

# 水晶圧電式切削動力計による切削性能の評価

## *Evaluation of Cutting Quality by Quartz Force Cutting Dynamometers*

大山 博・ 北口 嘉亮・ 藤原 久一・  
*Hiroshi Oyama Yosiaki Kitaguchi Hisacazu Fujiwara*

(1998年10月30日 受理)

キーワード：水晶圧電式，動力計，切削力，切削抵抗，工具，被削材，切削油

### 1. はじめに

わが国の製造業は、機械加工の自動化、高速化、高精度化などの追求と、熟練技術者の不足や若い人の製造業離れなどの社会的環境の変化などに伴い、機械加工における加工条件の最適化やデータベースの充実への要望が強い。また、多様な新しい材料や難削材の開発に伴い、材料特性の測定技術と評価技術の確立、さらに、製品製作時に於ける品質と信頼性の向上や生産性の向上などの期待も大きい。

当研究所では、昭和54年から切削加工や研削加工、ドリル加工やタップ加工などの切削や研削抵抗を測定するシステムを導入して、加工条件の最適化や加工特性の把握、製品開発に関わる性能評価などの依頼試験を実施してきた。近年は、鉄鋼・非鉄などの金属から樹脂や木材、複合材料などの材料開発関連企業や切削工具の製造販売の企業、切削油開発企業などから持ち込まれる依頼試験が多い。技術的には、試験条件が厳しくまた複雑化する傾向にあり、さらに、切削抵抗の大きさや変動を高精度に計測し、迅速なデータ収集と正確な分析、適切な評価が求められている。

### 2. 切削力を測定する重要性

切屑除去加工である切削は、機械加工における最も重要な技術の一つであり、生産方法が進歩するにつれて機械や工具に対する要求もそれぞれ高度になっている。

効果的な切削とは、最適な切削工具と最適な切削条件により、工作機械の能力を十分に引き出すことである。したがって、最適切削条件を確立しなければ自動化による加工や無人運転による加工が難しくなる。

最適切削条件を確立するには、以下のような取り組みが必要である。

- 1) 熟練技能者の経験やノウハウである実績データと多くの実験データを積み重ねて信頼性の高い切削加工データを育て上げる。
- 2) 実験データを得る一つの方法として、実加工に近い環境を整え、実績データを参考にしながら、色々な条件によって切削試験をおこなう。
- 3) 切削試験では、加工条件の違いによる切削力の大きさや方向を測定しながら、工具摩耗や被削材表面の状況などを観察する。

切削力の大きさや微妙な変動、作用する力の方向に影響を与える因子としては、切削速度、送り速度、切り込み深さ、被削材質、工具材質、工具形状、冷却材、機械の剛性など多様であり、これらによる複雑な切削現象を正しく把握して加工の力学を明確にすることが切削力を測定する目的である。

従って、切削力の全成分を測定できる動力計は、研究開発、工具などの製造、生産技術の向上にとって強力な武器になると言える。

### 3. 水晶圧電式切削動力計

ほとんどの力の測定システムは、力の大きさに比例して弾性変形の生じる弾性体を採用している。この変形を

\* 生産技術部 機械加工グループ

インダクタンス、キャパシタンス、抵抗の変化に置き換えて間接的に測定するシステムが切削動力計である。

現在市販されている切削動力計には、ひずみゲージ式の動力計と水晶圧電式の動力計がある。極一部ではあるが、静電容量を測定して切削力とする動力計や微小変位を測定して切削力とする動力計が利用されている。しかしこれらは、特殊な動力計である。

1880年キューリー兄弟によって、ある種の結晶に機械的な圧力を加えると、その表面に電荷が発生することが発見された。これが圧電効果であり、この効果を示すものとして、水晶、ロッシェル塩、チタン酸バリウムなどの結晶が知られている。

水晶は、圧電効果をもつ結晶の中でも、優れた安定性と剛性の高さで、力を測定するセンサーとしての適応性は群を抜いている。ただし、水晶の結晶配列は、異方性であり物理特性が方向によって異なっているため、この性質に注目してセンサー素子として利用することを可能にする加工技術が必要である。

図1に水晶円板の模式図を示す。切断する方向によって、圧力にのみ感応（縦効果）する円板や一方のせん断力に感応（せん断効果）する円板を作ることができる。

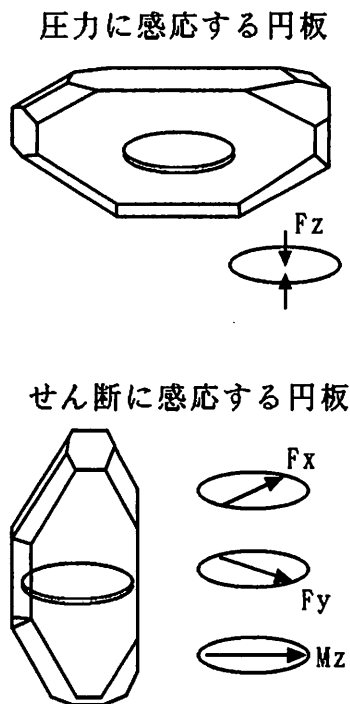


図1 切断方向と水晶円板

図2に圧電リングの模式図を示す。切断された円板を規則正しく整列させて圧電リングを作る。たとえば、圧力に感応する円板だけを円周上に配列した圧力リング

(Fzリング)、せん断力に感応する円板を一方に配列したせん断力リング (Fx, Fyリング)、せん断力に感応する円板の軸を接線方向に配置したトルクリング (Mzリング) などがある。

圧電効果による力の測定は、変形をともしない測定方法と根本的に異なる。測定時の素子の変形は、全負荷をかけたときでも数マイクロンの変形である。極めて高い剛性があり高い共振周波数が得られる。その結果、高速現象でも容易に測定できる。

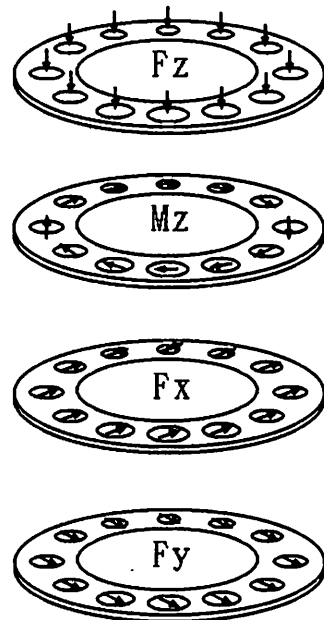


図2 各種の圧電リング

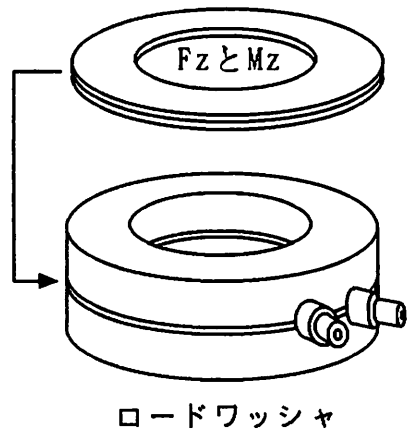


図3 2成分のロードワッシャー

図3は、2成分を測定するロードワッシャーである。圧力に感応するFzリングと接線方向に感応するMzリングを組み合わせてハウジングで挟み込む。これが2成分 (Fz,

Mz) のロードワッシャーである。このロードワッシャーを内蔵した動力計では、ドリル加工やタップ加工、リーマ加工などのトルクやスラストの力が測定できる。

同じ様に、せん断力に感応する2枚のリングで、それぞれの感応軸を直交させて、圧力に感応するリング1枚と合わせると、3成分 (Fx, Fy, Fz) を測定するロードワッシャーができる。このロードワッシャーを4個配置した動力計が、フライス加工や研削加工の切削抵抗を測定するテーブルタイプである。そのほかにも旋削加工用の動力計もある。

その他、水晶圧電式切削動力計の一般的な特徴として、

- ・剛性および固有振動数が高い
- ・広い測定範囲
- ・優れた直線性、小さいヒステリシス
- ・小さいクロストーク (1%未満)
- ・容易な取り扱い
- ・小型
- ・長寿命
- ・保護等級IP67

等をあげることができる。

水晶圧電効果を利用した力の測定では、負荷面に発生した電荷を計測しなければならない。この電荷は、極短時間で無くなるため、電荷の大きさに応じた電気信号として取り出す必要がある。この処理をチャージアンプ (電荷増幅器) が行い電荷の大きさに応じた電圧の変化として出力し、この出力端子に、各種計測機器を接続して電圧の大きさを力の大きさとして観察する。

#### 4. 水晶圧電式切削動力測定装置の構成

本装置は、スイス・キスラー社が開発した高精度なユニットである。国内・国外を通じてキスラー社以外に同種の製品はなく、世界的に信頼されている動力計である。国内でも、国公立の研究所や公設試験研究機関、大学、工具メーカ、油剤メーカ、材料メーカなどの研究開発部門などで利用されている。

力の検出には、水晶圧電素子を用いているため、数グラムから数トンまでの静的な力と動的な力を測定することができる。

前述のように水晶圧電式切削動力計は、非常に剛性が高く、固有振動数も高いため、力の変動が数kHzの速さでも計測が可能である。また、2kN~4kNの荷重で1 $\mu$ m程度の変位量しか必要としないため、弾性による測定誤差が無く精度の高い測定ができる。

当研究所では昭和40年代は、ひずみゲージ式の動力計により、切削抵抗の測定をおこなっていた。しかし、昭和54年に切削加工全般の切削抵抗を測定する動力計とし

て、スイス・キスラー社の水晶圧電式切削動力計と波形処理用のミニコンピュータを導入した。

切削動力計は、旋削加工用の3成分動力計9263A、フライス加工や研削加工用の3成分動力計9257A、ドリル、リーマ、タップ加工用の4成分動力計9273、また、チャージアンプ5001 (4台) も導入した。

さらに平成8年の研究所移転とともない、より多くの企業の方々にご利用いただけるよう、水晶圧電式切削動力測定装置を一新した。これにより測定可能範囲の拡大と計測精度の向上、データ処理の迅速化など適切な評価技術の確立が図られることとなった。

また、測定データの高精度・高速処理、分析や解析技術の多様性、グラフ化やデータベース化への処理機能の充実が実現した。

以下に主要な装置の概要と技術データ (表1) を示す。

##### (1) 3成分動力計 9265B (図4)

重切削の旋削加工に最適の堅牢な動力計で冷却液流路を内蔵している。ツールホルダを動力計の上面にネジ止めして、シャンク断面最大32×32のバイトが取り付け可能である。

##### (2) 3成分動力計 9255B (図5)

堅牢な構造であり、フライス加工や研削加工の切削力の測定ができる。動力計の上面は、260×260の大きさがあり、M12の取り付け用ネジ穴がある。

##### (3) 4成分動力計 9272 (図6)

小型、堅牢でドリル加工、タップ加工、リーマ加工などの穴明け用として開発された。トルクとスラストの他にx方向、y方向の力も測定できる。

##### (4) 回転式動力計 9123B (図7)

回転工具に作用する直行3成分 (Fx, Fy, Fz) および駆動トルクMzを直接検出する動力計である。測定データは、信頼性の高い非接触方式で伝送する。加工物の大きさや工具の位置に関係なく切削力の測定が可能である。

##### (5) マルチチャンネルチャージアンプ 5019A (図8)

マルチチャンネルチャージアンプは、水晶圧電式切削動力計には不可欠なアンプであり、力の変化を電気信号として取り出すためのチャージアンプである。チャージアンプの出力電圧は±10Vであり、圧電式の加速度計にも利用できる。

感度調整や測定レンジの設定、ローパスフィルターの設定、時定数の決定などが液晶ディスプレイで確認しながら入力ができる。また、測定範囲を越えると自動的に保護回路が働きオーバーロードの警告を発する。

各種動力計との接続には、密閉性に優れた金属保護管付きの特殊ケーブルが使われている。

##### (6) その他の計測機器

動力計以外の計測機器として、8chデータレコーダ、4

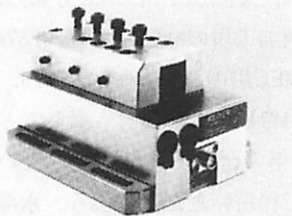


図4 3成分動力計 9265B

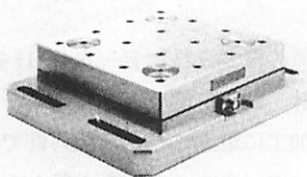


図5 3成分動力計 9255B

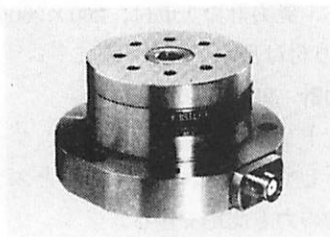


図6 4成分動力計 9272

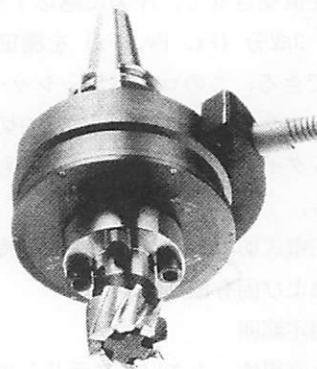


図7 回転式動力計 9123B

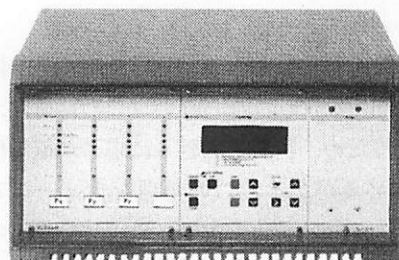


図8 マルチチャンネルチャージアンプ 5019A

表1 水晶圧電式動力計の技術データ

仕様項目	形式	3成分動力計 9265B	3成分動力計 9255B	4成分動力計 9272	仕様項目	形式	回転式動力計 9123B
測定範囲	: Fx, Fy	-15kN~15kN	-20kN~20kN	-5kN~5kN	測定範囲	: Fx, Fy	-5kN~5kN
	: Fz	-10kN~30kN	-10kN~40kN	-5kN~20kN		: Fz	-20kN~20kN
	: Mz			-200Nm~200Nm		: Mz	-200Nm~200Nm
感度	: Fx, Fy	-8pC/N	-8pC/N	-7.6pC/N	最高回転数: n		7000min <sup>-1</sup>
	: Fz	-3.7pC/N	-3.7pC/N	-3.8pC/N			
	: Mz			-1.6pC/Nm			
	剛性	: Cx, Cy	1kN/μm	2kN/μm		0.4kN/μm	剛性
	: Cz	2kN/μm	3kN/μm	2.0kN/μm		: Cz	1.5kN/μm
	: CMz			70Ncm/μrad		: CMz	32Ncm/μrad
固有振動数	: fo (x, y)	1.7kHz	2.0kHz	3.0kHz			
	: fo (z)	2.7kHz	3.3kHz	6.0kHz			
	: fo (Mz)			4.0kHz			

chデジタルオシロ, 4chデジタルレコーダを導入した。

8chデータレコーダ (RD-180T) は, チャージアンプから出力される電圧波形を保存する。デジタル記録ができるDAT規格を採用しSN比の向上を図っている。

4chデジタルオシロ (DL2240) は, 最高200MHzの速さで4ch同時サンプリングが可能であり, 波形解析に必要な微積分, デジタルフィルター, FFT演算, 2値化処理などの豊富な演算機能を有している。

4chデジタルレコーダ (RT3108N) は, サーマルヘッドによる感熱式の記録計である。リアルタイム記録, メモリ記録, X-Y記録, 数値化記録などのモードがあり, 最高4 $\mu$ secの同時サンプリングが可能である。各チャンネルの最大サンプリング数は32000点である。また, サンプリングされた波形データは, 通信機能により外部に転送できる。パソコンに取り込んだ波形データは, 演算処理や統計処理さらにグラフ化などが容易にできる。また, 市販されている表計算ソフトなどの利用も可能である。図9に導入機器の構成を示す。

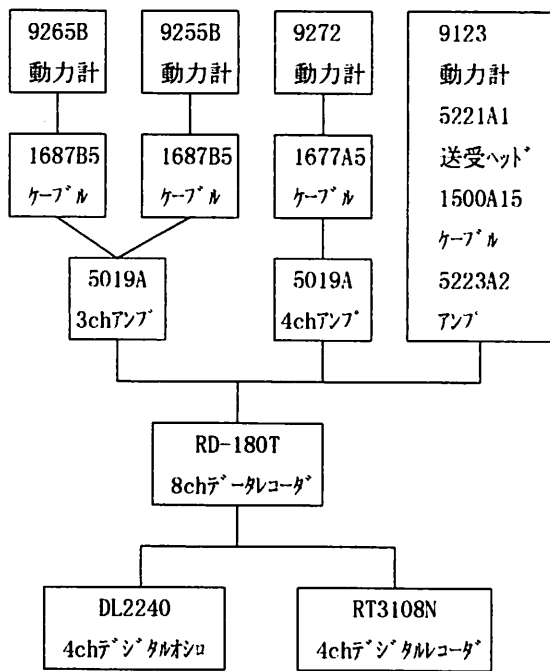


図9 導入機器の構成

### 5. 切削試験の事例と評価

切削状況を的確に評価する熟練技能者は, 機械や工具の性能や癖を把握しつつ, 切削中の音, 機械や工具の振動, 製品の仕上げ面, 切り屑の状態などから多くの情報を得ている。

視覚と聴覚から得られる情報を整理して, 過去の経験と照らし合わせて, 適当か不適当かの判断により切削条件や工具形状を変更し, 好ましい切削状態を保っている。

これは, 人間の持つ高度なパターン認識力と適応能力の高さによるものである。

水晶圧電式切削動力計から得られる情報は, 工具と被削材の間でおこる切削力の大きさと変動を電圧波形として測定される。

切削抵抗の情報だけで切削状況の全てを判断することは難しいが, 切削抵抗に影響を与える多様な要因から比較的影響が強いと考えられる項目に注目して, 切削試験をおこなっている。

#### (1) 快削黄銅の被削性能試験

この試験は, 旋削加工用の3分力動力計とNC旋盤で実施した切削試験である。材料成分の違いや熱処理条件の違いによる13種類の快削黄銅について, 超硬真剣バイトにより外形削りをおこなった事例である。今回は, その中から6種類のデータを選びグラフ化した。

被削材外径5mm, スクイ角8度, 主軸回転数2000 $\text{min}^{-1}$ , 切り込み量0.5mm, 送り速度0.08mm/rev, 乾式などの条件を一定とした切削試験である。

図10は, データ処理の模式図を示す。

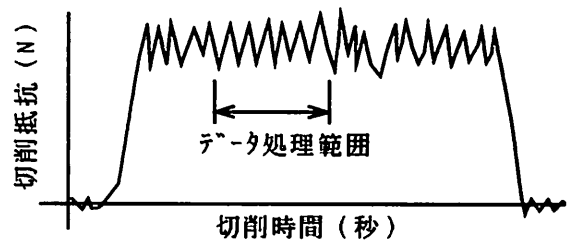


図10 データの取り込み

1回の切削時間は約12秒である。切り始めから3秒後に信号を発生して, そこから4秒間のデータをコンピュータに取り込んでいる。そのデータにより統計処理 (平均値, 標準偏差) をおこなった。切削抵抗は, 主分力, 送り分力, 背分力の3方向に分けて測定する。

図11に送り分力の平均値と標準偏差の大きさを示す。また, 図12に主分力の平均値と標準偏差の大きさを示す。

線の長さが標準偏差であり, 線の中央が平均値を示している。

送り分力と背分力は, 6種類とも同様の傾向を示す。主分力では, 被削材5と6の傾向が逆転している。しかし, 標準偏差値は被削材5の方が小さい。被削材5の刃先には, 被削材6に比べると合力で1割程大きな力が作用しているが, 変動の少ない安定した切削抵抗である。

被削材6が従来品の黄銅棒である。被削材5は, 熱処理温度と時間の調整で改善された材料である。被削材1~4の材料は, 快削性を向上するために, 鉛の添加比率を少し変えた材料である。切削抵抗の大きさと変動から判断すると被削材1が最も削り易い材質であると言える。

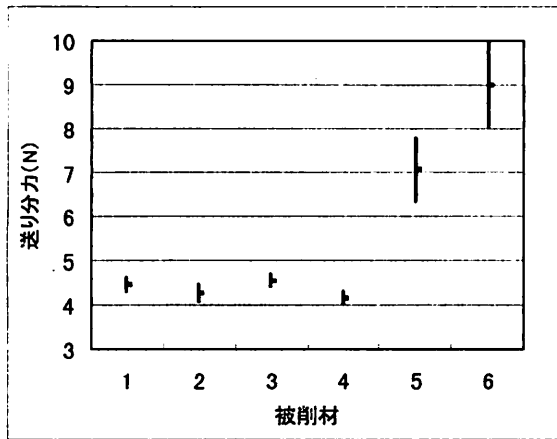


図11 送り分力の平均値と標準偏差

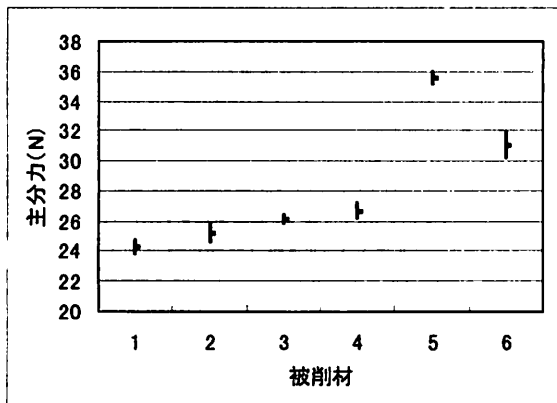


図12 主分力の平均値と標準偏差

の条件により、トルクとスラストの力を測定した。

図13と図14にトルクとスラストの測定結果を示す。力の測定位置は、ドリルの肩が被削材上面から5mm下がってドリルの挙動が安定した所から約1.8秒間である。

この切削試験は、他社製品と自社製品の比較をすることが目的である。被削材1~3は他社製品であり、全てメーカーが異なる。

被削材4と5が自社製品であり、被削材4は従来品5の切削性を改善した材料である。

従来品では、他社製品に比べると切削性が良いとは言えない。改善された被削材4の製品は、他の2社より切削抵抗が下がっているが、被削材3のメーカーには追いついていない。

材料特性を損なわずに、被削性の向上を目指す努力はこれからも必要である。

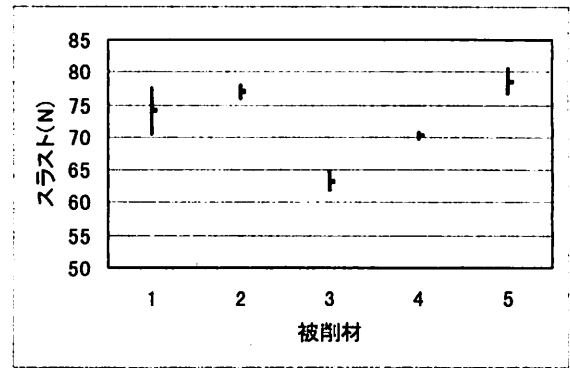


図14 被削材の違いによるスラストの変化

(2) アルミニウム合金の被削性能試験

この試験は、穴加工用の4成分動力計と治具中ぐり盤で実施した切削試験である。材料成分の違いによる5種類のアルミニウム合金に対するドリル加工の被削性を調べた事例である。

被削材の大きさは、直径25mm・長さ30mmとして、動力計に取り付けたスクロールチャックで保持した。

直径10mmのストレートシャンングドリルで、主軸回転数1250min<sup>-1</sup>、送り速度0.15mm/rev、不水溶性切削油使用

(3) 水溶性切削油剤の違いによるトルクの比較

この試験は、穴加工用の4成分動力計とタッピングマシンにより実施した。タップ加工において切削油剤の違いにより、どれだけ切削抵抗が減少するかを調べた。

被削材は、ADC-12で工具摩耗の激しい材料である。工具は、M8の転造タップである。転造タップの下穴径は直径7.5mm、主軸回転数1800min<sup>-1</sup>、クーラント流量2L/min、希釈率20倍として水溶性切削油剤5種類を試験した。

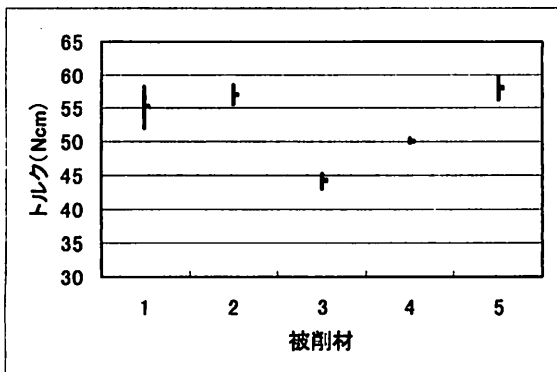


図13 被削材の違いによるトルクの変化

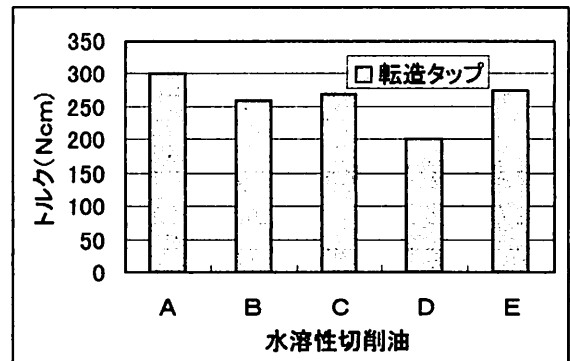


図15 切削油剤の違いによるトルクの変化

図15に切削油剤の違いによるトルクの変化を示す。

5種類の水溶性切削油の中で油剤Cだけがソリュブルであり、他の4種類はエマルジョンである。

水溶性切削油剤は、種類の多い切削油である。ベースオイルの他に界面活性剤、添加剤などの種類や配合割合によって色々な油剤が開発されている。

今回の試験は、塩素系と硫黄系の2種類の添加剤の配合の違いによるトルクの変化を調べた。

油剤Aは、添加剤が含まれていない。塩素系の添加剤は、油剤Dに5%含まれている。硫黄系の添加剤は、油剤Bと油剤Cに0.3%、油剤Dと油剤Eに0.2%含まれている。

両添加剤が含まれる油剤Dのトルクは、他の油剤より20~30%程度減少している。これは、油剤Dに含まれる塩素系の添加剤が影響していると考えられる。

しかし、主軸回転数を $3000\text{min}^{-1}$ や $4000\text{min}^{-1}$ に上げると油剤間の差が少なくなり、 $250\text{Ncm}$ ~ $300\text{Ncm}$ の間に集まる。これは、回転速度が速すぎて、水溶性切削油が転造タップの刃先に十分供給されないことが原因である。

**(4) エンドミル加工の工具摩耗と切削抵抗**

この試験は、フライス加工用の3分力動力計とNCフライス盤を利用した。エンドミルによる側面加工において、時間の経過に対する工具摩耗の状況と切削抵抗の変化を調べた。

図16は、エンドミル加工の模式図を示す。切削方向は、上向き削りである。被削材は、SUS304の角材を動力計に取り付けられた治具に固定した。

エンドミルは、粉末ハイスの2枚刃で外径12mmの標準品である。軸方向切り込み $A_d=12\text{mm}$ 、半径方向切り込み $R_d=1.5\text{mm}$ 、切削速度 $V=18\text{m/min}$ 、送り速度 $F=95\text{mm/min}$ 、切削油JIS2種6号相当品の条件で1時間の切削試験をおこなった。その間、5分毎に切削抵抗と工具摩耗を測定した。工具摩耗は、エンドミル外周刃の刃先端と中央部の2箇所の摩耗を測定した。

図17に工具摩耗の変化、図18に $F_y$ と $F_z$ の切削抵抗の変化、図19に $F_z$ の切削抵抗の変化をそれぞれ示す。

エンドミルの側面加工は、底刃と外周刃の両方で削っているが、切削抵抗に影響を及ぼすのは外周刃である。

エンドミルの側面加工では、切削中に曲げの力が作用している。その力の大きさと曲げの方向は、上向き削りか下向き削りかの違い、軸方向の切り込み $A_d$ や半径方向の切り込み $R_d$ の大きさと変化する。

径方向の切り込み量が小さいときは、ワークから逃げる方向(- $F_y$ )へ曲げる力が発生する。反対に切り込み量が大きいとワークに食い込む方向( $F_y$ )に曲げる力が発生する。両方向ともチッピングや欠損の原因となる。

エンドミル加工は、短時間の間に曲げの力が繰り返し加わり、強制的な振動を与えられている不安定な加工で

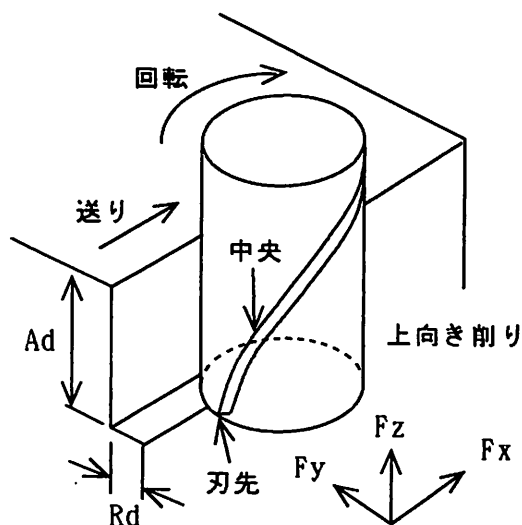


図16 エンドミル加工の模式図

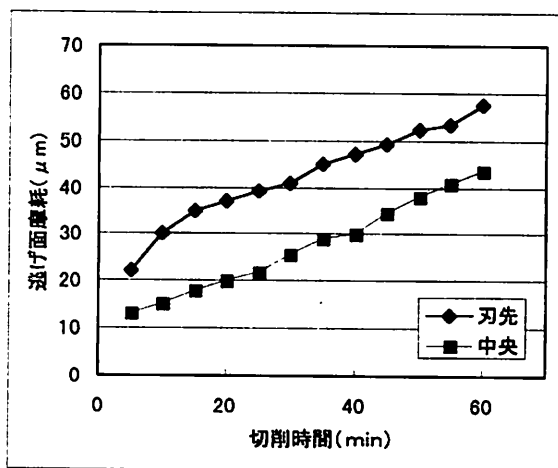


図17 工具摩耗の時間的变化

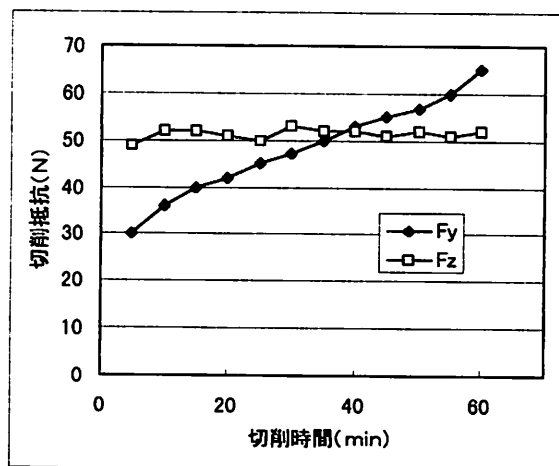


図18 切削抵抗の時間的变化 (Fy・Fz)

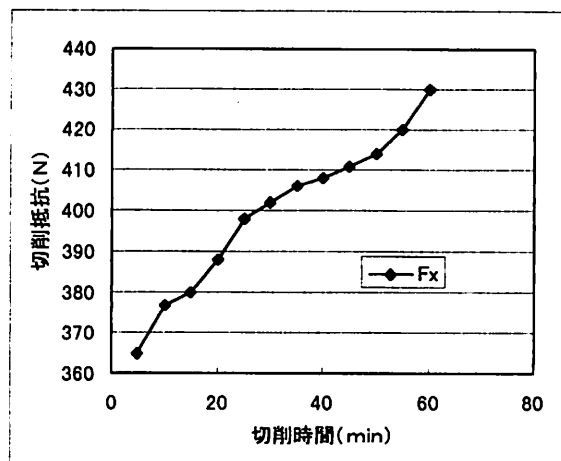


図19 切削抵抗の時間的变化 (Fx)

ある。曲げの力は加工面の形状精度を著しく悪くする原因の一つである。

SUS304のエンドミル加工では、チッピングや欠損、工具摩耗が非常に多いことが知られているが、この試験では、工具摩耗も順調に増加し比較的トラブルも少ない。これは、加工中に加わる曲げの力が小さくなる加工条件 ( $R_d=1.5$ ) が設定されているからである。

エンドミルに余分な曲げの力を与えない切り込みとは、工具直径の $1/8 \sim 1/6$ が良いと言われている。この値は、切削試験や切削抵抗の計算式などからも確認されている。

工具摩耗の増加に伴って、切削抵抗 $F_x$ と $F_y$ も同様に大

きくなっている。また、1時間の切削で切削抵抗 $F_y$ は2.2倍、 $F_x$ は約1.2倍に達している。なお、軸方向の切削抵抗 $F_z$ が、ほとんど増加していないのは底刃の摩耗が進んでいないためである。

## 6. おわりに

当研究所は、開放と交流を基本理念として、最新の施設設備や先進設備を幅広く開放しています。

今回の水晶圧電式切削動力計も企業の方々にご利用いただいておりますので、依頼試験、機器使用、受託研究など幅広い体制で協力いたします。

水晶圧電式切削動力計は、静的な力から動的な力、小さな力から大きな力まで一台の動力計で測定することが可能です。また、計測装置の設定は、機械加工以外の分野の方でも、扱いやすく理解し易い形になっています。欧州や米国などでは、この水晶圧電式切削動力計を医療関係やバイオメカニクスの研究など、切削加工以外にも利用されています。

## 参考文献

- 1) 加工技術データファイル, (財) 機械振興協会技術研究所, 総説第1巻~2巻(1977)