



Title	切削加工自動化を目的とした切りくず処理と工具寿命管理に関する研究
Author(s)	高津戸, 光雄
Citation	大阪大学, 1992, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3088050
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

切削加工自動化を目的とした
切りくず処理と工具寿命管理に関する研究

1 9 9 1 年

高 津 戸 光 雄

目 次

主な記号表	iv
序 論	1
第 I 編 切りくず処理	
第 1 章 緒 論	4
第 2 章 切りくず処理用ソフトウェアの開発	8
2. 1 緒 言	8
2. 2 システム構成	9
2. 3 間欠減速送りと切りくず挙動	17
2. 4 結 言	20
第 3 章 旋削における切りくず処理	21
3. 1 緒 言	21
3. 2 間欠減速送り	22
3. 3 切りくずの処理性	23
3. 4 切りくずの切断特性	31
3. 5 結 言	37
第 4 章 ドリル加工における切りくず処理	39
4. 1 緒 言	39
4. 2 ドリル加工における間欠減速送り	40

4. 3	切りくずの処理性	43
4. 4	間欠減速送りによる効果	45
4. 5	結 言	55

第 II 編 工具寿命の判定

第 1 章	緒 論	56
-------	-----	----

第 2 章	A Eと材料特性の関係	59
2. 1	緒 言	59
2. 2	A Eセンサと信号処理	60
2. 3	引張試験及び曲げ試験によるA Eの発生	62
2. 4	圧痕試験によるA Eの発生	65
2. 5	結 言	71

第 3 章	A Eを用いた旋削工具の寿命判定	72
3. 1	緒 言	72
3. 2	研究の方法	73
3. 3	リアルタイム解析	75
3. 4	リアルタイム解析のための条件設定	78
3. 5	A Eセンサの開発	80
3. 6	開発したセンサと従来のセンサによる検出波形の比較	81
3. 7	工具摩耗によるオシレーション数の変化	85
3. 8	工具寿命判定の信頼性	85
3. 9	結 言	87

第 4 章	流体伝播 A E 検出法による回転工具の寿命判定	89
4. 1	緒 言	89
4. 2	研究の方法	90
4. 3	流体伝播 A E 検出装置の開発	92
4. 4	工具寿命の判定	96
4. 5	結 言	102
第 5 章	旋削プロセスにおける A E の発生	104
5. 1	緒 言	104
5. 2	研究の方法	105
5. 3	切削条件が A E 信号に及ぼす影響	106
5. 4	流れ形切りくずにおける A E 信号	111
5. 5	せん断形切りくずにおける A E 信号	114
5. 6	切削抵抗と工具摩耗との関係	116
5. 7	背分力と A E 信号との関係	119
5. 8	結 言	124
総 括		125
参 考 文 献		129
謝 辞		140

主 な 記 号 表

第 I 編

V : 切削速度	m/min
f : 送り速度	mm/min
d : 切込み	mm
N : 回転数	rpm
M : 質量マトリックス	kg
C : 減衰マトリックス	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$
K : 剛性マトリックス	N/m
U : 変位ベクトル	m
F : 荷重ベクトル	N
E : ヤング率	N/m^2
V : ポアソン比	
C_s : 横切刃角	deg
t_c : 切りくず厚みの実測値	mm

第 II 編

d B : デシベル
$\bar{x}$: 平均値
μ : 母平均
$t_\phi(\alpha)$: 危険率 α で自由度 ϕ なる t 分布表の値

σ_e :	不偏分散の平方根	
n :	サンプル数	
F_c :	主分力	N
F_f :	送り分力	N
F_b :	背分力	N
R :	主分力と背分力の合力	N
N :	合力 R のすくい面に垂直な分力	N
F :	合力 R のすくい面方向の分力	N
α :	工具のすくい角	deg
P :	摩擦力	N
μ_e :	すくい面と切りくず及び前逃げ面と被削材の間の摩擦係数	

序 論

切削加工の最終目標は与えられた工作物をできるだけ高精度にそして安価に、かつ能率的に加工することである。これらの要求に貢献しているのは、NC (Numerical Control) 工作機械の発達と高性能工具の開発と言える。NC 工作機械の発達を例にとれば、回転数において10,000回転という高速回転が可能になってきたこと、また位置決め精度が $0.1\mu\text{m}$ という高精度で、送りが 20m/min もの高い速度が可能な工作機械が出現してきたことである。NC 工作機械の発達と高性能工具の開発を基盤として、生産体系が自動化の方向に進んでいると言える。このような高精度化・高速化がなされつつある現在でも、実際の作業においては切りくずの絡みや工具摩耗及び欠損等によって加工能率や加工精度の低下が余儀なくされていることに変わりはない。したがって工作機械や工具の高性能化を図ることは言うに及ばず、特に加工能率や加工精度の低下の原因と思われる要因を把握し、解決を図ることが真の自動化の実現にとって不可欠である。

このような観点から本論文では切削加工における加工能率や加工精度を大きく支配している要因として切りくずと工具摩耗及び欠損を取上げ、切りくず切断による適切な処理法及び工具寿命の自動判定の確立を見出すことを目的としている。

最近の工作機械はNC化が進み、ロボット等と組み合わせることにより自動化の体制ができあがっているが、切削中における切りくず処理が解決されず、自動化の大きな障害になっている。切込みが 0.5mm 以上の場合は工具にチップブレーカ等を付けることによつてほぼ解決できているが^{1) - 6)}、仕上加工のように切込みを小さくすると、切りくずが切断できずにつながってしまう場合が多い。切込みが小さいと、切りくずは糸状になってしまいチップブレーカでは切断できなくなっている。切りくずが絡まると非常に危険な状態になるため、人間が定期的に監視しなければならない。場合によっては、常時機械に付いていて切りくずを

取りさる作業を行うことが必要になっている。このことは多くの切削システムがせっかく高度の能力をもちながら実用上自動化の確立ができないという現実となっていて残されているのである。

次に自動切削システムのなかで特に最近要望されていることは、加工プロセスの状態を監視するシステムの確立である。これはセンサ技術の確立である。センサ技術は加工プロセスを監視するだけでなく、システムの自動化の確立につながるものである。たとえば生産現場では作業者が工具寿命を判断する場合、視覚と聴覚で判断している場合が多い。そこで自動化を確立するためには、センサ技術がこれら人間の聴覚とその感覚中枢に対応する機能を代行する能力をもつ必要がある。

工具寿命の適切な判定の必要性は、工具の摩耗及び微小な欠損が寸法誤差並びに仕上げ面粗さなど加工物に与える影響が大きく、加工精度や加工能率を高める上で大きな障害になっていることから容易に理解される。また、同じロツトであっても工具寿命が異なる場合が多い。特に穴明け工具のドリルにおいては、寿命のばらつきにかなりの差が生じている。工具寿命を時間で設定できない所以である。そのため定期的にドリルをタッチセンサに接触させて検査する方法等を止むなく行っているが、検査の間にドリルが折損した場合、不良製品を作ってしまうことになる。そこで、これらの工具の寿命を判定するためのインプロセス監視が自動化を確立する上で重要な課題となる。

最近、加工プロセスの状態を監視する方法で、代表的なセンサ技術として注目されているものにアコースティックエミッション（以後A Eと呼ぶ）がある。A Eは一般に固体材料の変形や破壊に伴って発生すると考えられているが、加工プロセスの監視にも有望視され、多くの研究が行われている。しかし、まだ現場で使用できるほど十分な判定精度には至っていないのが現状である。そこでA Eを用いて工具のインプロセス監視を実現することが、切削の自動化において重要な課題であると考えられる

本論文は2編で構成されており第Ⅰ編は旋削加工及びドリル加工における切りくず処理の問題を、第Ⅱ編ではA Eを用いて工具寿命の判定を取り扱っている。

第Ⅰ編では、まず旋削の仕上げ加工における切りくず切断について検討する⁷⁾ -¹⁰⁾。切りくずを切断する方法については、切りくずの厚みを薄くし、切りくずがつながりにくくなるまで薄くすることによって、切りくずを切れやすくする方法である。そこで切りくず厚みに直接影響する送り速度を小さくすると、切りくずの厚みが薄くなり、切りくずを切断できることを明らかにする。送り速度を小さくすると当然加工時間が長くなるため、仕上げ加工の中に間欠的に減速した送り速度を入れることによって、加工時間の増加を最小限にできることを示す。次に旋削加工の切りくず切断方法と同様の方法をドリルの穴明けに適用し、送り速度を減速した時に切りくずを切断できることを検討した^{11) - 12)}。また、間欠的に減速した送り速度を入れる方法は、切りくずが一定の間隔で切断でき、切りくずが穴の中で詰まることがないので、連続送りの場合より穴の曲がりが少ないことを明らかにした。

第Ⅱ編では、まずA E信号を用いて旋削工具の寿命判定を取り扱う。従来の研究では工具の欠損等をA E信号の平均値によって判定している例が報告されているが^{13) - 16)}、この値は工具摩耗に対する変化が少ないこと、また、繰り返し判定精度が不安定であるため、現場において十分に使用されていない。そこでA E信号にたいして変動しきい値を設け、しきい値に感知するA E信号の振動数を基に定量化し、工具寿命の適切な判定を行った結果を示す¹⁷⁾。また、A E信号は金属中において縦波と横波の合成波であるが、液体の中にA E信号を通すことにより、縦波だけを限定して取り込んだ効果についても詳しく示す。

次に回転工具については、直接センサを工具に取り付けることができないため、液体の中をA E信号が伝播することを利用して、回転工具に切削液をかける時、そのかける口元にセンサを内蔵した流体伝播A E検出装置を提案し、これを用いて寿命判定を行った結果と考察を行う。

第 I 編 切りくず処理

第 1 章 緒 論

加工技術は、自動化、省力化工作機械の普及とともに、加速度的な発展をとげつつある。加工能率の向上を図るためには、NC 工作機械やロボットの導入による自動化や無人化が益々重要になってきている。切削加工の自動化、無人化を進めるためには、切削工具の異常損傷の予知や生成される切りくずを効果的に処理することが、きわめて重要となってきた。特に切りくずが工具や加工物に絡みつくことを解決することが大きな問題である。この問題の効果的解決を可能とするための基本的な対策が急がれている。自動生産システムの完全運用のために、切りくず処理の問題は、工具寿命の問題と同等、場合によってはそれ以上に重要と考えられている。切りくずを効果的に処理することは、加工能率を考慮しながら被削材料、切削工具材料と形状、工作機械、切削条件などいろいろな方向から改善が検討されているが、まだ解決に至っていない。

切りくず処理の問題は、高能率化の一要素といった単純なものではなく、作業の安全性、製品の品質保証、工具寿命、工作機械の精度維持といった切削加工上の重要な諸要素と結びついている。

切りくず処理が問題となる加工を分類すると以下のように整理することができる。

I. 旋削

- (1) 仕上げ加工
- (2) 軸部から端面への引き上げ加工
- (3) 内径加工

II. ドリル加工

（１）穴明け加工

以上のように、切りくずは旋削、ドリル加工において問題になっているが、具体的な問題点をあげてみると以下のように列記できる。

１．旋削

- （a）切りくずが工具や工作物に巻きつく
- （b）工具の刃先が切りくずにたたかれて破損する
- （c）切りくずが工作物の表面を傷める
- （d）テーブル上に切りくずが堆積する
- （e）切りくずが工作物の溝や穴に入る
- （f）切りくずが機械の摺動部やチャックに入る
- （g）切りくずと製品が混ざり合い分離しにくい

２．ドリル加工

- （a）穴から出た切りくずがドリル自身に巻きつく
- （b）穴の中で切りくずが詰まる
- （c）切りくずが堆積する

以上の諸問題を解決するための研究が以前から多くの研究者や技術者によって行われてきた。切りくずが引き起こす諸問題を解決する方法としては、切りくずを短い一定の長さに切断することがあげられる。このような観点から主に行われてきたことはチップブレーカによる切りくず切断の方法である。この方法は主として中山^{1) - 9)} のものがあげられる。次に切りくずを短く切断するのではなく、小さなカール状にして、工具や被削材に絡まらない方向に切りくずを流出させる方法^{10) - 19)} がある。また切削条件により切断する方法^{20) - 24)} や振動による切りくずの切断方法²⁵⁾ があげられる。

これらの方法は一長一短があり、全ての条件において切りくずを適切に処理できるまでには至っていない。一例を示すと、チップブレーカの場合、切込みが0.5 mm以上並びに送り速度0.15 mm／rev以上の条件ではほぼ切りくずを切

断できる。しかし、切込み 0.5 mm 以下または送り速度 0.1 mm/rev 以下においては、切りくずがチップブレーカに当たっても切断されず、工具や工作物に切りくずが絡まる現象が生じている。仕上げ加工の条件となる低切込みや低送りなどの時に切りくずを切断できないことが大きな問題になっている。

以上のことから本論文では、低切込みとなる仕上げ加工時の切りくずを切断することを取り上げることとした。切りくずは厚いほど側面の凸凹の影響が大きく折れやすくなることが報告されている³⁾。しかし、切りくずの厚みが薄くなり切りくずがつながるための限界に近くなると、逆に切りくずは切れやすくなるものと考えた。そこで切りくずの厚みに影響を及ぼす送りについて検討した。切りくずを完全に切断するためには切りくず厚みを零にすることである。つまり送りを零にすれば良いが、送りを零にすると工作物の表面に筋が生じて仕上面に悪い影響を及ぼすことになる。そこで、切削送りを零にするのではなく、切りくずがつながりにくくなる程度に送りを小さくして、切りくず厚みを薄くすることを検討する。

このような観点からまず第2章では切削送りをどのような条件にすれば切りくずを切断できるかについて明らかにする。²⁶⁾ また、切削送りを小さくすれば加工時間が長くなることが予想されるため、切断することと加工時間を最小限にすることを併せて検討する。

第3章では、旋削加工において切りくずを切断するための減速する送り速度と、その時の仕上送り幅と減速送り幅を合わせたトータル送り幅（以後送り幅と呼ぶ）を検討し、仕上面精度や加工時間及び工具寿命に対する効果を明確にする^{27) - 29)}。また、この章では長手切削の他に円弧切削においても減速した送り速度を間欠的に仕上送り速度の中に入れる方法で、切りくずを切断することを検討する。

第4章では、第3章で得られた結果に基づいてドリルの穴明け加工における切りくず切断のための最適な送り速度の条件を明らかにする。切りくずの切断を第

一義に考え，穴の真円度や工具寿命についても検討する．また，ドリル加工においては穴の曲がりも重要な要素であるので，間欠的に減速した送り速度を連続送り速度の中に入れた場合の効果を明確にする．³⁰⁾

第2章 切りくず処理用ソフトウェアの開発

2.1 緒 言

NC工作機械や専用工作機械の導入による自動化や無人化が大きな課題になっている。切削加工の自動化や無人化が進むと共に、生成排出される切りくずの処理性がきわめて重要となってきた。鋼の旋削加工では、連続した切りくずが発生しやすく、自動化の大きな障害になっている。特に仕上加工時に切りくずが切断されず被削材や切削工具に巻きつく現象が、加工現場でよく見受けられる。このため被削材の面粗さ不良、切削工具破損、労働災害、ロボット搬送装置の作動不良等を生じている。

切りくずを処理しやすい形状に切断する方法は、チップブレイカ法等種々行われている。^{1) - 6)}しかし切込み0.5 mm、送り0.1 mm/rev以下の仕上加工に対しては、いまだ有効な方法が見出されていない。

NC旋盤加工において、切りくずを処理しやすい長さに切断することが、自動化や無人化を実現する場合の大きな障害となっている切りくずの巻きつきや絡み合いを解消する方法と考えられる。また、この研究は前加工を必要とせず、仕上面粗さ、加工時間、工具寿命等それぞれ良好な状態で切りくずを処理しやすいように切断することを目的としている。

切りくずが細く薄くなると、切りくずがチップブレイカに当たっても折れずに伸びてつながった切りくずが生成してしまう。そこで切りくずがつながるための最低の厚み以下にすれば切りくずは自ずから切れると考えた。切りくずを薄くするためには送り速度を小さくすることである。しかし、送り速度を小さくすると加工時間が増加するので、送り速度と送り幅については最小限にしなければならない。そこでNC旋盤加工において仕上切削送り速度の中に減速した送り速度を

微小幅だけ入れる方法を考えた。つまり、送りを停止するのではなく、通常の仕上送り速度の中に間欠的に減速した送り速度を入れることにより、その減速時に切りくずを切断する方法である。以後間欠減速送りと呼ぶ。NCテープの中に減速した送り速度を入れる方法であるため、プログラミングするときに減速した送り速度の指令も加える方法をとった。一般的にプログラミングの方法で、この減速した送り速度を入れることは手入力となるため実際に入力するとなると時間がかかり実用的でない。

そこで本章ではパーソナルコンピュータを利用して最小の入力で、減速した送り速度を仕上加工の中に一定サイクルで間欠的に入るような自動プログラミングの開発を行った。⁷⁾⁻⁸⁾ 使用したパーソナルコンピュータの形態は、スタンドアロン形で、使用言語はベーシックである。使用機種は、シャープMZ3500で、プログラムのステップ数は320であった。

2.2 システム構成

パーソナルコンピュータをベースにした機器構成図を図I. 2.1に示す。MZ3500において開発したソフトウェアを使用し、NCデータを作成する。次に加工条件等の各種の機能をもつPW-8300は、XYプロッタ、NCテープパンチャで構成され、パーソナルコンピュータで作成されたNCデータを作図チェックする。また、加工条件機能を付けた後にNCデータをパンチアウトするシステムになっている。

仕上げ加工において、まず仕上面粗さが良好であること、次に加工時間があまり変わらないこと、工具寿命も低下しないこと、以上の条件を満たしながら切りくず切断の方法を考えた。すなわち、汎用旋盤では切削送りを自由に变化させることができないが、NC旋盤では送り速度を指令どおりに变化させることができることに着目し、連続送り速度の中に減速した送り速度を入れることにより、切

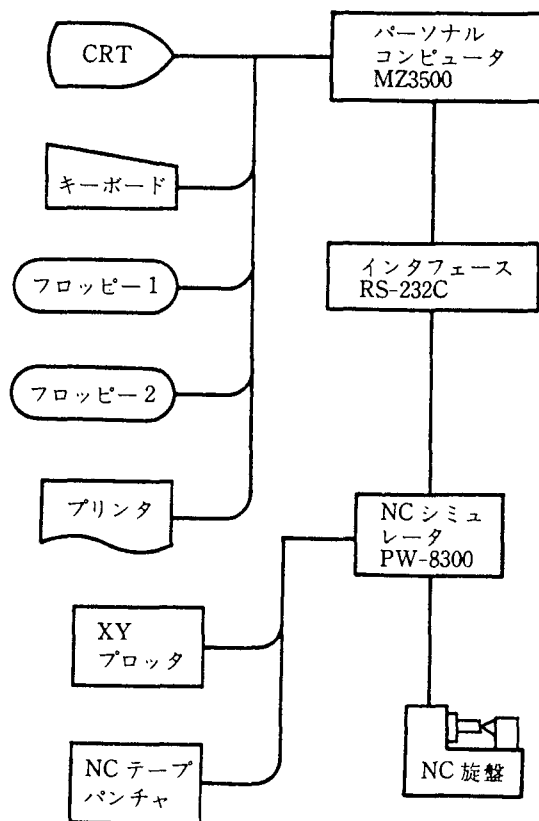


図 I. 2.1 機器構成図

りくずを切断する方法を行う。

切りくず厚みは送り速度が小さくなればなるほど薄くなり、最終的に送り速度が零になれば切りくずも零になる。そこで送り速度を徐々に小さくした時の切りくずの状態を示したものが図 I. 2.2 である。送り速度を 0.02 mm/rev から小さくしてゆき送り速度 0.012 mm/rev までは切りくずが長くつながっている。しかし送り速度が 0.01 mm/rev になると切りくずはつながらずに細かな切りくずになり始める。送り速度が 0.008 mm/rev になると完全に細かな切りくずが生成される。以上から切りくずを切断しやすくするためには 0.01 mm/rev 以下にすれば良い。しかしあまり送り速度を小さくすると加工

時間が長くなるので、減速する送り速度は 0.01 mm/rev が切りくずを切断する送り速度としては適している。

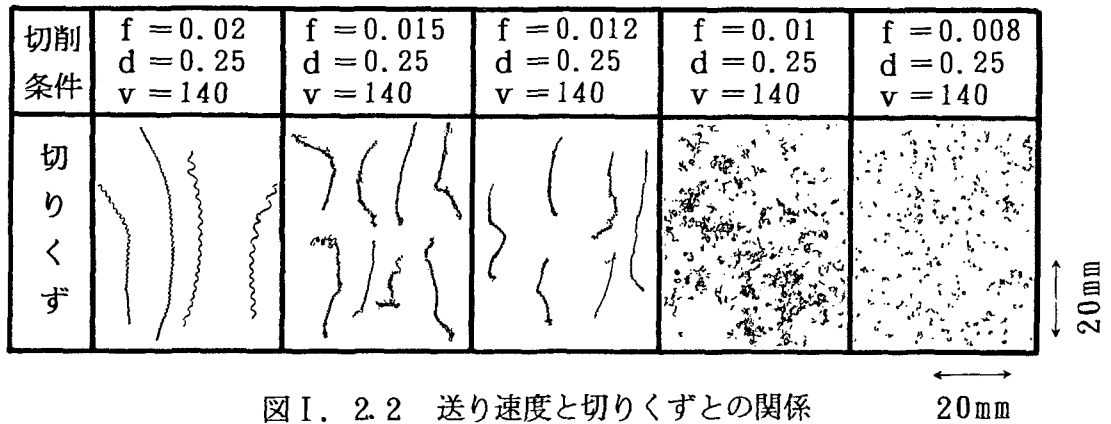


図 I. 2.2 送り速度と切りくずとの関係

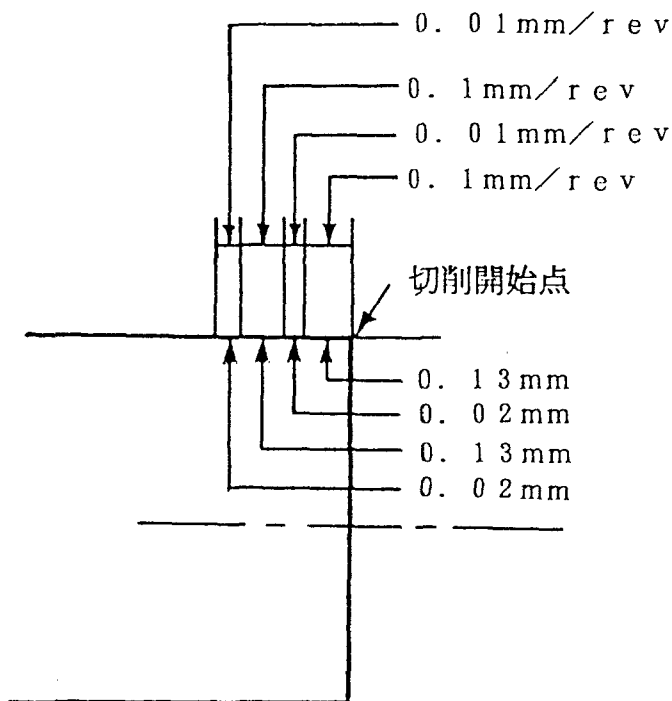


図 I. 2.3 間欠減速送りの図解

図 I. 2.3 は間欠減速送り切削による切削工具の動きを図解したものである。工具は原点から早送り位置まで早送りで移動し、次に切削開始点に切削送りで移動する。つづいて被削材の端面から 0.13 mm まで送り速度 0.1 mm/rev で移動する。次の 0.02 mm の幅を減速した送り速度 0.01 mm/rev で移動する。以後同様の動作を繰り返す方法である。

切りくず処理が容易に出来る自動プログラミングソフトのフローチャートを図 I. 2.4 に示す。(1)の選択モードの表示からデータインプットのモードを選択す

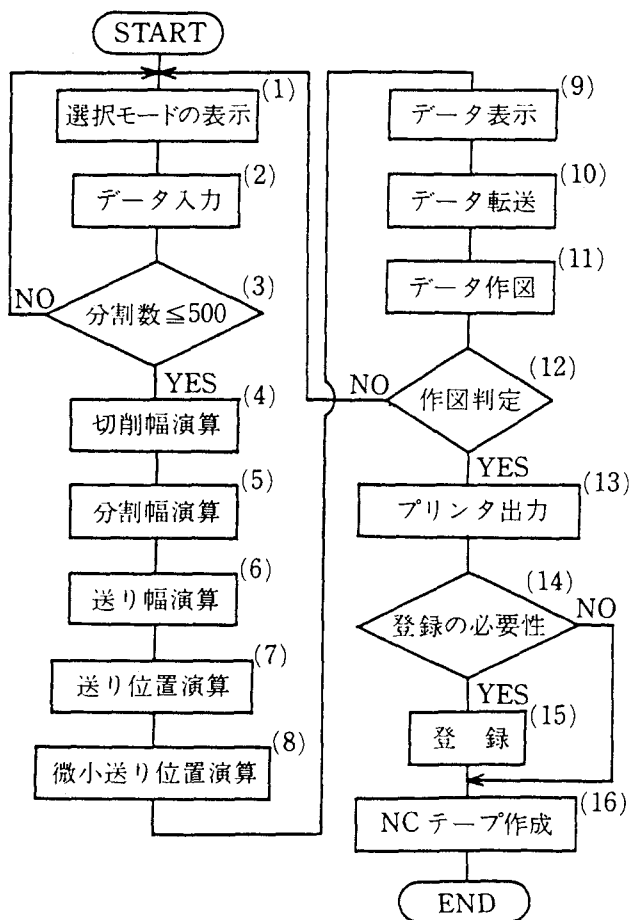


図 I. 2.4 切りくず処理用自動プログラミングソフトウェアのフローチャート

ると、(2)のデータ入力となる。(3)で分割数(減速した送り速度を入れる回数)が500以上になると、パーソナルコンピュータの能力がオーバとなり、エラーになってしまうので500以下にしなければならない。(4)は切削加工長さを演算する。(5)、(6)は分割幅、送り幅を演算する。(7)、(8)は送り位置と微小送り位置を演算する。これでNCデータの演算は完了する。

(9)はCRTにNCデータを表示する。(10)はPW-8300にデータを転送する。(11)はNCデータにより作図を行う。(12)で作図が正確にできているかどうか判定する。誤りがあれば再度(1)に戻り、データインプットのモード選択をして以後同様な手順となる。(12)でよければ、(13)のプリンタ出力を行う。(14)でデータの登録が必要であれば、(15)に進み、必要なければ(16)に進む。(16)ではNCデータをパンチアウトし、NCテープを作成して完了となる。

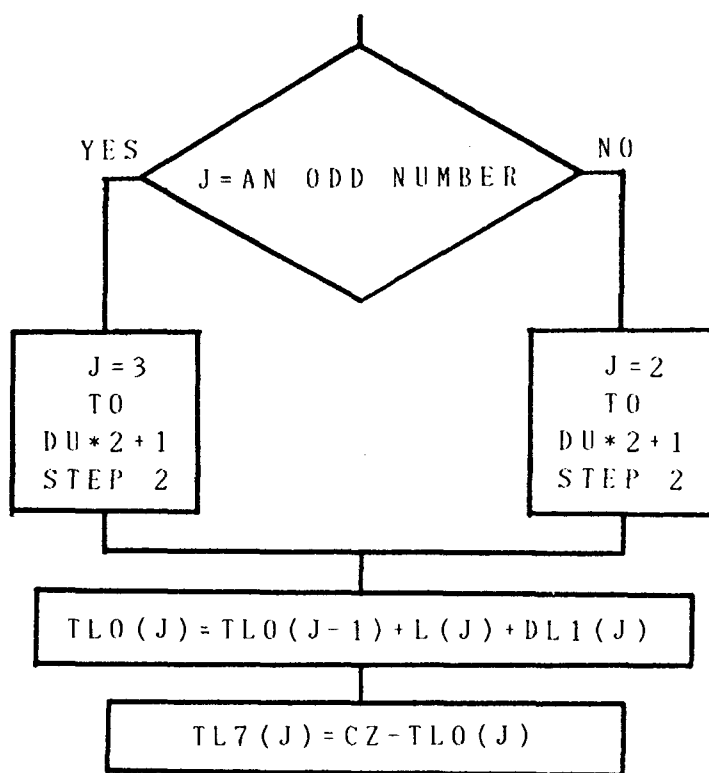


図 I. 2.5 Z軸の位置演算の流れ図

図 I. 2. 5 は Z 軸の位置演算の流れ図である。送り速度を変化するための Z 軸の位置の算出方法を示したものである。通常送り幅の到達位置を偶数，微小送り幅の到達位置を奇数とした。切削開始点（C Z）から通常送り幅 {L（T）} と微小送り幅 {D L 1（J）} を奇数，偶数に分け，1 回おきに交互に引いてやると Z 軸の位置演算ができる。

C R T における選択モードの表示を図 I. 2. 6 に示す。システムは 5 個のモードを実行するためのプログラムがディスクに格納されているので，オペレータはその番号を指定するだけでモードを自由に選択でき，実行させることができる。以下各モードを簡単に説明する。

- (1) データインプット： 切りくず処理条件，切削条件，切削油剤等の各条件に関するデータを入力し，そのデータに基づいて N C 指令を自動的に生成するモードである。

データインプット (1)

データヒョウジ (2)

ファイル (3)

データテンソウ (4)

プリントアウト (5)

オワリ (6)

OPERATION NO.

図 I. 2. 6 C R T における選択モードの表示

- (2) データヒョウジ： データインプットにより入力されたデータをもとにして計算されたNCデータを表示するモードである。計算過程で入力に誤りがあった場合、エラーが表示される。
- (3) ファイル： モード(1)で入力した各種のデータと生成したNC指令を自動的にフロッピディスクへファイルするモードである。
- (4) データテンソウ： (2)で表示されたNCデータをPW-8300に転送するモードである。PW-8300で作図を行い正確な作図であるかどうかを確認する。確認後NCテープを作成する。
- (5) プリントアウト： (2)で表示されたNCデータを記録紙にプリントするモードである。

図I. 2.7は入力項目と入力データの実例である。CRT画面に表示されるも

ゲンテン	X 0	ヲシテイセヨ	X 0 = X 3 0 0
ゲンテン	Z 0	ヲシテイセヨ	Z 0 = Z 3 0 0
ハヤオクリ	イチ		X H P = X 5 0
ハヤオクリ	イチ		Z H P = Z 5 1
セツサク	カイシテン		C T X = X 5 0
セツサク	カイシテン		C T Z = Z 5 0
セツサク	オワリテン		C E = Z 3 0
ブンカツスウ			D V = 2 0
ビショウ	オクリハバ		D L = 0 . 0 2
オクリ	ハヤサ		S P 1 = 0 . 1
オクリ	ハヤサ		S P 2 = 0 . 0 1
ニゲテン			E O X = X 5 0
ニゲテン			E O Z = Z 3 0
カイテンスウ			S = S 3 0 0
カイテン	ハウコウ		M = M 0 4
コウゲ	バンゴウ		K O G = T 0 3
セツサク	オイルハ	YES (1) NO (0)	= 1

図I. 2.7 入力項目と入力データ

のである。このデータは、円筒加工で長手方向に20mm切削する場合、減速した送り速度を20回仕上加工の中に一定サイクルで、間欠的に入力して切りくずを切断するデータの実例である。

図I. 2.8は図I. 2.7に表示した入力データを演算した後のNCデータである。このデータを転送してパンチアウトすれば、切りくず処理を含んだNCテープが作成される。これによって特に仕上加工つまり微小切込みの場合の切りくず処理が可能になる。減速送り速度を入れるための分割数や、減速送りの幅は入力データにより自由に入力できるため被削材の材質や切削条件に対して応用が可能である。

このように減速した送り幅が0.02mmと小さいため加工時間は連続送り切削よりそれほど増加しない。仕上面粗さは連続送り切削より間欠減速送り切削の方が良い結果が得られた。以上のことから間欠減速送り切削は、有効な切りくず処理方法であると考えられる。

G 9 6 S 3 0 0 G 0 0 X 3 0 0	
Z 3 0 0 M 0 4 T 0 3	
X 5 0 Z 5 1	F 0.1 Z 3 9.0 2
G 0 1 F 0.1	F 0.0 1 Z 3 9
X 5 0 Z 5 0	F 0.1 Z 3 8.0 2
F 0.1 Z 4 9.0 2	F 0.0 1 Z 3 8
F 0.0 1 Z 4 9	F 0.1 Z 3 7.0 2
F 0.1 Z 4 8.0 2	F 0.0 1 Z 3 7
F 0.0 1 Z 4 8	F 0.1 Z 3 6.0 2
F 0.1 Z 4 7.0 2	F 0.0 1 Z 3 6
F 0.0 1 Z 4 7	F 0.1 Z 3 5.0 2
F 0.1 Z 4 6.0 2	F 0.0 1 Z 3 5
F 0.0 1 Z 4 6	F 0.1 Z 3 4.0 2
F 0.1 Z 4 5.0 2	F 0.0 1 Z 3 4
F 0.0 1 Z 4 5	F 0.1 Z 3 3.0 2
F 0.1 Z 4 4.0 2	F 0.0 1 Z 3 3
F 0.0 1 Z 4 4	F 0.1 Z 3 2.0 2
F 0.1 Z 4 3.0 2	F 0.0 1 Z 3 2
F 0.0 1 Z 4 3	F 0.1 Z 3 1.0 2
F 0.1 Z 4 2.0 2	F 0.0 1 Z 3 1
F 0.0 1 Z 4 2	F 0.1 Z 3 0.0 2
F 0.1 Z 4 1.0 2	F 0.0 1 Z 3 0
F 0.0 1 Z 4 1	G 0 0 X 3 0 0 Z 3 0 0
F 0.1 Z 4 0.0 2	M 0 9
F 0.0 1 Z 4 0	M 0 5 M 3 0

図I. 2.8 データ表示のプリントアウト

2.3 間欠減速送りと切りくず挙動

図 I. 2.9 は切込みを変化させたときの間欠減速送り切削の切りくず形状を示したものである。切込みが0.05 mmから0.1 mmまでは切りくずのカールが小さく、切りくず長さも細かであった。切込みが0.2 mmから0.5 mmまでの形状を見ると切込みが大きくなるに従いカール径は大きくなっている。写真では切りくずを収集するときに重なり合ってしまったため、つながっている様に見えるが一定の長さに切断されている。ばらそうとすると切れてしまうためそのまま撮影した。これらのことから間欠減速送り切削は、切込みに関係なく切りくずを切断できることがわかった。

方法	間 欠 減 速 送 り			
No	1	2	3	4
切りこみ	0.05	0.075	0.1	0.2
切りくず				
方法	間 欠 減 速 送 り			
No	5	6	7	
切りこみ	0.3	0.4	0.5	
切りくず				

図 I. 2.9 間欠減速送り切削の切込み変化による切りくず形状

図 I. 2.10 は切込みを変化させたときの連続送り切削の切りくず形状を示したものである。当然の結果として切りくずは、切断されずつながった切りくずとなっている。切込みが大きくなると切りくずのカール径が大きくなる傾向があり切削工具や被削材に益々切りくずが巻きつきやすくなる。切込みが増加するに従い切りくず形状は悪影響を及ぼす傾向が強くなることがわかる。

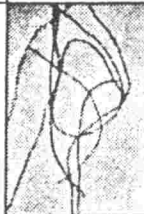
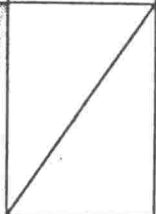
方法	連 続 送 り			
No	1	2	3	4
切りこみ	0.05	0.075	0.1	0.2
切りくず				
方法	連 続 送 り			
No	5	6	7	
切りこみ	0.3	0.4	0.5	
切りくず				

図 I. 2.10 連続送り切削の切込み変化による切りくず形状

切削速度を変化させた場合の間欠減速送り切削の切りくず形状と仕上面粗さを示したものが図 I. 2.11 である。切削速度を 200 m/min 以下にすると、仕上面が極端に悪くなるため、 200 、 250 、 300 m/min の 3 種類の速度で切削実験を行った。

切削速度の変化で、切りくずがどのように切断されるかを調べるために切削を行ったが、切削速度 200 、 250 、 300 m/min のいずれの場合も切りく

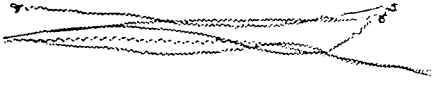
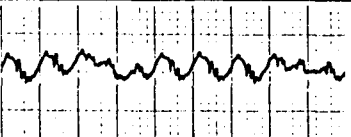
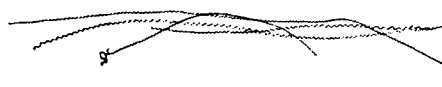
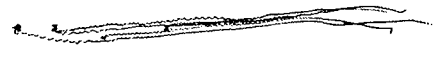
切削速度	切りくず形状	仕上面粗さ
200 m/min		
250 m/min		
300 m/min		

図 I. 2.11 間欠減速送り切削の切削速度変化による切りくず形状

ずは切断されていた。切削速度が増加するに従い、切りくずカール径は小さくなる傾向がある。切りくずは切りくずカール径が小さい方が絡まりにくいため、工

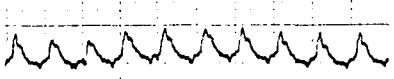
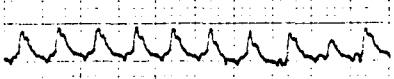
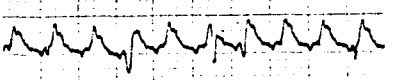
切削速度	仕上面粗さ
200 m/min	
250 m/min	
300 m/min	

図 I. 2.12 切削速度変化による仕上面粗さ

具寿命を考慮した上で、できうるかぎり切削速度は大きい方が良いと言える。切りくず長さはそれぞれほぼ同じ長さに切断されているため、切りくずは送り速度が減速した時に切断されるものと考えられる。仕上面粗さは、切削速度 200, 250, 300 mm/min において、 R_{max} が $2\text{ }\mu\text{m}$ でほぼ同じであった。

切削速度を変化させた場合の連続送り切削の仕上面粗さを示したものが図 I. 2.12 である。仕上面粗さは、切削速度 200, 250, 300 mm/min において、 R_{max} が $2.5\text{ }\mu\text{m}$ でほぼ同じであった。これらのことから間欠減速送り切削の方が連続送り切削より、仕上面粗さにおいて少し良いと言える。

2.4 結 言

NC 旋盤加工の切りくず処理を行うため、パーソナルコンピュータを使用して、間欠減速送り切削の機能をもった自動プログラミングソフトの開発を行い次のような結果が得られた。

- (1) 間欠減速送り用のソフトウェアを開発したが満足できる結果を得た。入力項目により自由に条件を変えられることができるため被削材に応じた条件を入力し、適切な切りくず処理条件の NC テープを作ることができた。
- (2) NC 旋盤において減速送り速度を 0.01 mm/rev にし、その時の幅を 0.02 mm の条件にすれば切りくずの絡みや、巻きつきをなくし、切りくずを一定の長さに切断できることがわかった。
- (3) 仕上面粗さについては、間欠減速送り切削の仕上面粗さが $R_{max} 2\text{ }\mu\text{m}$ で、旋削の仕上面粗さとしては十分と考えられる。また、間欠減速送り切削の外観は、連続送り切削の仕上面よりむしろ良いくらいであり、良好な仕上面であった。
- (4) 間欠減速送り切削の加工時間は、連続送り切削より若干増加する程度であった。

第3章 旋削における切りくず処理

3.1 緒言

切りくず処理が最近大きな問題としてとりあげられているのは、切削能率の向上にともなって、時間当たりの切りくず生成量が非常に増加し、その排出の能率化や自動処理が全体の能率に大きく影響するようになってきたためである。また、切削作業の自動化、無人化のためには切りくずが工具や加工物に絡みつくとという障害はなんとしても避けなければならないことである。高価なNC旋盤に工業ロボットまで付けて、しかもそのわきに作業者が立って、からみついた切りくずを落としている風景が見られるのは、切りくず処理のむずかしさを如実に示すものである。

これらの問題解決のためには、工作機械や切りくず搬出装置などの設計ももちろん重要であるが、根本は切りくずを処理しやすい切削を行うことである。したがって切りくずに要求される事項としては、なるべくかさばらないこと、絡みつかないような形であること、遠くに飛散しないことなどがあげられる。そこで、なるべく短く切断した切りくずが望ましいが、あまり短いと飛散が問題になる。また、密に巻いたパイプ状の切りくずは、長く続いたものであっても、絡みつにくいので、むしろ処理しやすいとの報告がある。^{1) - 4)} 一方、切りくず処理が容易であっても、仕上面粗さ、切削抵抗、工具寿命等に悪影響を及ぼしては困る。

このようなことから、本研究では旋削の仕上送り速度の中に減速した送り速度を微小幅だけ間欠的に一定ピッチで入れる方法で、^{5) - 6)} 特に低送りと低切込みの条件において、切りくずを処理しやすい長さに切断することを目的とした。また、この方法は前加工や特殊な装置を必要とせず、仕上面粗さ、工具寿命、切削加工時間等それぞれ良好な状態で切りくずを処理しやすいように切断した結果を明らかにする。

3.2 間欠減速送り

実験には大隈鉄工所製LS30N型数値制御旋盤を使用した。NCテープの作成には、パーソナルコンピュータを使用した。被削材は炭素鋼S50C，ステンレス鋼SUS304，アルミニウム合金AL2017であり，これを長手切削により行った，使用工具は，超硬合金を母材にした多層コーティングチップで，工具刃部形状は，上すくい角 0° ，横すくい角 0° ，前逃げ角 5° ，横逃げ角 5° ，前切れ刃角 52° ，横切れ刃角 3° コーナ半径0.8mmのものを使用した。切削条件は表I. 3.1に示すとおりである。実験は湿式切削で行った。

切りくずを処理しやすいように切断するために，間欠減速送り法を図示したものが図I. 3.1である。切削工具は原点から早送り位置まで早送りで移動し，次に切削送りで切削開始点まで送り速度 0.1 mm/rev で移動し，切削開始点から幅0.48mmだけ送り速度 0.1 mm/rev で移動し，次に微小幅0.02mmを減速した送り速度 0.01 mm/rev で移動する。以後この方法を繰り返すものである。送り速度 0.1 mm/rev から 0.01 mm/rev の変化に要する時間は，指令とサーボ機構の到達時間を合わせて7～8msであるので，減速送りの微小幅が小さくても十分 0.01 mm/rev の送り速度に到達できるものである。微小幅が0.01mmでは切りくずを切断できない場合があるが，微小幅を0.02mmにすると全て切断できた。

表I. 3.1 実験条件

切 削 速 度	m/min	141, 200, 500
送 り 速 度	mm/rev	0.1, 0.01
切 込 み	mm	0.05

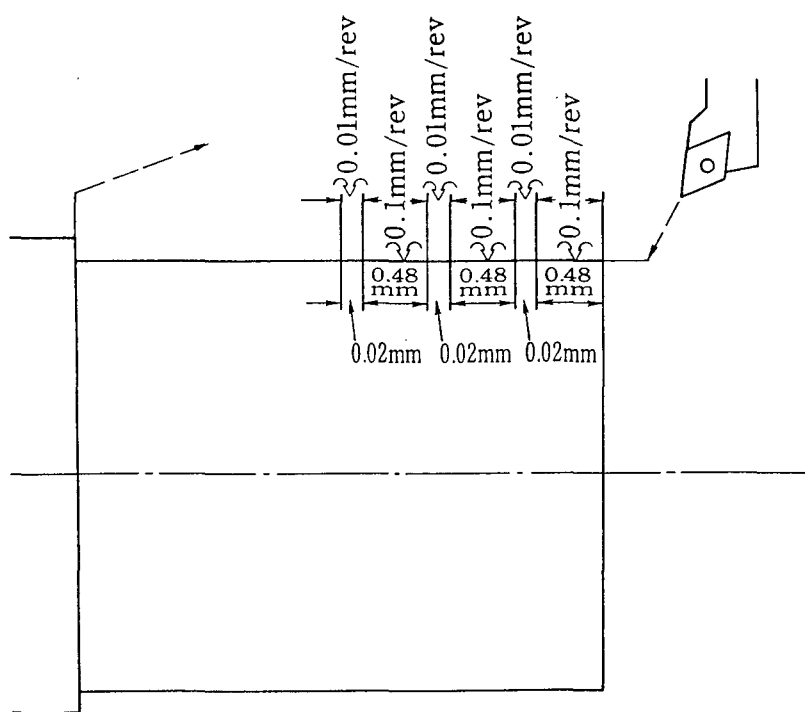


図 I. 3.1 間欠減速送り方法

3.3 切りくずの処理性

被削材 S 5 0 C, S U S 3 0 4, A L 2 0 1 7 において, 間欠減速送り切削と連続送り切削を行ったときの切りくずの状態を示したものが図 I. 3.2 である。間欠減速送りの場合はそれぞれ一定の長さに切断されているのがわかる。S 5 0 C は小さくカールしており, S U S 3 0 4 は S 5 0 C より大きい径のコイル状になっている。A L 2 0 1 7 は延性が高いため S 5 0 C ほどカールしていない。一方連続送り切削ではそれぞれ明らかにつながって, 絡まっている状態である。切りくずを処理しやすい長さに設定するためには, 作業者が逆算して間隔を決定すれば良い。

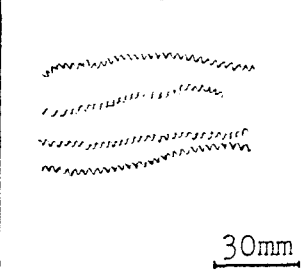
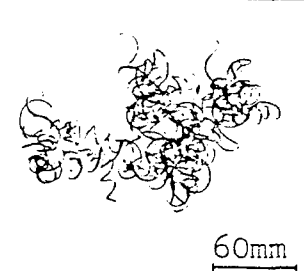
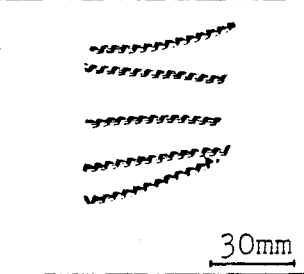
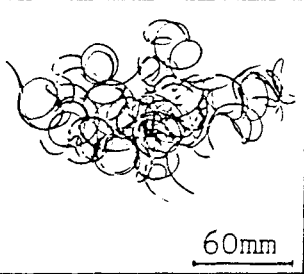
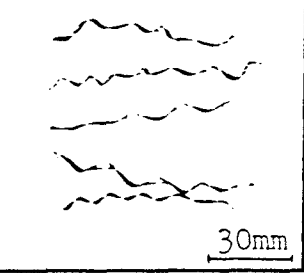
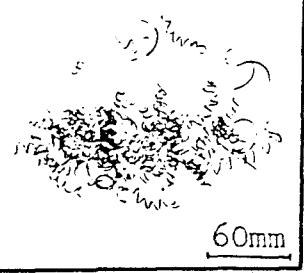
	間欠減速送り 送り 0.1mm/rev 幅 0.15mm 送り 0.01mm/rev 幅 0.02mm	連続送り 送り 0.1mm/rev
切削速度 180m/min 切込み 0.25mm S50C		
切削速度 150m/min 切込み 0.25mm SUS304		
切削速度 600m/min 切込み 0.25mm AL2017		

図 I. 3. 2 間欠減速送り切削と連続送り切削の切りくず形状の比較

図 I. 3. 3 は被削材 S 5 0 C, S U S 3 0 4, A L 2 0 1 7 の表面性状と仕上面粗さ曲線を示したものである。表面性状と仕上面粗さの横倍率が 5 0 倍であるので、送りマークの関係が良くみることができる。仕上面粗さ曲線をみると、間欠減速送り切削の方が仕上面粗さが良くなっている傾向がある。特に被削材が柔らかくなっているほど、その傾向は大きくなっている。

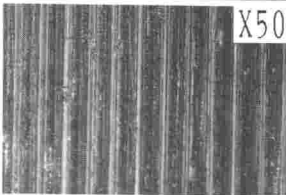
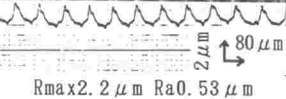
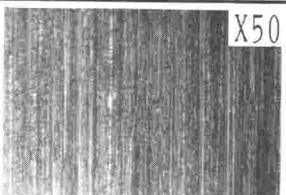
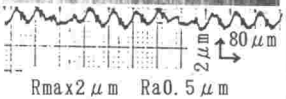
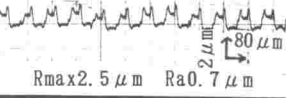
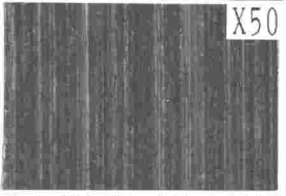
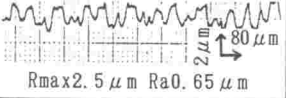
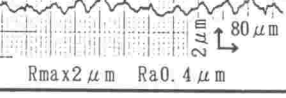
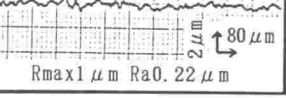
	連続送り切削 送り速度 0.1mm/rev	間欠減速送り切削 送り速度 0.1mm/rev 幅 0.13mm 送り速度 0.01mm/rev 幅 0.02mm
切削速度 200m/min 切込み 0.05mm 被削材 S50C	  Rmax2.2 μm Ra0.53 μm	  Rmax2 μm Ra0.5 μm
切削速度 141m/min 切込み 0.05mm 被削材 SUS304	  Rmax2.5 μm Ra0.7 μm	  Rmax2.5 μm Ra0.65 μm
切削速度 500m/min 切込み 0.05mm 被削材 AL2017	  Rmax2 μm Ra0.4 μm	  Rmax1 μm Ra0.22 μm

図 I. 3.3 間欠減速送り切削と連続送り切削の表面性状と仕上面粗さの比較

被削材 S 5 0 C の加工時間に対する逃げ面摩耗幅を調べたものが図 I. 3. 4 である。図 I. 3. 4 から間欠減速送り切削を行っても、連続送り切削の場合に比べて摩耗の増加はみられないため、寿命の低下がないことがわかった。

図 I. 3. 5 は被削材 S 4 5 C の連続送り切削と間欠減速送り切削の工具摩耗の写真である。摩耗の形状はほぼ同じようであるが、減速送りの前逃げ面摩耗の方が連続送りの前逃げ面摩耗より少ないことを示している。

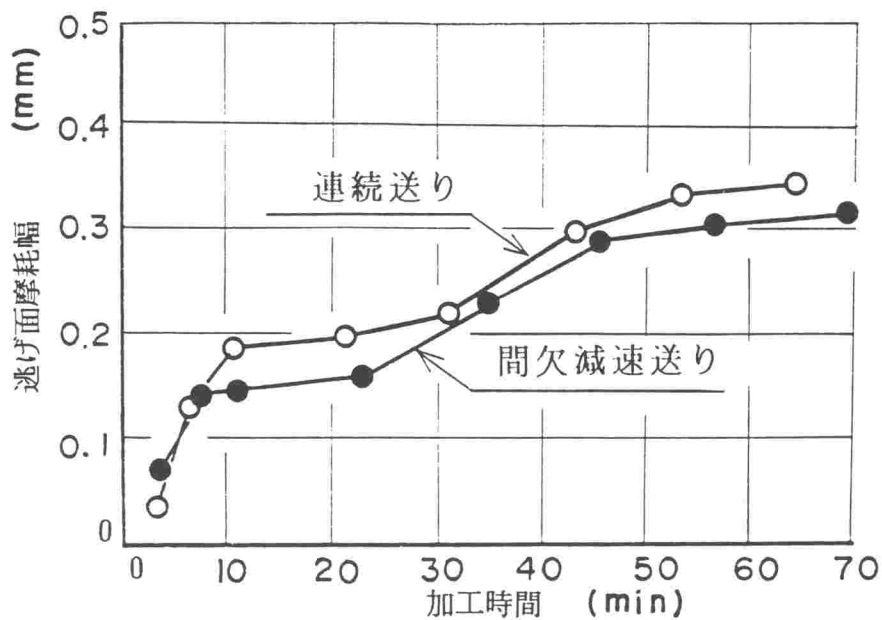


図 I. 3. 4 加工時間と逃げ面摩耗幅

連続送り

間欠減速送り

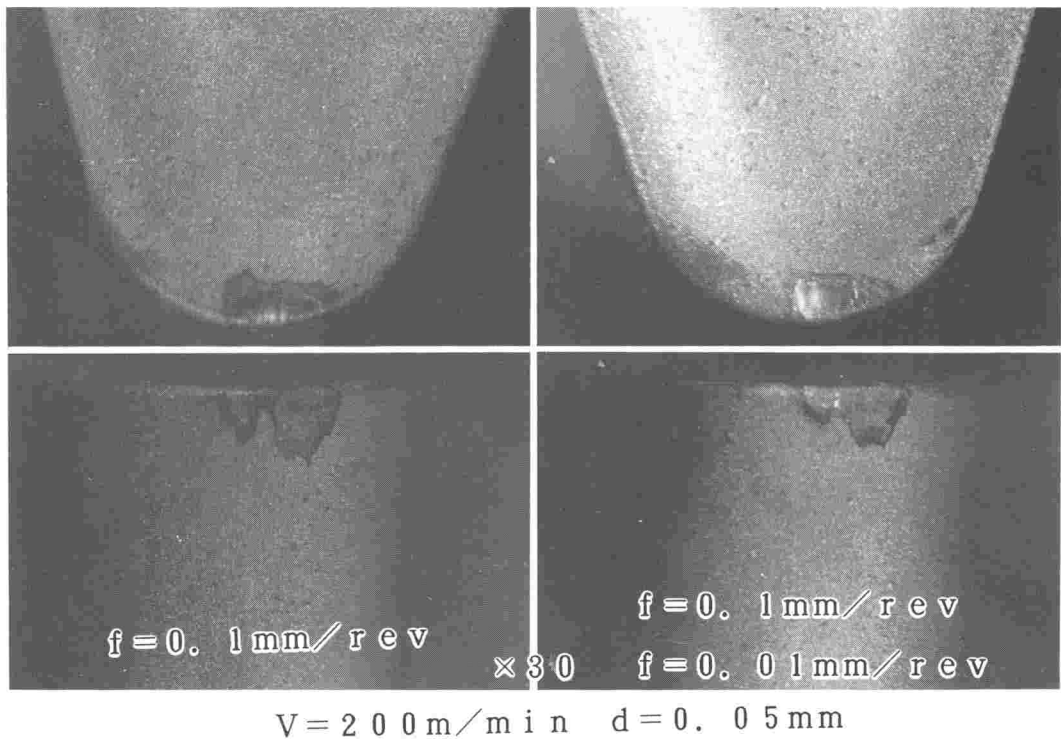


図 I. 3. 5 間欠減速送り切削と連続送り切削の工具摩耗の写真

図 I. 3. 6 は円弧切削における間欠減速送り切削を図示したものである。円弧を角度によって分割する方法である。まず 0.9° に分割される円弧を $0.1\text{ mm}/\text{rev}$ の送り速度で切削し、次ぎに 0.1° に分割される円弧を $0.01\text{ mm}/\text{rev}$ の送り速度で切削する。以後この方法を繰り返し行うものである。

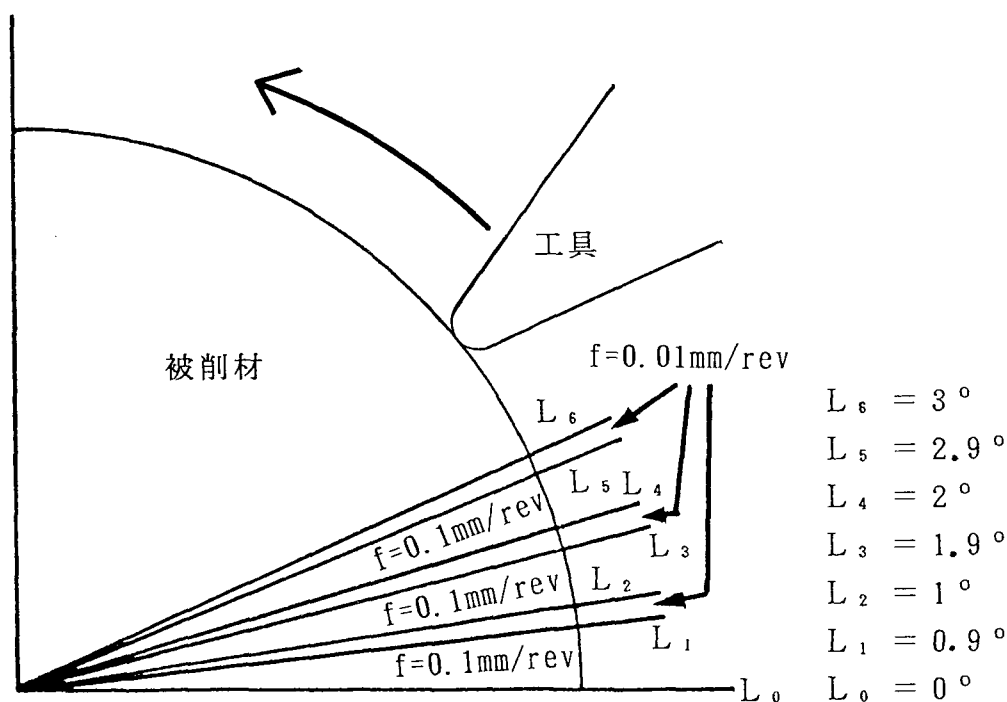


図 I. 3. 6 円弧における間欠減速送り切削

図 I. 3. 7 は円弧切削の場合の間欠減速送り切削のソフトウェアのフローチャートである。円弧を角度で分割し、円弧上の送りを変換する各点を計算して求め NC テープを作成する。

図 I. 3. 8 は円弧切削における連続送り切削の切りくず形状を示したものである。連続送り切削では切りくずが切り込みに関係なくつながり、工具や被削材に絡まりやすい形状になっている。このような切りくずが生成する加工法では、工具が破損する危険性がある。さらにこの種の切りくずは作業性においても悪く、

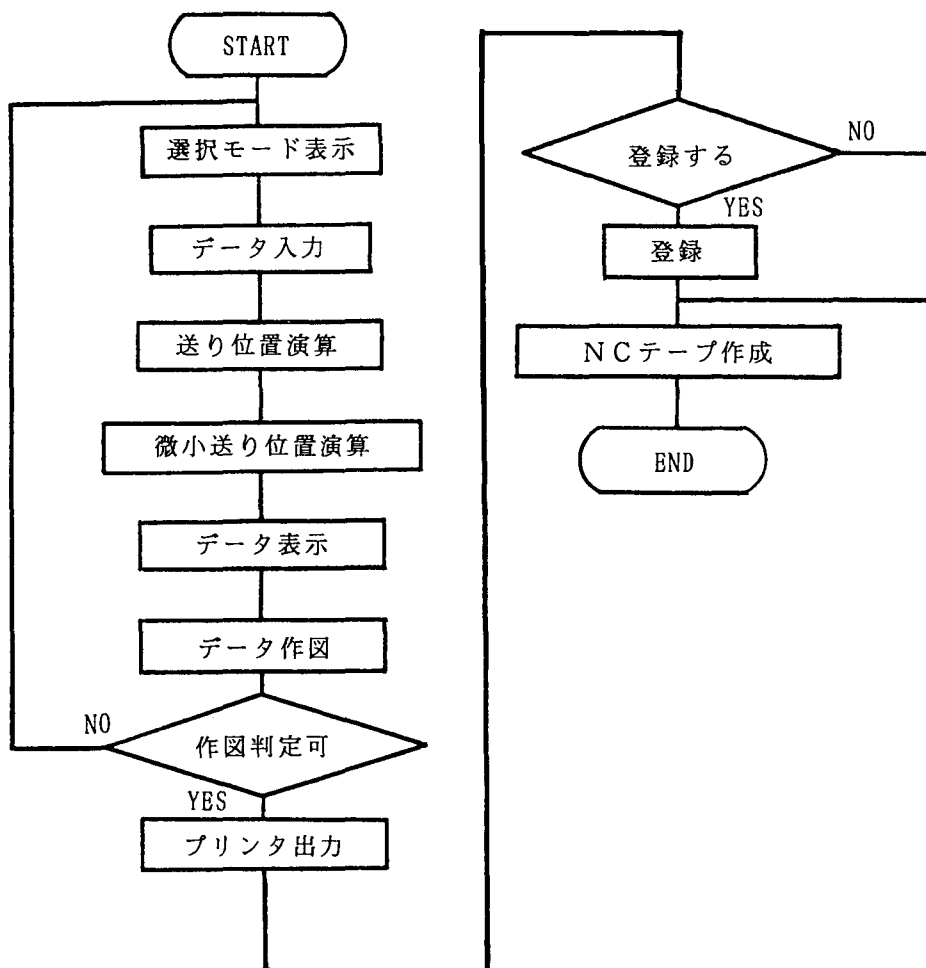
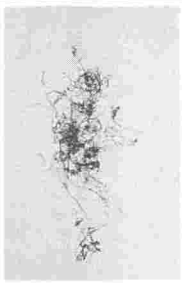
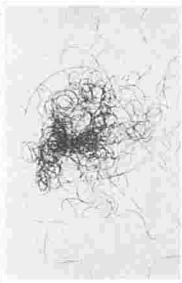


図 I. 3. 7 円弧における間欠減速送り切削のソフトウェアのフローチャート

製品の精度にも著しく悪影響を及ぼすことになる。

図 I. 3. 9 は円弧切削で間欠減速送り切削の切りくず形状を示したものである。連続送り切削の切りくず形状とは異なり，切りくずは全て切断されている。このことによって間欠減速送り切削は長手切削だけでなく，円弧切削においても十分切りくずを切断でき，実用的に使用できることが明らかになった。

図 I. 3. 1 0 は間欠減速送り切削による円弧切削後の被削材の写真である。表面は光沢があり，表面性状が良いことを示している。

切 削 方 法	連 続 送 り			
実 験 番 号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
切 込 み	0.05	0.07	0.1	0.2
切りくず				
切 削 方 法	連 続 送 り			
実 験 番 号	No. 5	No. 6	No. 7	
切 込 み	0.3	0.4	0.5	
切りくず				

$$V = 200 \text{ m/min} \quad f = 0.1 \text{ mm/rev}$$

図 I. 3. 8 切 込 み変化にともなう連続送り切削の切りくず形態変化

切 削 方 法	間 欠 減 速 送 り			
実 験 番 号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
切 込 み	0.05	0.07	0.1	0.2
切りくず				
切 削 方 法	間 欠 減 速 送 り			
実 験 番 号	No. 5	No. 6	No. 7	
切 込 み	0.3	0.4	0.5	
切りくず				

$$V = 200 \text{ m/min} \quad f = 0.1 \text{ mm/rev}$$

$$f = 0.01 \text{ mm/rev}$$

図 I. 3.9 切込み変化に伴って生じる間欠減速送り切削の切りくず形態変化



図 I. 3.10 間欠減速送り切削による
円弧切削の仕上写真

3.4 切りくずの切断特性

図 I. 3.11 は間欠減速送り切削における切削抵抗を示したものである。図 I. 3.11 をみると一つのパターンの繰り返しになっており、その数は 19 である。10 mm の幅を 20 分割して、減速した送りを入れる加工を行ったが、減速送り速度の数は 19 であるので、パターンの数と一致している。

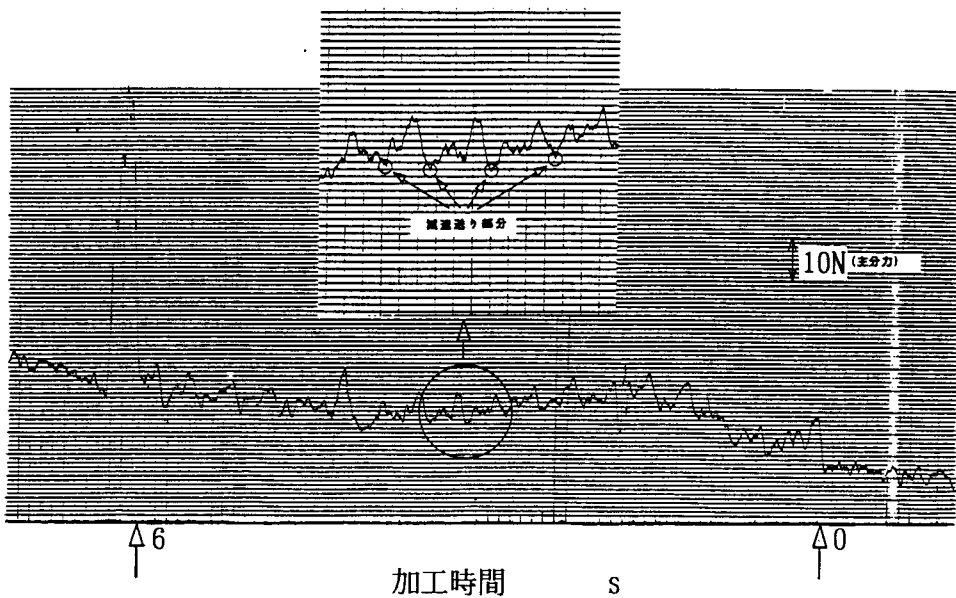


図 I. 3.11 間欠減速送り切削の切削抵抗

切りくずの切断に関しては工具刃先の変位が関与している可能性があると考えられるため、工具刃先の変位を検討する。図 I. 3.12 は工具刃先近傍に加速度センサを取り付けた状態を示したものである。取り付け位置は工具のすくい面上に固定した。工具刃先の変位で切りくずが切断されるものであれば、主分力方向の変位が最も影響が強いと考えられるため、図 I. 3.12 のように取り付けた。

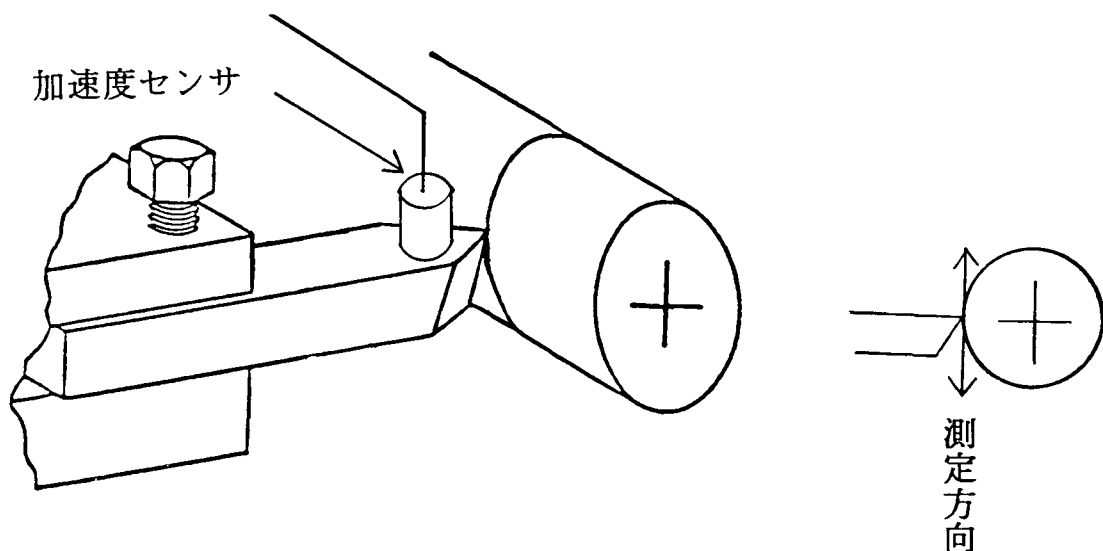
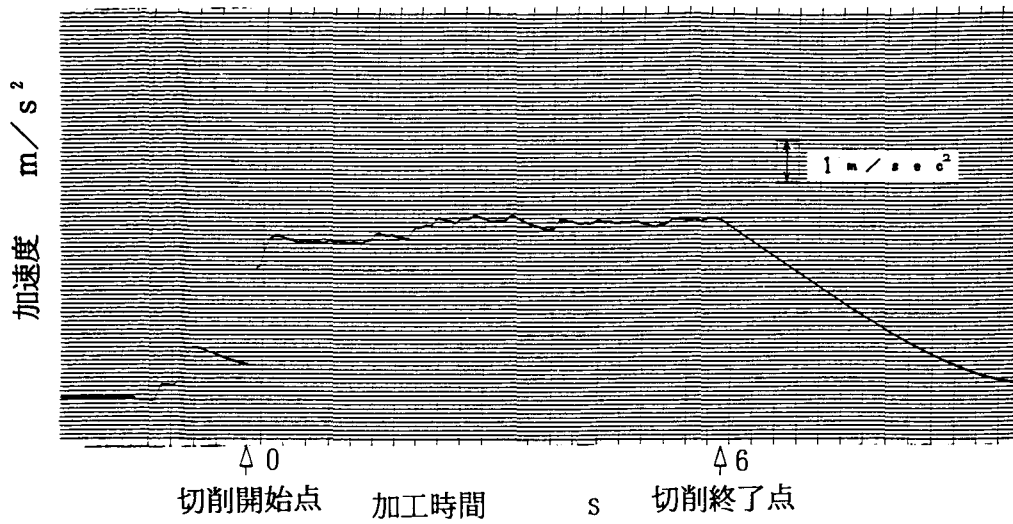


図 I. 3.1 2 加速度センサの取り付け位置

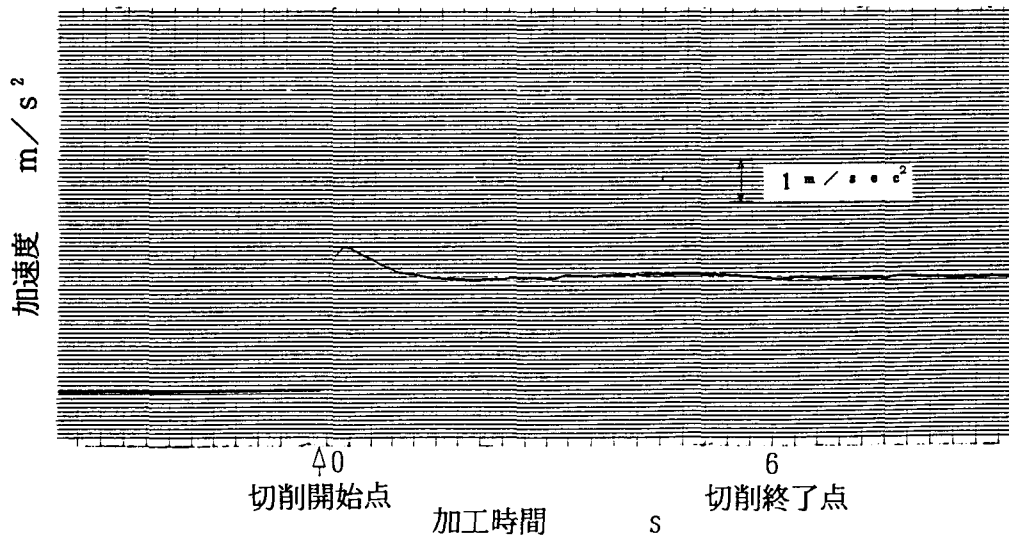
図 I. 3.1 3 は間欠減速送り切削と連続送り切削の工具刃先の切削方向（主分力方向）の加速度の状態を示したものである。同図(a)の曲線が間欠減速送り切削の場合であり、同図(b)の曲線が連続送り切削の場合である。明らかに間欠減速送り切削では加速度に変化が生じており、2 回積分すると変位がでるので、工具刃先に微小の変位が生じていることがわかる。

図 I. 3.1 4 は有限要素解析のため使用した切削工具を自動要素分割したものと、有限要素法により計算した工具刃先の変位を示したものである。分割技法は境界線上の発生節点を自動発生させて行った。節点数は 2 2 4 であった。

バイトホルダの材質は S C M 4 4 0 で、チップは超硬合金を母材にした多層コーティングチップである。同図(a)は左勝手の工具の X Y Z 面を示したものであり、同図(b)は Y Z 面を示したものである。同図(c)は減速送り速度になる前の抵抗値 1 0.8 N と減速送り速度になったときの抵抗値 6.6 N の工具刃先の変位を静解析で 5 万倍に拡大して図示したものである。いずれも図はワイヤフレームモデルである。



(a) 間欠減速送り切削と加速度



(b) 連続送り切削と加速度

図 I. 3.13 間欠減速送り切削と連続送り切削時の工具先端の加速度

工具刃先の時間による変位をとらえるために、構造力学の運動方程式を有限要素法により半離散化近似したものが次式である。

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{F\}$$

ここで、 $\ddot{\cdot}$ は d^2/dt^2 ， $\dot{\cdot}$ は d/dt ， $[M]$ は質量マトリクス， $[C]$ は減衰マトリクス， $[K]$ は剛性マトリクス， $\{u\}$ は変位ベクトル， $\{F\}$ は

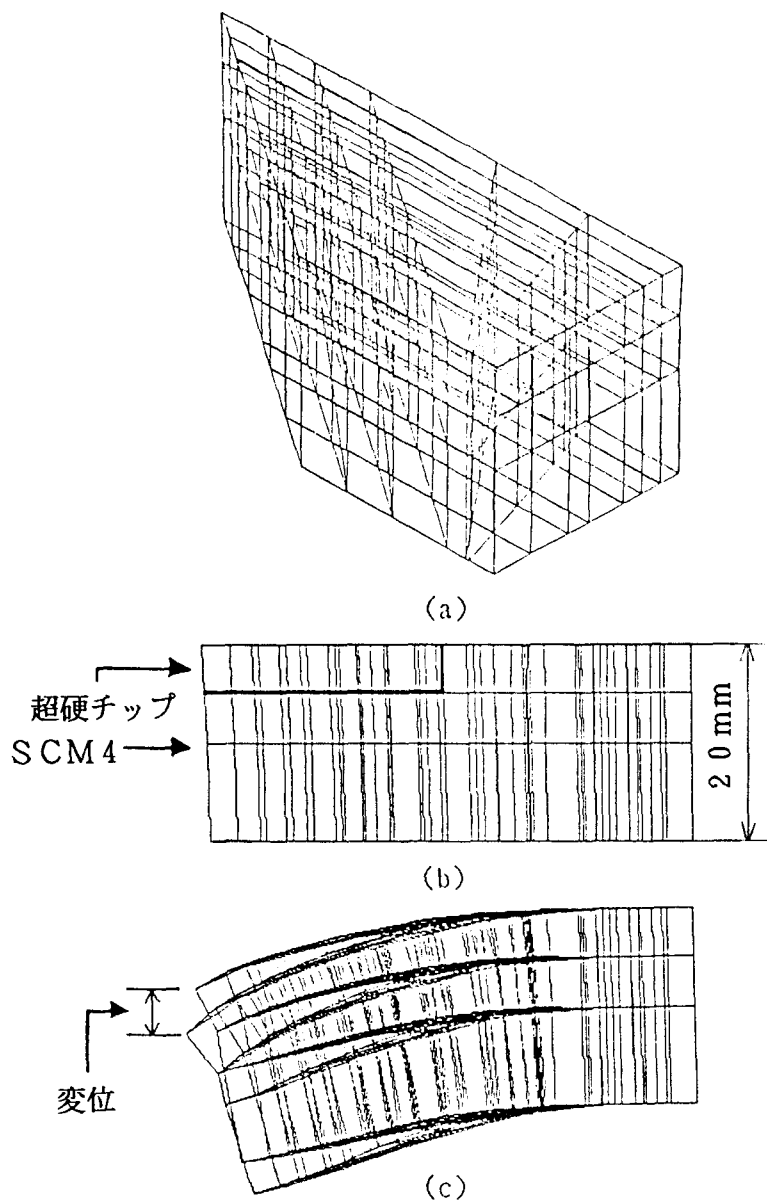


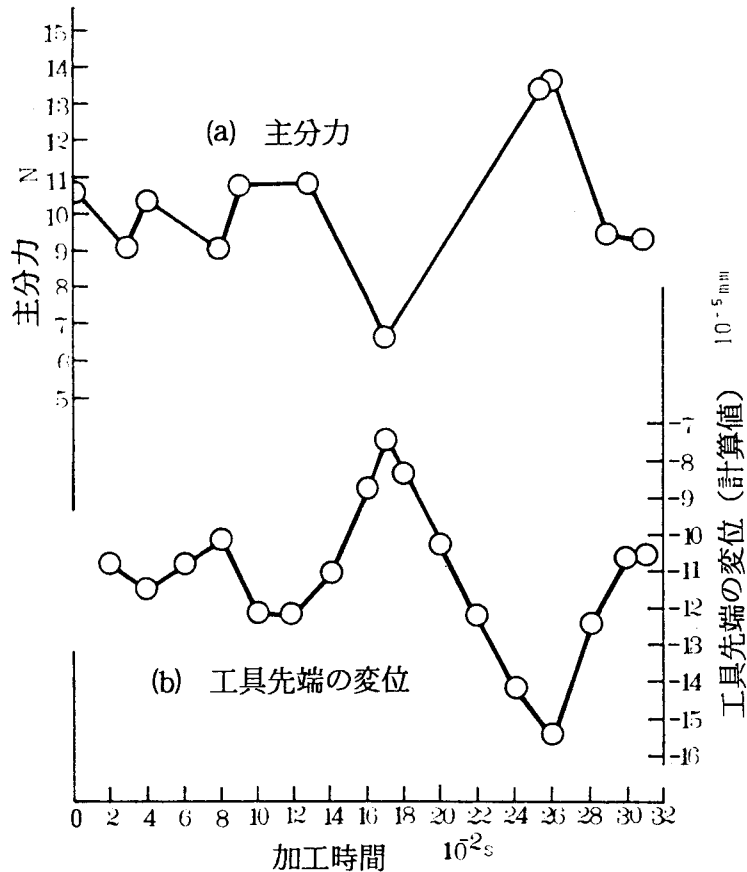
図 I. 3.14 有限要素法による工具刃先の変位

荷重ベクトルである。

2階微分の項を直接近似する方法としてWilsonの θ 法による数値解析式に展開して、以下一般的に時刻 t の工具刃先抵抗を与え工具刃先の変位分布を求める手法によって行った。

超硬合金の物理定数はヤング率 $E = 4.41 \times 10^{12} \text{ N/m}^2$ ，ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。SCM440の物理定数は，ヤング率 $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，ポアソン比 $\nu = 0.3$ ，とした。

図I. 3.15は工具刃先の切削時間による変位を示したものである。同図(a)の曲線は間欠減速送りのときの切削抵抗値（主分力）である。同図(b)の曲線が時間



図I. 3.15 間欠減速送りにおける工具先端の主分力と変位

0 から 0.31 s 間に工具刃先の変位を動解析したものである。0.17 s のところが減速送り速度の部分である。この図から明らかなように減速送り速度のときに切削抵抗値は低下し、逆に工具刃先は復元力で主分力方向と逆方向にはね上がっているのがわかる。

被削材 SUS304 の連続送りと間欠減速送りの顕微鏡写真を図 I. 3.16 に示す。連続送りの切りくずで、30 倍のものが実体顕微鏡で撮影したものである。切りくずは一定の厚みになっている。さらに 280 倍に拡大してみると、流れ形

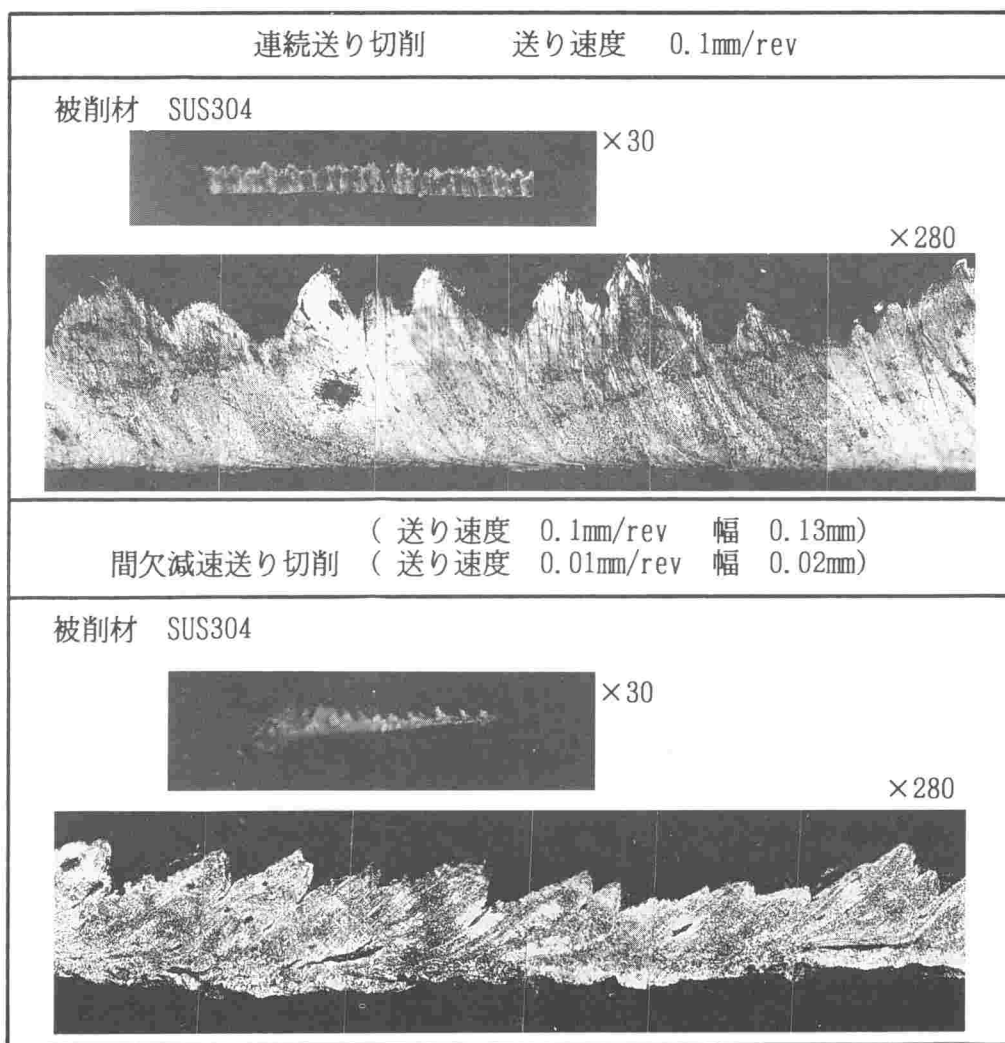


図 I. 3.16 間欠減速送り切削と連続送り切削の切りくず写真

の切りくずになっているのがみられる。

間欠減速送りの場合，30倍の実体顕微鏡で切りくずの切断された部分をみると，切りくず厚みが切断部分に近づくにつれて薄くなっているのが見られる。これは減速した送りが小さいため，切りくず厚みも小さくなるものと考えられる。切りくずの中間部分を280倍にしてみると，切りくずはせん断形を示している。これは減速送りにより工具刃先に振動が起こり，切りくずがせん断形になるものと考えられる。せん断形の切りくずは，流れ形の切りくずより当然切断されやすい。

切りくずが切断される原因として，次のことが考えられる。切削送り速度が小さくなると，有効すくい角が小さく（極端に小さくなると負角になる）なる。そのことによって切れ味が低下し，工具刃先に振動が誘発されると同時に，切りくずは図I. 3.16から明らかなようにせん断形の切りくずになり，切れやすくなる。また，減速時に薄くなった切りくずの部分に振れ回りによる集中応力が生じること等が重なることによって，切りくずは切断されると考えられる。

3.5 結 言

間欠減速送り切削により被削材S50C，SUS304，AL2017のいずれの場合にも切りくずを切断することができ，切りくず処理性としては，良好であった。以下結果を要約する。

- (1) 数値制御旋盤における間欠減速送り切削の条件については，減速送り速度0.01mm/revが最も適している。また，その時の幅は小さい方が良いが0.01mmでは切りくずが全て切断できない場合がある。しかしその幅を0.02mmにすると完全に切断できるため，切断条件としては減速送り速度は0.01mm/revでその時の幅が0.02mmの組合せが適している。

- (2) 間欠減速送り切削の仕上面粗さは、連続送り切削の仕上面粗さより良い仕上面であった。特にAL2017とSUS304では顕著に差がでた。
- (3) 切削加工時間については、間欠減速送りでも連続送りより若干増加する程度であった。
- (4) 被削材S50Cの工具寿命について調べた結果、間欠減速送り切削は連続送り切削に対して寿命の低下はみられなかった。
- (5) 切りくずが切断される原因としては、切削送り速度が小さくなると、有効すくい角が小さくなる。そのことによって切れ味が低下し、工具刃先に振動が誘発されると同時に、せん断形の切りくずになり切れやすくなる。また、減速時に薄くなった切りくずの部分に振れ回りにより集中応力が生じること等が重なることによって、切りくずは切断されることが考えられる。

第4章 ドリル加工における切りくず処理

4.1 緒 言

穴明け加工は切削加工の30%を占めていると言われており重要な加工法の一つである。先端技術分野における製品の小型化、軽量化、高性能化に伴い、穴明け加工の中でも小径穴明け加工を要求される例が増えてきた。小径とは一般に $\phi 10\text{ mm}$ 以下を指す。先端技術の進展している現在、さらに深穴加工が増加してきている。深穴とは通常、直径の3～5倍以上の深さを持つ穴を言うが最近のニーズは直径の10倍以上の深穴を求めている。この小径深穴加工は特有のさまざまな問題点をもっている。そのいくつかをあげると以下ようになる。

- (1) 切りくず処理性が悪く、安定した連続切削が難しい。
- (2) 工具形状が細くなり、曲げや振じりに対して工具強度が弱くなる。
- (3) 切削油剤の供給が難しい。
- (4) 切削熱が放散しにくく、これによって精度の低下、加工変質層の発生、工具の熱変形、工具摩耗などの悪影響がでる。

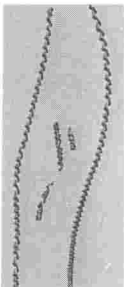
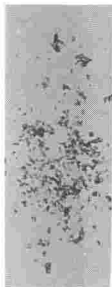
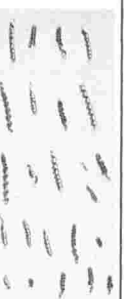
以上の問題点のなかで特に大きな課題となっているものが(1)の切りくず処理の問題である。ドリルによる穴明け加工では、切りくずが悪影響を及ぼし、しばしば生産性向上の障害になっている。一般に切りくずは穴の内壁によって強い拘束を受け、切りくずの流出が妨げられる。このような時には、切削抵抗、特にトルクが増し切削温度が上昇し、切れ刃の摩耗が促進される。したがってドリルの穴明け加工の性能を向上させる方法の一つとして、切りくずを短く切断し、切りくずの流出を容易にすることがあげられる。穴明け加工の切りくずに関する研究も旋削と同様に数多く報告されている。^{1)～10)} しかしそれらはドリルの刃部形状にたよるものが多く十分な効果を上げるに至っていない。

そこで本研究では，ドリル加工の連続送りの中に減速した送り速度を微小幅だけ間欠的に一定ピッチで入れる方法^{11)・12)}で切りくずを一定の長さに切断すること，また，切りくず流出が容易になることで，穴の曲がりや連続送り切削より少なくなる結果を明らかにする。

4.2 ドリル加工における間欠減速送り

間欠減速送りの最適な条件を決めるために送り速度と送り幅をそれぞれ変え，そのときの切りくずの状態を調べてみた。図 I. 4.1 は各種間欠減速送りにより切断された切りくずを示した写真である。実験番号 2 番の場合，切りくずが細かすぎるため，飛散して悪影響を及ぼすこと，また，減速時の幅が 0.1 mm と比較的長いことから，加工時間が増加してしまう。実験番号 3 番の場合，減速時の送り速度が 0.02 mm/rev であるため切りくずを切断できない時がある。送り速度を更に大きくした実験番号 4～6 番の条件では切りくずを切断できないことが明らかになった。実験番号 7 番をみると減速時の送り速度が 0.01 mm/rev であるが，送り幅が 0.01 mm と小さいため切りくずを切断できない場合が生じている。実験番号 8～9 番の条件では切りくずがよく切断されている。特に実験番号 8 番は減速時の幅が切りくずを切断できる範囲のなかでは 0.02 mm と一番小さいため加工時間を最小限の増加に食い止めることができる。以上のことから，減速時の送り速度が 0.01 mm/rev でその時の幅が 0.02 mm を間欠減速送りの最適条件と設定した。

図 I. 4.2 は図 I. 4.1 の各切削条件で穴深さ 20 mm まで加工したときの加工時間を示したものである。加工能率を考慮すると，切削加工時間はできるだけ短い方が良いので，実験番号 1 の連続送り切削の加工時間 17 秒に近い方が良い。実験番号 2 から 9 までの中で加工時間の短いものは，実験番号 7 と 8 である。図 I. 4.1 から実験番号 7 は切りくずを完全に切断できない場合があるので，実験

切削方法	連続送り	間欠減速送り			
実験番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
送り速度(f) と 送り幅(s)	f=0.15	f=0.15 s=0.9 f=0.01 s=0.1	f=0.15 s=0.9 f=0.02 s=0.1	f=0.15 s=0.9 f=0.03 s=0.1	f=0.15 s=0.9 f=0.05 s=0.1
切りくず					
切削方法	間欠減速送り				
実験番号	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	
送り速度(f) と 送り幅(s)	f=0.15 s=0.9 f=0.1 s=0.1	f=0.15 s=0.99 f=0.01 s=0.01	f=0.15 s=0.98 f=0.01 s=0.02	f=0.15 s=0.95 f=0.01 s=0.05	
切りくず					

ドリル径 8 mm 回転数 950 rpm

図 I. 4.1 間欠減速送り速度の変化と切りくず形状

番号 8 が最も良いと言える。以上のことから減速時の送り速度が 0.01 mm/r ev でその時の幅 0.02 mm を最適条件とした。

被削材は炭素鋼 S45C, ステンレス鋼 SUS304, アルミニウム合金 AL

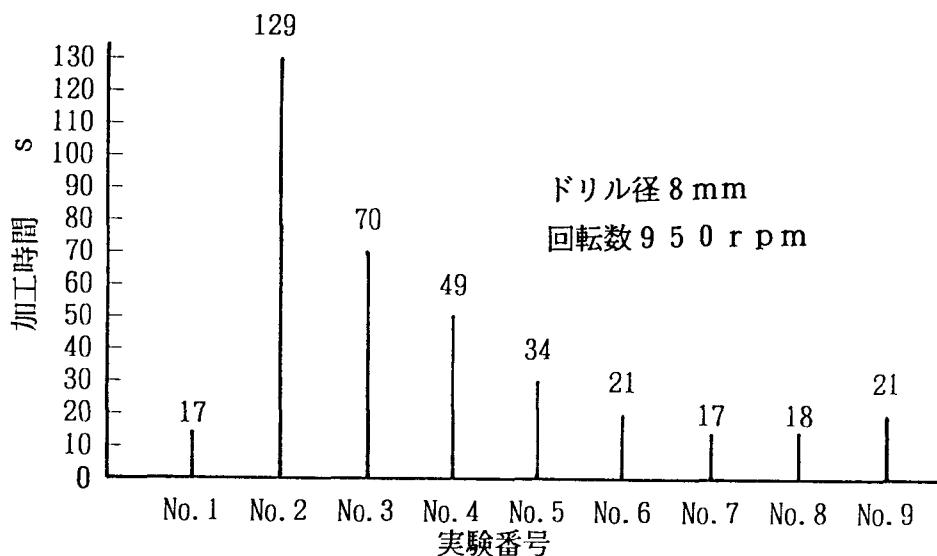


図 I. 4. 2 実験番号と加工時間との関係

表 I. 4. 1 実験条件

送り速度	rpm	600, 950, 2000
回転数	mm/rev	0.01 0.15

2017を使用した。市販のドリル刃先を工具顕微鏡で調べて見ると、刃こぼれや割れが生じているものが見られるため、これらを取り除く目的ですべてのドリルを先端角 118° に再研削したもので実験した。工具直径は8mmのものを使い、切削条件は表I. 4. 1に示すとおりである。実験は乾式切削で行った。

図I. 4. 3はドリル加工における間欠減速送り切削の図解を示したものである。ドリルは原点から早送り位置まで早送りし、次に切削送りで切削開始点まで送り速度 0.15 mm/rev で移動し、次に微小幅 0.02 mm を減速した送り速度 0.01 mm/rev で移動する。以後この方法を繰り返し行うものである。

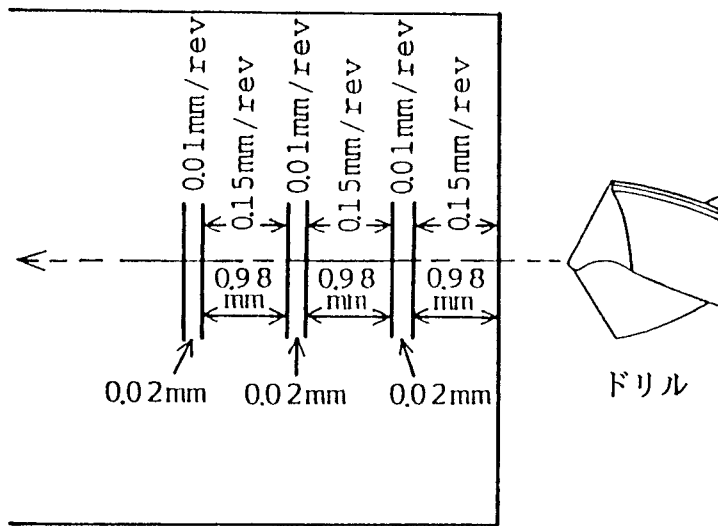


図 I. 4.3 ドリル加工における間欠減速送り切削の図解

4.3 切りくずの処理性

連続送り切削と間欠減速送り切削で、被削材 S 4 5 C, SUS 3 0 4, AL 2 0 1 7 を切削したときの切りくず状態を示したものが図 I. 4.4 である。連続送り切削の場合、切りくずは長くつながっている。一方、間欠減速送り切削は、それぞれ一定の長さに切断されているのがわかる。被削材 S 4 5 C, SUS 3 0 4, AL 2 0 1 7 のいずれも減速した送り速度の時に切断されている。

送り速度 0.15 mm/rev でその時の幅が 0.98 mm の場合、密にカールした切りくず長さは約 15 mm の長さになっている。切りくず処理としては十分処理しやすい長さと考えられる。工作機械の構造によっては、さらに切りくずが長くなっても障害にならない場合があると考えられる。減速した送り速度を変化させてみると、減速送り速度が 0.01 mm/rev であれば、S 4 5 C, SUS 3 0 4, AL 2 0 1 7 のいずれの場合においても切断できるが、被削材によっては減速送り速度を大きくしても切断できると考えられるため被削材に応じた減速送

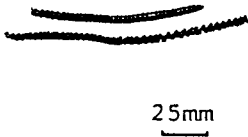
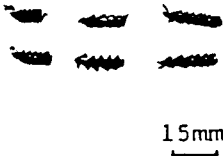
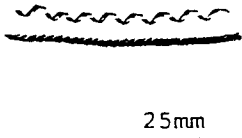
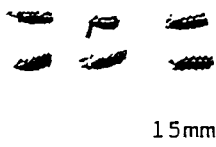
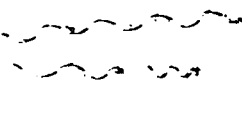
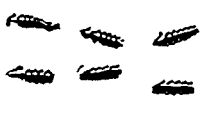
	連続送り切削 送り 0.15mm/rev	間欠減速送り切削 送り 0.15mm/rev 幅 0.98mm 送り 0.01mm/rev 幅 0.02mm
回転数 950rpm Drill HSS 8 mm 被削材 S45C	 25mm	 15mm
回転数 600rpm Drill HSS 8 mm 被削材 SUS304	 25mm	 15mm
回転数 2000rpm Drill HSS 8 mm 被削材 AL2017	 25mm	 15mm

図 I. 4.4 間欠減速送り切削と連続送り切削の切りくず形状の比較

り速度を設定すれば良い。

以上のように、減速した送り速度を入れる間隔と減速時の送り速度を最適にすれば、切りくずを障害にならない長さに切断することができる。

図 I. 4.5 は被削材 S 4 5 C，S U S 3 0 4，A L 2 0 1 7 の切削後の穴の仕上面粗さ曲線を示したものである。連続送り切削と間欠減速送り切削の仕上面粗さを比較してみると、ほとんど同じような仕上面粗さであり、間欠減速送りであっても仕上面粗さは悪くならないことがわかった。

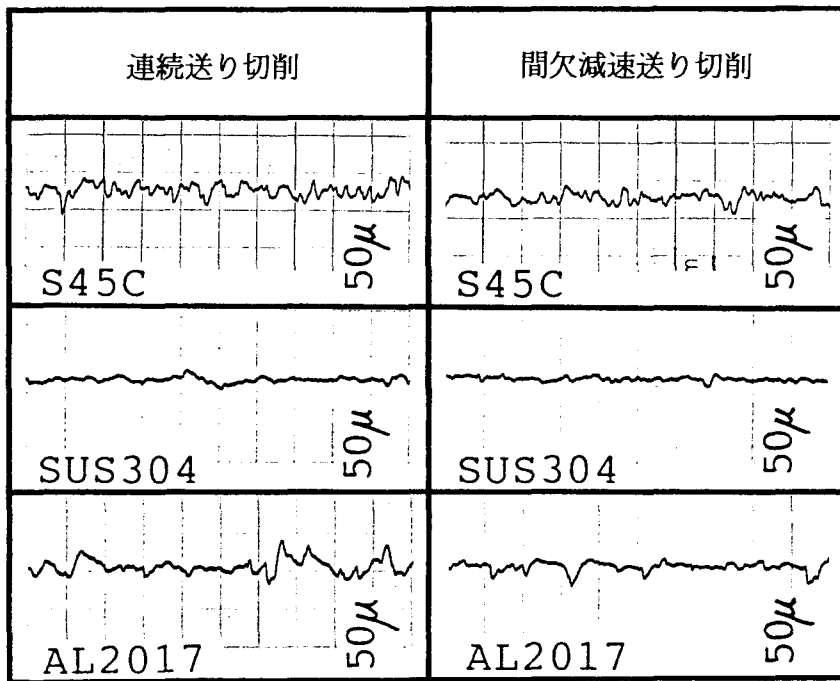
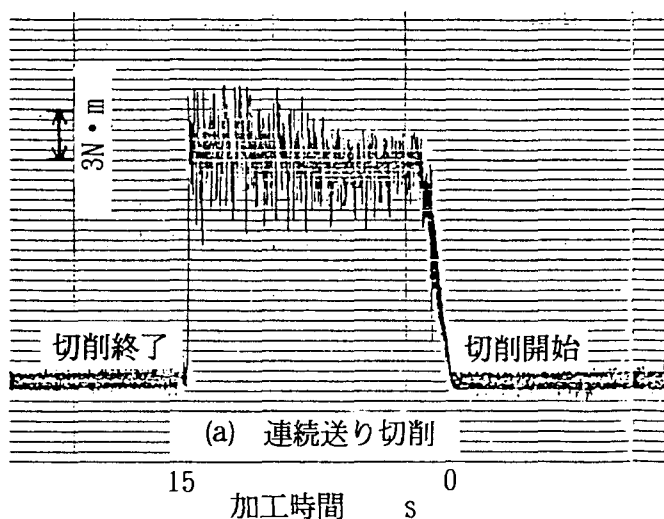


図 I. 4.5 穴仕上面粗さの比較

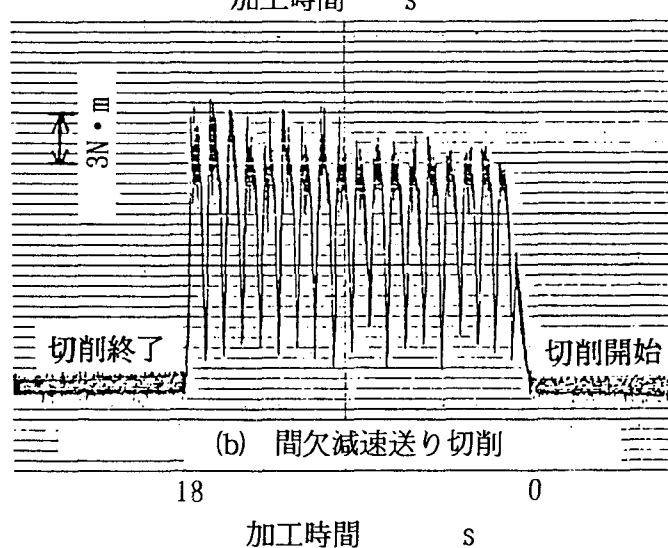
4.4 間欠減速送りによる効果

連続送り切削と間欠減速送り切削のトルクの比較図を示したものが図 I. 4.6 である。連続送り切削では、穴あけ始め 28.5 N・m であるが、穴が深くなるにつれて増加し最後には 30.8 N・m になる。これは切りくずの排出が悪化して抵抗が増加し、トルクが増加するものと考えられる。間欠減速送り切削では、穴あけ始め 27 N・m で以後も連続送り切削ほどトルクは増加していない。これは切りくずが一定の長さに切断され、切りくずの排出が容易になっているためと考えられる。

穴の中の切削状況や切りくずの様子をさぐることは重要なことである。そこで、穴の中の切りくずの詰まりの状態を見るためにアコースティックエミッション（以後 A E と呼ぶ）を用い A E の平均値を検出することを試みる。



ドリル径 8mm
 回転数 950rpm
 送り 0.15mm/rev



ドリル径 8mm
 回転数 950rpm
 送り 0.15mm/rev,
 0.01mm/rev

図 I. 4.6 間欠減速送り切削と連続送り切削のトルクの比較

図 I. 4.7 は A E による連続送り切削と間欠減速送り切削の比較である。同図 (a) の連続送り切削によるドリルの穴あけでは、深さの中間ほどから高い A E 平均値が頻繁に発生しているのがみられる。これは切りくずが詰まりやすくなっていることと、穴の中で無理な状態で切断されているためと考えられる。

一方同図 (b) の間欠減速送り切削では、後半に少し高い A E 平均値が見られる程度である。また、全体的なレベルをみても間欠減速送り切削の方が、低いことが

容易にわかる。以上のことから間欠減速送り切削では、切りくずが穴の中でも一定の長さで切断されるため、ドリルの溝の中を切りくずが通る場合、連続送り切削より容易に排出されていると推測できる。

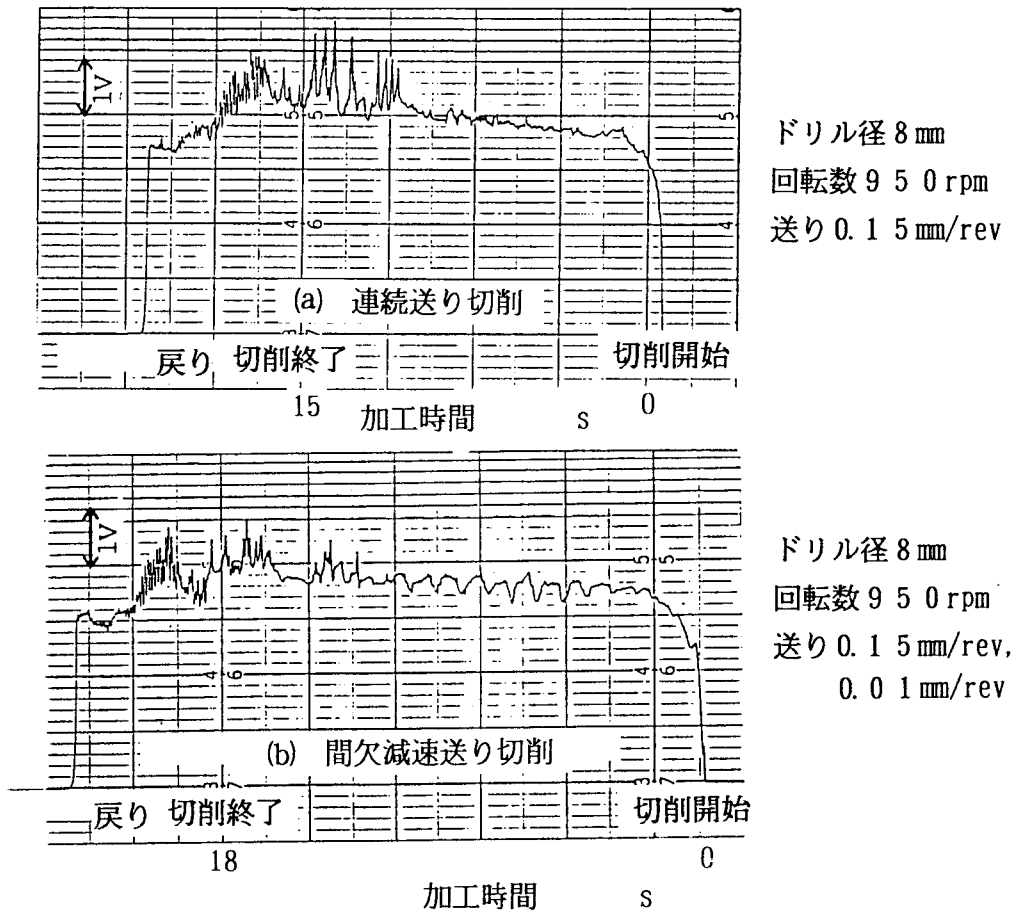


図 I. 4.7 間欠減速送り切削と連続送り切削の AE の比較

図 I. 4.8 はドリルによって加工された穴の真円度を測定するための測定機器構成図である。穴径が 8 mm と小さいので通常の真円度測定機では測定ができないため、図のような測定機構成で測定した。輪郭形状測定器で測定を行い、そのデータにもとずいて真円度を打ち出すものである。

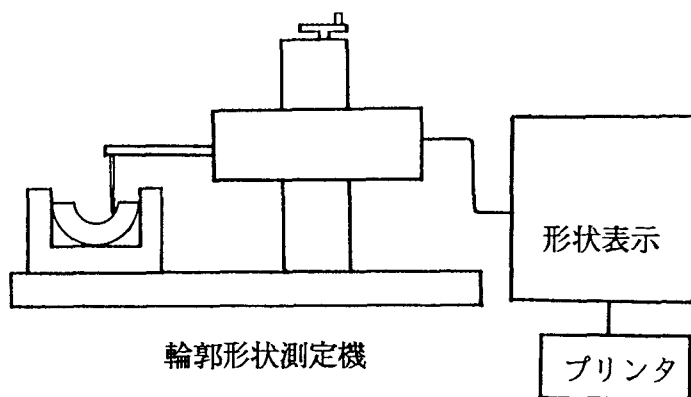


図 I. 4. 8 真円度測定のための機器構成

図 I. 4. 9 は図 I. 4. 8 の測定機で真円度を測定した結果である。連続送り切削は穴が深くなるにつれて真円度の精度は悪くなる傾向であるが、間欠減速送り

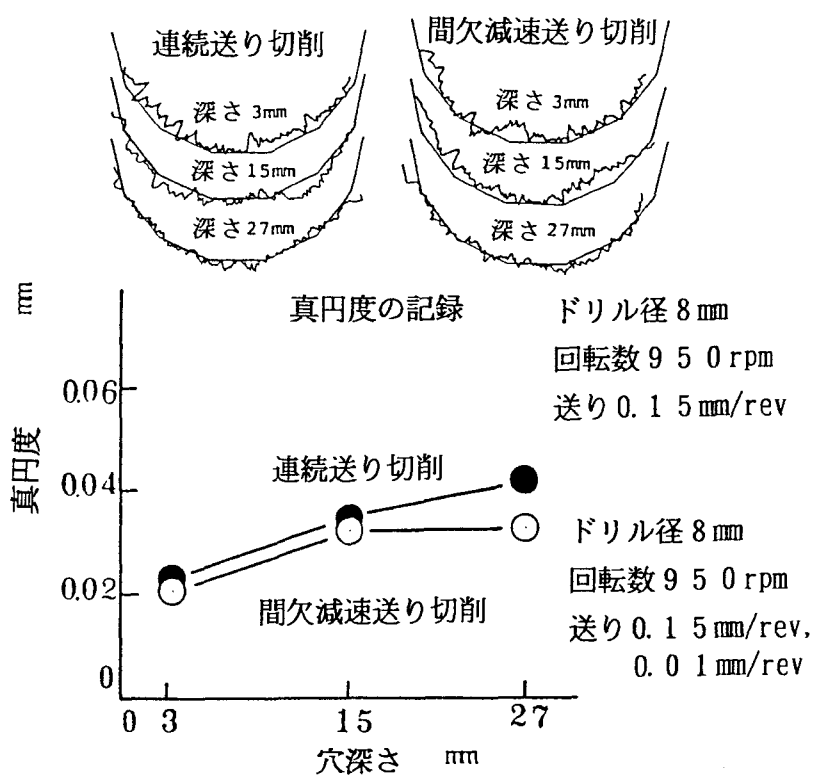


図 I. 4. 9 間欠減速送り切削と連続送り切削の穴の真円度の比較

切削では連続送り切削ほど悪くはない結果が得られた。

図 I. 4.10 は加工穴の曲がりの状態を 3 次元測定機で調べるための測定箇所を図示したものである。被削材の両端面は円筒軸に垂直に研削したものを使用した。穴は 90° に分割し、それぞれ A、B、C、D 断面とした。測定は A 面、B 面を対にして測定した。測定深さは 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm であった。

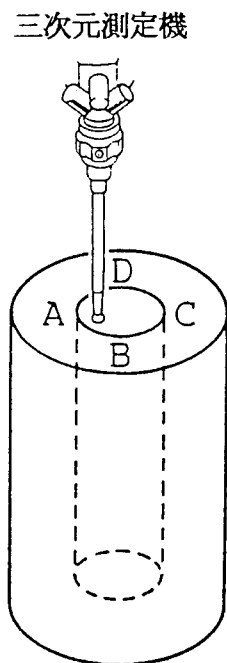


図 I. 4.10 穴の曲がりを測定するための
測定箇所

間欠減速送り切削による穴の曲がりについて調べたものが図 I. 4.11 である。穴深さ 5 mm のところの測定値を 0 とし、各点の測定値をプロットした。A 面の部分の曲がりの最大は 0.045 mm、C 面の部分の曲がりの最大は 0.021 mm である。又、B 面及び D 面はそれぞれ 0.036 mm、0.021 mm である。間欠減速送り切削では比較的曲がらずに穴あけされていると言える。これは切りくずがつまらずに排出されるためと考えられる。

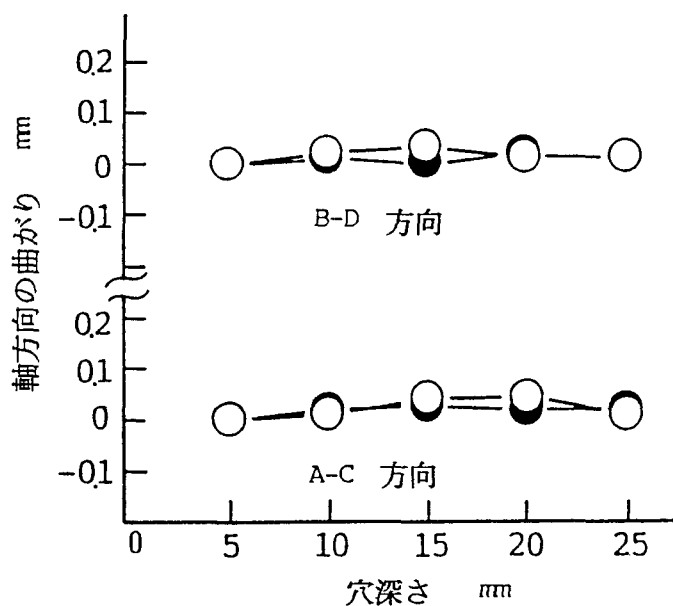


図 I. 4.1.1 間欠減速送り切削による穴の曲がり

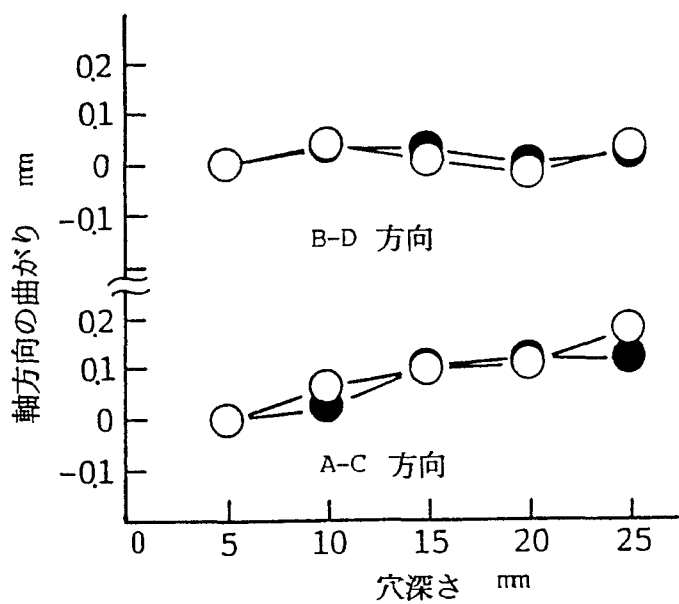


図 I. 4.1.2 連続送り切削による穴の曲がり

連続送り切削における穴の曲がりについて調べたものが図 I. 4.12 である。A 面，C 面の部分の最大値はそれぞれ 0.178 mm，0.12 mm であり，穴が深くなるにつれて曲がりは大きくなる傾向であった。又，B 面，D 面の部分の最大値はそれぞれ 0.04 mm，0.033 mm であり，B 面，D 面方向にはあまり曲がりがみられなかった。連続送りでは切りくずの排出が悪いため，どちらかの方向に曲がりが生ずるものと考えられる。

ドリルの刃は間欠減速送りにより刃先にかかる力が変化する。そのとき刃先がどのように変位するかをモーダル解析で調べたものが図 I. 4.13 である。モーダル解析測定については，ドリルの幾何学モデルの作成を行い，インパルスハンマで抵抗が生ずる部分を加振して，FFTアナライザーで伝達関数を測定し，コンピュータ画面にモードアニメーションを表示ものである。図 I. 4.13 のドリル形状のモードアニメーションから軸方向や回転方向にそれぞれ変位していることがわかる。これらの刃先の変位現象が切りくず切断の一つの要因になっているものと考えられる。

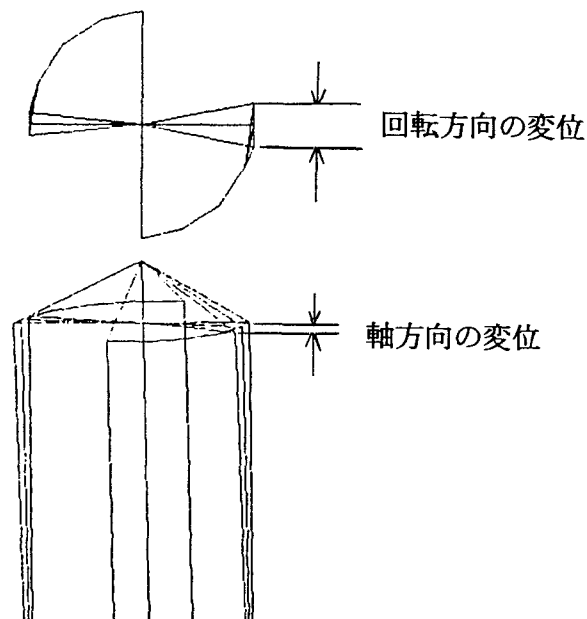


図 I. 4.13 モーダル解析による工具刃先の変位

工具の摩耗幅と穴あけ個数の関係が，連続送り切削と間欠減速送り切削によってどのように変わるか調べた結果を図 I. 4.14 に示す．被削材は S 4 5 C（焼準材）で直径 30 mm の丸棒を切断，端面を旋削仕上して厚さ 50 mm に作り，その端面中心に深さ 20 mm の盲穴を両側からあけた，横軸に穴の数，縦軸にドリル切れ刃正面側の逃げ面摩耗幅をとったものである．図から間欠減速送り切削は連続送り切削より数多く穴あけできることがわかった．

連続送り切削で穴明けすると切りくずがつながり，穴の中で詰まりぎみになるため，ドリル刃先に余分な応力や熱が加わることになる．一方間欠減速送り切削で穴明けすると，切りくずが一定の長さに切断できるため，切りくずの詰まりが少なく切りくずが外に排出される．間欠減速送り切削のドリルには，連続送り切削のドリルのように余分な応力や熱が加わることがないので，連続送り切削のドリルより寿命が長くなるものと考えられる．

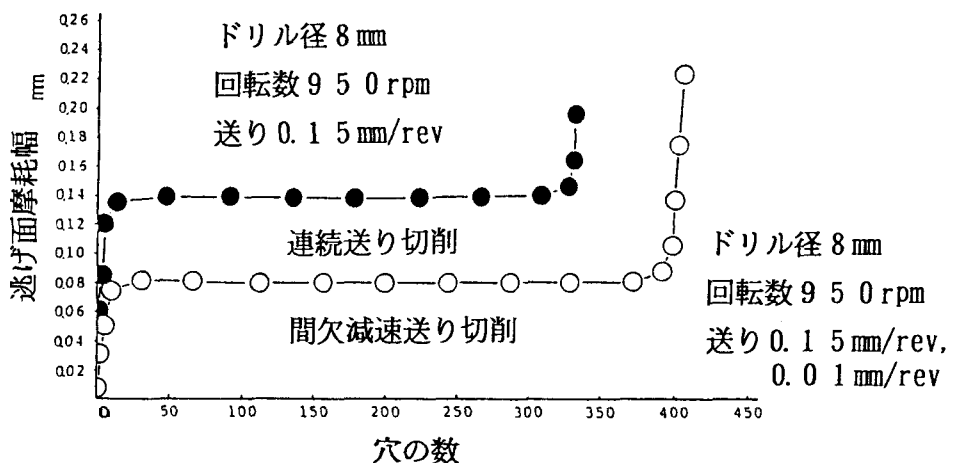


図 I. 4.14 間欠減速送り切削と連続送り切削の穴明け数と逃げ面摩耗幅との関係

図 I. 4.15 は間欠減速送り切削の方法により切りくずが 0.15 mm/rev の送り速度から 0.01 mm/rev の送り速度に変化していく過程の状態を示したものである．ドリルの場合，切りくず厚みの式は $t = f \cdot \cos C_s / 2$ であ

り，送り速度 0.15 mm/rev の時の切りくず厚みは，2次元に換算すると $f = 0.15 \text{ mm/rev}$ ， $C_s = 31^\circ$ から $t = 0.064 \text{ mm}$ になる．送り 0.01 mm/rev の時の切りくず厚みは $f = 0.01 \text{ mm/rev}$ ， $C_s = 31^\circ$ から 0.004 mm となる．

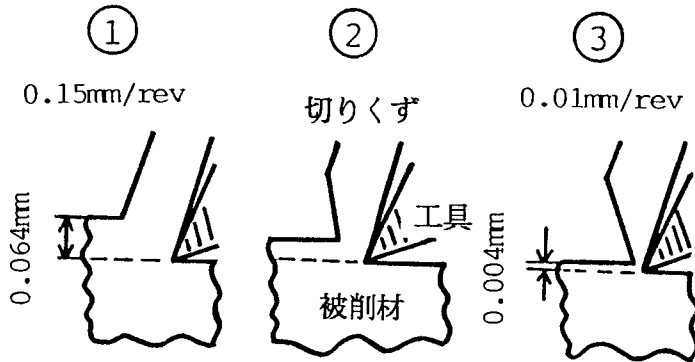


図 I. 4.15 間欠減速送り切削による切りくず厚みの変化

図 I. 4.16 は被削材 S 45 C の連続送り切削と間欠減速送り切削の切りくずの顕微鏡写真である．12 倍のものが実体顕微鏡で写したものである．間欠減速送りの 12 倍の写真をみると切りくずの切断部分において切りくず厚みが薄くなり，ところどころ穴があいているように見えるところがある．一方，連続送りでは切りくず厚みが変化していない．

切りくず厚みを 2 次元切削に換算すると $t = f \cdot \cos C_s / 2$ である．連続送り速度は $f = 0.15 \text{ mm/rev}$ ，刃先とワークとの角度 $C_s = 31^\circ$ から $t = 0.064 \text{ mm}$ となり実測値は $t_c = 0.18 \text{ mm}$ である．切削比の式は $\gamma = t / t_c$ であるから $\gamma = 0.064 \text{ mm} / 0.18 \text{ mm} = 0.356$ となる．減速送り速度の場合， $t = 0.004 \text{ mm}$ であるから，切削比から減速時の切りくず厚みを推定すると $t_c = 0.004 \text{ mm} / 0.356 = 0.011 \text{ mm}$ となり実測値は 0.07 mm であるから，減速する送り 0.01 mm/rev の切取り厚さに到達する前に切りくずは切断されるものと考えられる．さらに 200 倍に拡大してみると間欠減速

送り切削では一方向に細長い組織になっている。

間欠減速送り切削の切りくず切断原因としては、減速されて切りくず厚みが0.007mm近くになったときに、有効すくい角が負角になり、切れ味が悪くなることによって振動が生じやすくなること。また、ドリルの場合、剛性が弱く振動を起こしやすいこと、有効すくい角が負角になるため、せん断形の切りくずが生じて切れやすくなることなどが、重なって切りくずが切断されるものと考えられる。

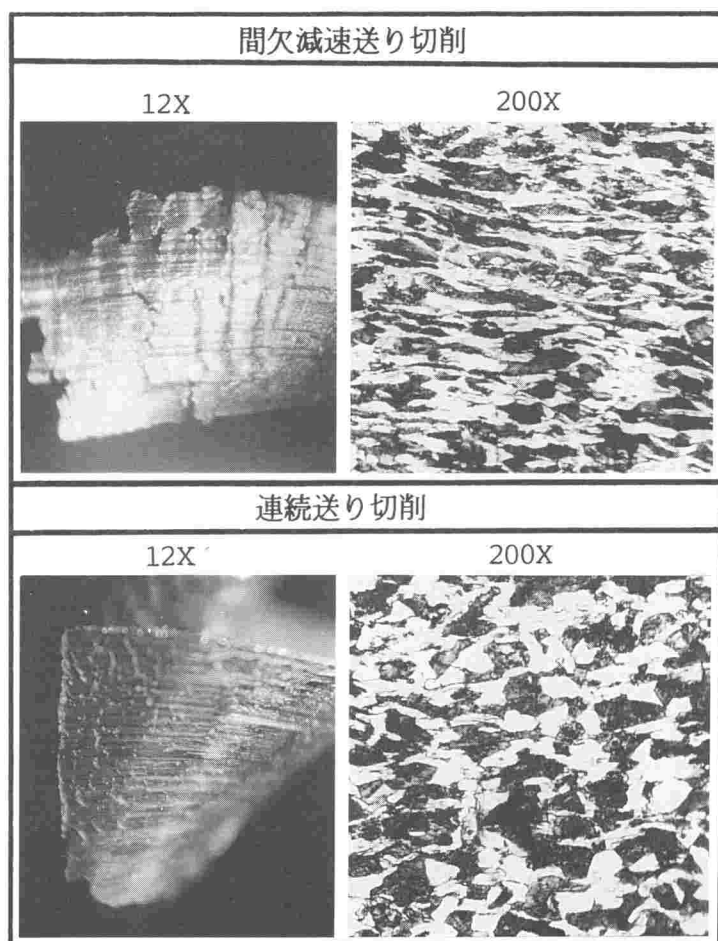


図 I. 4.16 間欠減速送り切削と連続送り切削の切りくず写真

4. 5 結 言

間欠減速送り法によるドリル加工から次のようなことが明らかになった。

- (1) 間欠減速送り切削は切りくずを一定の長さに切断でき、切りくずを容易に処理することができるようになった。
- (2) 間欠減速送り切削は切りくずの排出が容易になるため、穴深さに対して連続送りよりトルクの増加が少なかった。
- (3) 間欠減速送り切削は穴の曲がりにおいて、連続送りより曲がりが少ない傾向が認められた。
- (4) 工具寿命において、間欠減速送り切削の方が連続送り切削より寿命が長いことが確認できた。

第Ⅱ編 工具寿命の判定

第1章 緒 論

生産システムや自動化の動きがきわめて活発となり、FMS、FA、CIM等の言葉をひんばんに聞くようになってきた。このような生産システムの自動化を実現する上でまず確立されねばならないのは、加工プロセスが高い信頼性を以て自動化されることである。自動生産システムでは、1台の工作機械に生じた異常事態もシステム全体に及ぼす影響は極めて大きい。そこで高い信頼性をもった機能にするためには、プロセスの状態を監視するシステムの確立がまず必要とされる。その前提となるものは適切なセンサ技術を確立することである。

センサ技術は、加工プロセスを監視するシステムの確立を目指していることは言うまでもない。作業者が加工プロセスを監視する際に用いている感覚は、主として視覚と聴覚である。したがって、これまでに開発されたセンサも、これらの感覚器官および感覚中枢に代わる機能を目指しているものが多い。切削システムを円滑に動作させるには、工具の摩耗・損傷状態を無人運転の下で検出し、適切な処理をすることが必要になってくる。このような状況を反映して、工具の摩耗、欠損などの損傷を検出しようとする研究が多数試みられてきた。主な例を上げると、切削抵抗^{1) - 2)}、振動³⁾、音⁴⁾、主軸電動機電流^{5) - 6)}、切削温度⁷⁾、仕上面粗さ⁸⁾などを利用するものである。

現在、現場で最も多く利用されているセンサは主軸電動機電流の検出によるものであるが、小径ドリルなどによる加工の場合、検出力が小さく信頼性に問題がある。そこで固体が塑性変形あるいは破壊するときに弾性波を生じる現象、すなわちアコースティックイミッション（以下AEと略す）に着目し、切削から得られるAE信号によって工具の摩耗を主として検出し、工具寿命の判定を試みる。

A E 信号を利用してインプロセスで工具摩耗及び欠損を検出する可能性はすでに報告されている。^{9) - 20)}

一般にA E と呼ばれている信号の周波数は 1 0 0 k H z ~ 1 M H z の超音波領域である。このような高周波の信号を対象とすることにより、A E の利用は機械振動などのノイズに影響されないでプロセスの監視が行えるという特徴を持っている。又、センシングするセンサが小さく、取り付けが簡単という利点がある。生産工場での自動化を図るためには多くの機械の状態を監視する必要がある。A E の適用範囲は広く、解析精度が向上すれば機械のモニタリングだけでなく、切削の条件設定のための評価基準としての役割をも併せ持つまで範囲が広がる可能性をもっていると考えられる。

ここでは切削工具の摩耗をA E を用いて調べ、それらのデータを解析してインプロセス認識を行い、切削工具の寿命判定を主として行った結果を示す。²¹⁾

第2章では、A E 信号と材料特性との関係について検討する。まずセンサの感度と周波数特性を調べ、工具寿命の判定を行う場合のセンサの最適選定条件の考察を行う。次ぎに圧痕の体積変化とA E 信号の発生の実験を行い、圧痕の体積変化とA E 信号の発生が相関関係になった結果を示す。

第3章では、A E を用いた旋削工具の寿命判定について検討する。A E 信号を取り込む場合、A E 信号と他の信号との認識をするため、しきい値を設けさらに安定して取り込めるように変動しきい値を提案した。また、A E センサの中には工具摩耗の情報としてはしいA E 信号だけでなく工具摩耗に関係のない雑音信号も同時に入ってくる。情報としてはしいA E 信号と雑音信号とを区別し、弁別する方法として最小持続時間の設定を行い、工具摩耗の増加に対応するA E 信号を取り込むことを検討する。次にA E 信号には通常縦波と横波が合成された波形となっているが、縦波だけを取り込めるようにA E センサを開発することを示す。続いて工具寿命を判定するため解析用ソフトウェアを作成し、これを用いてA E 信号を定量的に解析して、工具寿命を判定する。

第4章では、切削工具に直接センサを取りつけることができない回転工具に対して、流体を介して非接触で検出できる流体伝播AE検出法を提案し、これを用いてドリル及びボールエンドミルの工具寿命の判定を行う。

最後に第5章では、切削中のAE信号の発生源として考えられている被削材内部の切りくずせん断領域、すくい面と切りくずとの摩擦、前逃げ面と被削材との摩擦等の中で、切削中のAEがどこから主に発生するかについて調べる。また、AE信号のオシレーション数がなぜ工具が摩耗してくると増加するのかについて明らかにする。次にAE信号のオシレーション数と切削条件との関係を調べて報告する。

第2章 AEと材料特性の関係

2.1 緒言

技術の進歩により、機械加工は高度に自動化されてきた。機械工場では、数値制御工作機械が数多く導入され、FMC、FMS等の自動化がますます増えている。このように、機械が自動コントローラ、又は入力プログラムの指示に従って作業を行うようになり、作業者が加工中に工具状態などを直接監視することが少なくなっている。ここで自動化という意味は、プロセスからの出力と要求された出力との間にずれがあった場合に、これをフィードバックして修正する機能を持たせることと解釈できる。このような機能を持たせるには、プロセスの状態を監視するシステムの確立がまず必要とされる。いわゆるセンサ技術の確立がある。

センサ技術の中で最近用いられているものにAEがある。AEは一般に固体材料の変形や破壊に伴って発生するとされている。近年、切削を始めとする各種の加工プロセスの監視にAEの利用が有望視され、多くの研究が行われている^{1) - 6)}。一般にAEと呼ばれている信号の周波数は100kHz～1MHzの超音波領域である。このような高周波の信号を対象とすることにより、本方法は機械振動などの雑音に影響されないでプロセスの監視が行えるという特徴をもっている。また、温度、⁷⁾ 切削抵抗^{8) - 9)} 等の他の方法では、装置の関係で現場的にはむかないなどの問題点があるが、AEでは、監視する部分の近くに小さなセンサを取り付けるだけで検出できる利点がある。しかも広域のオンラインモニタリングが可能である。反面、切削プロセスと、そこから生ずるAE信号の因果関係が必ずしも明らかにされていないため、信号処理の方法に理論的な根拠を与えにくいのが現状である。

A Eを使う利点について整理してみると次のように表すことができる。

- (1) 構造物全体を少数のセンサを設けることによって観測できる。従来のひずみ計その他の検出計と違って応力集中部に近接しておく必要はない。
- (2) 時間差計測によりA E発生源の位置を評定できる。また、外部からの雑音を弁別することが可能である。
- (3) 高感度である。とくに割れの発生は目視で発見できるよりもはるか以前に検出できる。
- (4) 記録性がよい。疲れ試験、応力腐食割れ試験、溶接の遅れ割れ検出など長時間かかる試験でも、中断せずにまた無人で時間的経過を記録できる。
- (5) 計測器が比較的安価で可搬性がある。
- (6) F R Pのような複合材の場合は繊維と母材それぞれの破壊および接着の破壊を分離して測定できる。

したがって、A Eによる計測は従来の測定法では得られない新しい次元の観測を可能にするものである。

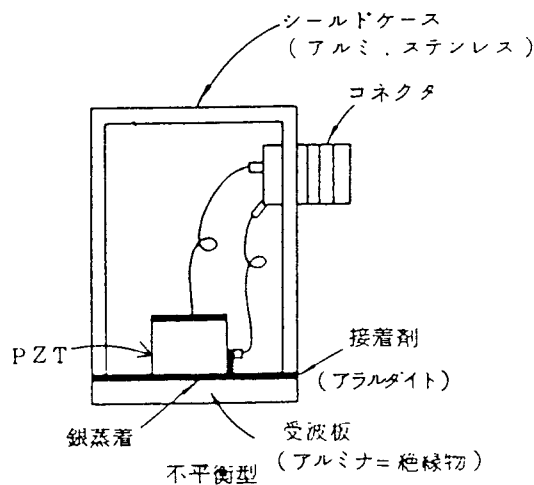
本章では、A Eセンサの特性および材料の履歴現象を調べた結果について示す。また、圧痕の体積変化に対するA E事象数の関係を表すことを試みる。

2.2 A Eセンサと信号処理

A Eセンサは、P Z T（ジルコン酸チタン酸鉛磁器）の圧電素子（ $\phi 20 \times 20$ ）を使用した。A Eの解析にはN F回路設計ブロック製のA Eシステムで、周波数帯域が10 kHz～2 MHz、イベントタイミング検出、ピークタイミング検出、持続時間計測の分解能がそれぞれ0.5 μ s、弁別レベルが20 mV～1.98 Vで20 mVステップ、総合利得80 dBのものを使用した。使用機械は汎用の材料試験機及びビッカース硬度計である。引張試験及び曲げ試験で使用した試験材はF R Pで、圧縮試験で使用した試験材は超硬チップ（S T i 20）であ

った。

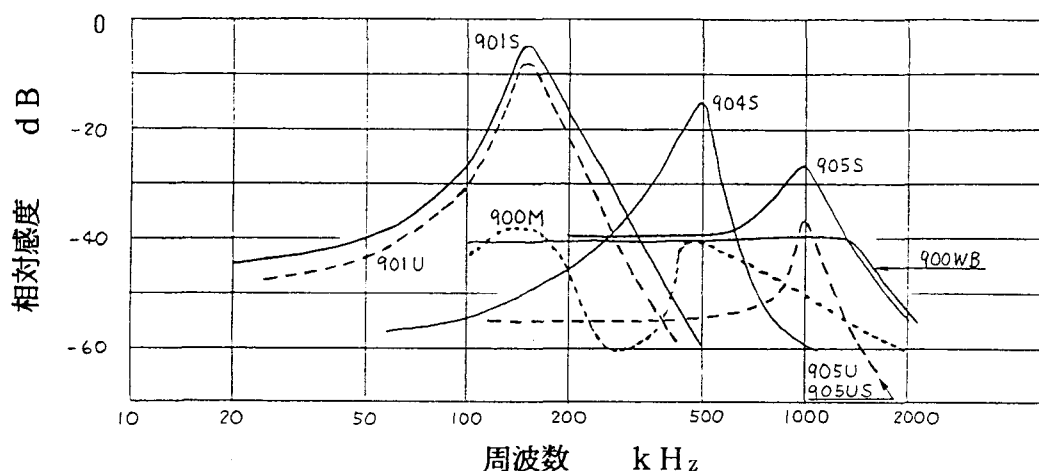
A E センサの構造例を図Ⅱ． 2. 1 に示す． このセンサは一般的な不平衡型 A E センサである． P Z T の出力インピーダンスは比較的高いので， 出力線に外来の電気雑音が混入しないように P Z T は金属のケースでシールドされている． また， 多点接地によるアース雑音の影響を除去できるようにケース全体は受波面を介して被測定物と電氣的に絶縁されている．



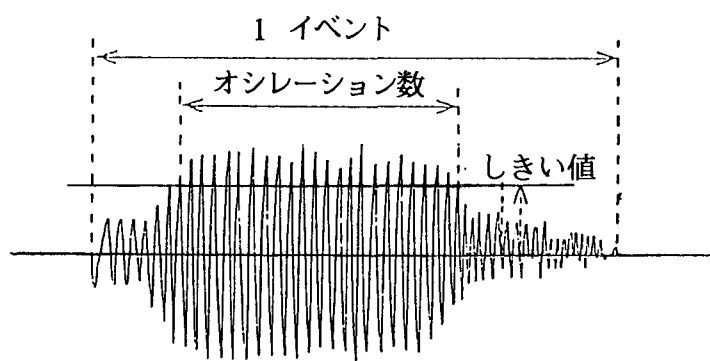
図Ⅱ． 2. 1 A E センサの構造

図Ⅱ． 2. 2 は各種 A E センサ感度と周波数特性を模式的に示したものである． A E 信号の周波数は $100\text{ kHz} \sim 1\text{ MHz}$ の超音波領域であるが， 切削工具の摩耗及び欠損の検出等においては $200\text{ kHz} \sim 1\text{ MHz}$ の範囲と言われている． また， A E センサの大きさは切削工具にできるだけ近くに取り付けるため小さい方が望ましい． 以上を考慮した結果， 900WB の A E センサが適していると考えられるため以後 900WB の A E センサを使用した．

A E 信号波形の取込みとして， 図Ⅱ． 2. 3 に示すような感知方法で行った． しきい値を設定して感知してから感知できなくなるまでの A E 信号を 1 イベントと



図Ⅱ. 2.2 AEセンサと周波数特性



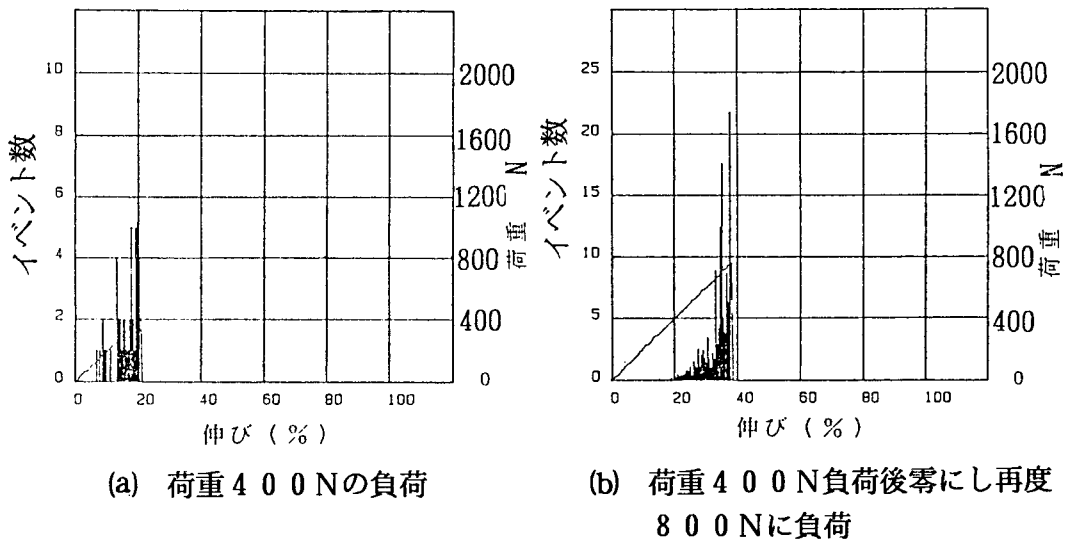
図Ⅱ. 2.3 しきい値設定によるAE信号の取り込み

した。又、1 イベント中の振動数を以後オシレーション数と呼ぶ。

2.3 引張試験及び曲げ試験によるAEの発生

図Ⅱ. 2.4 は引張試験によるAEの発生を調べたものである。試験片はAE信号が発生しやすい炭素繊維一方向強化プラスチック（強化繊維はトレカT-3

00, マトリックスはエピコート828, 繊維体積含有率は約70%である。)を使用した。炭素繊維一方向強化プラスチックを用いた理由は、巨視的な破壊にいたるまでに放出されるイベント数が金属に比べ多いこと、比較的低応力でも放出されること、低周波数成分(数十kHz~数百kHz)が多いことなどである。AEセンサは引張試験片に直接取り付けた。

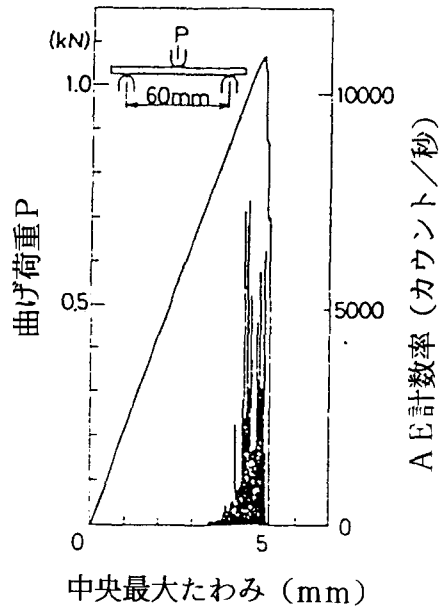


図Ⅱ. 2.4 引張試験によるAE信号の発生

図Ⅱ. 2.4の(a)は荷重400Nまで負荷したときのイベント数を図示したものである。図から試験片に伸びが生じてくるとAE信号のイベント数が増加することがわかる。図Ⅱ. 2.4の(b)は荷重400Nまで負荷した後負荷を零にもどし、再度荷重800Nまで負荷した時のイベント数を図示したものである。AE信号のイベント数をみると、伸びが0~20%(以前負荷された範囲)までは、イベントが発生せず、伸びが20%以上になって、初めてイベントが発生する現象がみられた。これらのことから、材料は引張荷重を受けると、荷重に応じてAE信号のイベントの発生を起こすが、除荷後の再負荷では前歴の荷重以内ではAE信号のイベントを発生しないことがわかった。したがって材料の歪み状態を調べる場合、引張試験を行いAE信号のイベントの発生状況を調べると、過去にどの程

度歪みを受けたかを推定することが可能であることがわかった。

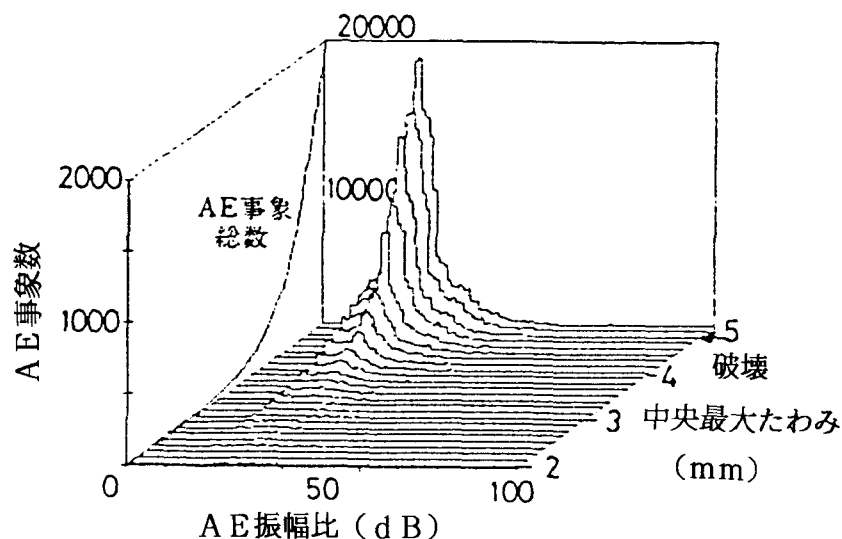
図Ⅱ． 2. 5 は曲げ試験における破壊時までの荷重－たわみ曲線と A E 事象数を示したものである。材料は F R P を使用した。曲げ試験の場合、曲げ荷重の初期にはほとんど A E 信号は発生せず、破断する少し前から発生することがわかった。



図Ⅱ． 2. 5 曲げ試験による A E 信号の発生

図Ⅱ． 2. 6 は図Ⅱ． 2. 5 の条件で発生した A E 信号の振幅分布曲線をたわみの増加に対しプロットしたものである。横軸には各 A E 信号の最大振幅値を、センサの出力 $1 \mu V$ を 0 d B として表し、縦軸には A E 事象数を取り、3 番目の軸には三点曲げ試験の中央部最大曲げたわみをとった。たわみ軸上に巨視的破壊点を記し、たわみの変化に対する A E 事象数の変化を示した。

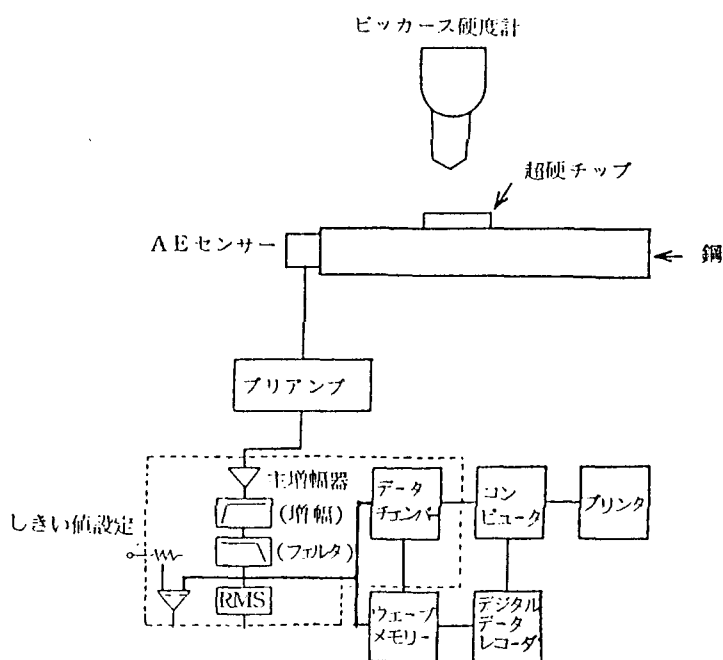
図Ⅱ． 2. 6 から破壊にいたるまで発生する A E 信号は小振幅 (20 ～ 35 d B) のものが多いことがわかった。小振幅の A E 信号は破壊応力と剛性が小さいので貯えられるひずみエネルギーも小さいマトリックスの破壊により発生するものと考えられる。



図Ⅱ. 2.6 たわみ増加による振幅分布とAE信号の発生

2.4 圧痕試験によるAEの発生

切削工具の寿命判定を行うためには、一般的に使用されている超硬工具から発

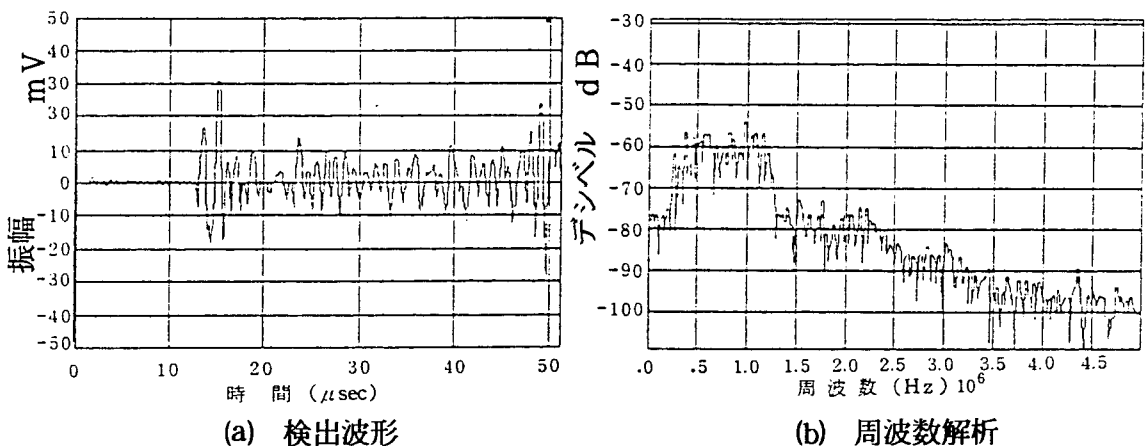


図Ⅱ. 2.7 圧痕試験によるAE信号の計測システム

生するAE信号を知る必要がある。超硬工具では引張試験をすることができないため圧痕試験で行った。

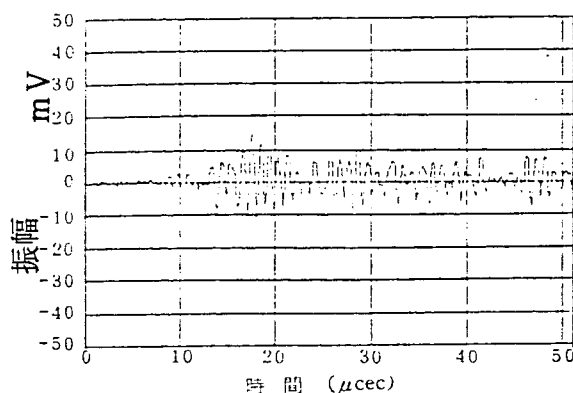
図Ⅱ．2.7はビッカース硬度計を使用し、圧痕試験によるAE信号の処理手順を示したものである。超硬チップ上にダイヤモンド圧子で圧痕を作り、その時発生するAE信号を検出するシステムである。

図Ⅱ．2.8はビッカース硬度計の圧痕荷重10NによるAE信号の検出波形と周波数解析結果を示したものである。図Ⅱ．2.8(b)の周波数解析図をみると400kHz～1.2MHzの帯域の周波数が多いことがわかる。

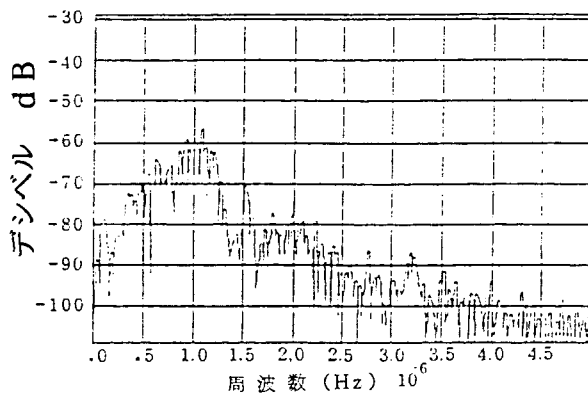


図Ⅱ．2.8 ビッカース硬度計荷重10NによるAEの検出波形と周波数解析

図Ⅱ．2.9はビッカース硬度計の圧痕荷重500NによるAE信号の検出波形と周波数解析結果を示したものである。同図(b)の周波数解析結果をみると圧痕荷重10Nと同じように400kHz～1.2MHzの帯域に高い周波数レベルがあり、大きい破壊でも周波数では小さい破壊とほとんど変わらないことがわかった。図Ⅱ．2.10は圧痕の体積変化とオシレーション数との関係を示したものである。圧痕の体積変化が大きくなると、オシレーションの数が増加するが、1イベント中におけるオシレーション数は30以下のものが多い。

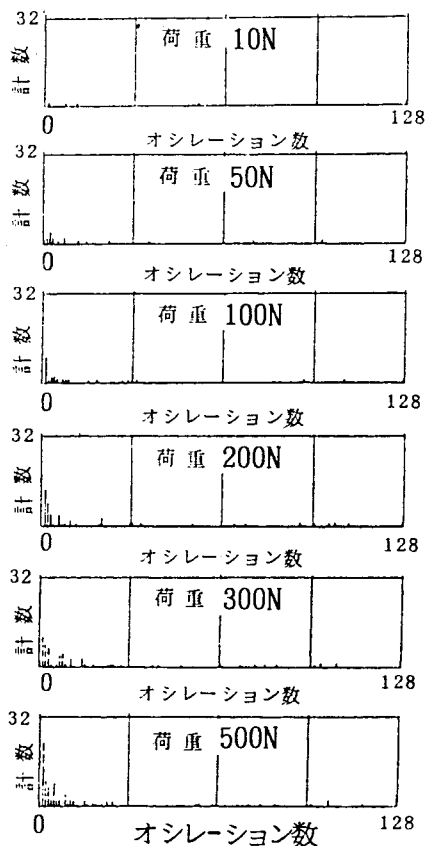


(a) 検出波形

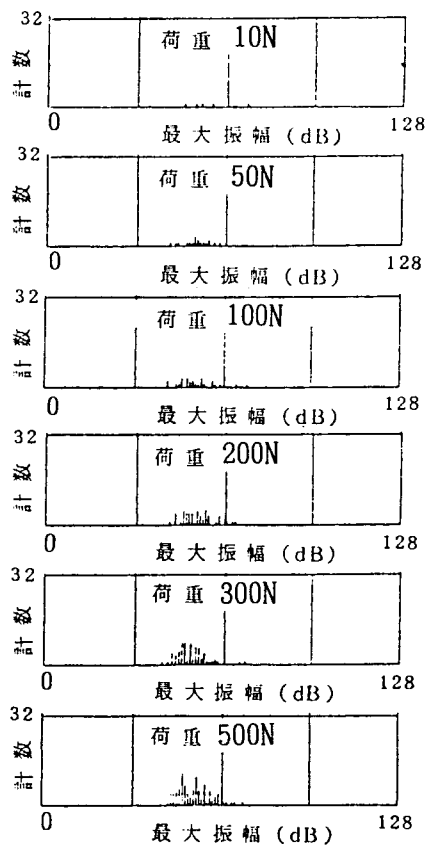


(b) 周波数解析

図Ⅱ. 2.9 ビッカース硬度計荷重500NによるAEの検出波形と周波数解析



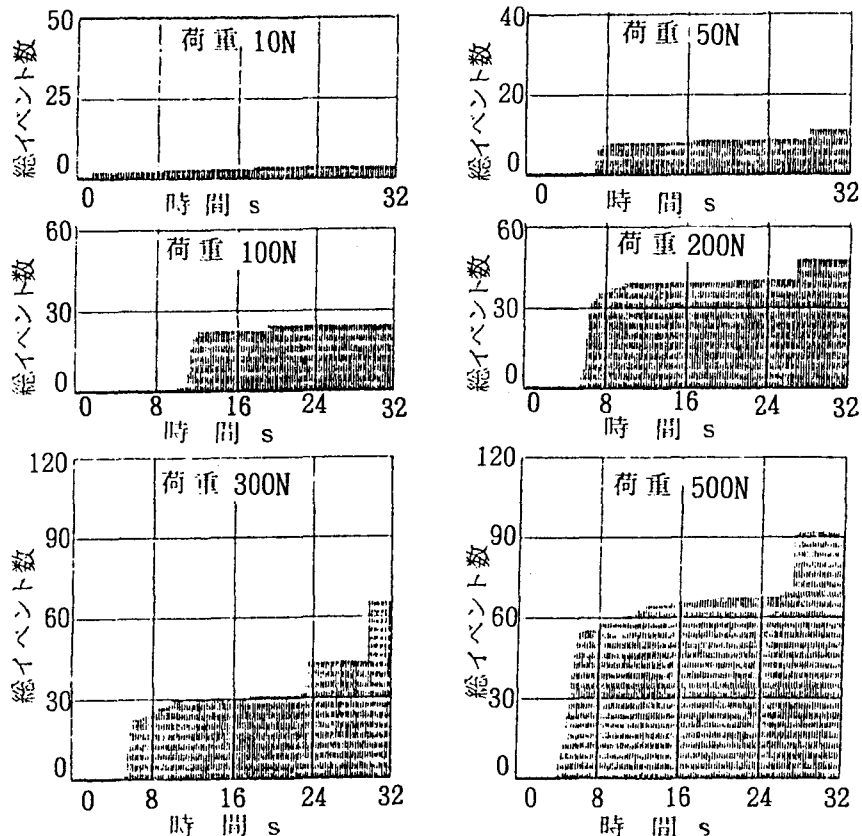
図Ⅱ. 2.10 圧痕の体積変化とオシレーション数の関係



図Ⅱ. 2.11 圧痕の体積変化と最大振幅の関係

図Ⅱ. 2.1.1は圧痕の体積変化と最大振幅の関係を示したものである。圧痕の体積の増加により、最大振幅の発生数は44～72 dBの範囲で増加することがわかった。

図Ⅱ. 2.1.2は圧痕荷重を10 Nから500 Nまで加えたときの総イベント数と時間との関係を示したものである。総イベント数の発生状態をみると急な立ち上がりが生じてからは、一定状態になり再度立ち上がる状態を示している。急な立ち上がりは圧痕により塑性変形が進行し、亀裂の発生等により急増するものと

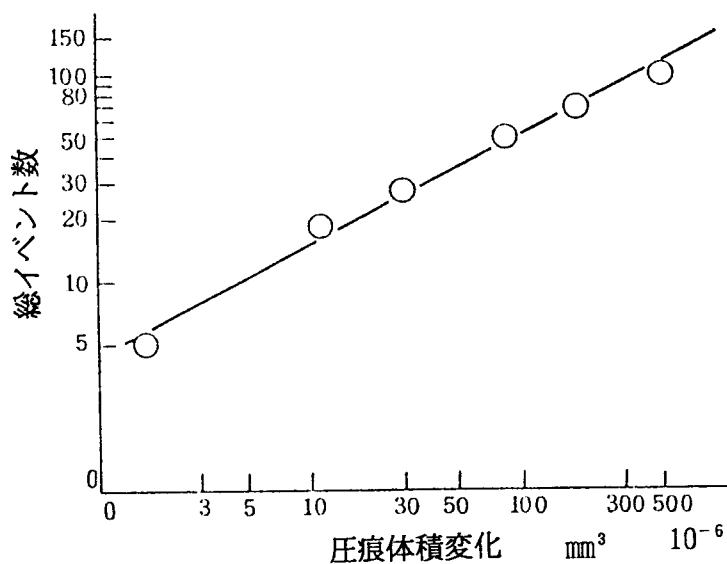


図Ⅱ. 2.1.2 圧痕の体積変化と総イベント数と時間との関係

考えられる。

図Ⅱ． 2. 1 3 は図Ⅱ． 2. 1 2 の最終的な総イベント数と圧痕の体積変化との関係を図示したものである。図をみるとほぼ直線になっているのがみうけられる。

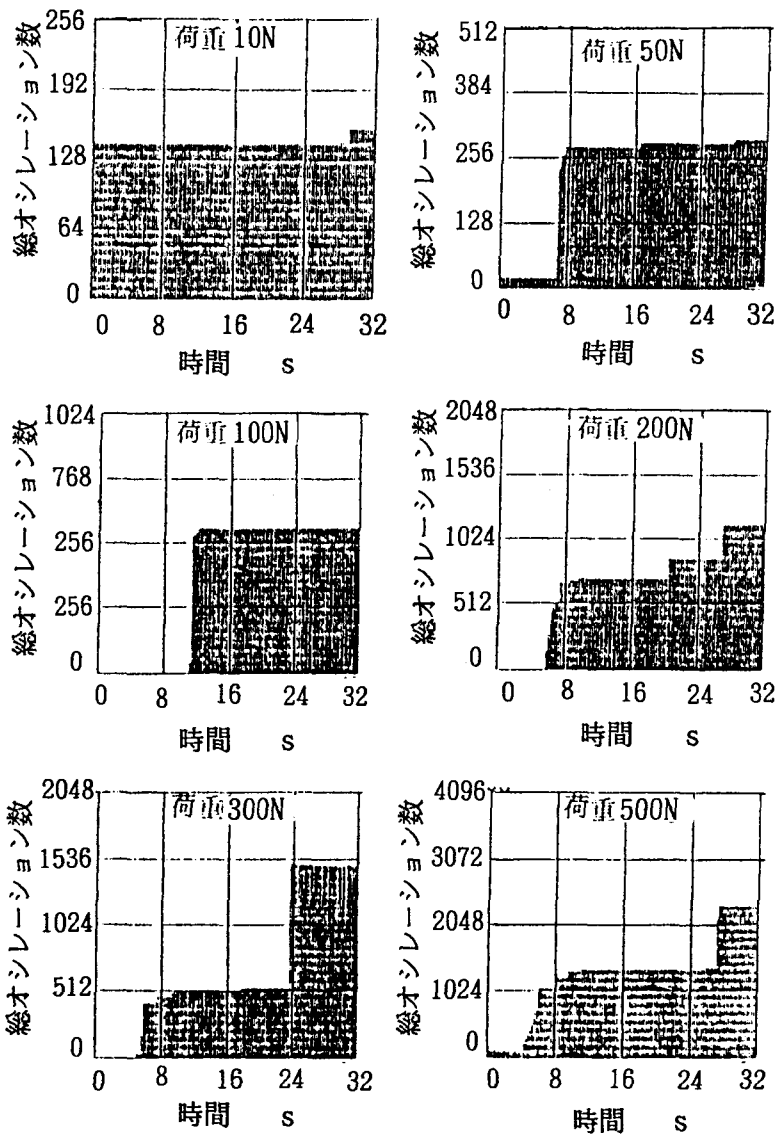
A E 信号の発生は圧痕の体積変化に依存すると考えられる。



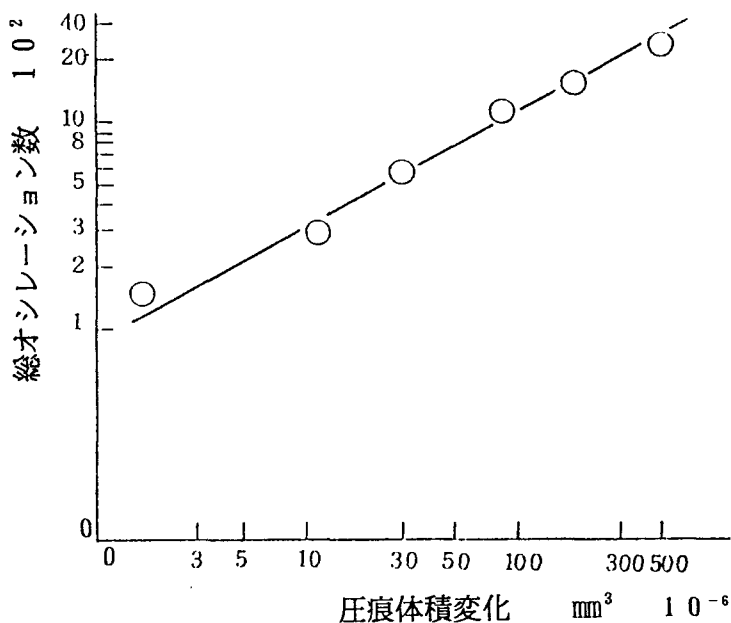
図Ⅱ． 2. 1 3 圧痕の体積変化と総イベント数の関係

図Ⅱ． 2. 1 4 は圧痕荷重を 1 0 N から 5 0 0 N まで加えたときの総オシレーション数と時間との関係を示したものである。図Ⅱ． 2. 1 2 と同じような立ち上がりを示している。イベント数が増加すれば当然オシレーション数も増加するものと考えられる。

図Ⅱ． 2. 1 5 は総オシレーション数と圧痕の体積変化との関係を図示したものである。図Ⅱ． 2. 1 3 と同様に直線上にのっており、両者には良い相関があることがわかった。



図Ⅱ. 2.14 圧痕の体積変化と総オシレーション数と時間との関係



図Ⅱ. 2.15 圧痕の体積変化と総オシレーション数の関係

2.5 結 言

A E信号の基本的性質を調べるために実験を行ったが、以下結果を要約する。

- (1) 引張試験において、荷重履歴を調べる方法としては、A E信号の発生状況を調べる方法が有効であることがわかった。
- (2) ビッカース硬度計を使用し超硬チップの圧痕試験を行ったが、圧痕の体積変化とイベント数及び、オシレーション数の関係は良い相関になっていることがわかった。

第3章 AEを用いた旋削工具の寿命判定

3.1 緒言

AE信号によってインプロセスで工具損傷を検出できる可能性は、すでに北野、岩田・森脇、垣野、稲崎らによって報告されている^{1)~5)}。しかしこれらの報告は、旋削の断続切削に関する報告が多く、連続切削に関するものはごくわずかである。連続切削の報告ではAE信号の平均値をとらえて工具の摩耗及び損傷との関係を調べている。AE信号の平均値は工具の欠損、き裂などにより大きなレベルの信号が検出されると報告されているが、摩耗に関しては実用化しうるに十分なデータが得られていない現状である。また、外部からの振動・騒音などの雑音を取り除くために、バンドパスフィルタを通して周波数の帯域制限を設ける方法で行っている場合が多いが、これだけでは十分とは言えない。そこで本章では、これまでの研究の判定精度をさらに向上させ実用化に向けての妥当性を検討する。

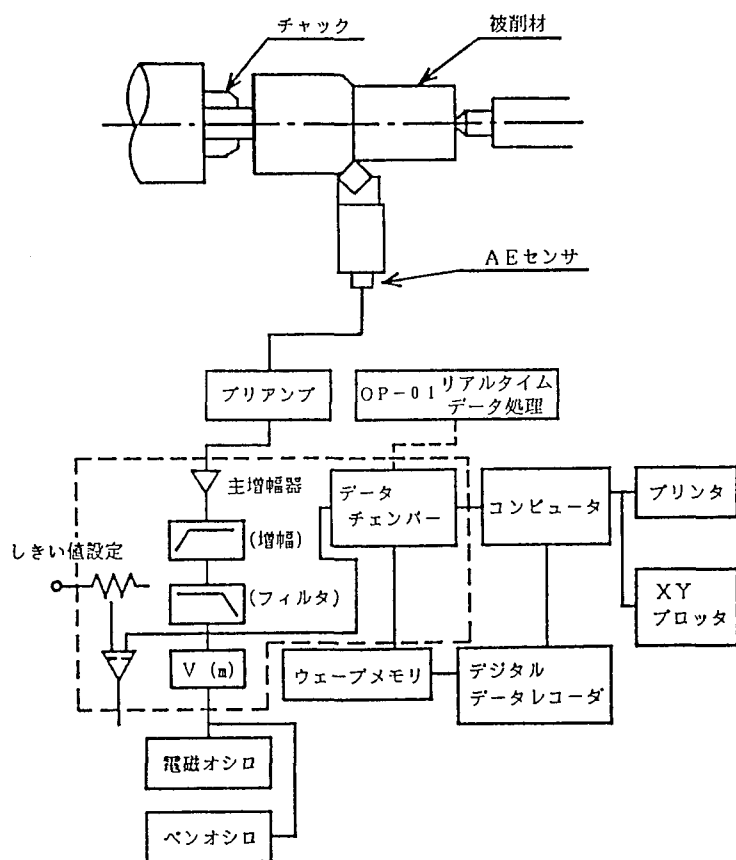
旋削加工において工具寿命をAEを用いて判定するためには、まずAE信号を正確に取り込むことが必要である。従来、AE信号を取り込む場合2つの方法が行われている。1つはAE信号の平均値を取り込む方法である。この方法はAEセンサの中に入ってくる信号の全てをAE信号として入力し、平均値処理をして解析するものである。この取り込みでは、工具摩耗や工具損傷に直接関係のない工作機械から発生する雑音や他の雑音も同時に取り込む欠点がある。また、もう一方の方法はしきい値の設定による取り込みである。この方法は、電圧レベルのしきい値を設け、そのしきい値に到達する信号をAE信号として認識する方法である。この場合しきい値より小さな振幅の信号はAE信号として認識せず取り込まない。そのため雑音として考えられる小さな信号は取り除くことができる利点がある。しかし、しきい値を設定する方式には欠点がある。しきい値を設定して

A E 信号として認識するためには，最初にしきい値に振幅が到達して感知してから，感知できなくなった後に信号が入ってこない休止時間を経過して，始めて 1 個の A E 信号として認める方式になっている。したがって工具が摩耗してくると A E 信号の振幅が増加する傾向があるため，信号の振幅が全てしきい値より大きくなると A E 信号として取り込めなくなってしまう場合がある。以上のような欠点を補うため本章では，変動しきい値を提案し，A E 信号の取り込み状態を調べ，その結果に基づいて工具寿命判定を定量的に検討する。

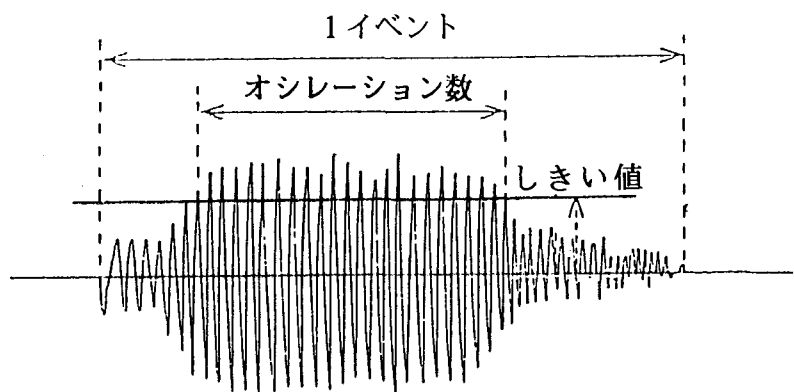
3. 2 研究の方法

A E センサは，P Z T（ジルコン酸チタン酸鉛磁器）の圧電素子（ $\phi 20 \times t 20$ ）で共振周波数の影響を少なくするために広帯域 A E センサ A E - 900 F 1 を使用した。A E の解析には N F 回路設計ブロック製の A E システムで，周波数帯域が $10 \text{ kHz} \sim 2 \text{ MHz}$ ，イベントタイミング検出，ピークタイミング検出，持続時間計測の分解能がそれぞれ $0.5 \mu \text{ s}$ ，弁別レベルが $20 \text{ mV} \sim 1.98 \text{ V}$ で 20 mV ステップ，総合利得 80 dB のものを使用した。その機器構成及びセンサ取付け位置を図 II. 3. 1 に示す。使用機械は汎用の数値制御旋盤を使用した。A E 信号を解析するため，しきい値を設定し，波形として感知してから感知できなくなるまでの波形を 1 つの A E 信号として認め，それを 1 イベントとした。また，1 イベント中の振動数をオシレーション数とした。

図 II. 3. 2 はしきい値設定による A E 信号の感知方法を示したものである。通常検出される A E 信号の電圧レベルは数十～数百 $\mu \text{ V}$ と非常に小さい。そのため A E 信号はアンプにより総合利得で 80 dB 増幅した。実験条件は表 II. 3. 1 に示す。



図Ⅱ. 3. 1 AE信号の計測システム



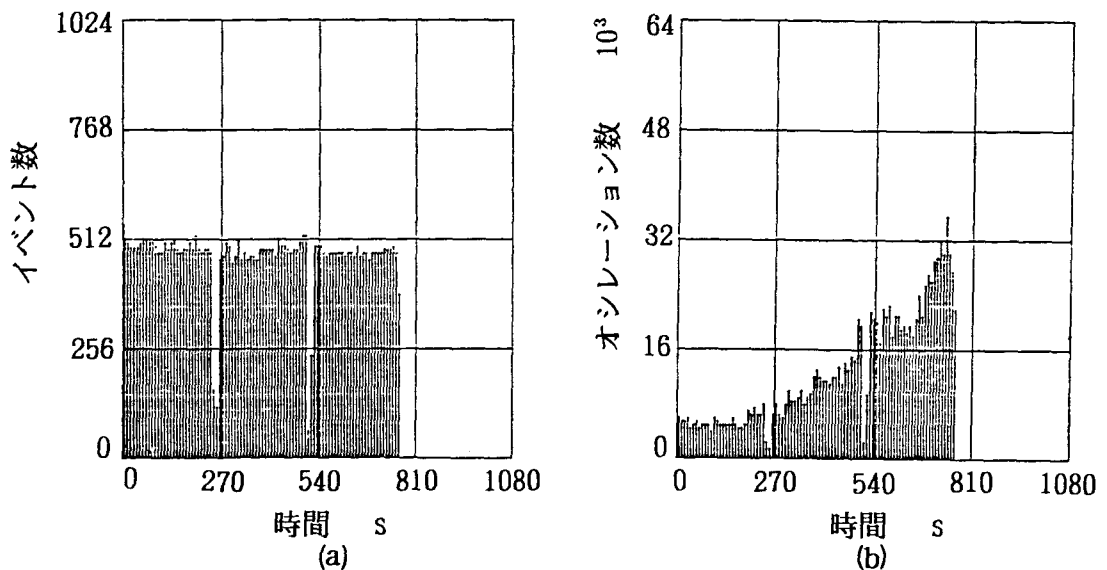
図Ⅱ. 3. 2 しきい値設定によるAE信号の取り込み

表Ⅱ. 3. 1 実験条件

切削条件	$V = 300, 400 \text{ m/min}$ $f = 0.1, 0.2 \text{ mm/rev}$ $d = 0.25, 0.5 \text{ mm}$
被削材	S45C
工具材質	P20
切削方式	湿式切削

3. 3 リアルタイム解析

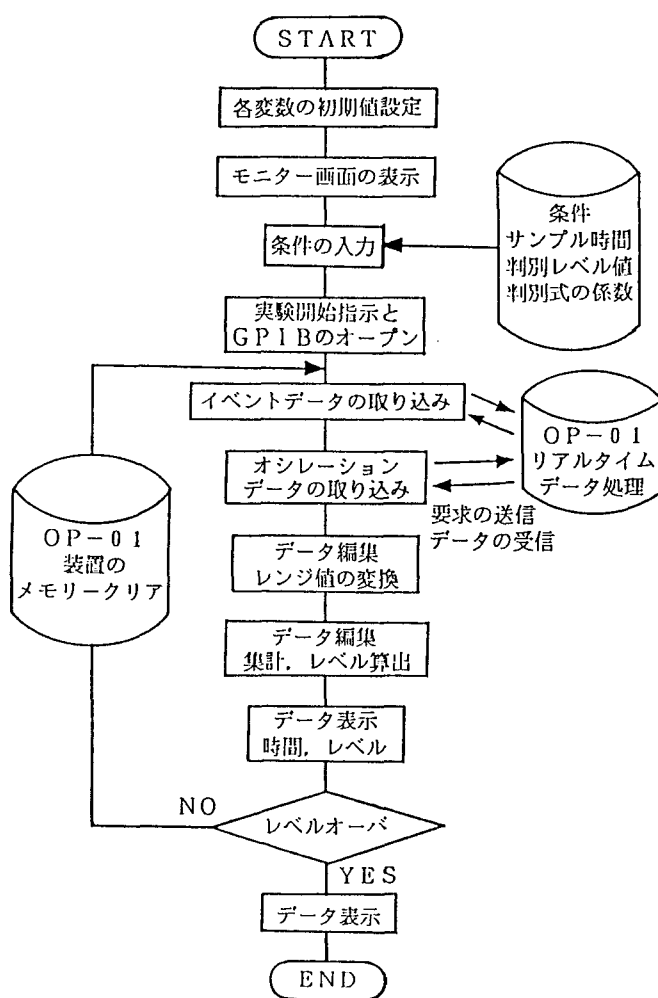
図Ⅱ. 3. 3 は旋削の連続切削において工具が寿命に到るまで切削したときのイベント数とオシレーション数を示したものである。同図(a)はイベント数、同図(b)はオシレーション数である。図は単位時間ごとにそれぞれの数を取り込んだもの



図Ⅱ. 3. 3 摩耗経過によるイベント数とオシレーション数の関係

である。イベント数とオシレーション数を比較してみると、イベント数は工具摩耗の増加にも影響を受けずほぼ一定である。オシレーションの場合、工具摩耗の増加に伴い増加する。これらの傾向からオシレーション数とイベント数の比をとることによって定量比ができると考えた。

定量化するためには、一定時間ごとにイベント数及びオシレーション数を取り込み、その比を刻々と表示させる必要がある。これら一連の表示をさせるためにリアルタイム解析用ソフトを開発した。



図Ⅱ. 3.4 リアルタイム解析用ソフトウェアのフローチャート

図Ⅱ. 3. 4 は、リアルタイム解析用ソフトウェアのフローチャートである。A E信号をリアルタイムにOP-01（高速演算モジュール）で処理し、その処理したデータをコンピュータ側からサンプリング時間内に取り込んだイベント数を要求し、そのデータを受信して、演算後表示するフローチャートである。

図Ⅱ. 3. 5 はリアルタイム解析用画面を示したものである。オシレーション数をイベント数で割り、その値に係数を掛けた値をA E寿命指数とする。A E信号を取り込むとコンピュータが演算し、サンプリング時間、イベント数、オシレーション数、A E寿命指数が表示される。A E寿命指数が設定値を超えるとその値をA E寿命指数の枠に表示する。その表示された数値の数によって工具寿命を判定するものである。

サンプリング時間	10 sec
設定値	20
係数値の設定	0.001

サンプリング時間	イベント数	オシレーション数	A E寿命指数
0～10	534	290187	0.5
10～20	611	294987	0.5
20～30	619	281947	0.5
⋮	⋮	⋮	⋮

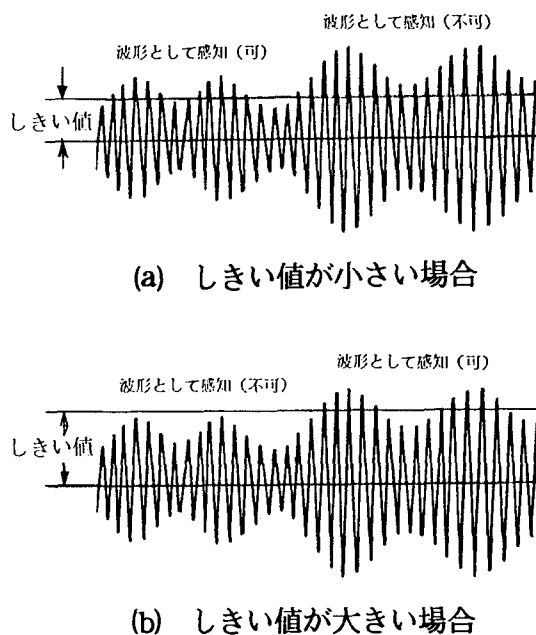
A E寿命指数
21.5
25.2
⋮

図Ⅱ. 3. 5 リアルタイム解析画面

3.4 リアルタイム解析のための条件設定

図Ⅱ. 3.6 はしきい値の設定において，波形の振幅が変動する場合一定のしきい値では波形として感知できる場合と感知できない場合があることを示したものである。同図(a)はしきい値の設定値が小さい場合，波形の振幅が小さいときは感知できるが，波形の振幅が大きくなると感知できなくなる状態を示したものである。逆に同図(b)はしきい値が大きい場合であり，振幅が小さいうちは感知できないが，振幅が大きくなると感知できるようになる状態を示したものである。つまり通常のしきい値の設定では，振幅の変動が生じたときにA E信号として取り込みができない状態が生じてしまう。

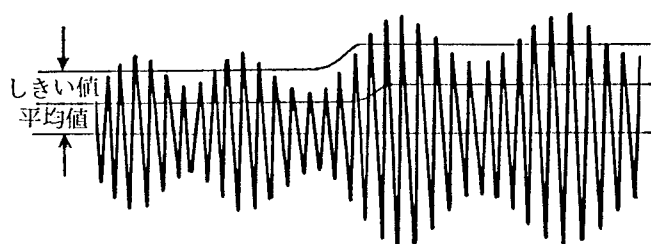
図Ⅱ. 3.7 は変動しきい値を付加した場合を示したものである。変動しきい値は，A E信号の平均値に対して常にしきい値が加えられている。これはA E信号に振幅の変化が生じてもそれにともなって平均値が追従するため，平均値に加え



図Ⅱ. 3.6 A E信号の検出波形としきい値の関係

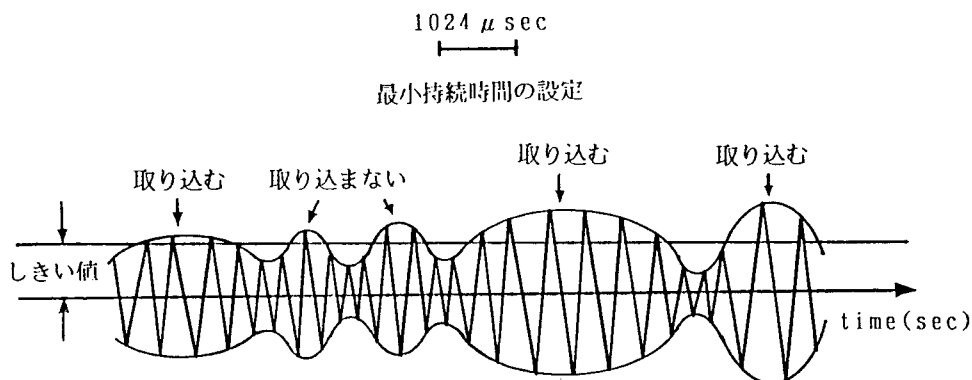
られているしきい値を設定すれば、どのように波形が変化しても波形として感知できるため安定した取り込みができるようになる。このことによって工具が切削初期から工具寿命に到達するまでのA E信号に振幅の変化が生じても取りこぼしがなく取り込みができ安定した解析が可能となった。本研究ではA E信号は総合利得80dBであり、しきい値は200mVの設定で行った。

波形がどのように変化しても感知(可)



図II. 3.7 変動しきい値付加によるA E信号の検出波形

図II. 3.8はA Eの検知に対する設定最小持続時間の変化の影響を示したものである。設定最小持続時間とは、A E信号の持続時間が設定値に対して、その値より小さい信号は電気雑音とみなして切捨て処理をして取り込まないというものである。その値を例えば1024 μ secとすると、しきい値によって感知して



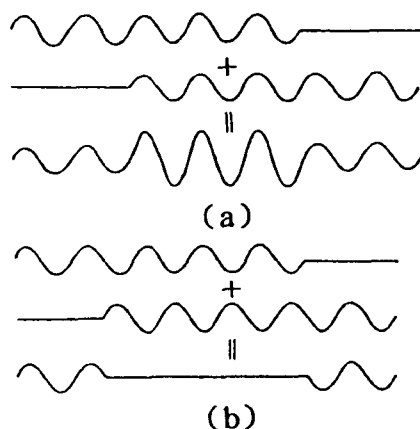
図II. 3.8 設定最小持続時間による弁別

いる持続時間が $1024\mu\text{s}$ より小さなAE信号を取込まないという機能である。設定最小持続時間の最適値を見出すため、 $0, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16384, 32768\mu\text{s}$ の9種類の設定で実験した結果、摩耗の増加に対して良い相関関係を示したのが $1024\mu\text{s}$ であった。機械系から発生している雑音信号は実験の結果、 $1024\mu\text{s}$ より持続時間が小さいAE信号であることがわかったため、これらの弁別処理をすることによって、雑音信号を取り除けるようになった。

3.5 AEセンサの開発

AE信号が固体中を伝播する場合、縦波と横波が存在する。縦波の進行方向は粒子の動く方向と同じ方向であり、横波の進行方向は粒子の動きと垂直方向に伝わる。液体には、横に動かすせん断力に対する抵抗がないので横波は存在せず縦波のみが存在する。横波は縦波の約半分の伝播速度であるので、発生するAE信号が単純な波形であっても、あとからくる横波の位相のずれによっては、複雑な波形となってしまう場合が多い。

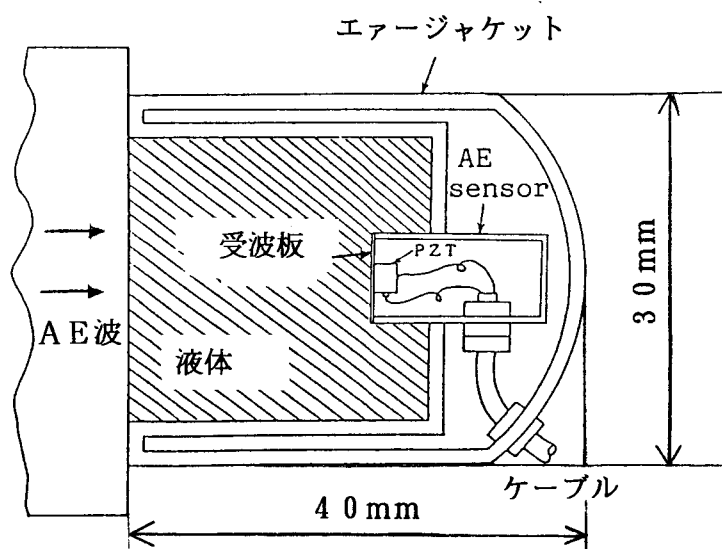
図Ⅱ. 3.9 (a), (b)は波形の波が2つ重なり合ったときに位相によって合成され



図Ⅱ. 3.9 位相による干渉状態

た波形が、まったく異なる波形となってしまうことを示したものである。(a)は山と山、谷と谷が強め合って振幅はが大きくなる場合、(b)は山と谷が打ち消し合って弱め合ってしまう場合がある。

図Ⅱ．3.10はA E信号の縦波だけを取込めるように開発したA Eセンサの断面図である。A E信号はセンサ前面の液体の中を通ってくるための縦波だけとなる。また、センサに直接切削液がかかるときに雑音信号が入るため、それを防止するために空気の層で遮断した。例えば発生時に単純な波形であったものが金属中を通っていったん縦波と横波の合成波となるが、液体の中を通すことによって再度縦波だけの単純な波形にもどすことができる。

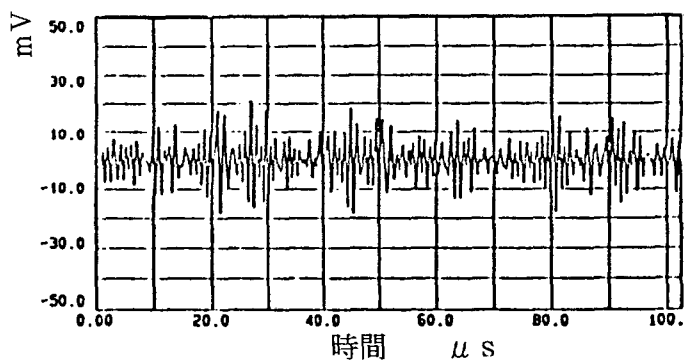


図Ⅱ．3.10 開発したA Eセンサの断面図

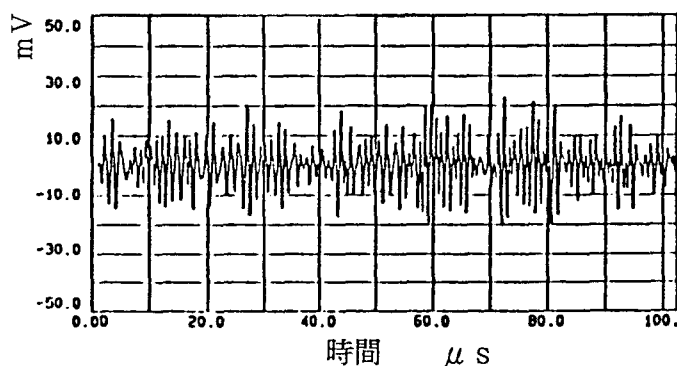
3.6 開発したセンサと従来のセンサによる検出波形の比較

図Ⅱ．3.11 (a), (b), (c)は従来のA Eセンサで取込んだ検出波形を示したもの

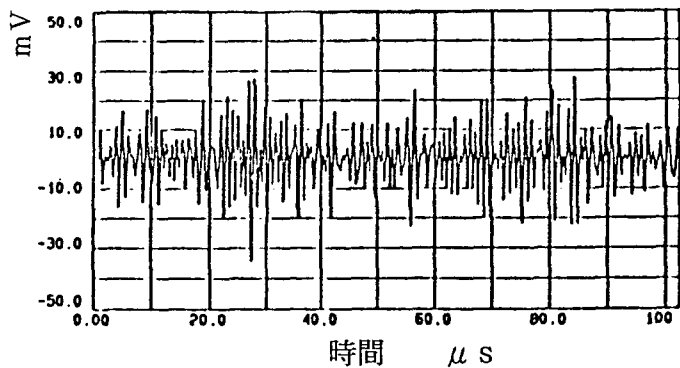
である。(a)は切削中における工具の使用初期、(b)は中期、(c)は工具寿命近傍のA E検出波形を図示したものである。従来のセンサによる検出波形は、縦波と横波が合成されているため、工具摩耗による検出波形の変化が明確でなくなっている。



(a) 使用初期



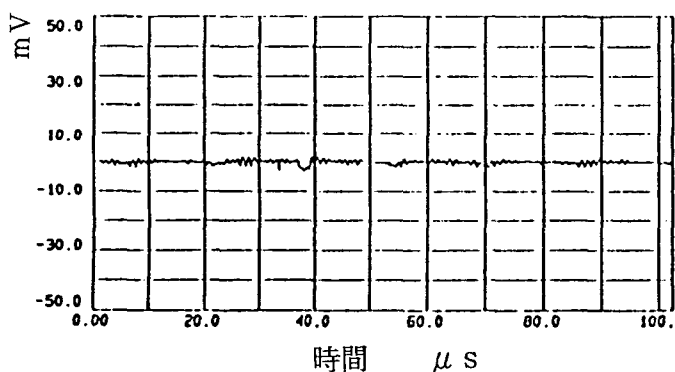
(b) 使用中期



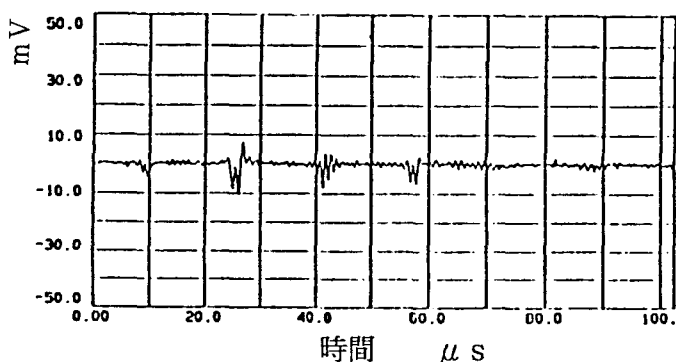
(c) 工具寿命近傍

図Ⅱ. 3.11 市販のセンサによるA E信号の検出波形

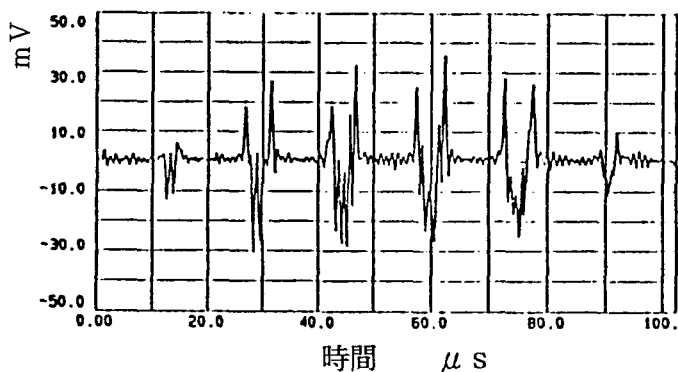
図Ⅱ. 3.12 (a), (b), (c)は開発したセンサによる検出波形である。波形はシンプルな波形となっており、工具摩耗による、検出波形は明らかに変化しているため、



(a) 使用初期

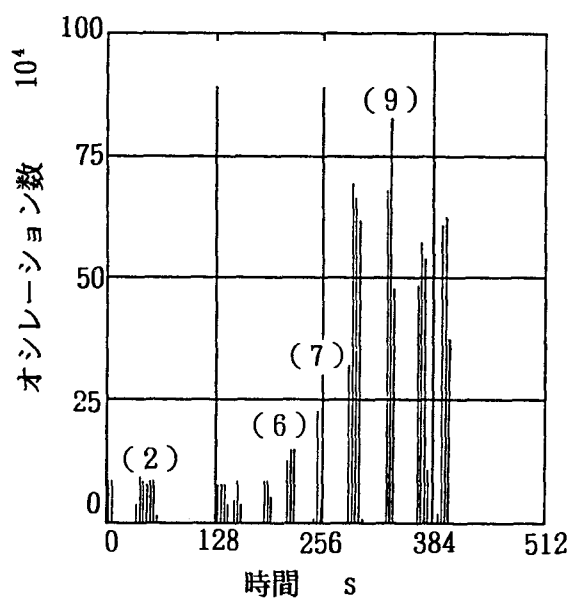


(b) 使用中期

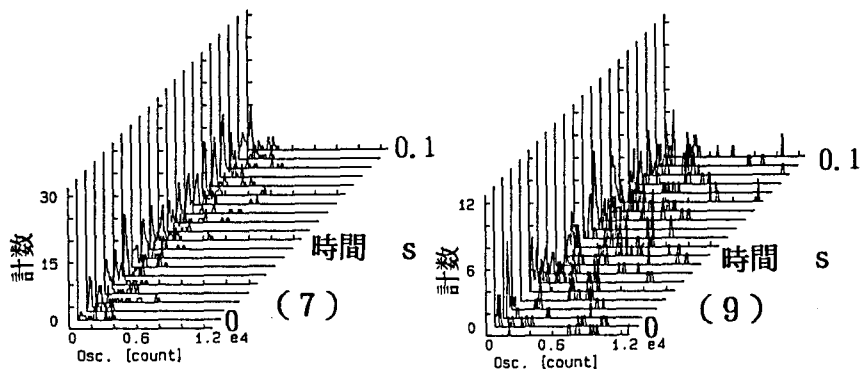
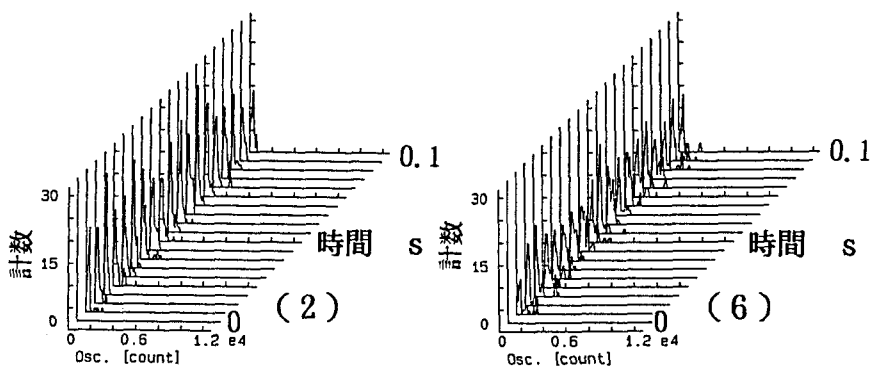


(c) 工具寿命近傍

図Ⅱ. 3.12 開発したAEセンサによるAE信号の検出波形



(a)



(b)

図Ⅱ. 3.13 工具摩耗によるオシレーション数の変化

従来のセンサ使用のA E波形よりも変化の程度がわかりやすくなっている。工具摩耗に対してA E波形の変化が大きいほど、寿命判定精度は高くなるものと推測される。開発したセンサを使うことによって、判定精度が向上するものと考えられる。

3.7 工具摩耗によるオシレーションの変化

図Ⅱ. 3.13は工具摩耗により、オシレーション数が増加する現象を同図(a)にさらに詳細に解析したものを同図(b)に示したものである。同図(b)の詳細図の縦軸はA E信号の事象数である。横軸はオシレーション数である。前後方向の軸は時間である。同図(a)の(2)の部分は切削の初期の状態である。オシレーション数はまだ少ない。その時の詳細図(b)の(2)をみるとオシレーション数の少ないものが多いことが目立つ。一方同図(a)からオシレーション数が最大の(9)の部分に対する詳細図(b)の(9)をみると、オシレーション数の多いものが増加している様子がわかる。つまり大きなうねりの波形が工具寿命に近づくとなることがわかった。

3.8 工具寿命判定の信頼性

表Ⅱ. 3.2はリアルタイム解析ソフトウェアによりある切削実験を行い、工具寿命に至るまでのイベント数とオシレーション数及びA E寿命指数を示したものである。表Ⅱ. 3.2からA E寿命指数がサンプリング時間の経過につれて増加しているのが良くわかる。A E寿命指数が20を越えると仕上面粗さが悪くなるので、この時を工具寿命と考えた。工具の前逃げ面摩耗幅を調べてみるとほぼ0.3mmあった。

表Ⅱ. 3.3は寿命判定値（イベント数とオシレーション数の比で寿命を予測す

表Ⅱ. 3.2 リアルタイム解析ソフトウェアによるAE寿命指数

サンプリング時間	イベント数	オシレーション数	AE寿命指数
0～10sec	534	290187	0.5
10～20	611	294987	0.5
20～30	619	281947	0.5
30～40	697	526293	0.8
40～50	619	512000	0.8
50～60	763	890240	1.2
60～70	549	1111573	2.0
70～80	326	817387	2.5
∴	∴	∴	∴
960～970	102	2191787	21.5
970～980	91	2296320	25.2
980～990	75	2610347	34.8

表Ⅱ. 3.3 リアルタイム寿命判定による工具摩耗幅

切削条件	実験回数	逃げ面摩耗
V=400mm/min d=0.25mm f=0.1mm/rev Setting of level 20	1	0.298mm
	2	0.309mm
	3	0.317mm
	4	0.323mm
	5	0.305mm
	6	0.294mm
	7	0.295mm
	8	0.297mm
	9	0.316mm
	10	0.293mm

る値)をAE寿命指数20とし、20以上の値が3個表示した時を寿命と予測して、切削を停止し、その時の工具前逃げ面摩耗幅を表示したものである。これらの値が寿命と決めた前逃げ面摩耗幅0.3mmとどの程度の差になっているか推定してみた。

推定は次の式で求められる。

$$\bar{x} - t_{\phi}(\alpha) \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\phi}(\alpha) \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}}$$

$\bar{x}$ は平均値、 μ は母平均、 $t_{\phi}(\alpha)$ は危険率 α で自由度 ϕ なるt分布表の値、 σ_s は不偏分散の平方根、 n はサンプル数である。信頼度95%とすると、t分布表から $t_{\phi}(\alpha) = 2.262$ となり、 $\sigma_s = 0.014$ 、 $\bar{x} = 0.3047$ 、 $\mu = 0.3\text{mm}$ 、 $n = 10$ により計算すると、95%の信頼度で判定値(0.3mm)対して0.295～0.314mmの範囲に入ることが推定できた。以上のことからリアルタイム解析ソフトウェアを使い、AE寿命指数を20にとり工具の寿命を判定すれば、逃げ面摩耗幅0.3mmに対して±0.015mm以内の範囲に、工具寿命を判定できると考えられる。また、仕上面粗さについては、被削材S45Cにおいて前逃げ面摩耗幅が0.3mm以上を越えると仕上面粗さが悪くなる傾向であるため、工具寿命として逃げ面摩耗幅を0.3mmに設定するのは適していると考えられる。

3.9 結 言

リアルタイム解析ソフトを使い、工具寿命を判定する実験を行ったが以下の様な結果が得られた。

- (1) イベント数及びオシレーション数を安定して取込むために変動しきい値を付加した結果、工具が摩耗することによってAE信号の振幅が大きくなるが、AE信号の振幅変化が生じてても全てのAE信号を取り込むことができるよう

になった。

- (2) 雑音信号を取り除くために設定最小持続時間による弁別を行ったが、機械系から発生する雑音信号を取り除くことができた。
- (3) A E 信号を液体の中に通すことによって横波を分離し、縦波だけに限定して取り込めた。そのことによって、A E 信号の単純化が図れ、寿命判定精度の向上につながった。
- (4) 工具摩耗のバラツキ状態を判定値（0.3 mm）との差で推定してみると、95%の信頼度で判定値に対して、摩耗幅が±0.015 mmの範囲に入ることが推定できた。
- (5) 単位時間当たりのイベント数及びオシレーション数からA E 寿命指数を演算し、工具寿命を判定することは、評価方法として有効であることがわかった。

第4章 流体伝播A E検出法による回転工具の寿命判定

4.1 緒 言

A E信号を検出する場合、A Eセンサの取り付け方によってA E信号振幅が変化することが知られている。疑似A E発生器とA Eセンサを直接押し付けた条件で、センサ検出面にグリスを塗布した場合としない場合では、明らかにグリスを塗布した場合の方がA E信号振幅が減衰しないことが報告されている¹⁾。また、センサ検出面に瞬間接着剤で接合した場合、センサ検出面にグリスを塗布した場合よりさらにA E信号振幅が減衰しないことが報告されている²⁾。次ぎに伝達経路が長くなるにしたがいA E信号は減衰することがわかる。一方その時の周波数特性に関しては、全体のゲインは下がるが、分布特性は大きな変化はないことが報告されている¹⁾。伝達経路中にベアリング等が存在する場合、A E信号振幅が30 dB以上小さくなる場合が多い。これは面接触が点接触になることにより接触面積が著しく減少したためである。また、ベアリングの回転中には、回転中のベアリングからもA E信号を発生することがあり³⁾、伝達されるA E信号が検出できない場合がある。以上のようにA Eセンサの取り付け方によってA E信号振幅が変化することや、伝達経路の長さ、及び伝達経路中のベアリング等の存在によってもA E信号振幅が影響を受けることなどから、A E信号を取り込むための条件設定が重要であるのでこの章で検討する。

第Ⅱ編第2章で旋削工具の寿命判定について検討したが、この場合工具が固定されているため直接工具にセンサを取りつけることができた。しかし、回転工具においては、工具に直接センサを取りつけることができないため、間接的にA E信号を取り込むことになり、雑音信号が入りやすくなることに加えて、A E信号の取り込みが発生源から遠くなることから、減衰してセンサまで到達しにくくな

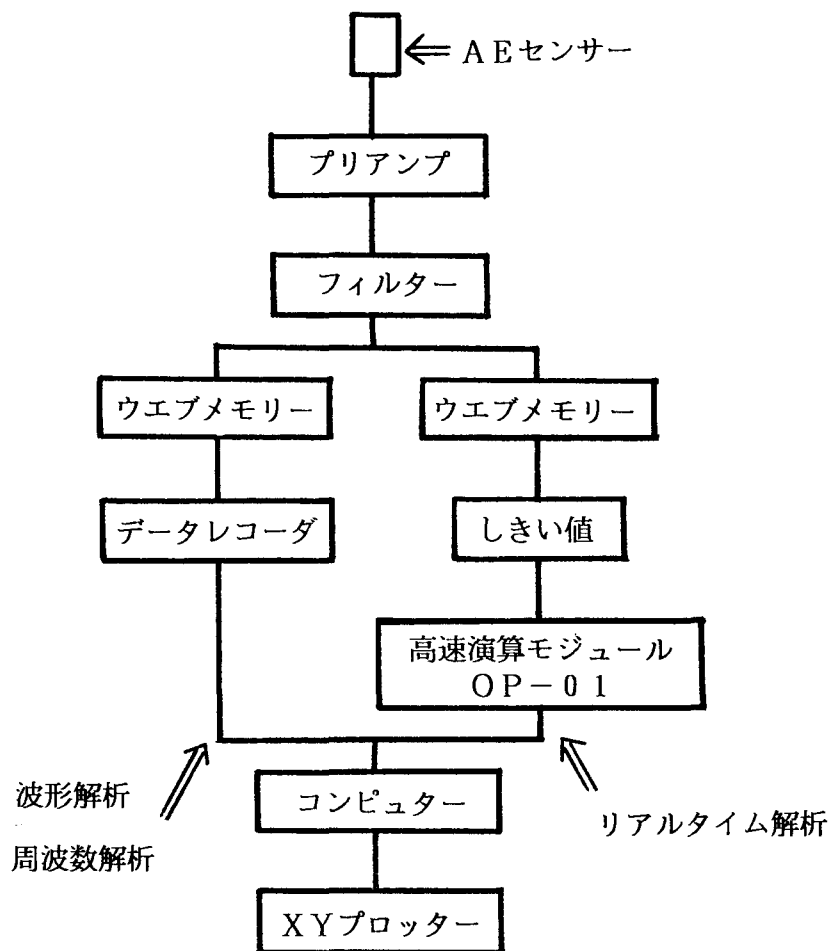
っている。さらに加工する場所が時々刻々と変化するため、センサと加工個所の距離が変わることや、A E発生源とセンサとの入射角が変わることにより、A E信号の取込み量や信号振幅に変化が生じてしまう。そのため工具摩耗の増加等によるA E信号振幅や減衰の変化が、センサと加工個所の距離変化やA E発生源とセンサとの入射角の変化で生じたものか、判断ができなくなってしまう欠点が生じている。以上のことから、センサを主軸の近傍や被削材に取り付けると、寿命判定のための解析が非常に困難な状態となっている。

ドリルやボールエンドミル等の回転工具による加工は機械加工の中でも大きな比重を占める加工方法であるためインプロセス検出の重要性が非常に高いと考えられる。従って本研究では、ドリルやボールエンドミル等の回転工具に対して、主軸の近傍や工作物にセンサを取りつけるのではなく、加工個所が移動しても加工個所とセンサの距離が一定にでき、かつ非接触でA E信号を取り込めることができる流体伝播A E検出法を提案し、その有効性を示す結果を報告する。

4.2 研究の方法

A Eの解析にはNF回路設計ブロックのA Eシステムで行った。センサ及びA Eシステムは第Ⅱ編第2章で記述したものと同一である。その構成を図Ⅱ. 4.1に示す。機械は数値制御付ジグ中グリ盤を使用した。A E解析として、しきい値を設定し、波形として感知してから感知できなくなるまでの波形を一個のA E信号波形として認めそれを1イベントとした。又、オシレーション数は1イベントの中で振幅がしきい値より大きい値の振動数である。

定量的に数値化する方法は、A E信号をリアルタイムに高速演算モジュール(OP-01)で処理し、その処理したデータをコンピュータ側からサンプリング時間内に取込んだイベント数及びオシレーション数を要求し、そのデータからA E寿命指数を演算するものである。



図Ⅱ. 4.1 AE信号の計測システム

AE寿命指数はオシレーション数をイベント数で割り、その値に比較的判断しやすい数になるように係数を掛けたものである。オシレーション数をイベント数で割る理由は、雑音信号が入ってきてオシレーション数が増加した場合、イベント数も同様に増加するため比をとることにより相殺でき、雑音信号を無視できるためである。

実験条件は表Ⅱ. 4.1 に示す。

表Ⅱ. 4. 1 実験条件

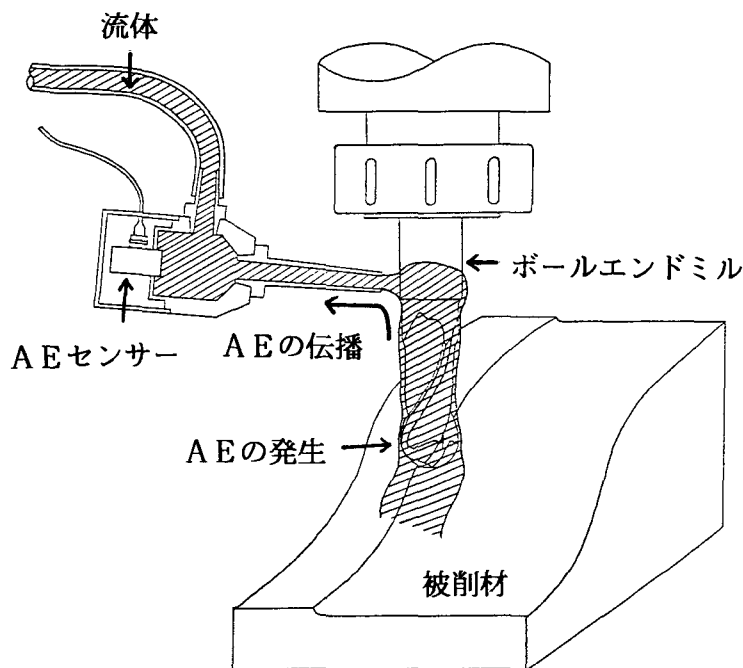
ドリル		
回転数 rpm	1000	1900
送り速度 mm/min	100	200
工具材質	HSS $\phi 0.1, \phi 2, \phi 3$	
被削材	SCS 14	
	湿式切削	

ボールエンドミル		
回転数 rpm	1900	
送り速度 mm/min	300	
工具材質	HSS $\phi 8$	
被削材	S55C	
	湿式切削	

4. 3 流体伝播 A E 検出装置の開発

図Ⅱ. 4. 2 は流体伝播 A E 検出装置を示したものである。回転工具における工具寿命及び工具損傷を検出するためには、従来工作機械の回転工具の近い部分や工作物に A E センサを取付けて検出する方法であった。しかし工作機械の回転工具の近い部分に A E センサを取付けた場合、工具と工作物との接触によって A E 信号が発生するが、センサ位置までの伝達距離が長いため A E 信号が弱まってしまう。また、途中にベアリング等を通過するための雑音信号の方が、大きな信号となって取込んでしまう欠点が生じている。

次に工作物にセンサを取付けた場合、加工している場所によって、センサとの距離及び入射角が変化することなどから不安定要素が多く、工具寿命等の判定に大きな障害となっている。

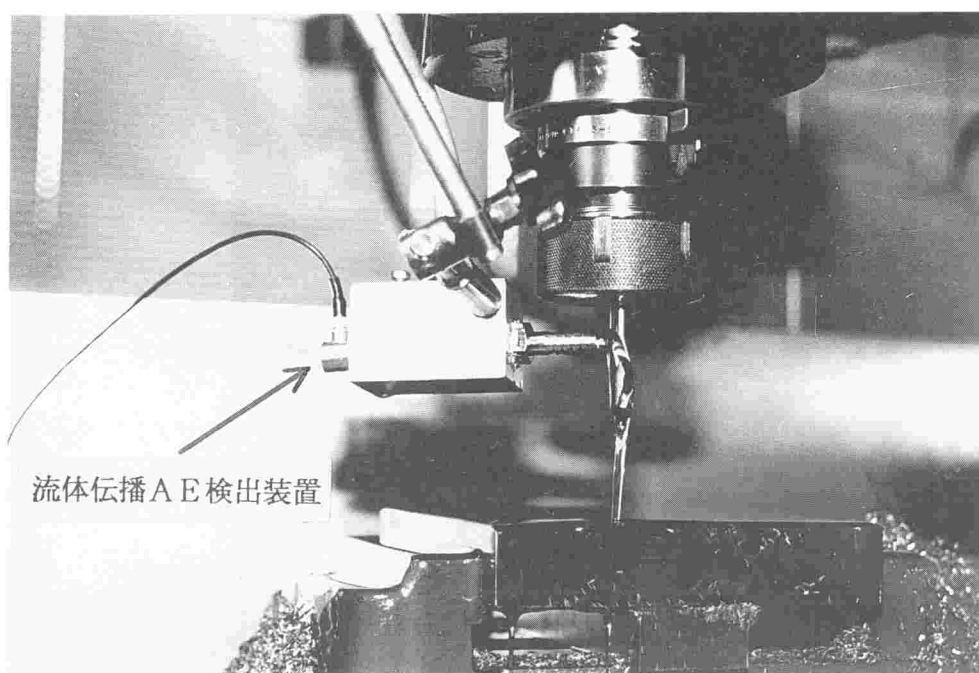


図Ⅱ. 4.2 流体伝播AE検出装置

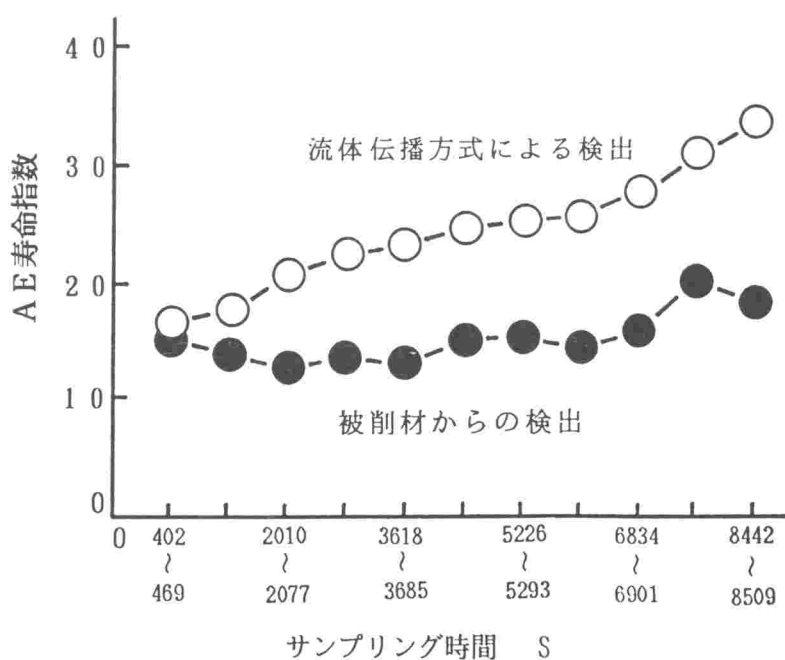
流体伝播AE検出装置は、これまでの回転工具に対するAE検出の問題点を解決しようとして作成したものである。この方法は回転工具に流体を流しかけ、工具と工作物の間から発生しているAE信号を流体を通して取込むものである。この方法により従来取込むことができなかったAE信号が十分検出可能になった。

図Ⅱ. 4.3 はボールエンドミル加工における流体伝播AE検出装置の写真である。

図Ⅱ. 4.4 は被削材にAEセンサを取り付けた場合と流体伝播AE検出との工具摩耗に対するオシレーション数の変化を調べたものである。明らかに被削材にAEセンサを取り付けた場合、AE発生源とセンサ間の距離と入射角の変化によ



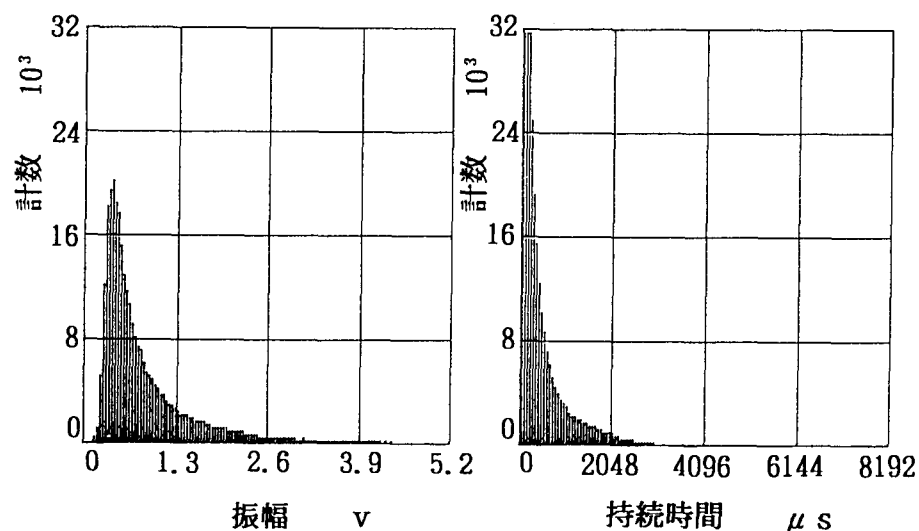
図Ⅱ. 4. 3 ボールエンドミル加工における流体伝播AE検出装置



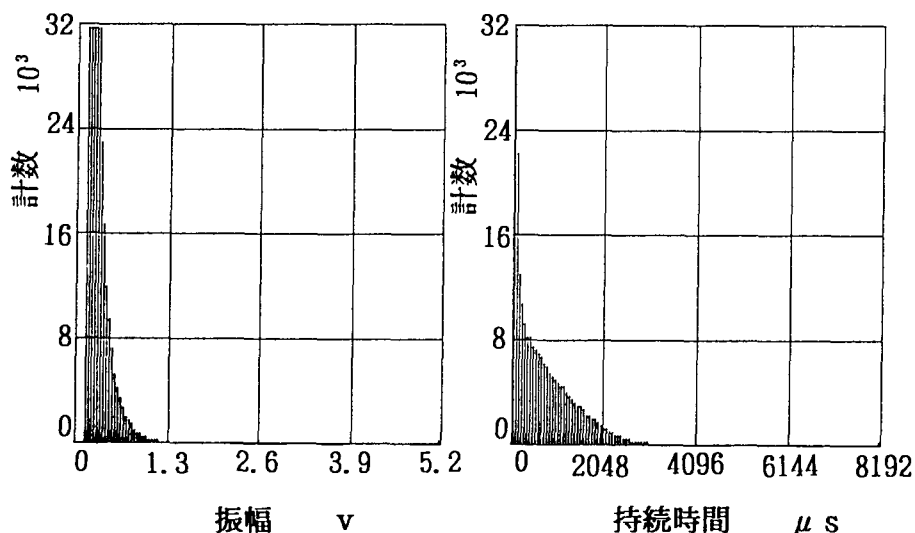
図Ⅱ. 4. 4 流体伝播AE検出法と被削材からの検出のAE寿命指数

り不安定になっている。流体伝播 A E 検出の場合では、はっきりと摩耗によるオシレーション数の増加が生じていることがわかる。

図Ⅱ． 4. 5 は被削材に A E センサを取り付けた場合と流体伝播 A E 検出との A



(a) 流体伝播 A E 検出装置による検出



(b) 被削材からの検出

図Ⅱ． 4. 5 A E 信号の入力量の比較

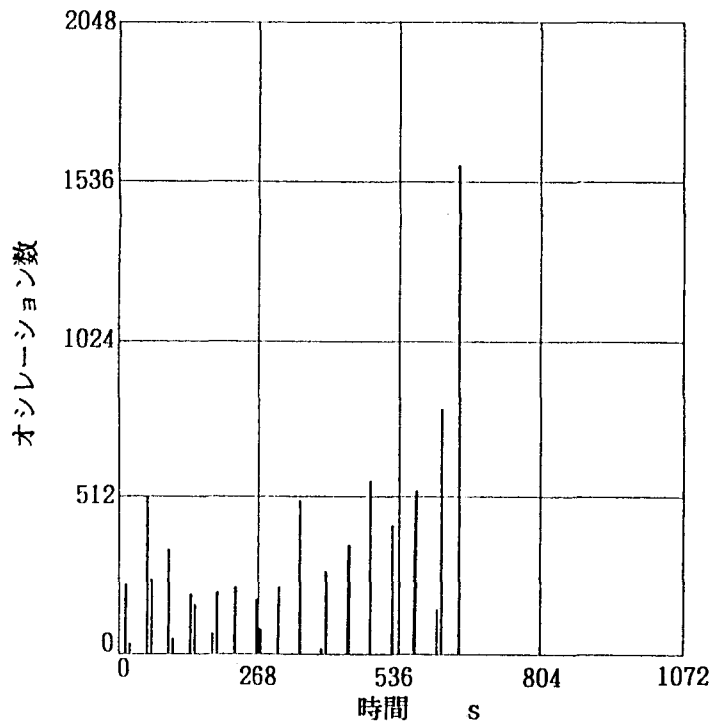
E信号の入力量の比較を示したものである。同図(a)が流体伝播A E検出であり、振幅をみると大きな振幅まで十分検出されていることがわかる。また、持続時間の方も十分な量の検出が得られている。

一方同図(b)の被削材に取り付けた場合は大きな振幅のものがみられず小さいものが多くなっている。これは大きな振幅の波形が発生してもセンサの所に到達するまでに減衰して小さくなってしまうためと思われる。持続時間の方も入力量が流体伝播A E検出と比較すると少なくなっている。

流体伝播A E検出の方が安定した取込みができるだけでなく、信号の入力量も他の方法よりも多いため、工具寿命判定には有効であると考えられる。

4. 4 工具寿命の判定

センサを被削材や機械の主軸近傍の部分に取り付ける方法では、ドリル加工の

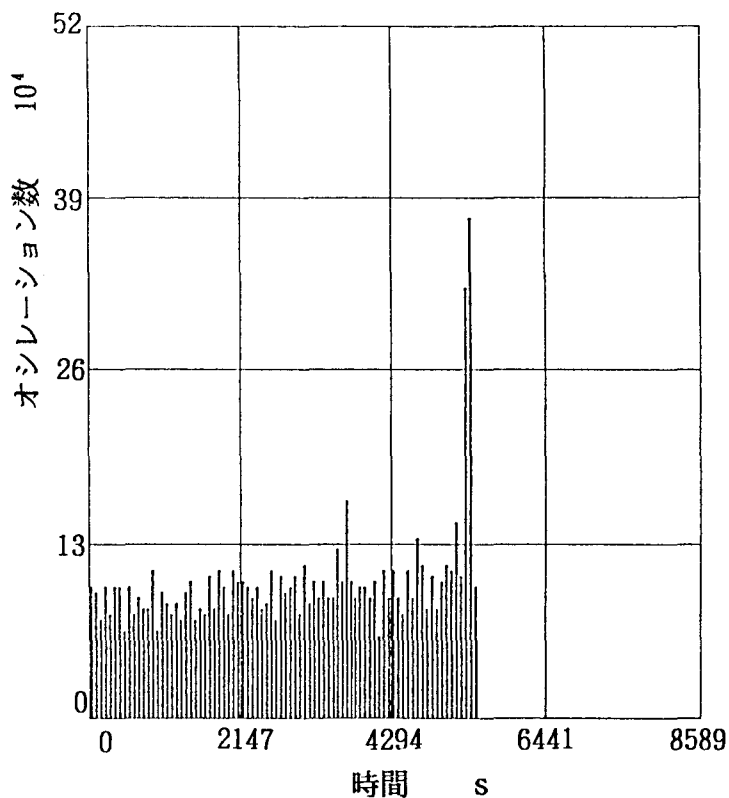


図Ⅱ. 4. 6 ドリル (φ 0.1) の切削時間とオシレーション数の関係

場合，ドリル径で0.5 mmの検出が限度であると言われているが，流体伝播AE検出法の場合，AE発生源にできるだけ近くに取り付けられること，次に雑音信号の発生部分から遠ざかることができる。又，工具先端の発生源とセンサの位置関係を常に一定に保つことができる等の利点がある。以上のことから0.5 mm以下のドリルでも検出が可能になった。

図Ⅱ. 4.6はドリル径0.1 mmの折損におけるオシレーション数の変化を示したものである。取込みを流体伝播AE検出法で行った結果，0.1 mmのドリル折損検出が可能になった。最後のオシレーション数の増加時にドリルが折損した。

図Ⅱ. 4.7はドリル径2 mmにおいて，折損までのオシレーション数を示したものである。あきらかに折損前にオシレーション数が増加し，その後折損することがわかる。図中の一本の線は6個分の穴数に相当するため，オシレーション数



図Ⅱ. 4.7 ドリル ($\phi 2$) の切削時間とオシレーション数の関係

は折損する10～12個前から増加している。そのため寿命判定としてはオシレーション数の増加が2～3回生じた時を寿命とすれば良いと考えられる。

図Ⅱ．4.8は工具寿命をリアルタイムに判定するためのCRT画面の一例である。あらかじめ設定した値よりAE寿命指数が越えた場合、そのAE寿命指数を別枠に表示させるものである。

サンプル時間		10 sec
設定値		20
係数の設定		0.001

サンプル時間	イベント数	オシレーション数	AE寿命指数
0～10	534	290187	0.5
10～20	611	294987	0.5
20～30	619	281947	0.5
.	.	.	.

$$\text{AE寿命指数} = \frac{\text{オシレーション数}}{\text{イベント数}} \times 0.001$$

AE寿命指数	
21.5	
25.2	
.	

図Ⅱ．4.8 リアルタイム解析画面

表Ⅱ．4.2はドリル径2mmにおいてリアルタイムに寿命判定するためのAE寿命指数の時間的变化を示すものである。指数は工具が折損する直前に増加現象が見られるため、あらかじめ値を設定しておけば、容易に寿命判定ができることがわかる。

ドリルの工具摩耗に伴ってAE信号がどのように変化するかを調べたものが図Ⅱ．4.9である。同図(a)が工具摩耗によるイベント数とオシレーション数である。イベント数はあまり変化しないが、オシレーション数は増加現象が顕著である。

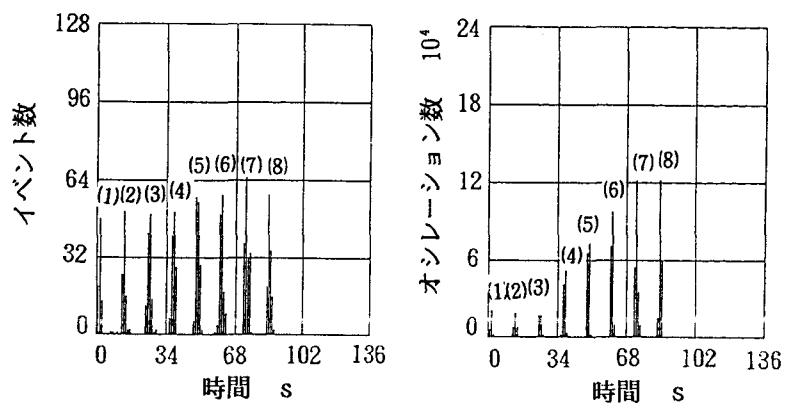
表Ⅱ. 4. 2 リアルタイム解析の演算結果
(ドリル加工)

サンプル時間	イベント数	オシレーション数	A E 寿命指数
67-134	883	87239	9.9
1809-1876	1346	139884	10.4
3351-3418	920	97553	10.5
5293-5360	977	91537	9.4
7035-7102	834	107867	12.9
8777-8844	735	71338	9.7
10519-10580	931	87454	9.4
12261-12328	1009	122264	12.1
14003-14070	816	66611	8.2
15745-15812	704	73487	10.4
17487-17554	897	97123	10.8
19229-19296	1361	140958	10.4
20971-21038	912	374314	41.0
21105-21172	987	422430	41.8

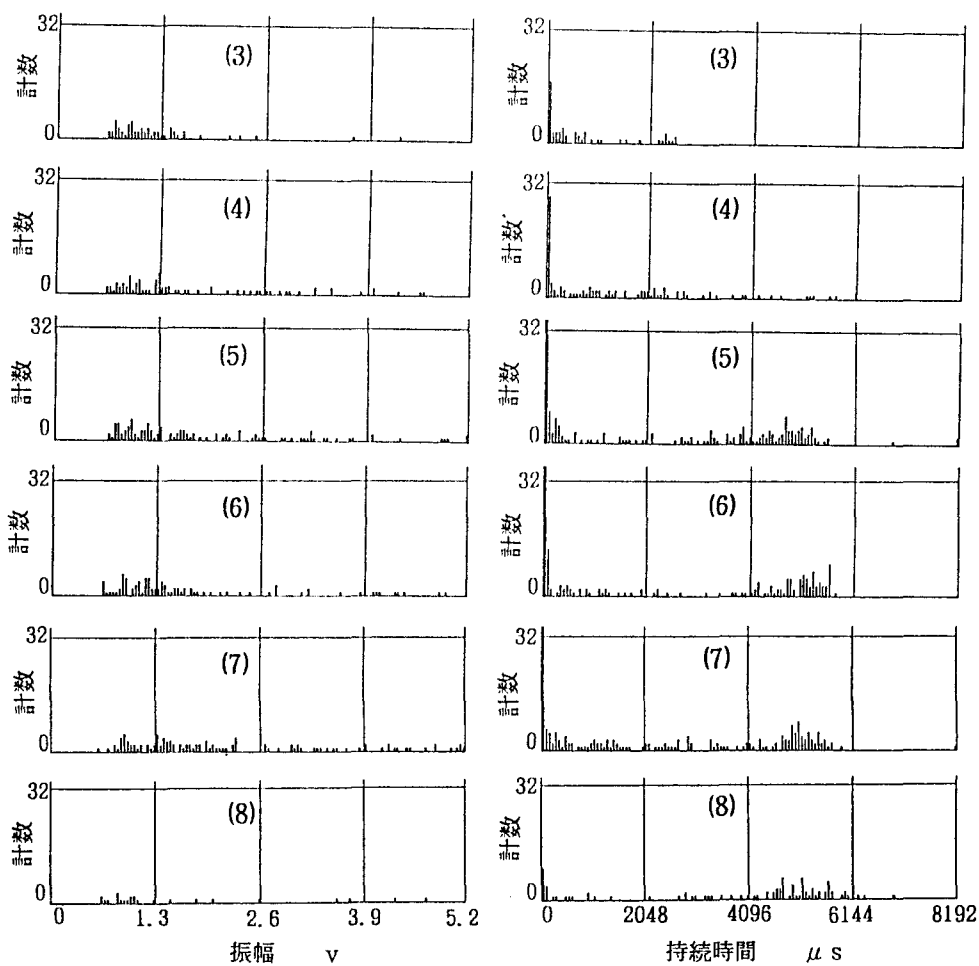
係数の設定 0.1

A E 信号の振幅と A E 信号の持続時間を調べたものが同図(b)である。振幅の変化をみると徐々に大きくなっているのがみえる。しかし、大きな変化ではない。一方持続時間をみると、工具摩耗に伴って増加現象は振幅の増加よりはるかに大きくなっている。オシレーションの増加は持続時間の増加、つまり A E 信号のうねりが長くなるためと考えられる。

表Ⅱ. 4. 3 はリアルタイム解析ソフトウェアによりボールエンドミルの工具寿命の切削実験を行い、工具寿命に至るまでのイベント数とオシレーション数及び A E 寿命指数を示したものである。表Ⅱ. 4. 3 から A E 寿命指数がサンプリング時間の経過につれて増加しているのが良くわかる。A E 寿命指数が 7 を越えた時から仕上面粗さが悪くなるので、A E 寿命指数 7 を越えた値が 3 個表示した時を工具寿命と考えた。工具の逃げ面摩耗を調べてみると、ほぼ 0. 2 5 mm であった。



(a) 工具摩耗によるイベント数及びオシレーション数



(b) 工具摩耗による振幅及び持続時間

図Ⅱ. 4.9 工具摩耗に対する振幅とA E信号の持続時間

工具を寿命以前で中断し、再度切削を開始した場合においても、A E 寿命指数は中断した時と同じ値から始まるために、切削している工具を何度中断しても A E 寿命指数は継続して工具摩耗の進行状態をみることができる。このことから流体伝播 A E 検出法は、工具寿命判定に有効であると考えられる。

表Ⅱ. 4. 3 リアルタイム解析の演算結果
(ボールエンドミル加工)

サンプル時間	イベント数	オシレーション数	A E 寿命指数
0-10	425	165729	3.9
10-20	443	177216	4.0
20-30	445	178011	4.0
30-40	446	182862	4.1
2800-2810	448	237441	5.3
2810-2820	450	238523	5.3
2820-2830	447	236914	5.3
3990-4000	440	308021	7.0
4000-4010	445	311519	7.0
4010-4020	448	318084	7.1

係数の設定 0.01

表Ⅱ. 4. 4 は判定値（イベント数とオシレーション数の比に係数を掛けた値で寿命を予測する値）を 7 とし、7 以上の値が 3 個表示されたときを寿命と予測して、切削を停止し、その時の逃げ面摩耗幅を表示したものである。

表Ⅱ. 4. 4 を基にして逃げ面摩耗幅についてのバラツキ状態を調べるために統計的手法により推定を行った。工具摩耗幅（0.25 mm）との差の推定は下記の式で求められる。

$$\bar{x} - t_{\phi}(\alpha) \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\phi}(\alpha) \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}}$$

$\bar{x}$ は平均値, $t_{\phi}(\alpha)$ は危険率 α で自由度 ϕ なる t 分布表の値, σ_s は不偏分散の平方根, n はデータの総数, μ は母平均である。信頼度を 95% とすると α は 0.05。

表Ⅱ. 4.4 リアルタイム解析判定による工具摩耗幅

Cutting condition	実験 回数	Flank wear land
N = 1900 rpm d = 1 mm f = 300 mm/min Setting of level 7	1	0.254 mm
	2	0.261 mm
	3	0.248 mm
	4	0.272 mm
	5	0.263 mm
	6	0.245 mm
	7	0.255 mm
	8	0.260 mm
	9	0.264 mm
	10	0.249 mm

0.5 となり t 分布表から $t_b(\alpha) = 2.262$ になる. $\bar{x} = 0.257$, $\sigma_s = 0.0084$, $\mu = 0.25$, $n = 10$ により計算すると, 95%の信頼度で判定値 (0.25 mm) に対して 0.251 ~ 0.263 mm の範囲に入ることが推定できた.

以上のことからリアルタイム解析ソフトウェアを使い, ボールエンドミル工具の場合, 95%の信頼度で逃げ面摩耗幅 0.25 mm に対して +0.001 mm から +0.013 mm の範囲に入り, 工具寿命を判定できると考えられる.

4.5 結 言

回転工具による折損検出及び寿命判定をするために A E 信号の検出を流体伝播 A E 検出法によって行ったが, 以下のような結果が得られた.

- (1) ドリルやボールエンドミル等の回転工具に対して、主軸の近傍や被削材にセンサを取り付けるのではなく、切削箇所が移動しても切削箇所とセンサ間の距離が一定にでき、かつ非接触でA E信号を取り込めることができる流体伝播A E検出法を開発した。
- (2) センサを主軸の近傍や被削材等に取り付けていた従来の方法では、工具先端のA E発生源とセンサとの距離が刻々と変わり、検出するA Eの量が変わっていたが流体伝播A E検出法で行った結果、距離が一定となったことから安定した取込みができるようになった。また、従来の方法では検出できなかった小さなA E信号まで検出できることがわかった。
- (3) 従来のセンサの取り付け位置では、ベアリングやモータ等からの雑音信号が入りやすかったが、流体伝播A E検出法はそれらの発生源からセンサが離れているため、雑音信号を無視できるほど小さくすることができた。
- (4) 流体伝播A E検出法を用いることによって、ドリルにおいては直径0.1 mmの折損検出が可能になった。またドリル直径2 mmにおいては工具寿命の判定が可能になった。
- (5) ボールエンドミル工具の寿命判定について調べてみると、判定値0.25 mmに対して95%の信頼度で+0.001 mmから+0.013 mmの範囲に入ることがわかった。

第5章 旋削プロセスにおけるA Eの発生

5.1 緒 言

A Eセンサによって切削中に検出されるA E信号は、一般に連続的なものと突発的なものとが重畳された振幅特性をもっている。信号の発生個所としては、被削材のせん断変形部分、工具と被削材及び切りくずの摩擦部分、切りくずの破断と衝突、更に工具に生ずるき裂と欠損などに大別される。A E信号の発生は、上述のように切削機構とも密接に関係しているため、切削プロセスの監視はもとより、切削現象そのものの解明に対しても有用な情報を提供してくれるものと考えられる。例えば、切りくず形成に伴う塑性仕事率と、A E振幅の二乗平均値との関係を解析した報告がある¹⁾。A E振幅は切削速度とほぼ比例的な関係にある。しかし、切り込み深さや送りの影響に関してはかなりの相違があることが報告されている²⁾。また、A E信号は被削材材質の変化に極めて敏感であり、材料の品質が厳しく管理されていることがこの方法を適用する際の前提条件となる。このようにA E信号が切削条件に敏感に影響されることは、欠点であると同時に、反面それだけ切削条件の相異を忠実に検出しているということでもある。A Eを利用して工具の損傷状態を監視するには、これら切削条件がA E信号に与える影響を把握しておくことが監視システムの信頼性を高める上で重要なことである。

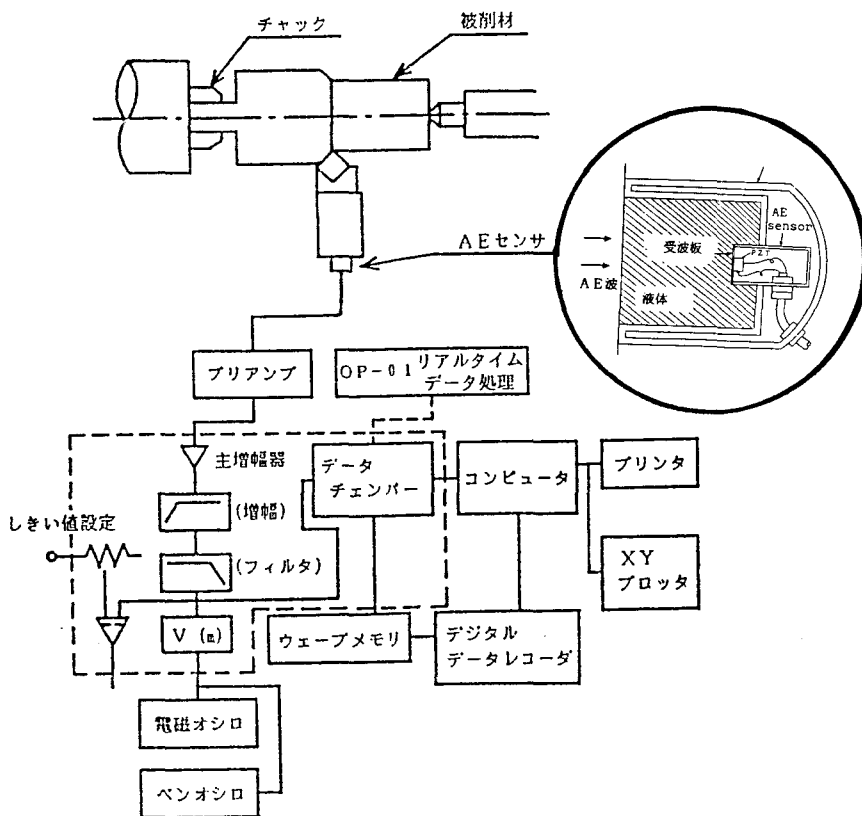
従来から逃げ面摩耗とA E信号との相関関係に大きな関心が払われている。これらの妥当性をみいだすことは重要なことであり、和田らによりA E信号と摩擦・摩耗挙動の間に相関関係があることが報告されている³⁾。実際の加工現場では、加工寸法の許容値を越えた時、切りくずの色が変わった時、あるいは表面粗さが許容値に収まらなくなった時など、さまざまな基準で工具寿命が判定されている。したがって、これら実現象とA E信号との対応付けを行うことが、A Eに

よる工具摩耗監視技術を実用的なものとする上で重要であるといえる。

そこで、本章では工具摩耗とAE信号との相関関係を明らかにし、工具摩耗の増加に相関があるAE信号は主としてどこから発生しているかを明確にする。また、AE信号と切削中の仕上面粗さとの関係を検討する。

5.2 研究の方法

実験装置の概略を図Ⅱ. 5.1に示す。センサを工具シヤンク後部に取り付けし、液体を通してAE信号を縦波だけに限定して取込み、AE信号の処理を行った。処理の方法はAE信号に対してしきい値を設け、イベント数及びオシレーション



図Ⅱ. 5.1 実験装置の概略

数をとらえて処理を行うものである。又、FFTアナライザを用いてAE信号の周波数分析を行った。切削実験はNC旋盤を用いて超硬チップを使用し、被削材S45C、FC25、AL2017を切削することによって行った。なお切削条件は表Ⅱ．5.1に示す。

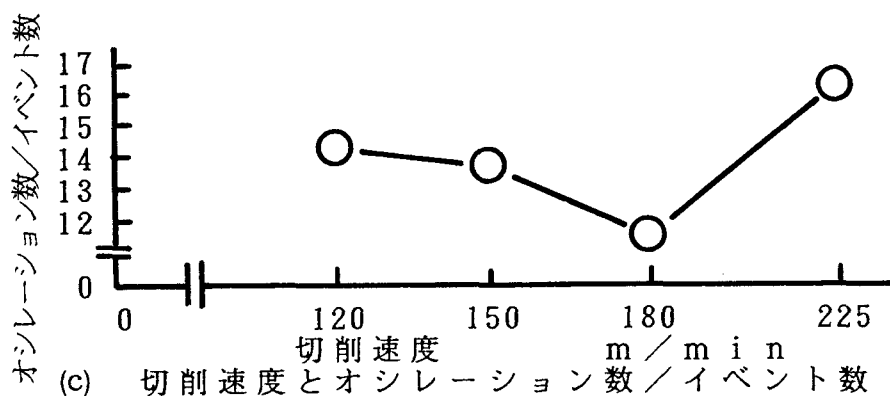
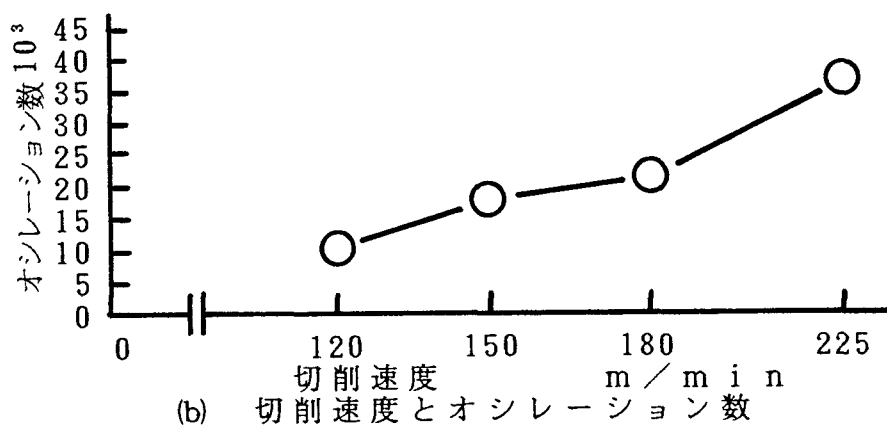
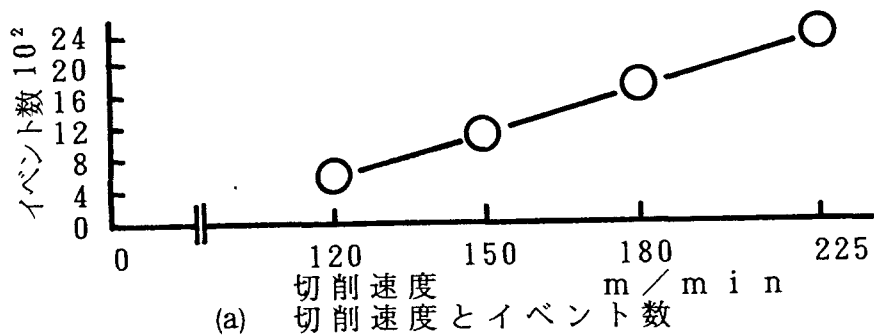
表Ⅱ．5.1 実験条件

切削速度	120, 150, 180, 225
送り	0.1, 0.16, 0.2, 0.24, 0.3, 0.4
切込み	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
被削材	S45C, AL2017, FC25
工具	P20, K10

5.3 切削条件がAE信号に及ぼす影響

切削条件とAE信号がどのような関係にあるかを調べるために以下の実験を行った。

図Ⅱ．5.2(a), (b), (c)はAE信号の切削速度の影響を示している。同図(a), (b)から切削速度が増加することによって、AE信号のイベント数及びオシレーション数が増加することがわかる。同図(c)からオシレーション数／イベント数の比を調べると、切削速度180m/minのところが極小値になっている。この比は1イベント当たりの平均振動数であり、この値が小さいことは、無理のない切削ができていえる。つまり切削速度180m/minが最適な切削速度と考えられる。

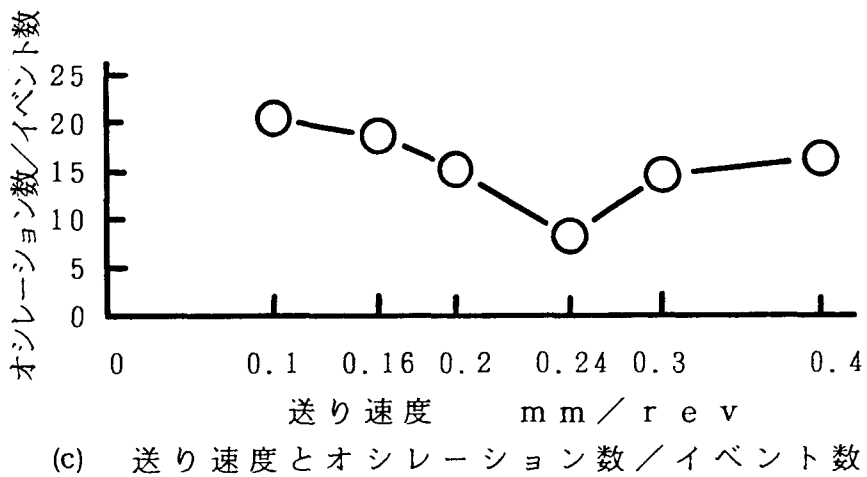
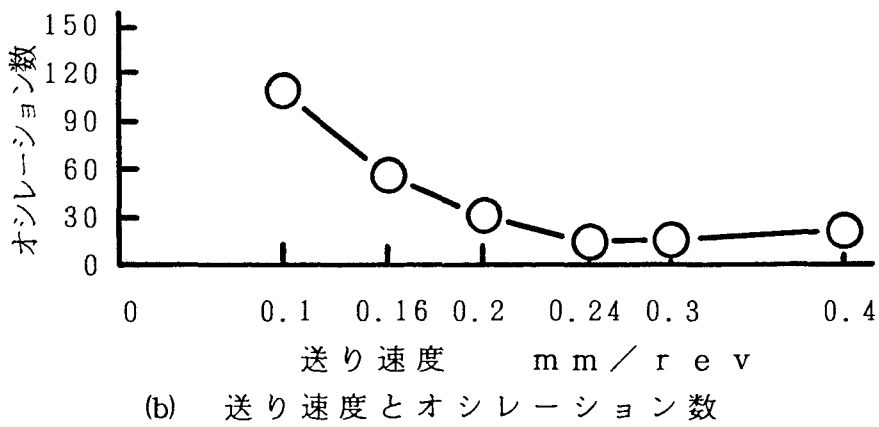
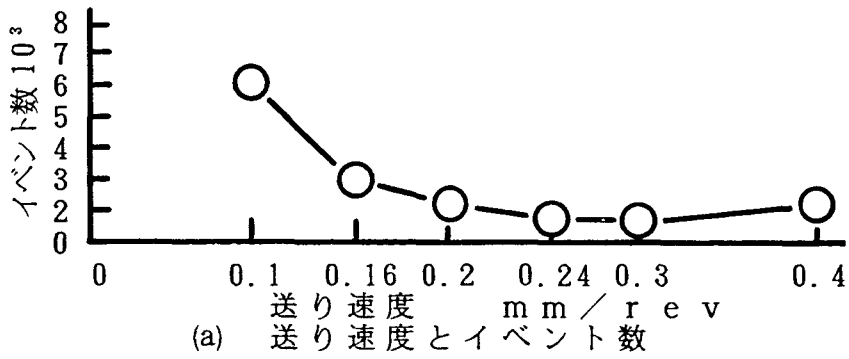


図Ⅱ. 5.2 切削速度とイベント数およびオシレーション数の関係

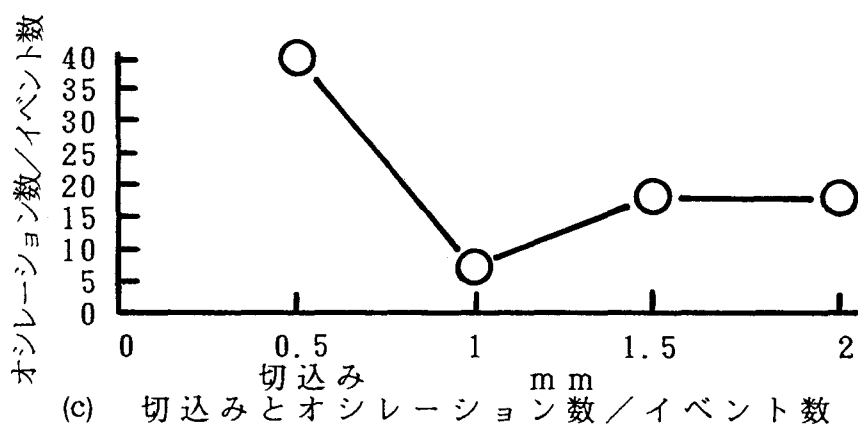
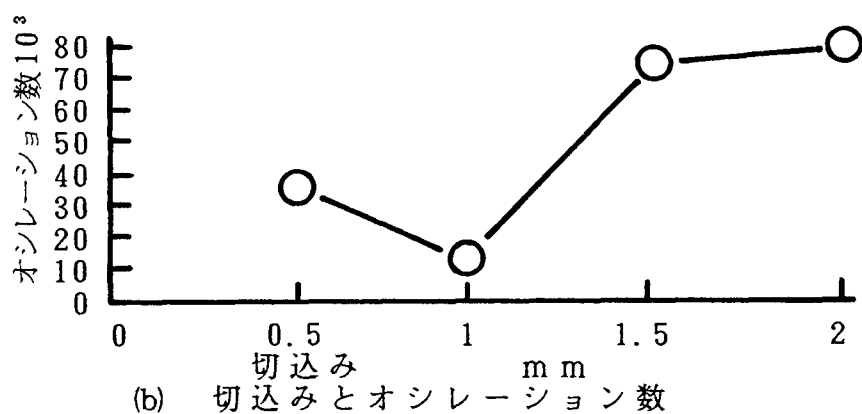
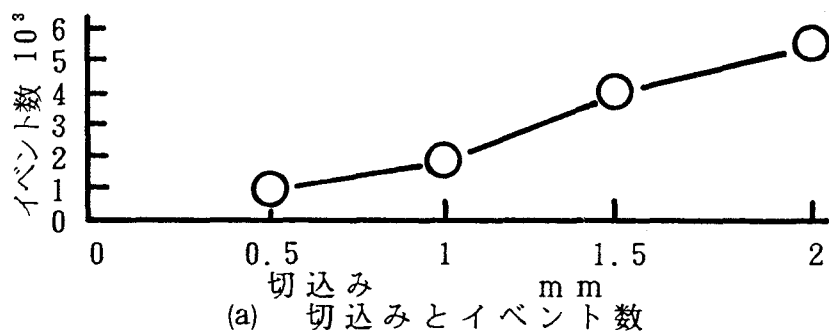
図Ⅱ. 5. 3 (a), (b), (c)は送りとA E信号の関係を示したものである。同図(a), (b)から送り $0.2 \text{ mm/rev} \sim 0.4 \text{ mm/rev}$ の間ではほとんど影響を受けていない。しかし送りが小さくなると、A E信号のイベント数とオシレーション数は増加している。送りが大きいほど切削面積が増え、A E信号は大きくなるように思えるが、図Ⅱ. 5. 3の結果は逆になっている。この理由の一つとしては送り速度が小さくなると有効すくい角が小さくなる。そのことによって切れ味が低下し、工具刃先に振動が誘発されることが一因としてあげられる。同図(c)からオシレーション数/イベント数の比を調べると、送り 0.24 mm/rev が極小値になっている。この場合も切削速度と同様に最適な送りの値と考えられる。

次に切込みとA E信号との関係を示したのが、図Ⅱ. 5. 4 (a), (b), (c)である。同図(a), (b)から切込みも切削速度と同様に切込みが増加するとA E信号も増加傾向にある。同図(c)からオシレーション数/イベント数の比を調べると、切込み 1 mm が極小値になっている。この場合も切削速度と同様に最適な切込みの値と考えられる。

以上の結果を要約するとA E信号は工具摩耗だけでなく、切削速度、切込み、送りなどの切削条件の影響を受けることがわかった。しかしながら最近の工作機械はNC化が進み、切削速度、送り、切込み等の切削条件を一定として切削でき、切削条件の変化によるA E信号のばらつきを考慮しなくてもよいため、工具摩耗に対応するA E信号の変化を追求すれば工具寿命の判定ができる。また、オシレーション数/イベント数の比を調べることによって、それぞれの切削条件に最適値が存在することを示唆していると考えられる。これらのことは、切削条件の最適値を評価する基準として重要な意味もつものと考えられる。



図Ⅱ. 5.3 送り速度とイベント数およびオシレーション数の関係



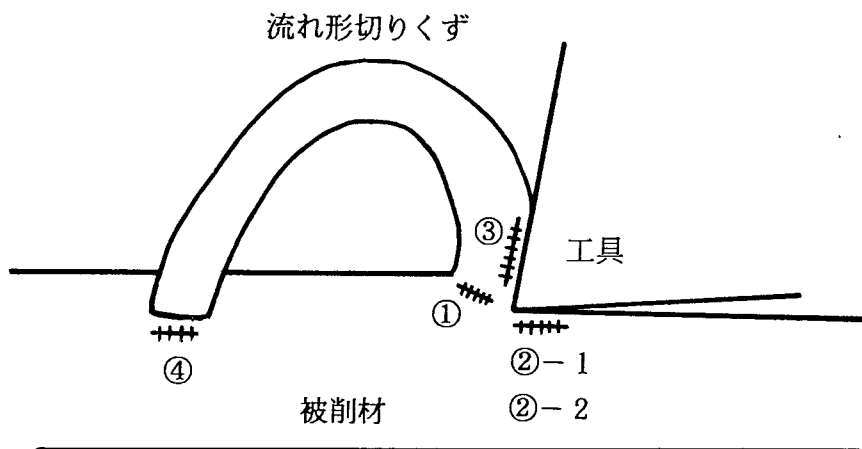
図Ⅱ. 5.4 切り込みとイベント数およびオシレーション数の関係

5.4 流れ形切りくずにおけるA E信号

旋削の流れ形切りくずにおけるA E信号の発生個所と考えられるところを示したものが図Ⅱ. 5.5である。

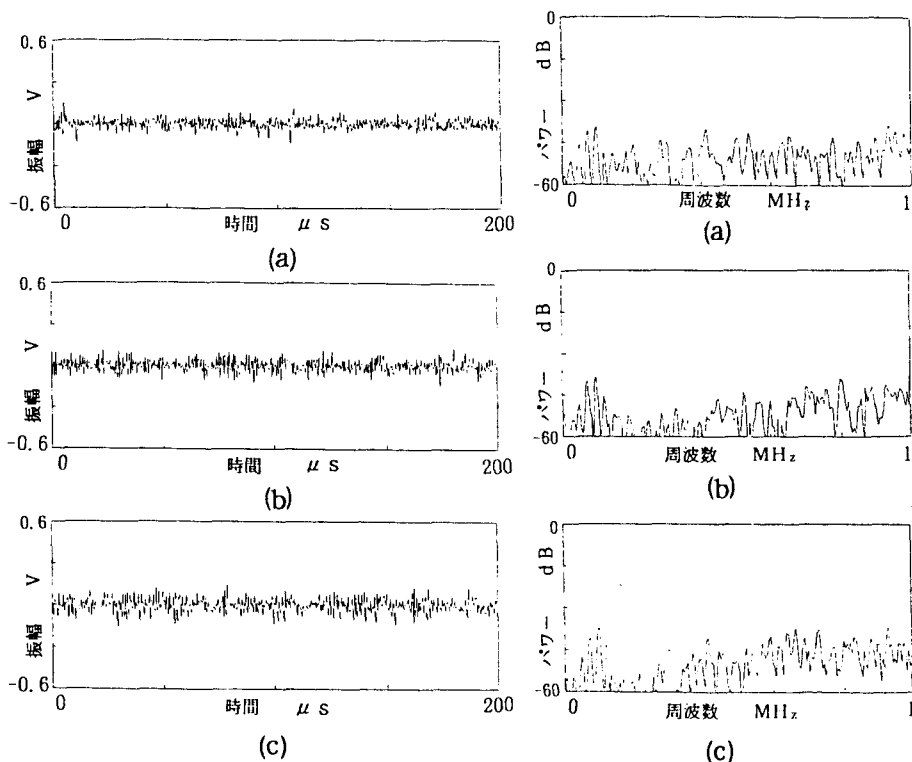
- ①は切りくずせん断領域の部分
- ②-1 は前逃げ面と被削材との摩擦の部分
- ②-2 は横逃げ面と被削材との摩擦の部分
- ③はすくい面と切りくずとの摩擦の部分
- ④は切りくずが被削材及び工具等に接触するときの摩擦の部分

A E信号の発生個所として①, ②-1, ②-2, ③, ④, 等が考えられるが, その中でA E信号が主として発生している場所を調べるため, 次のような実験を行った。まず通常の切削のときのA E信号の検出波形を取込み, 次に切削し終わったところから戻りの切込み零の切削を行い, そのときのA E信号の検出波形をみる。さらにもう一度切込み零の切削を行ってそれぞれの検出波形を比較する。



図Ⅱ. 5.5 流れ形切りくずにおけるA E信号の発生個所

それらの検出波形とパワースペクトラムを図Ⅱ. 5. 6 (a), (b), (c)に示す。同図(a)は切削のときのもの、同図(b)は戻りの切込み零の切削を行ったときのもの、同図(c)は再度切込み零の切削を行ったときのものである。同図(a)のA E信号の検出波形と同図(b), (c)のいずれもA E信号の検出波形がほぼ同じ波形であることがわかる。以上のことから旋削で被削材S 4 5 Cの加工の場合、A E信号が発生しているのは、図Ⅱ. 5. 5 ②-1 の前逃げ面と被削材との摩擦によって発生しているA E信号と考えられる。つまり図Ⅱ. 5. 5 ①の切りくずせん断領域ではほとんどA E信号が発生していないこと、又、図Ⅱ. 5. 5 ③のすくい面と切りくずとの摩擦の部分及び図Ⅱ. 5. 5 ②-2 の横逃げ面においても、A E信号は発生していないものと推測できる。切りくずと被削材との摩擦や巻きつき等がなかったため図



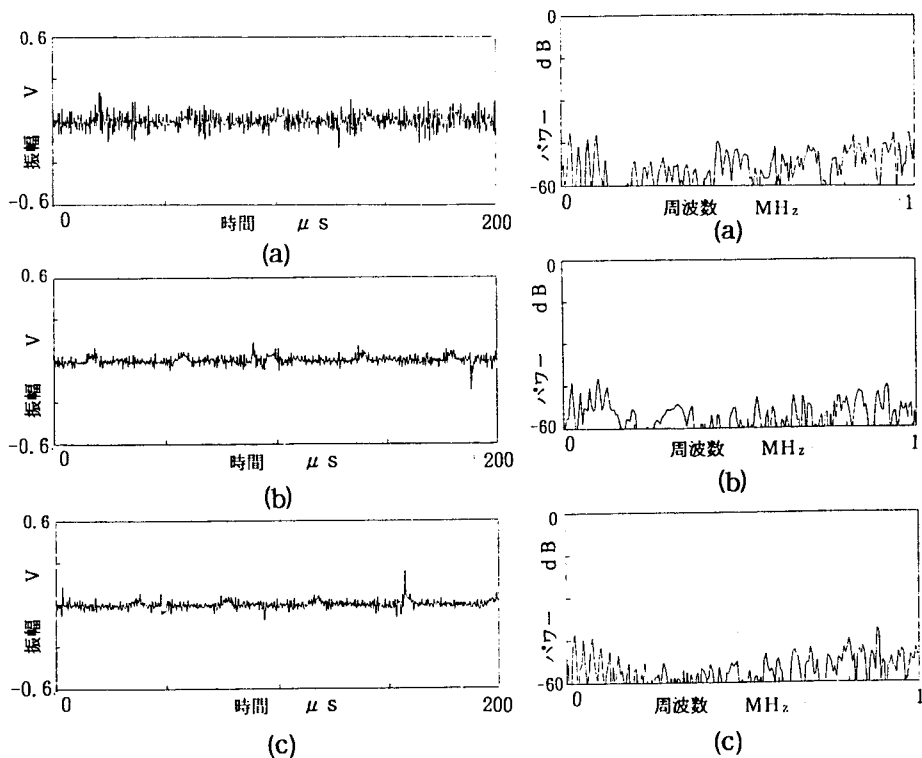
$$V = 200 \text{ m/min} \quad f = 0.2 \text{ mm/rev} \quad d = 1 \text{ mm}$$

図Ⅱ. 5. 6 S 4 5 C 切削における摩擦のA E 信号検出波形と
パワースペクトラム

II. 5.5 ④でもない。

このことは、すくい面と切りくずとの接触面積の増加や横逃げ面と被削材との摩擦の増加に対してA E信号があまり影響を受けていないことを示していると言える。前逃げ面と被削材との摩擦は、切込みに関係なく一定である。このことから旋削において流れ形切りくずの場合は、A E信号の発生は主として前逃げ面と被削材との摩擦から発生しているものと考えられる。

パワースペクトラムの方を見ると切削中のA E信号の検出波形はほぼまんべなく、どの帯域にも存在しているが、切込み零の切削の図II. 5.6(b), (c)では200kHzから300kHzのところがパワーレベルが低くなっている。この部



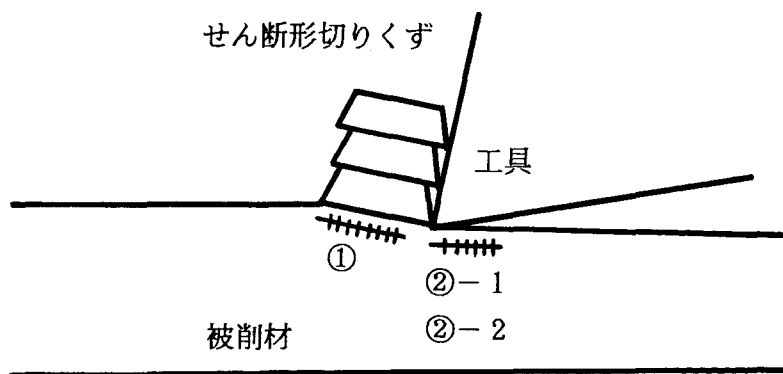
図II. 5.7 AL2017切削における摩擦のA E信号検出波形とパワースペクトラム

分は、前逃げ面と被削材との摩擦によって発生しているA E信号ではなく別のところから発生しているA E信号と考えられる。ただこの信号の量はあまり多くないと考えられる。

図Ⅱ． 5. 7 (a), (b), (c)はアルミ合金A L 2 0 1 7を同様に実験した結果を示したものである。アルミ合金の場合もS 4 5 Cと同様に流れ形切りくずになっているため、切削中と切込み零の切削のA E信号はほとんど同じであった。これらのことは、S 4 5 Cと同様に切りくずせん断領域や横逃げ面の摩耗からはあまり検出していないことを示している。又、パワースペクトルの傾向もS 4 5 Cと同じである。

5. 5 せん断形切りくずにおけるA E信号

せん断形切りくずとなる被削材は鋳鉄に代表されるため、F C 2 5の旋削におけるA E信号を調べた。A Eの発生源と思われる個所を示したものが図Ⅱ． 5. 8である。流れ形で考えられたすくい面摩耗や、切りくずの絡みはF C 2 5の場合、切りくずが細くなるため、すくい面を切りくずが擦っていくこともなく、また、切りくずがつかないことから、切りくずの絡みもないと考えられる。



図Ⅱ． 5. 8 せん断形切りくずにおけるA Eの発生個所

以上からA Eの発生源と思われる個所は

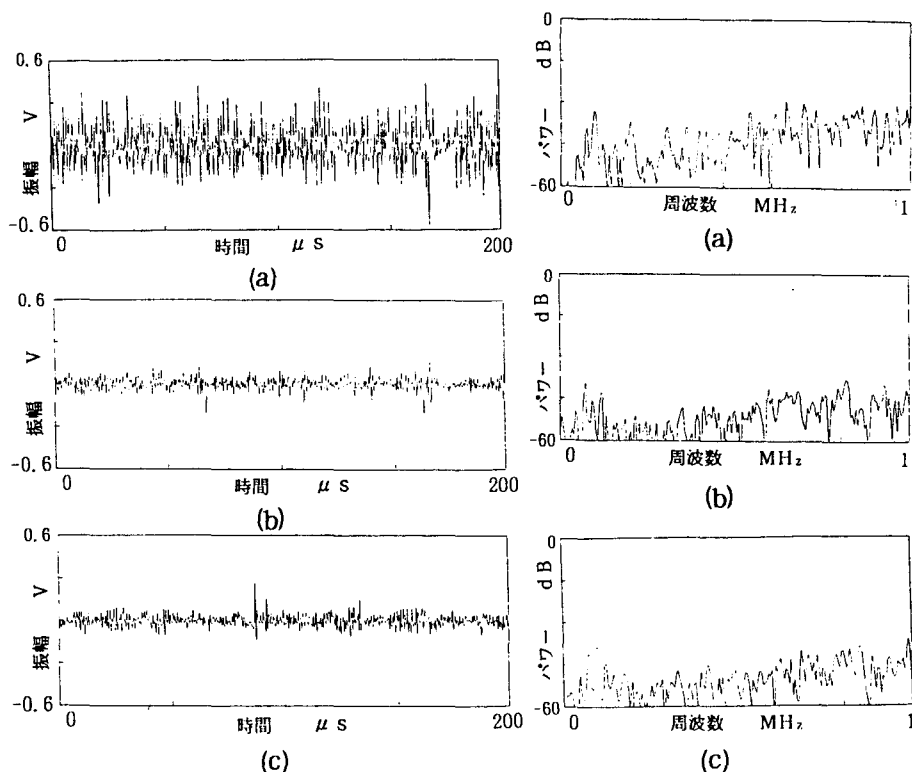
①切りくずせん断領域における割れが発生する部分

②-1 前逃げ面と被削材との摩擦の部分

②-2 横逃げ面と被削材との摩擦の部分

と考えられる。その中でもどこの部分からが主としてA E信号が発生しているかを調べるために、流れ形切りくずと同様の方法で行った。

切込み1 mmで切削したときのA E信号の検出波形を示したものが図Ⅱ. 5. 9 (a), (b), (c)である。同図(a)はS 4 5 Cの流れ形切りくずの振幅より大きな振幅となっている。次に戻りの切込み零の切削を同図(b)に示す。明らかに同図(a)より小さな振幅になっている。さらにもう一度切込み零の切削を行った結果が同図(c)で



$V = 80 \text{ m/min}$ $f = 0.2 \text{ mm/rev}$ $d = 1 \text{ mm}$

図Ⅱ. 5. 9 FC25切削における摩擦のA E信号検出波形とパワースペクトラム

ある。同図(b)と同図(c)は同じ振幅であった。流れ形切削の場合、切込み1 mmの切削でも切込み零の切削でもほぼ同じであったが、せん断形の切りくずでは、明らかに切込み1 mmのときの振幅が大きい。このことは図Ⅱ. 5. 8 ②-1 及び図Ⅱ. 5. 8 ②-2 の逃げ面と被削材との摩擦から発生するAE信号より図Ⅱ. 5. 8 ①の割れによって発生するAE信号が明らかに大きいと考えられる。

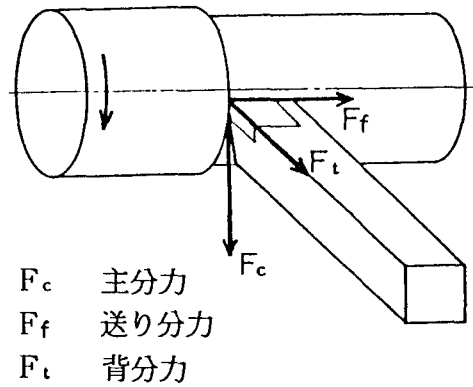
以上のことから、切りくず形態によって主なAEの発生個所は異なることがわかった。これは被削材の材料特性に関連していると考えられる。

パワースペクトラムの方を見ると切削中の検出波形図Ⅱ. 5. 9 (a)は、ほぼまんべんなくどの帯域にも存在しているが、切込み零の切削の図Ⅱ. 5. 9 (b), (c)では150 kHzから400 kHzのところがパワーレベルが低くなっている。この帯域は、切りくずせん断領域における割れによって発生していたAE信号が摩擦だけのときには、発生しなくなったためと考えられる。

5. 6 切削抵抗と工具摩耗との関係

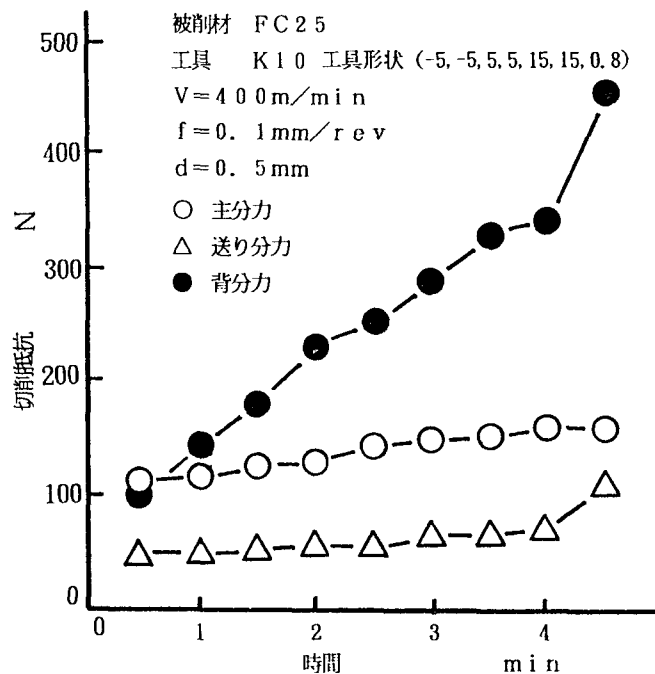
流れ形切りくずにおけるAE信号発生は、前逃げ面と被削材との摩擦から大きく影響を受けていることが第Ⅱ編第5章5. 4で明らかにできた。摩擦力は摩擦係数と荷重で決定される。荷重に相当する背分力と工具摩耗の増加を調べることにより、工具摩耗とAE信号発生との関係が明らかにできると考えられる。そこで工具摩耗に対して切削3分力の影響について検討する。

図Ⅱ. 5. 10は旋削の長手切削において工具に作用する切削3分力を示している。切削抵抗のそれぞれの分力（主分力、送り分力、背分力）と工具摩耗との関係を調べるために3分力と切削時間との関係を示したものが図Ⅱ. 5. 11である。切削時間の経過に対して3分力とも増加傾向にあるが、特に顕著に増加しているのが背分力である。工具が摩耗してくると背分力が特に増加することが明らかに見られる。主分力と送り分力ではほぼ同じようにゆるやかな増加傾向が見られる。



図Ⅱ. 5.10 工具に作用する切削3分力

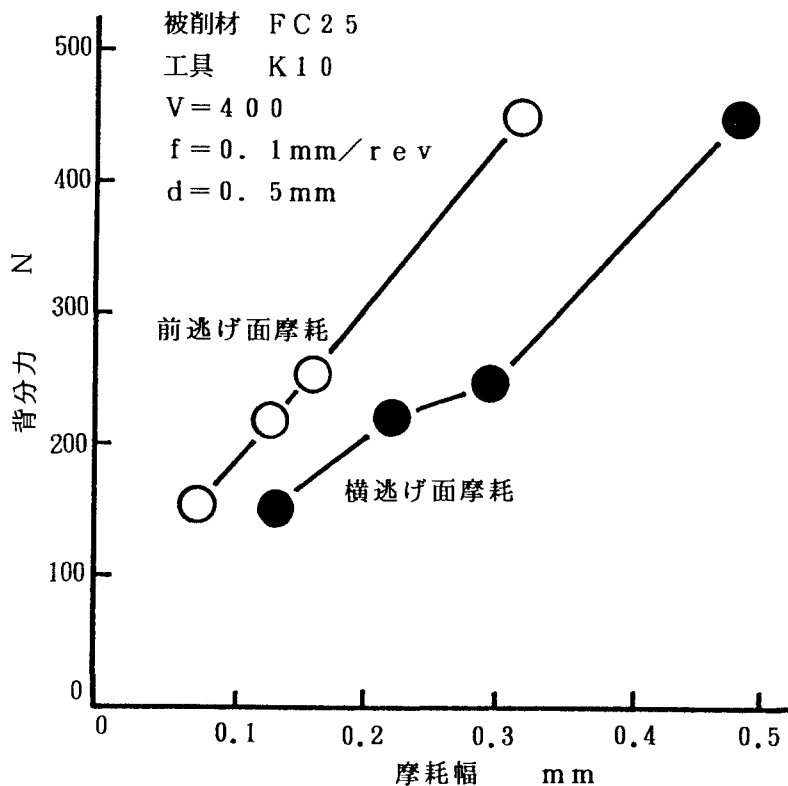
図Ⅱ. 5.11 の条件で切削時間4分すぎには前逃げ面摩耗が0.3 mm, 横逃げ面摩耗が0.48 mmであった。判定する場合, 検出対象とするものの変化が大きい程, 判定誤差は少ないと考えられる。背分力は工具摩耗に対して変化の度合い



図Ⅱ. 5.11 3分力と切削時間との関係

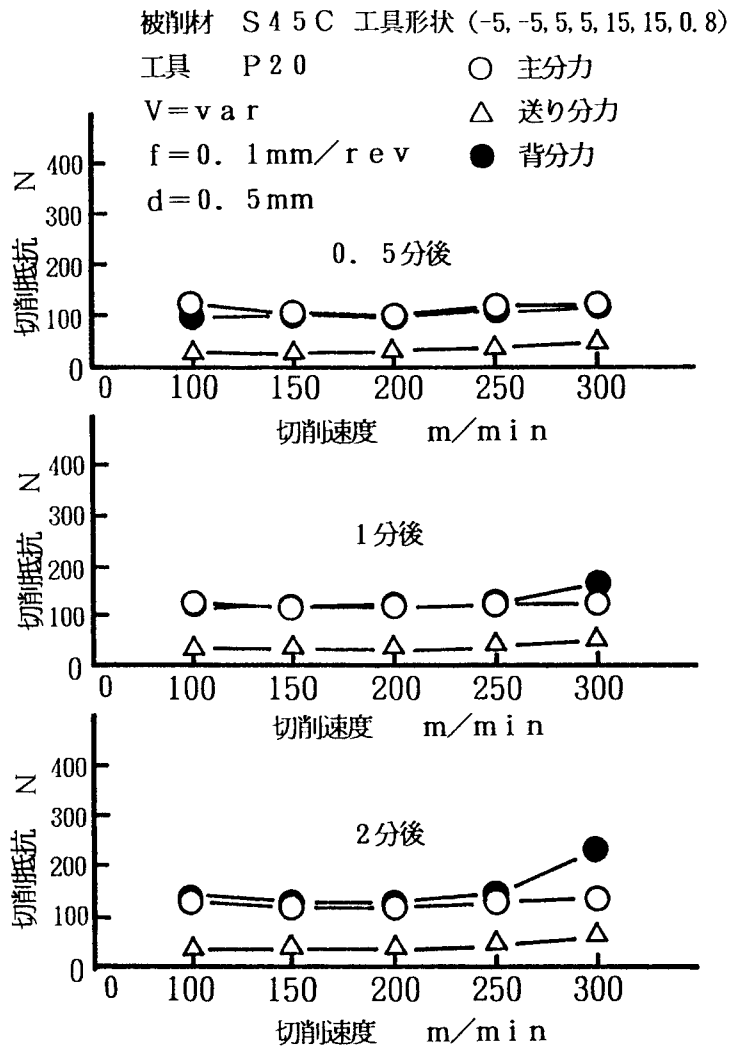
が大きいのので、背分力と関係付けられるもので寿命判定すれば、判定精度は高くなると考えられる。しかし背分力だけでの判定は不安定要素があり十分な成果がでていない。

次に背分力が前逃げ面摩耗と横逃げ面摩耗に対して、どちらの摩耗と密接に関係があるかを調べたものが図Ⅱ. 5. 1 2である。背分力と前逃げ面摩耗とは比例関係にあることが明らかである。これは背分力が前逃げ面に直接関係があるためと考えられる。



図Ⅱ. 5. 1 2 背分力と前逃げ面及び横逃げ面摩耗幅との関係

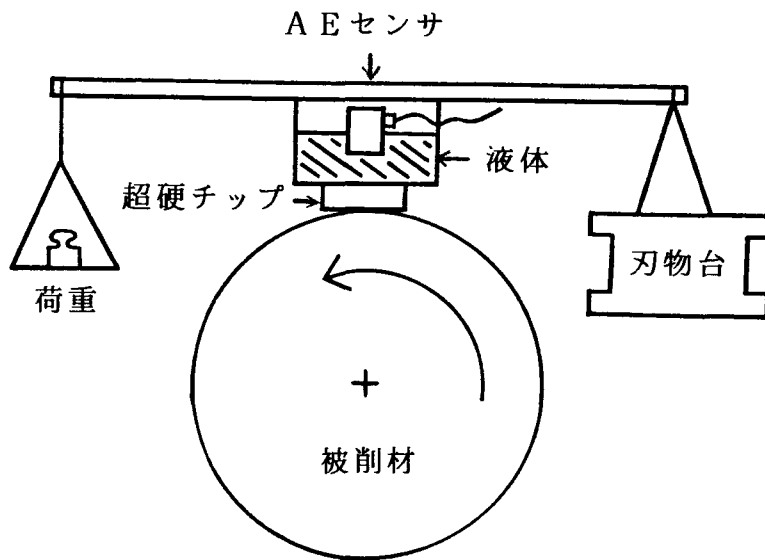
図Ⅱ. 5. 1 3は切削速度と切削抵抗との関係を示したものである。切削速度が変化しても切削抵抗はほとんど影響を受けないことがわかる。切削時間の増加により、背分力が少しずつ増加しているのが見える。又、切削速度が大きいほど背分力が増加する傾向が大きいことがわかった。



図Ⅱ. 5.13 切削速度と切削抵抗との関係

5.7 背分力とAE信号との関係

図Ⅱ. 5.14はAE信号と摩擦力との関係を調べるための装置を示した図である。荷重が均一になるように天秤式の装置で行った。荷重を徐々に増加させ、そのときのAE信号の状態を調べた。



図Ⅱ. 5.1 4 摩擦面に垂直方向の荷重とA E信号との
関係を調べる装置

図Ⅱ. 5.1 5 はA E信号と摩擦力の関係を示したものである。摩擦係数が一定であれば、摩擦力は接触面に働く垂直分力に比例するから、A E信号が垂直分力に比例すればA E信号は摩擦力に比例することになる。図からA E信号のオシレーション数と垂直分力が比例しているから、A E信号のオシレーション数は摩擦力に比例すると言える。

切削抵抗と摩擦力の関係を明らかにするために切削機構について検討する。切削機構図を図Ⅱ. 5.1 6に示す。

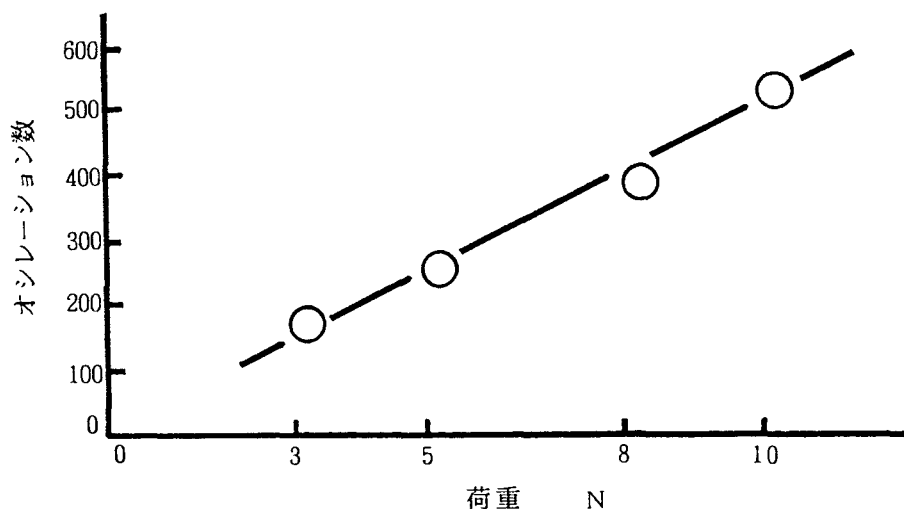
F_c = 主分力, F_t = 背分力, R = 主分力と背分力の合力

N = 合力 R のすくい面に垂直な分力

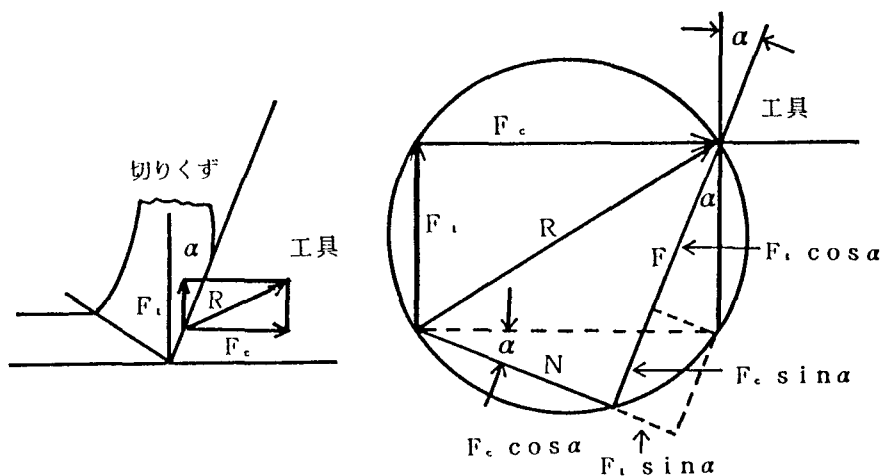
F = 合力 R のすくい面方向の分力

α = 工具のすくい角

μ_0 = すくい面と切りくず及び前逃げ面と被削材の間の摩擦係数



図Ⅱ. 5.15 摩擦面に垂直方向の荷重とAE信号との関係



図Ⅱ. 5.16 切削機構図

図から

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha$$

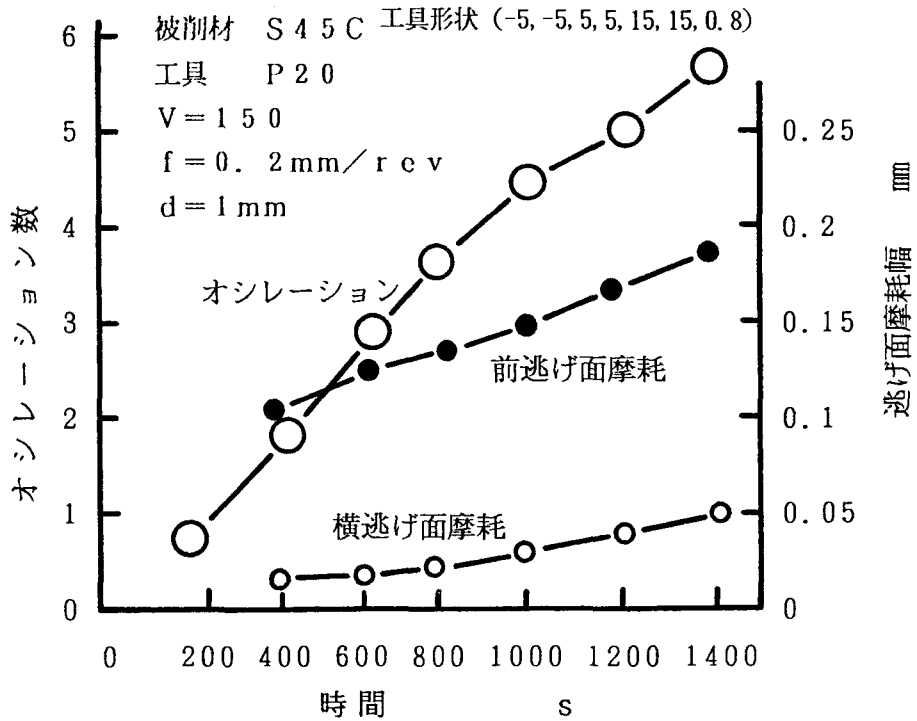
$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha$$

摩擦力は $P = \mu_o N$, $P = \mu_o F$ であり、すくい角 α を小さくすると、 $N = F_o$, $F = F_i$ となるため、 $P = \mu_o F_o$, $P = \mu_o F_i$ になる。摩擦係数が一定の場合、すくい面と切りくずの間の摩擦力は主分力に比例する。又、前逃げ面と被削材との間の摩擦力は背分力に比例する。これらのことから、工具が摩耗しても主分力はあまり増加しないから、すくい面と切りくずとの摩擦力もあまり増加しない。摩擦力と A E 信号のオシレーション数は比例関係にあるから、A E 信号のオシレーション数は工具摩耗の増加に対して、すくい面と切りくずとの摩擦からあまり増加しないと考えられる。一方前逃げ面における摩擦力は、背分力に比例することから、工具摩耗の増加に対して、背分力が増加し、摩擦力が増加する。そのことによって、A E 信号のオシレーション数が増加する。つまり、流れ形切りくずの形態の場合、工具摩耗の増加による A E 信号は、前逃げ面と被削材との間の摩擦力の増加によって発生しているものが多いと考えられる。

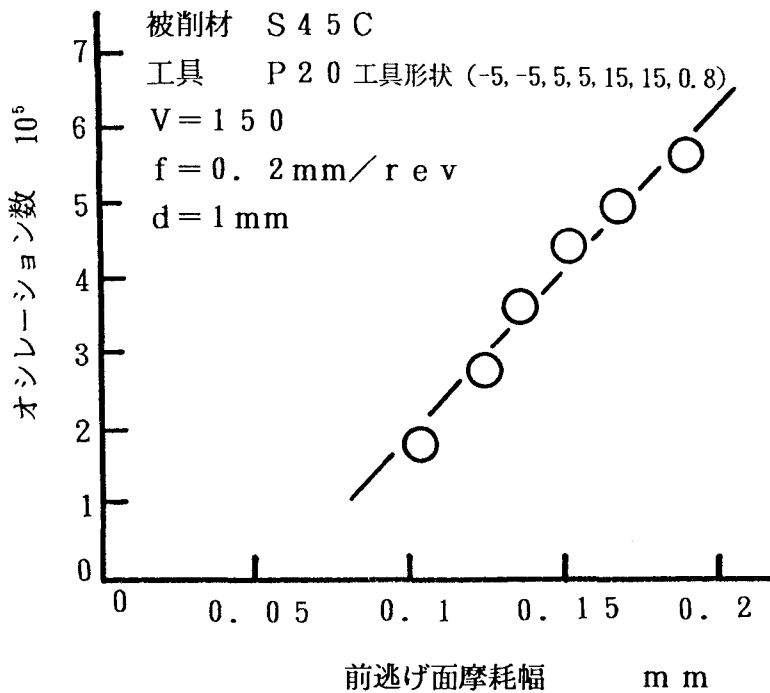
被削材 S 4 5 C を切削した場合の切削加工時間と A E のオシレーション数及び逃げ面摩耗との関係を図 II. 5. 1 7 に示す。加工時間の増加、つまり工具摩耗が増加すると A E 信号のオシレーション数も増加する。それに対して横逃げ面摩耗はわずかな増加しか見られない。一方前逃げ面摩耗は顕著に増加していることが見られる。これによっても A E 信号が前逃げ面において発生しているものと考えられる。

オシレーション数と前逃げ面摩耗幅との関係を、図 II. 5. 1 8 に示す。前逃げ面摩耗はオシレーション数と比例関係にあり、流れ形切りくずの場合、A E のオシレーション数は旋削工具の前逃げ面摩耗部における被削材との摩擦力に比例して発生しているものと考えられる。

工具寿命の判定という問題を実際的な立場から考えると、横逃げ面摩耗及びすくい面摩耗のいずれも間接的な判定基準であり、加工物寸法のばらつきの増大、仕上面粗さの劣化、バリの発生などが最も直接的な判定基準と考えられる。これ



図Ⅱ. 5.17 逃げ面摩耗曲線とオシレーション数との関係



図Ⅱ. 5.18 前逃げ面摩耗幅とオシレーション数との関係

らのことに前逃げ面はすべて関与しており，前逃げ面の摩擦によってA E信号が発生していることになれば，旋削プロセスにおける監視としては，A E信号の把握は非常に重要な意味をもつものと考えられる。

5.8 結 言

切削中に発生するA E信号について，切削条件，工具摩耗，切りくず形態との関係を調べた結果，以下のようなことがわかった。

- (1) 切削速度，送り，切込みをそれぞれ変化させて（オシレーション数）／（イベント数）の比について注目してみると，切削速度，送り，切込みのいずれの場合においても極小値があり，その極小値の値は，それぞれ被削材と工具との関係から切削条件の最適値と言われている数値に近い値であることがわかった。このことは（オシレーション数）／（イベント数）の比が切削条件の設定の評価関数として重要な意味をもつと考えられる。
- (2) 流れ形切りくず形態におけるA E発生場所としては，切りくずせん断領域及びすくい面と切りくずの摩擦の部分からは，あまり発生せず，前逃げ面と被削材との間の摩擦部分から主として発生していることがわかった。
- (3) せん断形切りくず形態において，A Eの発生は主として切りくずせん断領域における割れによって発生していると考えられる。
- (4) A E信号は被削材と工具前逃げ面における摩擦力と相関関係にあることが実験結果から得られた。工具の摩耗が増加すると背分力が増加し，背分力が増加すると前逃げ面と被削材との摩擦力が増加し，そのことによってA E信号が増加することがわかった。

総 括

切削加工の高能率化や高精度化を妨げるものに切りくずの処理性と工具摩耗及び欠損がある。まず切りくずの場合、切りくずを処理しやすくするためには切りくずが工具や工作物に絡まらない長さに切断することであるが、これまでの方法では切込みが0.5 mm以下の場合、切りくずを切断することができなかった。

本論文はこのような観点から、仕上げ送り速度の中に間欠的に減速した送り速度を入れる方法で切りくずを切断しようとしたものである。つぎに工具摩耗及び欠損については、切削中に正確に工具寿命の判定をすることや欠損を検出することであるが、これまでの方法では実用化するに十分なものが見あたらなかった。以上の観点からA Eを用いて旋削工具および回転工具の寿命を判定しようとしたものである。

本研究の結果明らかになった事項は、それぞれ各編各章の結論の項で述べたので、ここではそれらを通観して主要な事項について述べる。

第I編第1章は切りくず処理について述べた緒論である。

第2章では切りくず処理用ソフトウェアの開発について論じた。特に仕上加工のように切込みが小さい時に切りくずを切断できないことを指摘し、その対策としてNC旋盤加工において仕上切削送り速度の中に間欠的に減速した送り速度を入れることによって切りくずを切断する方法を考案した。本章では、その方法が自動的にNCデータの中に入るようにソフトウェア開発したことを述べている。

第3章では旋削の間欠減速送り切削による切りくず処理について論じた。具体例として被削材S 5 0 C, S U S 3 0 4, A L 2 0 1 7を切削する場合につき実験し、切りくずがちょうど減速したところで切断できることがわかった。この方法では、絡まらない程度の長さに切りくずを切断でき、効率良く処理ができることを示した。減速する幅は0.02 mmと非常に狭い範囲なので、加工時間がそれ

ほど増加しないため、能率も低下しないことがわかった。又、仕上面粗さを連続送り切削と間欠減速送り切削で比較してみると、間欠減速送り切削の方が仕上面粗さが良くなることがわかった。

4 章ではドリル加工における切りくず処理について論じた。ドリル加工においても間欠減速送り切削を行うことによって、切りくずが一定長さに均一に切断されることがわかった。加工された穴の真直度を調べてみると間欠減速送り切削の方が連続送り切削より曲がりが少ないことが明らかになった。また工具寿命についても間欠減速送り切削の方が長いことがわかった。

第Ⅱ編第1章では、加工プロセスの状態を監視するためにはセンサ技術が重要であること、そのセンサ技術としてアコースティックエミッション（AE）検出を用いて行う方法の可能性を論じた。

第2章においてはAEと材料の変形破壊特性との関係を論じた。まず基本的材料試験法としての引張試験及び曲げ試験によるAEの特性を調べた。又、圧痕試験におけるイベント数及びオシレーション数が圧痕の体積変化に比例することが明らかになった。

第3章においてはAEを用いて旋削工具の寿命判定について述べている。一般に工具が摩耗してくるとAE信号の振幅が大きくなることが知られている。しきい値の選び方によってはAE信号の発生にもかかわらずAE信号として感知できなくなる場合が多い。そこで平均値にしきい値を加えた、変動しきい値を付加することによって、AE信号の振幅がどのように変化しても、AE信号を取り込むことができる方式を提案した。

一般にAE信号が発生したときには単純な波形であっても、センサに到達するまでに金属中を通り、AE信号は縦波と横波の合成されたかなり複雑な波形となっているため、従来AE信号を正確に解析することが困難であった。そこでAE信号のうちの横波が液体中を伝播しないことを利用して、液体を介して取り込むことによって、AE信号を縦波だけに限定することができた。そのことによって

検出波形がかなり単純な波形となった。そこで旋削工具からのA E信号を定量的に解析し、工具寿命を判定した結果、寿命判定値0.3 mmに対して95%の信頼度で判定値のばらつきが ± 0.015 mm以内に入ることが明らかになった。

第4章では液体伝播A E検出法による回転工具の寿命について論じた。回転工具においては通常、工具にセンサを取り付けられないことが大きな問題となっている。そのためセンサを被削材に取り付けたり、主軸の近傍に取り付けたりしているが、いずれも、A E発生源からセンサ間に距離があり、小さなA E信号をとらえることができなかった。特に1 mm以下の小径ドリルの折損の検出が困難であった。そこで液体の中をA E信号が伝播することを応用して、切削液の供給路を介してA E信号を取込み解析する方法を考案した。この方法は非接触でセンシングすることができ、0.1 mmのドリルの折損をも検出できること、ドリル径2 mm程度であれば工具寿命の判定が可能であることがわかった。又、ボールエンドミル工具においては、95%の信頼度で寿命判定値0.25 mmに対して判定値のばらつきが $+0.001 \sim +0.013$ mm以内に入ることが明らかになった。

第5章では旋削プロセスにおけるA Eの発生源について論じた。流れ形切りくずの材料において、切込み1 mmと、切込み零で切削した時の検出波形を調べてみると、ほとんど同じであった。そのことから流れ形切りくずの切削の場合、切りくずせん断領域や、工具すくい面と切りくずとの摩擦によりA Eが発生しているのではなく、前逃げ面と被削材との摩擦によって発生していると推定された。また、鋳鉄のようにせん断形の切りくずの場合、流れ形切りくずの材料と同様な切削実験を行ってみると、切込み1 mmで切削した方が、切込み零の場合よりも検出波形の振幅がかなり大きいことから、A E信号は切りくずせん断領域での割れが主な信号源であると推定された。

一方工具が摩耗してくるとA E信号のオシレーション数が増加する傾向が得られているが、その原因解明を試みた。特に切削抵抗に注目して実験を行い、背分力と摩擦力、摩擦力とA E信号のオシレーション数の比例関係を見出し、背分力

が増加することによって、A E信号のオシレーション数が増加することを示した。また、切削条件をそれぞれ変化させて、オシレーション数とイベント数の比を調べると、それぞれ極小値があることがわかった。この極小値が最適切削条件の設定の評価関数として重要な意味をもつ可能性があることが明らかになった。

参 考 文 献

序 論

- 1) 中山一雄：チップブレーカによる切りくずの切断，精密機械，26，8(1960)482.
- 2) 中山一雄，李振加：チップブレーカの切りくずの切断性能，精密機械，52，12(1986)2120.
- 3) C. Spaans: The Fundamentals of Three-Dimensional Chip Curl, Chip Breaking and Chip Control. Delft University of Technology, April 1971.
- 4) 中山一雄：チップブレーカの研究，日本機械学会論文集，27，178(1961)833.
- 5) 谷戸勉，竹山秀彦，村田良司：特殊曲面工具（H,F,T）による切りくず制御，精密機械，49，3(1983)371.
- 6) 上田昇，松尾哲夫：鋸歯型切りくずの生成機構に関する研究（第3報），精密機械，48，2(1982)198.
- 7) 高津戸光雄，山崎洋三：パーソナルコンピュータ利用による切りくず処理用自動プログラミングソフトの開発，精密機械，51，10(1985)1858.
- 8) M. Takatsuto: Chip Disposal System in Intermittently Decelerated Feed, Bull of JSPE, 22, 2, 6(1988)109.
- 9) 高津戸光雄，山崎洋三：NC旋削における切りくず処理用ソフトの開発，日本機械学会論文集，53，2(1986)478.
- 10) 高津戸光雄：間欠減速送りによる切りくず処理の研究，精密工学会誌，52，9(1986)1610.

- 11) 高津戸光雄：間欠減速送りによる切りくず処理の研究（第2報）ドリル加工の場合，精密工学会誌，54，12(1988)2325.
- 12) M. Takatsuto and K. Kishi: Chip Disposal System Using an Intermittently Deceleration Drilling Feed Technique, Bull of JSPE, 24, 1, 3(1990)27.
- 13) 稲崎一郎：アコースティックエミッションによる切削プロセスの監視，日本機械学会論文集，51，466，6(1985)1163.
- 14) 三輪祐司，稲崎一郎，米津栄：アコースティックエミッションによる工具損傷のインプロセス検出，日本機械学会論文集，47，424，12(1981)1680.
- 15) 小島浩二，稲崎一郎，三宅亮一：アコースティックエミッションを利用した旋削プロセスの監視，日本機械学会論文集，52，474，2(1986)799.
- 16) 相田収平，稲崎一郎，福岡真一郎：A Eを利用した工具チップング検出システムの開発，日本機械学会論文集，52，481，9(1986)2563.
- 17) 高津戸光雄，高田昇：A Eを用いた旋削工具の寿命予知に関する研究，精密工学会誌，56，10(1990)1900.

第 I 編

第 1 章 緒 論

- 1) 中山一雄：チップブレーカの研究，日本機械学会論文集，27，178(1961)833.
- 2) 中山一雄：切削加工論，コロナ社（1978）.
- 3) 中山一雄，荒井実：切りくずの折れやすさの測定，精密機械，44，9(1978)1129.
- 4) K. Nakayama: Origins of Side Curl of Chip in Metal Cutting, Bull

of JSPE, 6, 3(1972)99.

- 5) 中山一雄：チップブレーカによる切りくずの切断，精密機械，26，8(1960)482.
- 6) 中山一雄，李振加：チップブレーカの切りくずの切断性能，精密機械，52，12(1986)2120.
- 7) M. C. Shaw: The Asscsment of Machinability, Machinability(Proc Conf on Machinability, Oct.1965), Iron and Steel Jnst, London, (1967)3.
- 8) G. Carro Cao: Cutting Phenomena Interpretation in Machine-Workpiece-Tool System, Ann, CIRP, 20, 1(1971)25.
- 9) H. Meretz: Parting with Self-Locking Carbide Metal Inserts, Werkstatt Betr, 123, 5(1990)403.
- 10) 中山一雄：切りくず形状の幾何学，精密機械，38，7(1972)592.
- 11) G. V. Stabler: The Fundamental Geometry of Cutting Tool, Proc,IME, 165(1951)14.
- 12) 中山一雄，上野山勝，田村清：切りくずの湾曲について，精密機械，27，10(1961)681.
- 13) C. Spaans: The Fundamentals of Three-Dimentional Chip Curl, Chip Breaking and Chip Control. Delft University of Technology, April 1971.
- 14) 竹山秀彦，宮坂金佳：切りくず処理に関する研究，精密機械，35，11(1969)700.
- 15) 谷戸勉，竹山秀彦，村田良司：特殊曲面工具（H,F,T）による切りくず制御，精密機械，49，3(1983)371.
- 16) 升田雅博，原利雄，賀勢晋：切りくず処理に関する研究，精密機械，47，5(1981)529.
- 17) G. V. Stabler: The Chip Flow Law and its Consequences, Advances in

MTDR, Pergamon Press, Oxford, (1964)243.

- 18) L. v. Colwell: Prediction the Angle of Chip Flow for Single-point Cutting Tools, ASME, 76(1954)199.
- 19) N. N. Zorev: Metal Cutting Mechaics, Pergamon Press, Oxford, (1966) 360.
- 20) 湊喜代士, 豊島敏雄: 切りくず処理に関する研究, 精密機械, 43, 6(1977)708.
- 21) 奥島啓式, 湊喜代士: 鋼切削における切りくずの挙動について, 日本機械学会論文集, 24, 134(1958)333.
- 22) R. S. Hahn: Some Observation on Chip Curl in the Metal-cutting Process under Orthogonal Cutting Condition, Trans, ASME, 75(1953)581.
- 23) 喜田義宏, 井戸守, 辻宜秀: 切りくず生成機構に及ぼす切削速度の影響, 精密機械, 45, 5(1979)607.
- 24) 田口三生, 横山一雄: 切削条件と切りくず破断との関係, 精密機械, 47, 8(1981)969.
- 25) 足立勝重, 小山富夫, 村上浩三: 振動ドリル切削の研究, 精密機械, 42, 12(1976)1133.
- 26) 高津戸光雄, 山崎洋三: パーソナルコンピュータ利用による切りくず処理用自動プログラミングソフトの開発, 精密機械, 51, 10(1985)1858.
- 27) M. Takatsuto: Chip Disposal System in Intermittently Decelerated Feed, Bull of JSPE, 22, 2, 6(1988)109.
- 28) 高津戸光雄, 山崎洋三: NC旋削における切りくず処理用ソフトの開発, 日本機械学会論文集, 53, 2(1986)478.
- 29) 高津戸光雄: 間欠減速送りによる切りくず処理の研究, 精密工学会誌, 52, 9(1986)1610.
- 30) 高津戸光雄: 間欠減速送りによる切りくず処理の研究 (第2報)

ドリル加工の場合, 精密工学会誌, 54, 12(1988)2325.

第 2 章

- 1) K. Nakayama: Origins of Side Curl of Chip in Metal Cutting, Bull of JSPE, 6, 3(1972)99.
- 2) 長谷川嘉雄, 花崎伸作, 藤原順介, 和田任弘: チップブレーカに関する研究, 精密工学会誌, 52, 7(1986)1211.
- 3) 中山一雄: チップブレーカによる切りくずの切断, 精密機械, 26, 8(1960)482.
- 4) 中山一雄, 李振加: チップブレーカの切りくずの切断性能, 精密機械, 52, 12(1986)2120.
- 5) C. Spaans: The Fundamentals of Three-Dimensional Chip Curl, Chip Breaking and Chip Control. Delft University of Technology, April 1971.
- 6) 升田雅博, 原利雄, 賀勢晋: 切りくず処理に関する研究, 精密機械, 47, 5(1981)529.
- 7) 高津戸光雄, 山崎洋三: パーソナルコンピュータ利用による切りくず処理用自動プログラミングソフトの開発, 精密機械, 51, 10(1985)1858.
- 8) 高津戸光雄, 山崎洋三: NC旋削における切りくず処理用ソフトの開発, 日本機械学会論文集, 53, 2(1986)478.

第 3 章

- 1) 喜田義宏, 井戸守, 辻宜秀: 切りくず生成機構に及ぼす切削速度の影響, 精密機械, 45, 5(1979)607.

- 2) L. v. Colwell: Prediction the Angle of Chip Flow for Single-point Cutting Tools, ASME, 76(1954)199.
- 3) 谷戸勉, 竹山秀彦, 村田良司: 特殊曲面工具 (H, F, T) による切りくず制御, 精密機械, 49, 3(1983)371.
- 4) 升田雅博, 原利雄, 賀勢晋: 切りくず処理に関する研究, 精密機械, 47, 5(1981)529.
- 5) 高津戸光雄: 間欠減速送りによる切りくず処理の研究, 精密工学会誌, 52, 9(1986)1610.
- 6) M. Takatsuto: Chip Disposal System in Intermittently Decelerated Feed, Bull of JSPE, 22, 2, 6(1988)109.

第 4 章

- 1) 中山一雄, 小川誠: 切りくず形状から見たねじれ刃ドリルの切削性能, 精密機械, 34, 4(1977)427.
- 2) 細井俊明, 細井良祐, 浅野幸三, 堀内幸, 長谷川嘉雄: 特殊刃先をもつ超ツイストドリルの切削性能, 精密機械, 47, 8(1981)975.
- 3) C. J. Oxford, Jr.: On the Drilling of Metals 1, Trans, ASME, 77(1955)103.
- 4) 広田明彦, 笠原和夫: ドリル加工における切りくず生成状態と切削抵抗の解析的予測, 精密機械, 47, 8(1981)987.
- 5) M. C. Shaw and C. J. Oxford, Jr.: On the Drilling of Metals 2, Trans, ASME, 79(1957)139.
- 6) A. K. Pal, A. Bhattacharyya and G. C. Sen: Investigation of the Torque in Drilling Ductile Materials, Int. J. Mach. Tool Des, 4(1965)205.

- 7) R. A. Williams: A Study of the Drilling Process, Trans, ASME, Ser, B, 96(1974)1207.
- 8) E. J. A. Armarego and C. Y. Cheng: Drilling with Flat Rake Face and Conventional Twist Drilling-I, and II. Int. j. Mach. Tool Des. Res, 12(1972)17, 37.
- 9) E. Usui, A. Hirota and M. Masuko: Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process (Parts 1 and 2), Trans, ASME, Ser, B, 100, 2(1978)222, 229.
- 10) 小川誠, 中山一雄: ニックによるドリル性能の向上, 精密機械, 50, 10(1984)1659.
- 11) 高津戸光雄: 間欠減速送りによる切りくず処理の研究(第2報)ドリル加工の場合, 精密工学会誌, 54, 12(1988)2325.
- 12) M. Takatsuto and K. Kishi: Chip Disposal System Using an Intermittently Deceleration Drilling Feed Technique, Bull of JSPE, 24, 1, 3(1990)27.

第 II 編

第 1 章 緒 論

- 1) L. V. Colwell: Tracking Tool Deterioration by Computer during Actual Machining, Ann, CIRP, 23, 1(1974)29.
- 2) W. Koenig: Automate Detection of Tool-breakage in Turning Operation, presented at the Meeting of STC "Cutting" of CIRP, (1978).
- 3) 中沢弘、三好由記博, 繁村一義: びびり振動発生限界の検出, 精密機械, 46, 2(1980)207.

- 4) 竹山秀彦, 山崎和雄, 沢井信重: 切削音による工具摩耗のインプロセス測定, 精密機械, 42, 11(1976)1063.
- 5) D. Dilipkumar, V. S. R. Gudimetla and W. E. Wood: Amplitude Distribution of Acoustic Emission, Experimental Mechanics, 19, 12(1973) 438.
- 6) 上原邦雄, 竹下英夫, 仁科健治, 桜井充: 切削工具逃げ面摩耗のインプロセス測定, 精密機械, 39, 8(1973)825.
- 7) V. Solaja and D. Vukelja: Identification of Tool Wear Rate by Temperature Variation of a Carbide Tip, Ann. CIRP, 22, 1(1973)5.
- 8) 佐田登志夫: 工作機械の適応制御のためのインプロセス測定法, 精密機械, 38, 10(1972)788.
- 9) K. Iwata and T. Moriwaki: An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear, Ann. CIRP, 25, 1(1977) 21.
- 10) 和田正毅, 水野亀雄: AEによる摩擦・摩耗の観察, 精密機械, 52, 10(1986)1719.
- 11) 垣野義昭, リュック・ディ・チョン, 小林昌彦: アコースティックエミッションによる切削工具損傷の検出, 精密機械, 46, 3(1980)344.
- 12) H. I. Dunegan and A. T. Green: Factors Affecting Acoustic Emission Response from Materials, Materials Research and Standards, 11, 3(1971)21.
- 13) 岩田一明, 森脇俊道, 橋本英文, 柴坂敏郎: アコースティックエミッションによる切削工具損傷の検出, 精密機械, 46, 7(1980)875.
- 14) 井川直哉, 島田尚一: アコースティックエミッションを利用した硬ぜい性材料の微小破壊強度測定法, 精密機械, 48, 2(1982)177.
- 15) G. F. Michelettei, W. Koenig and H. R. Victor: In Process Tool

- Wear Sensors for Cutting Operations, Ann, CIRP, 25, 2(1976)483.
- 16) 竹山秀彦：旋削加工の最適化制御，日本機械学会誌，73，619(1970)1141.
 - 17) 稲崎一郎：アコースティックエミッションによる切削プロセスの監視，日本機械学会論文集，51，466，6(1985)1163.
 - 18) 三輪祐司，稲崎一郎，米津栄：アコースティックエミッションによる工具損傷のインプロセス検出，日本機械学会論文集，47，424，12(1981)1680.
 - 19) 小島浩二，稲崎一郎，三宅亮一：アコースティックエミッションを利用した旋削プロセスの監視，日本機械学会論文集，52，474，2(1986)799.
 - 20) 相田収平，稲崎一郎，福岡真一郎：A Eを利用した工具チップング検出システムの開発，日本機械学会論文集，52，481，9(1986)2563.
 - 21) 高津戸光雄，高田昇：A Eを用いた旋削工具の寿命予知に関する研究，精密工学会誌，56，10(1990)1900.

第 2 章

- 1) 垣野義昭，リュック・ディ・チョン，小林昌彦：アコースティックエミッションによる切削工具損傷の検出，精密機械，46,3(1980)344.
- 2) H. I. Dunegan and A. T. Green: Factors Affecting Acoustic Emission Response from Materials, Materials Research and Standards, 11,3(1971)21.
- 3) 岩田一明，森脇俊道，橋本英文，柴坂敏郎：アコースティックエミッションによる切削工具損傷の検出，精密機械，46,7(1980)875.
- 4) 稲崎一郎：アコースティックエミッションによる切削プロセスの監視，日本機械学会論文集，51，466，6(1985)1163.
- 5) 三輪祐司，稲崎一郎，米津栄：アコースティックエミッションによる工具損傷のインプロセス検出，日本機械学会論文集，47，424，12(1981)1680.

- 6) 小島浩二, 稲崎一郎, 三宅亮一: アコースティックエミッションを利用した旋削プロセスの監視, 日本機械学会論文集, 52, 474, 2(1986)799.
- 7) L. V. Colwell: Tracking Tool Deterioration by Computer during Actual Machining, Ann, CIRP, 23, 1(1974)29.
- 8) W. Koenig: Automate Detection of Tool-brekage in Turing Operations presented at the Meeting of STC "Cutter" of CIRP, (1978).
- 9) V. Solaja, D. Vukelja: Identification of Tool Wear Rate by Temperature Variation of a Carbide Tip, Ann, CIRP, 22, 1(1973)5.

第 3 章

- 1) 北野彰彦, 中村示, 山本明: A E 信号による断続切削時の初期欠損の検出 (第 1 報), 精密工学会誌, 52, 7(1986)1167.
- 2) 岩田一明, 森脇俊道, 橋本英文, 柴坂敏郎: アコースティックエミッションによる切削工具損傷の検出, 精密機械, 46, 7(1980)875.
- 3) 垣野義昭, リュック・ディ・チョン, 小林昌彦: アコースティックエミッションによる切削工具損傷の検出, 精密機械, 46, 3(1980)344.
- 4) 三輪祐司, 稲崎一郎, 米津栄: アコースティックエミッションによる工具損傷のインプロセス検出, 日本機械学会論文集, 47, 424, 12(1981)1680.
- 5) 相田収平, 稲崎一郎, 福岡真一郎: A E を利用した工具チップング検出システムの開発, 日本機械学会論文集, 52, 481, 9(1986)2563.

第 4 章

- 1) 酒井勝: アコースティックエミッションによる工具破損検出, 不二越技報, 41, 1(1985)47.

- 2) 高津戸光雄, 高田昇: A Eを用いた旋削工具の寿命予知に関する研究, 精密工学会誌, 56, 10(1990)1900.
- 3) 吉岡武雄: 転がり軸受の新しい異常検出法について, 潤滑, 26, 2(1981)85.

第 5 章

- 1) E. K. Asibu and D. A. Dornfeld, Trans, ASME, J, Eng, Ind, 103(1981) 330.
- 2) 稲崎一郎: アコースティックエミッションによる切削プロセスの監視, 日本機械学会論文集, 51, 466, 6(1985)1163.
- 3) 和田正毅, 水野亀雄: A Eによる摩擦・摩耗の観察, 精密機械, 52, 10(1986)1719.

謝

辞

本論文をまとめるに際し、数々の有益な御助言と懇切な御指導を賜りました大阪大学工学部 井川直哉教授に深甚の謝意を表する次第であります。

また、大阪大学工学部 森 勇蔵教授，花崎伸作教授，岩田一明教授，岸田敬三教授には適切な御助言を数多く頂き，ここに厚く御礼申しあげます。さらに，大阪大学工学部精密工学科の諸先生方には御指導，御助言を頂きましたことを深く感謝いたします。

また，本研究の遂行，並びに本論文をまとめるに当り，終始かわらぬ御指導，御鞭撻を頂いた宇都宮大学工学部 貴志浩三教授に心から御礼申し上げます。

最後に，本研究の遂行に当り，終始御鞭撻を頂いた栃木県工業技術センター 熊田孝雄所長に厚く御礼申しあげます。また，実験等に御協力頂いた高田昇氏，加藤勝彦氏，並びに機械金属部の皆様に厚く御礼申しあげます。