確かであると

思われる。

結 論

- (1) 単粒研削による砥粒破碎実験を行い、前報で提案した切れ刃形状モデル間の推移確率、各モデルの破碎生起確率を求めた。
- (2) 推移確率は単純斉時マルコフ性を持つ。また破碎生起確率は指数分布をなし、破碎についても単純斉時マルコフ性が成り立つ。
- (3) 得られた推移確率、破碎生起確率を用いて切れ刃形状分布の切削回数による変化を計算する方法を示した。
- (4) 前項の方法による試算を行い、定性的にはあるが実情によく適合すると思われる結果が得られることを示した。

謝 辞

本報告の破碎実験と諸計算は東京工業大学大学院生、前村謙一郎、田中雅人の両氏の努力によるところが大きい。また実験に使用した砥石は三井研削砥石株式会社御好意により作製していただいた。記して感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 1) 臼井英治, 常川利之, 萩原親作: 研削における砥粒破碎のマルコフ過程的解析 (第1報), 精密機械, **50**, 10 (1984) 1652.
- 2) G. S. Reichenbach, J. E. Mayer, S. Kalpakcioglu and M. C. Shaw: The Role of Chip Thickness in Grinding, Trans. ASME, **78**, 5, (1956) 847.
- 3) 例えば, 砥粒加工研究会編: 砥粒加工技術便覧, 日刊工業新聞社 (1965) 23.
- 4) 吉川弘之: 研削砥石の寿命特性, 精密機械, **28**, 10 (1962) 562.
- 5) 島宗 勉, 小野浩二: 砥石寿命に関する研究 (第1報), 精密機械, **46**, 11 (1980) 1379.