

ボールエンドミル加工の幾何的切削機構解析に基づく 加工面生成に関する考察*

寺井 久宣^{*1}, 郝 明 暉^{*2}
吉川 浩一^{*3}, 水垣 善夫^{*3}

Study on Generation of Machined Surface Based on Geometric Analysis of Machining Mechanism for Ball-Nosed End Milling

Hisanobu TERA^{*4}, Minghui HAO,
Koichi KIKKAWA and Yoshio MIZUGAKI

^{*4}Department of Control and Information System Engineering, Kitakyushu National College of Technology,
5-20-1 Shii, Kokuraminami-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 802-0985 Japan

This paper clarifies the geometric generating mechanism of chip and machined surface in consideration of the tool orientation in ball-nosed end milling. Firstly the cutting cross section area A_g is proposed as the index of cutting state. It is one when the cutting edge generates the designed surface in the bottom. It changes according to the tool orientation, and affects the machining accuracy. Secondly the characteristic related with the tool orientation in several machining, for example contour cutting and scanning cutting, has been clarified. Thirdly there are pointed out the geometric difference of cutting mechanism between ball-nosed end milling and the other end milling.

Key Words: Ball-Nosed End Milling, Undeformed Chip Thickness, Geometrical Analysis, Machining Mechanism, Tool Orientation

1. 緒 言

ボールエンドミル加工は、切れ刃が球面上に配されており、工具中心を常に加工面からボール半径分離することで比較的容易に工具経路が生成できる利点があるため、金型などの複雑な形状を有する自由曲面加工によく用いられている。一方、球面上に切れ刃が配されているために、切れ刃各点での切削速度や切取り厚さが異なる。さらに、特徴的なこととして曲面加工に用いるため、3軸加工5軸加工に関わらず、工具軸は被削材表面に対して傾斜していることが挙げられる。したがって切削機構を考える上で被削材に対する工具軸の傾斜、すなわち工具姿勢を常に考慮する必要があるということである。ボールエンドミル加工は切削機構が最も複雑な切削加工方法の一つであると考えられる。

3次元CADや多軸加工用CAMの発達に伴い、複雑形状の金型や機械部品の機械加工が一般的になってきている。ボールエンドミル加工は今後ますます使用頻度が増加すると予想され、高精度高能率化を目指し、数々の研究・開発が進められている。特に、ボールエンドミルは工具径に比して工具長が長いので、切削抵抗の解析を基にした工具のたわみや振動が注目され、近年になって数多くの解析を中心にした研究がなされている。しかしながらいづれも、従来のスクエアエンドミル加工に関する研究の延長線上としてボールエンドミル加工を捕らえており、上記のようなボールエンドミル加工特有の切削機構を十分に考慮されている例は皆無である。特に切れ刃と被削材との干渉に関しては、スクエアエンドミルでは有効な近似式をそのまま流用している例が多く、工具回転中心近傍での加工には適用できない例が多い。また、工具姿勢についても傾斜方向について制限がある場合が多い。切削抵抗や切削温度などの解析については従来の研究成果は適用できるにしても、その基礎となる切れ刃と被削材の干渉に関しては、まだ十分に解明されていないと思われる。

これまでのボールエンドミル加工に関する幾何的理

* 原稿受付 2002年9月4日。

^{*1} 正員, 北九州工業高等専門学校(☎802-0985 北九州市小倉南区志井5-20-1)。

^{*2} 正員, 九州共立大学工学部(☎807-8585 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)。

^{*3} 正員, 九州工業大学工学部(☎804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

E-mail: terai@kct.ac.jp

論解析としては、岸浪らによる切削速度および作用角など切れ刃の幾何的挙動に関する詳細な解析⁽¹⁾⁽²⁾が端緒である。その後、加工面創成機構については、桑原らに端を発する切れ刃軌跡を追跡する手法による一連の解析⁽³⁾⁻⁽⁶⁾、あるいは萩らによる加工面上の一点を通過する切れ刃位置を特定する手法による解析⁽⁷⁾⁽⁸⁾その他⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾がある。最近になって、Ikuaらが詳細な解析を行って、工具姿勢に関しては制限がある⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

著者らは既に自由曲面のボールエンドミル加工における切れ刃と被削材との干渉量を幾何的に計算し、幾何的切屑生成機構を明らかにする解析手法⁽¹³⁾を開発している。また、工具回転中心近傍の複雑な切削機構についても詳細に解析可能としている⁽¹⁴⁾。

これらの幾何解析手法を基に、ボールエンドミル加工における切屑生成機構の特徴と加工面生成に及ぼす影響について詳細に検討した。特に、工具姿勢に関しては、その切削機構に与える影響について明らかにすることは工学的工業的にも極めて有意義である。

2. 加工面創成点通過時切削断面積

2.1 加工面創成点 自由曲面のボールエンドミル加工においては、球面上に配された切れ刃が回転しながら断続的に設計形状に沿って加工している。したがって設計形状上に実際にボールエンドミルの切れ刃が通過する点は離散的に存在していることになる。この設計形状上を切れ刃が通過する点を本稿では「加工面創成点(point of machined surface generation)」と称することとする。加工終了後の被削材上にはこの加工面創成点近傍の一刃当たり送り量×ピッチフィード量の大きさの領域が残って加工面全体を形成している。このことから加工後の形状精度に関しては、加工面創成点を通過する瞬間の切れ刃と被削材の干渉状態を正確に把握することは極めて重要であると考えられる。

自由曲面上における任意の一点を加工している時の被削材法線方向を基準としたボールエンドミルの幾何的關係を図1に示す。法線方向に対する工具姿勢は、送り方向傾斜角 ω_f とピッチフィード方向傾斜角 ω_p で表わす。幾何的には加工面創成点はボールエンドミルのボール中心から被削材表面へ下ろした垂線の足である。図1の幾何的關係から、切れ刃が加工面創成点を通過するときの工具回転角 θ_G は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_G &= \tan^{-1} \frac{\tan \omega_p}{\sin \omega_f} + \pi \quad (\omega_f \neq 0, \omega_p \neq 0) \\ &= 0 \quad (\omega_f = \omega_p = 0) \end{aligned} \right\} \quad \dots (1)$$

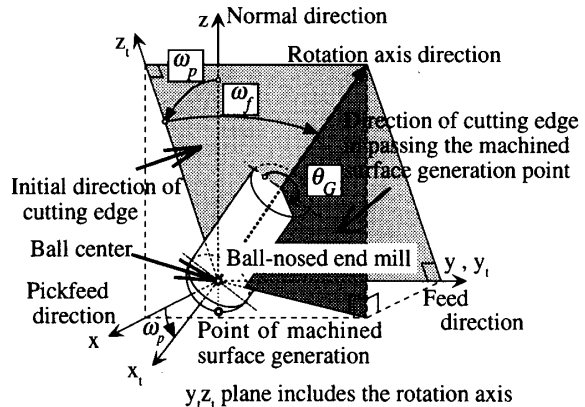
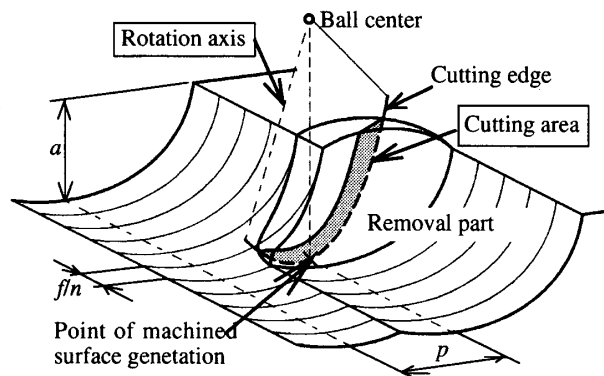
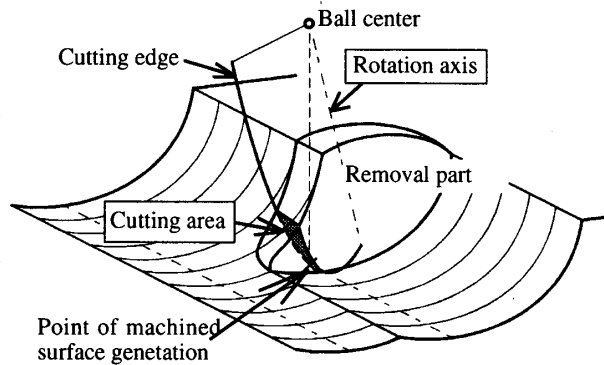


Fig. 1 Definition of tool inclination angle and θ_G



(a) A case of cutting area being large



(b) A case of cutting area being small

Fig. 2 Cutting area at the point of machined surface generation

2.2 切削断面 図2は同一加工条件で工具姿勢が異なると、切れ刃が加工面創成点を通過するときの切削断面を模式的に示している。なお、本稿においては説明を容易にするために直刃を対象とする。工具姿勢が異なると、切れ刃による除去部分の形状は全く同一ではないが通常の切削条件の範囲ではほぼ同じである。さらにボール中心と加工面創成点の位置も同一である。しかし、工具回転軸の傾斜方向が違うので切れ刃がこの除去部分を掃引する方向が異なり、加工面創成点を通過する瞬間の切削断面は図2に示す通り異なったものとなる。

2.3 工具姿勢と加工面創成点通過時切削断面積

図3に切れ刃が加工面創成点を通過するときの切削断面積 A_g の解析例を示す。なお、解析に用いる切削条件を表1に示す。図3(a)は $p=1.0\text{mm}/\text{track}$ でのピックフィード加工、(b)は溝加工で工具進行方向前面全てで加工している場合を示している。また、本解析では球面上の切れ刃のみを対象としているため、切削領域がボールエンドミル側面切れ刃に及ぶ工具姿勢での解析結果は示していない。図3(a)から、通常のピックフィード加工においては、 A_g が大きくなる工具姿勢の範囲が存在することがわかる。本解析条件では、 A_g の大きさは10倍以上違っている。通常、切削断面積が大きいと、ほぼ比例して切削抵抗も大きくなりボールエンドミル加工においては工具の弾性変形が大きくなる。ただし、切削抵抗の向きも影響するため、 A_g の大きさが直接加工精度に影響するとは限らないが、このように極端に A_g が大きくなる工具姿勢での加工は避ける方がよいと推測される。以上より、 A_g は、工具姿勢を検討する上での指標の一つとして十分意義があるものと考えられる。したがって、図3(b)の溝加工の場合は、工具軸を送り方向のみに傾斜させると A_g が大きくなることを示している。

図3(a)(b)より、 A_g は $\omega_p=\omega_f=0$ の原点を中心とした放射線状に分布している。これは A_g に対する切れ刃の回転角度の影響が大きいことを示している。このことから加工面創成点通過時の切れ刃回転角 θ_G と A_g との関係を図4に示す。図4より、 $\pi/2 \leq \theta_G \leq 3\pi/2$ の間、すなわち $\omega_f > 0$ の場合は、 A_g は θ_G とほぼ1対1の関係になっている。図2より、切削条件が同じであれば除去部分形状はほぼ同一なので、直刃の場合は θ_G が同じであれば工具軸を含む断面でこの除去部分を切断する断面形状もほぼ同一になるためであると考えられる。

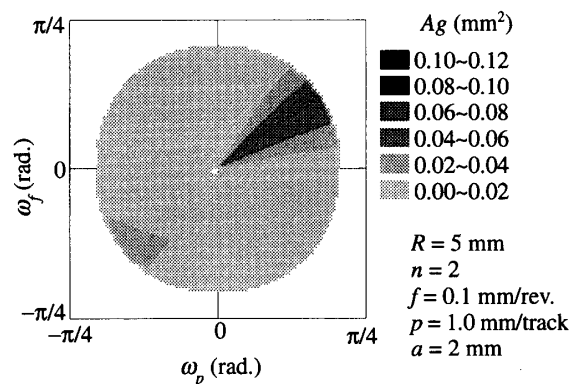
2.4 等高線加工と走査線加工 自由曲面の加工に際して工具経路の決定には様々な手法が提案されているが、等高線加工と走査線加工が一般的である。そこで、3軸制御加工におけるこの2つの加工方法の A_g について検討してみる。

等高線加工において、加工点の法線方向に対する工具姿勢は、常に $\omega_f=0$ である。したがって、図3の A_g 分布を参考にすると、切削条件に関わらず $\omega_f=0$ では常に A_g は小さいことがわかる。したがって、等高線加工は A_g に関しては有利な加工方法であると考えられる。

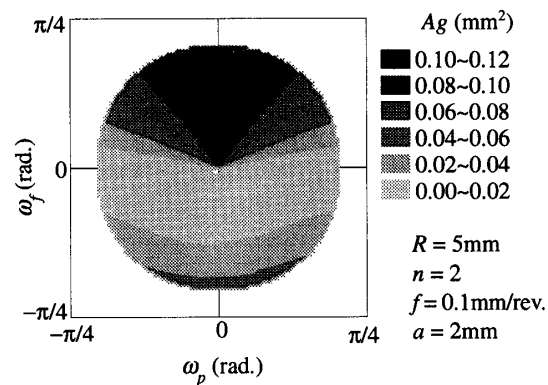
一方、走査線加工では加工点の法線方向に対する工具姿勢は様々な方向を向くことになり、加工箇所によっては A_g が大なる部分も生じる。加工形状は全く同一であっても、このように加工方法によって A_g の大きさが異なる可能性があることになる。

Table 1 Notations

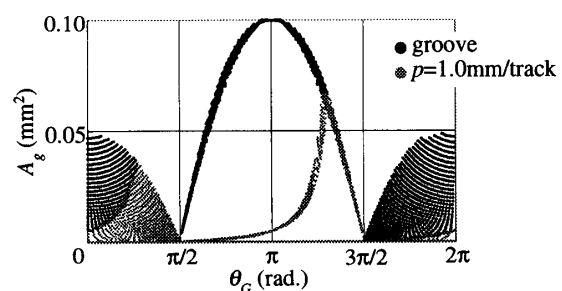
| | |
|--------------------------------------|------------|
| Tool geometry : | |
| Ball radius (mm) | R |
| Number of blades | n |
| Cutting conditions : | |
| Feed per revolution (mm/rev.) | f |
| Depth of cut (mm) | a |
| Pickfeed (mm/track) | p |
| Tool inclination : | |
| Inclination angle to pickfeed (rad.) | ω_p |
| Inclination angle to feed (rad.) | ω_f |



(a) Example of pickfeed machining



(b) Example of groove machining

Fig.3 Distribution of A_g Fig.4 Relationship between θ_G and A_g

3. 工具姿勢と切屑生成機構

3-1 切れ刃干渉領域 通常のピックフィード加工における加工面の模式図を図5に示す。切れ刃が一回転中に干渉する面は3つに分類でき、それぞれの面との境界を(i),(ii),(iii)で標記しそれぞれ以下のように定義する。

- (i) 直前の切れ刃による切削面との境界
- (ii) 平面と近似した加工前の表面との境界
- (iii) 円筒面で近似する一つ前のパスによって加工された表面との境界

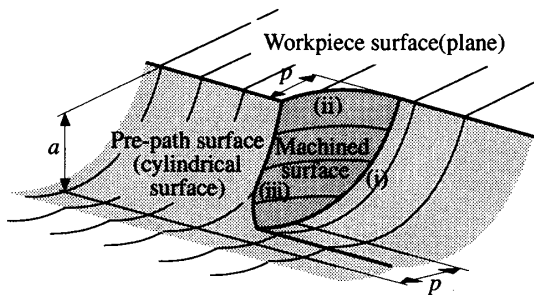


Fig. 5 3 types of interfere surface and boundary line

図6は、 $R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=0.1\text{mm/rev.}$, $p=1.0\text{mm/track}$, $a=2.0\text{mm}$ の条件で、工具姿勢 $\omega_f=0, \pm\pi/9\text{rad.}$, $\omega_p=0, \pm\pi/9\text{rad.}$ それぞれの場合の切れ刃干渉領域を工具回転軸に垂直な平面への投影で示している。境界は、それぞれの面と切れ刃との干渉を幾何解析により求めている⁽¹²⁾。境界(i),(ii),(iii)で囲まれた領域が切れ刃干渉領域である。各工具姿勢毎に加工面創成点を□印で示している。工具回転中心と加工面創成点を結んでいる直線が加工面創成点通過時の切れ刃の位置である。この切れ刃が切れ刃干渉領域と重なっている部分の断面積が A_g である。

同一切削条件で、除去部分の形状が同様であっても工具姿勢が異なると、関与する切れ刃位置や一回転の間における干渉する角度範囲も大きく異なる。たとえば、 $\omega_p < 0$ では送り方向に対して工具の後ろ側で切削している。また工具先端が干渉領域内にあると先端近傍の切れ刃は全周にわたって干渉している。

以上より、ボールエンドミル加工においては工具姿勢によって切れ刃干渉領域が大きく異なるため、切屑排出や工具変形の方に大きく影響を及ぼすことがわかる。

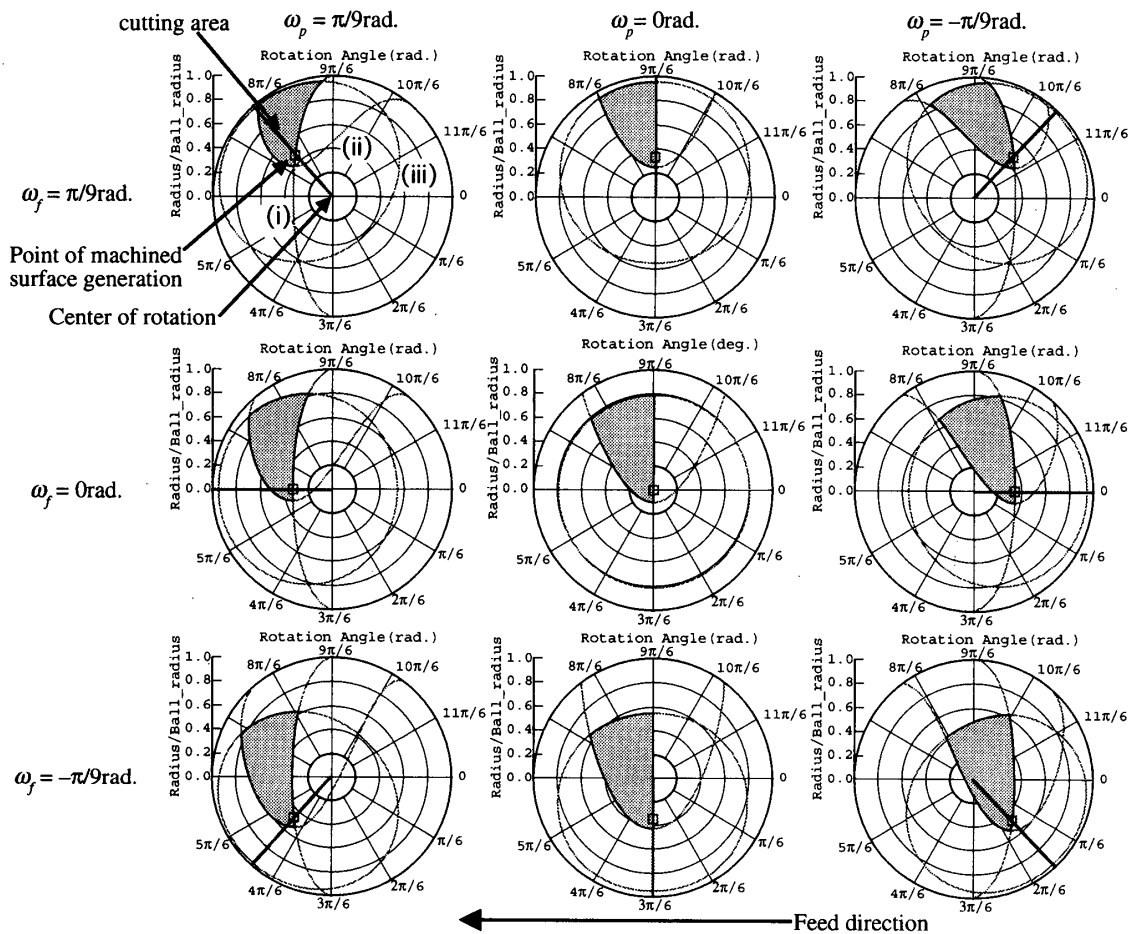


Fig. 6 Diagram of cutting edge interference area
 $R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=0.1\text{mm/rev.}$, $p=1.0\text{mm/track}$, $a=2.0\text{mm}$

3.2 切取り厚さ分布 図7に同一切削条件で工具姿勢が異なる場合の切れ刃一回転における切れ刃各部分の切取り厚さ分布を示す。本解析条件は、送り方向に対して右側にピックフィードをかけているので、いわゆる「ダウンカット」である。したがって、図7(a)に示すように、切取り厚さの大きな方から切れ刃が切り込み、次第に小さくなる削り方と考えられている。しかしながら、図7(b)では切れ刃全体からみると切り込み厚さが小さい方から切り込んでおり、いわゆる「ダウンカット」とは異なる削り方になっている。また、図7(c)の様に全周にわたって削る場合もあり、単純に「ダウンカット」とか「アップカット」とは呼べない削り方になっている。また、図7(c)の破線で挟んで示している部分の切れ刃では、一回転する間に2回削っている。また、図7(c)の場合の切削断面積の変化を図8に示す。切削断面積のピークが一回転中に2回あり、工具挙動が複雑になると推測される。

このようにボールエンドミル加工では工具姿勢によって切れ刃各部分における切取り厚さの変化の様子が異なっている。したがって、フライス加工やスクエアエンドミル加工と同様の考え方では必ずしも整理できず、これまでに示した幾何的特性を十分に考慮して検討する必要がある。

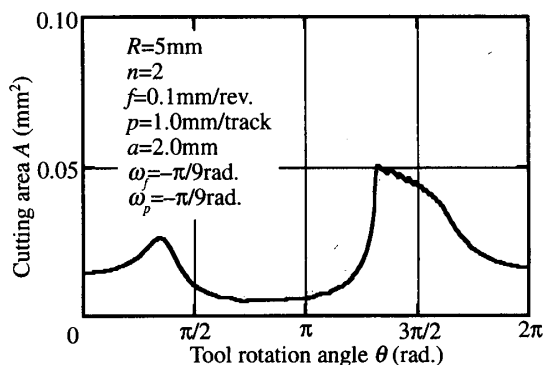


Fig. 8 Cutting area diagram

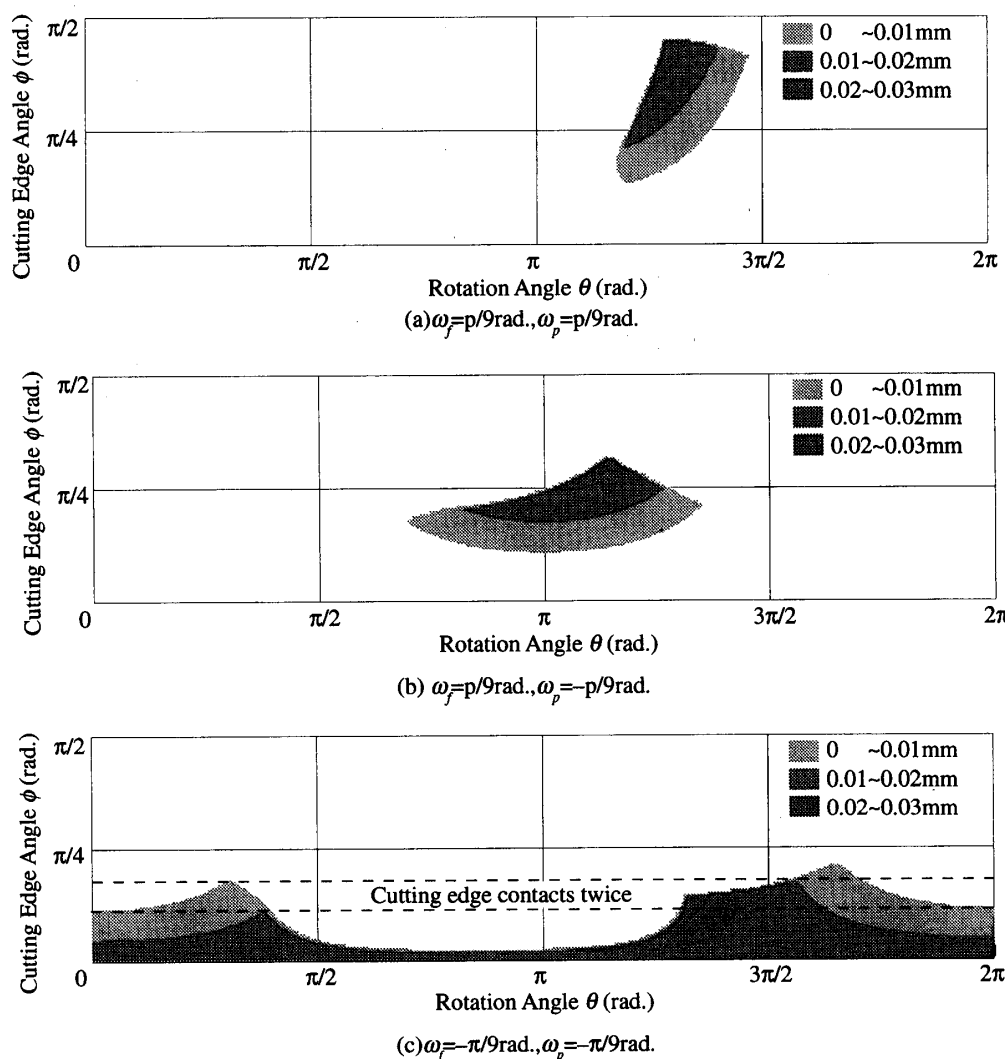


Fig. 7 Distribution of undeformed chip thickness
 $R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=0.1\text{mm/rev.}$, $p=1.0\text{mm/track}$, $a=2.0\text{mm}$

4. 結 言

ボールエンドミル加工の幾何的切屑生成機構解析に基づいて切屑生成機構について詳細に検討した結果, 下記の知見を得ることができた.

- 1) ボールエンドミル加工においては, 除去部分形状変化に与える工具姿勢変化の影響が大きい. 特に, 工具先端近傍切れ刃の切削領域に対する位置によって, 除去部分の形状が大きく異なる.
- 2) 工具姿勢が加工精度に与える影響について検討するための指標の一つとして加工面創成点通過時の切削断面積 A_g を提案した. A_g は切れ刃が仕上げ面を生成する瞬間の切れ刃に加わる力にほぼ比例し, 工具系の弾性変形の大きさにも比例すると考えられる. 加工精度には弾性変形の向きが直接には影響するが, 少なくとも A_g が小さい方が弾性変形は小さく加工精度の面からは有利である. A_g に関して等高線加工と走査線加工について比較すると, 等高線加工の方が, 常に A_g が小さい工具姿勢で加工しており, 加工精度の面で有利な方法であると推察される.
- 3) 送り方向とピックフィード方向が同一であっても, 工具姿勢によって切れ刃各部における切り取り厚さの推移が変化する. すなわち, 切削条件上一般的にアップカットまたはダウンカットと呼ばれる条件であっても, 切れ刃各部の切り取り厚さに着目すると必ずしもそのようには表現できないことが明らかになった.
- 4) ボールエンドミル加工における工具姿勢の影響の重要性を指摘した. ただしその切屑生成機構は複雑であるため, 容易に事前検討できる幾何解析が有効である.

文 献

- (1) 岸浪建史・鈴木裕・斎藤勝政, 円弧切れ刃ボールエンドミルのすくい面切削速度成分の解析 - 円弧切れ刃ボールエンドミルの切削機構に関する研究 (第1報) -, 精密機械, **46**, 10 (1980) 1303.
- (2) 岸浪建史・鈴木裕・斎藤勝政, 円弧切れ刃ボールエンドミルの切削作用角の解析 - 円弧切れ刃ボールエンドミルの切削機構に関する研究 (第2報) -, 精密機械, **47**, 4 (1981) 459.
- (3) 桑原晴義・江川庸夫・寺井久宣・藤井英治・外村保, ボールエンドミル加工の面粗さの改善, 1989年度精密工学会春季大会学術講演論文集, (1989) 725.
- (4) 江川庸夫・寺井久宣・松本隆博・木下俊之・高林信利, 同時5軸制御加工機の開発, 三菱重工技報, **27**, 2 (1990) 139.
- (5) 是田規之・江川庸夫・黒田基文・渡部健・伊井良治, ボールエンドミル加工における表面粗さの生成過程の解析, 精密工学会誌, **59**, 9 (1993) 1537.
- (6) 趙曉明・堤正臣・是田規之・葛東方・陳亮, 5軸制御加工におけるボールエンドミルの最適傾斜角決定方法, 精密工学会誌, **62**, 7 (1996) 1019.
- (7) 郝明暉・浅尾見通・寺井久宣・水垣善夫, 球面のボールエンドミル加工における加工面創成機構の理論解析, 精密工学会誌, **65**, 10 (1999) 1476.
- (8) 郝明暉・浅尾見通・寺井久宣・水垣善夫, 球面のボールエンドミル加工における加工面創成機構の理論解析 (第2報), 精密工学会誌, **66**, 7 (2000) 1150.
- (9) 高崎昭・阿部忠之・神田敬一・松岡和彦・渡辺一樹, 高速型彫り技術の開発 第1報 - ボールエンドミルにおける切削メカニズムの解析 -, トヨタ技術, **37**, 2 (1987) 221.
- (10) Krzysztof Marciniak, Geometric Modelling for Numerically Controlled Machining, Oxford University Press, (1991) ISBN 0-19-856353-1.
- (11) Bernard W. Ikua, Hisataka Tanaka, Fumio Obata and Satoshi Sakamoto, Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces -I theoretical analysis, Precision Engineering, **25**, 4 (2001) 266.
- (12) Bernard W. Ikua, Hisataka Tanaka, Fumio Obata, Satoshi Sakamoto, Takeyasu Kishi and Tatsuo Ishii, Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces -II Experimental verification, Precision Engineering, **26**, 1 (2002) 69.
- (13) 寺井久宣・郝明暉・吉川浩一・水垣善夫, 多軸ボールエンドミル加工における切り取り厚さの理論解析, 日本機械学会論文集(C編), **67**, 654 (2001) 263.
- (14) 寺井久宣・郝明暉・吉川浩一・水垣善夫, ボールエンドミル加工における工具回転中心近傍の切削機構に関する幾何的考察, 日本機械学会論文集(C編), **68**, 672 (2002) 2457.