

GMDH による切削工具摩耗の予測

Prediction of Cutting Tool Wear by Group Method of Data Handling (GMDH)

植松 哲太郎*・大島 康次郎**

Tetsutaro UEMATSU and Yasujiro OSHIMA

1. ま え が き

切削工具の寿命を予測するには、Taylorの工具寿命方程式 $VT^n=C$ あるいは $VT^n f^\alpha d^\beta=C$ (V : 切削速度, T : 工具寿命, f : 送り, d : 切込み, n, C, α, β : 定数) が一般に使用されている。この方程式の定数は、被削材の材質、使用工具、その他の切削条件によって異なるばかりではなく、個々の使用機械によっても異なる。また寿命判定基準が、たとえばフランク摩耗 0.4 mm と固定されていて、別の基準を採用する場合は定数も別の値になる。さらに入力変数 V あるいは V, f, d は、寿命 T との物理的因果関係に基づいて選択されたものではなく、経験的に選択されたものであるから、必ずしも最適なものとは言えない。

工作機械に適応制御を導入して、切削の経済性または生産性を評価関数に選ぶ場合は、任意の寿命判定基準に対する工具寿命を、個々の工作機械について、より最適な入力変数の組合せから予測できることが好ましい。言いかえれば、適応制御導入の現場で、数少ない試し切削データから工具摩耗進行状況の予測モデルを作成できることが望ましい。

入出力間の因果関係が複雑でよくわからないプロセスのモデルを少ない入出力データから作成する統計的手法として、Ivakhnenko の提案する GMDH (Group Method of Data Handling)¹⁾ が最近注目されている。わが国でも、池田らによる紹介²⁾ 以来、河川の流量予測、河川または大気の汚染予測などに GMDH が適用されて効果をあげている。筆者らは、切削工具の摩耗進行状況予測モデルを GMDH の手法を用いて作成し、上述の希望にかなうモデル作成が可能であることを確認した³⁾ ので以下に報告する。

2. GMDH のアルゴリズム

(1) 構成 GMDH のアルゴリズムは、その構成に融通性があり、個々の対象プロセスに適合するようにある程度変形できる。その基本的特徴は、少数の入力変数

を組み合わせた基礎関数についての回帰分析を、与えられた選択規準に従って多層的に積み重ねながら、自己選択的にモデルを構築していくことにある。これは、多くの入力変数をすべて同時に用いて回帰分析を行う場合の問題点、たとえば最適な関数形または次数を決定しにくいこと、一度に決定すべき回帰係数が非常に多くなって、多量の入出カデータと膨大な計算時間を要すること、を避けようというものである。

本研究で使用した GMDH アルゴリズムを、その流れ図 (図 1) に沿って説明する。

① M 個の入力変数 z_m と 1 個の出力変数 y とから成る n 組のモデリング用データ $(y, z_1, z_2, \dots, z_M)_q (q=1, 2, \dots, n)$ を用意する。

② i 番目および j 番目の入力変数 z_i, z_j を組み合わせた基礎関数として

$$y = b_0 + b_1 z_i + b_2 z_j + b_3 z_i z_j + b_4 z_i^2 + b_5 z_j^2 + \epsilon \quad (1)$$

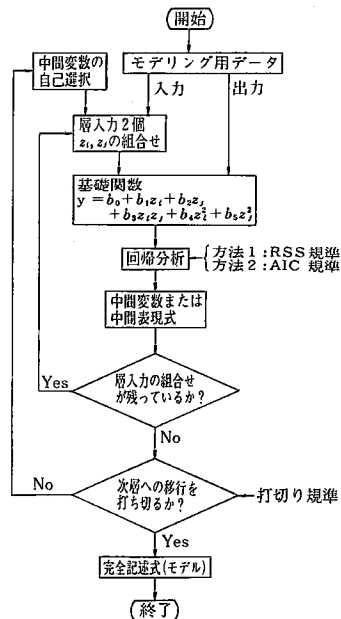


図 1 GMDH アルゴリズムの流れ図

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

** 東京大学名誉教授

なる線形重回帰モデル (ε は残差項) を採用する。

③与えられた評価規準 (後述) に従って (1) 式の回帰係数 $b_0 \sim b_5$ を n 組のデータから求め、得られた重回帰式を中間表現式あるいは中間変数 z'_h とする。

④ i, j のすべての組み合わせ (ただし $i \neq j$) について ②, ③ の操作を行うことにより、 $M' = M(M - I) / 2$ 個の中間表現式あるいは中間変数を得る。

⑤与えられた中間変数自己選択規準 (後述) に従って $M'' (\leq M')$ 個の中間変数を新たな入力変数と考慮して ($z'_h \rightarrow z_m, M'' \rightarrow M$)、次層で ②~④ の操作を繰り返す。

⑥次層への移行打ち切り規準 (後述) を満たすまで ②~⑤ の操作を繰り返して層を積み重ねる。移行が打ち切られた段階での中間変数を完全記述式 (モデル) の出力項とする。前層までに計算された (1) 式の形の中間表現式を次々に代入すれば、高次多項式の形のモデルが得られる。

(2) 評価規準 このアルゴリズムに外から与える規準として種々のものを考えることができるが、ここでは ③ の回帰分析時の評価規準の与え方によって次の 2 通りの方法に分ける。

方法 1 : 残差の平方和 (RSS) の平均値

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n (y_q - \hat{y}_q)^2 \quad (2)$$

を最小にする。ただし y_q, \hat{y}_q はそれぞれ第 q 組目のモデリング用データの出力観測値と、このときの (1) 式による回帰推定値を表す。これは通常回帰分析で最も広く用いられている最小 2 乗法に従うものである。

方法 2 : 情報量規準 AIC⁴⁾ を最小にするように説明変数を取捨選択する。⁵⁾ いま (1) 式を次の形

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + \varepsilon \quad (3)$$

に書き換えておく。定義によれば

$$\begin{aligned} AIC &= (-2) \log_e (\text{最大尤度}) + 2 (\text{パラメータ数}) \\ &= n \log_e \hat{S}_k^2 + 2(k+1) + c \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、 k は (3) 式右辺で実際に採用される説明変数の個数、 c は k に無関係な定数、 \hat{S}_k^2 は k 個の説明変数を採用したときの残差 2 乗平均の最小値である。 \hat{S}_k^2 の値は k が大きいほど小さくなる。すなわち $x_1 \sim x_5$ のすべての説明変数を採用したときに \hat{S}_k^2 は最小になる (方法 1 に相当)。しかし k を大きくしても \hat{S}_k^2 の値に大差がないときは説明変数の少ない方が予測モデルとしてはすぐれているという考え方が (4) 式右辺第 2 項にこめられている。説明変数の取捨選択には変数増減法⁶⁾を用いる。

中間変数自己選択規準は、残差 2 乗平均の最小値 \hat{S}^2 (方法 1) または AIC の最小値 \hat{AIC} (方法 2) を小さくする組み合わせから順に M'' 個の中間変数を採用するものとする。

次層への移行打ち切り規準は、(a) 指定した最大層数に達したとき、(b) 今回の最小の \hat{S}^2 値 (方法 1) または最小の \hat{AIC} 値 (方法 2) が前層のそれより増加するか、あるいは減少しても、前々層に対する前層の減少量の 10% 以下の減少量しか得られないとき、さらに方法 2 では、(c) 採用変数の個数が減少して、層の出力がすべて 1 変数の 1 次式 $y = b_0 + b_1z_i$ または $y = b_0 + b_2z_j$ の形だけになったときに移行を打ち切るものとする。

3. 対象プロセスと切削条件

対象プロセスとして、正面フライス加工における超硬チップのフランク摩耗進行状態を取りあげる。

固定切削条件は、被削材: AISI 1053 (硬度 $R_B \approx 95$)、カッタ: 直径 160 mm 正面フライス、チップ: 超硬ローアウェイチップ STi 25 (P 20 相当)、切込み: 1.5 mm (一定)、送り: 0.25 mm/tooth (一定) とする。

フランク摩耗に影響を与え、しかも定量化できる変数として、切削速度 V 、エンゲージアングル θ 、被削材幅 W_w を 4~5 段階選択し、これらを変動切削条件とする。変動切削条件を適宜に 24 通りに組み合わせると同一機械で切削したときのフランク摩耗進行データが与えられている。これらの生データの分布領域を 5 段階の切削速度 $V_1 \sim V_5$ によって分けたものを図 2 に示す。後の便宜のために、与えられた摩耗データを θ と W_w の組み合わせによってグループ分けしておく (表 1)。

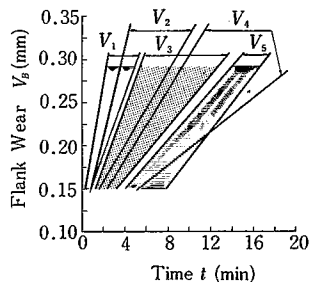


図 2 工具摩耗データの分布領域 (切削速度による分類)

表 1 切削条件による工具摩耗データのグループ分け

グループ番号	エンゲージアングル θ (deg)	被削材幅 W_w (mm)	切削速度 V (m/min)
1	30	50.8	$V_1^\circ V_2 V_3 V_4$
2	50	57.2	$V_2 V_3 V_4^\circ V_5$
3	60	76.2	$V_2 V_3 V_4 V_5^\circ$
4	18	57.2	$V_1^* V_2^\circ V_3 V_4^*$
5	30	76.2	$V_1^* V_2 V_3^\circ V_5^*$
6	50	101.6	$V_1^\circ V_2 V_3 V_4^*$

$V_1 = 222, V_2 = 181, V_3 = 151, V_4 = 123, V_5 = 100$

°印: モデリング用データ ケース 1

*印: モデリング用データ ケース 2

4. 入出力変数とモデリング用データ

フランク摩耗量 V_B (mm), 正味切削時間 t (min), 切削速度 V (m/min), エンゲージアングル θ (deg), 被削材幅 W_w (mm) について, 数値のオーダを揃えるための単位換算や, あてはまりの良さを向上させるための変数変換を行って, 次のような入出力変数を定めた. 出力 $y = V_B$, 入力 $z_1 = \log t$, $z_2 = V/1000$, $z_3 = (\pi/180)\theta$, $z_4 = W_R$ (実切削幅) $= (D/2) \{ \theta + \sin^{-1}(2W_w/D - \sin\theta) \} \cdot (\pi/180)$, (ただし D はカット直径 (mm)).

モデリング用データは, 与えられた摩耗データの中から次の2ケースの条件のものを採用して, それぞれのケースに対するモデルを作る.

ケース1: 表1で切削速度に○印をつけたもの

ケース2: 表1で切削速度に*印をつけたもの

グループ6, 切削速度 V_1 のデータは両ケースで使用される. ケース1はまんべんなく各グループから1条件ずつ選択しているのに対し, ケース2はグループ4~6だけから選んだ, かたよったデータになっている. 各ケースとも6通りの切削条件の組合せに対する試し切削を実施していることに相当する. 一つの切削条件に対しては, 適当な5時点における摩耗データを利用する. したがって各ケースとも $n=30$ 組のモデリング用データを含むことになる.

5. 計算結果と考察

(1) モデルの構造 最大層数を6, 中間変数を自己選択するときの最大個数 M'' を第2層入口で6, 第3層以降は15に制限してモデルを作成した. 完全記述式(モデル)が得られるまでの通過層数と最終層出力個数は方法1, ケース1で6層, 15個, ケース2で4層, 15個, 方法2, ケース1で2層, 4個, ケース2で4層7個であった.

モデルの構造が最も簡単になった方法2, ケース1の場合の具体的関数形は次のようになる.

第1層

$$\begin{aligned} u_1 &= 0.0462 - 0.121z_1 + 0.00057z_2 + 0.00097z_1z_2 \\ &\quad + 0.0348z_1^2 \\ u_2 &= 0.0785 + 0.0617z_1 + 0.434z_3 - 0.399z_3^2 \\ u_3 &= 0.177 + 0.0475z_1 \\ u_4 &= 0.152 + 0.00043z_2 \end{aligned}$$

第2層

$$\begin{aligned} v_1 &= 2.74 - 19.3u_3 - 9.44u_4 + 58.6u_3u_4 + 19.1u_3^2 \\ v_2 &= 0.409 + 0.424u_1 + 0.0996u_2 + 1.20u_1^2 \\ v_3 &= 0.0344 + 0.644u_1 + 0.829u_1^2 \\ v_4 &= -0.0286 + 5.03u_2u_4 \end{aligned}$$

ここで各変数の添字は, それぞれの層内で \hat{AIC} を小さくするものから順につけてある. 予測値は, 最終層の第

1出力 v_1 による計算値を採用しても, 数個の出力 v_1, v_2, \dots による計算値の平均値を採用してもよい.

(2) 摩耗進行状況の予測 得られたモデルに適当な切削条件と時刻を代入すれば, そのときの工具摩耗量の予測値が計算される. 出力予測値は, 最終層の第1~4番の最大4個の出力の算術平均値を用いた.

与えられた摩耗データに見られる種々の組合せの切削条件の場合について, モデルを用いて計算した予測値と生データを比較することによってモデルの予測能力を調べた. まず全体について言えば, 方法1, ケース2で得られたモデルは, グループ4~6の切削条件に対しては予測能力があるが, グループ1~3の条件に対しては生データから非常にかけ離れた予測値を出す. これは, ケース2のモデリング用データがグループ4~6だけからかたよって選択されていて, グループ1~3の条件が外挿条件になることに起因していると思われる. これは回帰分析の一般的性質であり, 予測条件が内挿条件になるようにモデリング用データを十分に広くとる必要があるとされている. 逆に, 方法2によるモデルはこのような外挿条件に対しても十分な予測能力をもっていると言える.

いくつかの切削条件について, モデルによって計算した摩耗進行予測曲線をプロットに描かせたものを図3に示す. 図中のプロットはそれぞれの条件に対する生データである. 方法1(図3-a)に比べて方法2(図3-b, c)の方が, 定常摩耗領域の全域にわたって生データをよく近似する予測曲線が得られている.

グループ1~6の24通りの切削条件のそれぞれについて4時点ずつ, 合計96点の摩耗量生データ V_{BR} と, それぞれに対応する摩耗量予測値 V_{BP} との相対誤差の絶対値 $|e| = |(V_{BP} - V_{BR}) / V_{BR}| \times 100$ (%) の相対度数分布を図4に示す. 方法1, ケース2は上述の理由により, グループ4~6の条件のものだけについて参考のために掲げた. いずれの場合も, 相対度数で約90%のものが $|e| \leq 15$ (%)におさまっており, 十分実用性のあるモデルと考えられる. 方法1, ケース1では $|e| > 40$ %のような大きくはずれる場合もあるので, 方法1, ケース2に関する上述の問題点と合わせて考えると, 方法1より方法2の方が予測の信頼性が高いと言える. これは情報量規準AICのねらい通り, 方法2ではモデルの構造が簡潔になっていることにも起因しているであろう.

(3) 工具寿命の予測 工具寿命の予測値は, モデルによる摩耗量予測値が, 与えられた工具寿命判定基準に等しくなるような時刻を試行錯誤的に求めることによって得られる. 摩耗進行曲線は単調増加曲線であるから, 試行の回数は少なくすむ. いま工具寿命判定基準を V_B

研究速報

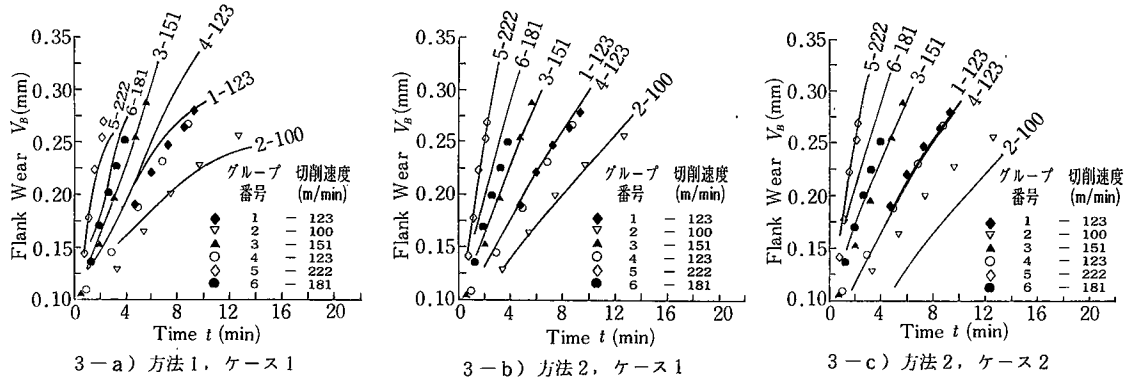


図3 摩耗進行予測曲線と実切削データ

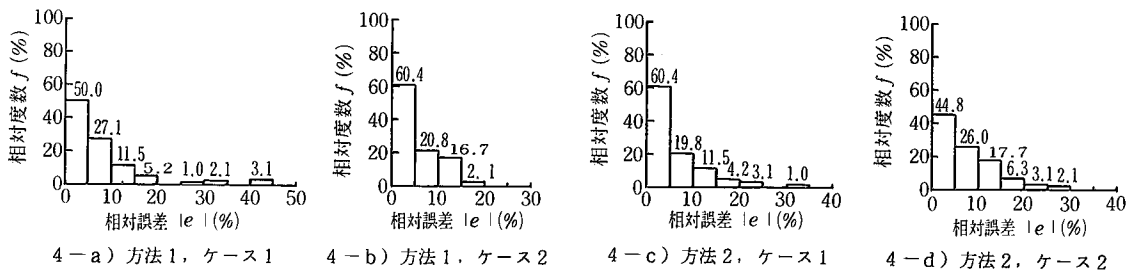


図4 摩耗予測誤差の相対度数分布

表2 工具寿命予測誤差 (単位: %)

グループ番号	ケース1			ケース2		
	RSS	AIC	Taylor	RSS	AIC	Taylor
1	5.3	1.8	5.1	/	7.9	12.3
2	8.0	3.0	6.6	/	10.6	18.5
3	2.7	3.2	3.9	/	10.3	14.1
4	11.2	4.3	4.6	7.5	8.4	7.7
5	8.4	6.3	4.2	5.8	7.9	3.9
6	28.7	12.8	16.7	9.7	7.7	11.1
全平均	10.7	5.2	6.8	(7.7)	8.8	11.3

= 0.25 mmとして、予測寿命 T_P と生データによって得られている寿命 T_R との相対誤差の絶対値 $|(T_P - T_R) / T_R| \times 100$ (%)によってモデルの寿命予測能力を評価する。各データグループごとに上記の誤差の平均値を求めて表2に示す。同じモデリング用データを用いて得られるTaylorの寿命方程式による予測誤差も表2に合わせて示す。摩耗進行状況の予測の場合と同様に、ここでも方法2によるモデルは方法1によるモデルより予測能力がすぐれていて、全体的にはTaylorの寿命方程式に対しても僅かに勝っている。

6. む す び

正面フライスカッタのフランク摩耗進行状況を予測するモデルを、GMDHの手法を用いて作成し、摩耗進行状

況および工具寿命について実用可能な予測精度をもつモデルが得られることがわかった。特に、変数選択の評価規準として情報量規準AICを用いる方法では、モデルの構造が簡単になる上に、モデリング用データに対して外挿条件となる入力条件に対しても十分な予測能力をもつモデルが得られる。さらに高い予測精度を要求する場合は、実切削中のデータを何らかの形で利用して、途中でモデルを修正するなどの対策が必要となるであろう。

おわりに、摩耗データを提供して下さった三菱金属(株)東京工場の根岸秀夫氏に深く感謝いたします。

(1980年9月9日受理)

参 考 文 献

- 1) A. G. Ivakhnenko: Polynomial Theory of Complex Systems, IEEE Trans., SMC-1, 364/378 (1971)
- 2) 池田三郎, 樺木義一: GMDH(発見的自己組織化法)と複雑な系の同定・予測, 計測と制御, 14-2, 185/195 (1975)
- 3) 樺松哲太郎, 大島康次郎: GMDHによる切削工具摩耗プロセスの同定, 昭和55年度精機学会秋季大会学術講演会論集 530
- 4) 赤池弘次: 情報量規準AICとは何か, 数理科学, No. 153, 5/11 (1976)
- 5) 近藤正, 田村坦之: 情報量規準AICを用いて中間表現式を自己選択する改良形GMDH, 計測自動制御学会論文集, 15-4, 466/471 (1979)
- 6) 奥野忠一ほか: 統多変量解析法, 日科技連(1976)