数値型電子計算機による最少費用切削条件の選定*

白井 英治** 岸 浪 建史***

On the Selection of the Optimum Cutting Conditions with Digital Computer

Eiji USUI, Takeshi KISHINAMI

The paper describes an automatic selection of cutting conditions for minimum cost per machined piece by using Tagawa's method and digital computer.

A problem of rough turning operation, in which a given depth of surface-layer of a bar is machined out, is taken as an example. Cutting speed, feed, depth of cut and flank-wear for tool life are optimized simultaneously as a set of cutting conditions under constraints of permissible cutting area, chatter, cutting temperature, surface-finish and some shop-conditions.

The computer results obtained appear to be in good agreement with practical cutting conditions for this operation, despite the assumptions made and the constants in set-up taken rather arbitrarily due to lack of concrete informations.

1. ま え が き

経済的切削条件の選定については最少費用切削条件, 最大生産性切削条件, 最大利益切削条件の3種の考え方があり, それぞれについての解析^{1),2)}がおこなわれてきた。しかしいずれの考え方をとるにせよ, 従来の諸研究は他の諸条件一定のもとで単一の変数(たとえば切削速度, 送りなど)の最適値を求める場合が多く, 多数個の変数が同時に最適値となる組合わせを求める試みは R. C. Brewer³⁾の研究****を除けばほとんどなされていない。

しかるに実用的には多くの切削条件の最適値を一つの組合わせとして同時に決定できなければ意味がないし, しかもその決定は多くの実際の制約を満たしながらおこなうことが必要である。容易に予想されるように, この問題は決定すべき条件数が増せば人力による検討では到底処理しえない複雑さを持つことになる。本報告は最少費用切削条件の場合をとり, デジタル電子計算機と極値探索法の組合わせによりこの問題を解くことが可能なることを示したものである。

2. 田川の極値探索法

前項に性格づけた問題は数学的には次式の連立方程式を解くことに帰着する。

$$\text{Min. (or Max.) } P = P(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\begin{cases} G_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \\ G_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \\ \vdots \\ G_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

すなわちある評価関数 P を $G_1, G_2, \dots, G_n$ なる拘束条件を満たしながら最小(または最大)にするような独立変数 $x_1, x_2, \dots, x_n$ を決定すればよい。本報告の場合, 評価関数 P は製品1個あたりの機械加工費をとればよく, また変数 $x_1, x_2, \dots, x_n$ は求めるべき切削条件, $G_1, G_2, \dots, G_n$ は切削条件の関数として定まる技術的あるいは現場的諸制約条件に相当する。

さて田川⁴⁾によれば(1)式の解法は次式で定義される関数 F の最小(または最大)値をあたえる $x_1, x_2, \dots, x_n$ を求めることに置きかえられる。

$$F = P + \sum_{i=1}^n C_i R_i^2 \quad (2)$$

$$R_i = \begin{cases} 0 & G_i \geq 0 \\ G_i & G_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

ただし C_i は大なる正(または負)の数である。すなわち適当な数値的解法による上式の解を(1)式の問題の解とみなすわけである。この解法は厳格な数学的証明を経たものではないが, 定数 C_i を十分に選べば必要な精度は常に確保される。なお上式の意味は拘束条件のもとで評価関数 P の極値を求めるかわりに拘束条件位置に絶壁(または断崖)を形成する単一関数 F をつくり, その極値を求めようとするものであり, 単一拘束条件の場合を図示すれば付録におけるものとなる。(2)式の数値解法には通常極値探索法の利用も可能であるが, 本報告では田川⁴⁾の方法を使用した。付録に2変数関数の場合をとおおよその考え方を示した。

なお(2), (3)式および付録に明らかなように, 田川の方

*原稿受付 昭和42年8月2日。昭和42年度春季大会学術講演会(昭和42年4月6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)

***学生会員 北海道大学工学部

****Brewerの研究では送り, 切削速度, 逃げ面寿命摩耗幅の3変数が求められているが, 寿命摩耗幅は前2者と無関係に定まる形式をとっているため, 事実上は2変数の最適値の同時決定である。

法で極値探索をおこなうためには(1)式の変数は連続可変でなければならない。しかるに切削条件には工具材質、切削油剤などのように数でないものも含まれている。このような場合、各項目(工具材質、切削油剤など)の種類は(1)式に必要な諸定数を変えることに相当するから、まず諸定数が固定された時に連続変数のみの極値を求めるプログラムを(2)式によって組む。次いで各項目とそれに対応する種類を記号化し、記号に対応する諸定数を計算機に記憶せしめる。そして項目を変数、種類を変数変化の歩幅として扱えば、前記のプログラムを含んだ Dö ループとして同じ考え方で最適種類の探索をおこなうことができる。

3. 問題の設定

厳格に考えれば最少費用切削条件は工作機械、切削法、被削材の選定から考えてかからねばならないが、複雑さも資料も十分にえられないので、本報告では(1)式における独立変数として切削速度(V)、送り(f)、切込み(d)、寿命フランク摩耗幅(V_B)の4個をとり、他の諸条件はすべて定まったものとする。すなわち対象とする切削加工は荒仕上げを目的とする旋盤長手乾切削、被削材は SUS-22 (フェライト系不銹鋼) 直径 150mm ϕ 、長さ 300mm の丸棒材、工具は超硬 MB1 [0, 10, 5, 5, 15, 15, 1] の JIS 31-2 型バイトであり、被削材全長にわたる一定取代を除去するものとする。また簡単のため切削速度、送りは連続に変えうとする。

評価関数 P は M. C. Shaw⁵⁾ によれば次式であたえられる。

$$P = XT_c + XT_d \frac{T_c}{T} + \frac{Y_i + X_g T_g N}{N+1} \frac{T_c}{T} + XT_w \quad (4)$$

ただし X : 切削費 (8円/min), T_c : 切削時間 (min), T_d : 工具脱着の無駄時間 (0.7min), T : 工具寿命 (min), Y_i : 工具原価 (780円), X_g : 工具再研摩費 (9円/min), T_g : 再研摩時間 (min), N : 工具廃棄までの再研摩回数, T_w : 被削材脱着の無駄時間 (2min) である。なお上記の価格および時間値はむしろ仮定であり、各工場の実情を調査した結果ではない。

(4)式の切削時間 T_c は次式であたえられる。

$$T_c = \frac{d_0 \pi l}{V f} \cdot \frac{a}{d} \quad d \leq a \quad (5)$$

ただし d_0 , l はそれぞれ被削材直径および長さ, a は取代である。また工具寿命 T は竹山⁶⁾の結果を整理すれば実用範囲では次式で計算してよいことが見出される。

$$\text{逃げ面摩耗} \quad Vd^{0.1} f^{0.45} T^{0.13} = 261 V_B^{0.287} \quad (6)$$

$$\text{すくい面摩耗} \quad Vf^{0.47} T^{0.18} = 378 K_T^{0.1572} \quad (7)$$

ただし K_T は寿命すくい面摩耗深さである。従来の常識では適当な制約条件から V_B , K_T の寿命値をあらかじめ定めておき、いずれかが寿命値に達した時をもって工具寿命と考えているが、(6), (7)式にみるように V_B , K_T は本来独立変数でないからこの考え方は本報告の方法には適用できない。本報告では寿命 V_B の最適値が決まれば、それに対して(6), (7)式より決まる K_T が最適すくい面摩耗寿命値であると考えられることになる。次に(4)式の再研摩回数 N および研摩時間 T_g であるが、摩耗こんの発達形状に応じてことなる研摩手順をとるのが一般であり、それに応じて N , T_g は変化する。したがって正しくは数種の研摩方式を定式化し、状況に応じていずれをとるのが有利かを計算機に判定させるプログラムとすべきであるが、本報告では簡単のため以下のように考える。すなわちすくい面摩耗こんおよび逃げ面摩耗こんはそれぞれの面の研摩によって除去するものとし、各面の研摩時間は K_T および V_B にそれぞれ比例するものとする。いま脱着および段取の無駄時間を 1min, $V_B = 0.6\text{mm}$, $K_T = 0.05\text{mm}$ の場合の全研摩時間を 3 min, また V_B に対しては 0.6min, K_T に対しては 2.4min を要すると仮定すれば次式をうる。

$$T_g = 1 + V_B + 48 K_T \quad (8)$$

また当初の超硬チップより 1mm 厚さが減少した時に廃棄することにすれば、 N は整数なることを条件に次式をうる。

$$N = \frac{1}{K_T} - 1 \quad (9)$$

(5), (6), (7), (8), (9)式および諸定数を(4)式に代入すれば評価関数 P は V , f , d , V_B の関数となる。なおこれらの最適値が求まれば上記諸式より最少機械加工費、工具寿命、最適再研摩回数、再研摩所要時間などが求まるのはもちろんである。

次に拘束条件であるが、本報告はもともと一つの試みないしは方法の提示であり、この意味から現在実際の資料がえられていない諸条件も適当な仮定のもとにあえて採用してみることにし、以下の6条件を考えた。なお(2)(3)式の意味から明らかなように最もきびしい拘束条件のみが最終的に有効となるが、いずれがきびしい条件かあらかじめ判断できない場合、計算時間の増加を問題にしなければ、すべての条件を(2)式に組込んでしまっても差支えない。

G_1 : 旋盤の剛性から切削面積は一定値 1.5mm^2 以下に制限される。すなわち $f \cdot d \leq 1.5$ (10)

G_2 : びびり振動を発生する f , V , d の組合わせがあり、この条件を避けねばならない。 f , V , d の全変域にわた

図1 仮定したびり発生領域

るびりの具体的資料が入りできなかった。本報告では従来の研究⁷⁾にみる定性的な傾向を参照して図1のびり域を仮定して用いることにした。実際にはS. Tobias⁸⁾の研究にみるように単一の領域とは限らないであろうが、簡単のため同図を用いる。同図のびり域を避けるには次式のいずれか一方が満たされればよい。

$$\left. \begin{array}{l} V \geq -750f + 70d \\ V \leq 420f \end{array} \right\} \quad (11)$$

G_3 : 構成刃先の発生, 加工変質層の巨大化を避けるため切削温度 θ は $560^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$ の範囲になければならない。SUS-22不銹鋼についての実際の資料がえられぬため, M. C. Shaw⁹⁾の解析を利用して適当に係数を仮定すると次式の制限を満たせばよいことになる。

$$560 \leq 120V^{0.5}f^{0.3} \leq 1200 \quad (12)$$

G_4 : 仕上面あらさ $H_{\max}$ は一定値 60μ 以下に制限したい。仕上面あらさは V. Solaja¹⁰⁾ によれば次式であたえられる。

$$H_{\max} = (V_B' - V_B)\tan\gamma + (V_B'^2 - V_B^2)/d_0 + (f - 0.065V_BR/f)^2/8(R - V_B\tan\gamma)$$

ただし $H_{\max}$ は仕上面最大値あらさ, γ は前逃げ角, R はノーズ半径, V_B' , V_B はそれぞれ前逃げ面の境界摩耗幅および V_B である。上式の第3項は他項に較べ小であり, また $-0.065V_BR/f$ は実験的補正項でその出所は明らかでない。そこでこの部分を除いた次式によって制限を示すことにした。

$$H_{\max} = (V_B' - V_B)\tan\gamma + (V_B'^2 - V_B^2)/d_0 + f^2/8(R - V_B\tan\gamma) \leq 60\mu \quad (13)$$

上式の V_B' と V_B には直接的関係なしとする報告¹¹⁾もあるが、一般には矢張り直接の対応をもつものと思わ

表1 最少費用切削条件の計算結果

	取代 5 mm		取代 8 mm	
	$G_1 \sim G_4$	$G_1 \sim G_6$	$G_1 \sim G_4$	$G_1 \sim G_6$
トラバース回数	1	1	2	2
$d(\text{mm})$	5	5	4	4
$V(\text{mpm})$	201.6	187.6	181.5	156.1
$f(\text{mmpr})$	0.300	0.300	0.359	0.374
$V_B(\text{mm})$	0.66	0.66	0.60	0.60
$K_T(\text{mm})$	0.052	0.063	0.055	0.077
$P(\text{円})$	38.01	38.42	55.03	56.39
$T(\text{min})$	57.64	101.01	67.57	188.29
$T_c(\text{min})$	2.34	2.51	4.22	4.71
$T_g(\text{min})$	4.16	4.66	4.24	5.29
$\theta(^{\circ}\text{C})$	1187.4	1145.2	1189.3	1116.5
$H_{\max}(\text{mm})$	0.0579	0.0580	0.0583	0.0599
N	18	15	17	12
1日の工具数	5	3	5	2
工具1本あたりの製品数	24.6	40.2	16.0	40.0
1日の製品数	110.0	106.0	76.8	71.4

れる^{12),13)}。実際の資料がえられぬため他例を参照して $V_B' = 1.7V_B$ と仮定し、また前逃げ面と横逃げ面の V_B は同一として(13)式を用いることにした。

G_5 : 生産管理上被削材は40本を1ロットとして扱われており、この1ロットの切削中に工具を取替えたくない。すなわち m を整数とすれば $T = m40T_c$ が理想的であり、計算機プログラム上では α を1以下の十分小なる正数(本報告では0.3)とすれば次式の制限を設ければよい。

$$m(40 + \alpha)T_c \geq T \geq m40T_c \quad (14)$$

G_6 : 工具の手持個数が決まっており、1日(8時間)に使用できる工具数(5本)が制限される。すなわち

$$8 \times 60 / (T + \frac{T_w}{T_c}T + T_d) \leq 5 \quad (15)$$

この制限はむしろ奇異であり、本来は最適切削条件において決まる工具寿命に応じて必要な工具数を用意すべきものであるが、小工場でのフライス作業などの場合、仮りにこのような要求が生じても処理しうることを示すため採用したものである。

なお以上の拘束条件のうち G_1 , G_2 , G_3 は切削の初期状態に関するものであり、正しくは摩耗の進行にともなう変化をも考慮しなければならない。しかしこれに関する資料のない場合、制限範囲をあらかじめ広くとっておけば実用的には十分かと考えられる。また後述するように極値に関係しない制限もでてくるから、制限定数を変えて極値の動きを検討し、どの制限が極値に関係し最も強く極値を左右するか調べる。そして最も影響の強い制限についてのみにさらに詳細な吟味をおこなえばよい。

4. 計算結果とその検討

表1は計算された最少費用切削条件であり、取代5mmおよび8mmの場合をとり、拘束条件 $G_1 \sim G_4$ を含む場合および $G_1 \sim G_6$ の全部を含む場合の両結果を併記してある。取代5mmの場合1回のトラバースで切削を終えるのが有利なのに対し、取代8mmの場合は等切込(4mm)で2回のトラバースをおこなうべきことが指示されている。この結果を説明するためにはまず切込みについての考え方を述べねばならない。設定取代をあるトラバース回数で除去する場合、各トラバースをそれぞれいかなる切込みおよび切削条件でおこなうのが最適かの厳密な決定は非常に困難である。各切込みに対する最適速度、最適送りとは異なるはずであり、一般にはトラバースごとに切削条件をかえながら削る場合を予想しなければならない。一本の工具で切削条件をかえながら切削する場合の工具寿命は現在の知識では処理しえない複雑さである。そこでおおよその見当をつけるため、各切込みにおいて1回だけトラバースする最少費用を加工物脱着費を省略し、 G_1, G_3, G_4 (びびりの条件 G_2 を除く)の拘束条件のもとに求めてみると表2(a)をうる。明らかに切込みが増すほど費用は大となっているが、これは大切切込みに対しては拘束条件のために経済的な切削条件がとれないことを示すものである。また小切込みのみをとれば取代に対してトラバース回数が増すのでこれも不経済になる。いまたとえば各トラバースにそれぞれ1本の工具を使用するとして、工具交換の無駄時間、被削材の直径変化を無視し、取代10mmのときの費用を表2(a)から求めてみると同表(b)をうる。同一トラバース回数(同一工具数)に対しては似たような切削条件を用いるほど有利なことが明らかである。もちろんこれは1本の工具で取代を除去する場合の証明にならないが、表2(a)の傾向および各トラバースで速度、送りを毎回調節する無駄時間をも考慮すれば、結局等切込み、同一切削条件でトラバースを繰返すのが適当と考えてよいように思われる。なお $\frac{a}{d_0}$ が大でなければ一定速度でなく、一定主軸回転数でトラバースを繰返すことがさらに適当であろう。さて以上の結果によればまず(5)式をそのまま用いて計算をおこない、最適切込み $d=d_i$ を求める。この時 $n = \frac{a}{d_i}$ が整数ならばその切込みと切削条件で n 回のトラバースをおこなえばよく、また $\frac{a}{n+1} < d_i < \frac{a}{n}$ (n は整数)ならば切込みを $d = \frac{a}{n+1}$ に固定したときの最適 V, f を求め、その $V,$

表2 (a)トラバース回数1の場合の切込みによる(最少費用/製品)の変化

$d(\text{mm})$	$V(\text{mpm})$	$f(\text{mmpr})$	$V_B(\text{mm})$	$K_T(\text{mm})$	$P(\text{円})$
1	150.0	0.483	0.44	0.100	17.13
2	160.8	0.448	0.50	0.071	17.85
3	160.8	0.448	0.50	0.050	17.93
4	181.5	0.370	0.61	0.054	19.71
5	201.6	0.300	0.66	0.052	22.01
6	219.6	0.243	0.73	0.057	24.73
7	244.0	0.213	0.73	0.043	26.49
8	257.8	0.186	0.73	0.038	28.57
9	271.1	0.166	0.73	0.034	30.51
10	286.5	0.149	0.80	0.037	32.20

(b)取代10mm, 各トラバースごとに別工具を用いる場合のトラバース回数, 切込みの組合せによる(最少費用/製品)の変化

トラバース回数1		トラバース回数2		トラバース回数3	
$d(\text{mm})$	$P(\text{円})$	d_1+d_2	P	$d_1+d_2+d_3$	P
10	32.20	1+9	47.64	1+1+8	62.83
		2+8	46.42	1+2+7	61.47
		3+7	44.42	1+3+6	59.79
		4+6	44.44	1+4+5	58.85
		5+5	44.02	2+2+6	60.43
				2+3+5	57.79
				2+4+4	57.27
				3+3+4	55.57

図2 製品1個あたりの機械加工費と切削条件との関係(1変数のみを変化させ、他の変数はそれぞれの最適値に設定した場合)

f において $n+1$ 回のトラバースを繰返せばよいことになる。なぜなら演算過程は n 回または $n+1$ 回よりも多いトラバース回数が不利な証明を自動的に含むからである。表1の結果はこの方法によるものである。なお取代8mmの場合の結果は被削材直径の変化をも考慮してある。

次に表1で取代5mm, $G_1 \sim G_4$ の場合の最適値がどのような状態にあるか1変数断面で考えてみる。図2はこれを示すものである。まず同図(a)では d を連続変数として示すため(5)式をそのまま使用する場合(取代で決まる一定切削容積を除去する場合)を考えたが、表2(a)と異なり切込みが大なるほど費用は安く、結局 $d \leq a$ (または $f \cdot d \leq 1.5 \text{ mm}^2$)が制限となって最適切込みが決まっている。また同図(b)では V_B が大(したがって K_T も大)なるほど費用は安く、いわゆる極値は存在しない。そして $H_{\max} \leq 60 \mu$ が制限となって最適寿命摩耗幅が決まっている。なお同図の結果は摩耗の巨大化を許せない特別の事情のない限り、再研摩費を考慮しても V_B を大に、つまり一切れ刃を使える限り使った方が有利なことを示している。木暮¹⁴⁾の述べるような変曲点が摩耗経過曲線に存在せず、工具寿命方程式が(6), (7)式のような指数関数で書けるのが一般とすれば、この結論は常に成立すると思われる。次に(c), (d)図をみると両曲線は従来の指摘のように極値を有する形であるが、 $d \cdot f \leq 1.5 \text{ mm}^2$ の制限のため送りについては真の極値でなく $f = 0.3 \text{ mmpr}$ が最適値として選ばれていることがわかる。これに対し V の最適値は制限条件によらず真の極値として選ばれている。

図3は費用の等高線を用いる2変数断面において同じ結果を示したものである。同図(a)では $d \leq a$ および $d \cdot f \leq 1.5 \text{ mm}^2$ の制限から d, f が決まり、同図(b)では $H_{\max}$ の制限から V_B が、また同図(c)では $f = 0.3 \text{ mmpr}$ における極値として V が決まることが理解できる。なお同図(c)にみるように他の条件一定のもとで V, f の両方を動かして極値を探索させると、拘束条件のない場合には計算は送り無限大の方向に流れてしまう。切削において使用される諸式は切削方程式、あらさの式のような解析的なものでも、寿命方程式のような実験式でも所せんは限られた変域においてのみ有効性をもつ。したがって計算結果がこれらの有効域に入るように拘束条件を与える配慮が必要であり、先のあらさによる V_B の制限はその一例である*。なおこの意味では使用した諸式が答の位置で有効

*R.C.Brewer³⁾のように V_B あるいは K_T の過大化による工具破断の危険度を用いて制限することも可能である。

図3 製品1個あたりの機械加工費と切削条件との関係(2変数のみを変化させ、他の変数はそれぞれの最適値に固定した場合)

か否かを検討してみなければならないが、表1の結果はまず妥当なものと考えられる。また図3(c)では温度およびびびり域の拘束は結果に影響していないが、先にも述べたようにこのような有効でない拘束条件を演算にとり入れることは差支えない。なお他の極値探索法でも同様であるが、田川の方法では許容域に複数個の極値の存在するいわゆる多峰性(本報告では多谷性)問題に対しては、計算の出発点によっては真の極値に到達しない欠点がある。解決策は異なる多くの出発点から計算を進行させ、いかなる極値がえられるか検討することであり、表1の結果はこれによる十分な確認を経たものである。拘束条件 $G_1 \sim G_6$ を含む場合多谷性であった。

以上本報告の解析はもちいた諸定数の吟味不足、拘束条件における粗雑な諸仮定などにもかかわらず、表1にみるように実際の条件にかなり近い解答を生じており、少なくとも採用した条件下では正解なことが確かめられたわけである。詳細な実験資料がえられ、実情にそくした諸拘束条件を加味できれば実用に供しうるのでないかと考えている。

5. 結 論

1. 数値型電子計算機と田川の方法を利用して最少費用

切削条件を求めることができる。特に実際の諸制約を満たしながら、多くの諸元的最適値を同時に求めることが可能である。

2. 丸棒の旋盤粗削りにおいて全長にわたる一定取代を除去する場合を実例にとり、最少費用切削条件を決定することができた。多くの仮定と条件の不備にもかかわらず、得られた結果は実用条件に近いものとなった。

本研究の遂行にあたり適切など助言を賜った北海道大学工学部田川遼三郎教授、星光一教授、機械試験所竹山秀彦博士、東京工業大学木暮正夫教授、阿武芳郎教授に厚く御礼申しあげる。また具体的な計算機プログラム、結果の検討など北海道大学工学部精密工学科第6回卒業生神谷征男氏（現石川島重工勤務）の努力によるところ大である。記して感謝の意を表する。

引用文献

- 1) W.W.Gilbert: Economics of Machining, Machining-Theory and Practice, ASM, Cleveland, Ohio, U.S.A. (1950) 465.
- 2) 奥島啓式, 人見勝人: 機械加工の経済的考察—最大利益加工条件の概念とその解析, 精密機械, 30, 6 (1964) 458.
- 3) R.C.Brewer: On the Economics of the Basic Turning Operation, Trans. ASME, 80, 7 (1958) 1479.
- 4) R. Tagawa: Automatic Design of Automatic Control Systems with the Help of Digital Computer, Proceeding of IFAC Tokyo Symposium on Systems Engineering for Control System Design, IFAC. (1965) 31.
- 5) M.C.Shaw, et al.: Wear Theory, MIT Press, U.S.A. (1958) 11-25.
- 6) 竹山秀彦, 谷戸勉, 吉川悌二: 切削作業標準設定に関する研究 (第4報), 機械試験所所報, 15, 4 (1961) 146.
- 7) 土井静雄: 工作機械の振動, 誠文堂, (1954) 28.
- 8) S. Tobias: Machine-Tool Vibration, Blackie & Son, England (1965) 234.
- 9) M.C.Shaw: Optimum Selection of Machine Tool Speeds and Feeds, Int. J. Mach. Tool Des. Res., 5 (1965) 25.
- 10) V. Solaja: Wear of Carbide Tools and Surface Finish Generated in Finish Turning of Steel, Wear, 2. (1958/59) 40.
- 11) 竹山秀彦: 切削技術の研究 (6), 工具研削と切削仕上げ粗さ, 機械の研究, 17, 4 (1965) 549.
- 12) 佐田登志夫, 天野和義: 切削仕上げ粗さとバイトの摩耗との関連, 精密機械, 26, 11 (1960) 686.
- 13) K. Okushima & Y. Fujii: On Surface Finish Produced by Ceramic Tools, Bulletin of JSME, 4 (1961) 365.
- 14) 木暮正夫: 超硬バイトの寿命とその試験, 日刊工業新聞社, (1957) 70.

図4 田川の極値探索法の説明

付録

図4(a)において実線を関数 $P(x_i)$ とすれば、これに拘束条件 G_1 を考慮するとき関数 $F(x_i)$ は点線で示すものとなり、極小値はM点で与えられる。定数 C_1 を大に選べばM点は次第に拘束条件位置に一致するものとなる。また同図(b)の等高線を拘束条件 G_1 をもつ関数 $F(x, y)$ のそれとすれば、田川の方法による極小値探索は以下のおこなわれる。まず出発点 $P_0(x_0, y_0)$ をあたえる。ついで x, y のいずれかを固定して他を動かしてみる。たとえば x を動かすとすれば動かす歩幅は常に $x \times 10^{-1}$ とする。 $\delta = F_{x_i + x_i/10} - F_{x_i}$ を計算し、 $\delta < 0$ の方向をたどらせる。いま P_1 点で行停まるとすれば、次に $x = x_1$ を固定して y を同じく $y \times 10^{-1}$ の歩幅で動かす。そして P_2 点で再び行停まるとき、 P_0, P_2 点間の距離 $S_1 = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$ を計算させる（多変数関数の場合には全変数をひとわり動かし後 $S = [(\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2]^{1/2}$ を計算させる）。 $S_1 \approx 0$ ならばさらに図示のようにひとわり変数を動かして再び S_2 を計算させる。この繰返しによって $S = 0$ すなわち大体の極小値に到達せしめる。次に歩幅を $x \times 10^{-2}$ に縮小して同様の計算を繰返させ、次第に $10^{-3}, 10^{-4}, \dots, 10^{-n}$ と対数尺上で同一距離だけ歩幅を縮小させて極小値の精度を高めてゆく。そして適当な精度までで計算を打ちらせるものである。