

# 切削抵抗の構成要素について

酒井義郎\*・綿野豊光\*\*・大草喜太雄\*

## Resolution of the Tool Force Vector in Turning

Yoshiro SAKAI, Toyomitsu WATANO and Kitao OKUSA

### Abstract

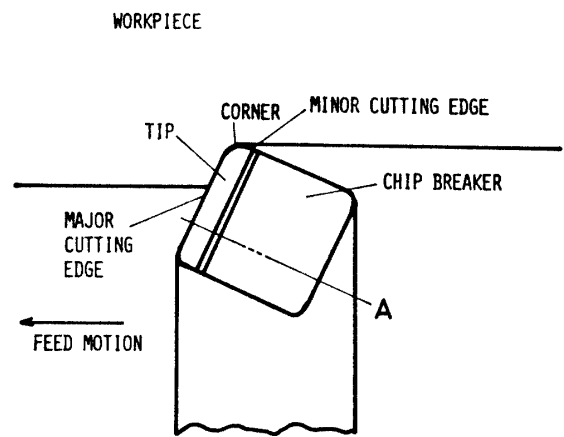
Chip control is one of the major problems in turning operation. The tool force as a vector includes much information about the direction of chip flow and the condition of chip formation. From the above point of view, the behavior of the tool force is discussed. It is found that the nonlinearity in the increase of the tool force with feed is mainly due to the cutting action at the corner and that the power spectrum of the fluctuation in the tool force reproduces well the chip breaking condition in operation. An equation is also proposed which governs the behavior of the tool force.

### 1. はじめに

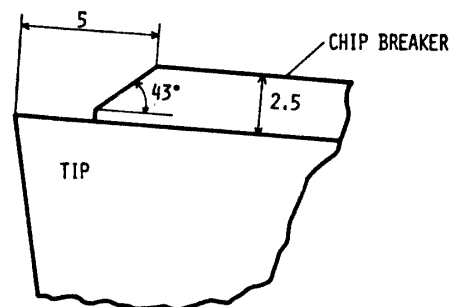
工具は切削に直接関与する部分であるから、刃先の(工具台に相対的な)挙動あるいは温度など物理的、工学的量を検出することによって切削状態に関する多くの情報を得ることができる。工具は、いわば、刃先からこうした多くの信号を工具台に向けて送っているわけで、そうした種々の量はシャンクの部分で線形あるいは非線形な変換を受けて工具台に伝えられる。したがって、それぞれの量に対するシャンクの伝達特性を踏まえて、それらの出力の挙動と刃先で実際に生じている現象との対応関係を把握しておけば、工程の管理などの点から非常に好都合である。そうした出力のうちでも、ベクトルとして捉えた切削抵抗は、工具の損耗状態などむしろ工具自体に関する情報、切削抵抗の値の大小など被削材質に関する情報あるいはまた切りくずの排出状況やびびりなど工具と被削材との相対的な挙動や親和性に関するもの、さらに総合的に捉えた切削状態に関する情報を含んでおり、興味深い量である。また、切削抵抗はシャンクの歪を通じて検出するので、伝達の線形性もよい。このような点から、切削抵抗は切削状態に関する非常に有力な情報源の一つといえる。その試みとして、今回ごく定性的にはあるが、その挙動について、切りくず処理性と関連させ

ながら検討した。

### 2. 切削抵抗時間平均値の挙動について



( TOP VIEW OF TOOL )



( MAIN PORTION OF SECTION A )

Fig.1 Geometry of chip breaker

\* 生産機械工学科  
\*\* 大学院生産機械工学専攻

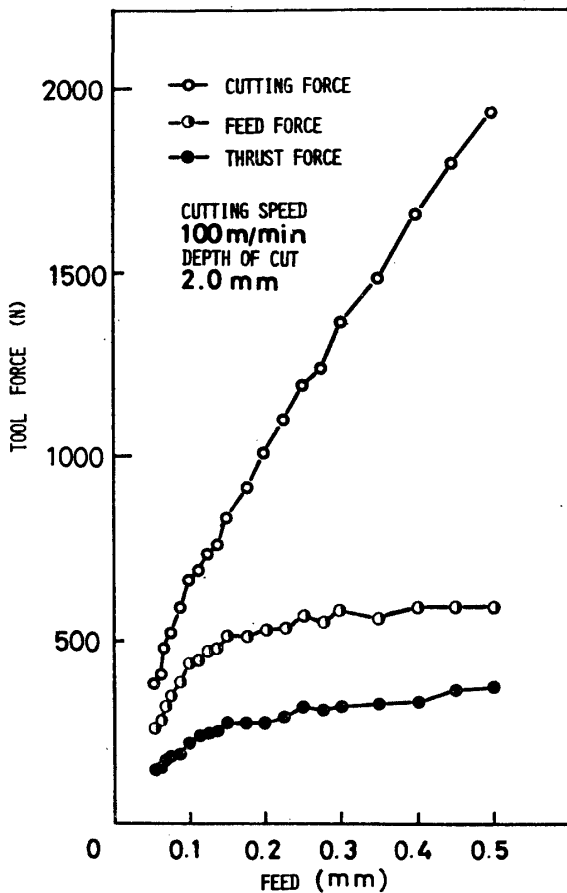
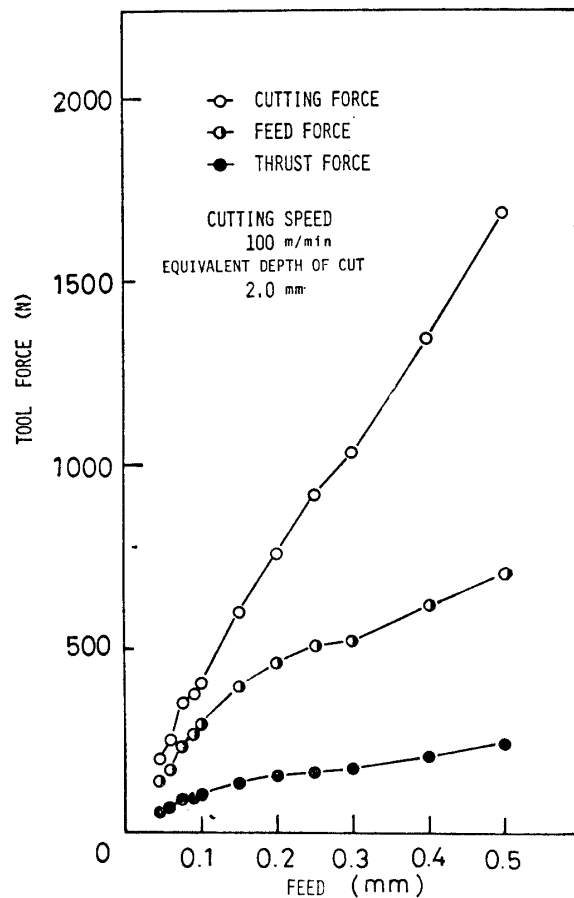


Fig.2 Behavior of tool force with feed

Fig.3 Behavior of tool force with feed  
(cutting at the straight edge alone)

以下に示す切削条件下で外周旋削を行った。工具：P20， $5^\circ, 5^\circ, 5^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 0.8$ ；被削材：S48C 焼ならし材， $600\text{mm} \times \phi 130\text{mm}$ ；切込み  $d$ ：0.5, 1, 1.5, 2, 3 mm；送り  $f$ ：0.056, 0.063, 0.069, 0.075, 0.088, 0.1, 0.15, 0.175, 0.2, 0.225, 0.25, 0.275, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5mm。チップブレイカ形状を Fig.1 に示す。

上記のように送りを変化させて、各送りにおける主分力、送り分力および背分力の3分力の値をグラフにしたものが Fig.2 である。主分力についてはあまり明瞭ではないが、他の2分力、ことに送り分力においては送りの増加に対して曲線的な増加を示している。これに対し、Fig.3 では送り 0.1mm 以下の部分を除いて（送りが小さい場合には、刃先の丸みや送り設定の精度などが効いているものと思われる。）、送りに対する切削力の増加における直線性がよい。この結果は主切刃の部分のみによる切削、すなわち直線刃による切削、におけるものである。ノーズ部（図1における CORNER）が切削に関与しないようにする方法として、倣い装置による切削を併用した。<sup>1)</sup> これにより、

被削材のノーズ部との接触部分を除去することができ、直線刃である主切刃のみが作用するようになる。この場合の切削幅（主切刃が被削材を切削する幅）は 2.07mm である。主切刃角が  $15^\circ$  であることから、通常の3次元切削における切込みに対応する値としては、 $2.07 \times \cos 15^\circ \approx 2\text{mm}$  となり、図3にはこの値を相当切込み深さとして記した。図2と図3を対比することにより、相当切込み深さとして同一のものではあっても、直線刃のみが作用している場合とノーズ部として曲線刃を含む切削とは大きな相違を生じることが理解できる。これは、ただ単に刃先形状に曲線部を含むことによるものというよりは、むしろノーズ部の特異性によるものと思われる。すなわち、例えばノーズ部を切刃に沿って微小角に分割して考えると、それぞれの分割における切りくず流出方向は隣り合う分割間で、その微小な分割角に応じて微小に変化する。このため、切りくずは互いにそれぞれの排出に関して干渉し合い、さらに直線刃部の切りくずに対してもそれら全体として影響を及ぼす。このことが切りくず全体としての流

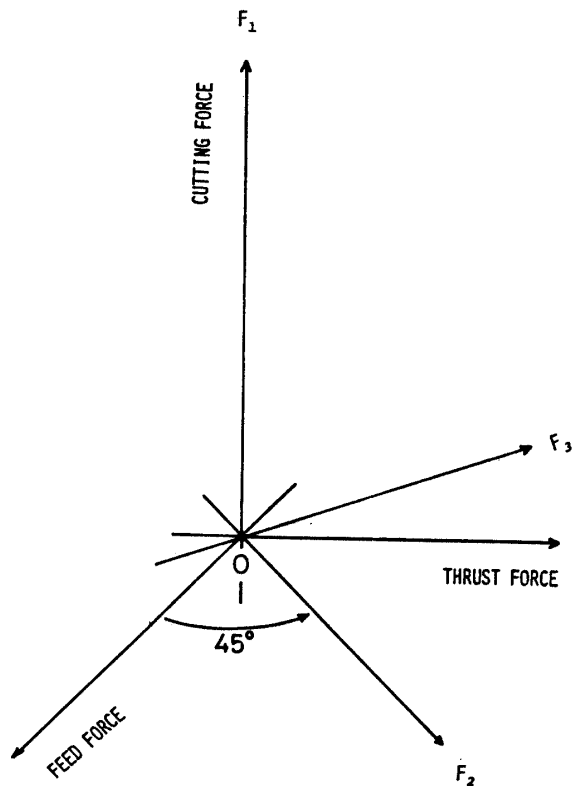


Fig.4 Ordinary and more convenient reference systems

出角に大きく影響しているものと思われる\*。もちろん、一般の曲線刃についても上記に類似の現象は生じるが、ノーズ部は作用切刃端部に位置するため、そこでの局部的に見た切りくずの排出に対する拘束が少なく影響が大であろう。こうしたノーズ部の特異性に関して以下さらに検討を試みる。

Fig.4 における各3分力方向を基底とした座標系が一般に用いられるものであるが、ここでは図に示したように、主分力方向に直交する面内で45°だけ座標回転を施した座標系において、切削抵抗ベクトルの挙動について観察する。座標回転を施したのは、例えば  $(F_3, F_1)$  面への切削抵抗ベクトルの射影が  $F_3 > 0$  の側にあれば、ベクトルの向きが工具寄りになり、 $F_3 < 0$  の側にあれば被削材寄りに向いていることを示しているということなどにより、直観的に挙動を把握しやすいと考えたからである。Fig.5 は切込みと送りの2者のうち、いずれか一方を固定して他を変化させたとき

\* 切りくず流出角（流出方向と切刃縁に直交する方向とがすくい面内でなす角）は  $\gamma = (\text{切込み}) / (\text{ノーズ半径})$  の増加とともに減少し、一定値に漸近する。

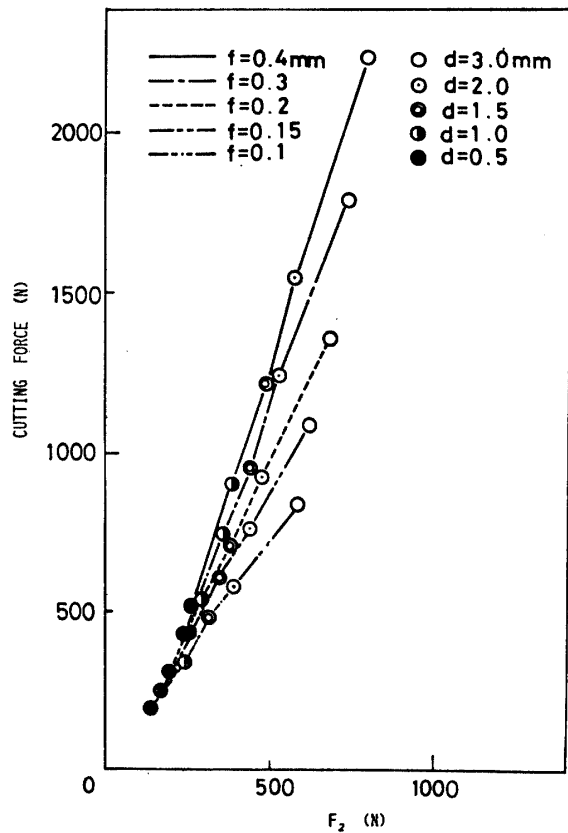


Fig.5 Behavior of tool force vector in the  $(F_2, F_1)$  plane

の切削抵抗ベクトルの挙動を  $(F_2, F_1)$  面内の動きとして捉えたものである。図中、直線あるいは鎖線などでつないだ一連の点（位置ベクトルの終点の位置）はそれぞれ送りを変化させて切込みを固定した場合の切削抵抗ベクトルの挙動であり、非常によい線形性が見られる。また、送りの増加に対し、それら点群の傾きは増加しており、送りの増加に対する主分力の伸びは送り分力および背分力のそれらに比して大きいことを示している。このことは図2からも容易に推察できる。さらに、同一の記号で示した点、すなわち切込みが同一のもの挙動を追ってみると、切込みが小さいほどその挙動の非線形性は大きいことが理解できる。次に Fig.6の  $(F_3, F_1)$  面での切削抵抗ベクトルの挙動については、座標系の取り方に関連して先に述べたことから、切込みの増加に伴って切削抵抗ベクトルの向きは被削材寄りに向うことがわかる。このことは切込みの増加に伴い、直線刃部における作用部分が増し、前述したようなノーズ部の影響が次第に薄れることを示している。送りの増加に対しては切込みが大きくなるとむしろほとんど向きの変化は見られない。ただ、切込

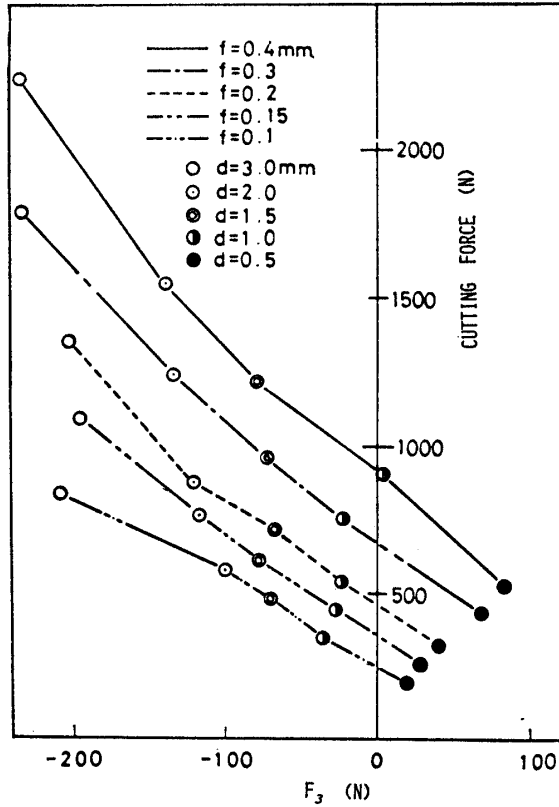


Fig.6 Behavior of tool force vector in the  $(F_3, F_1)$  plane

みが 0.5mm および 1mm の場合については、ノーズ半径が 0.8mm であることから、いずれもノーズ部のみによる切削であり、送りの増加に伴ってノーズ部の影響が大きくなるため、切削抵抗ベクトルの向きは工具寄りに向く。この送りの増加に伴うノーズ部の影響について、もう一度 Fig.7 を用いて整理しておく。Fig.7 は送りに対する  $\eta(f)$  (=背分力/送り分力) の値を記したものである。図中、 $\bigcirc \cdots \bigcirc$ 印は Fig.3 に関して述べたノーズ部の作用を除去した直線刃部のみによる切削におけるものである。この場合の  $\eta(f)$  の値は送りの変化に対して一定である。ところが、通常の 3 次元切削における  $\eta(f)$  の値の変化は切込みが小さいほど大きく、切込みが大きくなるにつれて変化が小さくなる。以上のように、切削抵抗ベクトルの向きに対するノーズ部の影響は大きい。

3. 切削抵抗変動分について

前節までは切削条件を固定した場合の切削抵抗の時

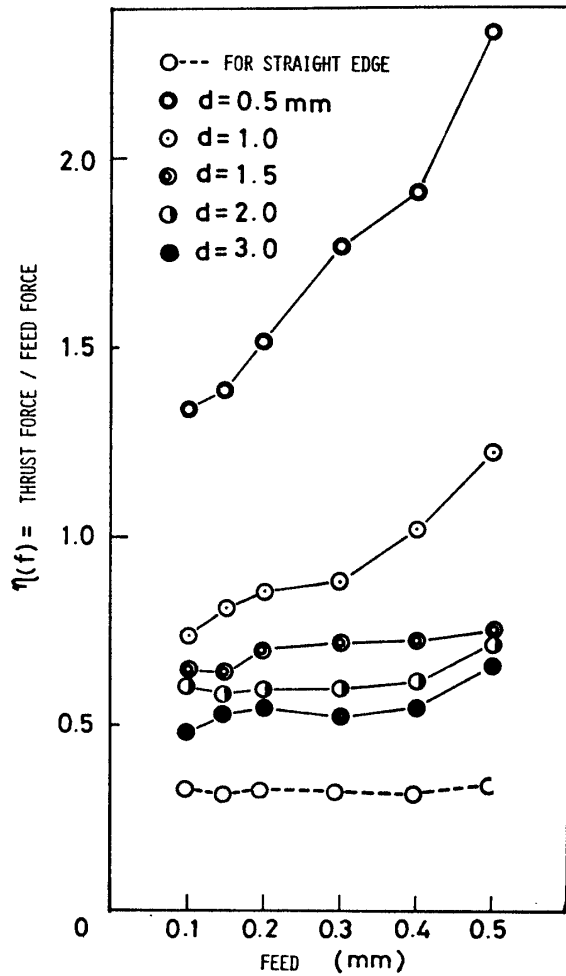


Fig.7  $\eta(f)$  versus feed

間平均値を扱ってきた。本節では切削抵抗の時間的な微小変動について言及する。

切削条件を固定すれば、切削抵抗の時間平均値はほぼ一定と考えられる。したがって、この値は切削抵抗による被削性の評価となるが、これだけでは切削状態に関する大まかな評価に過ぎない。むしろ、切削抵抗の時間的な変動が問題である。例えば、切削時間とともに工具は摩耗するので、これにより切削抵抗は一般に増加する。König および Essel<sup>3)</sup> は 0.325mm のフランク摩耗幅に対して、送り分力について 80% の伸びを観測したことを報告している。したがって、長時間の切削における時間平均は無意味である。この例は時間的にゆっくりした変動に関するものであるが、切削抵抗にはこの他に急激なあるいはむしろ概周期的な(確率的変動を伴うから正確な周期性は持たない。ただし、必ずしも数学的に定義された概周期性を意味するものではない。)微小変動を伴う。この微小変動が切削状態に関するより詳細な情報を含んでいる。例え

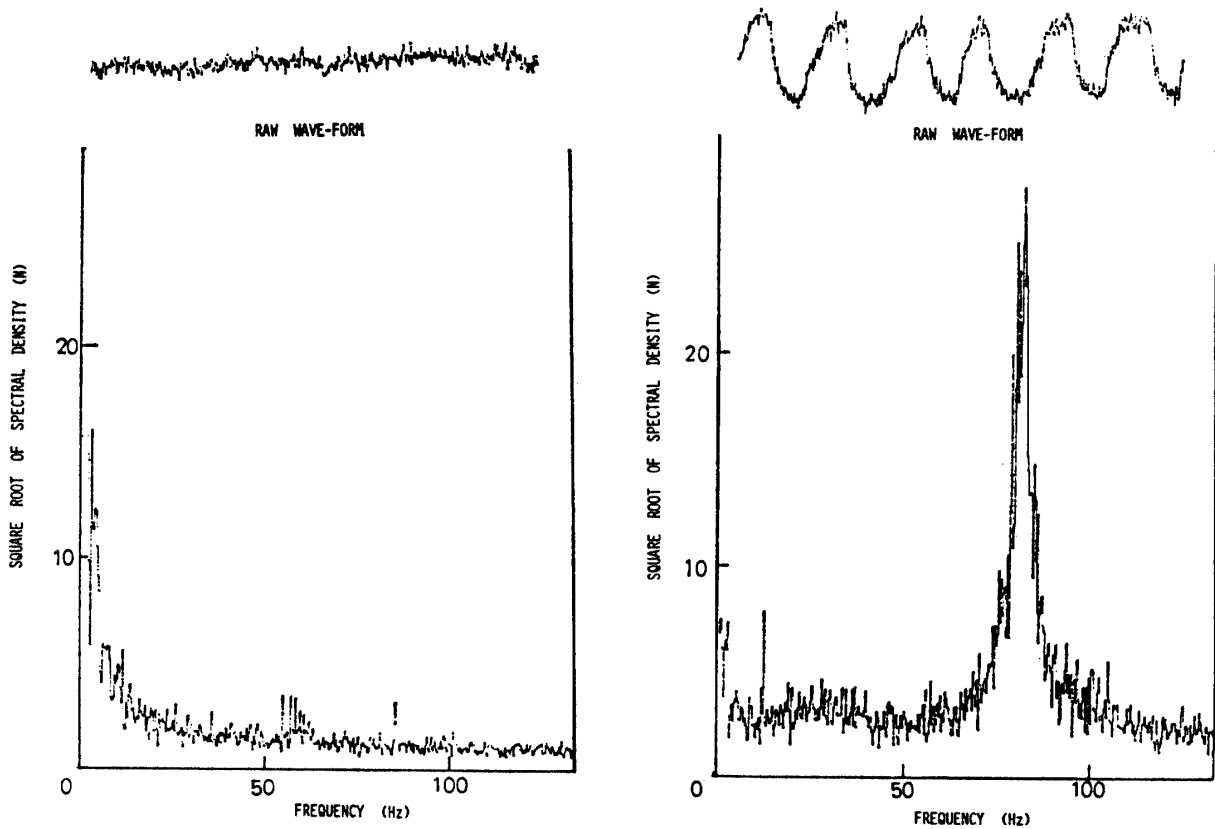


Fig.8 Typical patterns of the power spectral densities of the fluctuation in feed force  
 Fig.8 (a) In case of continuous chip ( $d=2\text{mm}$ ,  $f=0.275\text{mm}$ )  
 Fig.8 (b) In case of effective chip breakage ( $d=2\text{mm}$ ,  $f=0.45\text{mm}$ )

ば再び工具の損耗に関していえば、切削中の工具には上記の摩滅摩耗の他に偶発的な欠損が生じ得る。この場合、雑音に埋もれて切削抵抗から欠損の発生を検出することは困難なおそれはあるが、切削抵抗に何らかの変化が生じる。これが切削抵抗における急激な変化の1例である。概周期的な変化の例として、ここで取上げる切りくずの成長・破断に伴う変動が挙げられる。

Fig.8(a)および(b)はそれぞれチップブレイカが作用していない場合と有効に作用している場合における送り分力変動分のパワースペクトルを求めたものである。このスペクトルはサンプリング間隔 3 msec での 512 点の標本点を 1 組として 5 組観測し、それぞれの組についてのFFTによるスペクトルを平均することによって求めたものである。図の縦軸は各周波数におけるスペクトル密度の値をさらに開平した値を示している。また、同図(a),(b)各図の上部に変動分の原波形(ただし、サンプリング間隔  $100\mu\text{sec}$  での離散的観測値間を線分をつないで再生したもの)を示す。摩耗していない切刃を用いており、またびりなどの生じ

ない条件下で切削しているので、切りくずが破断されず連続切りくずとして排出されている場合(Fig.8(a))には変動分波形は直線的で、ごくわずかな雑音を伴うだけである。これに対し、有効にチップブレイカが作用し、切りくずの成長・破断が繰返されている場合(Fig.8(b))には、この歯状の増減がはっきり観察され、またスペクトルにおいても 82Hz 付近でピークが生じている。送り 0.3mm では、チップブレイカの作用がまだ不完全で切りくず長さも一定せず、したがって変動分波形の周期および振幅も一定していない。送りの増加につれて、同図(b)に見るように波形もきれいな形になり、また振幅も増大する。同図は送り分力におけるものであるが、各分力についても同様の結果が得られた。

ここで、波形の周期性が切りくずの成長・破断によるものであることを確認する意味で Fig.9 を掲げておく。図中の切りくず破断周波数は、精密天秤により測定した切りくず重量およびその重量を占める切りくず個数と切削条件から得られる 1 秒当りの切りくず重量

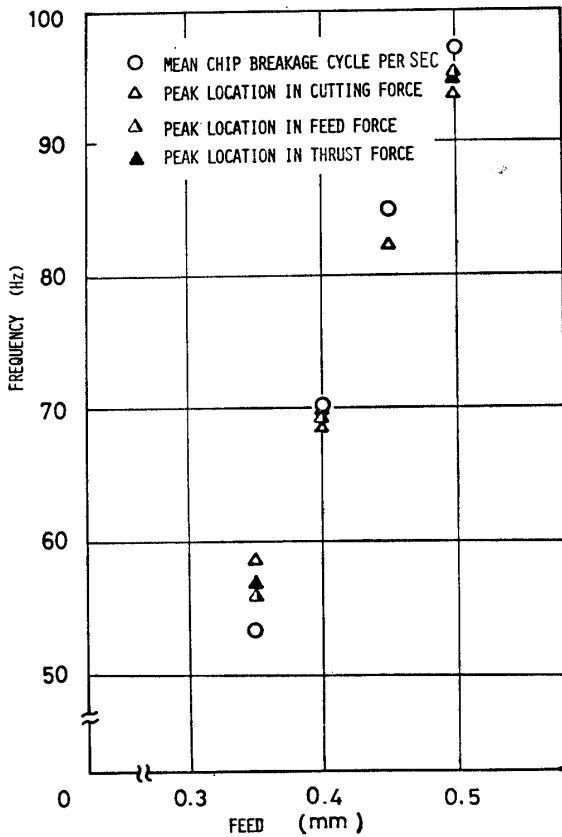


Fig.9 Coincidence between peak locations in spectral densities and mean chip breakage cycles

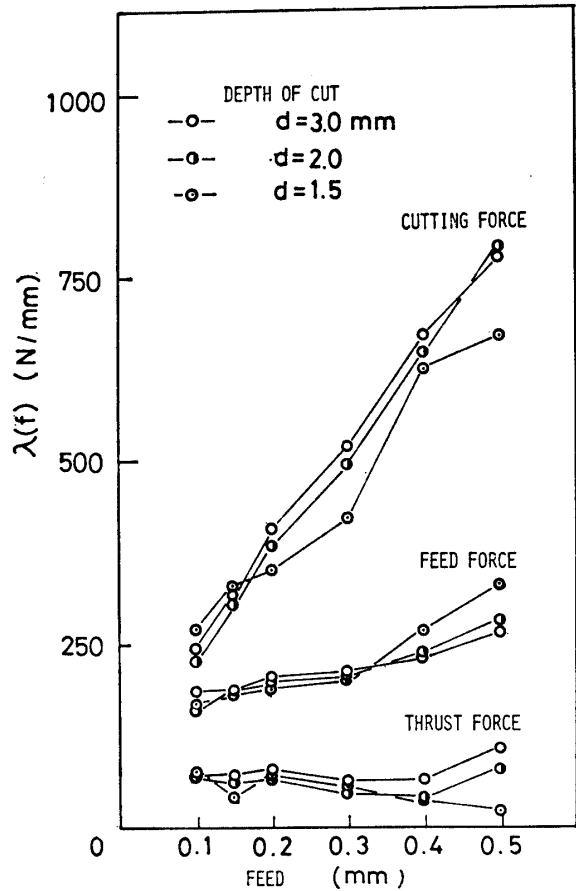


Fig.10 Coincidence of  $\lambda(f)$ 's

とから、比例計算により推定した値である。図中、送り0.45mmにおける送り分力および背分力ピーク周波数については、主成分のそれと完全に一致したため省略した。他の送りにおける各分力のピーク周波数間のずれは、最も高いスペクトル密度の値を選んだことによるものである。スペクトルのパターンはいずれもFig.8(b)に見るように鋭い山を示すが、原波形自体がきれいな三角関数波形ではないので、山は多少の広がりを持っている。

4. 切削抵抗の構成要素分解

前節までに述べたことを基にして、切削抵抗の構成について考察する

用いた工具のノーズ半径は0.8mmであるが、これをほぼ1mmと考えれば、切込み1mm以下\*での切削にはノーズ部のみが関与していることになる。このように考えると、一般に切込み $d$ mm( $>1$ mm)での切

\* 主切削角は15°であるので切込みの1mmと切削幅の1mmとの間に有意な差はない。

削はノーズ部(切込み1mmに相当)による切削と( $d-1$ )mmの直線刃による切削とから成立していることになる、これら二つの成分に分けた場合、果して( $d-1$ )mmの直線刃部による切削は、切削抵抗の意味で、純粋に( $d-1$ )mmの直線刃による切削と等価と考えてよいかどうかについて検討するため、次のような処理を施した。切込み $d$ mm( $>1$ mm)の切削における切削抵抗 $P_d$ から切込み1mmにおける切削抵抗 $P_1$ を差し引いた値を $Q$ とおく。(この操作は各分力について行うが、同じ操作なので記号的な区別はしないでおく。)すなわち、

$$Q = P_d - P_1$$

さらに、

$$\lambda = \frac{Q}{d-1}$$

とおけば、この値は直線刃部単位長さ当りに加わる切削抵抗の値を表わす。また、この値は送り $f$ によっても異なるので、 $\lambda$ の代わりに $\lambda(f)$ なる記号を用いることにする。各切込みと送りに対して、各分力における $\lambda$

( $f$ )の値を求めた結果を Fig.10に示す。 $\lambda(f)$ の値は、各分力ごとに、送りの増加に対して1本の直線にのっている。このことから、

- 1) 切削抵抗の大きさは、ノーズ部による切削抵抗の値と直線刃部による切削抵抗の値の和で表現できる。すなわち、加法性が成立する。
- 2) 送りの増加に対する切削抵抗の変化における非線形性はおもにノーズ部によるものである。

ことが理解できる。

上記の結果を一般化すれば、切削抵抗時間平均値に関して次式が成立する。

$$F_i(f, d) = R_i(f, d) + (d-r)\lambda_i(f), \quad d \geq r$$

ここに、 $F_i$ : 切削抵抗

$i=C, F, T$ : C, F, Tはそれぞれ主分力, 送り分力, 背分力に対する添字

$R_i$ : ノーズ部による切削抵抗 (非線形成分)

$\lambda_i$ : 直線刃部単位長さ当りの切削抵抗

$d$ : 切込み

$f$ : 送り

$r$ : ノーズ半径

上記の式は切削抵抗時間平均値に関するものであるが、切削抵抗の時間的挙動にはこの他に、摩耗による抵抗の増加および切りくず破断に要する力さらに種々の雑音などが加算されることはすでに述べた通りである。

## 5. む す び

切削抵抗はこのように種々の情報を含んでおり、さらに種々の条件下での分析を試みることによって、非常に多くのことを検知し得るものと思う。

第2節脚注で述べたように、切りくず流出角は $\gamma$ の値が増加するにつれて減少する。すなわち、より被削材寄りに向く。切削抵抗ベクトルの向きが切込みの増加とともに被削材寄りに向うということを述べたが、切削抵抗ベクトルの向きと流出角の間には対応関係が存在するはずであり、切込みの増加に対する両者の

挙動が類似しているのは当然のことと思われる。切りくず流出角および切りくず形状(カールの仕方など)とより直接的な対応関係にあるのは、切削抵抗変動分ベクトルの向きであろう。今回は十分なデータが得られなかったが、切込み2mmの場合送り0.35mmのときの送り分力変動分振幅に対する背分力変動分振幅の比は平均0.4, 送り0.4~0.5mmのときのそれらは平均0.5程度で、送りが大きくブレーカの効きがよりよい条件下では、変動分ベクトルの向きはやはり被削材寄りを向く。この点も切りくず形状と関連しているものと思われる。

以下に今回得られた結果を整理しておく。

- 1) 切削抵抗時間平均値の挙動における非線形性はおもにノーズ部によるものである。
- 2) 切削抵抗はノーズ部による切削抵抗と直線刃部による切削抵抗の和として与えられる。(加法性)
- 3) 切削抵抗変動分の時間的挙動はチップブレーカの効き具合をよく反映している。
- 4) 上記の結果を基にして、切削抵抗の構成要素分解を試みた。

終りに、実験に際して有益なご助言とご配慮をいただいた本学生産機械工学教室・北川亮三助教授に謝意を表します。また、被削材は東芝タンガロイ株式会社に提供していただいた。お礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) G. Boothroyd: Fundamentals of Metal Machining, Edward Arnold, London (1965) p.133
- 2) L. Reinhart: Ph.D. Dissertation, University of Massachusetts (1973)
- 3) W. König und K. Essel: Arch. Eisenhüttenwes., 47, No.10, pp.641-646 (1976)
- 4) C. Bingham, M.D. Godfrey and J.W. Tukey: IEEE Trans. Audio and Electroacoustics, Vol. AU-15, No.2, pp.56-66 (1967)

(昭和53年10月14日 受理)