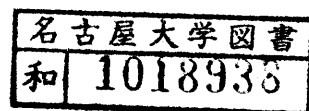


目・次

旋盤作業における被削材のびびり 振動の発生に関する研究

昭和62年9月



川 合 忠 雄

目 次

記号および用語	1
第1章 緒論	3
第2章 被削材の再生びびり振動の発生	8
2. 1 まえがき	8
2. 2 運動方程式	9
2. 3 実験装置および実験方法	10
2. 4 実験結果および解析結果	11
2. 4. 1 被削材の振動特性	12
2. 4. 2 切削力の静特性	12
2. 4. 3 びびり振動の発達過程	13
2. 4. 4 被削材に衝撃を加えた場合の結果	15
2. 5 まとめ	16
第3章 工具のすくい角が正の場合に被削材の びびり振動に及ぼす工具形状の影響	33
3. 1 まえがき	33
3. 2 実験装置および実験方法	34
3. 3 実験結果および考察	34
3. 3. 1 切削力の静特性	35
3. 3. 2 振動の発生条件	36
3. 4 まとめ	39
第4章 工具のすくい角が負の場合に被削材の びびり振動に及ぼす工具形状の影響	52
4. 1 まえがき	52
4. 2 実験装置および実験方法	52
4. 3 実験結果および考察	53
4. 3. 1 切削力の静特性	53
4. 3. 2 びびり振動の発生原因	55
4. 4 まとめ	58

第5章	工具と被削材が部分的に離れる場合に	
	被削材のびびり振動に及ぼす工具形状の影響	67
5.1	まえがき	67
5.2	実験装置および実験方法	67
5.3	実験結果および考察	68
5.3.1	工具による相違について	69
5.3.2	振動特性の変化について	70
5.3.3	振動の発生原因について	71
5.4	まとめ	74
参考文献		84
謝辞		92

記号および用語

b : 被削材の板厚

c : 振動系の平均減衰係数

c_{ξ} , c_{η} : ξ , η 方向の減衰係数

d , \dot{d} : 切込み深さおよび切込み深さの変化速度

d_0 : 旋盤の送り (前後送り)

ds : びびり振動が発生する切込み深さ

de : びびり振動が消滅する切込み深さ

E : 振動系に加わる全エネルギー (切削力によって加わるエネルギーから減衰によって失われるエネルギーを引いた残り)

Es : 振動系の持つ弾性エネルギーと運動エネルギーの和

F_x , F_y : 背分力および主分力

f_x , f_y : 背分力および主分力の無次元量

k : 振動系の平均ばね定数

k_{ξ} , k_{η} : ξ , η 方向のばね定数

lc : 切り屑の刃物すくい面上での接触長さ

m : 被削材の質量

n : 振動系の平均減衰係数 (無次元量)

N : 被削材の回転数を表す整数

$O - x y$, $O - \xi \eta$: 静止直交座標系

p : 振動系の固有振動数

r : 工具刃先の丸み半径

t : 時間

tc : 切り屑厚さ

T : 被削材の 1 回転に要する時間

V_0 : 切削速度

x , \dot{x} : 水平方向 (背分力方向) の被削材の変位および速度

x_0 : 定常切削時 ($d = d_0$) の被削材の水平変位

y , \dot{y} : 鉛直方向 (主分力方向) の被削材の変位および速度

y_0 : 定常切削時 ($d = d_0$) の被削材の鉛直変位
 z : 左右方向 (送り分力方向) の変位
 α : $O - \xi \eta$ 座標系と $O - x y$ 座標系のなす角で x 軸から ξ 軸を反時計方向に測った角 $\angle x O \xi$ を正とする.
 ξ, η : 被削材の自由振動の基準座標
 θ : 被削材の回転角
 σ : 工具の刃先が切り屑に及ぼす垂直応力
 τ : 工具の刃先が切り屑に及ぼすせん断応力
 ψ : 切り屑の流出角

第 1 章 緒 論

旋盤，フライス盤等の工作機械が発明されて以来，加工精度，加工能率の向上を目指して多くの研究や開発が行われ，今日に至っている．これらの研究の過程で加工精度，加工能率の向上を妨げる大きな問題としていつもびびり振動の発生が取り上げられてきた．このびびり振動とは，被削材，工具あるいは工作機械が振動して，被削材表面にびびり痕と呼ぶ振動痕が残る現象である．びびり振動は（1）一度発生すると，時間とともにその振幅が大きくなるので作業を続けることを困難にする（作業の中断），（2）びびり痕によって加工面性状を劣化させる（加工面の劣化），（3）振動を避けるために，単に加工能率の点からだけ考えて切削条件を決めることができない（切削条件の制約），（4）振動によって工具の損耗が激しくなる（工具の損耗），等の影響を与えるので，これを適切に防止することが望まれる．

びびり振動については以下に挙げるいくつかの観点からの研究が特に重要である．第一に，びびり振動とはどんな現象であるのか．研究を始めるに当たって，びびり振動の特徴を実験によって十分に把握することが大切である．工作機械が使われ始めた頃は，この振動が，自励振動であるのか，工作機械の不具合によって生ずる強制振動であるのかを区別することが大切であった．多くの種類の工作機械において，種々の切削条件で発生するびびり振動をその特徴によって分類することが必要である．しかし，測定および実験の困難さのために現在までのところ，この分類は不十分にしか行われていない．第二に，振動の発生原因は何か．びびり振動は，被削材あるいは工作機械の振動ではあっても，切削という複雑な現象を伴うために，その発生原因を特定することが困難である．現在までのところ，切削力の動特性や振動系の連成の効果によって振動が発生すると考えられている．第三に，どの条件で振動が発生するのか．実際に被削材を切削する場合には，びびり振動が発生する切削条件を知り，この条件を避けて切削することが重要となる．このため，いくつかの仮定のもとに運動方程式を立て，発振限界を推定する研究が行われてきた．第四に，振動に影響を及ぼす因子は何か．びびり振動を十分に把握するためには，切削速度，切込み深さ，振動系の連成等がびびり振動にそれぞれどのような効果を与えるのかを明らかにする必要がある．特に，

振動の発生原因と強く結び付いている因子が何であるのかを明らかにすることが重要である。

本論文ではこれまでまだ十分には研究されていない、びびり振動が発生し、発達する切削初期の振動現象をマイクロコンピュータを用いた測定装置および高速度カメラを用いて詳細に測定した。得られた実験結果と運動方程式を数値計算した結果とを比較して、数値解析から振動現象をどこまで明らかにできるのかを検討した。また、切削初期に発生する振動について物理的な考察を加え、その発生原因および振動の特徴を明らかにした。

次に、びびり振動について行われてきたこれまでの研究成果をまとめて示す。研究は主に、(1) 振動現象の解明、(2) 発振限界の推定、という二つの方向に沿って行われてきた。発振限界の推定は、振動現象の解明から得られた切削力の特性および振動系の特性を考慮して行われた。

びびり振動の現象についての解明は、最初、R.N.Arnold⁽¹⁾によって手掛けられた。彼は、切削速度が増加するときに切削力が減少する特性を持つためにびびり振動が発生すると報告した。その後、R.S.Hahn⁽²⁾によって一次びびり、過渡びびり、再生びびりについての詳細な特性が明らかになった。土井・加藤ら⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾は一連の研究を通して、切込み深さの変化に対して切削力の変化が時間的に遅れること、そのために切削状態が不安定になってびびり振動が発生することを実験的に確認した。さらに、P.Albrecht⁽¹¹⁾は切削中にせん断角が自励的に変化するためびびり振動が発生することを報告し、C.J.Hookら⁽¹²⁾は工具と被削材が離れる場合には離れない場合よりもびびり振動の発生しやすくなることを報告した。これらの研究によって切削力の特性にびびり振動を引き起こす原因のあることが明らかになってきた。

以上の実験結果に基づいて、切削力の動特性を仮定して、びびり振動の発生限界が求められた。S.A.Tobiasら⁽¹³⁾は工具が被削材に食い込むときに速度に比例する力が作用すること(Penetration effect)を考慮し、土井・加藤ら⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾、太田・河野⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾は切削力の時間遅れを考慮して発振限界を求めた。近藤ら⁽²⁰⁾は、工具と被削材が離れる場合には多重再生効果が生じて、振動の振幅が抑えられることを明らかにした。この工具と被削材が離れる場合については、切削力の非線形性によって振動が生じやすくなるという近藤ら⁽²⁰⁾とは異なる報告も

H. M. Shiら⁽²¹⁾によって行われた。これに対して、切削力の動特性に振動の発生原因がない場合にも、振動系の連成の効果によってびびり振動の発生することが報告された⁽²²⁾⁻⁽²⁴⁾。このように発振限界を求める多くの研究によって、びびり振動に及ぼす切削力特性、切削条件、振動系の連成の効果が明らかにされてきた。しかし、切削力の動特性を十分に解明できていないために、振動の発振限界を正確に推定することはまだ行われていない。

一方、びびり振動の研究とは独立に、切削機構および切削力の特性についての研究も行われてきた。切削機構は、最初、M. E. Merchant⁽²⁵⁾によって概念的に示された。その後、P. Albrecht⁽²⁶⁾によって切削力に及ぼす刃先の丸みの効果が明らかにされて以来、刃先の丸みは、切り屑の生成や被削材の加工面の性状に強い影響を及ぼすことが分かってきた⁽²⁷⁾⁻⁽³³⁾。さらに刃先の丸みは、切削開始時の切削状態に大きな影響を持つこと⁽³⁴⁾⁻⁽⁴²⁾、びびり振動の発生に関係すること⁽⁴³⁾⁻⁽⁴⁴⁾が指摘されてきた。また工具のすくい面の応力分布等はT. C. Hsu⁽⁴⁵⁾、臼井ら⁽⁴⁶⁾によって実験的、解析的に明らかにされた。B. T. Chaoら⁽⁴⁷⁾、L. DeChiffre⁽⁴⁸⁾はすくい面の効果についてさらに研究を進め、接触面積制限工具(Restricted contact tool)が切削力の低減等に対して有用であることを確認した。

このようにびびり振動が発生しない静的状態での切削機構、切削力特性の研究が進むにつれて、びびり振動現象をより詳細に考える目的で、びびり振動が生じているのと同じ動的切削状態での切削機構、切削力特性を求める研究⁽⁴⁹⁾⁻⁽⁵⁶⁾が始められた。これによって振動時の切削力特性、切り屑の流出状態、せん断角の変化する様子、切削力と切込み深さおよびせん断角の関係等が実験的、解析的に明らかにされてきた。また、D. F. Pearceら^{(57)・(58)}は接触面積制限工具について振動時の切削力特性を求め、接触面積制限工具を用いればびびり振動を低減できることを指摘した。

また最近では、旋盤の各部(チャック、工具台、旋盤本体等)の振動特性⁽⁵⁹⁾⁻⁽⁶⁴⁾およびそれがびびり振動に与える影響を明らかにする研究⁽⁶⁵⁾⁻⁽⁶⁹⁾あるいはびびり振動の早期検出、防止を目的とした研究⁽⁷⁰⁾も行われるようになってきた。

なお、びびり振動に関する研究は、ここに述べた旋盤に関するものばかりではなく、ボール盤、中ぐり盤、研削盤に関しても数多くなされている⁽⁷¹⁾⁻⁽⁷⁵⁾。

以上のようにこれまでの研究成果を振り返ってみると、びびり振動について次の点がまだ明らかにされていないことが分かる。

- (1) 発振限界を推定するときの基礎となる運動方程式の妥当性の実験による確認
- (2) 切削開始時の切削状態とびびり振動の発生との関係
- (3) 切削力の静特性、動特性に及ぼす工具形状（刃先の丸み、すくい角）の効果
- (4) (3) の特性とびびり振動の発生原因との関係

本論文は上記(1)～(4)に関するいくつかの論文をまとめたものである。

以下に各章の内容を要約して示す。本論文では刃先の丸み、すくい角の効果を調べるために2種類の工具を用いた。第2章、第4章では、すくい角 -5° 、逃げ角 5° の工具を、第3章では、すくい角 10° 、逃げ角 6° の工具を、第5章では両工具を用いた。

第2章では、実験結果に基づいて、振動系を表す運動方程式およびその振動特性値を求めた。この運動方程式を実験から得た切込み深さと切削力の関係を用いて数値計算し、実験結果との比較を行った。比較は(1)振動系に微小外乱が加わった場合、(2)振動系に大きな衝撃が加わった場合、について行った⁽⁷⁶⁾⁽⁷⁷⁾。

第3章では切込み深さが変化する切削開始直後の実験結果を用いて切削力の静特性を求めた。これによって切削力の静特性に及ぼす工具刃先の丸みの効果を明らかにした。次に、切込みが深くなるときに発生するびびり振動の特徴を明らかにした。高速度カメラを用いた撮影によって切り屑が発生する状態を観察し、切削力の変動との関係を求めた。振動が発生する切込み深さと収束する切込み深さを求め、刃先の丸み半径との関係を明らかにした。切込み深さと切り屑厚さおよび工具すくい面上の接触長さの関係を求め、切込みが深くなるときの切り屑流出状態のモデルを提案した。このモデルを用いて、第3章で扱うびびり振動の発生原因とその特徴についての物理的な説明を行った⁽⁷⁸⁾。

第4章では、第3章と異なる形状の工具を用いて、切削力の静特性、動特性に及ぼすすくい角の効果を明らかにした。本章の工具の場合にも切込みが深くなる切削初期にびびり振動が発生するので、この振動の特徴および発生原因を第3章の結果と比較しながら考察した。切り屑の流出状態と切削力の変動との関係、刃先の丸みおよびすくい角のびびり振動に及ぼす効果等を明らかにした⁽⁷⁹⁾。

第5章では、被削材の剛性が低く、びびり振動が発生すると工具と被削材が離

れる場合の現象について解明を行った。第3章、第4章で用いた2種類の工具を用いて、その相違点、類似点も明らかにした。実験では、切込みが深くなる時に発生する振動の特徴およびそれと第3章、第4章で得た切削力の静特性との関係を明らかにした。さらに切り屑の変形状態と切削力の関係から振動を引き起こす物理的原因についての考察を行った⁽⁸⁸⁾。

第2章 被削材の再生びびり振動の発生⁽⁷⁶⁾⁽⁷⁷⁾

2. 1 まえがき

旋削時に一度振動を生じると被削材の表面にびびり痕が残る、再生効果のために以後の切削が不可能となることがある。このために従来より再生びびり振動が発振する限界を求める多くの研究がなされてきた。土井・加藤⁽¹⁴⁾、太田・河野⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾は切削力に時間遅れがあるという実験結果を考慮にいれ、またTobias - Fishwick⁽¹³⁾は工具が被削材に食い込むときに速度に比例する力が作用すること(Penetration effect)を考慮にいれ再生効果のあるときのびびり振動の発振限界を求めている。一方、びびり振動が再生効果によってどのような影響を受けるのかを明らかにした研究も最近報告されている⁽²⁰⁾⁽⁸¹⁾。近藤ら⁽²⁰⁾は再生効果がびびり振動を発達させるばかりでなく、振動の振幅がかなり大きくなると、多重再生効果がびびり振動の発達を抑える逆の効果を持つことを明らかにし、金子ら⁽⁸¹⁾は発振状態での変位と切削力の関係を実験から求め、びびり振動系を2自由度の運動方程式によって記述している。しかし、これまでの研究からは実際の切削において理論解析で仮定するように、発振限界で定常な微小振動が存在しているかどうか、どの程度の大きさの振幅をもった振動が外乱として加わったときに再生びびり振動が発振するのかが明らかにされていない。また、発振後のびびり振動が定常状態に達したときの変位と切削力の関係は求まっているものの、再生効果を受けながらびびり振動が発達する段階についての研究はHahn⁽²⁾を除いてほとんど報告されていない。

測定が困難なためにこれまで十分な解明がなされなかった微小振動が発生してからそれが再生効果によって発達し、びびり振動が発振する様子をマイクロコンピュータを用いて測定した。この結果、安定な切削条件でも生じるような切削力の微小変動が再生びびり振動の発振にきわめて大きな影響をもつことが明らかになった。また、安定な切削中の被削材に衝撃を加えてびびり振動を引き起こし、再生効果がびびり振動にどんな影響を及ぼすのか、そのときの変位と切削力の関係がどのようになっているのかを解明した。解析ではびびり振動を表す2自由度

の運動方程式に実験で得られた切削力の特性をいれ、切削力の微小変動に相当する微小外乱が加わった場合と被削材に衝撃を加えた場合についてそれぞれに相当する初期条件のもとで発生する振動を数値計算によって求め、得られた計算結果を実験結果と比較した⁽⁷⁶⁾⁽⁷⁷⁾。

2. 2 運動方程式

本論文では被削材を保持する軸を含めて被削材ということにする。工具の剛性に比較して被削材の剛性が小さく、被削材のみが発生すると仮定した2自由度振動系を考えると、自由振動の基準座標からなる直交座標系 $O-\xi\eta$ と図2. 1 (b) に示す水平軸、鉛直軸からなる直交座標系 $O-xy$ は一般には一致しないと考えられる(原点 O は切削力が作用しないときの被削材の平衡位置である)。自由振動の基準座標 ξ, η 方向の被削材のばね定数 k_ξ, k_η および減衰係数 c_ξ, c_η を次のようにおく。

$$\left. \begin{aligned} k_\xi &= (1 + \Delta_k)k, k_\eta = (1 - \Delta_k)k \\ c_\xi &= (1 + \Delta_c)c, c_\eta = (1 - \Delta_c)c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2. 1)$$

上式で k は平均ばね定数、 c は平均減衰係数である。切削力が作用しないとき、 ξ, η に関する被削材の運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{\xi} + c_\xi\dot{\xi} + k_\xi\xi &= 0 \\ m\ddot{\eta} + c_\eta\dot{\eta} + k_\eta\eta &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2. 2)$$

となる。二つの直交座標系の間の次の一次変換式

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2. 3)$$

を用いて、式(2.2) から x, y に関する運動方程式を求め、その右辺に被削材に作用する切削力の x, y 方向の成分、すなわち背分力 F_x 、主分力 F_y を加える。いま、 $p^2 = k/m, n = c/(2m)$ とし

m : 被削材の質量(図2. 1 (a) のAA断面上に集中した等価な質量を考える)。

α : $O-\xi\eta$ 座標系と $O-xy$ 座標系のなす角で x 軸から ξ 軸を半時計方向に測った角 $\angle xO\xi$ を正とする。

d_0 : 送り (mm/rev)

d : 瞬間切込み深さで、被削材の一回転に要する時間を T とすれば、一般に d は

$$\begin{aligned} d = \min \{ & d_0 + x(t-T) - x(t), \\ & 2d_0 + x(t-2T) - x(t), \\ & 3d_0 + x(t-3T) - x(t), \dots \} \quad \dots\dots\dots (2.4) \end{aligned}$$

となる。ただし、式 (2.4) の右辺が正值ならばそのままよいが、もし負値のときには $d = 0$ とおく必要がある。

次の無次元量

$$\left. \begin{aligned} x' &= x/d_0, y' = y/d_0, t' = pt \\ f_x &= F_x/(kd_0), f_y = F_y/(kd_0) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

を用いると、切削中の x, y に関する無次元運動方程式 (2.6) を得る。以下では無次元量を表す右肩のダッシュ記号は省略することにする。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &+ (2n/p)(1 + \Delta_c \cos 2\alpha) \dot{x} \\ &+ (2n/p)\Delta_c(\sin 2\alpha) \dot{y} \\ &+ (1 + \Delta_k \cos 2\alpha)x + \Delta_k(\sin 2\alpha)y \\ &= f_x(d) \\ \ddot{y} &+ (2n/p)\Delta_c(\sin 2\alpha) \dot{x} \\ &+ (2n/p)(1 - \Delta_c \cos 2\alpha) \dot{y} \\ &+ \Delta_k(\sin 2\alpha)x + (1 - \Delta_k \cos 2\alpha)y \\ &= f_y(d) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

2. 3 実験装置および実験方法

実験では被削材の水平方向の変位 x 、鉛直方向の変位 y 、被削材と工具の相対変位、切削力の2成分、すなわち背分力 F_x と主分力 F_y 、および被削材の回転パルスを測定した。実験装置の概略図を図2. 1に示す。チャック固有の影響の少ない12inch四つづめチャック⁽⁶⁵⁾を取り付けた大隈鉄工所製LS540×800形旋盤を使用し、工具の前後送りによる二次元切削を行った。チャックには直径60mm、長さ270mmの軸①(炭素鋼S45C)を取り付け、これにホルダ②を用いて直径約150mm、

板厚 $b = 2\text{mm}$ と 3mm の円板型被削材③ (JIS H 3201による黄銅BsP3) を固定した。工具④ (すくい角 -5° , 逃げ角 5°) のホルダはタンガロイETFNR2020K33で、スローアウェイチップにはダイヤチタニットTNPL332 (超硬合金) を用いた。チップは切削ごとに取り替えて、常に同じ条件で切削できるようにした。背分力、主分力の測定に用いた切削動力計⑤はそれ自体の剛性と固有振動数が高く、切削に影響を及ぼすことのないキスラー社の圧電式切削動力計 (9257A) である。⑥⑥⑥は渦電流式変位計 (AEC-1553T) であり、⑥で工具と被削材の相対変位を測定して正しい切込み深さ d を求め、⑥, ⑥で被削材の水平変位 x と鉛直変位 y を測定した。旋盤の回転速度はコップ無段変速機で連続的に変化させることができ、その値は⑦のフォトインタラプタで発生するパルス信号から求めた。さらにこのパルス信号をノース・スター社のマイクロコンピュータ (ブラックボックス) に読み込み、回転マークとして利用した。切削開始点から測定データを読み込むために、旋盤の送り装置に連動させたトリガーパルス発生器を用いた。切削中に衝撃を加える実験の際には、ハンマーが軸に触れた瞬間にパルスが発生するように工夫しており、衝撃を加えた瞬間が確認できる。さらに、測定感度を高めるために変位計と対向する円板⑧は黄銅製とし、変位計および切削動力計の旋盤への取り付け剛性を増すために鋳鉄のブロック⑨などを用いた。

各測定器で得られた電気信号は、まず、TEAC製データレコーダ (MR-30) に記録してからマイクロコンピュータに読み込み、さらにデータの解析を行うために名古屋大学大型計算機センターの電子計算機 (FACOM-M382) に転送した。測定信号の処理手順を図2. 2に示す。マイクロコンピュータでのサンプリングは変位や切削力の波形が正確に得られるように 0.25ms 間隔とし、 2.5s のデータを記録した。

被削材の変位、被削材に作用する切削力は理論解析の場合と同様に図2. 1の静止座標系 $O - xy$ において、主分力は上向きを正、背分力は被削材③が工具④から離れる方向を正とした。軸①の回転角 θ は図2. 1 (b) に示すように z 方向から見て反時計方向に測った。板厚 b , 送り d_0 , 切削速度 V_0 を表2. 1の切削条件で実験を行った。

2. 4 実験結果および解析結果

2. 4. 1 被削材の振動特性

予備実験として切削しない状態で被削材に衝撃を与えてその固有振動数，減衰係数を求めた．基準座標 ξ ， η の方向に衝撃を与えたときの水平変位 x ，鉛直変位 y を図2. 3の上，下図に示す．振幅が小さいときほど減衰が小さい非線形特性がみられるが，本実験では粘性減衰力を仮定して，振幅が0.05mm付近の減衰波形から減衰係数を定めた．被削材のばね定数は切削力とそれによって生ずる被削材のたわみの比から求めた． ξ ， η 方向のばね定数の差 Δk は ξ ， η 方向の固有振動数から計算したばね定数の差ともよく一致している．得られた被削材の振動特性を表2. 2に示す．

2. 4. 2 切削力の静特性

本項ではびびり振動の発生しない安定な切削条件において，切削開始時から切込み深さが一定値 d_0 に達するまでの測定結果を用いて切削力の静特性を明らかにする．この測定により切込み深さ d と切削力 F_x ， F_y の関係が一度に得られる．図2. 4(a)，(b)には切削速度 $V_0 = 150\text{m/min}$ で，板厚 $b = 2, 3\text{mm}$ の場合に送り d_0 をいろいろに変えて得られた結果を示す．図2. 4から切削力は送り d_0 に無関係に切込み深さ d だけで定まることが分かる．また， d が大きくなるにつれて切削力が一本の直線に漸近することを示したAlbrechtの実験結果⁽²⁶⁾とも一致している．図2. 5には送り $d_0 = 0.125\text{mm/rev}$ で板厚 $b = 2, 3\text{mm}$ の場合に切削速度 V_0 を100～200m/minに変えたときの結果を示した．切削速度が100m/minから200m/minへ100%増えるときに切削力は20%程度小さくなっており，従来から指摘されている切削力の右下がり特性⁽¹³⁾が確認できた．しかし，今回行った実験の大部分において被削材の上下運動による切削速度の変化量は設定した切削速度の高々10%程度であり，この程度の速度変化による切削力の変化は2%ほどになることが図2. 5からわかる．したがって，以下の解析では瞬間切削速度 $V_0 - \dot{y}$ の変動部分 \dot{y} による切削力への影響を無視し，運動方程式(2.6)の右辺の切削力 $f_x(d)$ ， $f_y(d)$ には瞬間切込み深さ d のみによって定まる図2. 4の値を用いた．

2. 4. 3 びびり振動の発達過程

実験によって得られた被削材の水平変位 x の例を図 2. 6 に示す。横軸は切削開始時からの軸の回転角 θ を表し [回転角が $2N\pi \leq \theta < 2(N+1)\pi$ のときを N 回転目とした], $N = 0, 1, \dots, 7$ 回転目の被削材の水平変位 x を d_0 ずつ整数 N の増加につれて下方にずらして波形が重ならないように図示してある。図 2. 6 (a), (b) は再生びびり振動が発生する場合を, 図 2. 6 (c) は安定な切削条件の場合を示す。

図 2. 6 (b) では A_1, A_2, A_3 の位置にごく短期間現れた振幅 $2\mu\text{m}$ 程度の微小振動が再生効果によってしだいに発達している。この A_1, A_2, A_3 で発生しているような微小振動は振動が発生する図 2. 6 (a), (b) の場合だけでなく, 安定な切削条件である図 2. 6 (c) においても B_1, B_2, B_3 の位置に現れている。計算によると被削材に $2\mu\text{m}$ の変位を引き起こすのに必要な外力の大きさは 10N 程度である。この力は図 2. 4 の切削力に比べてたいへん小さな力である。実験では直径が比較的大きく振動しにくい軸に被削材を固定したが, この場合には図 2. 6 (b) に示すように微小振動が最初から被削材の一回転の全区間にわたって生じるのではなく, 切削加工中に断続的に生じた微小振動が再生効果によって発達しながら被削材の全周に広がっていく。測定が困難なために再生びびり振動に関する従来の実験結果⁽⁴⁾⁻⁽¹⁰⁾⁽²⁰⁾⁽⁸¹⁾は振動が十分に発達した状態のものに限られていた。このため, どの程度の大きさの初期振動が再生効果によって発達するのかが明かではなかったが, 図 2. 6 から再生びびり振動の発振には安定な切削中にも存在する微少な外乱が大きな原因であることが分かった。したがって, 被削材の全周にわたって微小振動が存在していると仮定し, その振動が発達するかどうかで再生びびり振動の発振限界を求める従来からの考え方は, 本実験のように被削材の剛性が高く, 減衰係数や固有振動数の大きい一般に用いられる切削の条件では適当でないことが分かる。

実験結果と比較するために定常切削中に加わる外乱に相当する初期条件を与え, 表 2. 2 の値を用いて運動方程式 (2.6) をギヤ法 (linear multistep method) によって数値計算したときの結果を図 2. 7 に示す。式 (2.6) で $d = d_0$ とした時の被削材の定常変位を x_0, y_0 とする。図 2. 7 (a), (b) は図 2. 6 (a), (b) と

同じ切削条件のときに初期条件として $x(0) = x_0 + 2\mu m$, $y(0) = y_0$, $\dot{x}(0) = \dot{y}(0) = 0 \text{ m/s}$ を与えて計算した結果である。図 2. 7 と図 2. 6 を比較すると、振幅の大きさには多少の差異がみられるが振動の発達する様子はよく似ており、計算からも微小振動に起因して再生びり振動の発達することが裏付けられた。実験結果と計算結果の振幅の差異は、計算では刃先の丸みや摩擦などの影響を無視したことや計算に用いた被削材の振動特性が実際の値と完全には一致していないことが原因と考えられる。

実験で再生びり振動の生じたときに得られる被削材の変位と切削力および振動系の全エネルギーを図 2. 8 に示した。図 2. 8 には図 2. 6 (a) の $\theta/2\pi = 6.75$ の瞬間を $t = 0$ とし、時間 t の経過につれて被削材の変位 x , y , 切削力 F_x , F_y , 全エネルギー E の変化を図示した。図 2. 8 のように振幅が時間とともに変化する場合には振動の 1 周期の間では振動系に出入りするエネルギーは釣り合わず、時間とともに増減する。したがって、振幅の変化の仕方と比較するためには振動系に貯えられる全エネルギー E を求める必要がある。全エネルギー E は、切削力によって系に入るエネルギーから減衰によって系から失われるエネルギーを引いて求めた。また、時刻 t における系の弾性変形による保存エネルギーと質点の運動エネルギーの和を E_s として計算し、図 2. 8 中に示した。時刻 $t = 0$ の瞬間に E の値と E_s の値を等しいとおけば、全エネルギー E と系のエネルギー E_s とはその後とも同じ値になるはずである。しかし、実験では E を被削材の変位と切削力から直接求めたために、十分な精度で測定できない場合や被削材の減衰係数の見積りが不正確な場合には E に大きな誤差が生じる。図 2. 8 で E と E_s の値はほぼ一致しており、表 2. 2 に示した被削材の振動特性値が妥当であり、実験も十分な精度でなされていることが分かる。図 2. 9 には変位と切削力の関係を示した。図 2. 9 の左上図で被削材は右上がりの時計方向の振動軌跡を描き、左下図で切削力は右上がりの反時計方向の軌跡を描いている。さらに、変位と切削力の関係は右上図、右下図でともに右下がりの時計方向軌跡を描き、切削力によって系に正のエネルギーが入っていることを示している。これらの変位と切削力の関係は従来の研究⁽⁷⁾
(81) でも示されているが、これだけでは再生びり振動の発達に及ぼす再生効果の影響や変位と切削力の関係を明確にすることは困難である。

2. 4. 4 被削材に衝撃を加えた場合の結果

外乱により発生した微小振動が再生効果により、被削材の数回転にわたってどのように変化するかを安定な定常切削中に衝撃を加えて調べた。一例として $b = 2\text{mm}$, $d_0 = 0.125\text{mm/rev}$, $V_0 = 150\text{m/min}$ の場合に衝撃を加えた瞬間 ($\theta = 0$) から のびり振動の実験結果と計算結果を図 2. 10 (a), (b) に示す。図 2. 10 (b) の振動波形は初期条件として $x(0) = x_0$, $y(0) = y_0$, $\dot{x}(0) = 0.067\text{m/s}$, $\dot{y}(0) = 0\text{m/s}$ を与え、運動方程式 (2.6) を数値計算して求めたものである。図 2. 10 (a) の実験結果を見ると、衝撃を加えたことにより被削材の一部に残った のびり痕が再生効果の影響で被削材の全周に広がっている。図 2. 10 (b) の計算結果は図 2. 10 (a) の実験結果と同様の傾向を示しており、再生のびり振動を解析的に研究するための糸口を与えている。

図 2. 10 (a) の実験結果のうち $\theta/2\pi = 1$ の瞬間を $t = 0$ とし、変位 x , y , 切削力 F_x , F_y , 全エネルギー E の時間変化を図 2. 11 (a) に示す。これに対応する図 2. 10 (b) の計算結果を図 2. 11 (b) に示す。図 2. 11 (a) には図 2. 8 と同様に系のエネルギー E_s も示しているが、この場合にも全区間 ($t = 0 \sim 50\text{ms}$) にわたって E と E_s はよく一致している。したがって、衝撃を加えた実験でも振動系に出入りするエネルギーはほぼ正確に測定できており、十分な精度で実験の行えたことが分かる。図 2. 11 (a), (b) から変位 x , y と切削力 F_x , F_y の関係を求め図 2. 12 (a), (b) に示す。図 (a) は実験結果、図 (b) は計算結果である。図 2. 12 (a), (b) の左上図に示す被削材の振動軌跡の回転方向については、時計方向という報告⁽⁷⁾ と反時計方向という報告⁽⁸¹⁾ の二つうりがあり、従来からどちらともはっきりしなかった。

このような正反対の現象は運動方程式 (2.6) 中の Δk と α の影響を考察することによって説明できる。まず、式 (2.6) で $\alpha = 0$ とおき x と y の式にばね連成のない状態を考える。式 (2.6) からわかるように背分力は x 方向に一種のばねとして作用するので x 方向の固有振動数を高めるが、主分力は y 方向に強制外力として作用するので y 方向の固有振動数を変化させない。一方、 $\Delta k < 0$ であるとき切削しない状態での y 方向の固有振動数は式 (2.6) から x 方向よりも高い。のびり振動が生じたときの x 方向と y 方向の振動数は同一であるから Δk が十分大

きな負値をもつ場合には、背分力によって x 方向の固有振動数が高くなったとしても相変わらず y 方向の固有振動数が高いために、切削力の変化に対する変位 y の位相遅れが変位 x の位相遅れよりも小さく被削材の振動軌跡が時計方向に回転することが説明できる。また、角度 α は切削力の作用方向と被削材の基準座標のなす角を定め、 Δk の効果を変化させる。 Δk と α の影響は運動方程式 (2.6) にこれらの種々の値を与えて数値計算した結果によって確認した。再生効果のあるときは図 2. 12 (a) の右上図、右下図から分かるように、まず、 F_x , F_y は正の方向に増加し、それにとまって変位 x , y が引き起こされ、その後右下がりの時計方向軌跡を描いて系にエネルギーが入っている。これは図 2. 12 (b) の右上図、右下図の計算結果からも確認できる。図 2. 11 (a), (b) からこのときの切削力と変位の間の位相を見ると、切削力が変位よりもほぼ 130° 位相の進んでいることが確認できる。図 2. 11 と図 2. 12 で実験結果と計算結果を比較してみると、両者は定性的にも定量的にもよく一致しており、図 2. 4 に示すような切削力の特性を使って運動方程式 (2.6) を数値計算すれば、再生びびり振動の過渡的な挙動を解析的にも検討することができる。ただし、図 2. 12 (a) の右下図で切削力が右上がりではなくに反時計方向の軌跡を描くことは従来の研究⁽⁸¹⁾でも明らかにされてきたが、本論文の計算では準静的な切削力特性を表す図 2. 4 を用いたので、図 2. 12 (b) の右下図に示す一本の線になっている。この切削力の動特性は今後の研究によって明らかにすべき課題である。

2. 5 まとめ

本章で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 安定な切削中でも切削力の微小変動によって被削材が微小変動していることを実験的に確認した。再生びびり振動はこの微小振動が再生効果によって発達するときに発振することを明らかにした。
- (2) 微小振動が再生効果によって発達するときの変位 x , y と切削力 F_x , F_y の関係を安定な切削中に被削材に衝撃を加える実験から明らかにした。
- (3) 切削力と減衰力から計算した系の全エネルギー E と系のもつエネルギー E_s を比較したところ、両者はびびり振動の発達する場合にもよく一致した。これから、

エネルギーを計算するのに用いた被削材の振動特性値が妥当な値であることと、変位、切削力の測定が十分な精度でなされたことが確認できた。

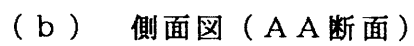
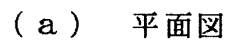
(4) びびり振動系に微小外乱を加えた場合と衝撃を加えた場合とについて、振動系を表す2自由度の運動方程式から数値計算して得られた結果と実験結果とを比較したところ、振動の発達する様子や変位と切削力の関係について両者は定量的によく一致していた。

表 2. 1 切削条件

Width b (mm)	Feed d_0 (mm/rev)	Cutting speed V_0 (m/min)
2.0	0.05 ~0.25	100~200
3.0	0.025~0.25	75~200

表 2. 2 被削材の振動特性

RMS value of natural frequency	$p/(2\pi)$ (Hz)	170
Spring constant	k (MN/m)	6.8
	Δk	-0.06
Damping coefficient	n/p	0.073
	Δc	0.35
Equivalent mass	m (kg)	5.96
Angle between principal coordinates and generalized ones	α (°)	-10



-19-

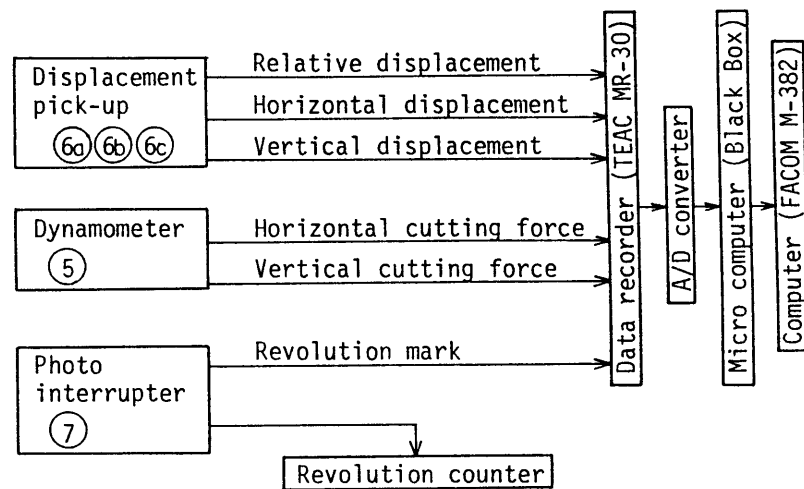


図 2. 2 測定信号の処理手順

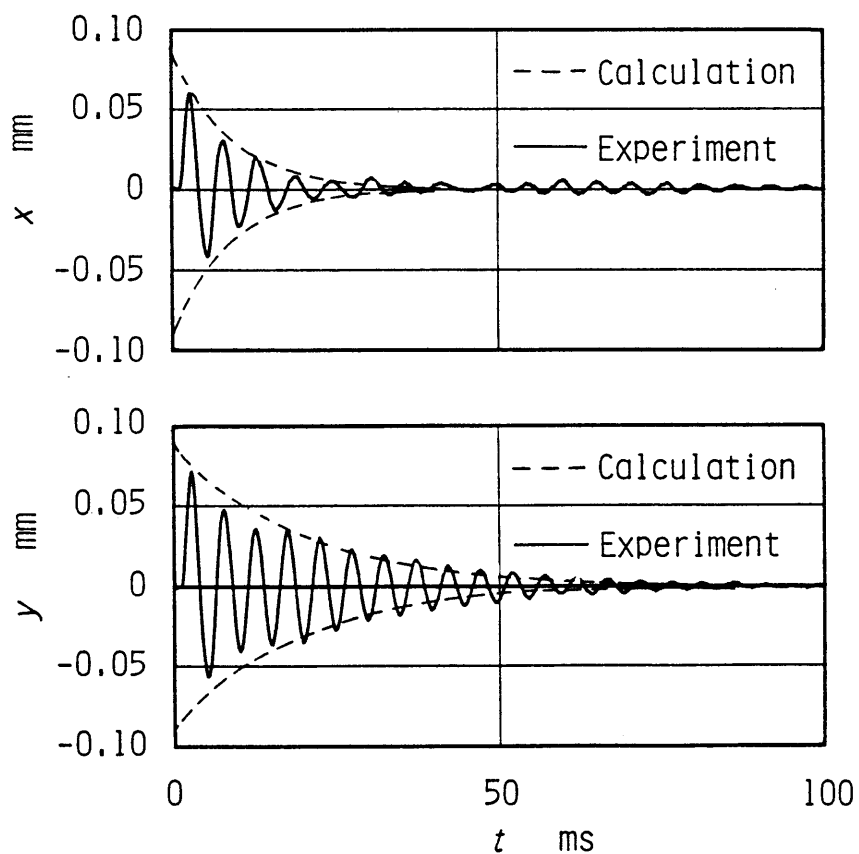
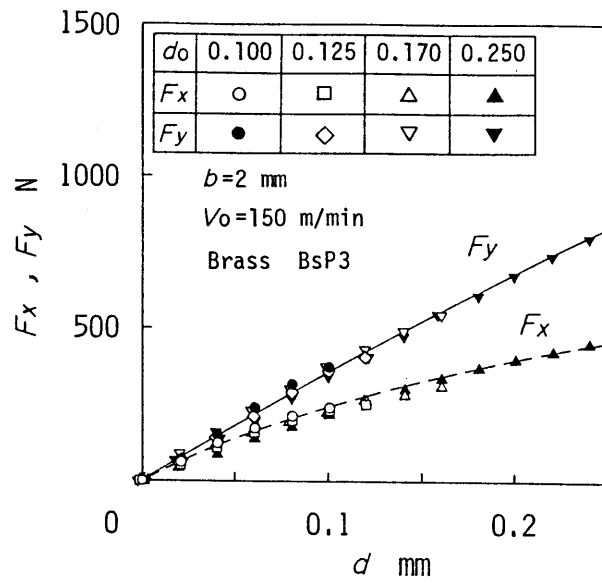
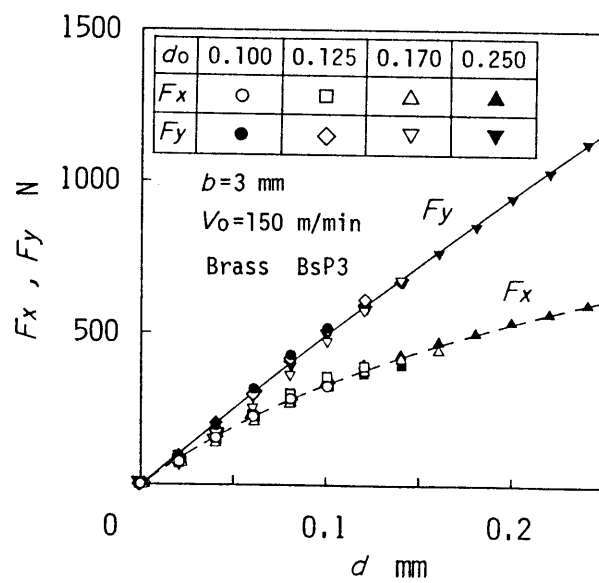


図 2. 3 被削材の自由振動



(a) $b = 2$ m m



(b) $b = 3$ m m

図 2. 4 切込み深さと切削力の関係

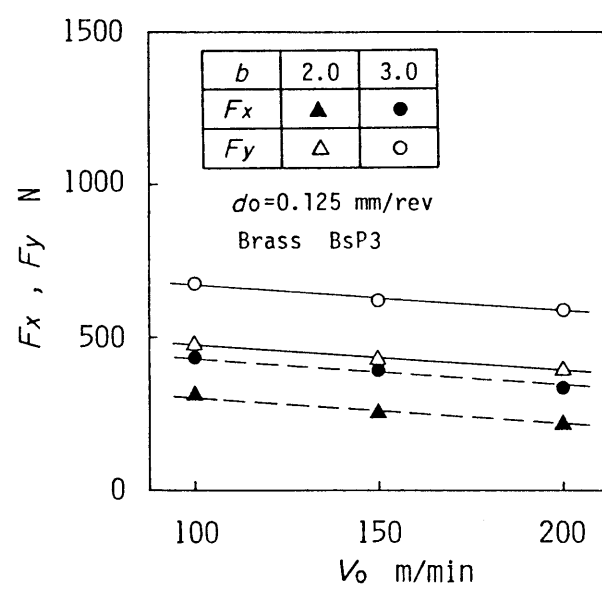
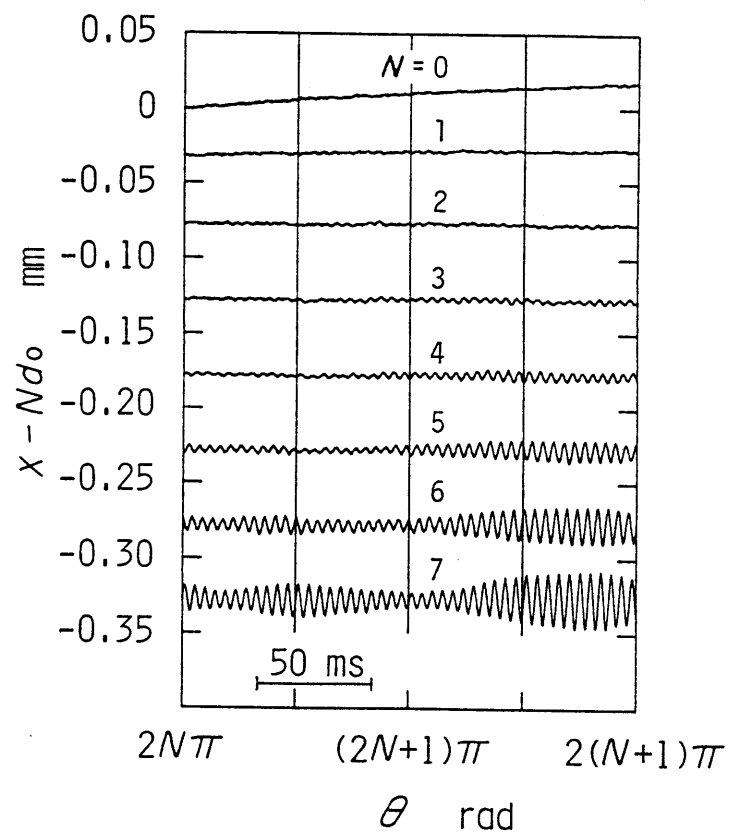
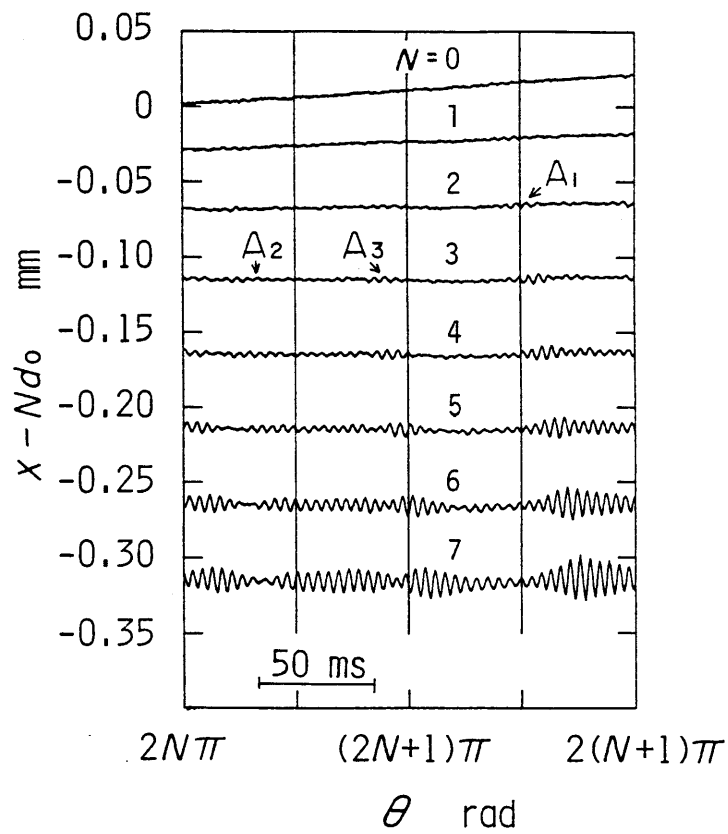


図 2. 5 切削速度と切削力の関係



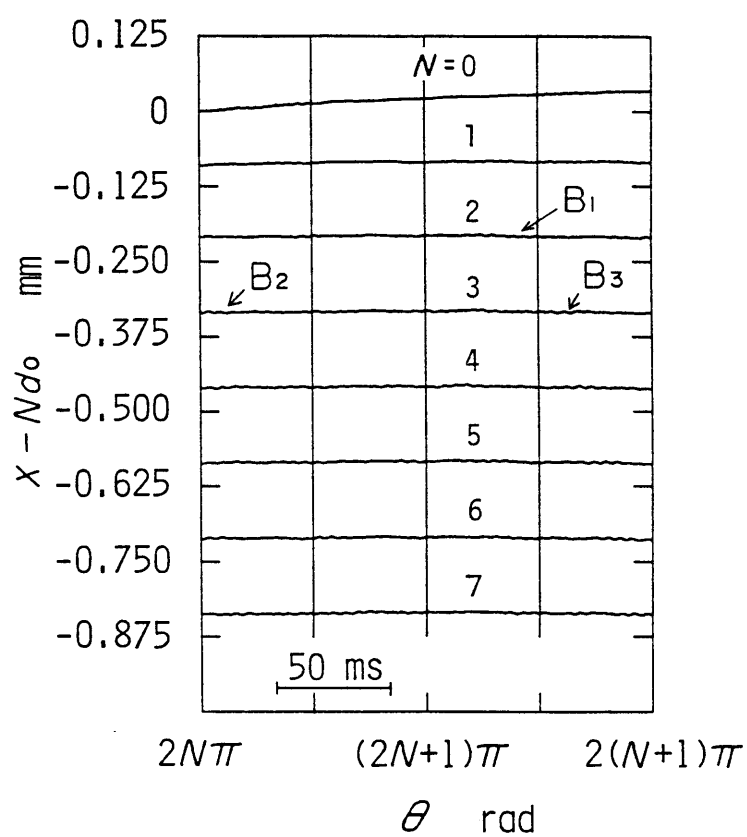
(a) $b = 2 \text{ mm}$, $d_0 = 0.05 \text{ mm/rev}$

図 2. 6 水平振動の発達 (実験結果, $V_0 = 150 \text{ m/min}$)



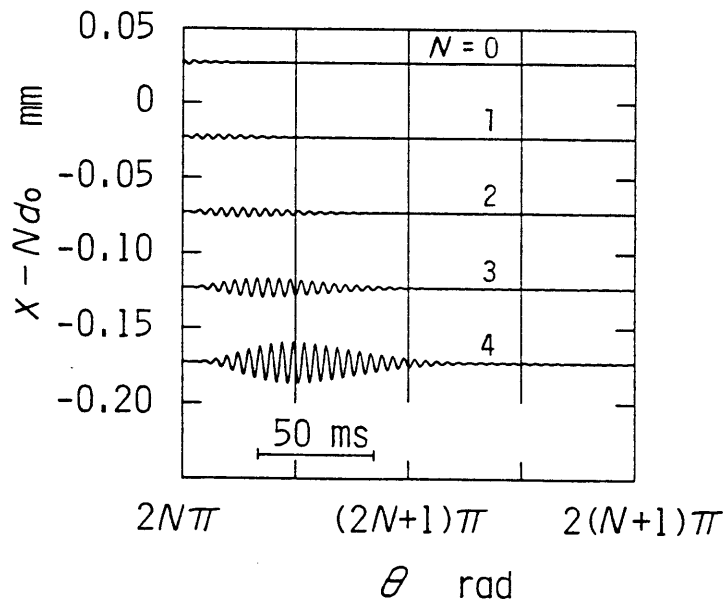
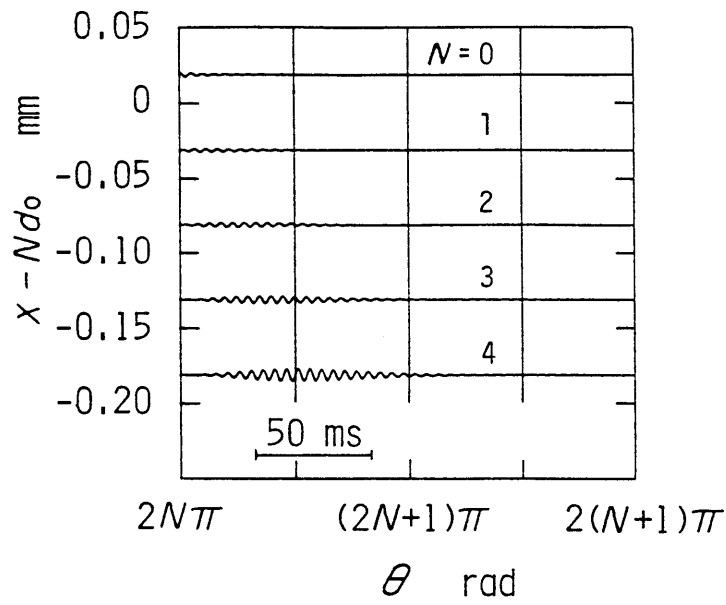
(b) $b = 3 \text{ mm}$, $d_0 = 0.05 \text{ mm/rev}$

図2. 6 水平振動の発達 (実験結果, $V_0 = 150 \text{ m/min}$)



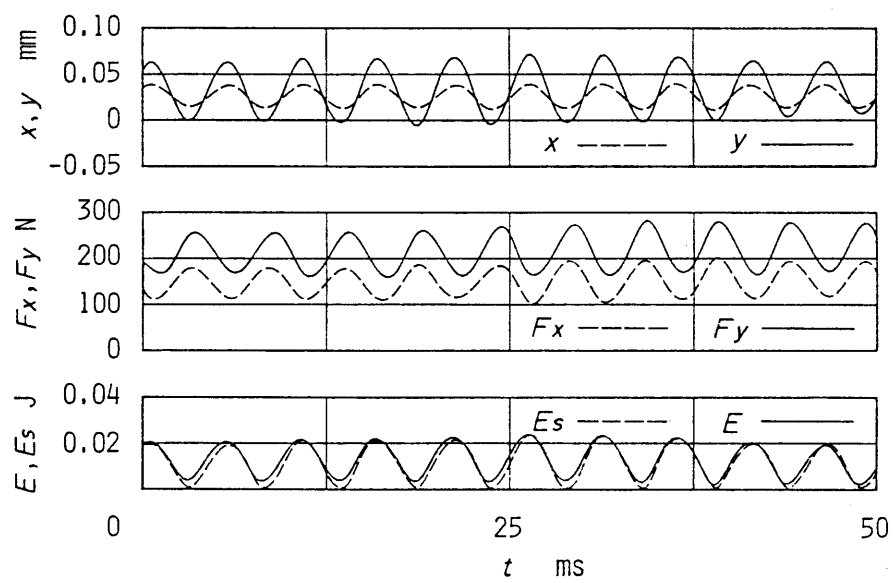
(c) $b = 2 \text{ mm}$, $d_0 = 0.125 \text{ mm/rev}$

図 2. 6 水平振動の発達 (実験結果, $V_0 = 150 \text{ m/min}$)



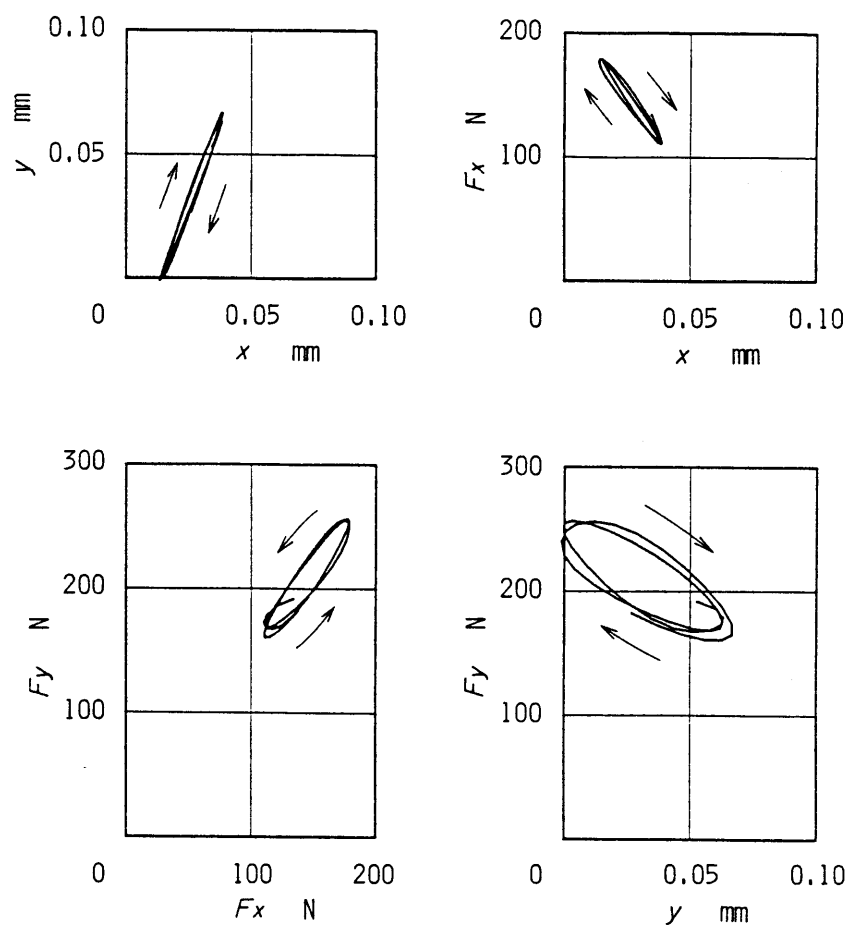
$d_0 = 0.05 \text{ mm/rev}, V_0 = 150 \text{ m/min}$ 計算には表 2. 2 の数値と初期条件
 $x(0) = x_0 + 2 \mu\text{m}, y(0) = y_0, \dot{x}(0) = \dot{y}(0) = 0 \text{ m/s}$ を用いた.

図 2. 7 水平振動の発達 (計算結果)



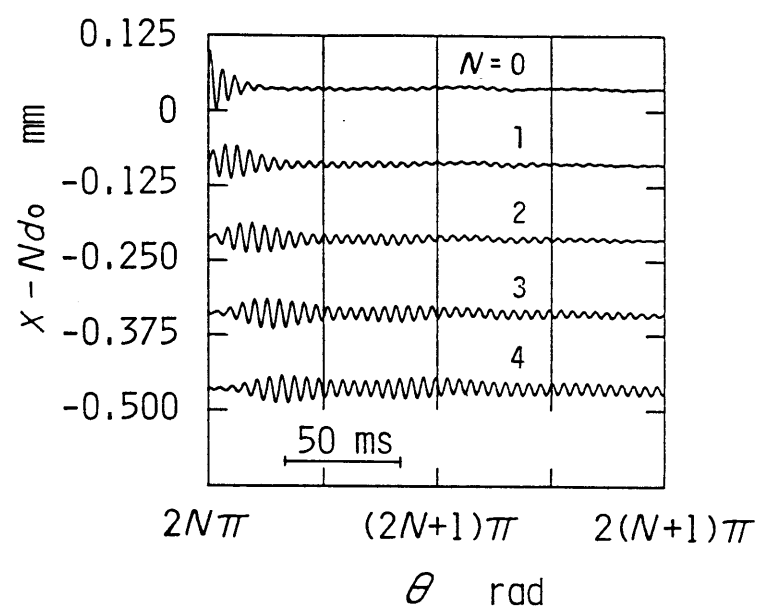
(実験結果, $b = 2\text{mm}$, $d_o = 0.05\text{mm/rev}$, $V_o = 150\text{m/min}$)

図 2. 8 被削材の変位, 切削力と全エネルギーの時間変化

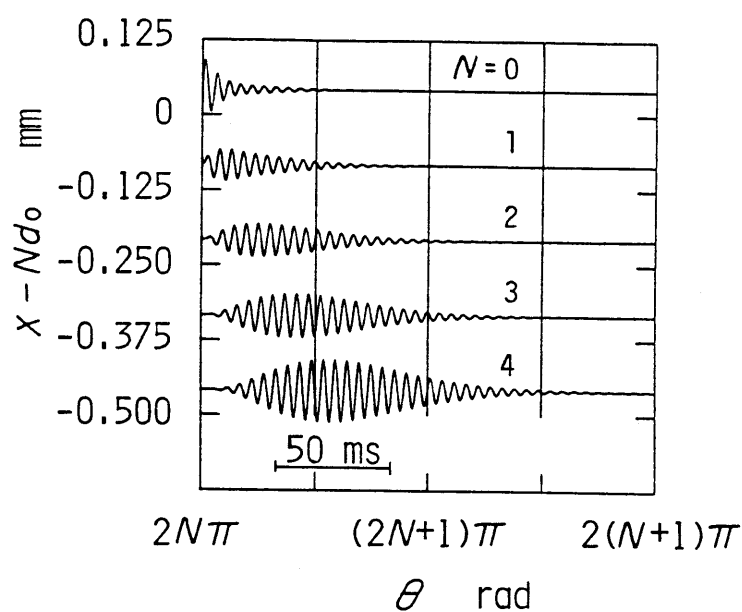


(実験結果, $b = 2\text{ mm}$, $d_o = 0.05\text{ mm/rev}$, $V_o = 150\text{ m/min}$)

図 2. 9 被削材の変位と切削力の関係



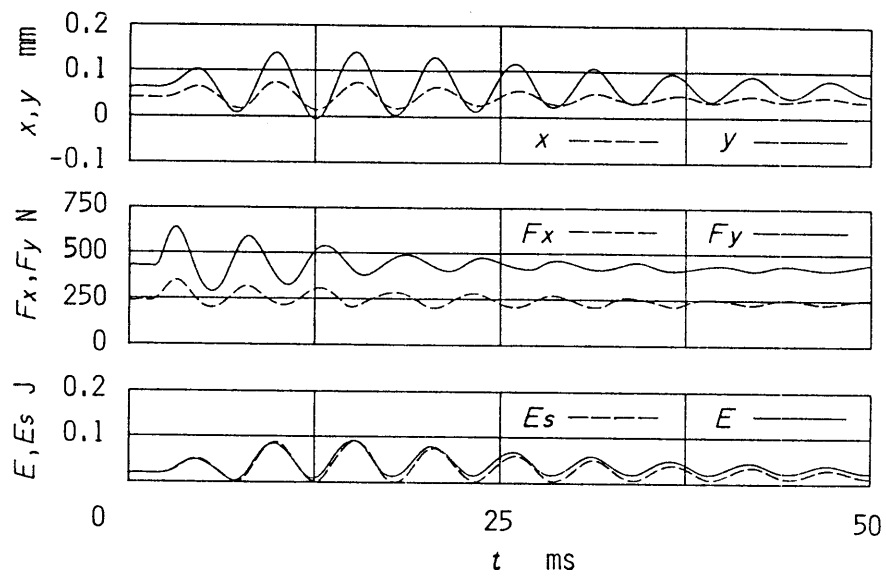
(a) 実験結果



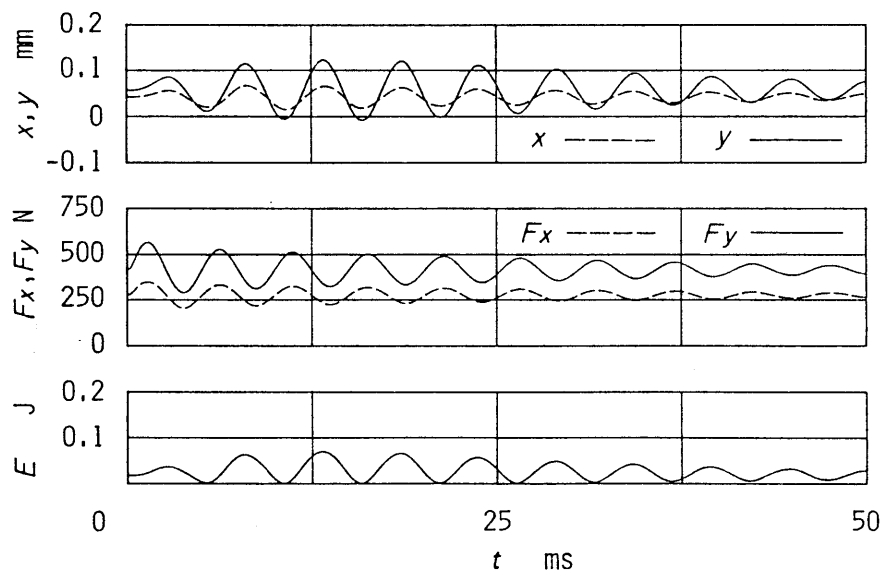
(b) 計算結果

$b = 2\text{mm}, d_0 = 0.125\text{mm/rev}, V_0 = 150\text{m/min}$ 計算には表 2. 2 の数値と初期条件
 $x(0) = x_0, y(0) = y_0, \dot{x}(0) = 0.067\text{m/s}, \dot{y}(0) = 0\text{m/s}$ を用いた.

図 2. 10 衝撃による水平振動の発達



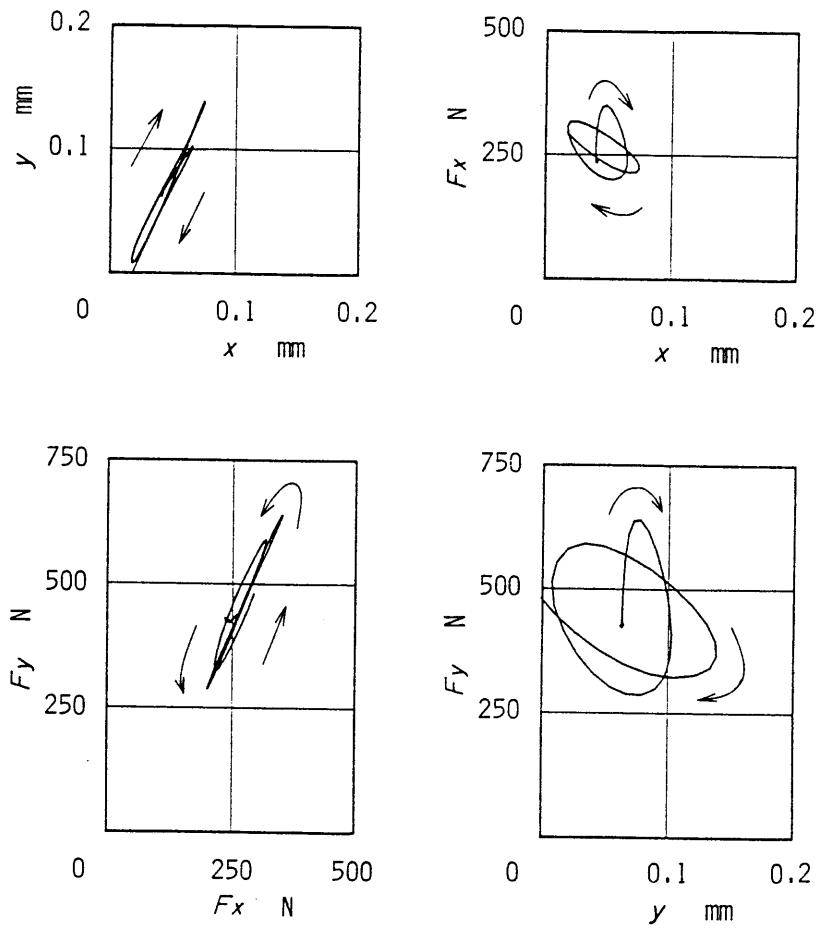
(a) 実験結果



(b) 計算結果

($b = 2\text{mm}$, $d_o = 0.125\text{mm/rev}$, $V_o = 150\text{m/min}$)

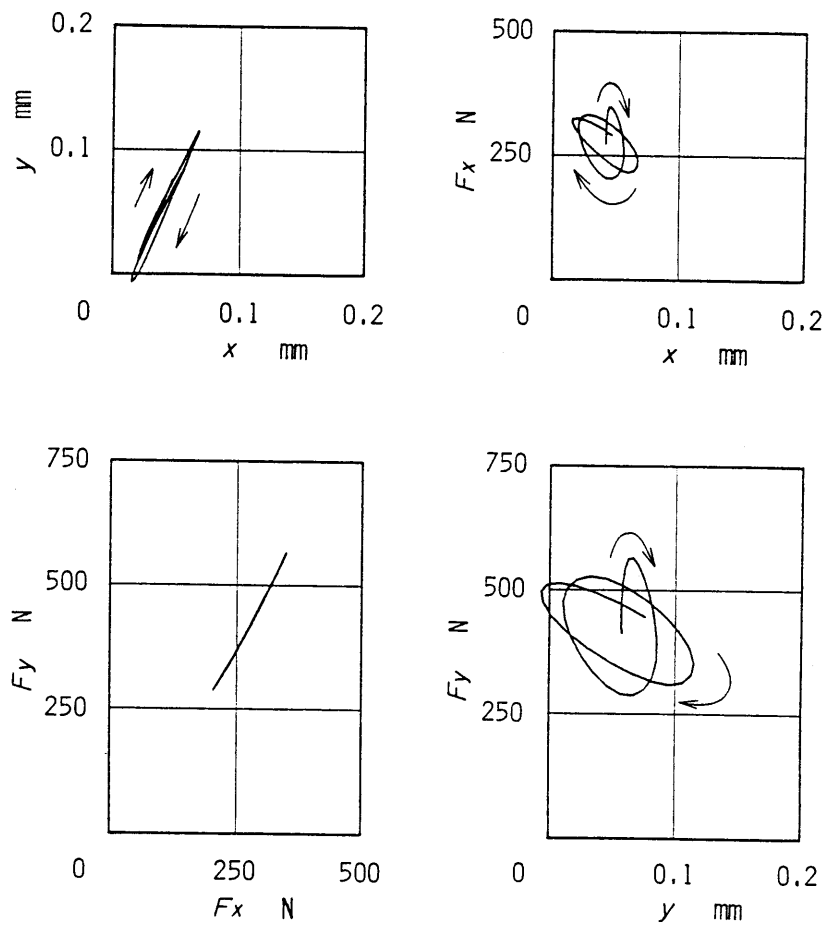
図 2. 1 1 被削材の変位, 切削力と全エネルギーの時間変化



(a) 実験結果

($b = 2\text{mm}$, $d_o = 0.125\text{mm/rev}$, $V_o = 150\text{m/min}$)

図 2. 1 2 被削材の変位と切削力の関係



(b) 計算結果

($b = 2\text{mm}$, $d_0 = 0.125\text{mm/rev}$, $V_0 = 150\text{m/min}$)

図 2. 1 2 被削材の変位と切削力の関係

第3章 工具のすくい角が正の場合に 被削材のびびり振動に及ぼす 工具形状の影響⁽⁷⁸⁾

3. 1 まえがき

旋盤で切削を始めると短時間のうちにびびり振動が発達し、旋削作業を続けることが不可能となる場合がある。このびびり振動を避けるために、従来は主に切削力の特性（切削抵抗、時間遅れ、ペネトレーション効果など）が切削条件（切削速度、送りなど）のみで決まるという仮定に基づいて、びびり振動の発生する不安定な切削条件が求められてきた⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。さらに、切込み深さに対して切削抵抗に非線形性がある場合⁽¹⁵⁾⁽²¹⁾、工具が被削材から離れて多重再生効果が生ずる場合⁽²⁰⁾の解析が行われ、このとき発生する振動の発生条件や特徴が明らかにされてきた。

一方、切削開始後、切込みが深くなるときの切削力の特性や発生する振動の特徴を実験的に調べることによってびびり振動の発生する物理的原因を解明しようとする試みもなされてきた。H a h n⁽²⁾ はびびり振動の発生原因の一つとして切削初期の摩擦現象をあげており、0.01 mm 以下の切込み深さでは切り屑が生じないことも明らかにした。勇田⁽⁴⁰⁾ は切削初期には切込み深さが増すに従い、摩擦領域、ほりおこし領域、切削領域を順次に経過し、切削力の特性も切込みが深いときとは異なることを明らかにした。山本・中村⁽³⁶⁾⁻⁽³⁸⁾ は切削開始条件に及ぼす切れ刃の丸みの効果を研究し、切れ刃の丸みが切削初期に重要な意味を持っていることを示した。

このように切削状態は切込み深さや工具形状などによって大きく変化し、切削力の静的、動的な特性も切込み深さによる強い影響を受けると考えられる。したがって、切削力の特性が単に切削条件のみで決まると仮定した解析や切削力に非線形性を入れた解析だけでは実際に生ずるびびり振動（特に、切込み深さのたえず変化するフライス削りにおいて発生するびびり振動、工具刃先が摩耗したときに発生するびびり振動）の発生条件や発生原因を十分に説明することができない。

本論文では切込み深さが変化する切削開始直後に発生するびびり振動を実験的

に調べることによって，切込み深さや工具形状が切削力の静的，動的特性に及ぼす効果を求め，切削抵抗の非線形性によって生ずると考えられてきたびびり振動や一般に「工具の食い込みが悪い」と扱われてきたびびり振動も含めてびびり振動の発生原因の解明を行った．このうち，本章ではすくい角が正の突切りバイトを用いて旋盤の前後送りによる二次元切削を行ったときのびびり振動の発生条件とその原因を明らかにした⁽⁷⁸⁾．

3. 2 実験装置および実験方法

図3. 1には本章で用いた被削材の2自由度系振動モデルを示す．本章の実験装置は第2章とほぼ同じなので被削材の水平変位 x ，鉛直変位 y ，背分力 F_x ，主分力 F_y ，切込み深さ d や直交座標系 $O - x y$ ， $O - \xi \eta$ の説明は省略する．

四つづめチャックに保持した直径 40 mm，突き出し長さ 300mm の丸軸に円板形被削材をねじ止めし，丸軸の右端を回転センターで支持した．この被削材を送り $d_0 = 0.05 \sim 0.25 \text{ mm/rev}$ ，切削速度 $V_0 = 50 \sim 200 \text{ m/min}$ の実験範囲で旋削した．被削材には厚さ $b = 3 \text{ mm}$ ，直径 $D = 140 \sim 190 \text{ mm}$ の黄銅板 (JIS H3201, Bsp3) を用い，工具 (すくい角 10° ，逃げ角 6°) はダイヤチタニットのホルダ EGHR2525M5 にスローアウェイチップ EGT5 (サーメット) を取り付けた突切りバイトを用いた．主軸も含めて被削材を2自由度の振動系と考えたときの等価な質量，ばね定数，減衰係数を第2章と同じ記号を用いて表3. 1に示した．

振動発生時の切り屑流出状態と被削材の変位および切削力の変化とを対応づけるためにナック社の高速度カメラ E-10 および解析映写機 DF-16C を用いた．

3. 3 実験結果および考察

図3. 2にはびびり振動発生時の被削材の変位 x ， y ，切削力 F_x ， F_y ，切込み深さ d の時間的变化を示した．図3. 2の上図の▽印は切削開始を始点にして被削材の半回転ごとの印である．図3. 2のような切削初期に発生するびびり振動は刃先と被削材の摩擦による振動ではないかと従来から考えられてきた．そこで

図 3. 3 に示すような切り屑センサ S を刃物④の先端に取り付けて、振動が切り屑生成後に生じているのかどうかを確かめた。図 3. 2 の下図の半印は切り屑が発生してセンサ S に触れた瞬間を表す。上述の d_0 , V_0 の実験範囲では、びびり振動が生じた場合にはかならず図 3. 2 のように切り屑生成後にびびり振動が生じていることを確認した。したがって、切削初期に生ずるびびり振動は工具④が被削材③に切り込む時の衝撃や摩擦によって生じたものではないことがわかる。また、図 3. 2 の $t = 470 \text{ ms}$ (切込み深さ $d = 19 \mu\text{m}$) のときに鉛直方向の振動 y と主分力 F_y の変動が現れ、 $t = 540 \text{ ms}$ ($d = 25 \mu\text{m}$) のときに急に主分力 F_y の変動がなくなる特徴は H a h n の実験結果⁽²⁾とも一致している。

3. 3. 1 切削力の静特性

この項ではびびり振動の発生原因を解明する前に、振動が発生する場合と発生しない場合に共通な切削力の静特性を明らかにしておく。

図 3. 4 (a), (b) は横軸を切込み深さ d , 縦軸を背分力 F_x , 主分力 F_y にとったときの切削力の特性を表す。ただし、びびり振動の発生している場合には振動している部分を除いて示した。図 3. 4 (a) は切削速度 $V_0 = 75 \text{ m/min}$ と一定にし、送り $d_0 = 0.05 \sim 0.25 \text{ mm/rev}$ に変えた場合である。図 3. 4 (b) は送り $d_0 = 0.1 \text{ mm/rev}$ と一定にし、切削速度 $V_0 = 50 \sim 200 \text{ m/min}$ に変えた場合を示す。図 3. 4 (a), (b) から、切込み深さ d が $30 \mu\text{m}$ より小さい範囲では振動が生じている部分を除けば切削力 F_x , F_y はともに切削条件 (送り, 切削速度) によらず切込み深さ d のみによって決まることがわかる。また、切削初期に現れる顕著な切削力の非線形特性は黄銅を切削する場合に特有ではなく、鋼を切削する場合にも報告されている⁽²¹⁾⁽³⁷⁾。

ここで、切込みがさらに深くなったときの切込み深さ d と切削力 F_x , F_y の関係を見ておくことは切削初期現象を理解する上で役に立つと思われる。図 3. 5 には図 3. 4 (a) よりもさらに切込み深さの大きな範囲までを示すが、送り d_0 の大小に関わらず切削力は切込み深さ d のみによって決まることが分かる。ただし切込み深さ d が $30 \mu\text{m}$ 以上になると切削速度 V_0 が大きいほど切削力の勾配は小さくなる。図 3. 6 には送りが $d_0 = 0.1 \text{ mm/rev}$ と一定の条件で切込み深さが d_0 になっ

た時の切削力 F_x , F_y の大きさと切削速度 V_0 の関係を図示した。この図から主分力 F_y の右下がり特性が確認できる。

図 3. 7 には図 3. 4 (b) における背分力 F_x と主分力 F_y の関係を示した。 F_x の変化に対する F_y の変化割合は P, Q の 2 本の直線に沿ってそれぞれ一定となっている。 勇田⁽⁴⁰⁾の研究を参考にすれば、P 部分には摩擦領域からほりおこし領域が、Q 部分には切削領域が対応し、切り屑はほりおこし領域に入った時（図では半印の位置）に発生していると考えられる。

次に、勇田⁽⁴⁰⁾、山本・中村⁽³⁶⁾が切削開始点とした切込み深さ d を求め図 3. 8 に示した。（図 3. 2, 3. 4, 3. 5, 3. 7, の対応する位置には記号 A をつけて示した。）

3. 3. 2 振動の発生条件

前項で切削開始時の切削力の特性は切込み深さ d のみによって決まり、切削条件によって影響されないことが明らかになった。それにも関わらず、切削条件によってびびり振動が発生したり、しなかったりする原因について本項で解明を試みる。

図 3. 9 はびびり振動が発生するときと消滅するときの切込み深さ d_s , d_e の値を示す。図 3. 9 からびびり振動は切込み深さ $d = 18 \sim 24 \mu\text{m}$ の範囲付近において生じており、その発生する切込み深さは図 3. 8 に示した切削開始点 A にほぼ一致することがわかる。したがって、びびり振動の発生する物理的原因を解明するためには切削開始時の切削状態を明らかにする必要がある。このため (a) 刃先の丸み半径 r , (b) 切込み深さ d と切り屑厚さ t_c および刃物すくい面上での切り屑の接触長さ l_c との関係性を求め、(c) 切り屑の流出状態をカメラ撮影によって観察することにより、切り屑が流出する様子を模式図 3. 11 に表した。刃先の丸み半径は刃先のレプリカをエポキシ系樹脂で作り、端面を研磨したのち顕微鏡撮影することによって求めた。本章で用いた工具の丸み半径は $r = 70 \mu\text{m}$ であった。切込み深さ d と切り屑厚さ t_c および接触長さ l_c との関係は、いろいろな切込み深さの瞬間に旋盤の送りを止めて工具を素早く引き抜いた後、それぞれの値を実測して求めた。得られた結果の 1 例を図 3. 10 に示す。実験に用いた工具の

場合には切削速度による差は認められなかった。また、高速度カメラ（每秒3000コマ）によって切り屑が生成する様子を撮影し、得られたフィルムをコマ送り映写することによって切り屑の流出状態を詳細に観察した。得られた切り屑の流出状態の模式図を図3. 11 (a)～(d)に示す。図3. 11 (a)は切り屑の発生時、(b)はびびり振動の発生時、(c)は振動の終了時、(d)はさらに切込みが深くなったときを表す。

切削初期において切り屑は最初、刃先の丸み部分から切り屑の流出角度 $\psi = 45^\circ$ の方向へ流出し、さらに切込み深さが増すに従って図3. 11 (b)のように ψ が大きくなり、ついには図3. 11 (c)のように工具すくい面に沿って流出するようになる。図3. 11 (a), (b)では切り屑のカールは生じていなかった。高速度カメラによる撮影から振動が発生しているときには切り屑の流出角度 ψ が周期的に変動していた。また、切り屑がすくい面に沿って流出し始めた瞬間が図3. 8の位置Aに対応し、これ以後切り屑が急に長くなることも確認できた。これは位置Aが切削開始点であるという勇田⁽⁴⁰⁾、山本・中村⁽³⁶⁾の指摘を裏付ける。図3. 11 (b)の状態における刃先丸み部分の応力分布は山本・中村⁽³⁸⁾の実測値を引用すれば図3. 12になると考えられる。ただし、本章の切削速度は最低でも50 m/minと切り屑が流出し易い状態になっている点が山本・中村⁽³⁸⁾の研究に比べて異なっている。

図3. 11 (b), 図3. 12のほかに大きな負のすくい角をもつ工具についての研究⁽⁸²⁾を参考にすれば、本章で扱っているびびり振動の発生原因はつぎのように考えられる。ただし、図3. 4 (a), (b)に示すようにこの振動が発生する切込み深さでは切込み深さが増加しても背分力 F_x の増加はなく、またこの振動の特徴として x 方向の振動は発生しないため、ここでは y 方向の振動のみを考える。

(1) 被削材が外乱によってまず鉛直下方へ動いたとき ($\dot{y} < 0$, $|\dot{y}| \ll V_0$) を考える。

(2) 被削材の振動により切削速度は被削材の周速 V_0 から $V_0 - \dot{y}$ に増加する。このとき、図3. 12に示す工具すくい面から切り屑に働くせん断力（図では $-\tau$ で示した）が静的な切削時よりも大きくなって、切り屑の流出角 ψ が大きくなる。

(3) 流出角 ψ の増加はすくい角を大きくしたのと等価な効果をもつと考えられるので、喜田らが報告⁽⁸²⁾しているように材料の塑性変形領域が小さくなり、主分

力が小さくなる。

(4) 主分力の減少によって、被削材はさらに鉛直下方に動く。

(5) 被削材が鉛直上方に動いたときには、力と運動の方向が上述の(2)(3)(4)の逆になって、被削材はさらに鉛直上方に動く。

以上の考察から次の推測が導かれる。

(i) 主分力 F_y は $\dot{y} > 0$ のときには $F_y + \Delta F_y$ ($\Delta F_y > 0$) となり、 $\dot{y} < 0$ のときには $\Delta F_y < 0$ となる。

(ii) 図3. 11 (a) の切り屑の発生直後ではせん断応力 ($-\tau$) の値が小さいので、鉛直方向の振動が発生してもせん断力の変化量は小さいと考えられる。したがって、流出角度 ψ の変動は引き起こされず、振動は発生しない。

(iii) 切り屑がすくい面の直線部分に沿って流出し始めると切り屑の流出方向の変化はなくなり、振動は消滅する。

(iv) 上述の(ii), (iii)からわかるように振動は切込み深さのある限られた範囲においてのみ発生する。

(i)~(iv)の推測を立証するために、切削開始後にハンマーで被削材に鉛直下向きの衝撃を加えた。なお、切削は振動が発生しない限界の条件 ($d_0 = 0.1\text{mm/rev}$, $V_0 = 75\text{m/min}$) で行った。図3. 13 (a), (b), (c) には図3. 11 (a), (b), (c) に対応する瞬間に衝撃を加えたときに得られる結果を示した。図3. 13 (a), (c) では鉛直方向の衝撃を加えても主分力 F_y の変動はなく、鉛直方向の振動 y も減衰して短時間のうちに消滅している。図3. 9も参照すれば上記(ii)~(iv)が証明される。図3. 13 (b) は振動が発生しうる切込み深さのときにちょうど衝撃を加えたために鉛直方向の振動 y がすぐに消滅することなく、切り屑がすくい面の直線部分に沿う切込み深さになるまで続いている。図3. 14には図3. 13 (b) で水平方向の変位 (切込み深さ) の変化がない $t = 290.5 \sim 294.5\text{ms}$ の変位 x ,

y と切削力 F_x , F_y の関係を示す。図3. 14より \dot{y} が最小のときに主分力 F_y が最小となり、 \dot{y} が最大のときに F_y が最大となっており、上記(i)の結果が証明された。

以上の考察から切込みが深くなる過渡状態で発生する振動の振幅は不安定な切込み深さの範囲を通過する時間によって決まってくると考えられる。図3. 15

には不安定な切込み深さの範囲における切込み深さの増加速度 \dot{d} を横軸に、縦軸にそのとき発生した振動の最大振幅 y_{max} を表した。図 3. 15 中の実線は $y_{max} \dot{d} = \text{一定}$ の直角双曲線を表すが、測定結果はこの曲線によく一致しており、不安定な切込み深さを通過する時間の大小によってびびり振動の振幅が決まることを確認できた。

3. 4 まとめ

切削初期に現れるびびり振動について実験的な研究を行った結果として以下の点が明らかになった。

- (1) 従来、勇田、山本・中村が切削開始点であると指摘した切込み深さまでの切削力の大きさは送り、切削速度などの切削条件によらず切込み深さのみによって決まる。
- (2) 本章で扱ったびびり振動はこの切削開始点近傍のある限られた切込み深さの範囲においてのみ発生する。
- (3) 発生するびびり振動の振幅は結論(2)に挙げた切込み深さの範囲を通過する時間が長いほど大きくなる。
- (4) びびり振動の発生原因は結論(2)に挙げた切込み深さの範囲において、切り屑の流出状態が工具刃先の丸みによって不安定になるためである。

表 3. 1 被削材の振動特性

RMS value of natural frequency	$p/(2\pi)$ (Hz)	243
Spring constant	k (MN/m)	11.6
	Δk	-0.06
Damping coefficient	n/p	0.046
	Δc	0.14
Equivalent mass	m (kg)	4.96
Angle between principal coordinates and generalized ones	α (°)	16

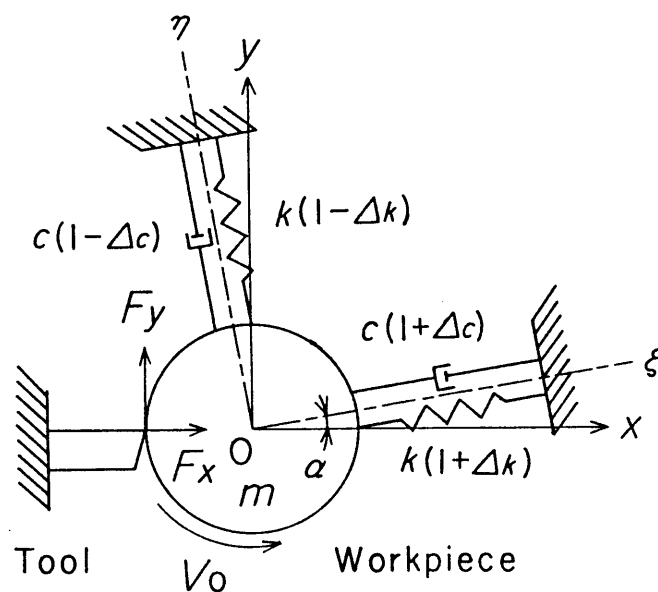


図 3. 1 被削材の 2 自由度系振動モデル

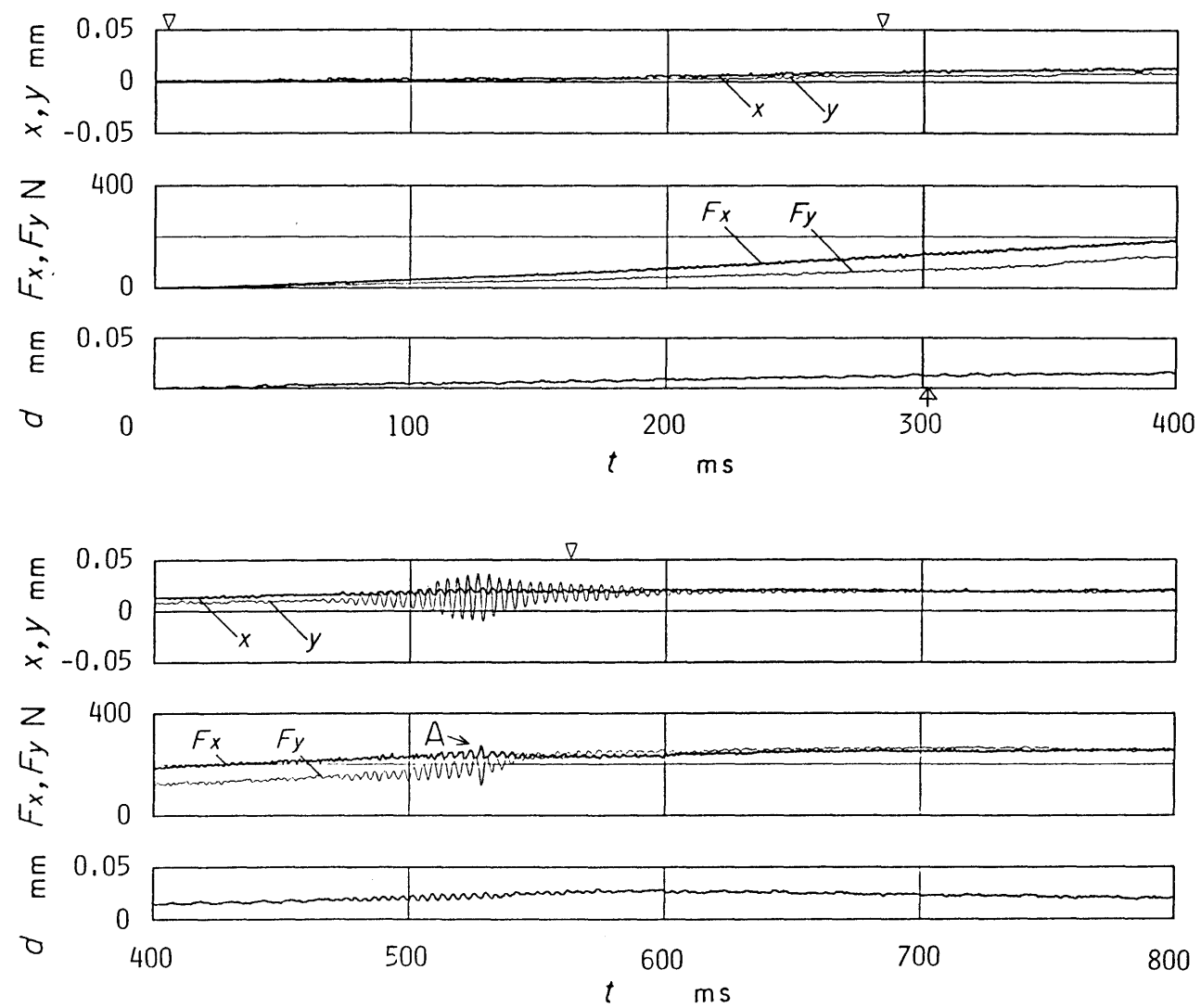


図 3. 2 びびり振動の発生例 ($d_0 = 0.05 \text{ mm/rev}$, $V_0 = 50 \text{ m/min}$)

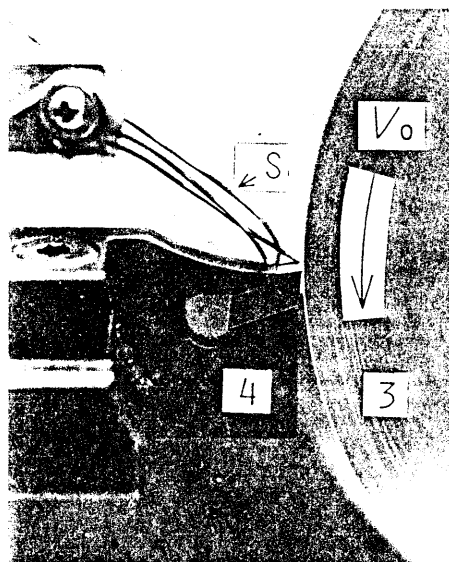
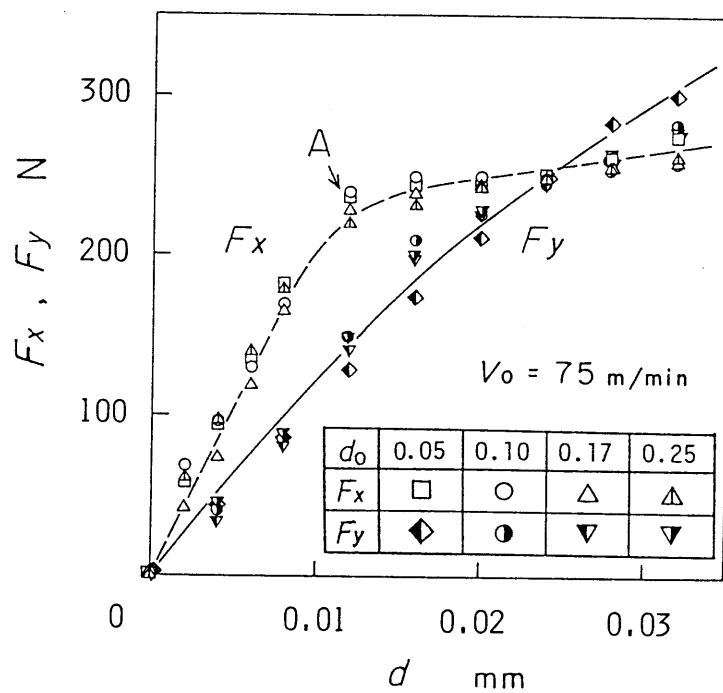
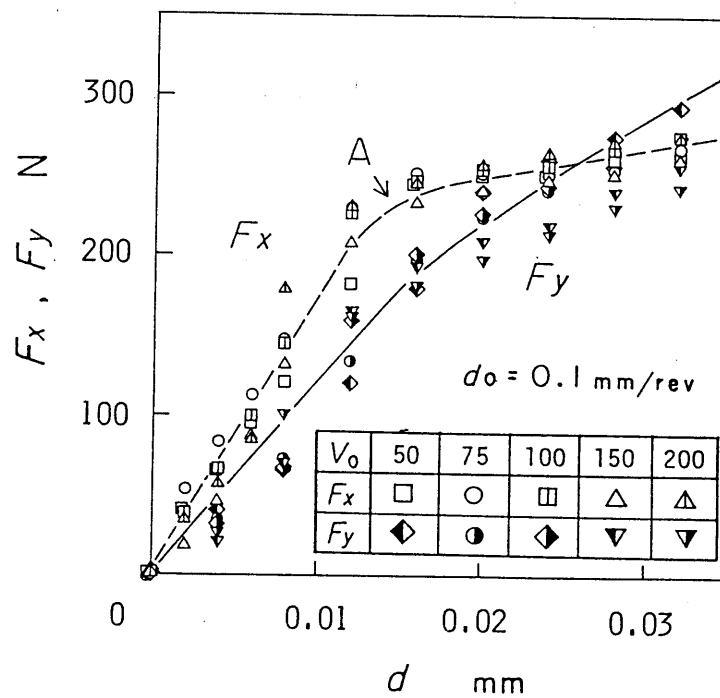


図 3. 3 工具・被削材と切り屑センサ



(a) $V_0 = 75 \text{ m/min}$

図 3. 4 切削力と切込み深さの関係



(b) $d_o = 0.1 \text{ mm/rev}$

図 3. 4 切削力と切込み深さの関係

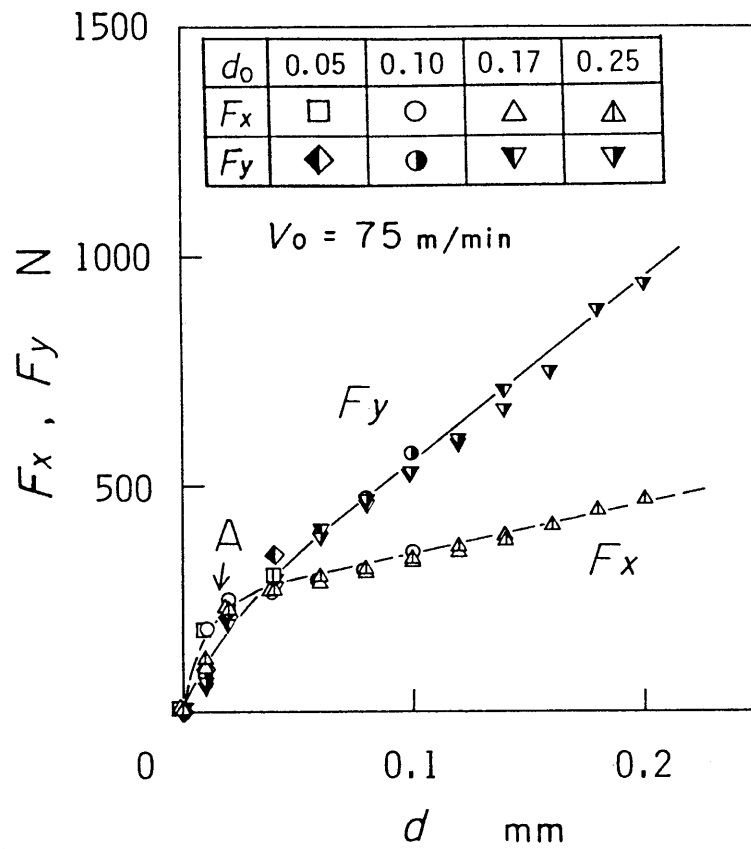


図 3. 5 切削力と切込み深さの関係

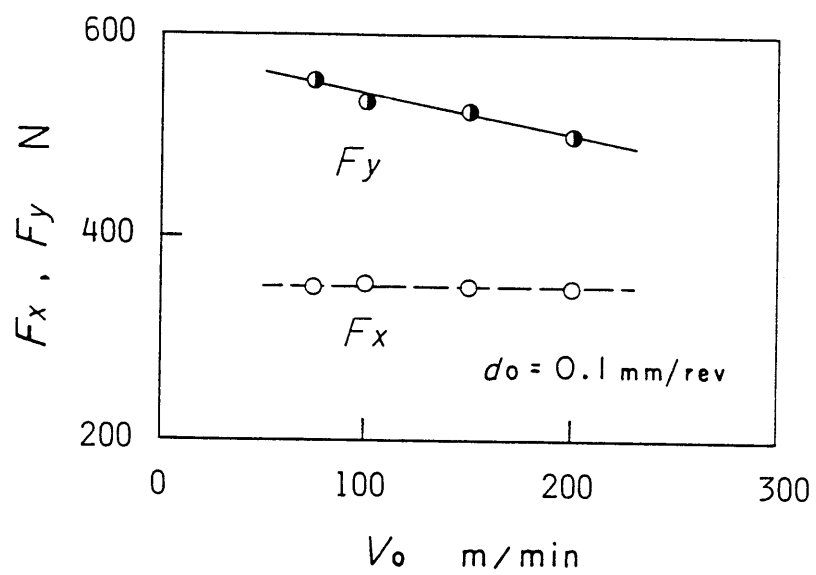


図 3. 6 切削力と切削速度の関係

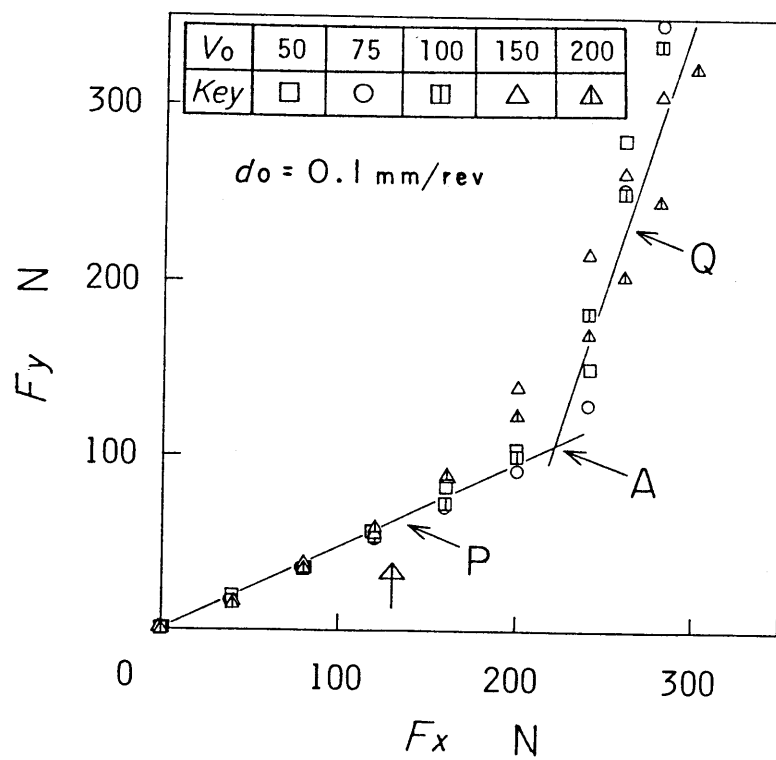


図 3. 7 主分力と背分力の関係

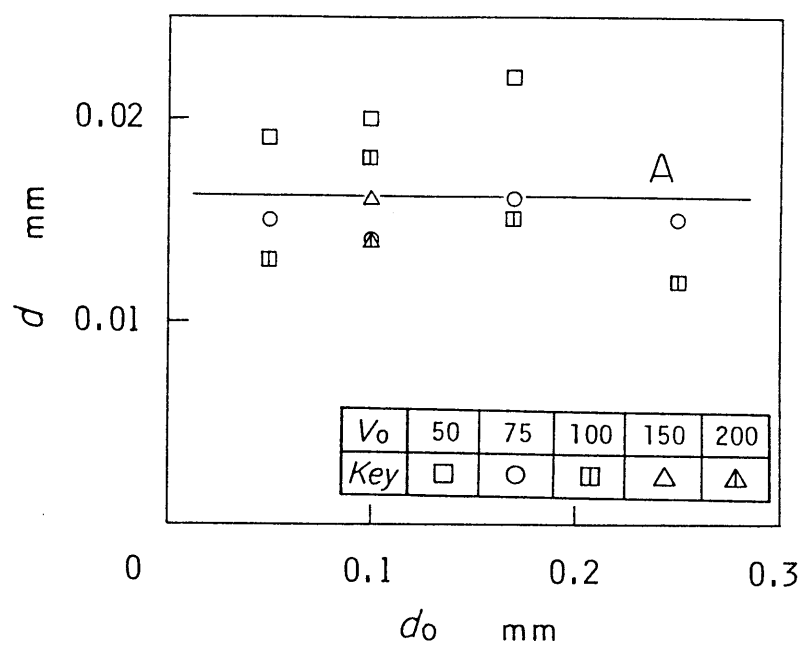


図 3. 8 切削開始点 A での切込み深さ

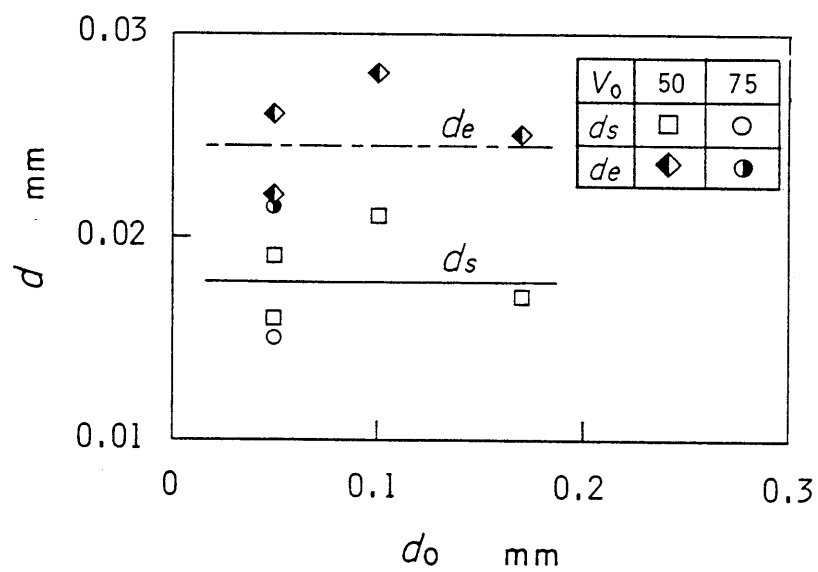


図 3. 9 びびり振動発生時，消滅時の切込み深さ

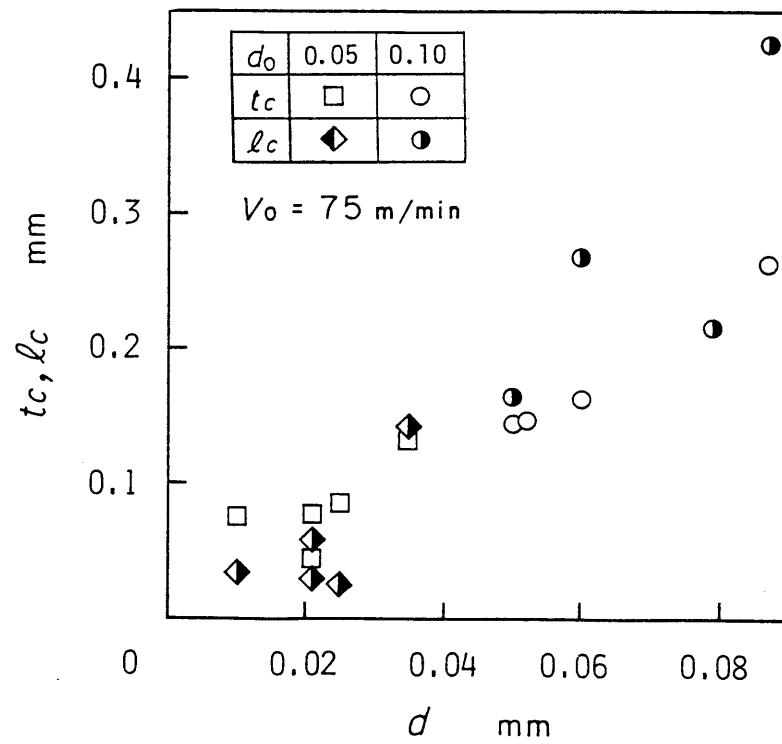


図 3. 10 切り屑厚さ，接触長さと切込み深さ

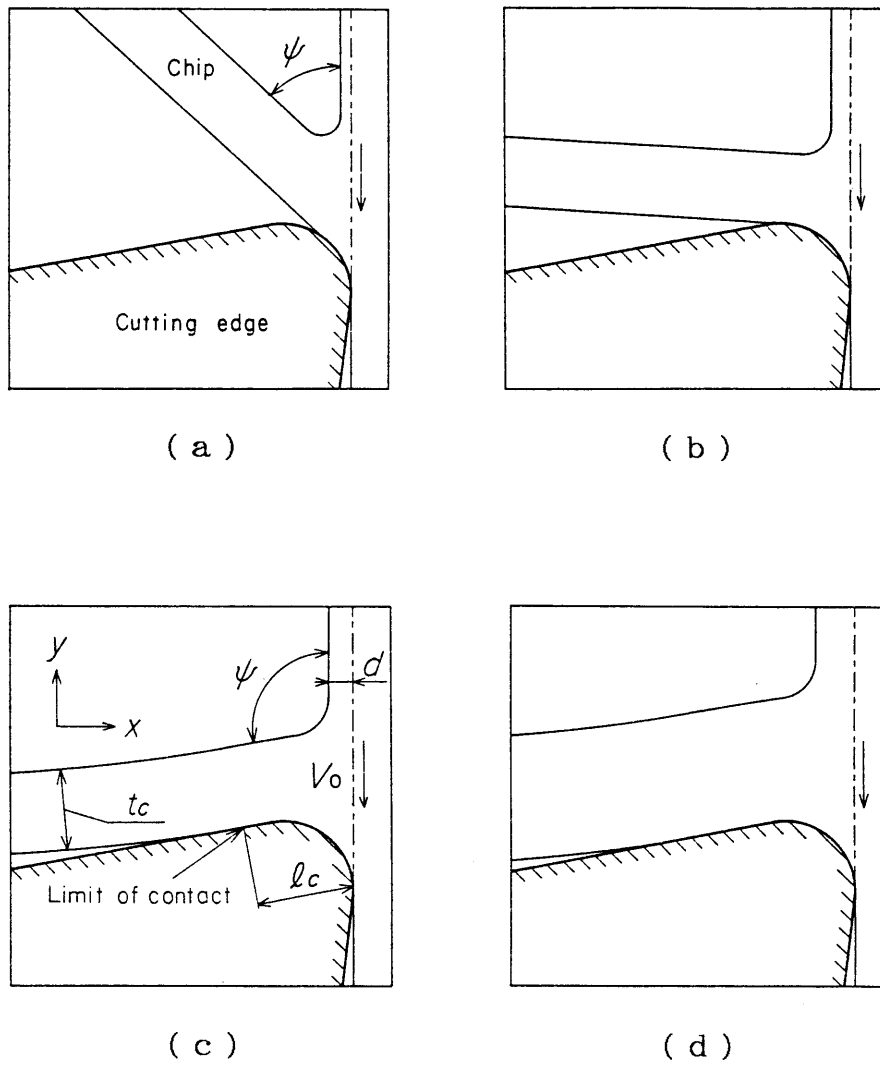


図 3. 1 1 切り屑の流出状態

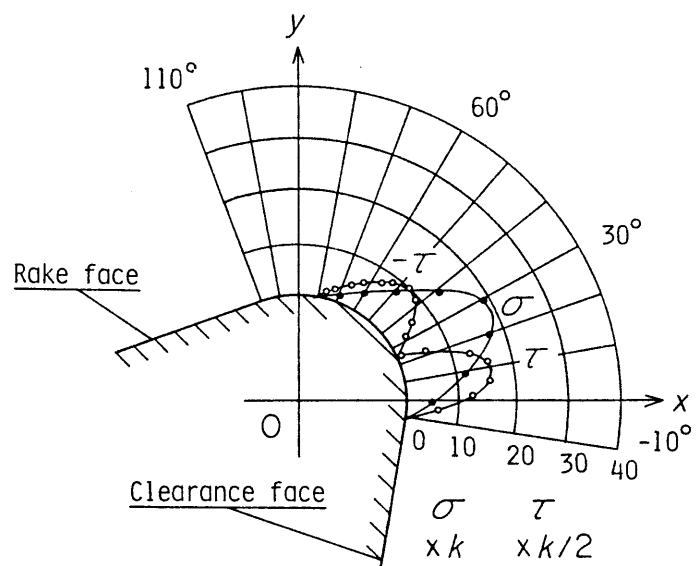


図 3. 1 2 工具刃先の応力分布⁽³⁸⁾ (k は楕次数)

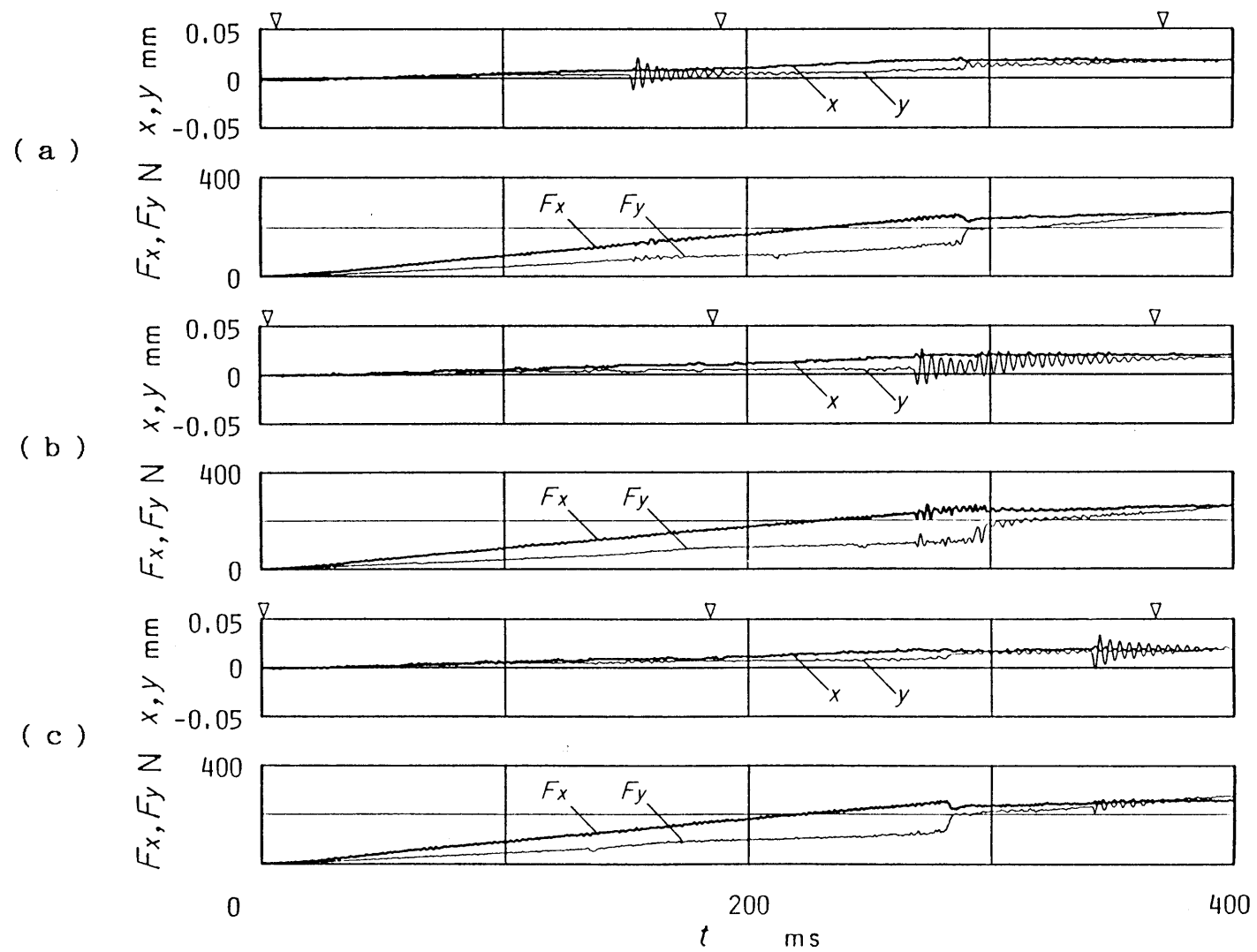


図3. 1 3 被削材に鉛直下方の衝撃を加えた例 ($d_0 = 0.1 \text{ mm/rev}$, $V_0 = 75 \text{ m/min}$)

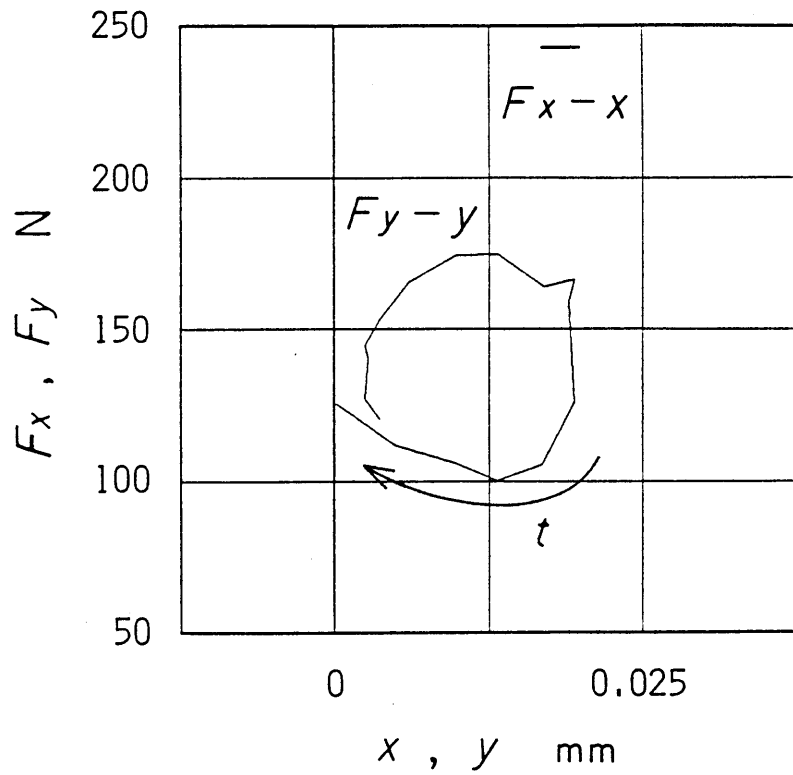


図 3. 1 4 切削力と被削材の変位との関係

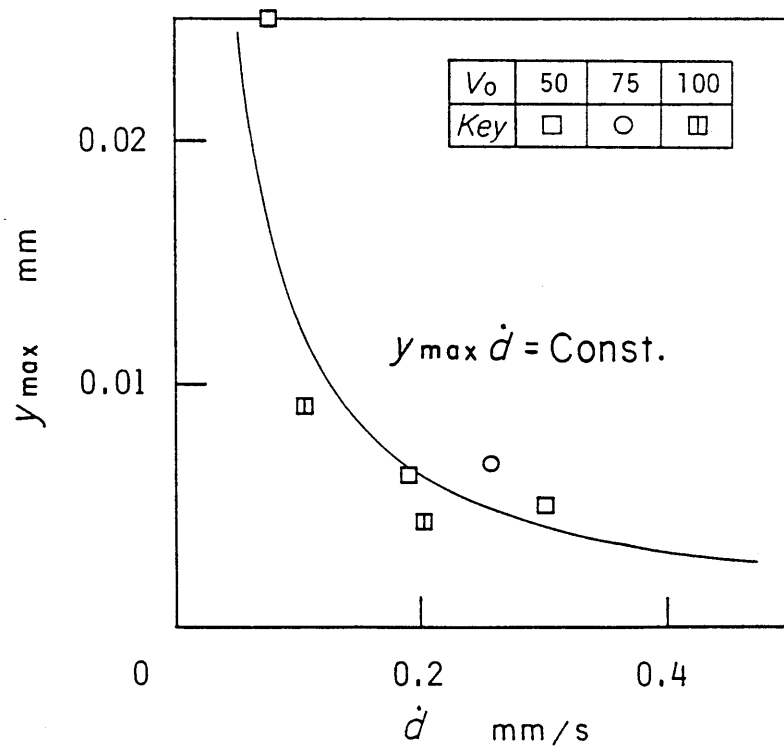


図 3. 1 5 びびり振動の振幅と切り込み速度

第4章 工具のすくい角が負の場合に 被削材のびびり振動に及ぼす 工具形状の影響⁽⁷⁹⁾

4. 1 まえがき

切削の初期に発生するびびり振動は、被削材の加工精度、工具の寿命などに悪影響を与えるのみならず、再生びびり振動の発生原因にもなる⁽⁷⁶⁾⁽⁷⁷⁾。切削開始後、切込みが深くなる時の切削状態は、単に切削速度、送りなどの切削条件だけでは決まらず、切込み深さ、工具形状によっても大きく変化する⁽³⁶⁾⁻⁽⁴⁰⁾。

著者らは、切削開始の直後に発生するびびり振動を実験的に調べることで、切込み深さや工具形状が切削力の静的、動的特性に及ぼす効果を求め、切削初期に発生するびびり振動の発生条件とその原因について考察した。第3章では、すくい角が正の工具を用いた旋削の初期に現れるびびり振動が、工具刃先の丸みに起因して発生することを示し、その発生機構を明らかにした。本章では、超硬工具に多いすくい角が負の工具を用いて旋削の実験を行い、その初期に発生するびびり振動が2種類の原因によることを示した。さらにそのびびり振動の発生条件、発生機構についても、第3章と比較しながら考察を行った⁽⁷⁹⁾。

4. 2 実験装置および実験方法

図4. 1には本章で用いた被削材の2自由度系振動モデルを示す。被削材の水平変位を x 、垂直変位を y 、背分力を F_x 、主分力を F_y 、切込み深さを d とし、被削材の自由振動に関する基準座標を $O-\xi\eta$ とする。実験装置および実験方法は前章までと同じなのでその説明を省略する。実験では、直径40mm、突き出し長さ300mmの丸軸の先端に取り付けた被削材の円周面を旋盤の前後送りによって二次元切削した。

切削条件および工具については以下に示す。

切削条件：送り $d_0 = 0.05 \sim 0.25 \text{ mm/rev}$

切削速度 $V_0 = 50 \sim 100 \text{ m/min}$

被削材： 黄銅板 (JIS H 3201, BsP3)

厚さ $b = 3\text{mm}$

直径 $D = 140 \sim 190\text{mm}$

(回転センターを使用した。)

工具： ホルタ (タンガロイ) ETFNR2020K33

スロ-フウェイチップ (タヤチニット) TNPA332

すくい角 -5° , 逃げ角 5°

刃先の丸み半径 $r = 36\mu\text{m}$ (実測値)

4. 3 実験結果および考察

本章の実験で発生したびびり振動の例を図4. 2に示す。図4. 2の上図の▽印は工具と被削材が接触を始めた点を始点としたときの半回転毎の印であり、下図の半印は切り屑が発生したことを表す印である。図4. 2と前章の図3. 2との比較により、(a) 背分力の時間に対する変化割合はA, Bの2箇所の位置で変化する、(b) びびり振動は(a)の2箇所(A, Bの位置)で発生しておりy方向の振動が顕著である、(c) びびり振動は切込み深さのある範囲でのみ発生する、ことがわかる。この章では、図4. 2に示すびびり振動の発生原因を調べ、その発生条件および発生機構について考察する。

4. 3. 1 切削力の静特性

この項では、まず、びびり振動の発生しない状態での切削力の特性を明らかにする。

図4. 3(a), (b)は切込み深さ d に対する背分力 F_x , 主分力 F_y の関係を表した。図4. 3(a)には切削速度が一定 ($V_0 = 75\text{m/min}$) で送り d_0 を変えた場合の結果を示し、図4. 3(b)には送りが一定 ($d_0 = 0.1\text{mm/rev}$) で切削速度 V_0 を変えた場合の結果を示した。図4. 4は図4. 3(b)のデータについて主分力 F_y と背分力 F_x の関係を表す。なお、びびり振動が発生する場合には振動が生じていない部分のデータのみを図に書き入れた。

図 4. 3 (a), (b), 図 4. 4 と第 3 章の図 3. 4 (a) (b), 図 3. 5 で得られた結果との比較から以下の類似点と相違点が明らかになる。

類似点：

(a) 図示の範囲において，切削力 F_x , F_y は送り d_0 ，切削速度 V_0 によらず，切込み深さ d のみによって決まる。

(b) 切込み深さ d に対する背分力 F_x の変化割合および背分力 F_x に対する主分力 F_y の変化割合が切込み深さ $d = 0$ から A 点までと，もう一つは B 点より深い切込みの 2 つの領域で一定値になる。第 3 章では A 点を変曲点として，その前後の切込み深さの領域で一定値になった。

相違点：

(a) 切込み深さに対する背分力 F_x の変化割合および背分力 F_x に対する主分力 F_y の変化割合は A, B の 2 点で変化する。

(b) B 点より深い切込みにおける (a) の二つの変化割合は第 3 章とは異なる。この考察に基づいて，A, B の 2 点に着目すると，実験結果を表 4. 1 のようにまとめることができる。表中には第 3 章から得られる結果も記入した。

つぎに，図 4. 3 (a), (b), 図 4. 4，表 4. 1 とこれまでに報告された研究⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽²⁶⁾との比較をもとにして，A 点，B 点の物理的意味を考える。

山本・中村⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾は，(a) 切削を開始した後，切削力の変化割合の最初に変化する点が切削開始点である，(b) この点における切込み深さ d ，切削力 F_x , F_y は工具刃先の丸み半径に比例する，(c) この点までの切削力は切込み深さに比例する，(d) 切削開始点よりわずかに深い切込みから切削力にすくい角の影響が現れる，と報告している。本章においても (a)～(c) の条件が満たされているので，図 4. 3，図 4. 4 に示した A 点は第 3 章と同じく山本・中村の報告した切削開始点であること，および A 点までの切削状態は工具の刃先の丸み半径の大小によって変わらないこと，を確認できた。また (d) に関して Albrecht⁽²⁶⁾ は，切削力の変化割合が変化した後の切込みにおいて，切込み深さに対する切削力の変化割合が刃先の丸み半径には関係しないこと，すくい角の強い影響を受けること，を報告している。したがって，B 点をすくい面の効果が現れ始める点と考えることができる。

4. 3. 2 びびり振動の発生原因

この項では高速度カメラを用いた実験に基づいて、振動の発生原因を解明していく。

切り屑の流出状態を高速度カメラを用いて観察し、変位、切削力の測定結果と対応させたところ、流出状態を四つに分けることができた。

(1) 工具が被削材に接触してから切り屑が発生するまで。

工具が被削材表面を擦過していると考えられる。

(2) 切り屑が発生してからB点まで。

カールしない、まっすぐな切り屑が発生する。切り屑の流出角 ψ （図4. 8を参照）が時間の経過にしたがって、 45° から 85° （すくい面の直線部分に沿う方向）へと変化する。A点近傍で振動が発生しているときには流出角 ψ が変動していた。

(3) B点から振動の終了まで。

B点のときに切り屑の長さが急に長くなる。B点の直後から切り屑のカールが始まる。切り屑は工具すくい面の直線部分にほぼ沿って流出する。びびり振動をしている間、切り屑は工具のすくい面を押し付けるように振動する。

(4) 振動終了後。

切り屑は一定のカール半径を保ったまま、振動することなく流出する。

切削力の静特性も考えると、このうち(1)が摩擦領域、(2)が掘り起こし領域から切削領域の初期に対応すること⁽⁴⁰⁾は第3章と同じである。したがって、A点近傍の(2)で発生する振動は、第3章で示した振動と同じであることが分かる。

一方、(2)の後半から(3)(4)にかけての切削状態は、次の点で第3章とは異なっている。第一は切り屑の長さがB点から急に長くなること。第3章ではA点の直後から切り屑の長さが急に長くなった。第二はB点から背分力 F_x が再び増加を始めること。第三は(3)のときびびり振動が発生すること。

第一および第二の相違点はすくい角の違いによって生ずると考えられる。すなわち、すくい面に沿った切り屑の流出は、すくい角が負の場合には正の場合よりも起きにくいと考えられる。したがって、すくい角が負の本章ではすくい角が正の第3章と異なり、切り屑の長さが急に長くなる点（すなわち、すくい面に沿っ

た切り屑の流出が始まる点)が第3章よりも遅いB点にずれている。また前項で考えたように、B点以降、切込みが深くなるに従って切り屑のすくい面に及ぼす力が大きくなるが、その大きさと方向はすくい角による影響を強く受ける。したがって、B点よりあとの切込み深さに対する切削力の変化割合はすくい角の異なる第3章と本章では異なる。

次に、第三の相違点のびびり振動について、その発生原因を考察する。図4.5(a), (b)には図4.2の $t = 335 \sim 339 \text{ms}$ における、変位 x , y と切削力 F_x , F_y の関係を示した。図4.2, 図4.5(a), (b)を見ると、この振動では、 x 方向の運動によりエネルギーが失われているにもかかわらず、 y 方向の運動により振動系にエネルギーが入ってその振幅が大きくなっている。被削材のばねによる連成も y 方向から x 方向にエネルギーを伝えるが、これは自励的な振動を引き起こさない。そこで、切削を介して y 方向と x 方向が連成し、それが振動を引き起こしているのではないかと考えられるので、確認のための一連の実験を行った。

実験ではまず、びびり振動が発生しない限界の切削条件($d_0 = 0.075 \text{mm/rev}$, $V_0 = 75 \text{m/min}$)で切削し、ハンマーで被削材に鉛直下方への衝撃を加えた。衝撃は、切込み深さが図4.2で振動が発生しているのと同じ切込み深さになったとき(図4.6の半印の瞬間)に与えた。図4.6はこのときの変位 x , y , 切削力 F_x , F_y , 切込み深さ d の時間変化を表す。

図4.7は衝撃を加えた直後($t = 115 \sim 119 \text{ms}$)の変位 x , y と背分力 F_x の関係を示す。図4.7から、背分力 F_x は被削材が下方に動く($\dot{y} < 0$)ときに大きくなり、上方に動くとき($\dot{y} > 0$)に小さくなること、つまり、 y 方向の運動が x 方向の運動に切削を介して連成していることが分かる。

次に、連成の機構を明らかにするために、切り屑が流出する状態を詳細に調べて、その状態を模式図4.8(a)~(d)に表した。図は切削速度 $V_0 = 75 \text{m/min}$ のときの結果である。図(a)は切り屑の発生時、図(b)はB点での振動の発生時、図(c)は図(b)の振動の終了時、図(d)は切込みがさらに深くなったとき、を表す。図(b)には山本・中村の実験結果⁽³⁸⁾を参考にして、刃先が切り屑に及ぼす垂直応力 σ , せん断応力 τ を書き入れた。図中の切込み深さ d に対する切り屑厚さ t_c および切り屑とすくい面の接触長さ l_c の比 t_c/d , l_c/d は第3章と同様の方法で求めた。この比は送り d_0 , 切込み深さ d に関係なくほぼ一定になった。切削速

度 V_0 を変えた場合の値を表4. 2に示した。第3章から得られる値も表4. 2に書き入れた。

図4. 8 (b) のB点の切削状態を考えれば、連成の機構は次のように説明できる。

- (1) 切り屑がまだすくい面に沿って流出していないときに被削材が鉛直下方へ動いたとする ($\dot{y} < 0$) 。
- (2) このとき切り屑はすくい面に押し付けられ、この面に沿って流出を始める。
- (3) 切り屑のすくい面に沿った流出はせん断応力 ($-\tau$) を大きくする。
- (4) せん断力の増加によって背分力 F_x が大きくなり、被削材は右方向に動こうとする。
- (5) その後、被削材が右方向に動くことにより切込み深さ d が小さくなるので、背分力 F_x 、主分力 F_y が小さくなる。
- (6) 被削材が鉛直上方に動くとき ($\dot{y} > 0$) は上記(2)～(5)とは力および運動の方向が逆になる。

以上の考察から、B点の近傍で切り屑がすくい面に沿って流出するかしないかを繰り返すときに切削力の変化が現れること、これによって鉛直方向と水平方向の連成が生じてびびり振動が自励的に発達すること、が分かる(図4. 7に現れる程度の連成で自励振動が生ずることについては別の機会に報告したい)。ただし、切込みが深くなると切り屑がすくい面に沿ってたえず流出しており、上記(2)の切り屑の流出状態の変化はなくなる。つまり、ここで説明したびびり振動は切込み深さの限られた範囲のみで発生する(深い切込みにおいて衝撃を加える実験を行い、振動が減衰して短時間に消滅することを確認した)。

最後に、発生するびびり振動の振幅の大きさについて考える。上でみたように、びびり振動は切込み深さの限られた範囲で発生するので、この範囲を通過する時間が長いほどその振幅が大きくなると考えられる。図4. 9には切込み深さの増加速度 \dot{d} とそのとき発生する振動の最大振幅 x_{max} , y_{max} の関係を表した。図中の実線は $x_{max} \dot{d} = \text{一定}$ および $y_{max} \dot{d} = \text{一定}$ の直角双曲線を表す。各切削速度に対して実験結果はこの曲線によく一致している。したがって、発生する振動の振幅は不安定な切削となる領域を通過する時間によって決まることを確認できた。ただし、切削速度 V_0 が小さくなるほど同じ \dot{d} に対してびびり振動の振幅 x_{max} ,

y_{max} が大きくなっている。表 4. 2 を見ると V_0 が小さいほど切込み深さ d に対して切り屑厚さ t_c 、接触長さ l_c が大きくなっている。このため、低速切削ほど切り屑が厚くならないとすくい面に沿ったなめらかな流出にならないために、同じ切込み速度に対してびびり振動の振幅が大きくなっているのではないかと考えられる。

4. 4 まとめ

すくい角が負の工具を用いた場合に発生するびびり振動について実験的な研究を行ったところ、次の結論を得た。

- (1) 切込み深さに対する背分力の変化割合が、A, B の 2 箇所に変化する。A 点は山本・中村の指摘した切削開始点であり、B 点は切り屑のすくい面に沿った流出の始まる点である。
- (2) 結論 (1) に挙げた A, B の 2 点においてびびり振動が発生する。
- (3) A 点で発生するびびり振動は第 3 章で報告したびびり振動と同じである。
- (4) B 点でのびびり振動は、切り屑がすくい面に沿って流出するかしないかを繰り返す不安定な切削状態になると、鉛直方向と水平方向の運動の連成が生じるために発生する。
- (5) 結論 (4) のびびり振動は B 点近くの限られた切込み深さの範囲において発生する。
- (6) 結論 (5) の切込み深さの範囲を通過する時間が長いほど発生するびびり振動の振幅は大きくなる。

表 4. 1 切削力の特徴

Tool		Present Chapter	Chapter 3
Radius of tool edge r (μm)		36	70
Value at point A	d (μm)	8	18
	F_x (N)	120	200
	F_y (N)	60	110
Value at point B	d (μm)	14	—
	F_x (N)	130	—
	F_y (N)	120	—
$\Delta F_y / \Delta F_x$ along P		0.53	0.55
Q		1.3	2.1

表 4. 2 切り屑厚さ, 接触長さと切込み深さの関係

Tool	Present Chapter			Chapter 3
V_0 (m/min)	50	75	100	50, 75
t_c / d	6.2	4.4	3.3	2.5
l_c / d	6.2	5.6	5.1	5.0

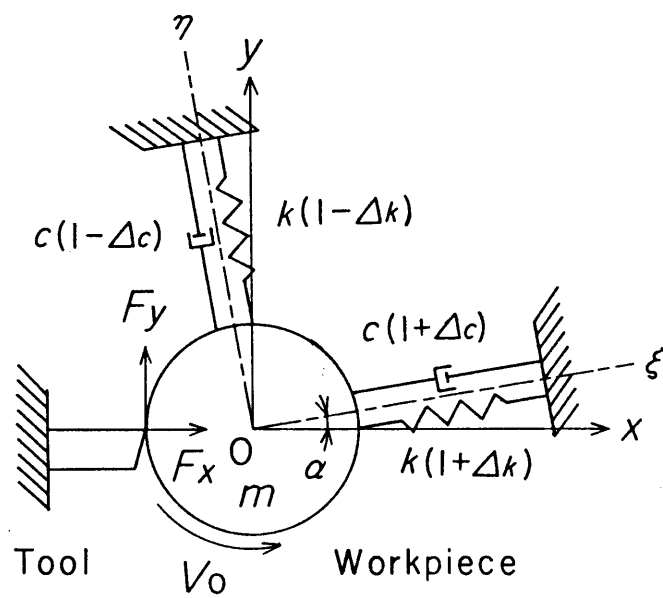


図 4. 1 被削材の 2 自由度系振動モデル

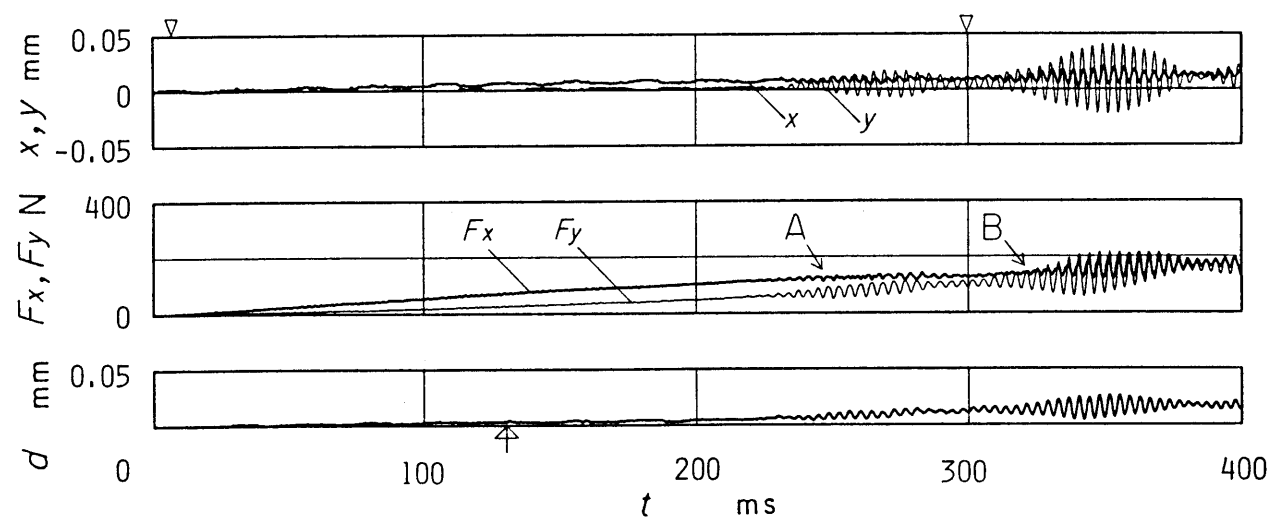


図 4. 2 びびり振動の発生例 ($d_0 = 0.05 \text{ mm/rev}$, $V_0 = 50 \text{ m/min}$)

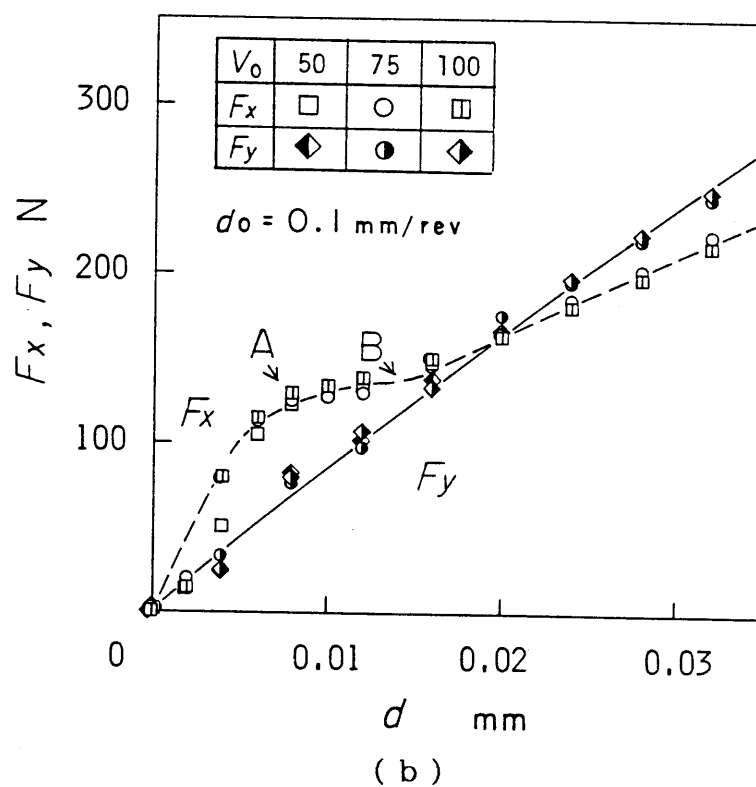
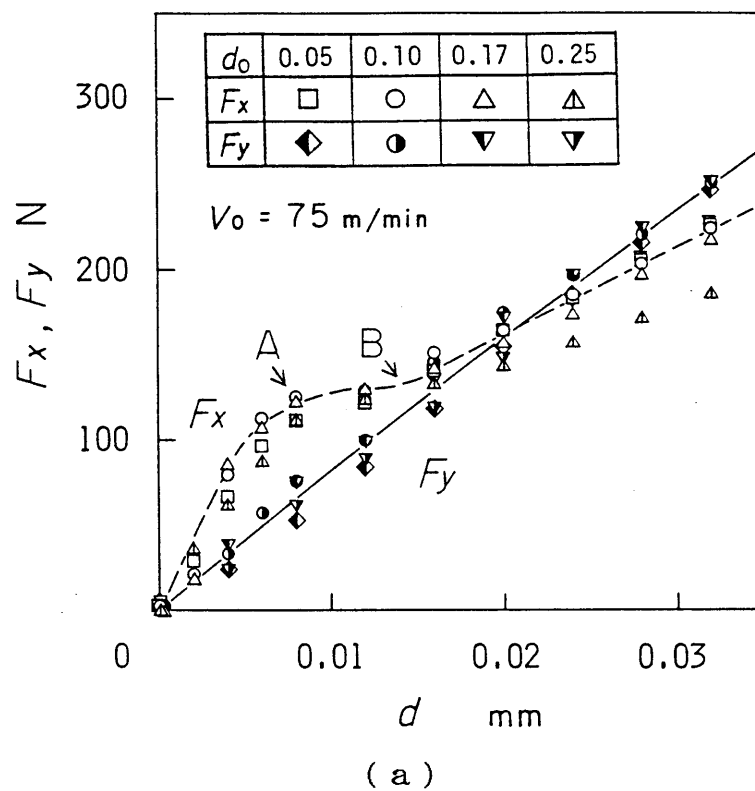


図 4. 3 切削力と切込み深さの関係

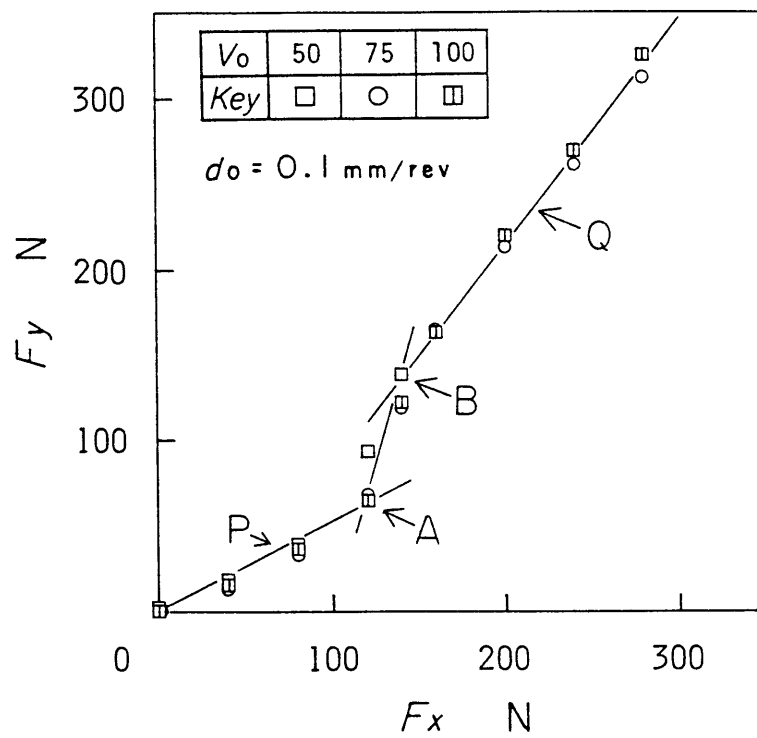


図 4. 4 主分力と背分力の関係

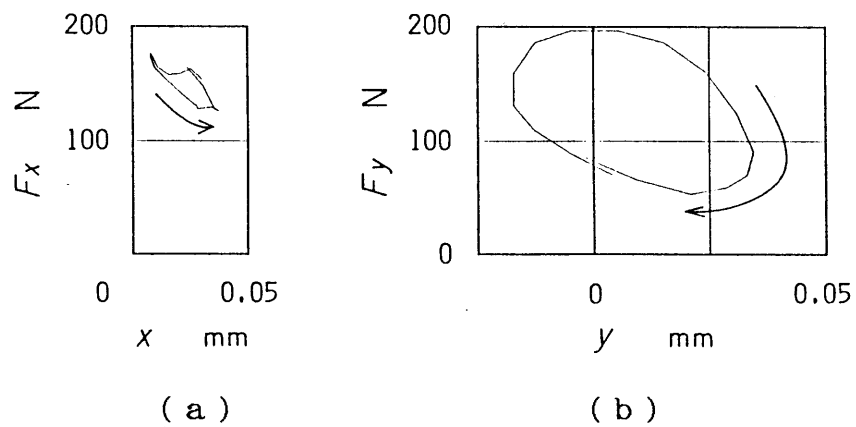


図 4. 5 変位 x , y と切削力 F_x , F_y の関係
($d_o = 0.05 \text{ mm/rev}$, $V_o = 50 \text{ m/min}$)

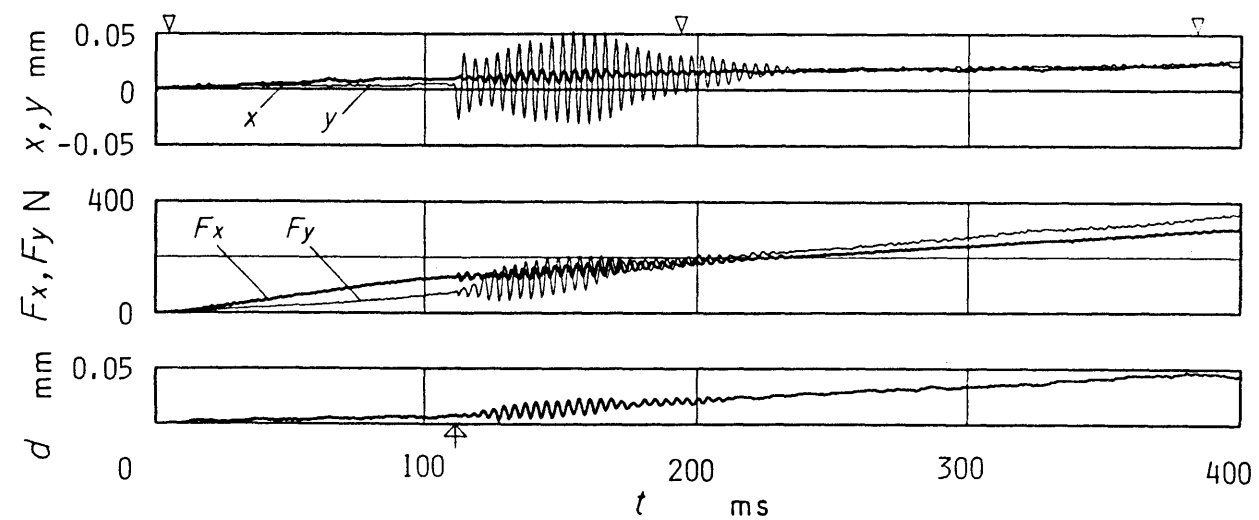


図 4. 6 被削材に鉛直下方への衝撃を加えた例

($d_0 = 0.075 \text{ mm/rev}$, $V_0 = 75 \text{ m/min}$)

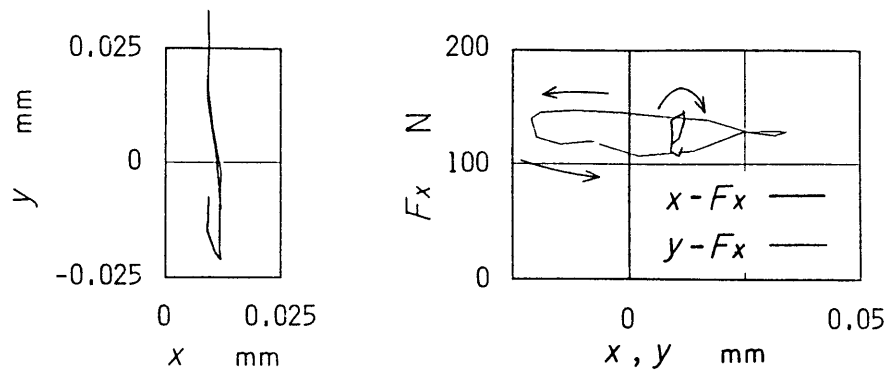


図 4. 7 変位 x , y と背分力 F_x の関係

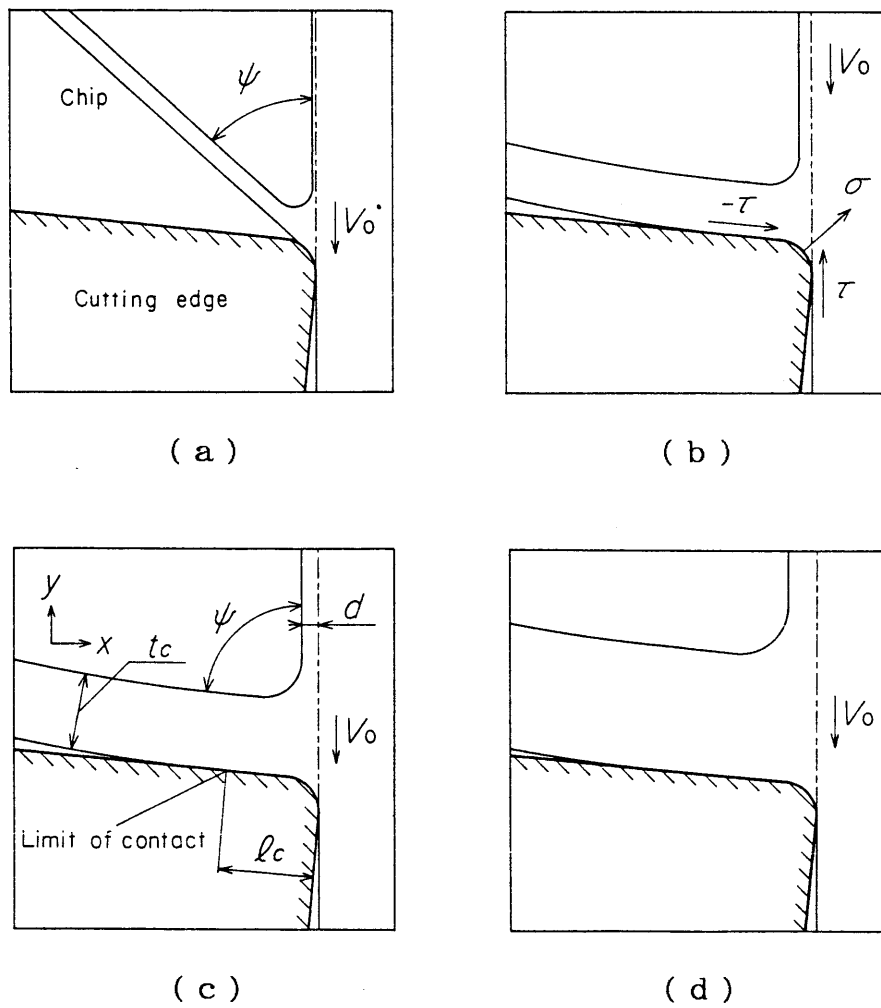


図 4. 8 切り屑の流出状態

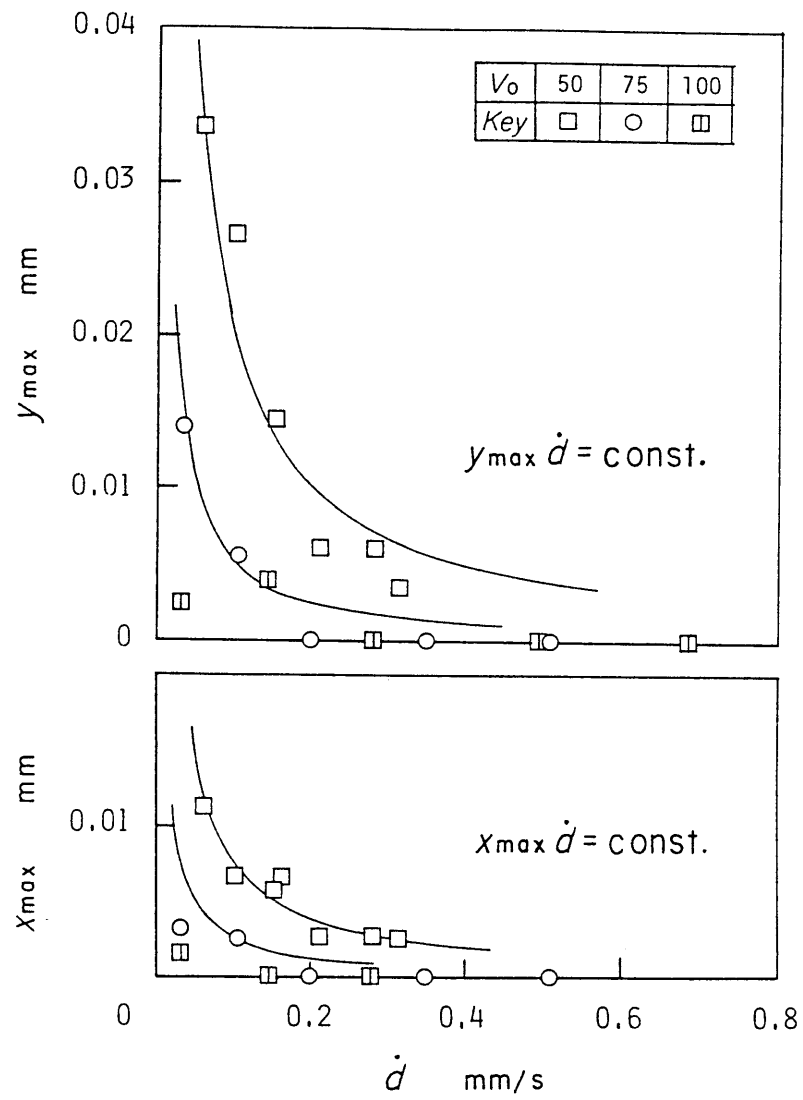


図 4. 9 びびり振動の振幅と切込み速度

第5章 工具と被削材が部分的に離れる 場合に被削材のびびり振動に及 ぼす工具形状の影響⁽⁸⁰⁾

5. 1 まえがき

びびり振動について研究を行う場合には、発振限界の推定、振動現象の解明が主要な問題点となる。著者らはこのうち振動現象の解明を目指して研究を行ってきた。従来、振動現象の解明については、近藤ら⁽²⁰⁾、Tobiasら⁽²¹⁾の研究が報告されており、工具と被削材が離れる場合に、(a) 多重再生効果が生じて振動の振幅が抑えられる⁽²⁰⁾、(b) 小振幅の振動が消滅する切削条件でも、切削力の非線形性によって大振幅の振動は消滅しない⁽²¹⁾、等が明らかにされてきた。しかし、これらの研究には、(1) 発達した後の振動の特性のみに注目している、(2) 工具と被削材が離れる場合には工具刃先の影響が大きいと考えられるが、その効果についての考察がない、等の問題が含まれている。実際、びびり振動は、切削開始後、短時間のうちに発達することが多いので、現象を解明するためには切削初期に注目する必要がある。切削初期は、また、切込みが浅いので、小振幅の振動でも工具と被削材が離れやすく、工具刃先の影響も受けやすい。

そこで、本章では、工具と被削材が離れる場合の振動現象を解明するという観点から、特に切削現象に及ぼす工具刃先の効果について報告する。実験は主に、被削材の剛性が低く、びびり振動の発生しやすい条件で、2種類の工具を用いて行った。工具による相違および被削材の剛性の大小による影響についても考察した⁽⁸⁰⁾。

5. 2 実験装置および実験方法

図5. 1には本章で用いた被削材の2自由度系振動モデルを示す。本章では前章までとほぼ同じ実験装置を用いたので、被削材の水平変位 x 、垂直変位 y 、背分力 F_x 、主分力 F_y 、切込み深さ d や直交座標系 $O - x y$ 、 $O - \xi \eta$ についての説

明は省略する。

実験では、四つづめのチャックに保持した直径40mm，長さ300mmの丸軸に円板状の被削材（黄銅板；JIS H 3201, Bsp3, 厚さ $b = 3\text{mm}$, 直径 $D = 140 \sim 190\text{mm}$ ）をねじ止めし，丸軸の右端を回転センターで支持しない場合（条件1），回転センターで支持する場合（条件2）の二つの条件で切削した。条件1，条件2における被削材の振動特性を表5. 1に示す。工具には表5. 2に示す2種類のスローアウェイ工具 I，IIを用いた。

なお，本章では，被削材を回転センターで支持しない場合（条件1）に得られる結果について主に考察する。

5. 3 実験結果および考察

第3章，第4章で，刃先の丸み，すくい角がびびり振動の発生に強い影響を及ぼすということがわかった。そこで，本章ではまず，剛性の低い被削材（条件1）を削る場合にこれらの工具形状の影響がどのように現れるのか，を調べた。

図5. 2 (a), (b) はそれぞれ，工具 I および II を用いて切削したときの被削材の水平変位 x ，垂直変位 y ，背分力 F_x ，主分力 F_y ，切込み深さ d の時間的な変化を表す。上図の▽印は工具と被削材が接触を始めたときを始点にした被削材の半回転ごとの印である。両図を比較すると次の特徴を挙げることができる。

(1) 工具による相違が小さい。

接触開始から $t = 450\text{ms}$ まで，図 (a) (b) の変位と切削力の間には，その大きさ，変化量およびそれぞれの波形の変化していく様子についてほとんど差異がない。また I，II いずれの工具を用いた場合にも，切削初期に発生する切り屑は長さ 2mm ほどの三日月状断片であった。ただし， $t = 450\text{ms}$ 以後の振動の発達する様子は図 (a), (b) で異なっている。

(2) 振動の特性が時間とともに変化する。

図 (a) (b) とともに，切込み深さ d がほぼ零のときからびびり振動が生じている。しかし，一度発生した振動も $t = 300\text{ms}$ 以後になると切削力の変動量，振動の振幅が時間の経過とともに小さくなる。また，切削力の波形も時間とともに変化していく。

ここに挙げた特徴は、これまでに、他の研究者が行ってきた研究や前章までに著者らが報告した研究には含まれていない。以下の項では、上記の特徴をもたらす原因およびその原因と工具形状との関係を明らかにしていく。

5. 3. 1 工具による相違について

この項では、本章で扱っているびびり振動の一番目の特徴である、工具による相違が小さいことについて考察する。

振動時の特性について考える前に、振動が生じないときの切削力の特性を示しておく。図 5. 3 (a), (b), 表 5. 3 は工具 I, II を用いて切削したときの切込み深さ d と切削力 F_x , F_y の関係を表す。図 5. 3 (a), (b) は切込み深さ $d = 0 \sim 35 \mu\text{m}$ の切削力の静特性を表し、表 5. 3 は切削速度 $V_0 = 100 \text{ m/min}$, 切込み深さ $d = 50 \sim 100 \mu\text{m}$ における切削力の変化割合 $\Delta F_x / \Delta d$, $\Delta F_y / \Delta d$ を表す。

次に、切削力の特性とびびり振動の関係について考察する。

まず、定常切削時、つまり、送り d_0 と切込み深さ d が等しいときの切削力の特性に注目して考える。従来からの考えに従えば、定常切削時の背分力の変化割合 $\Delta F_x / \Delta d$ が異なる場合にはびびり振動の発振限界、振動の発達の挙動も異なってくると考えられる。しかし、図 5. 2 (a), (b) の場合には、表 5. 3 に示す $\Delta F_x / \Delta d$ の値が大幅に異なるにもかかわらず、発生する振動の特徴は同じになっている。したがって、本章で扱っている、工具と被削材が部分的に離れる場合には、単に定常切削時の切削力の特性を考えただけではその現象を説明することができない。

そこで次に、 $d_0 = 0.1 \text{ mm/rev}$, $V_0 = 100 \text{ m/min}$ で振動が生じているときの切削力の動特性について考える。図 5. 4 (a) は図 5. 2 (a) の $t = 200 \sim 205 \text{ ms}$ における切込み深さ d と切削力 F_x , F_y の関係を示し、図 5. 4 (b) は図 5. 2 (b) の $t = 300 \sim 303.5 \text{ ms}$ における関係を示す。図 5. 4 (a), (b) 中の破線は切込み深さ d と切削力 F_x , F_y の静特性を表し（図 5. 3 を参照のこと）、実線は振動時の動特性を表す。

図 5. 4 (a), (b) から次の共通点を挙げることができる。

(1) 振動時にも切削力は振動が生じないときの静特性に沿って変化する。これは

Tobiasらが有限振幅のびびり振動について報告した結果と一致する⁽²¹⁾。

(2) 切削力は、山本・中村の指摘した切削開始点⁽³⁶⁾（図5. 3 (a), (b) のA点）を中心にして、工具Ⅰ, Ⅱの背分力の変化割合 $\Delta F_x / \Delta d$ が等しい範囲で変動する。つまり、切削力の動特性は図5. 4 (a), (b) に示すように相似的である。

したがって、工具が異なるにもかかわらず図5. 2 (a), (b) の $t = 450\text{ms}$ までの振動の特徴が同じになる理由は、上記(2)に示すように、工具Ⅰ, Ⅱの切削力の特性が同じになる範囲で振動が生じているためであることが分かった。この考察および第3章、第4章の考察から、本章で扱っているびびり振動は刃先の丸みに関係し、すくい角には関係しないことも理解できる。ただし、図5. 2 (a), (b) で $t = 450\text{ms}$ 以降になると切込み深さがそれぞれ $d = 38\mu\text{m}$, $d = 20\mu\text{m}$ になるので、背分力の変化割合も表5. 3に示した値にほぼ等しくなる。したがって、振動の発達する様子も工具Ⅰ, Ⅱによって大きく異なる。

5. 3. 2 振動特性の変化について

この項では、本章で扱っているびびり振動の二番目の特徴である、振動特性が時間とともに変化すること、について考察する。前項から工具による相違を考えなくてもよいことが分かったので工具Ⅱ（図5. 2 (b)）の場合についてのみ考える。

振動の発生、収束は切込み深さ d と切削力 F_x , F_y の振動状態における関係によって決定されるので、図5. 5 (a)～(d)にはこれらの関係が時間の経過につれて変化する様子を示した。図5. 5 (a)～(d)より次の点が明らかになる。

- (1) 振動の振幅が大きくなる時（図5. 5 (a), (b)）には、切削開始点Aよりも浅い切込み深さの範囲で、切込み深さと背分力の間に位相差（図5. 5 (a) (b) に矢印で示す反時計回り）が生じて振動系にエネルギーが流入する。
- (2) 振動の振幅が小さくなる時（図5. 5 (c), (d)）には、切込み深さと切削力の間に位相差がなくなり、振動系へのエネルギーの流入がなくなる。
- (3) 図5. 5 (b), (c) で切削力は切込み深さに対して非線形的に変化する。このことは図5. 2 (b) の切削力の波形が正弦波的ではなく下にとがっていることから分かる。

(4) 図5. 5 (b), (c), (d) となるにしたがって、切削力は、切削開始点Aよりも深い切込みにおける静特性（破線）とほぼ同じ勾配で変化するようになる。

これらの結果から、水平方向の速度 \dot{x} に比例する背分力の速度係数⁽¹³⁾が切込み深さによって異なること、切込み深さに対する切削力の非線形性によって切削力の波形が変化することが分かる。次の項では、これらの特性が生じる原因について考察する。

5. 3. 3 振動の発生原因について

第3章、第4章で著者らが報告したびびり振動にはその発生原因から考えて、次の特徴があった。

(1) 切り屑の流出状態が変化するような切込み深さにおいてびびり振動が発生する。

(2) ある一定の切込み深さの範囲のみで発生する。

本章で扱っているびびり振動には上記(1)(2)のような特徴がないので、振動の発生原因についても改めて考える必要がある。第3章、第4章では、高速度カメラを用いて観察した切り屑の流出状態の変化を被削材の変位および切削力の変化と関係付けることによって振動の発生原因を解明してきた。しかし、本章では、振動が発生するときに切り屑がばらばらになるので、切り屑の流出状態と変位、切削力の関係を求めることができない。そこで、Pearceらが工具のすくい面と切り屑の干渉作用について行った研究方法⁽⁵²⁾に従い、切り屑の変形を切込み深さおよび切削力の変化と関係づけることによって、振動の発生原因についての解明を試みる。

切り屑の変形状態を知るために、回転センターで支持した被削材（条件2）に、水平方向に衝撃を加える実験を行った。図5. 6 (a), (b) は衝撃を加えた後の切込み深さ d と切削力 F_x , F_y の関係を表す。図5. 6 (a) は切削開始点よりも浅い切込み深さ（ $d = 8 \mu\text{m}$ ）で衝撃を加えた場合を、図5. 6 (b) は定常な切込み深さになった後（ $d = 50 \mu\text{m}$ ）で衝撃を加えた場合を示す。なお、図5. 6 (b) は図5. 6 (a) の倍のスケールで表示した。図5. 6 (a) と図5. 5 (a), 図5. 6 (b) と図5. 5 (b) の切削力の動特性は同じであると見なせるので、条件2の

場合に得られる結果を条件 1 の場合に適用できるものと考えてよい。

図 5. 7 (a), (b) は図 5. 6 (a), (b) に対応して得られる切り屑の顕微鏡写真である。図 5. 6 (a), (b) に記した①～⑤の番号と図 5. 7 (a), (b) に記した①～⑤の番号はそれぞれほぼ同一の瞬間であることを表す。図 5. 6, 図 5. 7 より次の点が明らかになる。

- (1) 衝撃を加えることによって切込み深さ d が $8\mu\text{m}$ から $24\mu\text{m}$ に変化しても切り屑厚さ t_c は $120\mu\text{m}$ のままで変化しない (①の位置での変化)。
- (2) 切込み深さ $d = 0\mu\text{m}$ の状態でも切り屑厚さ $t_c = 50\mu\text{m}$ である (②の位置)。
- (3) 図 5. 7 (a) では切込み深さの変化に対する切り屑厚さの変化が小さい。
- (4) ①～②, ②～③と変化するときのせん断角の変化が大きい (写真の右下がりのせん断面に注目すること)。
- (5) 図 5. 7 (b) の④⑤では切込み深さに対する切り屑厚さの比が一定になる ($t_c / d = 3.0$)。
- (6) ④～⑤と変化するときのせん断角の変化が小さい。
- (7) 同一の切込み深さに対する切り屑厚さの比 t_c / d が図 5. 7 (a), (b) で異なる。③の位置で $d = 24\mu\text{m}$, $t_c / d = 5.0$, ⑤の位置で $d = 23\mu\text{m}$, $t_c / d = 3.0$ になる。

以上の結果より、本章で扱っているびびり振動の特性は次の原因によって生じていると考えられる。

(a) 切削開始点よりも浅い切込みにおける特性。

切り屑の流出状態は第 3 章の図 3. 11 から図 5. 8 と考えられる。このときに被削材に水平方向の衝撃を加えて、切込み深さ d を急に大きくすると切り屑の流出角 ψ が大きくなるとともに、せん断角が小さくなる。切込み深さの増加は切り屑を厚くし、せん断角の減少は切り屑を薄くする。このため、上記 (1)～(4) の切込み深さが増加するときにも切り屑厚さの変化は小さく、せん断角の変化は大きいという特性が生じるものと考えられる。また、このような切削状態の変化は、第 3 章で述べたように、切削力の時間的な遅れを生じさせ、びびり振動を引き起こすものと考えられる。

(b) 切削開始点よりも深い切込みにおける特性。

上記 (5) (6) の特性は Pearce らによって報告された結果と同じである⁽⁵²⁾。したが

って、切り屑とすくい面の干渉作用によって切削力の動特性が決まってくる。本実験は振動速度が低く、切削力が減衰力として作用する場合に相当すると考えられるので、切削開始点よりも深い切込みになると振動が消滅する。

また、上記(7)の特性から、すくい面に沿って切り屑が流出していないとき(図5.6(a), 図5.7(a))と流出しているとき(図5.6(b), 図5.7(b))では切り屑を生じさせる塑性変形の状態の異なることが分かる。

最後に、切削開始点よりも浅い切込み深さにおける背分力の速度係数 c_d を求める。背分力 F_x を切込み深さ d と水平方向の速度 \dot{x} の関数と考える。短い時間をとれば、

$$d = a_0 - x$$

$$F_x(d, x) = b_0 - k_c x + c_d \dot{x}$$

ここで、 a_0 , b_0 , k_c , c_d は定数, $k_c > 0$, $c_d > 0$

$c_d \dot{x}$ は振動系に負の減衰力として作用する。

振動の一周期について F_x を積分すれば

$$\int_0^T F_x \dot{x} dt = \int_0^T (b_0 - k_c x + c_d \dot{x}) \dot{x} dt = c_d \int_0^T \dot{x}^2 dt$$

$$c_d = \frac{\int_0^T F_x \dot{x} dt}{\int_0^T \dot{x}^2 dt} \dots\dots\dots (5.1)$$

式(5.1)を用い、図5.6(a)から数値計算した c_d の値は $c_d = 260$ (Ns/m)になる。被削材を回転センターで支持しない場合(条件1)と支持する場合(条件2)の振動系の平均減衰係数を表5.1から見積ると次のようになる。

条件1の場合 $c = 75$ (Ns/m)

条件2の場合 $c = 700$ (Ns/m)

したがって、被削材を回転センターで支持しない場合には、切込み深さがほぼ零の状態からびびり振動の発生することを確認められる。

5. 4 まとめ

工具と被削材が部分的に離れる場合のびびり振動について実験的な研究を行ったところ以下の点が明らかになった。

- (1) 本章で扱ったびびり振動は、形状の異なる工具を用いた場合にも、変位と切削力について、その大きさ、変化量およびそれぞれの波形の変化する様子にほとんど差がない。
- (2) 上記(1)の原因は、異なる工具を用いる場合にも、切込み深さに対する切削力の変化割合が同じになる範囲でびびり振動が発生しているためである。
- (3) 切削力が切込み深さに対して非線形的に変化するために、切込みが深くなるに従って、切削力の変動波形が変化する。
- (4) 背分力の速度係数が、切削開始点⁽³⁶⁾よりも浅い切込みと深い切込みで異なる。
- (5) 切削開始点よりも浅い切込みにおいては、被削材の振動にともなって切り屑の流出方向が変化する。この切削状態の変化によって切削力の時間的な遅れが生じ、びびり振動が発生する。
- (6) 切削開始点より深い切込みにおいては、切り屑とすくい面の干渉作用⁽⁵²⁾が重要になる。本章の場合にはこの作用が減衰力として振動を抑える働きをする。

表 5. 1 被削材の振動特性

Condition		1	2
RMS value of natural frequency	$p/(2\pi)$ (Hz)	111	243
Spring constant	k (MN/m)	2.11	11.6
	Δk	-0.02	-0.06
Damping coefficient	n/p	0.012	0.046
	Δc	0.70	0.14
Equivalent mass	m (kg)	4.34	4.96
Angle between principal coordinates and generalized ones	α (°)	11	16

表 5. 2 工具の形状

Tool	I	II
Clamp holder	ETFNR2020K33	EGHR2525M5
Throw away chip	TNPA332 (Cemented carbide)	EGT5 (Cermet)
Class (JIS)	M20	P20
Back rake angle	-5°	10°
End relief angle	5°	6°
Side rake angle	5°	0°
Side relief angle	5°	0°
Radius of tool edge	36 μ m	70 μ m

表 5. 3 切削力の静特性

($V_0 = 100 \text{ m/min}$, $d = 50 \sim 100 \mu \text{ m}$)

Tool	I	II
$\Delta F_x / \Delta d$ (MN/m)	2. 7	1. 1
$\Delta F_y / \Delta d$ (MN/m)	5. 0	3. 6

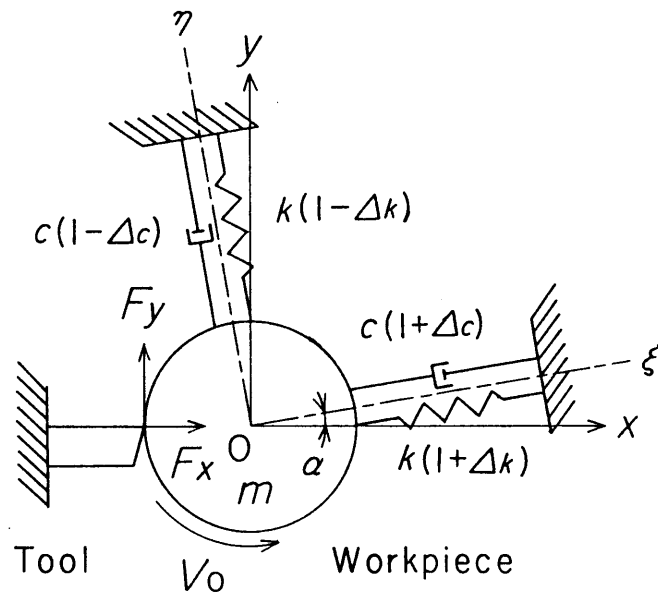
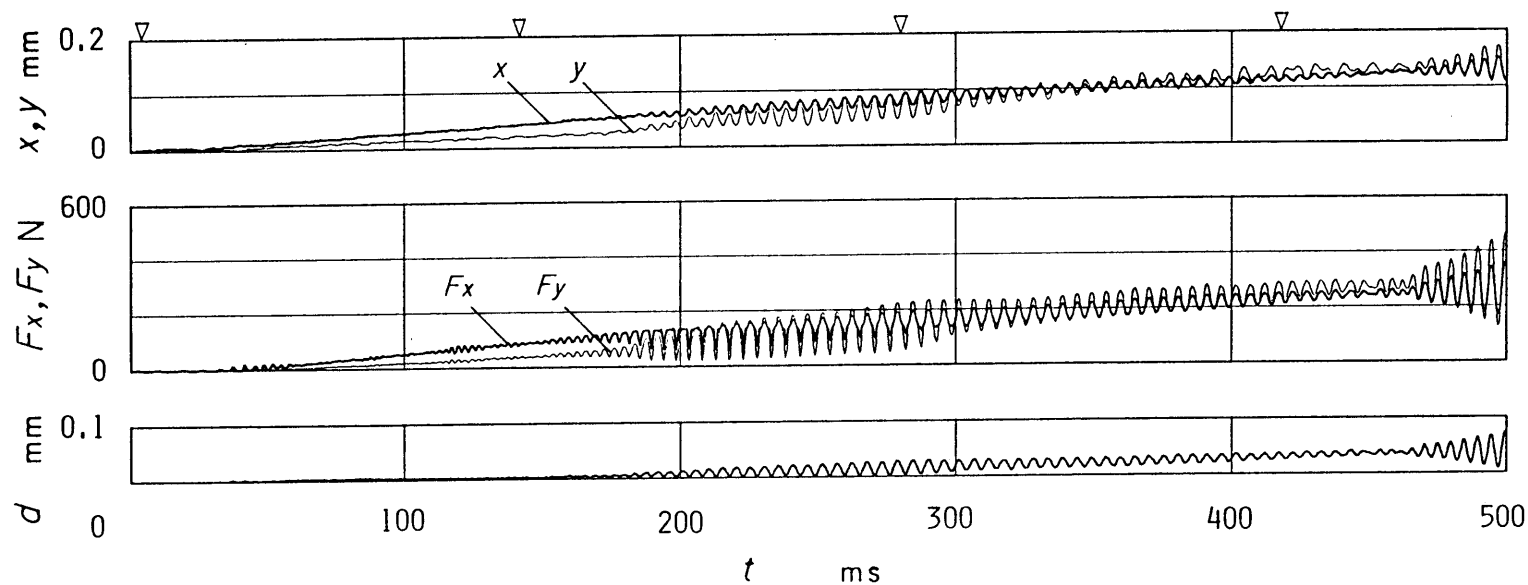
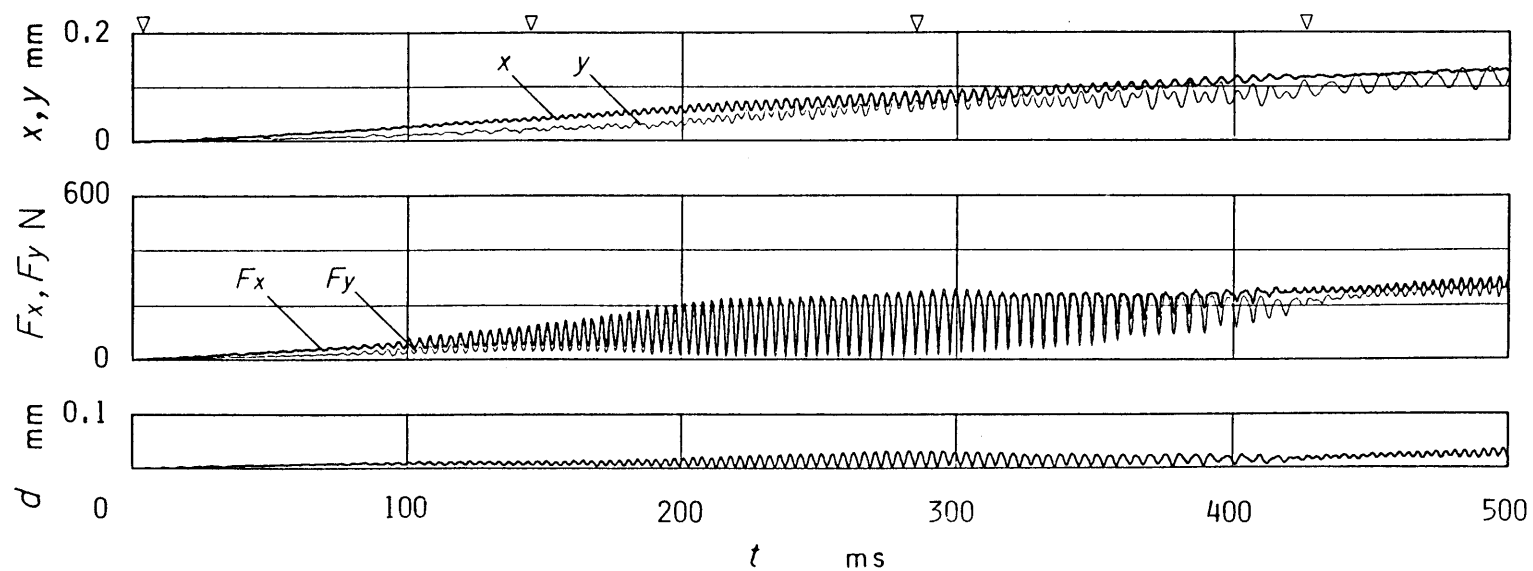


図 5. 1 被削材の 2 自由度系振動モデル

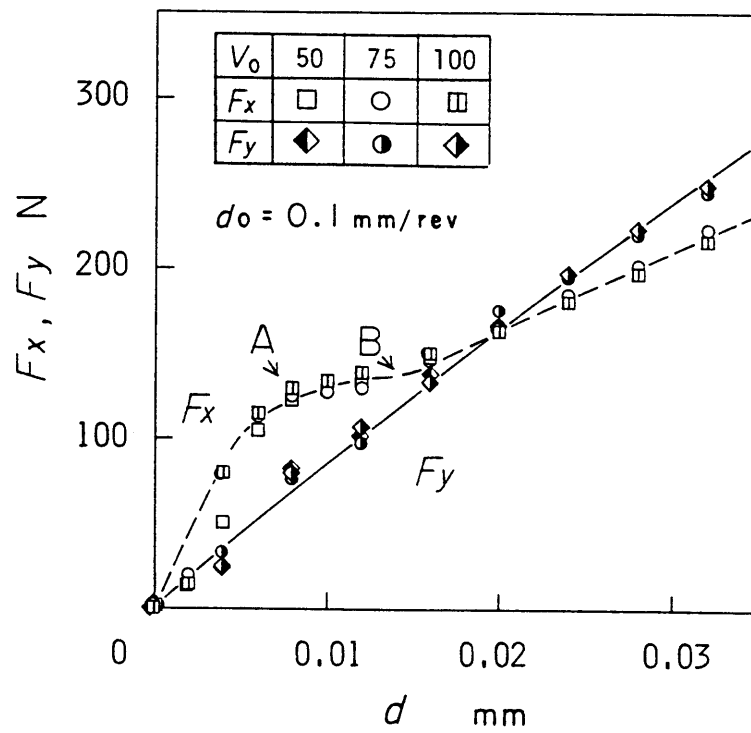


(a) 工具 I

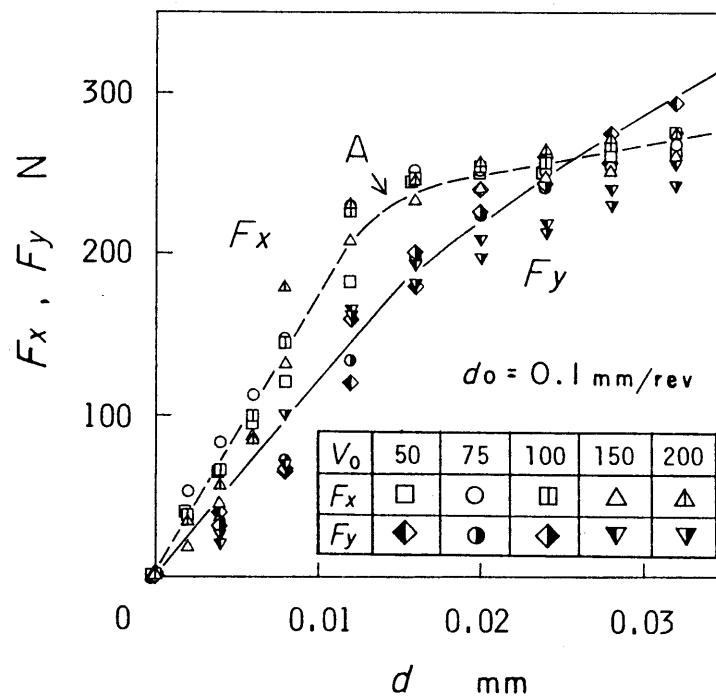


(b) 工具 II

図 5. 2 びり振動の発生例 (条件 1, $d_0 = 0.1 \text{ mm/rev}$, $V_0 = 100 \text{ m/min}$)

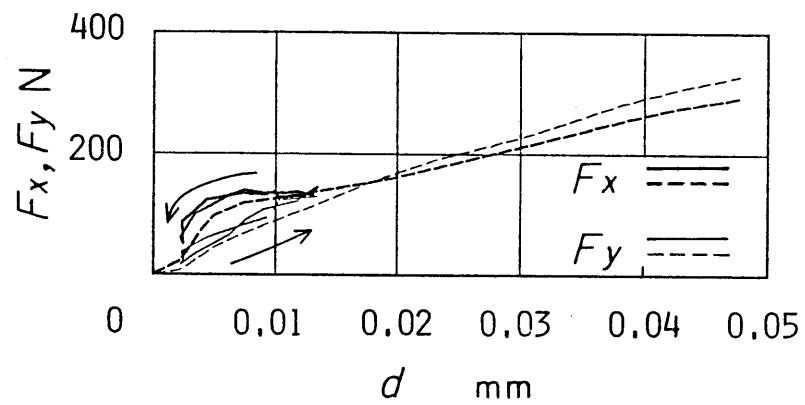


(a) 工具 I

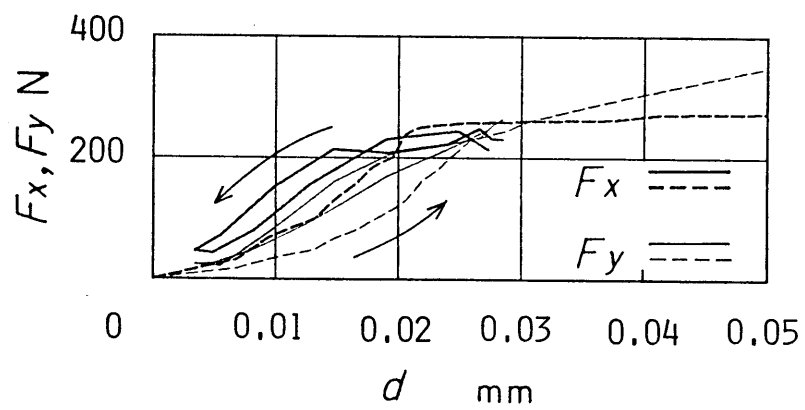


(b) 工具 II

図 5. 3 切削力の静特性



(a) 工具 I



(b) 工具 II

図 5. 4 切削力の動特性

(条件 1, $d_0 = 0.1 \text{ mm/rev}$, $V_0 = 100 \text{ m/min}$)

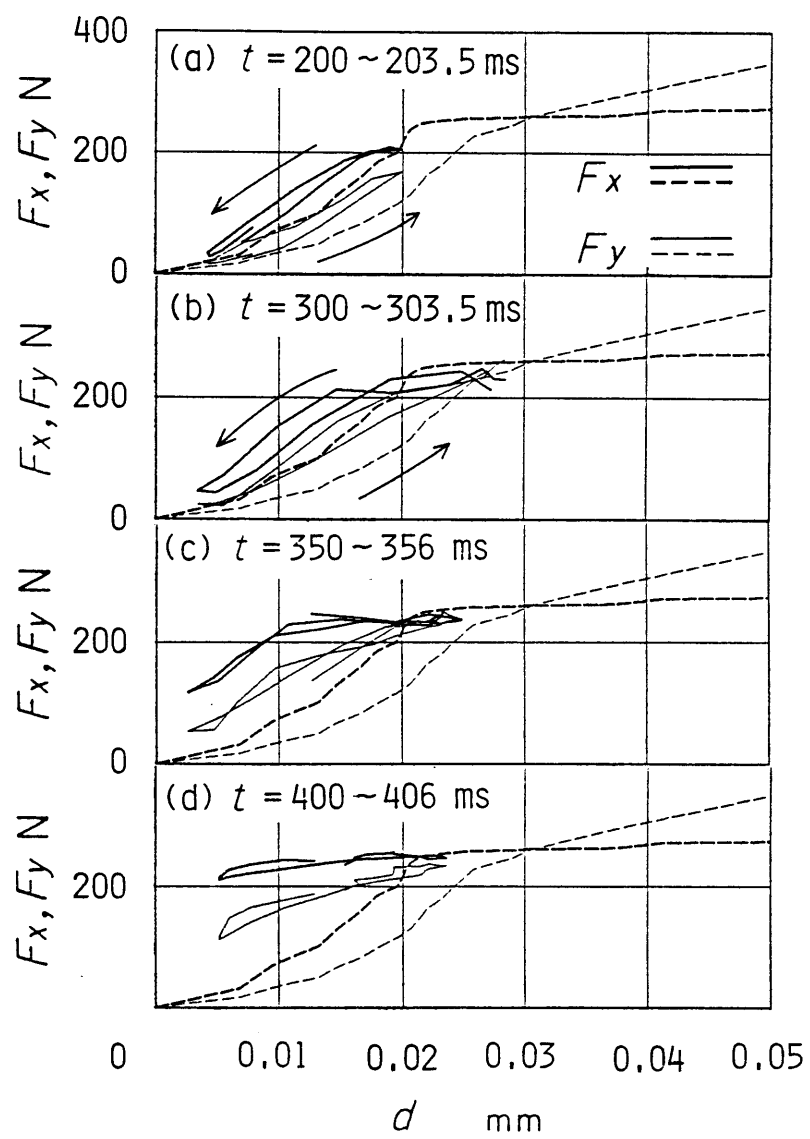
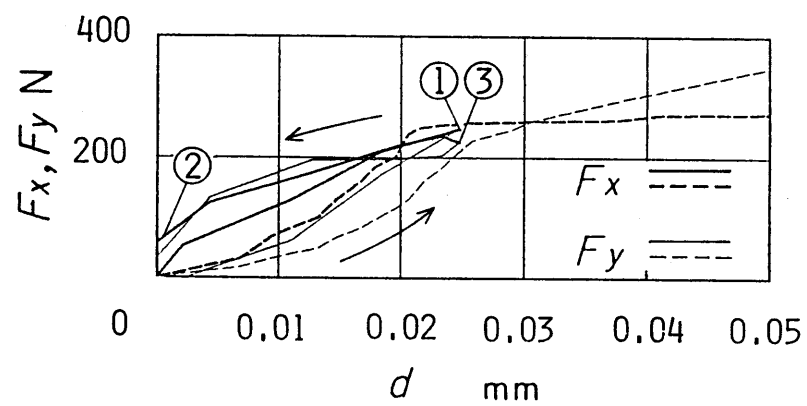
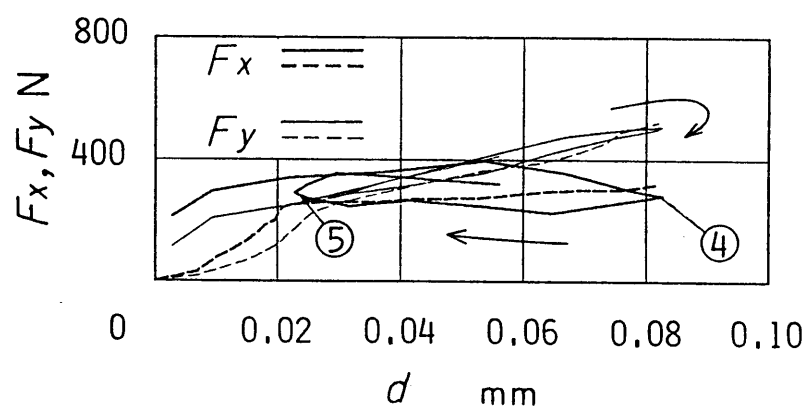


図 5. 5 切削力特性の時間的变化
(条件 1, 工具 II, $d_0 = 0.1 \text{ mm/rev}$, $V_0 = 100 \text{ m/min}$)

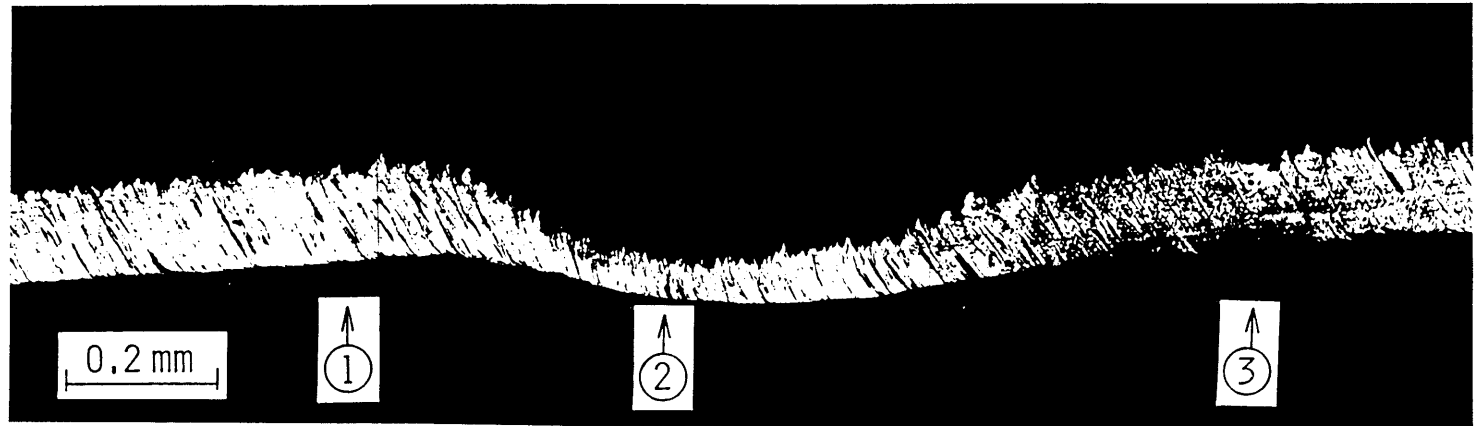


(a) 切込みが浅い場合

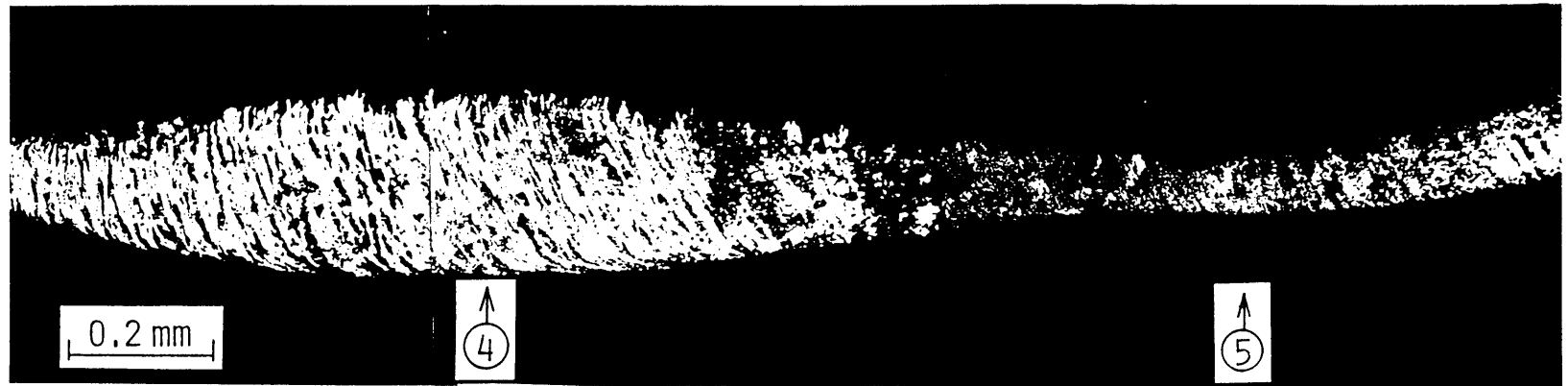


(b) 切込みが深い場合

図5. 6 水平方向に衝撃を加えた場合の結果
(条件2, 工具II, $d_0 = 0.05 \text{ mm/rev}$, $V_0 = 75 \text{ m/min}$)



(a) 切込みが浅い場合



(b) 切込みが深い場合

図 5. 7 切り屑の顕微鏡写真 (条件 2 , 工具 II , $d_o = 0.05 \text{ mm/rev}$, $V_o = 75 \text{ m/min}$)

(写真に示す切り屑の下面は工具と擦過しながら左方向へ流出する.)

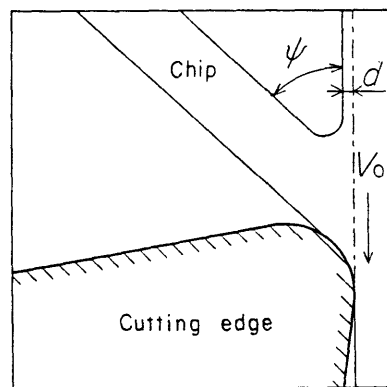


図 5. 8 切り屑の流出状況（工具Ⅱ）

参考文献

- (1) Arnold, R. N., "Mechanism of the Tool Vibration in Cutting Steel",
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 154
(1946), pp. 261-276.
- (2) Hahn, R. S., "Metal-Cutting Chatter and Its Elimination", Trans. ASME,
Vol. 75, No. 6 (Aug. 1953), pp. 1073-1080.
- (3) Doi, S., "On the Chatter Vibrations of Lathe Tools", Memoirs of the
Faculty of Engineering, Nagoya Univ. Vol. 5, No. 2 (Oct. 1953),
pp. 179-216.
- (4) 土井静雄・下山美德・黒田二郎, "旋盤主軸に原因するびびりの発生" 機
械学会誌, 54巻, 385号 (昭26-2), pp. 39-44.
- (5) 土井静雄・加藤仁, "バイトのたわみに関するびびりについて", 機械学
会論文集, 19巻, 86号 (昭28-10), pp. 28-34.
- (6) 土井静雄・黒田二郎, "旋盤主軸に原因するびびりの発生 (第2報)",
機械学会論文集, 19巻, 86号 (昭28-10), pp. 34-39.
- (7) 土井静雄・加藤仁, "旋盤主軸に原因するびびりの発生 (第3報)", 機
械学会論文集, 20巻, 90号 (昭29-2), pp. 61-65.
- (8) 土井静雄・加藤仁, "旋盤主軸に原因するびびりの発生 (第5報)", 機
械学会論文集, 21巻, 110号 (昭30-10), pp. 727-731.
- (9) 土井静雄・加藤仁・伴英雄・大和田毅, "旋盤主軸に原因するびびりの発
生 (第6報)", 機械学会論文集, 22巻, 118号 (昭31-6), pp. 408-411.
- (10) Kato, S., "Theoretical Research on Chatter Vibration of Lathe
Tools", Memoirs of the Faculty of Engineering, Nagoya Univ.
Vol. 10, No. 2 (Oct. 1958), pp. 117-174.
- (11) Albrecht, P., "Self-Induced Vibrations in Metal Cutting", Trans.
ASME, Ser. B, Vol. 84, No. 4 (Nov. 1962), pp. 405-417.
- (12) Hook, C. J. and Tobias, S. A., "Finite Amplitude Instability-A New
Type of Chatter", Proc. 4th Int. M. T. D. R., Conf. (Sep. 1963),
pp. 97-100.

- (13) Tobias, S. A. and Fishwick, W., "The Chatter Vibration of the Lathe Tools under Orthogonal Cutting Condition", Trans. ASME, Vol. 80, No. 5 (July 1958), pp. 1079-1088.
- (14) 土井静雄・加藤仁, "旋盤主軸に原因するびびりの発生(第4報)", 機械学会論文集, 21巻, 102号(昭30-2), pp. 110-113.
- (15) 加藤仁, "びびり発生の理論的研究(第1報, 非線型の場合)", 機械学会論文集, 24巻, 138号(昭33-2), pp. 115-119.
- (16) 加藤仁・五島健, "びびり発生の理論的研究(第2報, びびりの振動数について)", 機械学会論文集, 24巻, 138号(昭33-2), pp. 119-124.
- (17) 太田博・河野和豊, "剛性に方向差のある工具の自励振動について", 機械学会論文集, 38巻, 314号(昭47-10), pp. 2543-2557.
- "Chatter Vibrations of Machine Tool or Work with Directional Stiffness Inequality", Bull. JSME, Vol. 16, No. 96 (June 1973), pp. 947-954.
- (18) Ota, H. and Kono, K., "On Chatter Vibrations of Machine Tool or Work Due to Regenerative Effect and Time Lag", Trans. ASME, Ser. B Vol. 96, No. 4 (Nov. 1974), pp. 1337-1346.
- (19) 太田博・河野和豊, "再生作用による工具および被削材の自励振動について", 徳島大学工学部研究報告, No. 20 (March 1975), pp. 73-83.
- (20) 近藤禎孝・河野治・佐藤壽芳・駒崎正洋, "多重再生効果を考えた自励振動の挙動について", 機械学会論文集, 46巻, 409号, C編(昭55-9), pp. 1024-1032.
- (21) Shi, H. M. and Tobias, S. A., "Theory of Finite Amplitude Machine Tool Instability", Int. J. M. T. D. R., Vol. 24, No. 1 (Feb. 1984), pp. 45-69.
- (22) Tlustý, J., 工作機械の力学, (昭47), pp. 89-218, 養賢堂.
- (23) Merritt, H. E., "Theory of Self-Excited Machine-Tool Chatter, Contribution to Machine -Tool Chatter", Trans. ASME, Ser. B, Vol. 87 No. 4 (Nov. 1965), pp. 447-454.

- (2 4) Tobias, S. A., Machine Tool Vibration, (1965), pp.292-332., Blackie & Son Ltd.
- (2 5) Merchant, M. E., "Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and Type 2 Chip", J. Appl. Phys., Vol.16 (May 1945), pp.267-275.
- (2 6) Albrecht, P., "New Developments in the Theory of the Metal-Cutting Process, The Ploughing Process in Metal Cutting", Trans. ASME, Ser. B Vol. 82, No. 4 (Nov. 1960), pp. 348-358.
- (2 7) Connolly, R. and Rubenstein, C., "The Mechanics of Continuous Chip Formation in Orthogonal Cutting", Int. J. M.T.D.R., Vol.8, No.3 (1967), pp.159-187.
- (2 8) Haslam, D. and Rubenstein, C., "Surface and Sub-Surface Work-Hardening Produced by the Planing Operation", Annals of the C. I. R. P., Vol.18, No.3 (June 1970), pp.369-381.
- (2 9) 白井栄治, 切削研削加工学 上, (昭46), pp.24-27, 共立出版.
- (3 0) 白井栄治・白樫高洋・高田孝次, "切削における二, 三の特別な場合のすべり線場解", 精密機械, 38巻, 8号 (1972), pp.672-678.
- (3 1) Thompson, P. J. and Sarwar, M., "Power Hacksawing", Proc. 15th Int. M. T. D. R. Conf. (Sep. 1974), pp.217-225.
- (3 2) Sarwar, M. and Thompson, P. J., "Cutting Action of Blunt Tools", Proc., 22nd Int. M. T. D. R. Conf. (Sep. 1981), pp.295-304.
- (3 3) Rubenstein, C., Lau, W. S. and Venuvinod, P. K., "Flow of Workpiece Material in the Vicinity of the Cutting Edge", Int. J. M. T. D. R., Vol.25, No.1 (Sep. 1984), pp.91-97.
- (3 4) 津枝正介・長谷川嘉雄・中野哲夫, "刃先の微小丸みが切削現象に及ぼす影響 (第1報, 刃先の押しならし作用)", 機械学会論文集, 26巻, 166号, (昭35-6), pp.803-808.
- (3 5) 津枝正介・長谷川嘉雄・中野哲夫, "刃先の微小丸みが切削現象に及ぼす影響 (第2報, 刃先表面の応力分布)", 機械学会論文集, 26巻, 166号, (昭35-6), pp.809-812.

- (36) 山本明・中村示, "微小切削における切削開始の条件について(切れは丸みを変化した二次元バイトによる実験的研究)", 精密機械, 34巻, 5号(1968), pp.310-315.
- (37) 山本明・中村示, "微小切削における切削開始の条件について(第2報, 切削開始モデルの検討と接触面に働く摩擦力について)", 精密機械, 35巻, 3号(1969), pp.164-168.
- (38) 山本明・中村示, "微小切削における切削開始の条件について(第3報, 光弾性実験法による切削開始に関する研究)", 精密機械, 36巻, 3号(1970), pp.176-182.
- (39) 山本明・中村示, "微小切削における切削開始の条件について(第1報, 切削速度および切削油剤による影響)", 精密機械, 36巻, 11号(1970), pp.765-769.
- (40) 勇田敏夫, "切削初期現象に関する基礎的研究(第1報, 切削初期現象の観察)", 精密機械, 35巻, 5号(1969), pp.292-288.
- (41) 勇田敏夫, "切削初期現象に関する基礎的研究(第2報, 切削初期現象に及ぼす工具切れ刃先端半径と被削材表面層の影響について)", 精密機械, 36巻, 3号(1970), pp.202-206.
- (42) 勇田敏夫, "切削初期現象に関する基礎的研究(第3報, 切削初期現象に影響を及ぼす二, 三の因子について)", 精密機械, 37巻, 2号(1971), pp.93-97.
- (43) 奥島啓次・人見勝人, "金属切削における過渡現象について", 日本機械学会論文集, 26巻, 169号(昭35-9), pp.1216-1222.
- (44) Sisson, T. R. and Kegg, R. L., "An Explanation of Low-Speed Chatter Effects", Trans. ASME, Ser. B, Vol. 91, No. 4 (Nov. 1969), pp. 951-958.
- (45) Hsu, T. C., "A Study of the Normal and Shear Stresses on a Cutting Tool", Trans. ASME, Ser. B, Vol. 88, No. 1 (Feb. 1966), pp. 51-64.
- (46) 白樫高洋・白井栄治, "工具すくい面の摩擦特性", 精密機械, 39巻, 9号(1973), pp.966-972.
- (47) Chao, B. T. and Trigger, K. J., "Controlled Contact Cutting Tools", Trans. ASME, Ser. B, Vol. 81, No. 2 (May 1959), pp. 139-151.

- (4 8) DeChiffre, L., "Cutting Tools with Restricted Contact", Int. J. M.T.D.R., Vol. 22, No. 4 (June 1982), pp. 321-332.
- (4 9) Albrecht, P., "Dynamics of the Metal-Cutting Process", Trans. ASME, Ser. B, Vol. 87, No. 4 (Nov. 1965), pp. 429-441.
- (5 0) Knight, W. A., "Some Observations on the Vibratory Metal Cutting Process Employing High Speed Photography", Int. J. M.T.D.R., Vol. 10 (Oct. 1969), pp. 221-247.
- (5 1) Boothroyd, G., "Effect of Surface Slope on Shear Angle in Metal Cutting", Trans. ASME, Ser. B, Vol. 92, No. 1 (Feb. 1970), pp. 115-118.
- (5 2) Pearce, D. F. and MacManus, B. R., "Dynamic Chip Formation and its Significance to Machining Stability", Proc. Inst. Mech. Engineers, Vol. 187, No. 21 (1973), pp. 273-283.
- (5 3) Szakovits, R. J. and D'Souza, A. F., "Metal Cutting Dynamics with Reference to Primary Chatter", Trans. ASME, Ser. B, Vol. 98, No. 1 (Feb. 1976), pp. 258-264.
- (5 4) Nigm, M. M., Sadek, M. M. and Tobias, S. A., "Determination of Dynamic Cutting Coefficients from Steady State Cutting Data", Int. J. M.T.D.R., Vol. 17, No. 1 (Sep. 1976), pp. 19-37.
- (5 5) Nigm, M. M. and Sadek, M. M., "Experimental Investigation of the Characteristics of Dynamic Cutting Process", Trans. ASME, Ser. B, Vol. 99, No. 2 (May 1977), pp. 410-418.
- (5 6) Srinivasan, K. and Nachtigal, C. L., "Investigation of the Cutting Process Dynamics in Turning Operations", Trans. ASME, Ser. B, Vol. 100 No. 3 (Aug. 1978), pp. 323-331.
- (5 7) Richardson, D. B. and Pearce, D. F., "Measurement of Dynamic Cutting Force When Using Restricted Contact Tools", Proc. 18th Int. M.T.D.R. Conf. (Sep. 1977), pp. 391-397.
- (5 8) Pearce, D. F., "Dynamic Chip Formation with Machining with Restricted Contact Tools", Proc. 18th Int. M.T.D.R. Conf. (Sep. 1977), pp. 399-405.

- (59) 太田博・岡崎幸広・三輪正夫, "剛性に方向差のある軸受台で支えられた偏平軸の不安定振動", 機械学会論文集, 44巻, 380号, C編 (昭53-4), pp.1225-1233.
- (60) 太田博・水谷一樹・三輪正夫, "剛性に方向差のある軸受台で支えられた偏平軸の不安定振動(第2報, ジャイロ効果のある傾き振動の場合)", 機械学会論文集, 46巻, 401号, C編 (昭55-1), pp.17-25.
- (61) 太田博・水谷一樹, "剛性に方向差のある軸受台で支えられた偏平軸の不安定振動(第3報, 2種類の不安定振動の発生機構)", 機械学会論文集, 46巻, 408号, C編 (昭55-8), pp.873-882.
- (62) 太田博・水谷一樹・川合忠雄, "剛性に方向差のある軸受台で支えられた偏平軸の不安定振動(第4報, 近似解法の検討)", 機械学会論文集, 52巻, 476号, C編 (昭61-4), pp.1272-1279.
- (63) Ota, H., Mizutani, K., and Kawai, T., "Influence of Unequal Stiffness on the Instability Regions of a Rotating Asymmetric Shaft (4th Rep. Further Considerations of an Approximate Analysis)", Bull. JSME, Vol. 29, No. 258 (Dec. 1986), pp. 4350-4355.
- (64) Mizutani, K., Ota, H. and Kawai, T., "Some Considerations of Approximate Analysis on Unstable Vibrations of an Asymmetrical Shaft Supported by Asymmetrical Pedestals", Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ. Vol. 11 (Dec. 1986), pp. 1-11.
- (65) 土井雅博・益子正巳・伊東誼, "三つつめチャック加工における工作物剛性の方向依存性", 機械学会論文集, 48巻, 429号, C編 (昭57-5), pp. 761-768.
- (66) 土井雅博・益子正巳・伊東誼, "三つつめチャック加工時に生ずる特異なびびりマークの観察", 機械学会論文集, 48巻, 434号, C編 (昭57-10), pp. 1633-1639.
- (67) 土井雅博・益子正巳・伊東誼, "びびり振動に及ぼすチャック-工作物系の減衰特性の影響", 機械学会論文集, 50巻, 460号, C編 (昭59-12) pp. 2392-2398.

- (68) 丸井悦男・江馬諭・加藤仁, "旋削バイトのすべり挙動と減衰特性", 精密機械, 49巻, 10号 (1983), pp.1404-1409.
- (69) 森脇俊道・上野滋・高野真一・岩田一明, "高分子コンクリートの動特性と工作機械構造への応用に関する研究(第1報, 高分子コンクリートの配合設計)", 精密機械, 51巻, 3号 (昭60-3), pp.576-581.
- (70) 柳本憲作・荻野隆・一宮亮一, "定常な切削音からびびり音への移行と切削状況変化との相関", 機械学会論文集, 53巻, 489号, C編 (昭62-5), pp.1108-1112.
- (71) 藤井洋・丸井悦男・江馬諭, "ドリルのふれまわり振動(第1報, 発生機構とチゼル・エッジの役割)", 機械学会論文集, 50巻, 453号, C編 (昭59-5), pp.898-906.
- (72) 藤井洋・丸井悦男・江馬諭, "ドリルのふれまわり振動(第2報, 発振限界に及ぼすドリル刃先形状(主として主切れ刃部逃げ面)の影響)", 機械学会論文集, 50巻, 453号, C編 (昭59-5), pp.907-914.
- (73) 松原一三生・山本久隆・水本洋, "中ぐり加工における再生びびり振動の研究(第1報, 振動特性に方向性がある中ぐり棒)", 精密工学会誌, 52巻, 7号 (1986), pp.1230-1235.
- (74) 丸井悦男・江馬諭・加藤仁, "旋削バイトのびびり振動(第1報, 振動の一般的な性質)", 機械学会論文集, 48巻, 428号, C編 (昭57-4), pp.606-613.
- (75) 丸井悦男・江馬諭・加藤仁, "旋削バイトのびびり振動(第2報, 振動発生機構に関する考察)", 機械学会論文集, 48巻, 428号, C編 (昭57-4), pp.614-621.
- (76) 太田博・水谷一樹・川合忠雄, "再生びびり振動の発生について", 機械学会論文集, 52巻, 480号, C編 (昭61-8), pp.2278-2286.
- (77) Ota, H., Mizutani, K. and Kawai, T., "On the Occurrence of Regenerative Chatter Vibrations", JSME Int. Journal, Vol.30, No.262 (April 1987), pp.661-669.

- (78) 太田博・水谷一樹・川合忠雄, "被削材のびびり振動に及ぼす工具形状の影響(第1報, 工具のすくい角が正の場合)", 機械学会論文集, 掲載予定
- (79) 太田博・水谷一樹・川合忠雄, "被削材のびびり振動に及ぼす工具形状の影響(第2報, 工具のすくい角が負の場合)", 機械学会論文集, 投稿中
- (80) 太田博・水谷一樹・川合忠雄, "被削材のびびり振動に及ぼす工具形状の影響(第3報, 工具と被削材が部分的に離れる場合)", 機械学会論文集, 投稿中
- (81) 金子享・佐藤壽芳・谷藁弘・大堀真敬, "旋削時自励振動と被削面の振動こんについて", 機械学会論文集, 50巻, 454号, C編(昭59-6), pp.961-969.
- (82) 喜田義宏・井戸守・川崎直通, "大きな負のすくい角工具による切削機構", 精密機械, 44巻, 9号(1978), pp.1099-1104.

謝 辞

本研究は、名古屋大学工学部機械学科機械力学講座において、太田博教授のご指導のもとに行なわれたものである。本論文を結ぶにあたり、終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜った太田博教授に深甚の謝意を表します。

また、本研究に有益なご教示、ご助言をいただいた名古屋大学工学部電子機械工学科山口勝美教授ならびに安田仁彦教授に心から感謝する次第であります。

さらに、本研究を遂行するにあたり有益なご助言をいただいた三重大学工学部水谷一樹助教授、名古屋大学工学部加藤正義助手、ならびに実験装置の制作に際してご協力いただいた山口登技官（当時）をはじめ、機械力学および機械制御実験室の諸兄に厚くお礼申し上げます。

昭和62年9月

論文提出者の発表論文
ならびに業績リスト

1 / 3

1. 本論文に関係のあるもの

番号	論文等題目	公表の方法および時期	共著者
1	再生びびり振動の発生について	日本機械学会論文集 52巻480号C編 (昭和61年8月), pp.2278~2286	太田博 水谷一樹
2	On the Occurrence of Regenerative Chatter Vibrations	JSME International Journal Vol.30, No.262 (April 1987) pp.661-669	Hiroshi OTA Kazuki MIZUTANI
3	被削材のびびり振動に及ぼす 工具形状の影響 (第1報, 工具のすくい角 が正の場合)	日本機械学会論文集 掲載予定	太田博 水谷一樹
4	被削材のびびり振動に及ぼす 工具形状の影響 (第2報, 工具のすくい角 が負の場合)	日本機械学会論文集 投稿中	太田博 水谷一樹 後藤良次
5	被削材のびびり振動に及ぼす 工具形状の影響 (第3報, 工具と被削材が 部分的に離れる場合)	日本機械学会論文集 投稿中	太田博 水谷一樹 白土敏治

番号	論文等題目	公表の方法および時期	共著者
1	円柱表面からの熱伝達に 及ぼすトリップワイヤの 効果 (第1報, 円柱まわりの 圧力分布および抗力係数)	日本機械学会論文集 50巻453号B編 (昭和59年5月), pp.1275~1284	藤田秀臣 高浜平七郎
2	Effects of Tripping Wires on Heat Transfer from a Circular Cylinder in Cross Flow (1st Report, The Pressure Distribution around the Cylinder and the Drag Coefficient)	Bulletin of JSME, Vol.28, No.235, (Jan. 1985) pp.80-87	Hideomi FUJITA Heishichiro TAKAHAMA
3	円柱表面からの熱伝達に 及ぼすトリップワイヤの 効果 (第2報, 熱伝達特性)	日本機械学会論文集 51巻464号B編 (昭和60年4月), pp.1334~1341	藤田秀臣 高浜平七郎
4	剛性に方向差のある軸受台 で支えられた偏平軸の不安 定振動 (第4報, 近似解法の検討)	日本機械学会論文集 52巻476号C編 (昭和61年4月), pp.1272~1279	太田博 水谷一樹

5	Some Considerations of Approximate Analysis on Unstable Vibrations of an Asymmetrical Shaft Supported by Asymmetrical Pedestals	Research Reports of the Faculty of Eng., Mie Univ. Vol.11 (Dec. 1986) pp.1-11	Kazuki MIZUTANI Hiroshi OTA
6	Influence of Unequal Pedestal Stiffness on the Instability Regions of a Rotating Asymmetric Shaft (4th Report, Further Considerations of an Approximate Analysis)	Bulletin of JSME, Vol.29, No.258, (Dec. 1986) pp.4350-4355	Hiroshi OTA Kazuki MIZUTANI