

エンドミル加工の切削抵抗見積り手法の開発

第1報—スクエアエンドミルの場合—

Cutting Force Estimation in End Milling - 1st Report, In Case of Square End Mill -

(平成16年9月受理)

松本 匡以* (MATSUMOTO Tadaï)

Abstract

This paper deals with a cutting force estimation in end milling applied to 3-D shape like dies and molds. When carrying high speed end milling of hard metal materials, the sudden change of cutting force incurs shortening tool life and gives a fatal damage to machine tools. For efficient high speed end milling, it is required that the CAM or NC equips the database and simulating function for high speed cutting. In order to work the simulation of high speed end milling, simple and fast cutting force estimation is needed. I suggest a new cutting force estimation method applied to square end mills using end and side edges. This method approximates the removed volume of workpiece to a triangle pillar. The end and side edge cuts the pillar in 2-dimensional cutting operation, and cutting force is computed by using Kronenberg's formula. The estimated cutting force becomes maximum immediately after engage point, and decreases slowly toward to disengage. This is similar to experimental results of cutting force in end milling, on some research reports.

Keywords: cutting force, end mill, high speed cutting, CAM, NC

1. はじめに

現在、工業製品の多くが、金型を用いた加工であるプレス・鋳造・射出成型等により生産されており、金型等の3次元形状の高速加工の必要性が以前にも増して高まってきている。金型等の高硬度材料の加工は、コーティング超硬やCBN焼結体等の切削工具材料の技術革新により、従来の放電加工からエンドミルを用いた高速切削加工へ移行してきている。また、高速切削加工には「省エネ加工」の効果もあるため¹⁾、今後さらに応用が広がるものと期待される。

高硬度材料の高速切削加工では、切削抵抗の急激な変化により引き起こされる工具寿命低下、ひいては加工の効率低下が大きな問題となっている。このため、高速エンドミル加工時の切削抵抗の測定²⁾や、切削抵抗の予測^{3)~5)}の研究が行われている。切削抵抗の予測においては、処理能力が著しく向上したコンピュータを用いて複雑なアルゴ

リズムを解析するものや、エンドミルの側刃のみの切削時の抵抗予測等が報告されている。

エンドミル加工時の工具経路生成等に使用される現

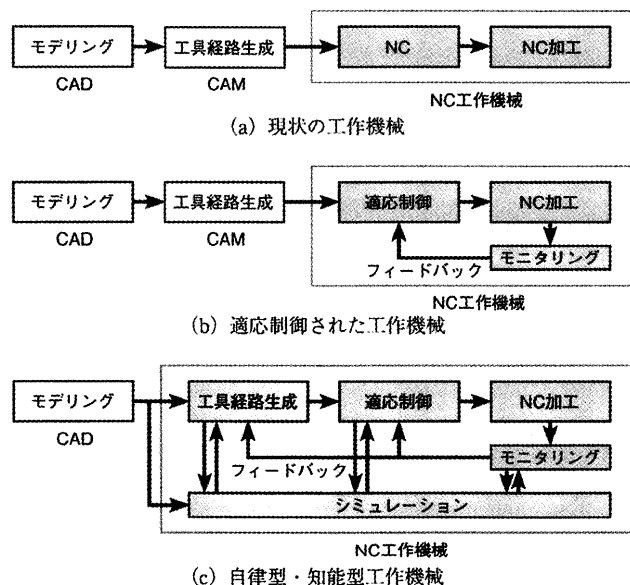


図1 自律型・知能型工作機械の概念

* 福島工業高等専門学校 機械工学科 (いわき市平上荒川字長尾30)

在のCAMシステムは、工作機械からは独立して、幾何学的な工具経路の選択肢の多いものが主流となっている。しかし、前述の高速エンドミル加工時の切削抵抗の変動の問題に対応し加工効率の向上を目指すためには、高速加工のデータベースや切削加工シミュレーションを内蔵するCAMや、このようなCAM機能を内蔵するNC工作機械（自律型・知能型工作機械⁶⁾一例を図1に示す）が必要になる。特に、切削加工シミュレーション機能を持つNC工作機械にはリアルタイム処理が要求されるため、簡易的で高速な切削抵抗の推定方法が不可欠となる。

また、自然環境破壊が大きな問題となっている現在、製造のパラダイムも効率重視から環境調和のモノづくりへと変化せざるを得ない状況になりつつある。このような動きに呼応して、CADによる3次元形状モデルからCAM/CAE/バーチャルプロトタイプング等と応用が広がったように、製品のライフサイクルにおける消費エネルギー等の環境負荷をモデル化したLife Cycle Modelをコンピュータ上に構築し、これからLCD(Life Cycle Design)/LCA(Life Cycle Assessment)への応用を行おうという考え方も提唱されている⁷⁾。切削加工においても、工具経路データより時々刻々の切削抵抗を見積り、全工程におけるエネルギーを積算すれば、作り出される製品のライフサイクルの一部である製造部分のライフサイクルモデルとしての活用も期待される。

以上のような状況から、本研究は3次元形状を切削加工するエンドミル加工時の切削抵抗を、工具経路とその他の切削条件から簡易的かつ高速に推定する手法を開発することを目的に行う。今回は、金型等の荒加工に多く用いられるスクエアエンドミルの側刃と底刃両方を使用する場合の切りくず1片あたりの切削抵抗の見積り手法を提案する。

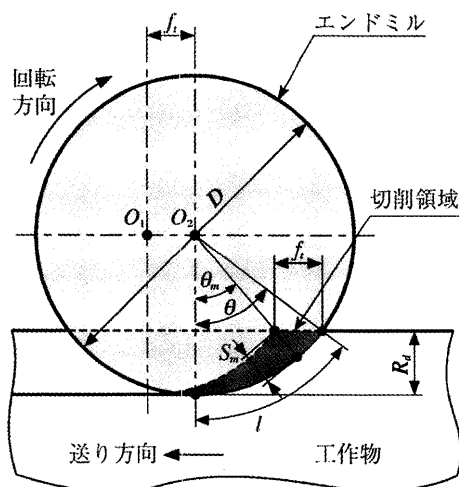


図2 フライス工具の切削領域

2. 切削領域の近似と切削抵抗の求め方

2.1 フライス工具の切削領域

エンドミルを含めたフライス工具の1枚の切刃が削り取る部分の形状は、工具の回転と工作物の送りと同時に進行するためトロコイド曲線となるが、1刃当りの送りが工具直径に比べて小さい場合は、図2に示すように円弧で近似しても誤差は少ない。図2において、工具直径： D 、接触角： θ 、1刃当りの送り： f_t 、半径方向の切込み： R_d 、接触長さ： l 、変形前切りくず厚さの最大値： S_m 、最大切りくず厚さ時の角度： θ_m とすると、 S_m 、 θ 、 θ_m は下記の式により求めることができる。

$$S_m = \frac{D}{2} - \left(\frac{D^2}{4} - 2f_t \sqrt{D \cdot R_d - R_d^2} + f_t^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2R_d}{D} \right) \quad (2)$$

$$\theta_m = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{D \cdot R_d - R_d^2} - f_t}{\frac{D}{2} - R_d} \right) \quad (3)$$

2.2 スクエアエンドミルの切削領域

スクエアエンドミルの底刃と側刃の両方を使って切削する場合の切刃1枚の切削領域を図3に示す。図で A_d はエンドミルの軸方向の切込みを示す（その他は、図2と同じである）。切削領域は、図2で示した2つの円弧で囲まれる部分をエンドミルの軸方向に沿った柱状の形状としている。今回は、底刃と側刃それぞれの切削抵抗を求め、合計して全体の切削抵抗とすることにした。そのため、エンドミルの底から軸方向に1mmまでの高さの部分の切削領域とし、

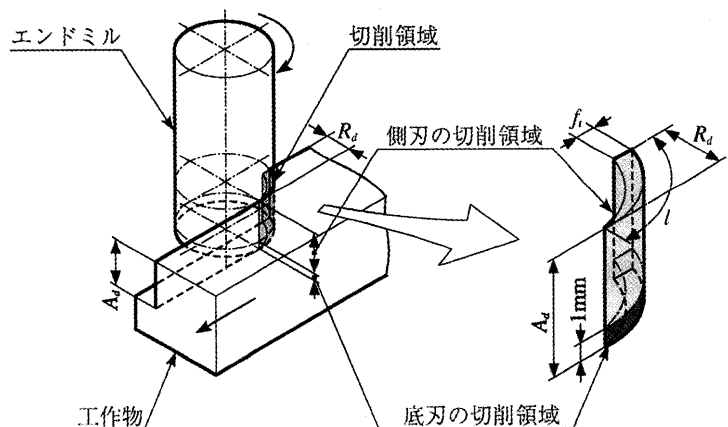


図3 エンドミルの切刃1枚の切削領域

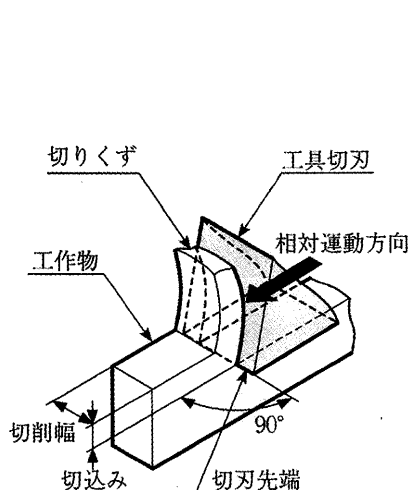


図4 2次元切削

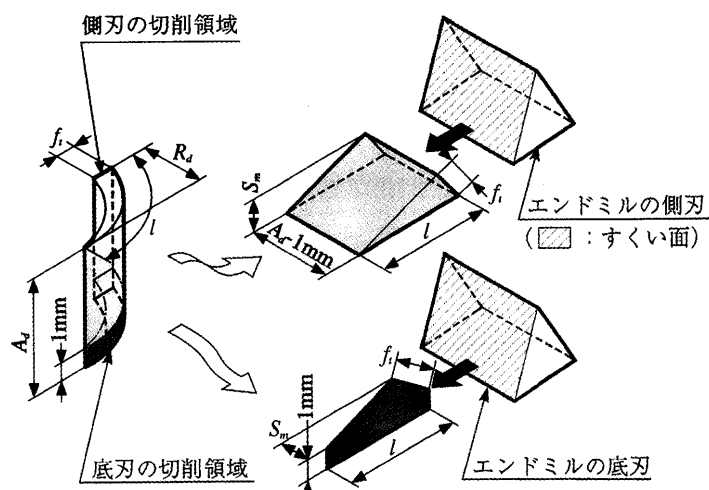


図5 切削領域の近似と切削

それより上の部分から軸方向の切込み \$A_d\$ までを側刃のみの切削領域とした。

切削抵抗を求めるに際して、底刃・側刃の両方とも計算を簡単にするため、切刃先端が工具-工作物間の相対運動の方向と直行する2次元切削(図4)として取り扱うことにした。このため、図5に示すように、底刃・側刃の切削領域とも円弧状の接触長さ \$l\$ を直線にのばした三角柱の形状に近似する。この切削領域の近似により、底刃での切削は切込みが \$1\text{mm}\$ (不変) で切削幅が \$0 \sim S_m\$ で変化する三角柱の2次元切削として、側刃での切削は切削幅が \$A_d-1\text{mm}\$ (不変) で切込みが \$0 \sim S_m\$ で変化する三角柱の2次元切削として解析が可能となる。

2.3 切削抵抗の求め方

前述の通り、2次元切削として切削抵抗を求めるものとし、切削抵抗の導出には Kronenberg の式⁸⁾を使用することにした。切削抵抗: \$F\$ (N)、工作物の比切削抵抗: \$K_s\$ (N/mm²)、切削面積: \$A\$ (mm²)

表1 切削抵抗計算のための切削条件

| | | |
|------------------------|--------------------------------------|------|
| 工具名 | スクエアエンドミル | |
| 工作物 | S55C (\$\sigma_t=780\text{N/mm}^2\$) | |
| 工具すくい角: \$\alpha\$ (°) | ARA=0, RRA=0 | |
| 切削方向 | ダウンカット | |
| 工具直径: \$D\$ (mm) | 10 | 20 |
| 1刃当りの送り: \$f_i\$ (mm) | 0.05 | 0.1 |
| 半径方向の切込み: \$R_d\$ (mm) | 1.25 | 1.25 |
| | 25 | 25 |
| | 5.0 | 5.0 |
| 軸方向の切込み: \$A_d\$ (mm) | 10.0 | 10.0 |
| | 25 | 25 |
| | 5.0 | 5.0 |
| | | 20.0 |

切削抵抗は

$$F = K_s \cdot A \tag{4}$$

となる。また、工作物の種類とすくい角による定数: \$C_{ks}\$、断面形状比: \$G (=h/b)\$ とすると、比切削抵抗は

$$K_s = \frac{C_{ks} \left(\frac{G}{5}\right)^{0.16}}{A^{0.137}} \tag{5}$$

で定まり、工作物の引張強さ: \$\sigma_t\$ (N/mm²)、工具すくい角: \$\alpha\$ (°) とすると、

$$C_{ks} = 2.4 \sigma_t^{0.455} \cdot (80 - \alpha)^{0.67} \tag{6}$$

となる。

図5で近似した三角柱を切削始めから終了までの長さ \$l\$ の間を適当な間隔に区切り、

- ① 底刃での切削の場合は切込みは \$1\text{mm}\$ 一定なので、切削幅を求め
- ② 側刃での切削の場合は切削幅は \$A_d-1\text{mm}\$ 一定なので、切込みを求めて

上記の式に代入し、切削の進行とともに変化する切削抵抗を計算することにより、スクエアエンドミルで切削加工する際の切りくず1片当りの切削抵抗の見積りが可能となる。

3. 結果と考察

3.1 切削条件

スクエアエンドミルの側刃と底刃両方を使用する場合に切りくず1片あたりの切削抵抗を求めるために用いた切削条件を表1に示す。

工作物は金型等にも用いられる S55C (引張強さ \$780\text{N/mm}^2\$)、エンドミルのすくい角は2次元切削と

するため軸方向・半径方向とも 0° 、工具直径は金型等の切削に多用される比較的小径の直径10mmと汎用的な直径20mmのものを選定した。1刃当りの送り量は、市販のエンドミルのカタログ等を参考にして、それぞれの工具直径に対してS55C程度の鋼を切削する場合の標準的な値とした。半径方向の切込み R_d は、工具直径の1/2を最大とし、その1/2~1/8で1.25mm以上の値とした。また、軸方向の切込み A_d は、工具直径を最大とし、その1/2~1/8で2.5mm以上の値とした。

3. 2 切削抵抗の値

エンドミルの直径(D)が10mmの時の切削抵抗の変化の一例を図6~図9に示す。また、直径が20mmの場合の一例を図10~図13に示す。切削抵抗は、エンドミルの底刃のみの値、側刃のみの値と、

これら2つの合成した値が示してある。いずれも横軸には接触長さを取り、接触長さ0は切刃の喰いつき時で、接触長さが長くなり切削抵抗が0となる点が切削終了の点である。

直径10mm・20mmとも、底刃の切削領域はエンドミルの底面から軸方向に1mmとしたため、工具直径と半径方向の切込み(R_d)が同じ場合は切削抵抗の変化は同じ形となっている。また、軸方向の切込み(A_d)が大きくなるにつれて、全体の切削抵抗のほとんどを側刃が受け持つ状況が示されている。

半径方向の切込みが工具直径の1/2の場合($D=10\text{mm}$ で $R_d=5\text{mm}$ 、 $D=20\text{mm}$ で $R_d=10\text{mm}$)は、喰いつき時に切削抵抗が最大となっている(その他の切削条件では、喰いつき時は切削抵抗が0で、その後最大値を迎える)。これは、1刃当りの送り(f)と変形前切りくず厚さの最大値(S_m)が等しくなり、

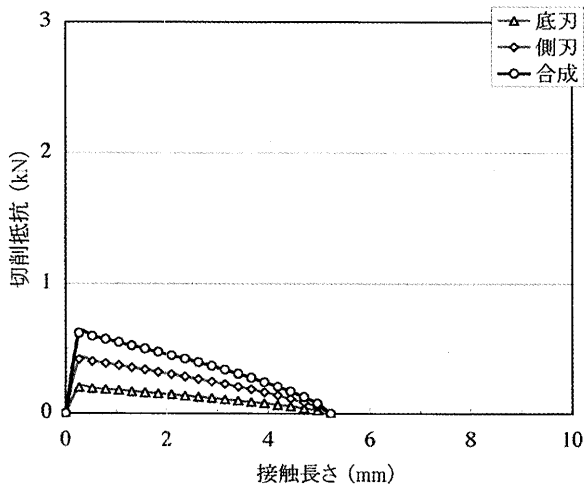


図6 工具直径10mm時の切削抵抗の変化
($R_d=2.5\text{mm}$ $A_d=2.5\text{mm}$)

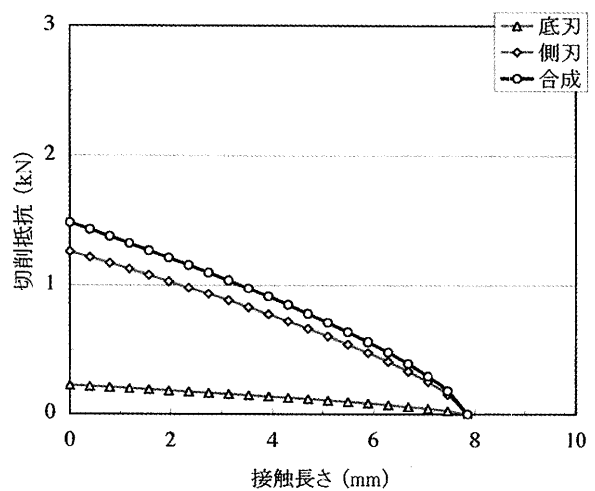


図8 工具直径10mm時の切削抵抗の変化
($R_d=5\text{mm}$ $A_d=5\text{mm}$)

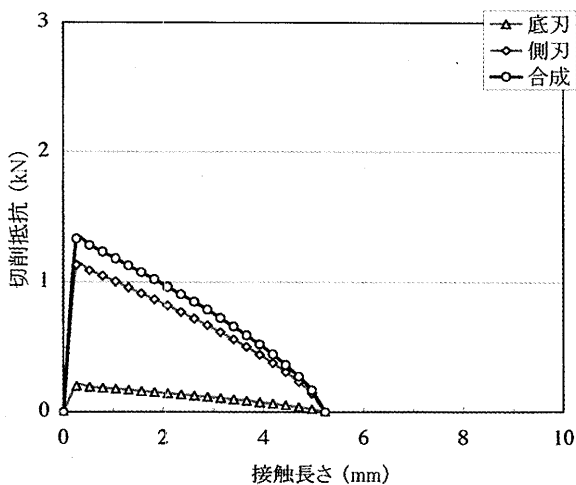


図7 工具直径10mm時の切削抵抗の変化
($R_d=2.5\text{mm}$ $A_d=5\text{mm}$)

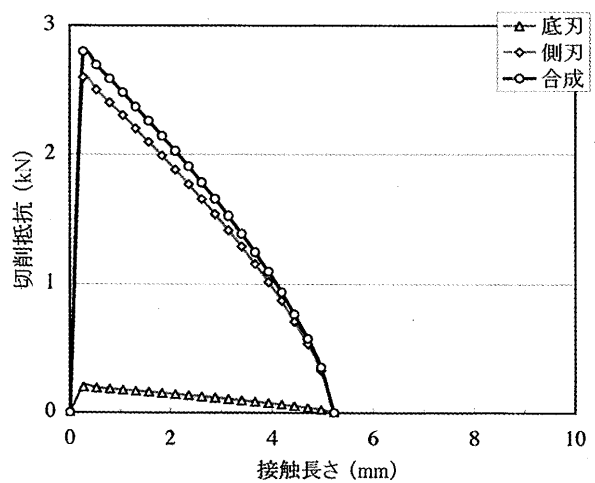


図9 工具直径10mm時の切削抵抗の変化
($R_d=2.5\text{mm}$ $A_d=10\text{mm}$)

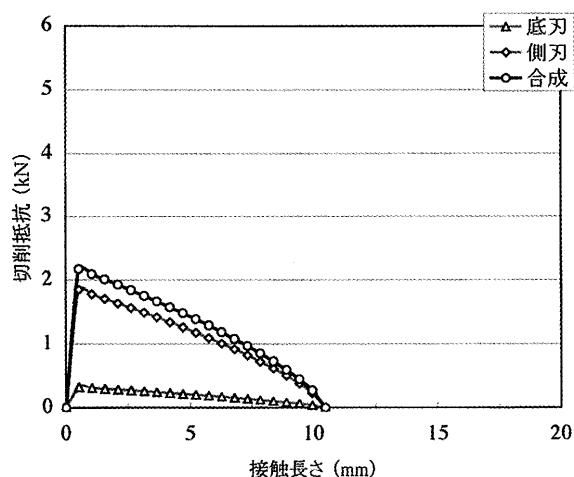


図10 工具直径20mm時の切削抵抗の変化
($R_e=5.0\text{mm}$ $A_e=5.0\text{mm}$)

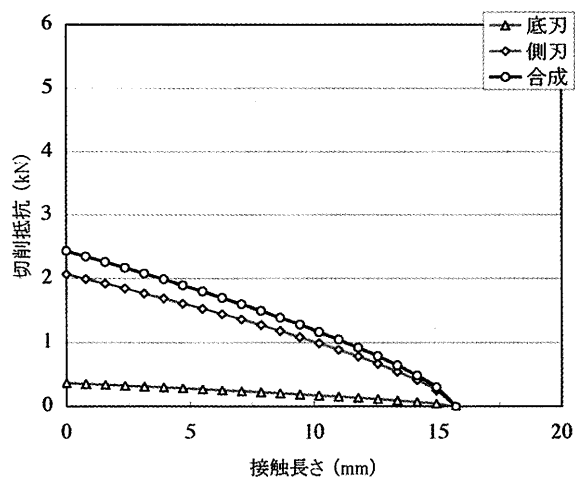


図12 工具直径20mm時の切削抵抗の変化
($R_e=10\text{mm}$ $A_e=5.0\text{mm}$)

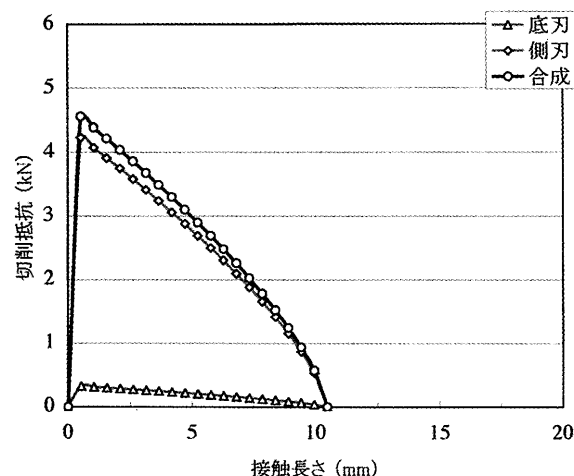


図11 工具直径20mm時の切削抵抗の変化
($R_e=5.0\text{mm}$ $A_e=10\text{mm}$)

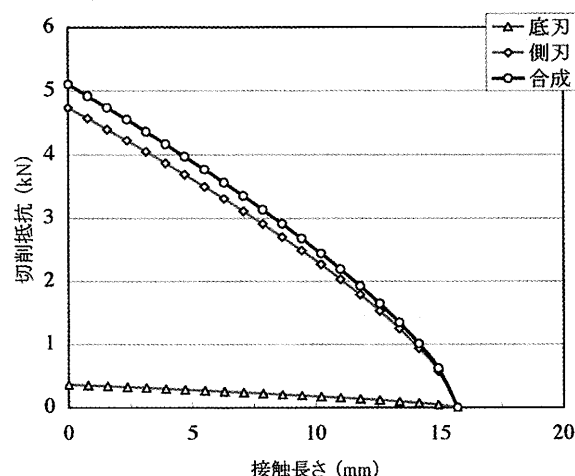


図13 工具直径20mm時の切削抵抗の変化
($R_e=10\text{mm}$ $A_e=10\text{mm}$)

切削領域を近似した三角柱の喰いつき側が切刃稜に平行な直立した面となり、切込みや切削幅が最大の状態からから切削を開始することになるためと考えられる。

切削開始直後に最大になった切削抵抗は切削終りの点に向って減少して行くが、三角柱の近似で切込みや切削幅の減少が直線的であるのに、切削抵抗の減少は緩やかなものとなっている。これは比切削抵抗に關係する断面形状比が、小径のエンドミル加工の小さな切込みでも影響を及ぼし、寸法効果^{註1)}の影響を表したものと考えられる。

今回提案した手法で求めた切削抵抗の変化は、切削開始直後に最大となり切削終り付近でも減少傾向が小さい等、特に軸方向の切込みが大きい場合は、エンドミル側刃のみの切削抵抗の実測値⁵⁾と同様の傾向が見られ、スクエアエンドミルの切削抵抗の見積りに有効であると思われる。

4. まとめ

3次元形状を切削加工するエンドミル加工時の切削抵抗を、工具経路とその他の切削条件から簡易かつ高速に見積る手法を開発することを目的に研究を行った。今回は、スクエアエンドミルの側刃と底刃両方で切削する場合に、切刃1枚による切削領域を三角柱で近似し、その三角柱を底刃と側刃で2次元切削する状態で、切りくず1片あたりの切削抵抗の変化を求める手法を提案した。

今後は、工具動力計を用いた切削加工実験等を通して計算値の検証を試みたいと考えている。また、金型の仕上げ切削加工等に多用されているボールエンドミルについても、切削抵抗の見積り手法の検討を進める予定である。

謝 辞

本研究を行うにあたり協力をいただいた平成13年度～15年度卒業研究生の野崎諭司君、佐藤俊文君、近藤努君に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 斎藤義夫：環境対応省エネ加工、機械技術、第48巻、第11号、pp.36-39、2000
- 2) 武藤学，森田昇，吉田嘉太郎：高硬度金属材料の高速エンドミル加工に関する研究（第1報）－切削抵抗・工具切れ刃温度同時測定装置の開発－、精密工学会誌、Vol.64、No.11、pp.1674-1678、1998
- 3) 垣野義昭，大塚裕俊，中川平三郎，廣垣俊樹，佐々木将志：焼入鋼のエンドミル加工に関する研究（第1報）－切削抵抗の簡易推定式とそれを用いた切削抵抗一定化制御－、精密工学会誌、Vol.66、No.5、pp.730-734、2000
- 4) 寺本孝司，小野里雅彦：モデル学習によるボールエンドミル加工の高精度切削力予測、精密工学会誌、Vol.69、No.8、pp.1098-1103、2003
- 5) 金子順一，寺本孝司，小野里雅彦，竹内芳美：微小切込時の状態変化を考慮したエンドミル加工の切削抵抗予測－すぐ刃工具による加工の場合（第1報）－、精密工学会誌、Vol.69、No.11、pp.1605-1609、2003
- 6) 白瀬敬一：技術動向編ソフトウェア（インテリジェント化）、機械技術、第49巻、第12号、pp.40-44、2001
- 7) 木村文彦：LCDの考え方および諸外国の動向、ライフサイクルデザインシンポジウム－環境調和のモノづくりに向けて－、pp.15-18、(財)製造科学技術センター、1998
- 8) 米津栄：改訂機械工作法Ⅱ、pp.30-32、朝倉書店、1993
- 9) 中山一雄，上原邦雄：新版機械加工、pp.49-50、朝倉書店、1998

注1) 比切削抵抗は、切込みや送りの減少に伴って増加する傾向にあり、これを比切削抵抗の寸法効果 (size effect) と呼んでいる。原因として、次のようなことが考えられている⁹⁾。

- ① 切込みや送りが小さくなると、切削仕事量が少なくなり、発熱量も少なくなるので、刃先温度が下がり、材料のせん断応力や工具のすくい面上での摩擦角が増大し、それに伴ってせん断角が減少する。

- ② 切刃先端には丸みがあるから、切込みや送りが小さいと実質のすくい角が減少する。
- ③ 加工面下変質層の厚さは、切込みや送りに比例して減少しないので、加工面下変質層を作るために要する力の割合が増える。
- ④ μm オーダ以下の微小切削では、材料強度の寸法効果 (材料の寸法が小さくなるほど強度が増す) も考えられる。