



Title	工作機械の適応制御について : 使用する工具寿命式の誤差の影響に関する考察
Author(s)	関口, 恭毅; Sekiguchi, Yasuki; 小山, 昭一 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 52, 127-135
Issue Date	1969-03-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40924
Type	departmental bulletin paper
File Information	52_127-136.pdf



工作機械の適応制御について

— 使用する工具寿命式の誤差の影響に関する考察 —

関 口 恭 毅*

小 山 昭 一*

三 浦 良 一*

(昭和43年11月16日受理)

On the Adaptive Control to Cutting Process

— A Study on the Influence of the Errors
in the Used Tool-life Equation —

Yasuki SEKIGUCHI

Shōichi KOYAMA

Ryōichi MIURA

(Received November 16, 1968)

Abstract

It is well known that the cutting condition is one of the most important factors determining the economy of machining. Many papers have been written on the mode of determination of the optimal cutting condition, using such performance indexes as machining cost, machining efficiency or profit-rate. The off-line method was used in most of these papers and the adaptive control technique has been applied in more recent papers. In any event, an experimental tool-life equation must be used. This equation invariably has some errors against the real tool-life owing to the variety of tools, materials and conditions etc. These errors cause the estimated optimal cutting condition to veer from the actual optimal cutting.

The authors paid special attention to this discrepancy and studied its influence in the case where the machining cost per piece was used as a performance index for the adaptive-controlled turning operation by digital simulation. And the following results were made clear ;

1) When the machine operation cost is low and the tool-life is high and, more over, the high precision in machining is required, the more detailed investigation on the tool-life equation would be required.

* 精密工学科 自動制御工学講座

2) And in such a case, a study on the relation between cutting temperature and tool-life by a logarithmic graph showed that the temperature intercept and the mutual relation between the intercept and the slope is especially important.

In conclusion, if the economy of machining is aggravated to such an extent that it becomes impossible to neglect the increased part of the cost against the cost of production, a higher adaptive control loop might be needed to identify and correct the parameters of the tool-life equation on line.

1. 序 論

加工の経済性は選定された切削条件の良否によって大きく左右される事が知られており、従来から加工能率・加工費用・利益率等を評価基準として、拘束条件の範囲内でその最良値(最大値あるいは最小値)を与える切削条件—最適切削条件—をオフ・ラインで決定する問題が、多数の論文によって論じられている^{1,2,3,4)}。しかしオフ・ラインで求めた最適切削条件は加工プロセスの要素(工具・被削材等)の材質や仕上げ状態のバラツキ・加工のメカニズムの複雑さ・実験環境と現場の環境の違い等に起因する、加工プロセスの状態の予測不可能な多様さのために、往々にして真に最適な切削条件から大きくはずれてしまう。

最近、機械加工の自動化の機運とともに、この欠点を是正するために適応制御を応用することが考えられている^{5,6)}。しかし、この方法に於いてもほとんどの場合評価基準の算定に工具寿命が必要であるが、これを直接連続測定することは困難なため、他の出力変数—例えば切削温度・切削抵抗等—から間接的に求めなければならない。それ故、工具寿命と他の出力変数の関係式を設定しなければならないが、この関係式は、先にオフ・ラインでの方法は満足できる結果を与えない理由を述べたが、これと同じ理由から、必然的に実際のプロセスに於ける真の工具寿命特性に対して誤差を持つものである。ほとんどの場合この誤差のために、設定された工具寿命式の下で決定される最適切削条件は、真の最適切削条件からはずれてしまう。

本報告では、文献6に見られるのと同型の適応制御を旋削加工プロセスに実施した場合、設定した工具寿命式の誤差によって起きる、最適切削条件の真の値からのズレが加工の経済性をどの程度悪化させるかという点について、デジタル・シミュレーションによって考察する。

2. 加工プロセスと制御系に関する設定

本報告で考察の対象とする、加工プロセスの適応制御系の概略を図1に示す⁷⁾。数値制御装置(Numerical Control Unit)からの切削条件に関する指令は、最適化計算機(Optimization Computer)からの指令により、評価関数の値がより良くなるように修正される。この修正量は、過去の評価関数の値・実行中の切削条件に対する評価関数の値・その切削条件が拘束条件を満たしているか否かの判定結果等のデータから、極値探索等の手法により決定される。これらの

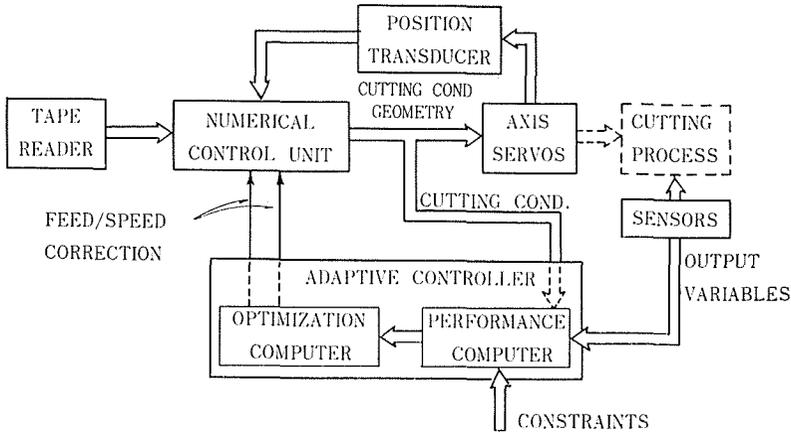


図1 工作機械の適応制御系

データは評価関数計算機 (Performance Computer) から与えられる。評価関数計算機に必要なデータは入出力端子から直接あるいは測定器 (Sensors) を通して間接に与えられる。こうして最適化計算機による修正を繰返し行なって、切削条件の最適化および最適切削状態の維持を行なおうとするのである。

文献6で用いられている評価関数は、フライス加工に於ける被削材平均除去速度と単位体積当たりの加工費用を組み合わせで定式化 (パラメータの値によってそのどちらかになったり、それらを混合したものと考えられるものになったりする。) したものであるが、これを旋削加工に於ける製品1個当たりの加工費用 C_u (円/個) に変形すると下記になる。

$$C_u = \frac{A}{1000Vfb} \left(K_1 + \frac{K_1 t_a + K_2}{T'} \right) + K_1 t_i \quad (1)$$

ここで A : 製品1個当たり全切削量 ($\text{mm}^3/\text{個}$), V : 切削速度 (m/mn), f : 送り (mm/rev), K_1 : 1分当たりの機械操作費+人件費 ($\text{円}/\text{mn}$), K_2 : Cutting Edge 1個当たりの費用 ($\text{円}/\text{edge}$), t_a : 工具交換時間 (mn/edge), t_i : 製品1個当たりの無駄時間+ローディング時間 ($\text{mn}/\text{個}$), T' : 設定した工具寿命式により算出される工具寿命の推定値 (mn/edge)

評価関数の変数の一つ—工具寿命—を推定するための工具寿命式として、(2)の形のものをとる²⁾(付記を参照のこと)。この形の、実際のプロセスに於ける真の工具寿命を与える式を(3)とする。

$$T' = \left(\frac{C_2'}{\theta} \right)^{n'} \quad (2)$$

$$T = \left(\frac{C_2}{\theta} \right)^n \quad (3)$$

θ は切削温度 ($^{\circ}\text{C}$) である。 $C_2 \cdot C_2' \cdot n \cdot n'$ は工具と被削材の組み合わせによって決まる定数であり、(2)式中の定数に付したダッシュは、この式が一般に(3)式に対して誤差を持つことを明示するためのものであるが、 θ は直接測定によって (測定誤差が無いものとすれば) 真の値

が知られるから、ダッシュは付かない。

真の加工費用は(2)式の誤差のために(1)式では与えられず、(1)式の T' 代わりに、真の工具寿命 T を入れた(4)式で与えられる。

$$C_u = \frac{A}{1000 V f b} \left(K_1 + \frac{K_1 t_a + K_2}{T} \right) + K_1 t_i \quad (4)$$

拘束条件は、計算が徒に複雑になるのを避けるために下記の2本のみを想定する。

$$f \cdot b = \text{Const.} \quad (5)$$

$$560 \leq \theta \leq 1200 \quad (6)$$

(5)式は旋盤剛性に関するもの、(6)式は加工変質層の巨大化・構成刃先の発生の防止に関するものである⁴⁾。

評価関数計算機で必要な出力変数は、以上の設定では切削温度 θ である。加工プロセスに関しては、測定器のサンプル時点での切削温度 θ が与えられるような設定をすれば良い。今、 τ は $m\tau$ 時点でのサンプル値 $\theta(m\tau)$ から、 $(m-1)\tau$ なる時点から実施されている切削条件 $[V(m-1\tau), f(m-1\tau), b(m-1\tau)]$ の下の工具寿命が(3)式で与えられる様に決定されているものとする。一方、一定切削条件下での工具寿命を与える式としては、拡張された Taylor の寿命方程式(7)が一般的である。

$$V f^{n_1} b^{n_2} T^{n_3} = C_1 \quad (7)$$

(3)式と(7)式は同一の T を与えるから、両式からこれを消去すると(8)になる。 $n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot C_1$ は工具と被削材の組み合わせによって決まる定数である。

$$\theta(m\tau) = C_2 \left(\frac{V(m-1\tau) f(m-1\tau) b(m-1\tau)}{C_1} \right)^{\frac{1}{n_3 n_2}} \quad (8)$$

本報告では(7)・(8)両式で旋削プロセスを定義する(これはシミュレーションに必要な部分に関する最小限のものである)。

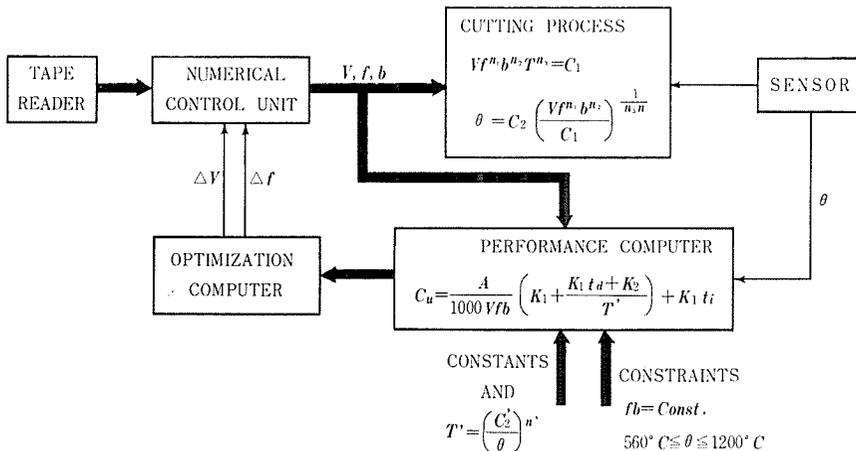


図2 シミュレーションの対象とする制御系

操作できる入力は切削速度 V と送り f の 2 つであるとし、以上の設定によって決まる制御系を図 2 に示す。(付記参照)

3. 最小加工費用

図 2 に示す適応制御系で適当な最適化の手法を用いれば、何回かの修正の後に、評価関数 (1)–(1) 式であって (4) 式でないことに注意—を最小にする切削条件 V_{opt}' , f_{opt}' が求められる。 (V_{opt}', f_{opt}') で加工した時の実際の加工費用は (4) 式から求められる。この値を見かけの最小加工費用 $(C_u)_{min}'$ とする。“見かけの” という意味は次のようになる。つまり、 (V_{opt}', f_{opt}') は (2) 式の下で求められる最適切削条件であり、(2) 式は実際の工具寿命特性に対して誤差を持っているので、正しい式 (3) の下で求められる真の最適切削条件 (V_{opt}, f_{opt}) からはずれてしまう。言ってみれば $(C_u)_{min}'$ は (2) 式という歪んだ眼鏡越しに見た時の見かけの最小値である。 (V_{opt}, f_{opt}) の時の加工費用が真の最小加工費用 $(C_u)_{min}$ となる。

結局、シミュレーションの目的は、(2) 式の誤差による (V_{opt}, f_{opt}) と (V_{opt}', f_{opt}') との相違が $(C_u)_{min}$ と $(C_u)_{min}'$ との間にもどの様な大小関係をもたらすかを知ることである。そこで次の E (%) を定義しておこう。これは $(C_u)_{min}'$ が $(C_u)_{min}$ に較べどの程度悪化しているかを示す尺度であって (V_{opt}', f_{opt}') の非最適度と言える。

$$E = \frac{(C_u)_{min}' - (C_u)_{min}}{(C_u)_{min}} \times 100 \quad (9)$$

4. シミュレーションとその結果

評価関数の計算のために設定した工具寿命式 (2) の誤差によって (V_{opt}', f_{opt}') の非最適度 E がどのように変化するかを図 2 の系についてデジタル・シミュレーションによって調べた。使用した計算機は北大計算センター NEAC 2203 G である。プログラムの大まかなフローチャートを図 3 に示す。極値探索法は、ステップ幅を変化させる試行錯誤法を用いた。

用いた各定数あるいはパラメータの値は一括して表 1 に示す。“その他” の欄の旋削プロセスに関する値は、超硬 P 10 のチップで炭素鋼 S 15 C を旋削し、寿命基準にクレータ摩耗量 $W_{max} = 0.05$ mm をとった場合にほぼ一致する。全切削量 A は $400 \phi \times 480$ の丸棒を切込み 2 mm で切削する場合に当たる。最大送り f_{max} はこの場合 (5) 式から求められる。 $1/N$, $1/C$ は各々 n'/n , C_2'/C_2 であっ

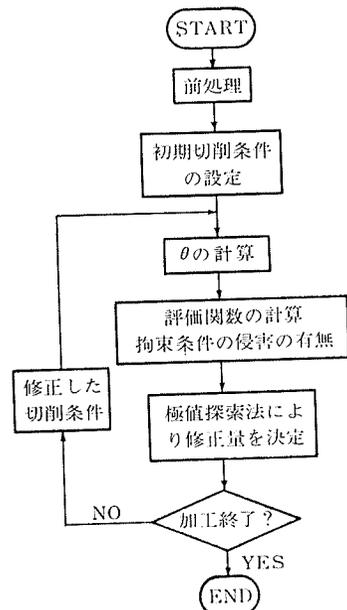


図 3 フローチャート

表1 図2の各曲線に対するパラメータの値

	f_{max} (mm/rev)	K_1 (円/mm)	K (K_2/K_1)	$1/N$ (n'/n)	$1/C$ (C_2'/C_2)	$(C_u)_{min}$ (円/個)	そ の 他
1	0.750	8	8.25	0.5-1.5	1	33.1	$n_1=0.38$ $n_2=0$ $n_3=0.13$ $n=12.987$ $C_1=328$ $C_2=1460$ $t_i=2$ $ta=0.8$ $A=600000$ $W_{max}=0.05$
2	〃	〃	〃	〃	0.8	〃	
3	〃	4.4	15	〃	1	18.9	
4	〃	8	8.25	1	0.8-1.2	33.1	
5	〃	〃	〃	0.5-1.5	1	34.4	
6	〃	〃	5	〃	〃	32.1	
7	〃	〃	8.25	〃	1.2	33.1	
8	〃	13.2	5	〃	1	53.0	
9	0.400	8	8.25	〃	〃	41.3	
10	〃	〃	〃	〃	1.2	〃	

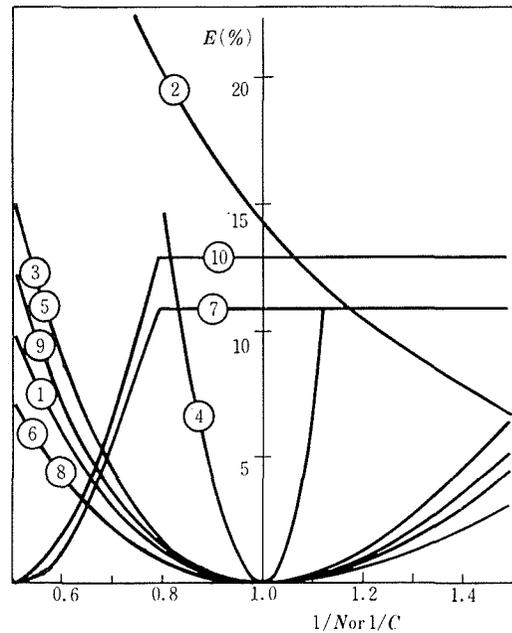
て、共に、設定された工具寿命式(2)の(3)に対する誤差の大きさの尺度である。 K は1分当たりの機械操作費+人件費 K_1 に対する Cutting Edge 1 個当たりの費用 K_2 の比の値である。

シミュレーションの結果を図4に示す。縦軸は E (%), 横軸は曲線④に対しては $1/C$ であり、他の曲線に対しては $1/N$ である。各曲線に付した番号は表1の各行の番号に対応している、その曲線が対応する行のパラメータの値の組み合わせに対するものであることを示す。図4と表1を比較検討すれば次の諸点が明らかになる。

(i) ①・②・③・⑥・⑨等は $1/N$ つまり n' の誤差を変化させたものであるが、共に、 $1/N$ が1より小(つまり $n' < n$)の方が、誤差に対する E の感度は大である。

(ii) ④は C_2' を変化させたものであるが、これによると C_2' が真の値 C_2 より大の時、小の時より E の感度は大である。

(iii) C_2' を変化させた④と n' を変化させた①・③等と較べると、 n' の誤差に対してより C_2' の誤差に対しての方が、 E はずっと敏感である。

図4 パラメータの誤差に対する E の感度

(iv) ⑥・①・⑤の順に K は次第に大きくなっている。これによると K が大一つまじり、Cutting Edge 1個当たりの費用 K_2 が1分当たりの機械操作費+人件費 K_1 に較べて大きくなるにつれて、誤差に対する E の感度が増す。

(v) ③と⑤, ⑥と⑧は共に K_1 と K_2 をその比の値が一定である様に変化させたものである。これによると, K_1, K_2 の値そのものは E の感度に影響しないことが判る。

(vi) ①と⑦は f_{max} が 0.750 (mm/rev), ⑨と⑩は 0.400 (mm/rev) の場合であるが, これらは f_{max} が小になると誤差に対する E の感度が増すことを示している。

(vii) ②・①・⑦と $1/C$ が 0.8, 1.0, 1.2と順に大きくなっているがこれにつれて曲線は右から左へと移動している。これから, C_2' が真の値 C_2 より大きめの時は n' が小さめ・及びその逆の関係のとき, 設定した工具寿命式が実際のプロセスでの工具寿命特性に一致しない時でも真の最適切削条件 (V_{opt}, f_{opt}) を与える場合のある事も判る。

尚④・⑦・⑩の各曲線はグラフの右側の方で水平になっているが, これは切削速度に対する拘束の影響である。曲線④についてこれを説明すれば一図5参照一点 (V_{opt}', f_{opt}') は A, B, C と $1/C$ が大なるにつれて V の大なる方へ移動しているが $1/C$ が約 1.13 以上では拘束条件のため点 P から動かなくなる。一方実際の加工費用は図2の系では切削条件のみで決まる。従って $(C_u)_{min}'$ は一定になる。拘束条件の形 (例えば図5曲線 l のような場合) によっては水平にならない場合も起きるであろう。

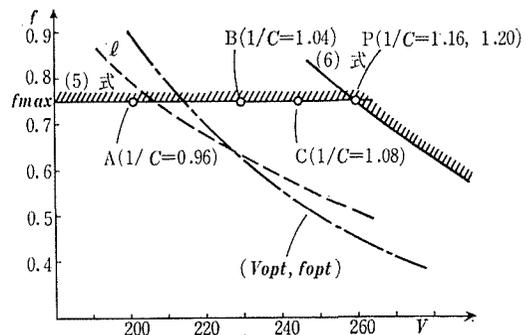


図5 拘束条件の影響

5. 結 び

本報告では設定された工具寿命式 (2) に含まれる誤差が, それを用いて求められる最適切削条件の経済性におよぼす影響について考察した。結果を要約すれば「機械操作費や人件費が安く, 工具費や再研摩費が高く, さらに精密な仕上げを要求される時は, 特に工具寿命式を検討する必要があり, その際切削温度 θ と工具寿命 T の関係を両対数グラフで考えれば, その切片 C_2 及び C_2' と傾き n の相互関係が特に重要である。」ということになる。

上の結果は, さらに, 先に述べた種々の原因により, 設定した工具寿命式の誤差が大である時には, 求められる最適切削条件の経済性が悪化して製品原価に対して無視できなくなる場合のある事を示している。その様な場合には, 設定した工具寿命式のパラメータの値をオンラインで同定し, 修正する, より高度の適応制御ループが必要であろう。

以上の結論は, 図1に示す様な適応制御の対象としての加工プロセスは (7) 及び (8) 両式で

記述できると考えて得たものである。問題は、制御の対象としての加工プロセスをどのようにとらえるか（とらえることができるか）にある。本報告で (7), (8) 両式を用いた事に対する釈明は付記に述べたが、両式は非常に単純化されたものであるから、何か重要な項が見落とされていなくても限らない。この点に関しては、加工プロセスの動特性を、その状態量(出力量)を変数としてとらえる方法についての十分な研究が必要であるが、この様な問題は、まだほとんど研究が進んでいず、切削加工の分野における今後の重要課題の1つであろう。

付記 加工プロセスに対する本報告の考え方

加工プロセスへの入力は切削条件 $u(t)=[V(t), f(t), b(t)]$ なるベクトルとし、状態量として工具摩耗量 $w(\theta, t)$ と切削温度 $\theta(u, w, t)$ を考える。加工プロセスは次の連立1次微分方程式で表現できるものとする。

$$\frac{d\theta}{dt} = f_1(u, w, \theta)$$

$$\frac{dw}{dt} = f_2(\theta, u, w)$$

工具摩耗速度 dw/dt はある工具と被削材の組み合わせに対し、 θ のみで決まると考えるとプロセスの式は下記のようなになる。

$$\frac{d\theta}{dt} = f_1(u, w, \theta) \quad (a)$$

$$\frac{dw}{dt} = f_2(\theta) \quad (b)$$

$\theta = \text{Const.}$ なる切削状態を考えると、初期摩耗量を零として (b) 式を積分し、摩耗量が W_{max} (工具寿命判定基準とする最大摩耗量) になる時間 (工具寿命) T を求めると (c) 式になる。

$$T = \frac{W_{max}}{f_2(\theta)} \quad (c)$$

$$T = \left(\frac{C_2}{\theta} \right)^n \quad (d)$$

本報告で工具寿命を推定するのに使用する (d) なる型の式は、一定切削温度で切削した場合の工具寿命式であって、(c) 式に対応するものと考えられる。

一般に、一定切削条件で切削する時の切削温度 θ の変化は、図6の(1)あるいは(2)の曲線で示される。 t_s は θ がほぼ一定の温度に達するまでの時間で数秒である。その後の(ロ)の部分での変化は、非常にゆっくりしている。 t_s に対し、 T は通常(ロ)の部分の終わり近くまで取られ、実用的な切削条件では10数分～数10分となる。従って $0 \leq t \leq T$ の範囲では、 $0 \sim t_s$ までの部分を無視し、 θ は時間 t を陽には含まないものとする。さらに、初期温度は(ロ)の部分での温度に影響を与えないものとする (a) 式の解は (e) のように書ける。

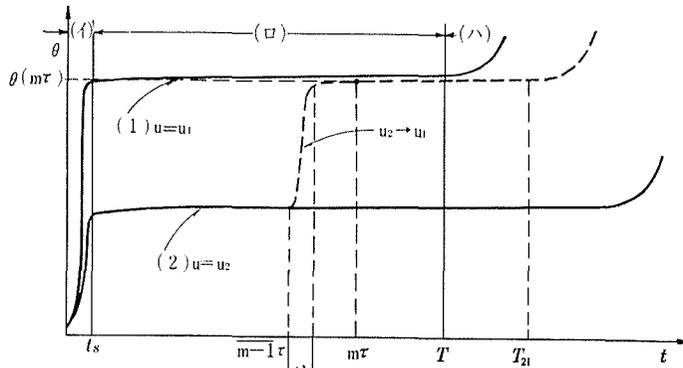


図6 切削温度の時間変化

$$\theta = \theta(u, w) \quad (e)$$

今、途中 $\overline{m-1}\tau$ で切削条件を u_2 から $u_1 = [V(\overline{m-1}\tau), f(\overline{m-1}\tau), b(\overline{m-1}\tau)]$ へ変更した時も、図6に示す様に最初から u_1 で加工したときと同一の温度で安定するものとする。(この事は、先の (e) 式のための仮定と次に述べる仮定とから導かれる。) それ以降 ((ロ) にあたる部分) の温度変化が無視できる位であれば ((d) 式は、無視できると考えて導かれたものである^{7,8)}), u_1 で加工する時の切削温度から、最初から u_1 で加工する時の工具寿命 T (T_{21} でない事に注意) を (d) 式によって推定できる。この時、測定は t_s' より十分長い τ 時間後に行なえば良い。この時の測定値を $\theta(m\tau)$ とする。(d) 及び拡張された Taylor の工具寿命式 (f) が正確に求められていれば、両式は $\theta(m\tau)$ と u_1 に対して同一の T を与える。そこで両式から T を消去すれば (g) 式を得る。

$$Vf^{n_1} b^{n_2} T^{n_3} = C_1 \quad (f)$$

$$\theta(m\tau) = C_2 \left(\frac{V(\overline{m-1}\tau) f(\overline{m-1}\tau) b(\overline{m-1}\tau)}{C_1} \right)^{\frac{1}{n_3 n_2}} \quad (g)$$

以上の議論から判るように、本報告で用いた定義式 (7) 及び (8) は、(ロ) の部分での変化が大きいきには不適當である。本報告では P 10 のチップと S 15 C の組み合わせについては、この変化が少ないものと仮定した。(文献8では、P 10 と SK-3 の組み合わせについては変化が微小であったと報告されている。)

参考文献

- 1) Taylor Fred W. : Trans. ASME, 28 (1907), p. 187-215.
- 2) Brewer R. C. : Trans. ASME, 80 (1958), 11, p. 1479-1498.
- 3) Wu S. M. & Ermer D. S. : Trans. ASME, 88 (1966), Series B, 11, p. 435-442.
- 4) 臼井英治・岸浪建史 : 精密機械, 34 (1968), 4, p. 248-253.
- 5) Kobrinsky A. Ye. 他 : 3rd-Congress of IFAC, Session 27, Paper 27-A, 1966.
- 6) Centner R. M. & Idelsohn J. M. : 3rd-Congress of IFAC, Session 27, Paper 27-C, 1966.
- 7) 中村裕道 : 精密機械, 30 (1964), 1, p. 99-111.
- 8) 中村裕道 : 日本機械学会仙台地方講演会前刷, 1961, 11, p. 9-12.