

切削力モデルに基づくエンドミル加工状態の知的認識* (データベースを必要としない手法の開発)

社本英二*¹, 樋野 励*³
梅崎雅之*², 森脇俊道*³

Intelligent Recognition of End Milling Conditions Based on Cutting Force Model (Development of Monitoring Method without Any Databases).

Eiji SHAMOTO*⁴, Rei HINO,
Masayuki UMESAKI and Toshimichi MORIWAKI

*⁴ Department of Mechanical Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

An intelligent method is proposed to recognize various end milling conditions by comparing simulated and measured cutting forces. Static stiffness of the mechanical structure is identified by utilizing the measured cutting forces, and it is shown that the static deformation of the structure can be taken into account for accurate calculation of uncut chip thickness in the end milling process. A cutting force equation is developed with considering cutting edge roundness, i.e. tool wear, and a milling force model is constructed. Various parameters in the model are identified so that the simulated forces fit best with the measured forces. Edge force component, tool setting angle, specific cutting force resistance, etc. are identified or recognized as the model parameters, which contain rich information about the end milling process. End milling experiments are carried out at various stages of tool wear, and the results show that the proposed index for the tool wear, i.e. the identified edge force component divided by the specific cutting force resistance, has good correlation with the measured tool wear. It is expected that the end milling conditions such as the tool wear, the static stiffness of the structure, the tool setting angle and the specific cutting force resistance can be recognized intelligently without any data bases by the present method.

Key Words: Milling, Modeling, Cutting Force, Tool Wear, Monitoring

1. 緒 言

機械加工の自動化は、工作機械の運動制御という点で目覚しく発展しているが、加工状態の自動認識と対処という点では数多くの課題を残している⁽¹⁾。これらの課題は、センサ技術や信号処理技術の進歩にも依存しているが、主に加工プロセスの複雑さに起因していると考えられる⁽²⁾。このため、加工条件を狭い範囲に限定することで加工プロセスの複雑性を回避し、特定の条件下のみで状態認識を実現する手法や、何らかのデータベースを用意することでそのデータの周辺条件に対応する妥協策が試みられている⁽³⁾⁽⁴⁾。

これに対して本研究では、加工プロセスのモデルを構築することでその複雑さをある程度考慮に入れ、データベースを用意することなく広い範囲の加工条件に対応することのできる加工状態監視システムの実現を目指す。ここでは、監視する状態量を整理するとともに、その監視に適した加工プロセスモデルを構築し、切削力の測定値を利用して対象とする状態量を推定する手法を提案してその可能性について検討を行う。

2. 実験方法

実験には、縦型マシニングセンタ（日立精機社製 VM40III）を使用する。図1に示すように、送りテーブルと被削材の間に圧電型動力計（キスラー社製 9257A）を固定し、加工中の切削力を測定する。動力計からの切削力信号はチャージアンプで増幅した後、A/D変換器を介してコンピュータに取り込む。この際、

* 原稿受付 2002年12月16日。

*¹ 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(☎464-8603 名古屋市千種区不老町)。

*² 正員, 電源開発(株)(☎235-8510 横浜市磯子区新磯子町37-2)。

*³ 正員, 神戸大学工学部(☎657-8501 神戸市灘区六甲台町)。

E-mail: shamoto@mech.nagoya-u.ac.jp

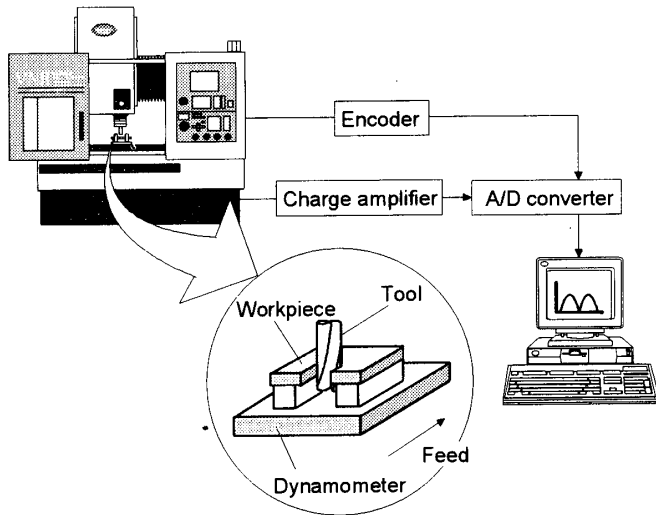


Fig. 1 Setup for end milling experiments

Table 1 Machining conditions

No.	I	II	III
Rotational speed min^{-1}	400	600	400
Feed $\text{mm}/\text{min}^{-1}$	40	60	40
Axial depth mm	2		
Radial immersion	Full slotting		
Workpiece	Steel (JIS: S45C)	Aluminum alloy (JIS: H4000)	
Tool	Number of teeth		1
	Diameter mm		20
	Rake angle deg.		0
	Helix angle deg.		0
	Material		High speed steel

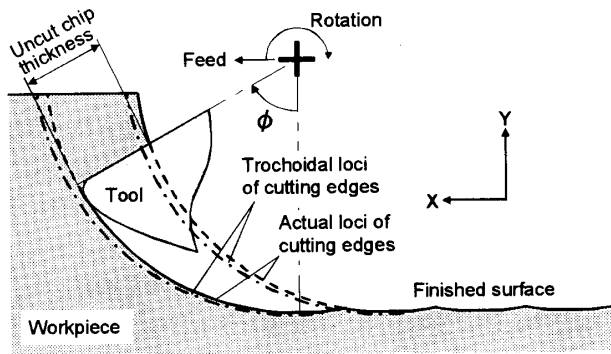
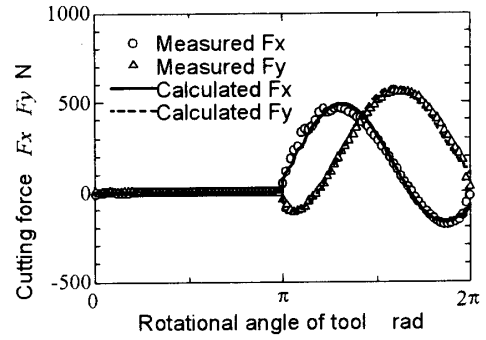


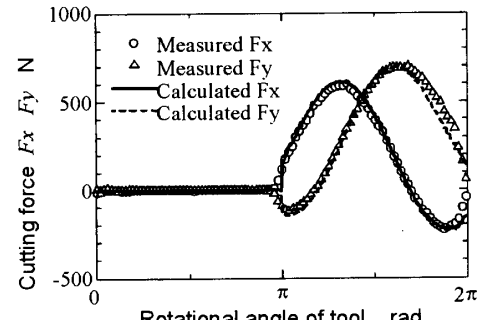
Fig. 2 Schematic illustration of end milling process

工具回転位置に同期して測定するため、主軸のエンコーダ信号を利用する。

ここでは、研究の第一段階として、工具切れ刃の傾斜の影響を受けないようにするためにねじれ角0度の一枚刃エンドミルを使用する。また、工具底刃の切削による影響を受けないようにするため、図1に示すように被削材を板状にし、工具を被削材の下に突き出すようにして、工具の側刃のみで切削を行う。なお、加



(a) Tool wear : 0 μm



(b) Tool wear : 322 μm

Fig. 3 Simulated and measured cutting force

工条件については、基本的に表1に示す3種類とする。

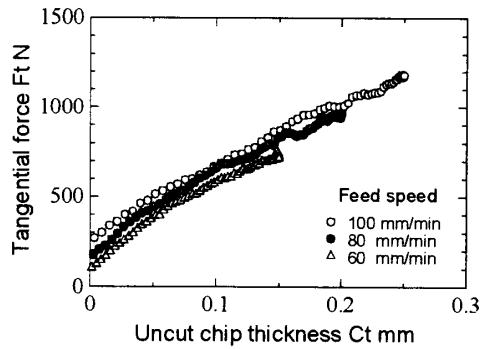
3. 加工プロセスモデルの構築と状態量の推定方法

3.1 切取り厚さの算出方法 図2に示すように、エンドミル加工で刃先が描く軌跡は基本的にトロコイド曲線となり、切取り厚さ C_t は隣り合う2つのトロコイド曲線にはさまれる部分となる。このように切取り厚さが変化すると同時に切削方向も変化するため、図3に示すような複雑な切削力が生じる。なお、この場合の加工条件は表1におけるNo. IIであり、(a)は新品の工具、(b)は逃げ面摩耗幅 322 μm の工具を使用した場合である。

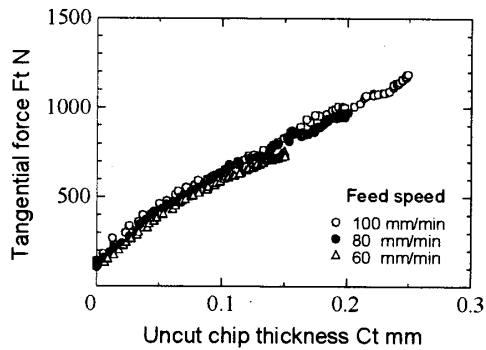
実際の切削においては、エンドミル工具はあまり剛性が高くないため、切削力により変形する。この変形によって刃先の軌跡が変化し、切取り厚さも変化する。そこで、ここではこの機械系の静的な変形を考慮して切取り厚さの算出を行う。

まず、図2に示すようにトロコイド曲線の刃先軌跡を求める。次に測定される切削力をもとに変位量を算出し、これを加算して実際の刃先軌跡を求める。そして、刃先と回転中心を結ぶ線分と前刃先軌跡との交点を求め、切取り厚さを算出する。

3.2 静剛性の影響とその同定 上述のように静的な変形を考慮して正確に切取り厚さを算出するため



(a) Without consideration of static displacement



(b) With consideration of static displacement

Fig. 4 Relationship between uncut chip thickness and tangential cutting force at various feed rates

には、機械系の静剛性を予め測定するか、あるいは加工中に推定する必要がある。

まず、正確な静剛性を知るため、次のような測定を行った。図1に示す状態でエンドミルを回転せずに被削材に接触させ、動力計から得られる力とテーブルの移動量から静剛性を測定した。その結果、X方向 3.2×10^6 N/m、Y方向 4.1×10^6 N/mであった。なお、エンドミル工具の突き出し量は約60 mmである。

次に、加工中に測定される切削力から機械系の静剛性を推定することを試みた。ただし、1種類の切削条件における切削力のみから推定することは残念ながら困難であるため、3種類の異なる送り量 60, 80, 100 mm/min における切削力を利用する。なお、その他の条件については表1に示す No. I と同じである。図4(a)は、変形を考慮せずに求めた切取り厚さと測定された主成分力の関係を示している。図に示されるように、3つの送り量における曲線は重なっていないが、同じ刃先を用いて同条件で切削を行っていることから、本来これら3つの曲線は重ならなければならない。このずれは、送り量が大きくなると一回転前の切れ刃の弾性変形による削り残し量が増え、実質の切取り厚さが増大して見かけ上同じ切取り厚さでも切削力が増大するために生じていると考えられる。この考えについて

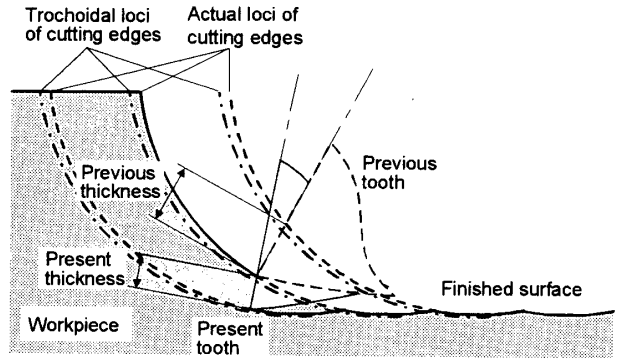


Fig. 5 Difference between present and previous uncut chip thickness in end milling process

は、誤解を与えやすいため以下に詳述する。エンドミル加工のような繰返し加工においては、十分な回数の切削を繰り返した後は、図5に示すように一回転前の切れ刃と現在の切れ刃の軌跡は同じものとなる。このため、一般に設定の切取り厚さと実際の切取り厚さが同じになると考えられている。しかし、実際にはそれらの軌跡が送り方向にずれているため、図のように現在の切取り厚さの方がその位置の前加工面を加工した際の切取り厚さよりも小さくなる。従って、前加工面を加工した際の切削力の方が大きいため削り残し量が増え、切削力が増大する。以上のメカニズムから、この現象は送り量が大きく、切取り厚さが小さい領域において顕著になる(図4(a)参照)。

そこで、XおよびY方向の静剛性を仮定して両方向の変位量分だけ切取り厚さを補正し、3つの曲線が最も一致するように静剛性値を探索した。その結果を図4(b)に示す。図内に示すように、本手法によって同定した静剛性値はX方向 2.9×10^6 N/m、Y方向 4.0×10^6 N/mであり、前述の測定値に近い値となった。このことから、送り速度を変化させて加工を行うことにより、切削力の測定値のみから機械系の静剛性を推定することが可能であり、これを用いて正確な切取り厚さを算出し得るものと考えられる。

3.3 切削力モデルの構築 図6は、測定された主成分力と切取り厚さの一例である。加工条件は、送り速度: 160 mm/min、工具直径: 25 mm、工具材質: 超硬、他の条件は表1の条件 III と同じである。図4(b)の場合と同様に、 F_e で示されるエッジフォース成分(単位切れ刃長さあたりの力)が存在し、切取り厚さが小さい範囲では A2 で示される寸法効果が見られるが、切取り厚さが大きくなると傾き K_f の直線に漸近する。

一方、刃先丸みを持つ実際の工具で連続体を切削するとすれば、図7に示す切削プロセスの相似則が成り立つはずである。すなわち、切取り厚さ C_f 及び刃

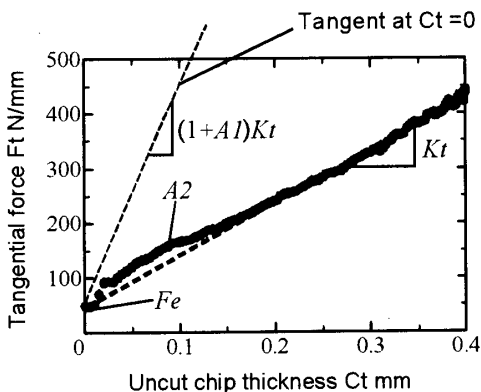


Fig. 6 Modeling of relationship between uncut chip thickness and cutting force

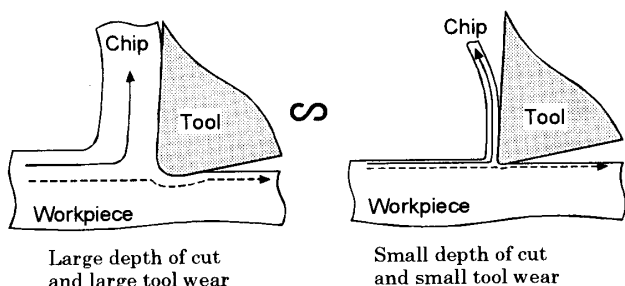


Fig. 7 Similarity of cutting process

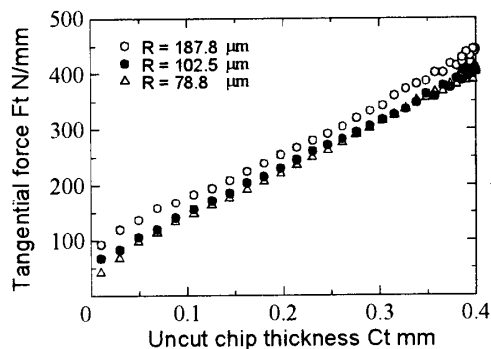
先丸みがともに n 倍になれば、エッジフォース成分と切削力も n 倍にならない。実際には、切取り厚さが結晶粒の寸法に近くなると連続体と見なすことはできないが、ここではこの相似則が近似的に成り立つものとする。

この切削プロセスの相似則を満たした上で、上述のような切取り厚さの変化に対する切削力の変化を正確に算出するため、ここでは次式の切削力モデルを提案する。

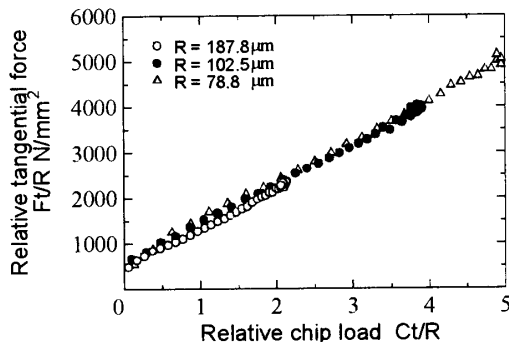
$$F_t = \{F_{et} + K_t \cdot C_t \cdot (1 + A_{1t} \cdot \exp(-C_t/A_{2t}))\} \cdot D_z \quad (1)$$

$$F_r = \{F_{er} + K_r \cdot C_t \cdot (1 + A_{1r} \cdot \exp(-C_t/A_{2r}))\} \cdot D_z \quad (2)$$

本モデル式は、まず切削力を刃先丸み部に働くエッジフォース成分と切削成分に分け⁶⁾、切削成分の係数すなわち被切削抵抗の刃先丸みによる寸法効果を指数関数で近似し⁴⁾、これに上述の相似則が成り立つように各係数を仮定したものである。ここで F_t , F_r は切削力の円周方向成分（主分力）および半径方向成分（背分力）であり、 K_t , K_r は切取り厚さが無限大のときの比切削抵抗を表し、被削材の硬さや工具形状などの影響を受けるパラメータであり、図に示すように漸近線の傾きを示す。 F_{et} , F_{er} は刃先に働くエッジフォース成分を表し、刃先の摩耗量や被削材の硬さに影響を受けるパラメータであって、図6に示す切片に対応する。 A_{1t} , A_{1r} は、被切削抵抗の寸法効果を表す係数で



(a) Without consideration of similarity



(b) With consideration of similarity

Fig. 8 Relationship between uncut chip thickness and tangential cutting force with different cutting edge roundness

あり、また相似則を満たすために摩耗の大きさに無関係であることから、摩耗の形態（形状や粗さ）に依存する係数であると考えられる。また、 A_{2t} , A_{2r} は摩耗量（相似則を満たすための制約）を表す補正係数であって、図6内に A_2 で示す寸法効果を表している。なお、 D_z は切削幅である。

ここで、前述した相似則について、実験的な検討を行った。まず、3段階に故意に刃先に丸みをつけた工具を用意し、その刃先丸みの半径を測定した。そして、それらの工具を用いて図6の場合と同じ条件で加工を行い、切削力（主分力）を測定した。その結果および測定した刃先丸みの半径 R を図8(a)にまとめて示す。図に示されるように、刃先丸みが大きくなるほどエッジフォース成分が増大し、寸法効果が著しくなっている。次に、主分力と切取り厚さの両方を刃先丸みで除した場合の関係を図8(b)に示す。図に示されるように、刃先丸みが異なる3つのデータが概ね同じ曲線上に重なることから、前述の相似則が成り立っているものと考えられる。

3.4 加工状態の推定方法 エンドミル加工は、図2に示したように工具回転位置によって切取り厚さが変化するプロセスである。それ故に、その切削力値は、上述したように刃先丸みや被削材の硬さ、工具取

付け角度, 静剛性等の多くの情報を含んでいる。そこで, これらの加工状態に関する情報を次のようにして切削力の測定値から抽出する。

ここでは, 静剛性は前述のようにして予め測定または推定されているものとし, 工具取り付け角度 (図 2 における工具刃先の回転位置 ϕ と主軸エンコーダのゼロ信号位置の角度差) を適当に仮定して 3.1 節で述べたように切取り厚さを算出する。次にこの値を式 (1), (2) に代入し, 諸パラメータを仮定して切削力を算出する。これらを X および Y 方向成分に変換して図 3 に示すような切削力を得る。各工具回転位置において, この切削力の推定値と測定値との差の 2 乗を積算する。さらに, この誤差総和を各パラメータで数値微分することにより, その最急降下方向を求める。各パラメータの値を最急降下方向に微小ステップ修正し, 再度切削力の推定と誤差の積算を行う。以上の計算を誤差が十分に小さくなるまで繰り返すことにより, モデル式内パラメータを同定する。具体的には, 各パラメータ値の変動がなくなって切削力の誤差 2 乗和が切削力の 2 乗和の 1% 以下に収束した後に繰返し計算を終了する。

この同定の際, 比切削抵抗の値 K_t, K_r は, 切取り厚さが無限大の時の比切削抵抗を表わしているのて, 工具摩耗量の影響は受けないはずである。また, パラメータ A_l は摩耗形態を表すパラメータであり, 刃先丸みの大きさには影響しないと考えられる。そこで, 同一切削条件の場合, 一度同定された比切削抵抗およびパラメータ A_l の値は以後の同定において固定値とし, 計算を簡略化する。

以上によって同定されるパラメータは, 工具取り付け角度, 比切削抵抗 K_t, K_r , エッジフォース F_{et}, F_{er} , 補正係数 $A_{lt}, A_{lr}, A_{2t}, A_{2r}$ である。この内, 比切削抵抗は主に被削材の硬さ, 比切削抵抗の比率は工具のすくい角とすくい面上の潤滑状態, エッジフォースは刃先の摩耗状態と被削材の硬さを表していると考えられる。このため, 工具の摩耗状態を推定するためには, エッジフォース成分から被削材の硬さ情報を取り除く必要がある。そこで, 次式に示すように, 主に被削材の硬さに比例すると考えられる比切削抵抗で除することにより, 刃先丸みの情報を抽出する方法を提案する。

$$\frac{\text{エッジフォース } Fe}{\left(\begin{array}{c} \text{被削材の硬さ} \\ \text{刃先丸み} \end{array} \right)} \div \frac{\text{比切削抵抗 } K_t}{\text{(被削材の硬さ)}} \propto \text{工具刃先丸み} \quad (3)$$

正確には, 比切削抵抗はすくい角やすくい面上での潤滑状態にも影響される。従って, 工具形状として既知であるすくい角, および上述のように同定される潤滑状態を考慮することにより, より正確に工具刃先丸みの情報を抽出し得るものと期待されるが, ここではこれらの影響を 2 次的なものと考えて無視する。

なお, ここでは取り扱わないが, 複数刃を持つ場合の偏心量や摩耗の形態についても同様の手法によって推定が可能であると考えられる。半径方向および軸方向の切込み量については, CAM から情報を得る方法も考えられるが, 上述のような同定方法によっても推定し得る可能性がある。

4. 工具摩耗量の推定実験

ここでは, 上述の手法を用いて実際に工具摩耗量の推定を行い, 本手法の可能性について検討する。加工条件は, 表 1 に示したように被削材を炭素鋼として主軸回転数を変化させた 2 条件と, 被削材をアルミニウム合金に変えた場合の計 3 条件とした。また, 各条件において 9 から 12 段階の摩耗量の工具を用いて切削力の測定およびパラメータの同定を行った。

4.1 各パラメータの同定 3.4 節で述べた最急降下法を用い, 図 3 に示す切削力測定値から切削力モデル内パラメータの同定を行った。同定後のパラメータを用いて切削力を算出した結果を同図内に合わせて示す。図に示されるように, 工具摩耗量の大小によらず, 切削力の測定値と計算値はよく一致しており, 前章で述べた誤差総和が十分に小さくなっていること, およびパラメータの同定が正しく行われたことが分かる。

4.2 工具摩耗量の推定 各パラメータの中で, 主分力方向のエッジフォース成分を同定した結果をまとめて図 9 に示す。横軸は, 工具顕微鏡を用いて測定した工具逃げ面の平均摩耗幅である。3 種類の加工条件において, それぞれ工具摩耗量が増加するにつれてエッジフォース成分も増加していることが分かる。しかしながら, 加工条件の違い, 特に被削材の違いによって両者の関係は大きく異なっている。これは, 主に被削材の硬さが異なるためであると考えられる。そこで, 式 (3) に示したようにエッジフォース成分を比切削抵抗で除した値と工具摩耗量との関係を求めた。その結果を図 10 に示す。図に示されるように, 切削速度や被削材質を変化させた場合でも, パラメータ F_{et}/K_t と工具摩耗量の関係は概ね一致している。

図 10 内の直線は, 全ての条件におけるパラメータ F_{et}/K_t と工具摩耗量 W_f (逃げ面摩耗幅) の関係を最小

二乗法によって近似したものであり、次式で表される。

$$F_{et}/K_t = 0.0594 W_f + 0.0137 \quad (4)$$

$$\therefore W_f = 16.84 F_{et}/K_t - 0.231 \quad (5)$$

以上より、加工中に測定される切削力からリアルタイムでパラメータ F_{et}/K_t を同定し、上式 (5) から工具摩耗量を推定すれば、異なる加工条件に対してデータベースを用いることなく工具摩耗量を推定し得る可能性がある。

今後は、平均化などによって図 10 に見られるばらつきを減少すること、工具形状やすく面上での潤滑状態を考慮すること、複数のねじれ刃を持つ工具および底刃を含めた加工に対応することなどが課題である。

5. 結 言

本研究では、加工条件の変化に対して膨大なデータベースを用意することなく、切削力の測定値をもとに、工具摩耗量などの加工状態を推定するための手法について検討を行った。ここで得られた成果は、主に下記のようにまとめられる。

- (1) エンドミル加工プロセスにおいて、十分な繰返し加工後でも弾性変形によって実切り厚さが大きくなって切削力が増大する現象を見出し、機械系の静的な変形を考慮して切り厚さを算出することで、切り厚さと切削力間の正確な関係が得られることを示した。また、この性質を利用し、送り速度を変化させた場合の切削力測定値から機械系の静剛性を推定し得ることを示した。
- (2) 切れ刃丸みと切込み量がともに n 倍になれば切削力も n 倍になる、という相似則を示し、これが近似的に成り立つことを実験的に確認した。
- (3) 刃先丸みを考慮し、上述の相似則を満たす切削力のモデル式を提案し、さらに上述の静的変形を考慮してエンドミル加工時の切削力を算出するモデルを構築した。
- (4) 上記モデルによる切削力の計算値が、実際のエンドミル加工時に測定される値に一致するようにモデル内の各パラメータを同定することで種々の加工状態を認識する手法を提案した。
- (5) 上記の加工状態の中で工具摩耗量について実証実験を行い、エッジフォースを被切削抵抗で除することによって、異なる加工条件に対してデータベースを用意することなく工具摩耗量を推定し得る可能性を示した。

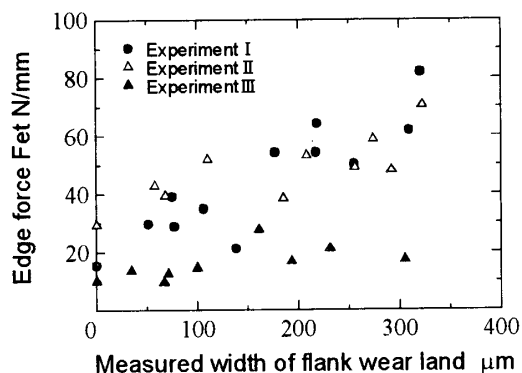


Fig. 9 Relationship between tool wear and edge force

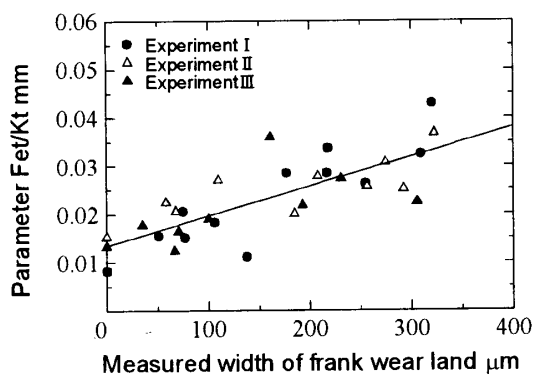


Fig. 10 Relationship between tool wear and F_{et}/K_t

最後に、実験を遂行する上でご協力を頂いた住友電工(株)の森良克氏に深謝いたします。なお、本研究はIMSプログラムの一部として行われたものである。

文 献

- (1) Toshimichi Moriwaki: Intelligent Machine Tool - Perspective and Themes for Future Development, ASME, PED-Vol.68-2, Manufacturing Science and Engineering (1994), 841-849.
- (2) Eiji Shamoto and Yusuf Altintas: Prediction of Shear Angle in Oblique Cutting with Maximum Shear Stress and Minimum Energy Principles, Trans. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 121 (1999), 399-407.
- (3) 山岡, 垣野, 佐藤: タップ加工用知能化工作機械システムに関する研究(第3報)-リアルタイム適応制御による難削材加工中の工具の折損防止と異常監視, 精密工学会誌, 68-9 (2002), 1226-1230.
- (4) 森脇, 社本, 高, 杉原: 切削力予測モデルに基づくフライス加工状態の認識(第1報)-最適化手法によるモデル内パラメータの同定と工具摩耗量の推定, 日本機械学会論文集中編, 61-586 (1995), 2592-2598.
- (5) Yusuf Altintas: Manufacturing Automation - Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design, Cambridge University Press.