

旋削時自励振動の発振後の挙動について

Behavior of the Self-Excited Vibration in Cutting after the Onset

佐藤 壽 芳*

Hisayoshi SATO

旋削時自動振動の発振後の挙動について、その研究の意義をのべる一方、多重再生効果の考え方を導入して多くの現象が説明できることを示している。すなわち、工具と被削材が分離すること、切屑が短かく切断されること、被削材に残される“びびりマーク”の特徴、切削力と振動変位のリサージュ図の特性、切削速度の変化に対する振動の挙動、切削断面積と振動変位の関係等の諸現象についてその性質が明らかにできることをとりまとめている。

1. ま え が き

切削に関する自励振動の問題は、Arnold¹⁾によって初めて系統だった研究論文として報告されたといっている。したがって、研究課題として古くから問題とされていることになるし、近代の工作機械の原型が、18世紀後半に生まれていることを考えれば、機械加工の現場では、はるかに以前から現象として気付かれていたものと思われる。その後、1950～60年代に、自励振動が発生するときの発振限界の観点から、その機構を明らかにしようとする研究が Tobias, Tlusty, Doi 等によってすすめられた^{2)～4)}。

この結果、切削時の自励振動の発生は

- 1) 切削剛性、切削点近傍の機械構造の振動特性、再生効果などを要素とする系の安定性の問題に帰着すること
- 2) これによって、いかなる切削速度に対しても自励振動を生じない安定な領域と、切削速度によっては、自励振動が発生する領域とが存在すること
- 3) 切削力が振動速度に比例するとするペントレーション効果や、工具逃げ面と接する被削材部分の弾塑性特性に基づき、振動速度に比例する減衰力が働くこと等の考え方を導入して、低い切削速度で安定な領域が拡大すること

等の点が明らかにされた。

この過程で、工作機械の受け入れ検査に関連し、自励振動の発振限界の特性を仕様と盛りこむことを意図した研究計画を米国防空軍が支援し、加振装置や測定装置の開発がすすめられた。また、自励振動発生時の安定限界について、自動制御の手法を導入し、ブロック線図を用いた

定式化によって特性を明らかにできることが Merritt⁵⁾によって示された。この研究によって、特に新しい結果が明らかにされたものではなく、仕様をきめるという当初の目的も達成されたわけではなかったが、従来の考え方により明快な指標を与えたものといえる。

安定に切削しようする限界を明らかにしようとする研究は、工作機械の性能向上、加工能率の向上、加工条件の限界の認識等の観点から、今後とも有意義なものである。しかし、仕上げ加工では自励振動が生じないようにしているのは当然のこととして、粗加工や加工部品の機能面から許容しようする場合には、自励振動が発生していても加工がおこなわれていることも少なくない。生産技術上は、加工継続の可否を判断するために、振動振幅を予測できることが望ましい。

しかしながら、安定限界に関する解析のみでは、発振後の振動が有限振幅で持続することについての説明はできない。筆者らは振動現象をより深く理解しようとする観点と、これにもとづく効果的な防振策の開発や安定限界解析自体への寄与、振幅予測による生産技術上への貢献等を期待して、発振後の挙動に関する研究をすすめてきた^{6)～9)}。本稿では、これらの研究によってえられた知見について、当面のとりまとめを試みることにする。

2. 多重再生効果

切削時自励振動の発振後の挙動に関する取り組みは、加工の観点からは重要性が等閑視されたため、近藤等の研究⁹⁾が最初である。Hanna ら¹⁰⁾、Savaranja-Fabris ら¹¹⁾の研究はその萌芽ともみられるが、在来の安定限界の研究に非線型の剛性の導入を試みたに止まっている。そ

* 東京大学生産技術研究所 第2部

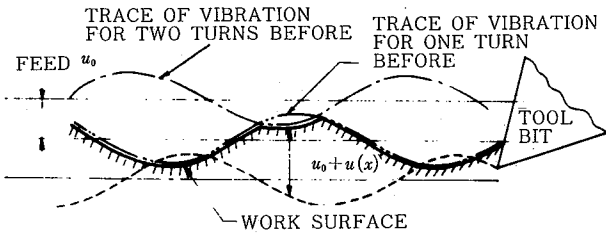


図1 多重再生効果の概念図

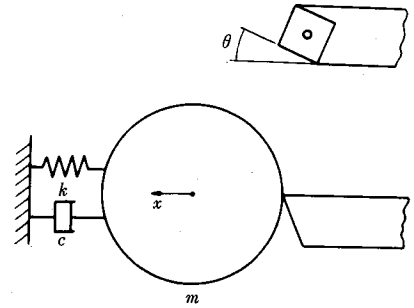


図2 振動系モデル図

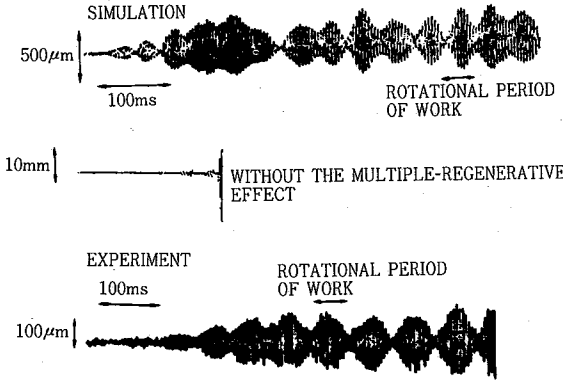


図3 実験と解析の振動波形の比較

給されて発生するが、振幅が十分成長した後におこる多重再生効果の現象で、工具と被削材の分離、切屑厚さの変化等の現象によって振動エネルギーは散逸し、供給されるエネルギーと均衡を保ったところで、有限の振幅で振動が持続することになると理解される。

図1に示される被削面の粗さを工具の運動方向に測定したとすれば、自励振動の波長とは関係のない波長成分が入ってくることになる。このことはその時点では理由が明確でなかったが、自励振動後の被削面について、周方向の高速粗さ測定を試みた三井ら¹⁴⁾によって指摘されていたし、その後と同様な被削面の2次元粗さ測定を試みた内田ら¹⁵⁾の結果によっても指摘されていた。

旋盤作業を例にすると、振動が主として被削材に生ずる場合と、工具に生ずる場合とがあげられる。工具に生ずる場合、振動数が高いのが通常である。以下では振動数が数百 Hz であり、工具の場合よりも観測が容易な被削材が主として振動する場合を対象としてのべる。まず、運動方程式において多重再生効果のはたす役割を明らかにしておく。これまでの例にならない振動系を単純化し⁶⁾、背分力方向の振動成分のみに注目した形で解析を試みている。図2はこの振動系のモデル図である。切削抵抗は背分力に対しても切屑厚さに比例するものとした。また切屑厚さに関連する工具形状としては、横切れ刃角 θ を考慮した形で振動系を考えている。

運動方程式は

$$\ddot{x}(t) + 2\omega_0 \zeta \dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = \omega_0^2 \gamma \Delta u \sin \theta \quad (1)$$

ここで ω_0 : 固有円振動数, ζ : 減衰定数, $\gamma = h/k$, h : 切削剛性, k : 被削材剛性, $x(t)$: 被削材水平方向振動変位で、工具からはなれる方向を正, Δu : 横切れ刃面に直角方向に計った切屑厚さの変動分, θ : 横切れ刃角等である。ここで Δu は、多重再生効果を考えた場合、

$$\begin{aligned} \Delta u = & \min \{ x \{ t - (60/\Omega) \} \sin \theta, \\ & f_0 \cos \theta + x \{ t - 2(60/\Omega) \} \sin \theta, \\ & 2f_0 \cos \theta + x \{ t - 3(60/\Omega) \} \sin \theta, \\ & \dots \dots \dots \\ & (n-1)f_0 \cos \theta + x \{ t - n(60/\Omega) \} \sin \theta \} \\ & - x(t) \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

の後、Tlustý ら¹²⁾は、フライス削りを想定して、2自由度数の時刻歴計算をすすめ、発振後も有限振幅で振動が持続することを明らかにしたが、多重再生効果の概念には言及していない。

近藤らは、自励振動が被削面に残した振動痕、いわゆる“びびりマーク”の観察から、再生効果が1回転前ばかりでなく数回転前まで及んでいることを見だし、これを多重再生効果と称している⁶⁾。そして、最も簡単な場合として、図1のようにモデル化しうることを提示している。これは、従来の安定限界を考えるモデルにおいても、振幅が十分大きくなった場合を想定すれば、当然おこることが考えられる簡潔なものである。すなわち、被削面には2回転前に削られた軌跡が残り、これがない単なる再生効果の場合と比べれば、切屑厚さがこの部分で小さくなり、切削力が変化すると考えられる。また、この軌跡が残される過程は、現回転の工具運動が被削材からいったん離れることによっていることがわかる。

この結果、切屑はつながらずに分離したものとなることが指摘できるが、実際、これは自励振動発生時に度々体験されていることである。この現象は中川ら¹³⁾によって金属短繊維の製造に巧みに利用されている。工具が被削材から離れる現象も、その後の研究においてくり返し観測、確認されている。振動振幅からはこの分離の確認は容易ではないが、分離確認の工夫をすればもちろん、切削力を測定すれば分離時に零となることから検知できる^{6),7)}。自励振動は切削自体によって振動エネルギーが供

と書ける。ここで $\min[\]$: 最小値を表す記号, f_0 : 定常送り, Ω : 主軸回転数, n : 何回転前かを表す数等である。 $n=1$ とすれば $[\]$ 内の第一項のみが残り, 再生効果を表すことになる。

図3は(1), (2)をルンゲ・クッタ・ギル法で解いた変位振動波形, 実験によって求められた変位振動波形を並べて示したものである。中段は, 安定限界を抜く過程で考えられた再生効果のみ, $n=1$ とした場合の方程式の解であり, 発振後振動波形は直ちに発散していることがみられる。一方上段は, 多重再生効果を考慮した場合の解であり, 自励振動の振動数が回転数で変調された波形となって持続している。これは, 下段に示した実験による被削材の水平方向の変位振動波形と定性的によく似た形となっており, 自励振動発振後の挙動が, 基本的に多重再生効果によって説明できることを示している。

3. 振動の挙動と切削痕の特徴

自励振動が発生すると, 被削面には“びびりマーク”といわれる特徴的な痕跡が残される。その痕跡の特徴は切削条件によって多様に変化するが, 図4はその典型的

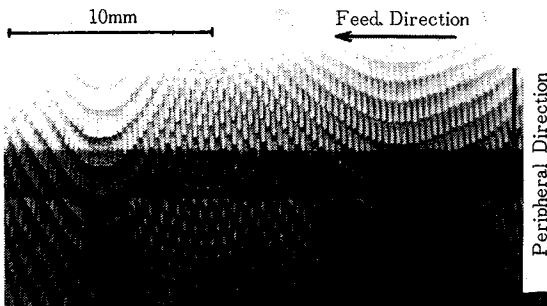


図4 振動痕“びびりマーク”の例

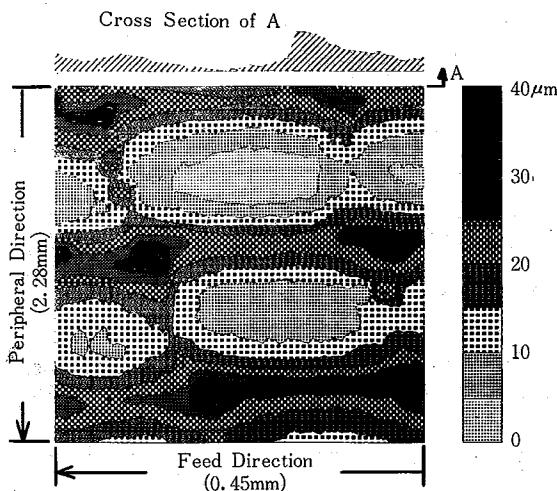


図5 左下がりに見える振動痕の等高線

な例である。図の例では送り方向に左上がり, 左下がり, これらの交差の状態があることがみられる。加工の現場では, このような痕跡が生じることは古くから知られていたであろう。しかし, 解析的な側面からは, 振動現象の位相特性との関連で左上がりの特徴のみが指摘されていた^{16),17)}。最近になって, 被削面上で振動軌跡を考えたとき, 再生効果にともなう1回転前の軌跡との間に起因する位相特性との関連で, これら痕跡の特徴を説明する試みもあるが¹⁸⁾, 多重再生効果の観点はなく, 十分にその特徴を説明できているとは言い難かった。筆者らは, 独自に開発した方法¹⁵⁾による被削面の形状測定の結果と合わせ, その特性を明らかにすることを試みている⁷⁾。

図5は, 図4で左下がりとなっている部分の2次元表面粗さを測定し, 等高線表示としたものである。これによると, 振動軌跡の最大値にたいしてできた, 凹みの部分の送り方向への連なりが左下がりとなっており, 振動痕の特徴が左下がりとなっていることと対応している。図6はこのときの切削条件を考慮し, 図5の特徴を峰, あるいは尾根の部分で線で抽象化したものである。この図において送り量はFG間の水平長さにあたっており, FGの傾きは1回転後に創成される振動の痕跡と送り量によってきめられる。同一回転上で振動の軌跡をたどると, $\square ff'g'g$ の痕跡が創成された後には, gg' に垂線をたて1, 2との間にできるBB'に次の痕跡が創成される。このときgBは, 被削材の径, 回転数, 自励振動の振動数からは決まる振動の波長となる。

$\square ff'g'g$ が創成された後, 被削材が1回転してきて創成される振動痕は $\square ee'f'f$ である。1回転前の振動軌跡との間に生ずる位相, すなわち, 空間位相にもとづく位相おくれ量は, たとえば gg' の線でみた当該回転での振

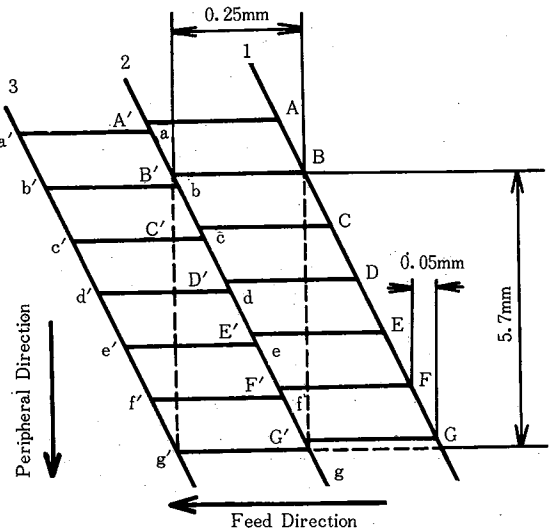


図6 図5から抽出される特徴

動波形と1回転後の振動波形の間の位相である。従来はこの位相特性によって左上がりの振動痕が創成されると理解されていた面があるが、左上がりか左下がりを決めるのは g が G より上にあるか下にあるかであり、これは上にみた空間位相の特性とは無関係であることが理解される。しかし、自励振動の振動数にわずかな変化があれば、空間位相の多少の変化には関係なく、 g が G' より上になって左上がりの特徴に容易に変化しうることが明らかである。実際、表面形状を創成するシミュレーションの結果では、振動数を 198.4 Hz とするとき、0.0655% の振動数の変化に対して左下がりから左上がりに変化することが示されている。ちなみに、この場合、直径 42 mm、回転数 600 rpm を仮定すれば、空間位相は 57.61° から 8.05% の変化となる。

図4の振動痕は、突き出し長さ 300 mm、チャック把持の片持ちで切削された結果である。このとき振動数は工具の送りにもなって、210.2 Hz から 209.5 Hz の間で微小に変化していることが確かめられている。また図5に抽出された特徴から、5回転前にさかのぼる多重再生効果の可能性のあることが示されている。

4. 位相特性、振幅特性について

再生効果に関連し、空間位相とよぶ特性があることはすでに指摘した。図7はこれを説明する図である。自励振動時には、これと並んで時間位相とよべるもう一つの位相特性が指摘できる。これは図8に示すような切削力と振動変位との位相特性である。背分力方向について、

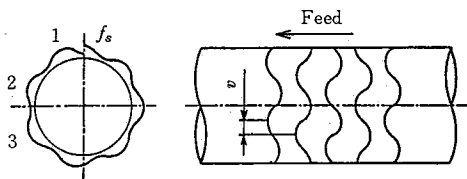


図7 空間位相の説明図

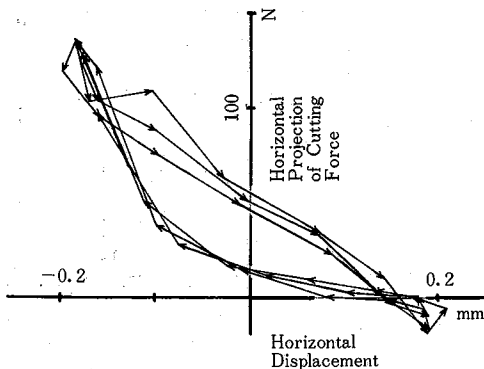


図9 振動変位と切削力のリサージュ図

横軸に振動変位、縦軸に背分力をとってリサージュ図をかかると図9のようになっている。これは、工具と被削材の相対変位が増加する時間領域、すなわち、被削材が工具から離れる時間領域のほうが、被削材が工具にくいこんでいく時間領域よりも切削力大きいことを意味している。このことは、本来切削中にはエネルギーが消費されるはずのものが、供給されることを意味しており、振動が自励的に持続する現象につながっている。切削力には零またはやや負になる部分があり、多重再生効果にもとづき工具と被削材の分離する現象が生じていることも示されている。

図9にみる特性は、すでに Doi ら⁴⁾によって指摘されているが、多重再生効果との関連、以下にのべる振幅特性との関連で、改めて注目している。図10は $\phi 50$ 、長さ 300 mm の黄銅をチャックで片持ちとし、工具に SNMR-431 C を使い、送り 0.05 mm、切りこみ 0.5 mm で切削したときの、切削速度、振動変位、切削力の状況を、横軸に被削材の回転位置をとって示している⁵⁾。この結果から、従来、振動が生じたときには切削速度を小さくすればよい、といわれてきたことは必ずしも当ておらず、この場合では、むしろ振幅が大きくなっていることを指摘できる。また切削速度を増加する過程では、振動を抑制できることが明らかにされている。

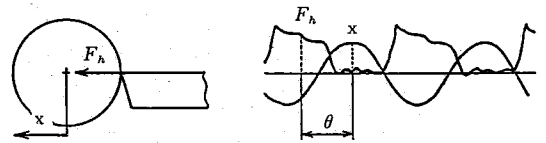


図8 時間位相の説明図

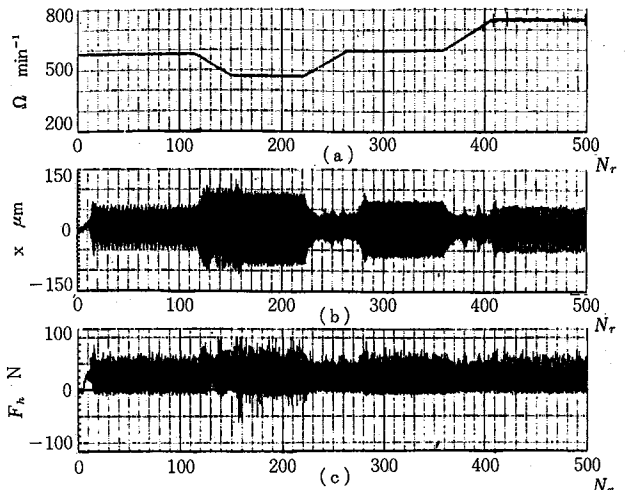


図10 切削速度にたいする振動変位、切削力の挙動

て振動振幅が変化しているが、切削力の振幅はそれほど変化せず、ほぼ一定であることが指摘できる。図 10 における特徴的な個所を、図 9 と同様なリサージュ図として示したものが図 11 である。(a), (b), (c) は、それぞれ、定速時、減速時、増速時に対応している。いずれの場合も切削力はほとんど変わらず、変位振幅のみが増減し、曲線によって囲まれる面積がこれと平衡し、広、狭に変化していることがわかる。

図 12 は図 11(b), (c) と同様な減速時、増速時に対応する振動変位を、1 回転ごとに始まりの時点と合わせ並べて示している。空間位相の特性も表すことになっているが、前者では、速度が小さくなって空間位相が小さくなり、振幅は増大する変化を示している。一方後者では、

増速と共に空間位相は大きくなり、位相が 180° となる近傍で極小となることが示されている。この研究がすすめられた装置では、一定の変化率で切削速度が変更されているから、空間位相を 180° に保つことはなされず、一度抑制された振動も再び大きくなる傾向がみえている。

自励振動が生じたときに、切削速度を変えることによって振動を抑制できることについては、竹村ら¹⁹⁾、稲村ら²⁰⁾の指摘がある。図 10 に示した研究の過程では、切削速度の変化率は一定であり、上記の指摘とは条件が異なっている面もあるが、切削速度の変化が直ちに振動の抑制に結びつくものではないことに注意しておく必要がある。

自励振動、特に被削材が主として振動する系では、背分力のみならず主分力も働くから、より適切な系のモデルは 2 自由度系によって表される。実系の測定結果によれば、被削材の振動変位は図 13 のように反時計まわりの軌跡を描いている。一方主分力、背分力の比率のみを与えて構成した 2 自由度の振動系では、これに対応する軌跡は図 14 に示すような単なる直線となる。一方、1 自由度系の基礎的な解析においては、実験的に確認をした

- 1) 切削速度に逆比例する
- 2) 工具と被削材の背分力の相対速度に比例する

という性質の抵抗力を基本の運動方程式に導入して、自励振動がおこらない安定な領域が、低速切削の領域で拡

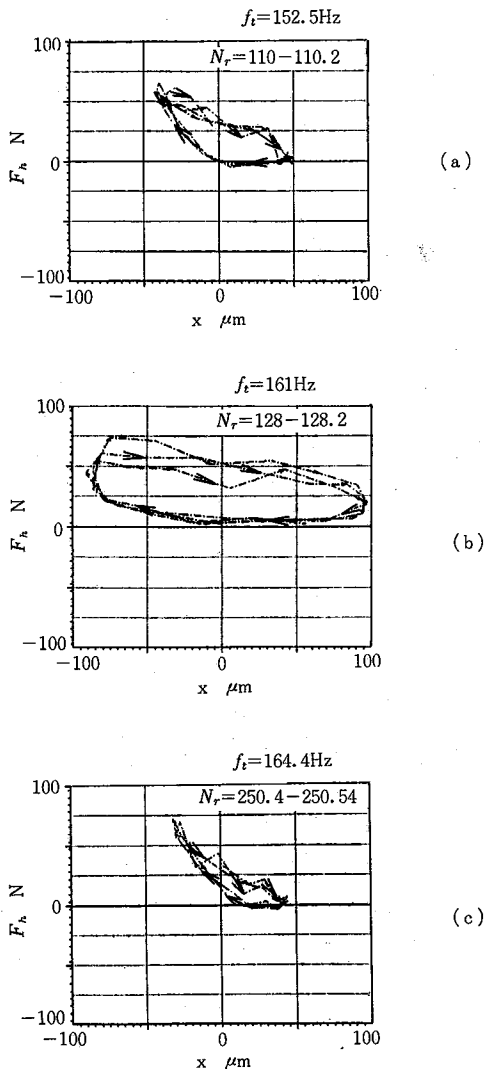
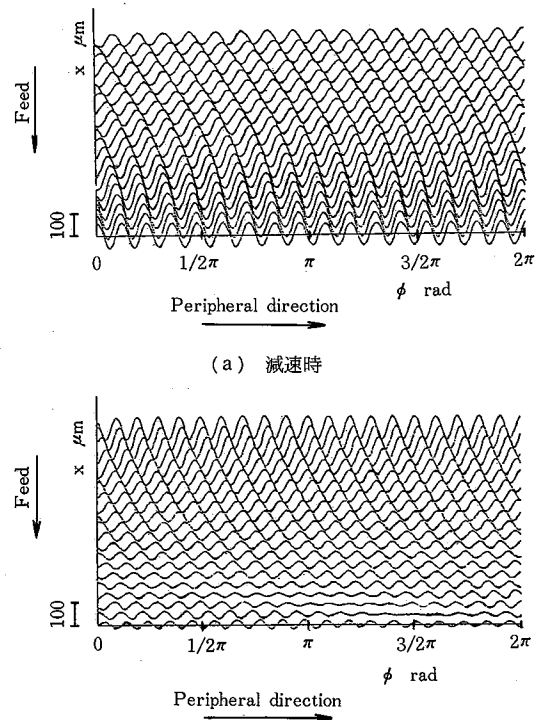


図 11 振動変位の変化とリサージュ図 (a) 定速時 (b) 減速時 (c) 増速時



(a) 減速時

(b) 増速時

図 12 空間位相の挙動

大する事実を説明できることを示していた⁹⁾。このことを考慮し、2自由度系にも同じ抵抗力を導入することにより、図15のように振動変位の軌跡は反時計まわりに回転することが明らかにされている。これは定性的に図13の特徴とよく一致している⁷⁾。上記切削抵抗力導入によるこのような効果は、この解析の過程で新たに指摘されたものといえる。

5. 切削断面積と切削力との関係

自励振動が発生している際に切削速度を変えたとき、振動振幅は増大するが、その割には切削力 F_h は増加しない現象のあることを指摘した。これを解明する過程で、測定された振動変位にもとづいて工具位置を与え、除去されるべき被削材が工具上にあたって占める切削断面積 I_A が、時刻歴の変化として求められた⁸⁾。この結果、切削断面積が切削時と一回転前の工具位置の相対的な差として与えること、また切削断面積の波形は切削力の波形とよく対応すること等が示された。このことは、変位振幅が大きくなっても、切削力はその相対的な差として決まることから、変位振幅には関係なく、ほぼ一定となっているという現象をよく説明している。

しかし、切削断面積を正確に求めようとすると、この過程では計算が複雑になるため、工具刃先半径は無視し、直角の形状をもっているとする、多重再生効果ではなく一回転前の影響を入れた再生効果のみを考慮したこと等现象を単純化していた。大堀らは刃先半径、多重再生効果を考慮し、切削断面積を正確に求めることを試み、その結果が切削力と最もよく対応することを明らかにしている¹⁰⁾。切削断面積を求める過程の詳細は文献にゆだね

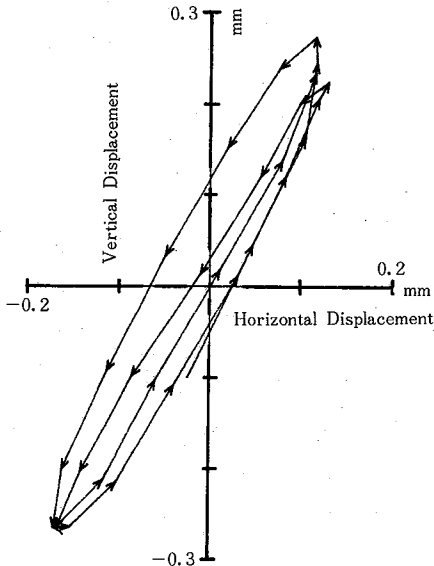


図13 被削材の振動変位軌跡

ねるとして、これを計算する場合わけは、表1のように示される。

これらの場合に対して求められた切削断面積の波形

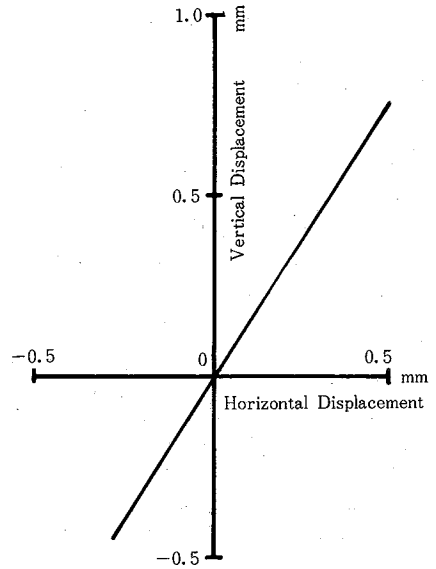


図14 2自由度系モデルの振動変位軌跡
—速度比例の切削抵抗を考慮しない場合—

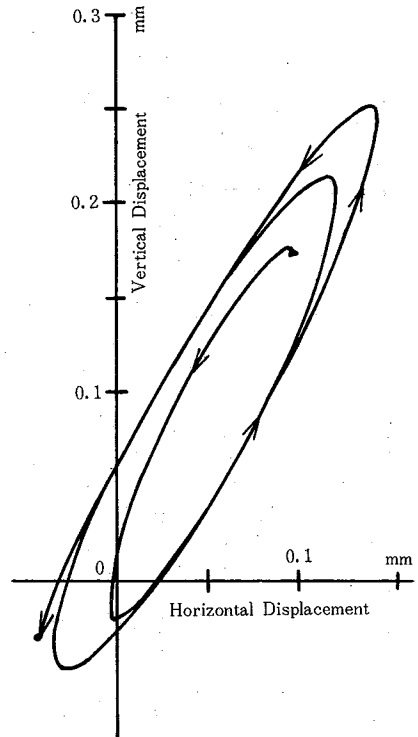


図15 2自由度系モデルの振動変位軌跡
—速度比例の切削抵抗を考慮した場合—

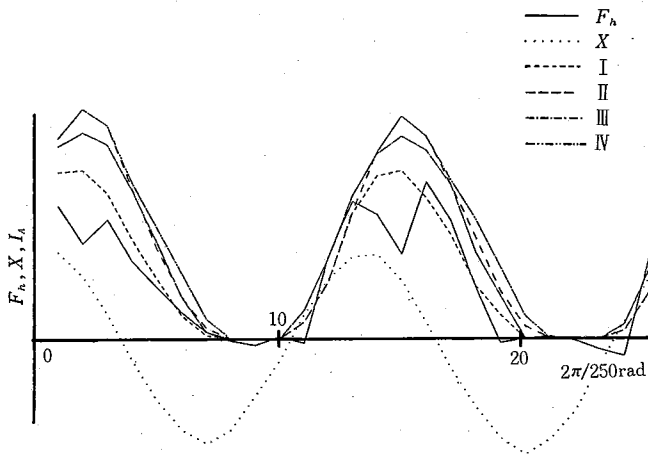


図 16 切削断面積の波形の詳細

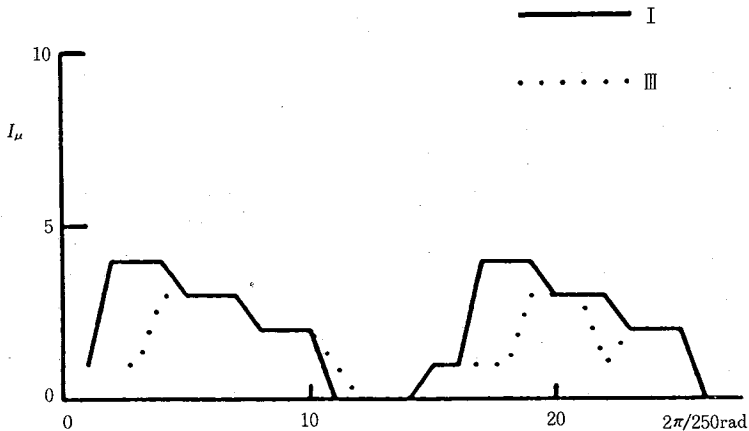


図 17 多重再生効果の回数の時間的变化

表 1 切削断面積計算の場合

| r (mm) | MRE | |
|--------|------|---------|
| | With | Without |
| 0.4 | I | II |
| 0.0 | III | IV |

を、切削力の波形と合わせて示したものが図 16 である。この図の結果だけからでは、どの場合が切削力と最も適切に対応するかは明らかではないが、現実に即した場合である I について、切削断面積は最も小さく評価されている。最大値近傍では多重再生効果を考慮しない場合、刃先半径を無視した場合の順に切削断面積が大きくなっていることがわかる。最大値としては、定常切削時の断面積に対する比として、I については約 3、IV については約 4 となっている。

つぎに、図 17 は切削断面積の波形に対応した多重再生

効果の回数の時間的变化を求めたものである。切削断面積の波形は、振幅の成長時と減衰時にそれほど違いが認められないのに、回数の変化は成長時の立ち上がりが早く、減衰時に小さくなり方がおそいという特性が認められる。またこの図から、刃先半径がある場合に多重再生効果のおこりやすいことがわかる。しかし、現在のところこの回数の特徴を生む機構については明らかでない。

表 1 に示された中で、どの場合の切削断面積を切削力の波形最もよく適合するかを検討するため、波形を構成するデータ個数 M に対して

$$e = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\kappa F_{hi} - I_{\mu i})^2 \quad (3)$$

と表される e を定義し、これを最小にする κ を求める観点から

$$\frac{\partial e}{\partial \kappa} = 0 \quad (4)$$

表2 切削断面積と切削力の適合

| Case | 110 | | 128 | | 250 | |
|------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| | κ | $\frac{e_1}{e_1}$ | κ | $\frac{e_1}{e_1}$ | κ | $\frac{e_1}{e_1}$ |
| I | 7.4 | 1.00 | 5.6 | 1.00 | 6.7 | 1.00 |
| II | 9.5 | 3.33 | 5.8 | 1.15 | 8.6 | 2.61 |
| III | 9.1 | 1.92 | 6.8 | 1.90 | 8.2 | 1.52 |
| IV | 9.9 | 3.02 | 6.8 | 1.90 | 9.0 | 2.26 |

を満足する κ を求めることを試みている。このときの e を併せて求めた結果が表2である。被削材の回転位置Nについては、回転数が一定で自励振動の振幅も一定である場合、回転数を減少させ、振幅が増大しつつある場合、回転数を増加させ、振幅が減少しつつある場合が対象とされている。いずれの場合についても、実際に即して計算されたIの切削断面積が、最もよく切削力に適合している。

6. おわりに

旋削時自励振動の発振後の挙動に注目するとき、種々の特性を多重再生効果の考え方を導入して説明できることが、筆者らの最近の研究によって明らかになってきた。本稿では、明らかにされた諸点について概観することを試みた。これまでのところ、これらの成果が切削加工の応用面に直接貢献するには至っていないが、切削剛性の評価への展開、自励振動の発振限界への寄与を含めて、自励振動全体像の理解とこれによる加工技術向上等をはかれることが期待される。しかし、これらの問題の進展をみるには、解決されるべき問題も少なくなく、これらに今後とも関心が寄せられることが望まれる。

(1985年8月16日受理)

参考文献

- 1) R. H. Arnold: The Mechanism of Tool Vibration in the Cutting of Steel, Proc. IME, Vol. 154, 1946, 261-284
- 2) S. A. Tobias and W. Fishwick: The Vibration of

- Radial-Drilling Machines under Test and Working Conditions, Proc. IME, Vol. 170, 1956, 232-264
- 3) J. Tlustý: A Method of Analysis of Machine Tool Stability, Proc. 6th MTDR, 1965, 5-14
 - 4) S. Doi and S. Kato: Chatter Vibration of Lathe Tools, Trans. ASME, 78-5, 1956-7, 1127-1134
 - 5) H. E. Merritt: Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter, Trans. ASME, 87-4, 1965-11, 447-454
 - 6) 近藤, 河野, 佐藤, 駒崎: 多重再生効果を考えた自励振動の挙動について, 機論, 46-409, 昭55-9, 1024-1032
 - 7) 金子, 佐藤, 谷, 大堀: 旋削時自励振動と被削面の振動こんについて, 機論C, 50-454, 昭59-6, 961-968
 - 8) 笠原, 佐藤: 切削時自励振動の挙動と位相特性について, 84-0531 B, 機論C, 51-465, 昭65-5, 1141-1146
 - 9) 大堀, 佐藤, 谷, 孫: 旋削時自励振動の切削断面積と切削力について, 機論投稿中
 - 10) N. H. Hanna and S. A. Tobias: A Theory of Non-linear Regenerative Chatter, Trans. ASME, 96-1, 1974-2, 247-255
 - 11) N. Savaranja-Fabris and A. F. D'Souza: Nonlinear Stability Analysis of Chatter in Metal Cutting, Trans. ASME, 96-2, 1974-5, 670-675
 - 12) J. Tlustý and F. Ismail: Basic Nonlinearity in Machining Chatter Annals CIRP, 30-1, 1981, 299-304
 - 13) T. Nakagawa, K. Suzuki, T. Uematsu, and H. Koyama: Production of Fine Short-Length Metal Fibers Using Self-Excited Vibration of an Elastic Tool, Proc. 23rd MTDR, 1982, 323-330
 - 14) 三井, 佐藤: 表面あらさの実時間測定に関する研究, 機論 44-377, 昭53-1, 321-329
 - 15) 内田, 佐藤, 大堀: 光切断法による二次元表面粗さ計測に関する研究, 機論, 46-407, 昭55-7, 771-779
 - 16) 大野: 円筒研削における自励振動の研究, 機論 35-276, 昭44-8, 1797-1805
 - 17) 星: びびり現象, 昭52, 34, 工業調査会
 - 18) T. P. Tai, Y. C. Yang, Y. C. Hwong, and C. H. Ku: A New Concept of Cutting Marks Formation in Metal Cutting Vibration, Proc. 20th MTDR, 1979, 449-456
 - 19) 竹村, 北村, 星: 主軸回転速度変動によるびびり振動の防止, 精機, 41-5, 昭50, 489-494
 - 20) 稲村, 佐田: 変動主軸回転数下の切削系の安定解析, 精機, 43-1, 昭52, 80-85

