

高速切削における切削負荷の変動

高知職業能力開発短期大学校

亀山 寛司

Cutting Resistance Characteristics of High-Speed Milling Method

Kannji KAMEYAMA

要約 主軸を高速に回転させ、切り込みを浅く抑えながら工具の送り速度を高める高速切削により、生産効率が大幅に改善できる。高速切削を使いこなすうえでまず重要なことは切削負荷の変動を抑えることである。本研究は、超硬ボールエンドミルによる高速切削加工、斜め切り込み加工、かけ上がり・かけ下がり加工の切削負荷変動を、切削動力計・アコースティックエミッションシステムを用いて測定した。

本研究により、高速切削加工を実現する生産技術であるCAM機能の等高線切削の有用性、切削の基本であるカットパスの指針が確認できた。

I はじめに

近年、等高線加工を中心とした高速切削の需要が高まっている。主にボールエンドミルを使って主軸を高速に回転させて浅い切り込み量で高速に送る。

このとき、工具の上下動作を抑えた等高線に沿って工具を動かすことにより、工具に対する切削負荷の変動を少なく抑えることができ、しかも切削負荷の均一化を図ることで加工全体の切削条件を上げることが可能となる。図1に事業内援助・卒研で試作製品化されているA社の人工骨（チタン合金）の等高線加工の軌跡を示す。工具アプローチとして斜め切り込み加工（ヘリカルアプローチ）、平面最適化パス（平坦部や平坦に近いところの取り残し部分の加工用パス）などを併用することによって、モデル全体を均一に仕上げている。稜線部は小径ボールエンドミルで、かけ上がり・かけ下がり加工を使用している。高精度・高速切削加工を活用すれば、生産効率が大幅に改善できる。また、50HRC前後の硬い材料も、この方法を使えば切削でき、ピックフィード（カットパスの間隔）を小さくしても時間が掛からないため高精度な仕上げが可能になる。CAMシステムにおいては、高効率な機械加工実現に向け様々なカットパスが考案され、高速切削用CAMソフトが提供されている。

本研究では、簡単な形状の高速切削用加工データを作成し、高速加工の送りと表面粗さの関係、斜め切り込み加工・かけ上がり・かけ下がり高速加工時の切削負荷変動を調べた。

加工の効率化を図る高速切削は、切削負荷の変動を抑えたカットパスであることが確認され、切削の基本である切削条件の検証の重要性について報告する。

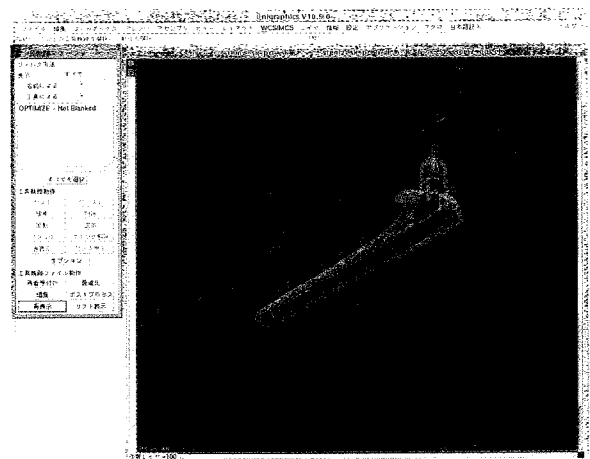


図1 股関節ステム部の等高線加工軌跡例

II 実験方法

2.1 送りと表面粗さ

一般的に金型の仕上げ加工にはボールエンドミルが使用されるが、そこで得られる加工面粗さは送りピッチ量 (Pick Feed) と工具径に依存するカスプ高さ (Cusp Height) それに1刃あたりの送り量によって決まる。そのうちカスプ高さHは、次式によって計算される。

$$H = P^2 / 8R \quad \dots\dots\dots (1)$$

P: 送りピッチ

R: 工具ボール半径

また、図2に各工具径における送りピッチとカスプ高さの関係を示す。カスプ高さを0.1 mm以下にするためには、R=3 mm、R=5 mmの工具では送りピッチは0.4~0.6 mm以下が、R=8 mmを越えても0.8 mm前後の数値にすることが必要なことがわかる。加工面粗さを向上するために送りピッチを小さくすればよいことは理解できるが、送りピッチを小さく取ると加工能率が落ちるので、能率を落とさずに加工するためには工具の送り (テーブル送り速度) を上げればよいが、送りを上げると1刃の送り量が大きくなる。材料表面を工具メーカーの仕上げ推奨値の回転数、切り込み、ピッチで、送り量だけを変化させて一方向で乾式加工を行い、加工表面の粗さ測定・観察をする。送りは、マシニングセンタの早送りパーセント機能を使用して1700~19995 mm/minまで段階的に変化させる。

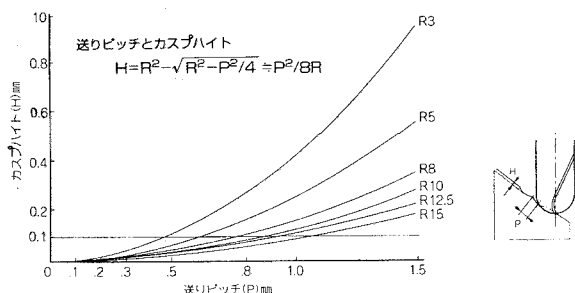


図2 各サイズにおける送りピッチとカスプの関係

2.2 斜め切り込み加工

平面的なワークの内部に溝を掘り始める場合などにエンドミルを深さ方向に垂直に落とし、結果として穴を開けているケースがある。このような場合、エンドミルの刃の先端は絶えずワークを削ることになり、切

粉がエンドミルの刃と長時間接しているうえ、切粉が飛びにくく、工具の温度上昇が激しくなる。また、途中からエンドミルの送りを深さ方向から水平方向に切り替えるケースが多く、切削負荷の大きさと方向が大きく変動する。

従ってこうしたケースでは、単にZ軸方向に切りこんでいくのではなく、工具を水平方向にも動かし、斜め方向に切り込ませていく。この方法をヘリカルという。こうすることで切粉を飛びやすくし、切削負荷の変動を小さく抑える。また、工具寿命に大きな影響を持つダウンカットの工具動作は、モデリングデータから自動的に作成可能である。

図3に示すヘリカル加工をエアブローで乾式加工し、どの角度が切削負荷が少ないかを切削動力計とAEセンサを用いてリアルタイムに測定する。具体的には、AE信号は工作物の下にAEセンサを取り付けて検出する。また、切削力はAEセンサを取り付けた工作物の下に切削動力計を配置して切削信号を検出する。ヘリカル角度は各企業によって異なるが、数社の工具メーカーなどに問い合わせた所、3°~5° (ランプ角度) を推奨しているの、本研究では10°までとした。

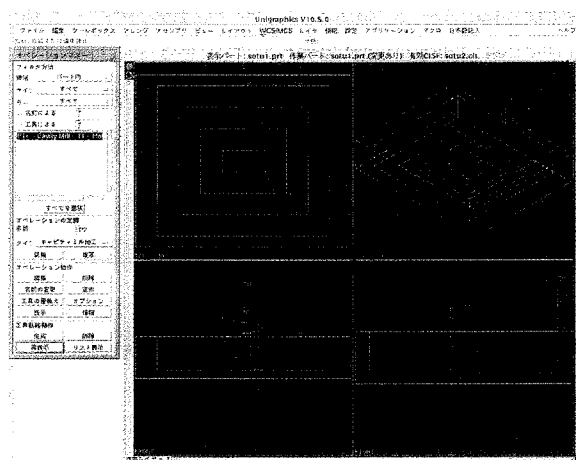


図3 ヘリカル加工軌跡例

2.3 かけ上がり・かけ下がり加工

稜線加工、走査線加工のカッターパスを用いる場合の切削負荷の変動を調べるため、ワイヤカットで頂上を開き角度0°~80°に加工した被削材の一方方向け上がり・かけ下がり加工のAE信号と切削信号を検出する。図4に示すカッターパスをエアブローで乾式切削する。

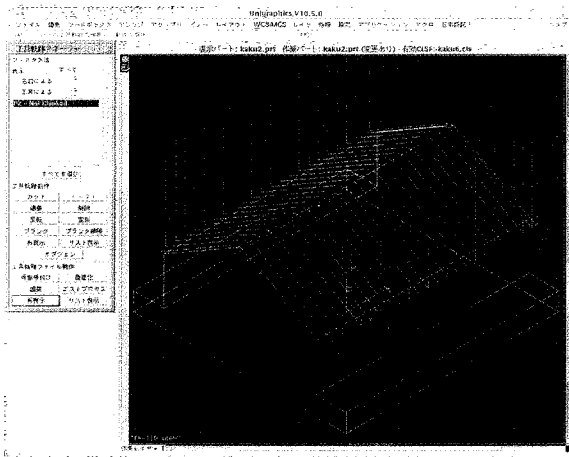


図4 かけ上がり・かけ下がり加工軌跡

加工に用いた、主実験仕様と条件を表1に示す。

表1 実験条件

超硬ボールエンドミル（日立ツール、球径 $\phi 21$ $\phi 10\text{mm}$ 、2枚刃）
マシニングセンタ（森精機、MV-40）
サーフテスト（MITUTOYO501）
走査電子顕微鏡（JSM-5200）
AE装置（NF回路設計ブロック：9501AEテスト・ ハイパスフィルタ100kHz内蔵）
AEセンサ（140kHz共振903N、 $\phi 3$ ）
サーマルオシロ（東京科学：T-438）
AST式工具動力計・計測プログラム（佐藤マ チー・マイ知電子）
被削材（S50C、硬度93HRB）
CAD/CAMシステム（セイコーインスツルマツUG）

III 結果と考察

3.1 送り量と表面粗さの関係

図5には、1刃あたりの送り量を変化させた時の加工面を示す。図6には、加工面のSEM写真と粗さ曲線を示す。粗さの測定方向は、送り方向である。

$R = 5\text{mm}$ のカスプ高さは、(1)式から $0.25\mu\text{m}$ であり、メーカー推奨の標準切削条件、回転数・5600rpm、切り込み $\cdot 0.1\text{mm}$ 、ピッチ 0.1mm を用いたが、送り速度 1700mm/min の図6(a)では、送り方向最大高さは $5.72\mu\text{m}$ である。これは、一般的な磨き作業廃止の実現条件である最大高さ $10\mu\text{m}$ の範囲内である。加工面の写真から、送りが早くなるほど削り残

しが増えていることがわかる。推奨条件でも、削り残しがあるが加工条件選定の目安として利用可能である。表面粗さを向上するには加工精度の許容範囲内で、1刃あたりの送りを削り残しがないように適切に決めなければならない。高速切削を安定して行うには、刃先にかかる負担を常に一定に保つことが求められ、同一形状の切りくずを発生させることがポイントである。加工面の写真から規則性のある Cutter マーク が確認でき切れている切りくずであると考えられる。

3.2 斜め切り込み加工における切削荷変動

ブロック材からキャビティ形状の荒加工を行う場合は、加工範囲の中央部分にヘリカル、スパイラルで切り込みを行い、その後Z軸高さ一定の等高線加工でその高さの面を加工する。実験では、面の繰り広げ加工は行わずヘリカル加工で深さ 5mm まで加工した。切削条件は、回転数 $\cdot 3100\text{rpm}$ 、送り $\cdot 600\text{mm/min}$ である。図7には、ヘリカル加工中の切削荷変動を示す。これから、ヘリカル角度が大きいほど切削荷が大きい事がわかる。

ヘリカル 10° の図7(d)では、底部にビビリが見られた。また、X方向からY方向に動きが変わる偏曲点などでは過大な取りしろのためXY成分の切削抵抗値が大きく変動している。AE信号は徐々に増えている。AE信号は斜め切り込みの進展にともない切りくずの発生状況をとらえていると考えられるのでボールエンドミルの切れ味は良好である事がわかる。

また、切りくずの情報を取得できることがわかった。切削荷を安定させるためには、ヘリカル切り込みより偏曲点の少ないスパイラル切り込みがよいと考える。CAM機能において、Z方向の高さピッチ指定の項目があるが適切な値を指示しないと斜め切り込み時の負荷と、等高線加工時の切削荷が大きく変わると予想される。

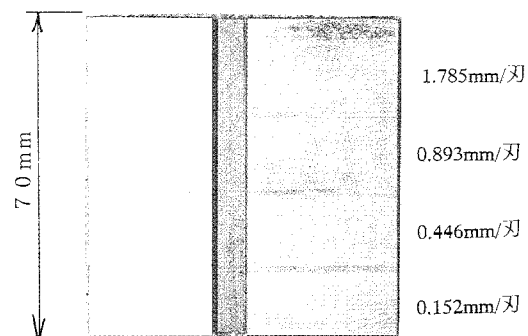


図5 1刃あたりの送り量と加工面

3. 3 かけ上がりかけ下がり加工の 切削負荷変動

モデル形状から、谷部を自動検出し稜線加工を行う機能があるがその時かけ上がりが良いか、かけ下がりがよいか迷う加工である。表2に、各角度のXYZ方向の平均切削負荷を示す。切り込みは、仕上げ面に対して法線方向で0.1mmである。表2から角度が大きい方が切削抵抗値が小さい傾向となっている。これは、ワイヤカットで開き部を加工している均一な仕上げしろ条件においては、図8に示すようにボールエンドミルの接触点が角度により異なるため切れ味が変化するためと、開き角度により、真実切り込みが変化することが要因と考えられる。

切削条件は、回転数・4000rpm、送り・1050mm/min、ピッチ3.5mmである。AEセンサの傾向を記述する。

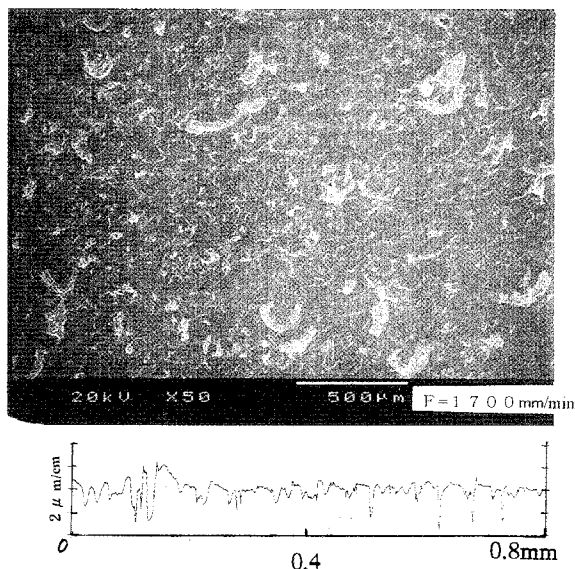
- 0 : 少し反応がある
- 3 : かけ下がり(X方向)で反応がある
- 5 : 少しかけ下がりで反応がある
- 10 : 反応はない
- 15 : 反応はない
- 20 : 反応はない
- 30 : 少しかけ下がりで反応がある
- 40 : かけ下がりでかなり反応がある
- 50 : 反応はない
- 60 : 反応はない
- 70 : かけ上がりかけ下がりです少し反応がある
- 80 : かけ上がりかけ下がりですかなり反応がある

(a) テーブル送り速度1700mm/min

1刃あたりの送り量=0.152mm/刃

$R_y = 5.72 \mu\text{m}$

$R_a = 0.57 \mu\text{m}$

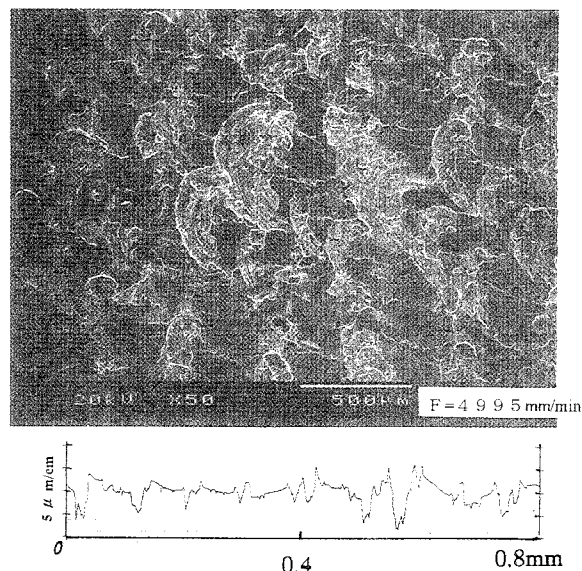


(b) テーブル送り速度4995mm/min

1刃あたりの送り量=0.446mm/刃

$R_y = 10.76 \mu\text{m}$

$R_a = 1.70 \mu\text{m}$

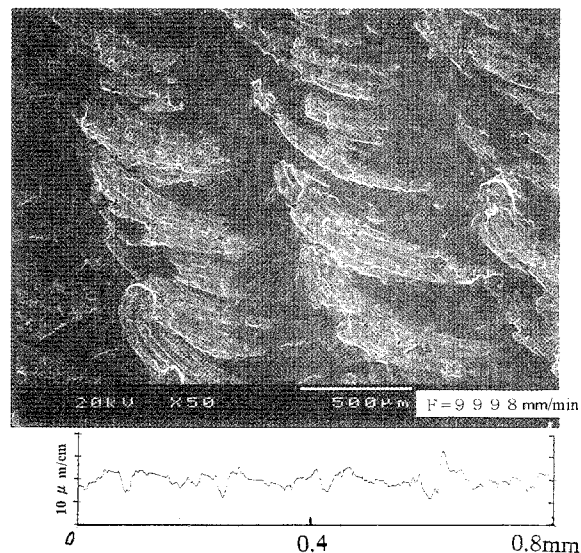


(c) テーブル送り速度9998mm/min

1刃あたりの送り量=0.893mm/刃

$R_y = 12.10 \mu\text{m}$

$R_a = 2.41 \mu\text{m}$



- (d) テーブル送り速度19995mm/min
 1刃あたりの送り量 = 1.785mm/刃
 $R_y = 31.62 \mu\text{m}$
 $R_a = 4.02 \mu\text{m}$

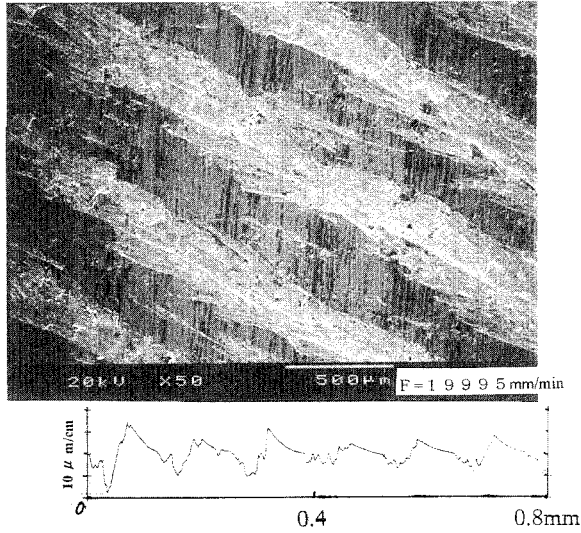
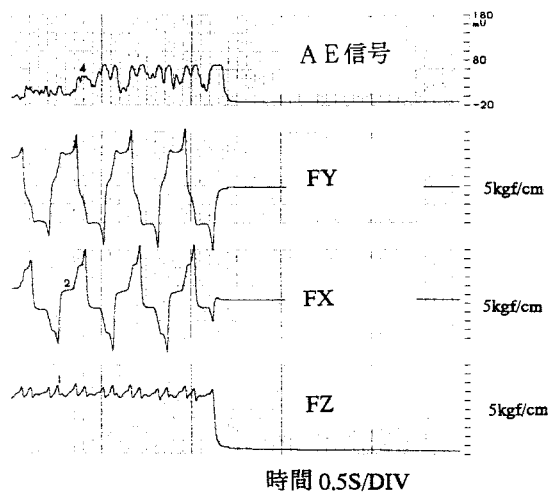
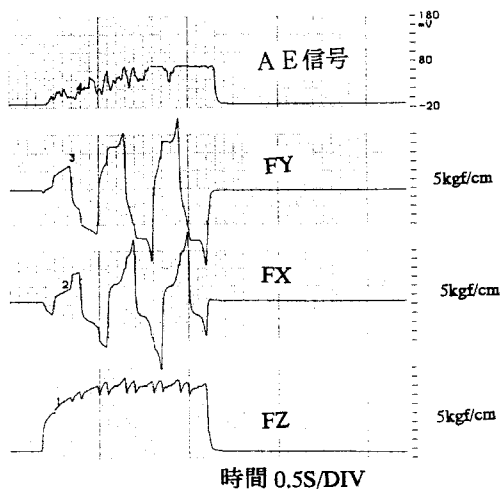


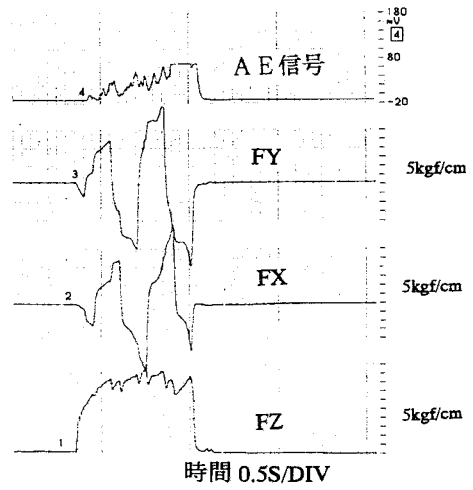
図6 加工面と粗さ曲線



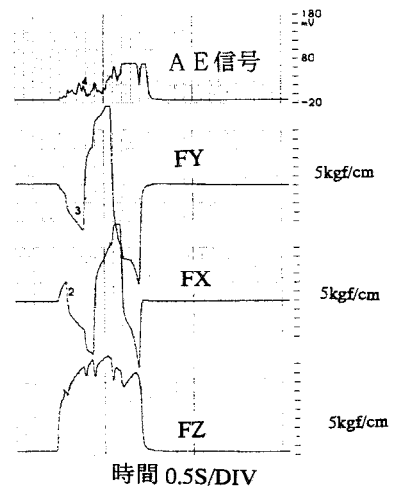
(a) ヘリカル 3°



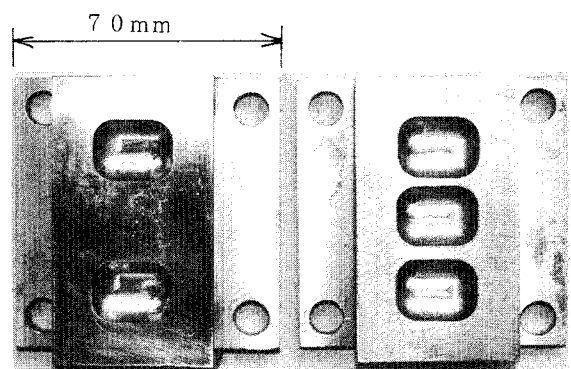
(b) ヘリカル 5°



(c) ヘリカル 7°



(d) ヘリカル 10°



(e) ヘリカル加工面

図7 ヘリカル加工面と負荷変動

図9に角度3°と角度10°の切削負荷変動信号の一例を示す。

表2 各角度における切削抵抗の平均値kgf

角度	FX	FY	FZ
0	6.41	5.78	5.51
3	6.25	8.28	10.7
5	2.94	5.55	11.4
10	1.52	7.31	11.4
15	2.72	12.1	13.6
20	1.47	6.25	2.33
30	1.43	0.688	0.926
40	3.13	2.38	0.227
50	2.69	2.46	0.463
60	1.52	1.67	0
70	1.43	0.924	0
80	3.94	2.98	0

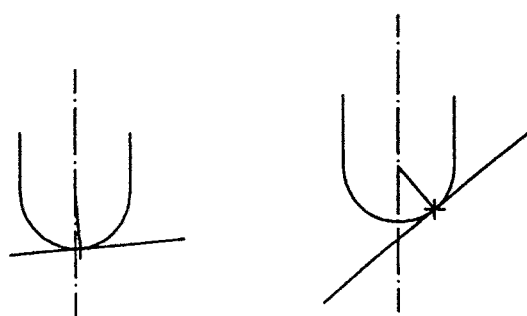
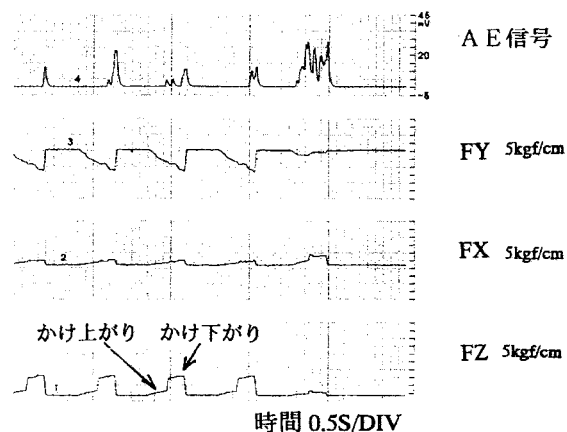


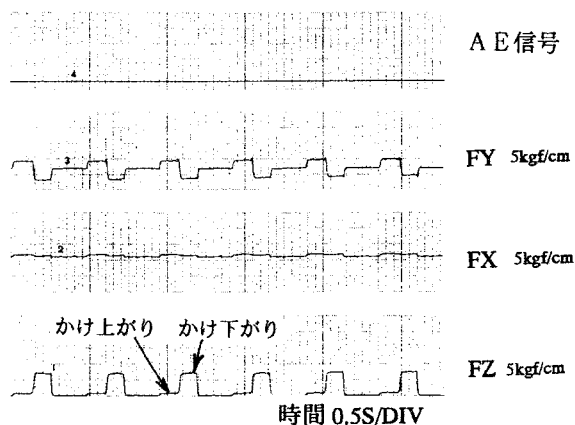
図8 ボールエンドミルの接触点

これらの実験のデータからFX, FY, FZ共にかけ下がりの方が切削抵抗が大きくなっている。また、AE信号もかけ下がりの方で出ている。これにより、かけ上がりよりも、かけ下がりの方が切削負荷が大きいことが分かる。切削抵抗値を見るとFXは表2で角度0°の時の一番大きくなっている。これは、0°の場合、ボールエンドミルの先端が常に当たっているからと考える。また、0°の時の負荷変動と切削抵抗の平均値・AE信号両面から検討すると3°と5°の実験値が類似しており、切削負荷の変動が少ないと言える。稜線加工においてはかけ上がり加工が良いと言える。また、走査線加工においては、仕上げしろが均一ならば仕上げのカッタパスとして十分利用可能である。ただし、刃物の進行方向に平行な立ち壁は面粗度が変化するので考慮しなければならない。なお表2の値で、角度による力の大きさの変化が大きい値がある。これはワイヤカッ

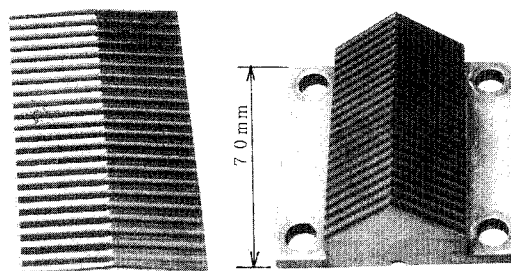
トでの開き角度の加工時、取付誤差が原因で切り込み0.1mmが変化したと考えられる。



(a) 角度3度の切削負荷信号



(b) 角度10度の切削負荷信号



角度3° 加工面

角度10° 加工面

図9 かけ上がりかけ下がり切削負荷信号の例

IV おわりに

本研究では、送りと表面粗さの関係、ヘリカル切削負荷の変動、かけ上がりかけ下がり加工の切削負荷の

変動について研究した。これにより、ボールエンドミルによる浅切り込み高速切削加工方法において、高精度・高速加工を実現する生産技術であるCAM機能の切削負荷の変動を検証し三次元形状の高速切削加工では負荷変動を抑えるために、浅切り込み高送り加工、等高線切削加工に使用するアプローチ角度は 5° 以内が良好であると確認できた。また、稜線加工では、かけ上がり加工が良いことがわかった。

CAMシステムを活用するにあたり加工形状と加工状況に応じた工具軌跡の選択・加工条件を考慮し、工具の負荷変動を考えた加工技術をCAM機能に反映しなければならないと考える。

V 所感

図10に今回の研究のきっかけになった股関節ステム部の加工状況を示す。地元の事業所より「親会社から、NC加工データを提供され試作加工をしたがエアーカット（刃物の無駄な動き）が多く、修正して効率の良い工具軌跡に変更したい」と相談を受けCAD/CAMセミナー・事業内援助により股関節ステム部のモデリング・NCデータ作成を支援した。

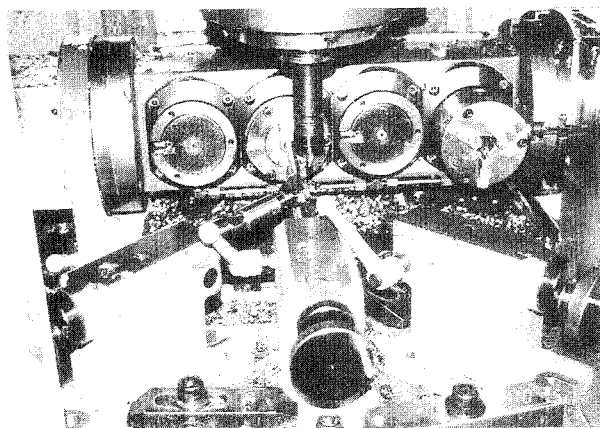


図10 股関節ステム部加工

その後、卒研テーマにてソリッドモデリング、解析、NCデータ作成・試作とコンカレントエンジニアリングにより検討を重ねた。成果を事業所に報告し、平成9年4月からは、月産300本を親会社から受注生産している。正直なところ、刃物が折れないか、寸法・面精度、スクラッチ傷が生じないか不安であった。従来の切削理論に加え、CAD/CAM技術を活用するにあたり工具の負荷変動を検証する必要性があった。また、平成9年度専門第一期研修・高速切削加工を受講でき大いに役立った。ものづくりの職業訓練を実践するに

あたり、加工精度を考えた要素技術を忘れてはいけな
いと考える。今後、研究テーマを絞ってさらに頑張っ
ていきたい。

【参考文献】

- (1) 富岡恒憲、木村知史：日経メカニカル10.16号48-24
p(1995)