

## 研削ベルトの摩耗予測モデルとその応用

Prediction Model for the Wear of Abrasive Belt and its Application

植松 哲太郎\*・中川 威雄\*

Tetsutaro UEMATSU and Takeo NAKAGAWA

## 1. ま え が き

工作機械の制御という観点からみれば、ベルト研削加工の分野は切削加工のそれに比較して遅れている。複雑な曲面の加工の寸法制御<sup>1)</sup>などの段階から、最近になって工具寿命の改善を目標とする適応制御<sup>2)</sup>の段階へようやく移行してきた。今後さらに、加工の経済性や生産性を評価関数とする適応制御の導入へ進展していくものと思われる。その際、工具である研削ベルトの摩耗進行状態を研削条件に対応させて予測することが必要となる。

筆者のひとりには、切削工具の摩耗進行状態予測モデルの作成に、GMDH(Group Method of Data Handling)の手法を適用する方法についてすでに報告した<sup>3),4)</sup>。本報告は、同様な手法の適用によって、研削ベルトの摩耗進行状態を予測する統計モデルを作成できること、およびベルト研削加工に適応制御を実施する際の予測モデルの利用法についての指針を示すものである。

## 2. モデルの作成

## 2.1 対象プロセス

本報告では、図1に模式的に示すコンタクトホイール型平面ベルト研削盤を対象機械とする。研削ベルトは多数の砥粒が集まって一つの工具を形成しているので、その摩耗状態を定量的に直接測定または表示するのは難しい。柴田ら<sup>2)</sup>は研削ベルトの摩耗特性を定量的に評価する実用的なパラメータ  $\bar{h}_N$  を提案している。このパラメータ  $\bar{h}_N$  は、単位研削幅当たりの垂直方向研削抵抗に比例し、比研削抵抗に相当するものである。本報でもこの摩耗評価パラメータ  $\bar{h}_N$  を採用し、研削ベルトの摩耗に大きい影響をもつ研削速度、工作物送り速度および研削時間を説明変数として、パラメータ  $\bar{h}_N$  を説明する統計モデルの作成を試みる。切込みは一定(1mm)とし、工作物の材質はS45Cとする。

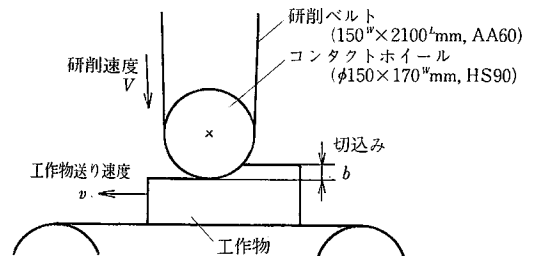


図1 コンタクトホイール型平面ベルト研削盤の模式図

## 2.2 モデル作成のアルゴリズム

モデルの作成は、前報<sup>1)</sup>で提案したアルゴリズムを用いる。具体的には、摩耗評価パラメータ  $\bar{h}_N$  を出力変数  $y$ 、研削時間  $t$  を主入力変数とし、研削速度  $V$ 、工作物送り速度  $v$ 、およびそれらの自然対数  $\log_e V$ 、 $\log_e v$  を副入力変数(ベクトル  $\mathbf{x}$  で表す)として、次の手順に従う。

手順[1]: モデル作成用のデータを得るために、研削速度  $V=900\sim 1500$  m/min、工作物送り速度  $v=0.5\sim 3.0$  m/minの範囲で、 $n$ 組の副入力変数 ( $\mathbf{x}_k: k=1, 2, \dots, n$ ) のもとで試し研削を行う。各組について、その摩耗進行曲線から10対の主入力変数-出力変数データ  $(t, y)_{jk} (j=1, 2, \dots, 10; k=1, 2, \dots, n)$  を採取する。 $n$ の値は、 $n=6, 8, 15$ の場合を後に比較する。表1に  $n=8$ の場合の副入力変数  $V$  と  $v$  の組み合わせを示す。

手順[2]: 摩耗評価パラメータ  $\bar{h}_N$  (出力  $y$ ) は研削時間  $t$  に対して単調に増加するから、 $y$  と  $t$  の関係を表す簡潔な主モデルとして、次の整式

$$y = F(t) = f_0 + f_1 t + f_2 t^2 + \dots + f_p t^p \quad (1)$$

を候補にあげる。副入力変数の各組  $\mathbf{x}_k$  について、手順[1]で得たデータ  $(t, y)_{jk}$  から最小二乗法によって、式(1)の係数  $f_{ik} (i=0, 1, \dots, p; k=1, 2, \dots, n)$  を決定する。 $p$ の値は、後述するように  $p=1, 2, 3$ の場合を比較、検討する。当然ながら、同じ番号  $i, k$  について、主モデル  $F(t)$  の最高次数  $p$  の値が異なれば、係数  $f_{ik}$  の値も異なる。

手順[3]:  $p$ の値を指定すると、手順[2]によって主

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

表1 モデル作成用研削条件の一例 (n=8)

番号	研削速度 V (m/min)	送り速度 v (m/min)
1	900	0.5
2	900	1.25
3	900	2.0
4	1200	0.75
5	1200	2.5
6	1500	1.0
7	1500	1.5
8	1500	3.0

表2 モデルの構造 (p=2, n=8 の場合)

説明変数	$t, x_1 (=V), x_2 (=v), x_3 (= \log_e V), x_4 (= \log_e v)$
主モデル	$y = f_0 + f_1 t + f_2 t^2$
副モデル	
係数 $f_0$	$f_0 = 1.33 + 10.4 x_3 + 19.7 x_3^2$
係数 $f_1$	$f_1 = 0.595 - 6.67 (2.74 + 8.86 x_3 + 32.7 x_3^2)^2$
係数 $f_2$	$z_1 = -1.96 + 7.31 x_1^2$ $z_2 = 7.00 + 6.97 x_4$ $z_3 = -0.391 + 3.54 x_2 + 52.9 x_2^2$ $z_4 = -1.28 + 0.0433 z_1^2 + 0.705 z_2$ $z_5 = 3.48 - 1.22 z_3 + 1.08 z_4 + 0.06 z_4^2$ $f_2 = z_5$

モデルの係数  $f_i$  に関する  $n$  組のデータ ( $x_k, f_{ik}$ ) ( $k=1, 2, \dots, n$ ) が得られる。このデータに基づいて次の副モデル

$$f_i = f_i(x) = f_i(V, v, \log_e V, \log_e v) \quad (2)$$

を決定する。しかし式(2)の関数形は不明であり、一般に複雑な形である。そこでGMDHの手法を用いてその構造を決定する。

手順[1]~[3]によって得られるモデルの構造は、主モデル(1)の最高次数  $p$  と副入力変数の組数  $n$  との組み合わせによって異なる。一例として、 $p=2, n=8$  としたときに得られた主、副モデルを表2に示す。

3. 予測モデルとしての性能

本研究で目的の一つとする、摩耗進行状態の予測モデルとしての能力は、次の相対推定誤差

$$e = (\hat{y} - y) / y \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

(ここで  $y$ : 観測値,  $\hat{y}$ : モデルによる推定値) によって評価する。いまモデル作成用の試し研削とは別に、副入力変数の21通りの組み合わせのそれぞれに対して9時点ずつ、合計  $21 \times 9 = 189$  点について、摩耗観測値とモデルによる摩耗推定値とから、相対推定誤差を式(3)によって求めた。 $p=2, n=8$  のモデル(表2)を用いて推定を行った場合は、相対推定誤差  $e$  の平均は  $\bar{e} = -2.1$  (%)、標準偏差は  $\sigma_e = 9.2$  (%) となった。 $p, n$  の他の組

表3 摩耗進行状態の相対推定誤差

組数 \ 次数	p=1		p=2		p=3	
	$\bar{e}$	$\sigma_e$	$\bar{e}$	$\sigma_e$	$\bar{e}$	$\sigma_e$
n=6	6.3	21.8	-0.7	11.7	13.8	68.6
n=8	5.3	16.3	-2.1	9.2	-8.8	34.8
n=15	3.2	15.1	-0.5	10.2	-1.4	25.7

( $\bar{e}$ : 平均,  $\sigma_e$ : 標準偏差)

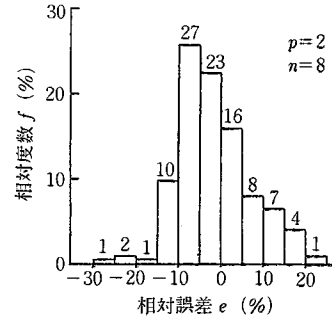
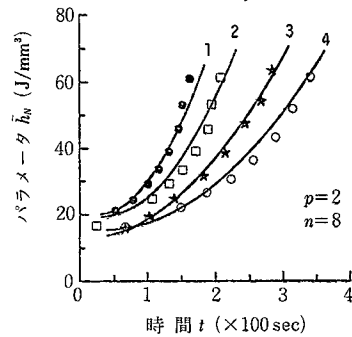


図2 モデルの相対推定誤差のヒストグラム



研削条件

曲線番号	V (m/min)	v (m/min)
1	1500	2.5
2	1500	1.25
3	900	1.5
4	1200	0.75

図3 推定摩耗進行曲線と観測値

合わせによって得られたモデルによる相対推定誤差の平均と標準偏差を表3に示す。主モデルの次数は  $p=2$  が適し、モデル作成用データのための副入力変数の組数  $n$  は、この検討の範囲では推定精度にそれほど影響しないことがわかる。試し研削量を減らすためには、 $n=6 \sim 8$  程度が適当と思われる。 $p=2, n=8$  の場合のモデルによる相対推定誤差  $e$  の相対度数分布を図2に示す。図3は、このモデルによる推定摩耗進行曲線(実線)と、対応す

る摩耗観測値（プロット）とを数例の研削条件について示したものである。

4. 予測モデルの応用

得られた摩耗進行状態予測モデルは、任意の研削条件 (V, v) の、任意の時刻 t における摩耗進行状態に関する予測情報を提供することはいうまでもない。ベルト研削加工に適応制御を導入する場合を想定して、モデルの具体的応用を検討してみる。

4.1 ベルト寿命の予測

前章の検討により、主モデルが2次式

$$y = f_0 + f_1 t + f_2 t^2 \quad (4)$$

のとき、モデル全体の摩耗予測能力がすぐれていることがわかった。研削条件 (V, v) を選定すれば式 (4) の係数  $f_0, f_1$  および  $f_2$  の値は副モデルより決定されるので、研削ベルトの寿命判定基準  $y = \bar{h}_{NL}$  が与えられると、ベルトの推定寿命  $\hat{T}_L$  は式 (4) よりただちに

$$\hat{T}_L = \{-f_1 + \sqrt{f_1^2 - 4f_2(f_0 - \bar{h}_{NL})}\} / 2f_2 \quad (5)$$

と求められる。主モデルの次数が  $p=1$  または3の場合も容易に解析的に、あるいは計算機によりベルト寿命を推定できる。

前章と同じ21通りの研削条件 (V, v) について、寿命判定基準を  $\bar{h}_{NL} = 50 (J/mm^3)$  としたときのベルト寿命

表4 工具寿命の相対推定誤差

(単位 %)

次数 組数	p = 1		p = 2		p = 3	
	$\bar{e}$	$\sigma_e$	$\bar{e}$	$\sigma_e$	$\bar{e}$	$\sigma_e$
n = 6	-16.4	17.4	2.2	9.7	-15.4	34.1
n = 8	-0.2	10.3	-0.1	6.0	-5.4	39.0
n = 15	1.5	9.4	-1.9	6.3	6.8	18.0

( $\bar{e}$ : 平均,  $\sigma_e$ : 標準偏差)

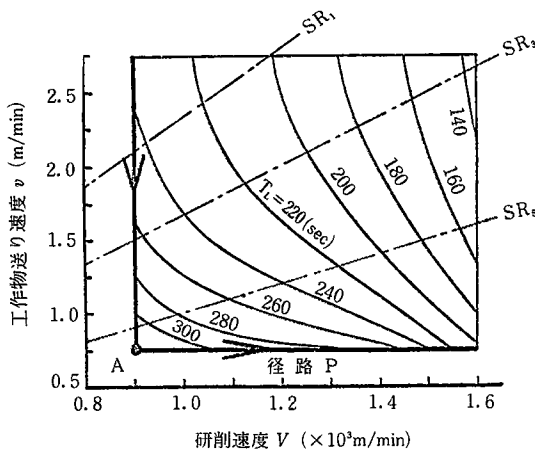


図4 等工具寿命曲線と最適径路

観測値とモデルによる寿命推定値とから、式(3)によって寿命推定相対誤差を求めてみた。p, nの種々の組合せに対する相対誤差の平均と標準偏差を表4に示す。表3と表4を比較すると、当然のことながら摩耗進行状態の推定精度が高い  $p=2$  の場合に寿命推定能力もすぐれている。

図4に、 $p=2, n=8$  の場合のモデルを用いて計算した、 $\bar{h}_{NL} = 50 (J/mm^3)$  のときの等寿命曲線群 (実線) を示す。機械側の制約により、研削速度と送り速度はそれぞれ  $V = 900 \sim 1600 \text{ m/min}, v = 0.75 \sim 2.75 \text{ m/min}$  の範囲で示した。一点鎖線で表された直線については後述する。

4.2 加工コストと生産性の評価

工作機械に適応制御を導入するとき、加工の経済性あるいは生産性を評価関数に選ぶことは有益である。本報では切込みを一定にしているのので、ベルト研削加工の経済性を単位研削距離当たりのコストで表し、生産性を単位時間当たり研削距離で表す。表5に示す記号を用いて

加工コスト: (=研削コスト+ベルト交換コスト)

$$C_u = \{C_M + (C_M t_c + C_B) / (T_L / 60)\} / v \quad (6)$$

生産性:

$$L_T = v \cdot (T_L / 60) / (T_L / 60 + t_c) \quad (7)$$

となる。標準的ケースとして、総人件費  $C_M = 70 \text{ ¥/min}$ 、ベルト価格  $C_B = 1500 \text{ ¥/1本}$ 、ベルト交換時間  $t_c = 1 \text{ min}$

表5 式(6)~(9)の記号と標準値

v: 工作物送り速度 [m/min]
$t_c$ : ベルト交換時間 = 1 [min]
$T_L$ : 工具寿命 [sec]
$C_u$ : 単位研削距離当たりコスト [¥/m]
$C_M$ : 単位時間当たり総人件費 = 70 [¥/min]
$C_B$ : ベルト価格 = 1500 [¥/1本]
$L_T$ : 単位時間当たり研削距離 [m/min]

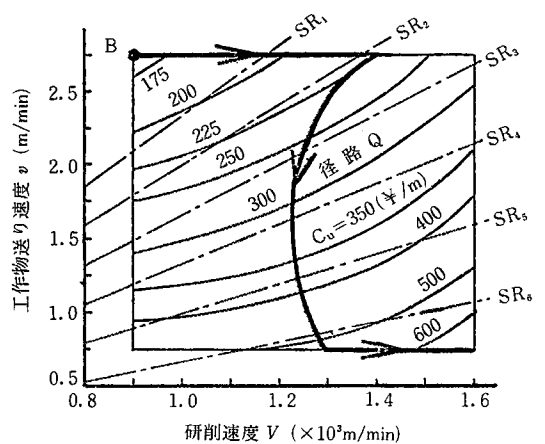


図5 等コスト曲線と最適径路

## 研究速報

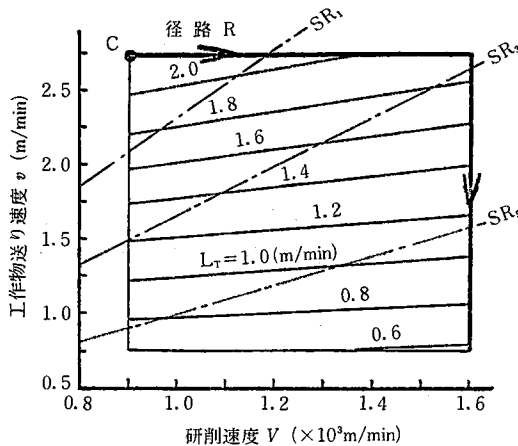


図6 等生産性曲線と最適径路

を代入すると

$$C_u = \{70 + 1570/(T_L/60)\}/v \quad [\text{¥/m}] \quad (8)$$

$$L_T = vT_L/(T_L + 60) \quad [\text{m/min}] \quad (9)$$

となる。なお工作物段取時間は近似的に0とした。

研削条件( $V, v$ )を決めると、モデルによってベルト寿命が推定されるので、式(8)、(9)によって加工コストと生産性の評価値が推定される。 $p=2, n=8$ のモデルを用いて計算した加工コストと生産性の等高線の $V-v$ 平面上における分布をそれぞれ図5と図6に実線で示す。

#### 4.3 最適加工条件

図4, 5, 6を比較すると、評価対象によって研削条件の影響のしかたが大幅に異なることがわかる。寿命と加工コストに対しては、傾向は異なるが研削速度と送り速度の両方が影響する。生産性に対しては研削速度はほとんど影響しない。工具寿命最大、加工コスト最小あるいは生産性最大のいずれかの目標を許容研削条件内で達成するには、それぞれ図4の点A、図5の点Bあるいは図6の点Cに相当する研削条件を選択すればよい。

柴田ら<sup>2)</sup>は、加工寸法精度をある許容範囲内に維持するためには、摩耗状態 $\bar{h}_N$ の値に対応した速度比 $SR (= v/V)$ で研削条件 $V, v$ を選択しなくてはならぬこと、この速度比 $SR$ は摩耗の進行に伴って減少することを指摘している。この知見を図4, 5, 6に適用してみる。図4, 5, 6中の一点鎖線は $SR=一定$ となる直線群を表してお

り、 $SR_1 \rightarrow SR_2 \rightarrow SR_3 \rightarrow \dots$ と速度比は小さくなっていく。したがって $SR=一定$ の直線上で前述の評価関数が最大または最小の点を選択しながら加工を続けていけばよい。すなわち図4, 図5あるいは図6において、摩耗の進行に伴って、それぞれ太線で示した径路 $P, Q$ あるいは $R$ に沿って矢印の方向に進みながら加工条件を選択していけば、加工寸法精度を許容範囲内に維持するという制約条件下で、それぞれ工具寿命最大、加工コスト最小あるいは生産性最大の目標が常時達成されていることになる。なお図4の径路 $P$ は柴田らの指摘するところと一致している。

#### 5. ま と め

研削ベルトの摩耗進行状態を予測する統計モデルを、簡潔な時間関数の形の主モデルと、主モデルの係数を研削条件から決めるための副モデルとによって構成した。主モデルは最小二乗法を用い、副モデルはGMDHの手法を用いて試し研削データから作成された。モデルの予測性能は、主モデルを研削時間の2次式としたときにもっともすぐれており、予測精度は満足のいくものであった。

ベルト研削加工に適応制御を導入して、工具寿命最大、加工コスト最小あるいは生産性最大の目標を達成しようとするとき、モデルを用いることによって最適加工条件が得られることも示した。今後、切込みを説明変数に加えた場合のモデルの検討およびモデルを用いた実機の適応制御の検討が必要であろう。

おわりに、摩耗データを快くご提供くださった芝浦工業大学柴田順二助教授およびご助言をいただきました本学大島康次郎名誉教授に深く感謝いたします。

(1981年7月27日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 植松, 大島: 生産研究, 27, 7 (1975) 271/279
- 2) 柴田ほか: 精密機械, 45, 8 (1979) 698/974 および 46, 6 (1980) 759/764
- 3) 植松, 大島: 生産研究, 32, 11 (1980) 555/558 および 33, 2 (1981) 56/59
- 4) 植松, 大島: 生産研究, 33, 5 (1981) 190/193