日本機械学会論文集(C編)
66巻645号(2000-5)

研究展望

エンドミルによる加工精度に関する基本的問題と高速・高精度加工法について*

岩　部　洋　育*1

Fundamental Problems of Machining Accuracy by End Mill and High-Speed and High-Accurate Machining Method

Hiroyasu IWABE*2

*2 Niigata University, Dept. of Mechanical Engineering, Ikarashi 2-nocho, Niigata, Niigata, 950-2181 Japan

Key Words: Accuracy, Milling, Machine Tool, End Mill, High-Speed Machining, High-Accurate Machining

1. はじめに

エンドミルは，NCフライス盤やマシニングセンタの工具として各種部品加工に多用されている．また，最近開発された主軸回転数が毎分数万回転，速り速度が毎分数十mの高速加工機の工具としての重要性が高まっている．この種の加工機を用いるとこれまでにない高速加工が可能となり(1)，加工能率の大幅な向上が期待できるからである．

しかし，加工能率の向上は必ずしも高精度加工を実現することにはならない．切削力の影響を極力抑制するために，微小な切込みと送りによる仕上げ加工条件を用いてもである．その理由は，主軸回転数や送り速度の増加によって，従来考慮する必要のなかった工具の振れ回りによる誤差，指令値に対する追従遅れによる誤差等が増大するためである(2)．しかしながら，生産性を高める効果は大きな魅力であり，高速加工機は今後大幅に普及し，活用されることになると予想できる．その結果として高速加工機を用いた各種の高速・高精度加工法も試みられるであろう．しかし，そのためにも，ねじれ刃による基本的な切削過程や切削中における工具の挙動およびそれに基づく加工誤差生成機構を理解しておくことが大切であると考えている．

そこで本稿では，まずエンドミル加工による加工精度に関する基本的問題および関連するおもな研究について述べる．また，高速加工に特有な誤差要因について言及する．その後，高速・高精度加工のために試みたいくつかの加工法を提案し，今後の技術開発の方向を展望する上で参考に供したいと考えている．

* 原稿受付　2000年1月24日．
*1 正員，新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)．
E-mail: iwabe@eng.niigata-u.ac.jp

2. ねじれ刃による切削機構

2・1 ねじれ刃による切削過程　図1は工具半径 Re mm，ねじれ角 η deg. のねじれ刃による側面加工における切削過程を上向き切削により説明している．図では基本となる一枚刃の場合で示しているが，図1中の OO' は工具の中心軸であり，工具は切削に関与している切れ刃部分($B'C'$, BI, DI', $D'I''$, LH)のみを示し，その他は透視している．工具の時計方向の回転によって，切れ刃はまず工作物の点 C より切削を開始し，工具の回転に伴って $B'C'$, BI へと移動する．斜線部は各切れ刃による切削面積である．切削開始か

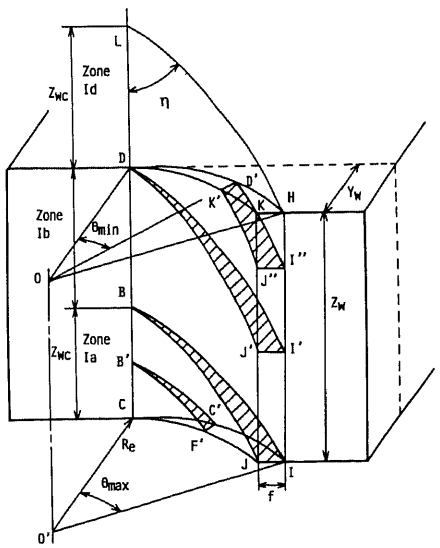


Fig. 1 Cutting process by helical edge (in case of up milling)

ら BI の位置まで(区間 Ia)切削面積は増大し，その後 DI' の位置まで(区間 Ib)最大値のまま一定となる．切れ刃は DI' の位置で CD を中心に1刃当たりの送りを幅とする加工面の創成を完了するが，この位置からは切削面積を減少させながら，LH の位置まで(区間 Id)切削を継続する．

ねじれ刃による切削面積 Ae mm^2 は，1刃当たりの送りを f mm/tooth，半径方向切込みを Yw mm とすると次式で与えられる．なお，θ_{max} および θ_{min} rad は工具の中心軸 OO' を中心とし，切削に関与している切れ刃の軸直角断面における CD からの回転角の最大値および最小値である．

$$Ae=\frac{Re\cdot Yw\cdot f(\cos\theta_{min}-\cos\theta_{max})}{\sin\eta} \quad \cdots\cdots(1)$$

図2(a)は横軸に図1の点 C を切削する時刻を基準とし，式(1)および図中の条件により計算した切削面積の変化を，上向き切削について示している．図2より切削面積は切削の進行につれて増加，一定および減少と変化するが，半径方向切込み Yw=6 mm 以上の条件では図1の区間 Ib がなくなるため，切削面積が一定となる範囲は存在しない．なお，n 枚刃の場合は $1/n$ 回転ごとに重ね合せればよく，次に述べる切削力に関しても同様である．図2(b)は加工面に直角方向の切削力の変化を示しており，計算により求めた切削面積の変化とよく対応している．一方，下向き切削においては，図2に示した切削面積および切削力の変化を，点 C を切削する時刻を基準に逆戻りさせた挙動となる．

2・2　切削力に基づく加工誤差生成機構　図3は4枚刃を用いて側面加工を行い，工具のほぼ1/2回転中における切削力［図3(a)］，工具の変位［図3(b)］および加工誤差［図3(c)］をそれぞれ加工

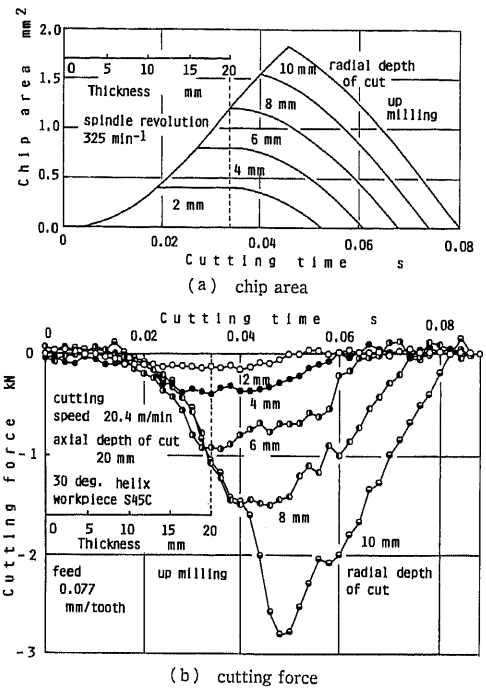


Fig. 2　Chip area and cutting force (in case of up milling)

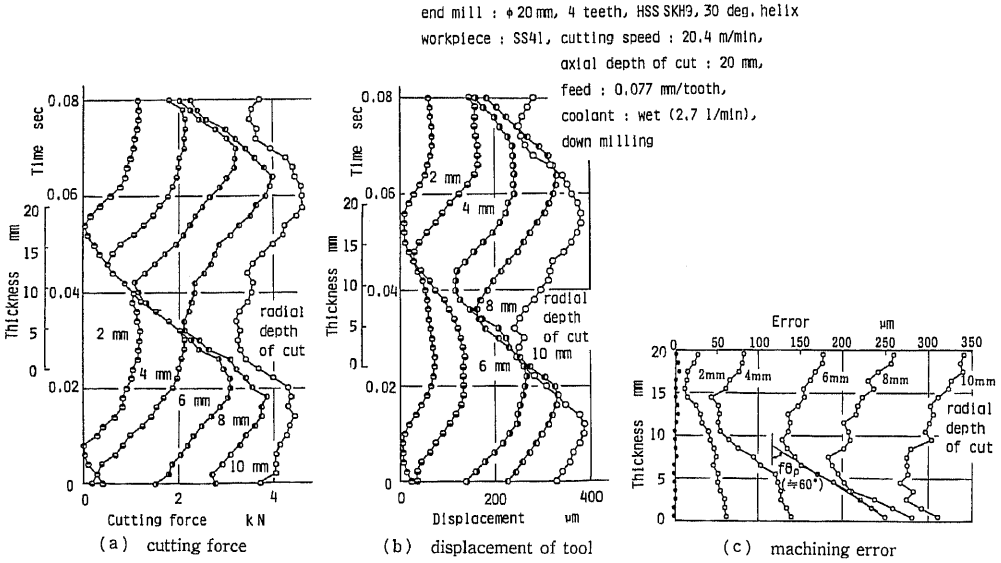


Fig. 3　Cutting force, displacement of tool and machining error (in case of down milling)

面と直角方向の成分に関して比較したものである．切削力は図2と同様でひずみ計を用いた工具動力計により測定し，工具の変位は工具の先端にリングを取付け，その外周にひずみ計を用いた板ばねを接触させて測定している．なお，図3(a)および(b)の縦軸は図3(c)に示す側面の各高さ位置を切れ刃が仕上げる時刻と一致させるために，図2(b)の横軸と縦軸が入れ代わった形となる．

図3において，各条件とも切削力の変動と工具の先端近傍で測定した変位の挙動がよく対応している．この工具の変位に，図3に示していないが工作物の変位が加算され，加工誤差が生じることになる．図3は下向き切削の場合であり，切削力によって工具は工作物から遠ざかる方向に変位するため，図3(c)に示すように削り残しの誤差が生じる．しかし，それぞれの条件における切削力が極小値を示す位置で工具は最も工作物側に近づくことになる．そのような時刻に創成された加工面の誤差は他の位置に比べて小さいため，中くぼみ形状を生じる．また，半径方向切込みによって図3(c)における中くぼみの位置が変化している．この理由は，重ね合せによって得られる切削面積の最小値の位置が変化するためである．

なお，加工面に生じる誤差形状は切削中におけるエンドミルの挙動に大きく影響されることがアメリカのNational Twist Drill and Tool社で行われた研究[3]やSchröderの報告[4]によって指摘された．報告書には切削中における工具の振れまわりと加工面の誤差形状の比較および切削方式と半径方向切込みによる誤差形状の分類も示されている．その後，藤井らによって加工面を創成する切れ刃点の軌跡が実験的に推定され，同時に切れ刃点における工作物との相対変位に基づく加工面の創成機構が明らかにされた[5]．同様の発想によりKlineらも側面加工による加工誤差の予測を行っており，切削モデルに基づいて切削三分力を推定するとともに，工具および工作物の変形解析を行い，両者の相対変位による加工誤差の予測値が実験値とほぼ一致することを示している[6]．

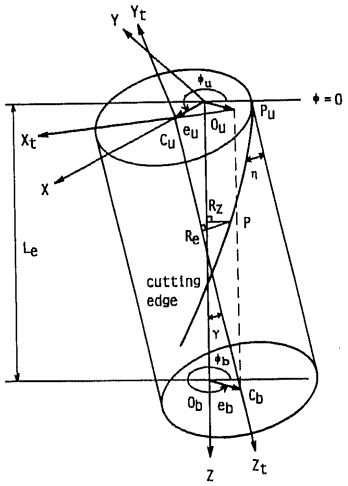


Fig. 4　Eccentric model of helical end mill

2・3　仕上げ条件による加工誤差

2・3・1　工具の偏心による影響　エンドミルを機械の主軸に取付ける際に，工具の中心軸を主軸に一致させることは困難である．本稿では工具の中心軸の不一致を広義の偏心と呼ぶことにし，図4にこの偏心が加工面の創成に及ぼす影響を解析するためのモデルを示している．図4において，工具の中心軸はZtであり，偏心の三次元的な状態は図4中に示す四つのパラメータ(eu, eb：切れ刃の上端，下端における偏心量 μm, ϕe, ϕb：ベクトル eu, eb の偏角 rad)によって定められる．なお，四つのパラメータの同定方法および後述する切れ刃の包絡面の計算方法については，文献(7)に詳しく述べられている．

工具の偏心によって主軸(Z)から切れ刃点Pまでの実半径Rzは，Z軸方向の各位置で異なるため，仕上げ条件で加工しても側面は平坦に仕上げられないことになる．図5はアルミニウム合金(JIS 5052 s)を用い，図5中に示す仕上げ条件により側面加工を行った一例である．図5より左側に示した加工面の中央で大きくくぼんでいることがわかる．工具の偏心量は切れ刃の上下端でそれぞれeu=10.7およびeb=9.4 μmであり，特別大きな値ではない．しかし，切れ刃の回転によって創成される包絡面はピア樽形状をしており，この形状が加工面によく転写されている．図5中のEとσは予測誤差とその標準偏差およびz mmは上下面を加工した工具の突出し長さである．

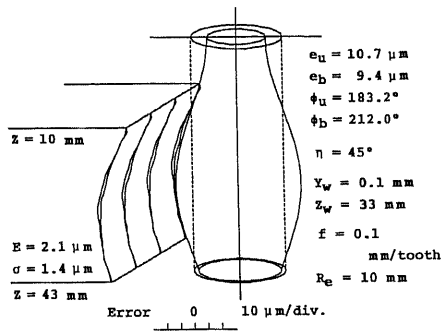


Fig. 5　Envelope surface by cutting edge and shape of machined surface

2・3・2　工具逃げ面の粗さによる影響　エンドミルによる加工面には送り方向にツールマークが残り，幾何学的な最大高さは $Rth=f^2/(8\cdot Re)$ で与えられる．$Re=10$ mm，$f=0.1$ mm/tooth を代入すると，$Rth=0.125$ μm と小さく，通常の条件では十分な精度である．しかし，軸方向には工具逃げ面の粗さが転写し，最大高さは次に示す図6によれば $Ry=2.7$ μm であり，上記の約20倍の値にも達している[8]．図6は工具逃げ面の粗さ曲線(破線)を反転させ，加工面の粗さ曲線(実線)と比較している．両粗さ曲線がほぼ一致しており，加工面の粗さに及ぼす工具逃げ面の粗さの影響が明らかである．

2・4　高速加工に特有な加工誤差

2・4・1　工具の振れ回りによる影響　高速回転した工具の振れ回り量を直接測定することは難しい．そこで，平行な加工面の両側をそれぞれ向かい合う位置で主軸回転数を一致させながら直線加工し，加工面の距離を測定することによって工具の振れ回り量を推定した．図7はその結果である．図7より主軸の角速度 ω の2乗に比例して振れ回り量が増大している[9]．図7では2種類の機械AおよびCで比較しているが，後者の値が小さく，機械Aに比べてCにおける取付時のアンバランスが小さかったことを示している．なお，機械Cは空気軸受主軸を使用しており，16 000 min^{-1} 以下の回転数で実験することができていない．

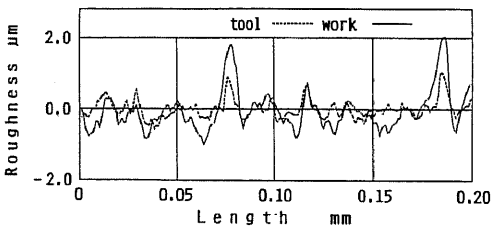


Fig. 6　Influence of tool flank roughness on machined surface

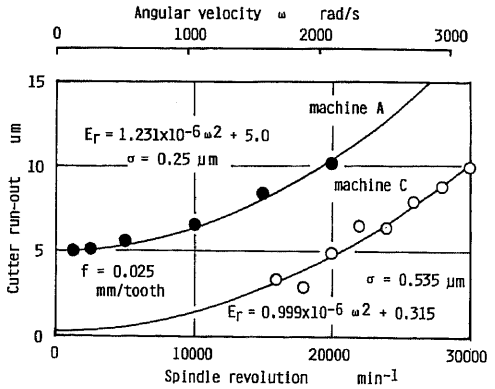


Fig. 7　Relationship between spindle revolution and cutter run-out

2・4・2　追従遅れによる影響　通常の三軸制御加工機を用いて円加工の工具経路を指令すると，工具の移動方向は時々刻々に変化する．さらに，指令送り速度が高くなり，加工する円の半径が小さくなると，指令値に対してドループと呼ばれる追従誤差によって次式で与えられる半径誤差 Ed mm が発生する[10]．Ed は加工面の法線方向の誤差であり，外周を加工される円においては半径が減少することになる．

$$Ed=\frac{F^2(Tp^2+Ts^2)}{2\cdot R\cdot 60^2} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここで F mm/min は速り速度，R mm は工具中心経路の半径，Ts および Tp s はそれぞれ位置決めループおよび平滑化ループの時定数である．式(2)に $F=4\,000$ mm/min，$R=25$ mm，$Ts=Tp=0.03$ s を代入すると，$Ed=160$ μm となり大きな誤差が生じる．そのため，フィードフォワード補償が採用され，誤差はゲイン α を用いた次式により求められる[10]．

$$Ed=\frac{F^2\cdot Tp^2}{2\cdot R\cdot 60^2}(1-\alpha^2) \quad \cdots\cdots(3)$$

$\alpha=0.7$ および先に示した条件を式(3)に代入すると $Ed=41$ μm となり，大幅に誤差が改善する[2]．さらに誤差 Ed を 2.5 μm 程度に抑制するためには，仕上げ時の送り速度を $F=1\,000$ mm/min 以下で指令すればよい．

3.　高速・高精度加工に向けて

これまでの結果を踏まえ，比較的容易に実現可能な三つの高速・高精度加工法を提案し，以下に説明する．

(1)　切削条件を均一化する方法
(2)　単一切れ刃による方法
(3)　切れ刃の高精度化による方法

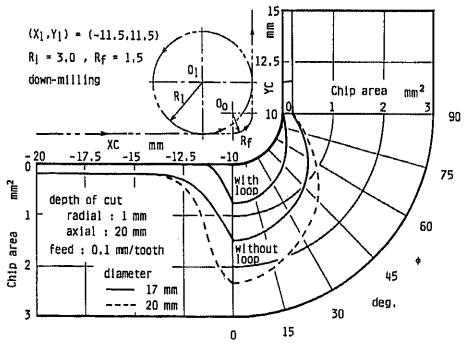


Fig. 8　Chip area difference in corner cut and effect by looped path milling

3・1 切削条件を均一化する方法　仕上げ面より一定の削り代が前加工面に与えられていても，その位置の曲率半径が異なると工具半径が一定なため，切削状態は大きく変化することになる．一例として直線と1/4円弧で定義されるコーナ部の内側を加工する場合を図8に示す．図8において，二点鎖線は工具経路であり，実線および破線は最大切削面積の変化である．図8よりコーナ部では切削面積の急増が避けられない．切削条件を均一化するには最大切削面積を抑制すればよく，工具経路を点 O_1 を中心に一度ループさせてから加工する方法が提案されている[11]．この方法によって，コーナ部加工時の最大切削面積は大幅に低減する．さらに点 O_0 を中心とした半径 Rf の円を指令し，工具経路に2度目のループをさせてからコーナ部を仕上げると加工精度は大きく改善する[12]．

一方，スクロール形状のように加工面の曲率半径が連続的に変化する場合，最大切削面積を一定にするために，(a)送り速度を制御する，(b)半径方向切込みを制御するおよび(c)主軸回転数を制御する三つの方法が考えられ，詳細は文献(13)に述べられている．高速加工機による加工を前提に考えると，(a)および(b)の方法が現実的な選択となる．さらに，除去される切りくずの形状を等しくさせようとすれば，(b)の方法を用いることになるが，新たに前加工面の定義をしなければならないことが欠点である．なお，具体的な加工実験によって，(a)および(b)の加工法はともに加工精度の向上に有効であることが報告されている[14][15]．

3・2 単一切れ刃による方法　この方法は切れ刃を1枚とし，さらにその先端の一部を用いて行う加工法である．実験に用いた工具の刃先を図9(a)に示しているが，この工具を主軸と直角方向に送ると切削現象は正面フライス加工的となり，微小な z 軸方向の切込みを繰返すことによって，薄壁形状の高精度加工を実現している[16]．一方，工具を主軸と平行に送るとボーリング加工的になり，微小ピックフィード Pf の繰返しによって同様に高精度に側面を仕上げることができる[17]．図9(b)は後者の方法を用いて側面を仕上げ，通常加工法と形状誤差の比較を行ったものである．なお，工具は直径10 mm，二枚刃，ねじれ角30°の超硬ソリッドエンドミルより刃先2 mmが残るようにして他の切れ刃部を削り落としている．切削条件は図9中に示すとおりの仕上げ条件であるが，図9より軸方向送り加工によって形状誤差が大きく改善することがわかる．

また，仕上げ面の粗さは，空気軸受主軸を搭載した機械Cにおいて，ピックフィード Pf=0.1 mm以下の条件では送りおよび軸方向とも最大高さ Ry がともに1 μm以下の高精度な加工面を実現している[17]．なお，この加工法は工具経路および加工時間が長くなるため，最終の仕上げ加工に用いることが望ましい．

3・3 切れ刃の高精度化による方法　通常の側面加工による加工面には，送り方向に平行で上面から下面まで多数の筋が観察できる．この原因は2・3・2項で述べたとおりであるが，工具の逃げ面を高精度に仕上げることによって，図6に示した粗さ曲線の最大高さ Ry を改善することが可能となる．そこでダイヤモンドホイールを用いて工具AないしCの逃げ面を仕上げ，市販の工具Dとともに側面加工を行い，加工面の粗さを比較して図10に示している．横軸に工具の逃

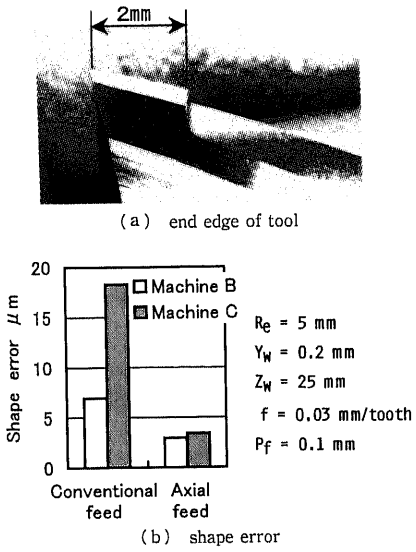


Fig. 9 Tool used and shape error of surface machined by axial feed milling

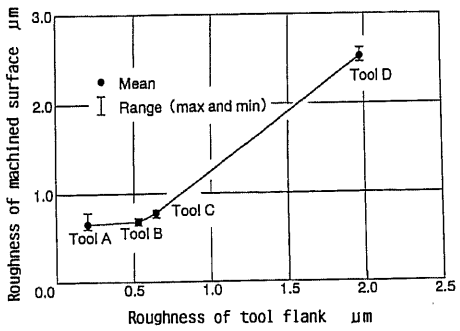


Fig. 10 Improvement of surface roughness using tool with high accurate flank

げ面の最大高さをとり，縦軸は各工具による加工面の軸方向の最大高さの平均値および最大値と最小値の変動幅である．図10より工具の逃げ面を1μm以下の高精度に仕上げることによって，最大高さが1μm以下の高精度な加工面を実現できることが明らかである．なお，工具Aの逃げ面はELID研削法[19]を活用してより高精度に仕上げているが，実験装置の制約で逃げ角が0°となっており，加工面の粗さのさらなる改善は得られていない．

4. 終わりに

ねじれ刃エンドミルによる切削機構と加工精度に関する基本的問題および関連する研究について述べた．また，高速加工において発生する誤差についても言及した．さらに，それらを基礎知識として，現状で実現できる高精度な加工面を得る2，3の方法を提案した．今後生産現場においては高能率かつ高精度な加工が一層求められ，日本国際工作機械見本市に出展されてから20年を経過していない高速加工機の利用が，急速に進むものと思われる．

高速加工機を有効に利用しながら，生産現場でも加工面の寸法誤差，形状誤差および仕上げ面粗さがともに1μm以下となる高精度な加工面を達成するためには，少なくとも工具逃げ面の粗さ，広い回転数領域における主軸の回転振れおよびホルダにおいては工具取付時の偏心が，それぞれサブミクロンのレベルにあることが要求される．そのような高い目標を実現するために，工作機械，工具，保持具等の各メーカにおける独自の技術開発や開発研究，公的研究機関での基礎研究，さらには両者の共同研究等を今後も継続して進めることがとても重要であると考えており，それらの成果に期待したい．

最後に本文がこの分野に関心のある方々に参考になれば幸いである．

文　献

(1) Schulz, H. and Moriwaki, T., High-Speed Machining, *Annals of CIRP*, 41-2(1992), 637-643.

(2) 岩部洋育・竹本和博・今井純一，エンドミルによる高速加工に関する研究(輪郭加工による加工精度と誤差要因)，機論，63-612，C(1997)，2878-2885.

(3) Accuracy of Milled Surface, Part 2, Effect of End Mill Deflection, *Metal Cutting*, 9-2(1961) 2-9.

(4) Schröder, K. H., Fertigungsungenauigkeiten beim Schaftfrasen, *Industrie Anzeiger 97. Jg. Nr. 55v. 9. 7.*, (1975), 1207-1209.

(5) 藤井義也・岩部洋育・鈴木雅晴，切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度の関係(第1報)ー加工誤差生成機構ー，精密機械，43-7(1977)，807-813.

(6) Kline, W. A., Devor, R. E. and Shareef, I. A., The Prediction of Surface Accuracy in End Milling, *Trans. of ASME, J. Engineering for Industry*, vol. 104, (1982), 272-278.

(7) 岩部洋育・三星宏，ねじれ刃エンドミルの偏心が加工精度に及ぼす影響，精密工学会誌，61-6(1995)，834-838.

(8) 岩部洋育・後藤隆夫，エンドミルによる仕上げ加工に関する研究ー逃げ面の仕上げ面粗さに及ぼす影響ー，1991年度精密工学会春季学術講演会講演論文集，(1991)，723-724.

(9) 岩部洋育・嶽岡悦雄・宮口孝司・賀井治久，高速ミーリングの現状と今後，精密工学会誌，64-6(1998)，808-812.

(10) 鞍掛三津夫，高速化に対応するNC装置ー高速・高精度の32ビットAI-CNC，型技術，4-9(1989)，68-71.

(11) 岩部洋育・藤井義也・斎藤勝政・岸浪建史，エンドミルによるコーナ部加工に関する研究ーコーナ部における切削機構の解析と新しい加工法ー，精密工学会誌，55-5(1989)，841-846.

(12) 岩部洋育・藤井義也，エンドミルによるコーナ部加工に関する研究(第2報)ー切削力の加工精度に及ぼす影響と精度改善についてー，精密工学会誌，57-11(1991)，105-110.

(13) 岩部洋育・島田智晴，エンドミルによるスクロール形状部品の高精度・高能率加工に関する研究(第1報，最大切削面積と仕上げ面粗さに基づく高精度・高能率加工法の提案)，機論，61-586，C(1995)，1184-1191.

(14) 岩部洋育・永原雄野・正木努・後藤隆夫，空気静圧主軸搭載の工作機械によるスクロール形状の高速加工に関する研究(第2報)ー切込み制御による高精度加工法ー，1997年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集，(1997)，53.

(15) 岩部洋育・坂垣内貴保・松橋英明，極座標方式によるスクロール形状部品の高速・高精度加工に関する研究，2000年度精密工学会春季学術講演会講演論文集，(2000)，169.

(16) 岩部洋育・飯田茂雄，エンドミルによる薄壁形状の高速・高精度加工に関する研究，1997年度精密工学会春季学術講演会講演論文集，(1997)，230.

(17) 岩部洋育，エンドミルによる高速加工における加工精度に関する研究ー軸方向送り加工による加工精度の改善ー，1999年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集，(1999)，164.

(18) 岩部洋育・大瀬戸隆之・後藤隆夫・嶽岡悦雄・石川淳，工具逃げ面のELID研削による仕上げ面粗さの改善に関する研究，1996年度精密工学会春季学術講演会講演論文集，(1996)，133-134.

(19) 大森整，超精密鏡面加工に対応したELID研削法，精密工学会誌，59-9(1993)，1451-1457.