旋削における工具摩耗のシミュレーション*

——工程設計における切削工具の寿命評価法 (第1報)——

楠 兼敬*** 島居強三** 高瀬公有** 野呂周平**

Simulation of Tool Wear Process in Turning

——Evaluation of Cutting Tool Life for Process Design (1st Report)——

Kaneyoshi KUSUNOKI, Kyoze TORII, Koyu TAKASE, Shuhei NORO

A simulation method for the estimation of cutting tool life is proposed in the present paper, which involves the process: collection of data from tool life experiments, statistical data processing and Monte Carlo simulation using these data.

It is revealed by this simulation method that the distribution of cutting tool life which is observed in production line can be estimated from laboratory scale experiments with sufficient accuracy. The advantage of the present method is based on the extraction of probabilistic information from a tool wear curve, not from the distribution of tool lives which requires the repetition of wear experiment. Then a process planner troubled by lack of data can design a process with high accuracy. And the present method derives confidence limits upon V-T diagram from as small amount of data as possible. Such V-T diagram is more effective for practical use by adding confidence limits on curves which indicate the tool life with its statistical features, necessary for optimum design of production lines.

1. ま え が き

切削工程における工具寿命のばらつきはきわめて大きく、われわれ現場において工程設計に携わる者、あるいは材料の被削性や工具の切削性を研究するものにとってかなり重大な問題となっている。しかるに、従来の多くのデータは、V-T 線図などに代表されるようにばらつきの概念が導入されておらず、点や線で表現される場合が多かった。このような状態のもとでは、量産工場の工程設計者は、各種データ表に適当な安全率をかけて仮りの条件を定め、さらに、現場での数カ月にもわたる試行期間を設け、加工条件・工具取換基準等を決定したり、またいろいろな研究所から出るデータ類がかみ合わず、その取捨選択に悩まされるというのが現状である。これは切削試験が、類似の試験である疲労試験と比べ人的にも、コスト的にも負担が大きく、簡単に観測点を増すことができないことに起因していると考えられる。

そこで本報では、①点で表現される観測されたデータ群を常識的な直線または曲線で補間することによってデータ数の拡大をはかり、②その曲線群を統計的な手法で処理し、③さらにそれらを実際の工場で行なわれる現象

に合わせて再組立てを行ない、コンピュータの助けによりばらつきを考慮に入れた工具寿命または工具摩耗の分布を推定する方法を求め、実験的検討を行なったので結果を報告する。なお、ここではその基本的考え方と旋削における実験例について述べる。

2. 工具寿命, 工具摩耗のばらつき

工具寿命や工具摩耗のばらつきが正規分布とか、ワイブル分布とか数学的に簡単に表現できる分布に従うことが証明できれば、数少ない観測点から母集団を推定することは容易なことである。そこでわれわれはフライス、ドリル、旋削作業の例について現場のデータを集めて工具寿命や工具摩耗量の分布をしらべた。

その一例を示すと、図1(a)は、量産工場における鋳鉄 FC 25 のフライス加工の工具の寿命について約6カ月にわたり分布を求めたものである。もちろんこの期間においては、被削材、工具とも一定の管理状態にあったものと考えられることができるが、わずかに数10個から1000個前後まで広くばらついている。この分布が何らかの簡単な統計的な表現でおきかえることができるかどうか検討してみた。その分布形を中心に見てみたのが図1(b)、図1(c)である。図1(b)では分布の正規性、図1(c)ではワイブル確率紙の上で検討を行なっている。いずれの場合でも、直線性で良ければ適合すると見得るものであるが、図のように2~3本の線の集合したものや、S型

*原稿受付 昭和46年5月21日。昭和45年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和45年10月6日)にて発表。

**正会員 トヨタ自動車(株) (豊田市トヨタ町1番地)

***トヨタ自動車(株)

切削速度: 70 m/min, 1 刃当り送り: 0.28 mm, 被削材: FC 25

図 1 正面フライスカッタの寿命分布

曲線, 1 本の直線であらわすことができるものなど, 種々雑多で分布形状としてどうとも限定できないというのが本当のようである. しかも, 特に量産工場ではいのはこの下限付近のところであるわけであるから, これをこれらの確率紙上で 1 本の線で代表させようとするときわめて都合の悪いことになる. 同様なことは旋削, ドリルによる孔明けなどにもいえて, 数少ない実験から母集団を推定することは一般的にはかなりむずかしいことであることがわかる.

そこで, これらの一般的に単純な形で表現しにくい分布形を限られた実験室または量産工場での観測点を適当に処理することによって, 実際の量産工場で行なわれる工具摩耗の進行状況を推定し, それらの集団としての分布を求めようとするのがこの研究の目的である.

3. シミュレーション

3.1 シミュレーションの手法

ここでは, 一応鋼の旋削の例について考えることにする.

鋼の被削性には, 化学成分, 焼入れ性, 清浄度にはじまり, 鍛造一焼入れ一焼戻し一素材センタリング一(荒加

工) など時系列的に各要因によるばらつきが複雑に交絡しており, また一方では工具, 機械さらには工具摩耗の測定法も含めて, いろいろなばらつきが交絡して最終的なばらつきがきまると考えられる. そこで, 実験的にこれらを有効に分類・分離して, その寄与率を求め, それを量産工場で行なわれる状態に近似させ再組立てを行なわせることが必要である. ここでは簡単のために全体のばらつきに対する要因群を二つに分割して検討することにした.

実験に用いる被削材は S 55C の鉛快削鋼 (S55CF) の焼入れ, 焼戻し材とし, まず S 55CF の素材 (as roll) について製鋼チャージの異なるものを無作為に 5 種類用意した. もちろん, これは当社の S 55CF として化学成分, 硬化能, 結晶粒度その他入荷基準に合致したものであり, 当社としての標準的なばらつきをもった S 55CF 材といえる. つぎに, これらを別々の時期に熱処理工場としての管理基準に従って同一条件といわれる焼入れ, 焼戻しを行なった. つまり, これによって素材の製鋼チャージと熱処理ロットのばらつきを交絡させたものを作成したわけである. このようにして作ったテストピースを実験用の旋盤を用いて旋削試験を行なった. そのときの逃げ面の摩耗曲線を図 2 に示す. 図中 AB……E は各チャージ名である. この段階でかなり大きくばらつくことがわかる. このばらつきは, 前述の製鋼チャージ, 熱処理ロットに工具エッジ, 実験間の誤差などが交絡したものである. これを一応簡単のためロット間のばらつきと呼んでおく. つぎにこの中から 1 種類のチャージ C を取り出し, 繰返し摩耗試験を行なった. 結果を図 5 (b) に示す. この摩耗曲線のばらつきには, 工具エッジ間のばらつき, ワークピース間のばらつき, ワークピース内部のばらつき, 実験間の誤差などが交絡したものである. これを一応ロット内のばらつきと呼んでおく. これら 2 種類のデータを利用して工具寿命または工具摩耗の分布や過程を求めようとするものである.

これをシミュレーションにより求めようとするわけであるが, それに先立ちつぎのような仮定を定めた.

i) 工具の逃げ面摩耗幅 V_B は同一の摩耗幅であれば, その工具が過去にどのような履歴を受けていても,

切削速度: 150 m/min, 送り: 0.3 mm/rev, 切込み: 1.5 mm, 刃先形状: (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8 R), 工具材質: P 10, 被削材: S 55CF, 乾式切削

図 2 フランク摩耗曲線

工具のエッジとして同一の価値をもつ。

ii) 各摩耗幅 V_B のときの摩耗曲線の傾きは、適当な数値変換を行えば正規分布をなす。

iii) 摩耗曲線の観測点は、それぞれの曲線について観測点間をなめらかな曲線または直線で結ぶことにより補間される。

この仮定のもつ意味はつぎのとおりである。まず i) については、本シミュレーションのもっとも基礎となるものであるが、今のところ工具の過去の履歴がその将来にどのような影響を与えるかは十分にわかっていないので、一応現在のところ履歴を吟味しないことにしたが、将来はそれも考慮に入れるべきであろう。また ii) はここではもっとも簡単な分布形状として変数変換後に正規分布をなすという態度をとったが、今後データの収集が進めばそのデータに基づいた分布曲線をそのまま使用すべきであると考えられるが、この点については後述する。iii) は従来の経験から一般的にいえることでありデータの拡大に役立つ。

この三つを基本として、新らしく研削された工具エッジがどのように摩耗してゆくかを調べる。その基本的考え方はつぎのとおりである。新らしく研削された工具エッジが最初の 1 個のワークピースを削るとき、その加工時間が ΔT 分であるとすれば、 ΔT 分後の工具の摩耗幅 ΔV_B にはそのワークピースの素材における製鋼チャージをはじめ、熱処理ロット、ワークピース個々のばらつきなど多くの要因が交絡した形であらわれるはずである。その中にはもちろん、ワーク 1 個 1 個で異なるものもあれば、素材チャージや熱処理ロットのように数 100 個単位であらわれるもの、バイトエッジのように 1 寿命ごとにあらわれるものなどがあり、それらが合成されて ΔV_B がきまる。それがつぎつぎに累積されて摩耗幅 V_B がきまると考えられる。しかも、それらの各要因の寄与率は、工具の逃げ面の摩耗形態に大ざっぱに見ても初期摩耗、定常摩耗、後期摩耗などいろいろ分類できるように、どのような領域でもいつも一定という保証はない。しかも、全体としての分散も当然 V_B に従属して変わるものであるから、これらの累積値である一定時間 T 分後の V_B の分布または一定の V_B になるまでの ΔT の累積値 T の分布を一般式として数式的に解くことは容易なことではない。したがって、ここでは手軽なモンテカルロシミュレーションの助けを借りて逐次摩耗の変化を求め、それらの繰返しにより V_B または T の分布を求めることにした。

その求め方を工具摩耗の模型図として図 3 を用いて説明する。一つの工具エッジが切削開始 T_1 分後に逃げ面

図 3 摩耗の模型図

摩耗幅は V_B であるとする。問題は、それからワーク 1 個削ったときの工具の摩耗量の増分 ΔV_B を求めることである。これを前述の図 2 (a), (b) のデータから求めるわけであるが、まず最初に前述のロット間のばらつき（もちろんロット内のばらつきも含んだデータであるが）による摩耗曲線の傾きを求める。それには、図 2 (a) におけるたて軸から V_{B1} をはさむデータ群をピックアップし、それらの対応するもの（同志）同一摩耗曲線となるもの）を直線で結びそれぞれ図 3 のごとく線分 SY_{1VB1} , SY_{2VB1} , ……とする。このようにして求めた SY_{iVB1} について、そのまま数値処理を行なうのは後の処理で異常に負の値が多くなり、現実的でなくなるので（切削時間とともに摩耗量が減少するということ）、次式により簡単な数値変換を行なっておく。

$$DY_{iVB1} = \ln \left(\frac{\pi}{2 \arctan dY_{iVB1}} - 1 \right) \quad (1)$$

dY_{iVB1} : SY_{iVB1} のこう配

変数変換後の母平均の推定値 M_1 は

$$M_1 = (\sum DY_{iVB1}) / n \quad (2)$$

n : 線分の数

母標準偏差の推定値は

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum (DY_{iVB1})^2 - (\sum DY_{iVB1})^2 / n}{n-1}} \quad (3)$$

となる。つぎに図 2 (b) をも同様な操作を行ないロット内の分について求めた。各素材チャージ間の摩耗曲線群の間に等分散性が成立するとすれば、この操作で得られ

る V_{B1} における母標準偏差の推定値 σ_{12} は前述の定義のロット内のばらつきの分をあらわすことになる。したがって分散の加法性が成立すると考えると

$$\sigma_{11}^2 = \sigma_1^2 - \sigma_{12}^2 \quad (4)$$

σ_{11} : ロット間のばらつきによるもの

σ_{12} : ロット内のばらつきによるもの

というように分離することができる。なお、厳密には、バイトエッジ間の違いが本来比較的長期間型の要因であるにもかかわらず、ロット内のばらつきの扱いをするのは不当であるが、ここではその寄与率は小さいものとしてそのまま処理した。

このように各要因を分離することができるので、 M_1 , σ_{11} , σ_{12} を用いてロット間に相当する正規乱数 $X1$, ロット内に相当する正規乱数 $X2$ を作り出し、次式により摩耗幅の増分 ΔV_B を求めることができる。

$$dY_{VB1} = M_1 + X1 \sigma_{11} + X2 \sigma_{12} \quad (5)$$

逆変数変換を行なって

$$dY_{VB1} = \tan^{-1} 2 \{ \exp(dY_{VB1}) + 1 \} \quad (6)$$

$$\Delta V_B = dY_{VB1} \times \Delta T \quad (7)$$

ΔT : ワーク 1 個削るのに要する時間

となり、新しい摩耗幅は $V_B = V_{B1} + \Delta V_B$ となる。以後逐次この操作を繰返し、一定の時間または一定の逃げ面摩耗幅までの V_B または T を求める。もちろん、 $X1$ に関しては実際の工場で行なわれるようなロットサイズに従って逐次新しい正規乱数を作り出し、ロット内のばらつきに相当する正規乱数 $X2$ はワークピース 1 個ごとに新しい数値を作り出す。

図 4 にこの計算のフローチャートを示す。ここでは、初期摩耗を一応 0.1 mm とし、初期摩耗部の推定がその部分から飛び出さないようにした。これは、上述の摩耗幅増分 ΔV_B を求める際、いつもデータ群として ΔV_B の起点付近のみのデータによったので、摩耗形態が異なる初期摩耗と定常摩耗とはデータ処理をやり直す必要があると考え、いったん 0.1 mm のところで区切り、そこであらためてデータの再処理を行ない、シミュレーションを続けることにした。参考までに各摩耗幅のところの傾きの標準偏差 (変数変換後) を図 5 に示す。

このようにして求めた摩耗曲線の例を図 6 に示す。実線はシミュレーションによって求めたもの、破線は旋削試験による観測値である。

3.2 結果

つぎにこのような手法の妥当性を検討するために、量産工場で得られるデータと実験室での試験データを基礎

資料として、上述の手法によって求めた結果を比較検討した。

被削材はいずれも S 30 C の鉛快削鋼 (S 30 CF) を焼入れ、焼戻したもので、前加工として黒皮削りのある比較的単純な丸棒の長手旋削に一部に

図 4 シミュレーションのフローチャート

図 5 摩耗幅による σ の変化の例

切削速度: 100 m/min, 送り: 0.3 mm/rev, 切込み: 1.5 mm
刃先形状: (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8 R), 工具材質: P 10, 被削材: S 55 CF, 乾式切削

図 6 摩耗曲線 (実測値, シミュレーション)

小さな段付部のあるならい加工部品である。

まず実験室での実験は外径のみの旋削とし、実験用の昌運カズヌーブ旋盤 HB-575 無段変速機付のものをを用い、工具は実際に量産工場で使用されているものと同種同形状のものをを用い、現場より数 10 個のテストピースを取り出して量産工場と同様な前処理を行なった上で試験を行なった。切削条件は 3 台の現場の機械に合わせ、データは前述の手法にもとづいて処理した

一方、量産工場での観測は被削材および加工部位は同じであるが、切削条件の異なる 3 台の機械について一定量切削後の工具を取り出し、逃げ面摩耗幅を測定した。機械はいずれも昌運工作所製のならい旋盤で、それぞれ HB 575, HBSC-575, HBSA-575 であり、基本的には実験室にある試験用の旋盤と似かよっている。しかし、実験室での試験は通常の刃物台に工具を取りつけているのに対して、量産工場でのならい加工では、ならい側の刃物台に工具を取りつけているので、刃物台の剛性は相当異なり、作業の仕方、環境もかなり違っている。これらのものについて、量産工場から取り出した一定個数切削後のバイトの摩耗量の分布と、同一条件に相当するものを上述の方法によりシミュレートさせた結果を図 7 に示す。それぞれの条件についてわかりやすくするため、現場での実測値と同一個数のシミュレーションの結果と、母集団に近い 100 エッジ分のシミュレーションの結果を記した。いずれの場合も詳細に見れば若干の違いはあるに

しても、大部分は非常に良く一致していることがわかる。

このような事実からも、平均値、分布の表現に上述の手法がかなり有力であることがわかる。特にこれらの工程では、仕上旋削の工程であるので、寸法精度等の問題から、逃げ面摩耗が 0.3 mm 程度が工具の使用限界となるが、このようなシミュレーションでは分布のすそのほうまで良く検討できるので、現場での現象にかなり矛盾が少なく、工具交換基準や加工条件を推測・設定することが可能であると考えられる。

3.3 工具寿命線図

また、このような手法を用いれば、工具寿命線図にも幅とか信頼限界を入れることがかなり容易になる。

前述の S 55 CF の工具寿命線図を考えてみる。図 8 に $V_B=0.3$ mm を寿命としたときの切削速度 $V=100, 150$ m/min の寿命分布を本方法でシミュレートした結果を記す。これを両対数グラフの上に移したいわゆる V-T 線図に相当するものが図 9 である。図上の 2 本の実線が工具寿命の 95% の存在範囲をあらわす。なお、ここでは母平均または母分散の信頼限界という考え方は除外して、単に存在範囲を表現してあるので、もしこの手法を検定とか推定などに用いようとする場合はプログラムの若干の修正を行なう必要がある。ここではわかりやすくするために、単に工具寿命の存在そのもののシミュレーションにとどめた。このような表現法を用いれば、工具の取り換え基準に近いような 95% 工具寿命線（下の実

線）とか、適当な安全率を入れた工具取り換え基準の設定または推定がより容易になると考えられる。なお、図中の各破線は実際の観測点を同一製鋼チャージ・熱処理ロットごとに結んだものである。

したがって、従来の方式で V-T 線図を引こうとすれば、破線のような V-T 線図群になるわけであるが（多ロットを含めた多量の実験により求める V-T 線図は別として）、かなり多種多様な線図となり、これが従来の V-T 線図から工程設

刃先形状: (-5, -5, 5, 5, 20, -10, 0.4 R), バイト材質: P 10 被削材: S 30 CF, 乾式切削

図 7 フランク摩耗分布の比較

(a) $V=100$ m/min
送り: 0.3 mm/rev, 切込み: 1.5 mm, 乾式切削, 刃先形状: (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8 R), 工具材質: P 10, 被削材: S 55 CF, 寿命判定基準: $V_B=0.3$ mm
(b) $V=150$ m/min

図 8 シミュレーションによるバイト寿命分布

送り: 0.3 mm/rev, 切込み: 1.5 mm, 乾式切削, 刃先形状: (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8 R), 工具材質: P 10, 被削材: S 55 CF 寿命判定基準: $V_B=0.3$ mm

図 9 シミュレーションによる V-T 線図

計を行なおうとする場合の危険性の大きな原因であったろうと考えられる。

3.4 シミュレーションの確率論的意味

以上で示したシミュレーションは、工具摩耗曲線の蛇行、すなわち確率過程としての摩耗進行過程からその確率的性質を求め、それを使ってある時間における摩耗幅のばらつき、またはある摩耗幅へ達する時間のばらつきを求めようとするものである。したがって、もし進行の確率過程としての特性、本論文ではそれを摩耗進行曲線のこう配の確率的性質として取扱っているが、それが与えられれば、ある時間における摩耗幅の分布や、ある摩耗幅に達する時間の分布が求まる。前述の実験で明らかにされたように、こう配の分布はその時点の摩耗幅のみによるということがそう大きな誤りなくいえそうである。そうすると進行曲線は Markov 過程である。現在のところ摩耗の物理学的根拠から、この過程の推移確率を理論的に求めることは困難である。したがって本シミュレーションでは実験値を使った。しかし、もし推移確率の摩耗幅に依存する関係が与えられていれば、推移確率が 1 本の摩耗進行曲線から十分な精度で推定できること

図 10

になる。いいかえれば、1 本の摩耗曲線から寿命の推定ができるはずであり非常に有力である。しかし、現在推移確率を理論的に求める方法、あるいは実験式として信頼すべきものがない。それは今後の問題である。

さて、本シミュレーションの意味はつぎのような問題を解くためのものと解釈することができる。

図 10 のように時間を離散的にとる 確率過程を 考えれば、1 間隔 (Δ sec) の摩耗の増分 Y_i は

$$Y_i = X_i \Delta \quad (8)$$

である。 X_i はこう配であり

$$\text{Prob. } [X_i < x] = G_i(x) \quad (9)$$

のような確率変数で分布 G_i をもつ。これは摩耗幅に対応してきまる。したがって摩耗の増分 Y_i は

$$\text{Prob. } [Y_i < y] = F_i(y) \quad (10)$$

は G から求まる。さて、 N step 後の摩耗幅 Z は

$$Z = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_N \quad (11)$$

という形の確率変数である。これは変数 Y の和の分布であって

$$F_Z(\xi) = F_1 * F_2 * \dots * F_N(\xi) \quad (12)$$

として Z の分布形がきまる。 $*$ は convolution をあらわす。したがって、たとえば F が正規分布

$$F_i(y) = N[\mu_i, \sigma_i^2] \quad (13)$$

であれば

$$F_Z(\xi) = F_1 * F_2 * \dots * F_N(\xi) = N[\sum \mu_i, \sum \sigma_i^2] \quad (14)$$

となってやはり正規分布である。このような場合は本論文で行なったシミュレーションのようにこう配の分布を求めるために、何本かの摩耗曲線を求めれば当然寿命データもいくつか求まり、それから直接 $\sum \mu_i$, $\sum \sigma_i^2$ などが推定できてわざわざシミュレーションする必要はない。しかし実験で求められたように、分布 F は複雑であって解析的に convolution 積分が行なえる形をしていない。したがって本論文のように寿命分布 F_Z は単純でないか

ら, それより単純なこう配分布 F から発して F_Z を求めるという考え方が必要となる. この考え方の背景には寿命分布 F_Z は物理的にいって単純なものではないが, こう配分布 F は物理的にはっきりした量であって, 将来理論的あるいは実験式として広く使用に耐える関係が求められるはずであるという立場がある.

いいかえれば, 寿命のばらつきを論ずるより, その素過程に対応するこう配のばらつきを論じたほうが意味ある結果が出るはずだということを指摘したい.

4. 結 論

以上, 旋盤を用いての丸棒旋削の場合の工具摩耗について比較的簡単は例を用いて実験室データと量産工場データの対応に関するデータの解析, 再組立てについて検討を行なった. その結果, つぎの結論を得た.

1) 工具寿命の分布は本来複雑で, かつ広い分布をなすものであるが, そのばらつきの要因を適当に分類し, それぞれ分離して取り出し, 現場作業に合ったように再組立てすることにより, 実験室的な限られた切削試験データから, 量産工場での工具寿命分布を推定することが可能になる.

2) その場合, データとしての工具の摩耗過程の観測点はもちろんのこと, それらの観測点を適当な直線または

曲線で補間し, 一見データ数を拡大したような有効に使用する方法が重要である.

3) このような考え方のもとに, データ群の直線補間と統計的处理, モンテカルロシミュレーションを組合わせることにより, 実験室的な数本の摩耗曲線のデータから, 量産工場での工具摩耗の分布を推定し, 量産工場での観測点と比べたところ, それらがかかなり良く一致することがわかった.

4) このような手法を用いることによって, 工具寿命の存在範囲に幅をもたせた $V-T$ 線図をひくとか, 材料の被削性や, 工具の切削性の推定検定などを容易に行なうことができる.

以上単純な例について工具寿命・工具摩耗に関して実験室データの作成・処理法について検討を行ってきたが, 今後はこの問題に関する統計的考察およびこれらのばらつきの詳細な分類と, それぞれの寄与率の検討により, さらに正確で使いやすいものにするとともに, 断続切削, フライス加工などのやや複雑な加工法についても検討を進めてゆく予定である.

なお本研究は東京大学精密機械工学科吉川弘之先生の指導のもとに行なったものである. ここに深甚の謝意を表する.