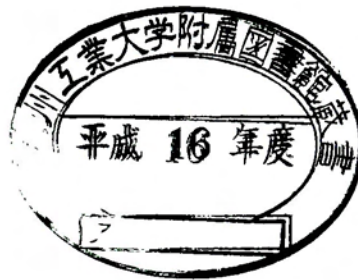


377.5

K-11

2-73

ボールエンドミル加工の切取り厚さ解析と 幾何シミュレーション



平成 15 年 2 月

寺井 久宣

九州工業大学附属図書館



0010516250

目次

第1章 序章	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	3
1.3 本論文の構成	4
<第1章の参考文献>	5
第2章 切取り厚さ解析	9
2.1 はじめに	9
2.2 解析モデル	11
2.2.1 想定する加工状態	11
2.2.2 座標系および工具姿勢の定義	12
2.2.3 切取り厚さの定義	13
2.3 切取り厚さ解析	15
2.3.1 切れ刃干渉点が先行切れ刃切削面上にある場合	15
2.3.2 切れ刃干渉点が被削材表面上にある場合	18
2.3.3 切れ刃干渉点が前パス加工面上にある場合	20
2.3.4 ねじれ角の考慮	21
2.3.5 計算の流れ	22
2.4 解析結果と考察	23
2.4.1 解析環境	23
2.4.2 切取り厚さ分布	24
2.4.3 切れ刃干渉領域	33
2.4.4 除去部分形状	35
2.5 第2章のまとめ	36
<第2章の参考文献>	37

第3章 工具回転中心近傍の切屑生成機構	38
3.1 はじめに	38
3.2 切れ刃退行現象	40
3.3 切れ刃退行現象発生範囲	42
3.4 切れ刃退行現象発生時の干渉量	44
3.5 切れ刃退行現象回避条件	46
3.6 表面粗さに与える切れ刃退行現象の影響	50
3.6.1 実験方法	50
3.6.2 実験結果	51
3.6.3 切れ刃退行現象発生範囲との関係	53
3.7 第3章のまとめ	56
<第3章の参考文献>	57
第4章 幾何解析に基づく加工面創成機構	58
4.1 はじめに	58
4.2 加工面創成点	59
4.3 切削断面形状	61
4.4 工具姿勢と加工面創成点通過時切削断面積	63
4.5 楕円面を加工する場合の解析例	67
4.5.1 走査線加工時の A_g の変化	67
4.5.2 等高線加工時の A_g の変化	72
4.6 切削条件の影響	74
4.8 予め工具傾斜を与えた場合	79
4.9 第4章のまとめ	80
<第4章の参考文献>	81
第5章 結論	82
5.1 本論文の要約	83
5.2 今後の課題	85

謝辞

付録

ボールエンドミル加工切取り厚さ幾何解析プログラム

第1章 序 章

1. 1 研究背景

近年、ソリッドモデルを用いた3次元CAD技術の発達によって、意匠性や機能集約性を積極的に盛り込んだ、複雑な3次元自由形状を有する製品の設計が可能となってきた。また、工作機械も多軸制御加工機や複合加工機など、高度な制御機構を有して複雑形状の加工が可能になってきている。これにともない自動車や家電製品は短期間に頻繁にモデルチェンジされ、多品種の金型製作のためにボールエンドミル加工の需要は高まっている。近年、中国などのアジア諸国における金型加工コスト低減により、日本国内の金型産業の生き残りのために、日本独自の高度な金型加工技術をもって差別化をはかる必要がある。これら複雑形状の製品を生産する金型の高能率で高精度な加工を実現し、さらにレベルを向上させることが、現在技術的な注目を浴びている。

ボールエンドミル加工は、3次元自由形状に対して、多く用いられている加工方法である。自動車の外鋼板などのプレス用金型や家電品などプラスチック製品の射出成形用金型などは、ボールエンドミル加工される典型的な適用例である。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⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。特に、ボールエンドミルは工具径に比して工具長が長いため、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、近年になって解析を

中心にした数多くの研究がなされている。

実切削実験による試行錯誤的な事前検討の工程を削減させ、製品開発の立ち上げや納期短縮のために、加工シミュレーションは重要な技術の一つである。多くの加工シミュレーションは、工具切れ刃と被削物との相対的干渉の幾何的理論解析と、これに基づいた切削温度や切削抵抗などの物理的解析からなると考えられる。ボールエンドミル加工では、切れ刃上の各点での回転半径が違うので、その移動軌跡が大きく異なり、工具回転角度とともにその干渉量も変化する。さらにボールエンドミル加工では通常工具回転軸は加工点法線方向に対して傾斜しており、その切れ刃上の点の軌跡さらには切屑生成機構はさらに複雑である。したがって、幾何的理論解析については、まだ十分に解明されているとは言えない。このような複雑な切屑生成機構を有する加工方法は他には無く、ボールエンドミル加工の最も大きな切削機構上の特徴であり、従来より解析を困難にさせている原因でもある。

ボールエンドミル加工における切れ刃の切取り厚さについては、フライス加工やスクエアエンドミル加工に関する計算⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾の延長線上としてボールエンドミル加工を捕らえて計算されている例が多い⁽⁵⁾⁽¹²⁾⁻⁽¹⁸⁾。例えば、図 1. 1 に示すように、一刃当たりの送り量を f とすると、切れ刃の回転角度 θ 、切れ刃位置を示す角度 ϕ から式 (1. 1) によって、切取り厚さ h は近似的に求められる。

$$h \doteq f \sin\theta \cos\phi \quad \dots \dots \dots (1.1)$$

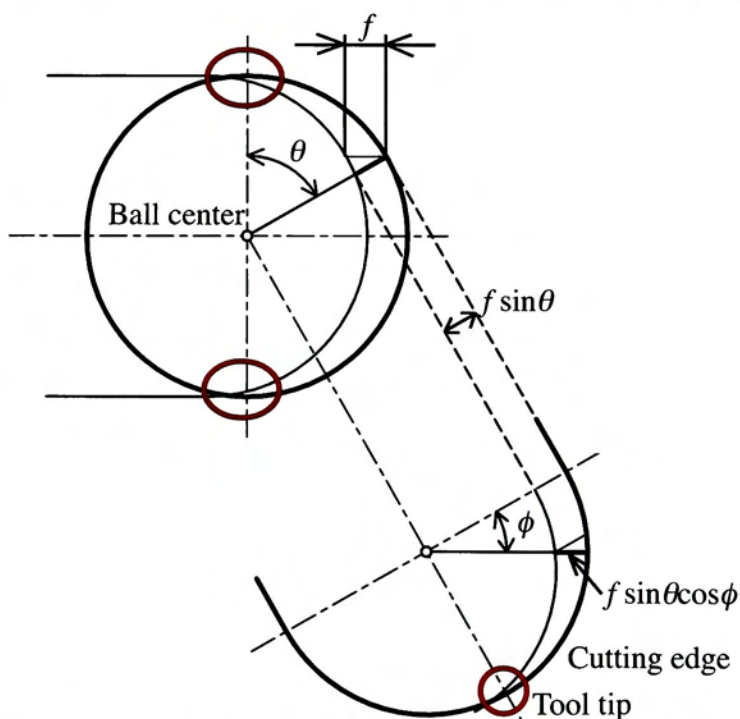


Fig. 1.1 Sample of approximate calculation of undeformed chip thickness

式(1.1)は取扱が容易であり、切取り厚さが大きい部分では良い近似値が得られる。しかし、 $\theta=0\text{rad}, 2\pi\text{rad}$. または $\phi=\pi/2\text{rad}$. の工具先端では、図1.1より切れ刃が被削材と干渉しているにも関わらず $h=0$ となる。そのため切れ刃と被削材の干渉の境界部分や工具解析や先端での計算ができない。したがって、これらの境界部分の影響を無視できる場合や工具先端部分が切削に関与しない場合には便利である。しかし、切削機構を詳細に検討するには不向きである。

工具姿勢が切削機構に与える影響については、切削抵抗⁽¹⁴⁾や工具寿命⁽⁶⁾⁽⁷⁾との関係が実験的に検討されている。幾何的な検討は、岸浪らが切れ刃軌跡や切削速度との関係を定式化している⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾が、切取り厚さは求められていない。Ikuaらが、切取り厚さも含めて、工具姿勢との関係と幾何的に示している⁽²¹⁾⁽²²⁾が、傾斜方向に制限がある。また、適正な工具姿勢については、工具経路生成の観点から工具干渉を回避するための手法が数多く提案されている。しかしながら、切削現象そのものの検討に基づいた適正工具姿勢については、上記の他、鈴木ら⁽²³⁾や森重ら⁽²⁴⁾の研究など実験に基づいた定性的なものも多く、定量的な指標や考え方は示されていない。

また、ボールエンドミル加工において問題視されていることの一つに、工具回転中心近傍の切れ刃による加工面のいわゆる「荒れ」が挙げられる。経験上ボールエンドミル加工の際には工具回転中心近傍の加工はできるだけ避けるようにと考えられている⁽⁴⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾。従来から、ボールエンドミル加工においては切れ刃逃げ面からの接触の有無について議論がなされており、近年になって、詳細に検討されている。例えば、岸浪らが切れ刃の切削速度を詳細に検討し、切れ刃の逃げ面から被削材に接触する「ラビング現象」逃げ面とすくい面が同時に被削材に食い込む「押し込み現象」の発生範囲を明らかにしている⁽¹⁷⁾。しかしながら、切れ刃と被削材との干渉量については明らかにされていない。他に、高崎らも、実験的もしくは経験的に切れ刃逃げ面からの接触を指摘している⁽⁴⁾。桑原らに端を発する一連の研究⁽²⁵⁾⁻⁽²⁸⁾では、切れ刃の軌跡を追跡し、加工面形状を求め、工具回転中心近傍の切れ刃による削り残しを定量的に示し、表面粗さについて詳細に検討している。また、郝らは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⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾によって表面形状を詳細に解析し、その中で逃げ面の接触について明らかにしている。しかしながら、いずれの検討においても、工具回転中心近傍における切れ刃と被削材との干渉量や逃げ面との接触を回避する切削条件や工具姿勢については検討されていない。

以上より、ボールエンドミル加工の切削機構については、今後以下に示す特徴の検討が必要である。

- 1) 切れ刃各部の切取り厚さの正確な算出
- 2) 工具回転中心近傍の切れ刃と被削材との干渉
- 3) 適正な工具姿勢を検討するための切削機構に基づいた考え方

1. 2 研究目的

本研究では、これまで十分に明らかにされていなかったボールエンドミル加工における切屑生成機構を幾何的に明らかにすることを目的とする。自由曲面を対象にして、加工面上の任意の点を加工しているとき、切れ刃上の任意の点における切取り厚さを幾何的に正確に算出する方法を明らかにする。その際、ボール半径、切り込み、送り量、ピッチフィード、ねじれ角といった切削条件と加工点法線方向に対する工具姿勢を考慮する。

以上の切取り厚さ解析を基にして幾何シミュレーションを行ない、従来よりボールエンドミル加工で問題点として指摘されている工具回転中心近傍における切れ刃と被削材との干渉について明確にする。

さらに、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、工具姿勢適正化に関する指標を提案する。

1. 3 本論文の構成

第1章では、本論文の研究背景ならびに研究目的について述べている。

第2章では、ボールエンドミル加工の幾何的切取り厚さ解析の考え方ならびに解析方法について詳細に説明している。その際、切削条件や工具姿勢によって変化する切れ刃と被削材との干渉領域の算出方法についても説明している。切取り厚さ解析結果に基づいて、切削断面積、切削長さ、除去体積などの幾何シミュレーションを行ない、ボールエンドミル加工の切屑生成機構における幾何的な特徴について明らかにしている。

第3章では、ボールエンドミル回転中心近傍における、切れ刃と被削材との干渉について詳細に述べている。特に、回転中心近傍において正常な切削作用がなされておらず、「切れ刃退行現象」と名付けている現象が発生することを示し、その発生機構とそれを回

避するための考え方を明らかにし、切れ刃退行現象を回避するための工具姿勢の範囲を定量的に示した。また、切れ刃退行現象発生時の切れ刃と被削材との干渉量解析についても述べている。さらに、加工実験により加工面の表面粗さに与える「切れ刃退行現象」の影響について明らかにして、工具姿勢の影響について示している。

第4章では、加工面創成機構について述べている。加工面創成点を通過するときの切削断面に着目し、その面積と切削条件との関係を明らかにしている。また、楕円面加工を例にして工具経路による上記断面積の変化と加工精度との関係について述べ、加工精度の観点から、工具姿勢を適正化する指標を提案している。

第5章では、本研究結果にもとづく考察を行ない、最後に本論文の要約と今後の課題について述べている。

第1章の参考文献

- (1) 細井俊明・星鐵太郎, うず巻状刃先をもつボールエンドミルの切削作用, 日本機械学会論文集 (第3部), 44, 378(1978-2)722-731.
- (2) 藤井義也・岩部洋育, ボールエンドミルによる切削力曲線と加工精度との関係, 精密機械, 48, 5(1982-5)649-654.
- (3) 青山英樹・岸浪建史・斉藤勝政, 楕円ボールエンドミルの開発と切削性能に関する研究, 精密工学会誌, 53, 3(1987-3)461-466.
- (4) 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 (1987-12) 221-233.
- (5) 藤井義也・寺井丈浩, ボールエンドミルシミュレータに関する研究 - 切削抵抗解析 -, 精密工学会誌, 54, 12 (1988-12) 2301-2306.
- (6) 高津戸光雄・貴志浩三, ボールエンドミルによる傾斜最適送りの実現, 日本機械学会論文集 (C編), 56, 521(1990-1)189-194.
- (7) 高津戸光雄・古沢利明・高田昇・貴志浩三, 傾斜最適送りによるボールエンドミル加工に関する研究, 精密工学会誌, 56, 2(1990-2)299-304.
- (8) 内藤国雄・大庫和孝・小長哲郎・阿部忠之・神田敬一・松岡和彦, 金型の高品位・高能率仕上切削法の開発, 精密工学会誌, 59, 4(1993-4)649-654.
- (9) 竹内芳美・長坂学・森重功一, ボールエンドミルの先端切れ刃・側面切れ刃を併用した5軸制御加工, 精密工学会誌, 61, 4(1995-4)561-565.
- (10) A Treatise on Milling and Milling Machine, The Cincinnati Milling Machine Co.
- (11) たとえば益子正巳ほか, フライス削りとフライスの設計, 大河出版 (1964) 6.
- (12) G.Yücesan and Y.Altuntas, Prediction of Ball End Milling Forces, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 118, 1 (1996-2) 95.
- (13) Hsi-Yung Feng and Chia-Hsiang Menq, A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 118, 4 (1996-11) 461.
- (14) H. El Mounayri, A. D. Spence and M. A. Elbestawi, Milling Process Simulation - A Generic Solid Modeller Based Paradigm, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 120,

2(1998-5)213-221.

(15) Y. Altintas and P. Lee, Mechanics and Dynamics of Ball End Milling, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 120, 4(1998-11)684-692.

(16) Ismail Lazoglu and Steven Y. Liang, Modeling of Ball-End Milling Forces With Cutter Axis Inclination, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122, 1(2000-2)3-11.

(17) B. M. Imani and M. A. Elbestawi, Geometric Simulation of Ball-End Milling Operations, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123, 2(2001-5)177-184.

(18) Rixin Zhu, Shiv G. Kapoor and Richard E. DeVor, Mechanistic Modeling of the Ball End Milling Process for Multi-Axis Machining of Free-Form Surface, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123, 3(2001-8)369-379.

(19) 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 (1980-10) 1303-1310.

(20) 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 (1981-4) 459-465.

(21) 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 (2001-10) 266-273.

(22) 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 (2002-1) 69-82.

(23) 鈴木裕・山崎和雄・星鐵太郎・黒宮義久, 金型実時間加工用数値制御システムの開発(第2報) —実時間工具経路生成について—, 精密工学会誌, 53, 12 (1987-12) 1952-1958.

(24) 森重功一・加瀬究・竹内芳美, C - S p a c e を用いた5軸加工のための工具経路生成法, 精密工学会誌, 62, 12 (1996-12) 1783-1787.

(25) 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.

(26) 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 (1990-3) 139-142.

- (27) 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 (1993-9) 1537-1542.
- (28) 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 (1996-7) 1019-1105.
- (29) 郝明暉・浅尾晃通・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 (1999-10) 1476-1480.
- (30) 郝明暉・浅尾晃通・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 (2000-7) 1150-1154.
- (31) Krzysztof Marciniak, Geometric Modelling for Numerically Controlled Machining, Oxford University Press, (1991) ISBN 0-19-856353-1.

第2章 切取り厚さ解析

2.1 はじめに

現在、旋削やフライス削りをはじめ様々な切削加工法に関して、切削抵抗や切削温度などの物理的解析が可能となり、工具寿命や加工精度などを予測して適切な切削条件を設定したり、様々なトラブルをシミュレーションしてその対策設定などに有効に使われている。これらの解析に際して、工具材や被削材の機械的物理的性質とともに、工具の切れ刃と被削材との干渉量すなわち切取り厚さおよび切削断面形状は、切削機構上最も重要な因子である。切れ刃各部における切取り厚さ分布と、加工進行と共に変化する切削断面形状の推移を、実用上有効な精度で求める必要がある。しかしながら、通常の種類々の切削加工については、この切取り厚さや切削断面形状は比較的容易に計算することができるために、特に注目されることは無かった。

例えば、旋削や形削りなどの連続切削加工では、切削中の切取り厚さ分布と切削断面形状は一定であり、切れ刃形状が分かっているならば、切り込みと送りで切取り厚さ分布が求められ、加工中切削断面形状も変化しない。フライス加工などは、断続切削であり、加工中に切取り厚さは変化するが、切取り厚さに対して、切れ刃の回転半径が大きいいため、切れ刃各部での軌跡の違いは無視できる。したがって、切取り厚さも比較的単純な近似計算で求めることができ、切れ刃各部での切取り厚さには通常大きな違いは無い。ドリ

ル加工は切れ刃各部の軌跡が異なるが、切削中の切取り厚さ分布は一定で変化しない。

したがって、以上のような切削加工において、切取り厚さ分布や切削断面形状の推移については、手軽に計算した上で、各種物理的解析の内容そのものに注力できる。

ところが、ボールエンドミル加工では、工具の切れ刃が回転中心を含む球面上に配されている。この工具が回転しながら送られるために、切れ刃各部でその回転半径が違うので軌跡が大きく異なる。したがって、切れ刃各部での被削材との干渉機構が異なり、切取り厚さ分布および工具一回転中の切削断面形状の推移が複雑に変化することになる。ちなみに、スクエアエンドミルでは、切れ刃は中心部には無く回転中心からほぼ一定の距離にあるため、切れ刃各部では位相が違うのみで軌跡は同一である。そのため、比較的単純な近似計算で切取り厚さを求めることができ、切削断面形状についても切れ刃各部で均等に推移するのみである。これに対し、ボールエンドミル加工の切取り厚さ計算は複雑であり、正確に求めている例は無い。

例えば、近年金型加工などの3次元形状の切削加工が増加してきて、ボールエンドミル加工の切削抵抗や工具の動的挙動などに関した数多くの物理的解析をもとにした切削シミュレーションがなされるようになってきている⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。しかし、切取り厚さの計算については、いずれもスクエアエンドミルで用いられる近似式⁽⁹⁾をそのまま流用しており、工具の外周近傍の切れ刃による切削にしか適用できず、実際上は制限が多い。中には近似式であることのことわりも無く使用されている例もある。

したがって、ボールエンドミル加工においては、切取り厚さに関しては安易な近似計算ではなく正確な幾何解析によって求める必要がある。ボールエンドミル加工は、3次元形状の加工に用いられるため、加工面に対して工具回転軸が様々な方向に傾斜している。したがって、切取り厚さの幾何解析においても、工具姿勢を正確に考慮できる必要がある。現在、切取り厚さそのものについては、著者以外にIkuaらが、幾何的解析を試みている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が、傾斜方向が送り方向のみか、もしくは送りに垂直方向のみに制限されており、任意の工具姿勢については適用できない。

以上のように、ボールエンドミル加工の需要が高いにも関わらず、その幾何的切削機構は、いまだに明確にされていない。したがって、任意の工具姿勢で任意の工具切れ刃位置における切取り厚さの幾何解析手法を明らかにする必要がある。

2. 2 解析モデル

2.2.1 想定する加工状態

本解析の目的は、図2.1に示すような曲面のボールエンドミル加工において、工具が被削物上の任意の点を通過する時の任意の切れ刃位置での切取り厚さを求めることである。しかし、実際には加工中における工具回転の位相は制御されていないため、ボールエンドミル工具が被削物上の任意の点を通過する時の厳密な切れ刃位置は特定されない。したがって、解析対象とする任意の点近傍において、切れ刃が工具1回転間に通過する範囲内では、送り方向、送り速度、工具姿勢の変化は小さいとみなし、工具1回転間はこれらの値は一定であると仮定する。

以上の仮定を基に本章においては、さらにピックフィード方向は接平面内で法線方向と送り方向各々に垂直な方向であると近似し、工具1回転間は被削物上の任意の点における接平面に平行な平面加工と見なせる場合を対象とする。

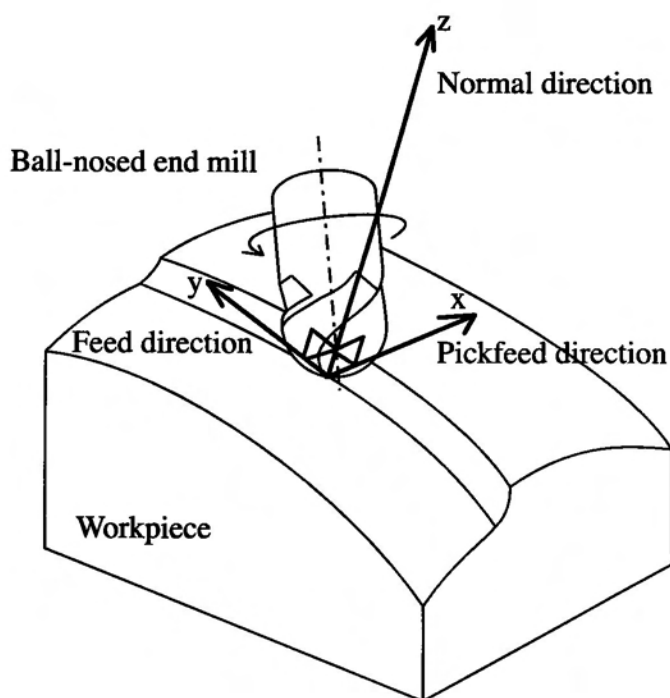


Fig. 2.1 Ball-nosed end milling

2・2・2 座標系および工具姿勢の定義

図2. 2に本解析で用いる座標系を示す。原点Oはボールエンドミル工具のボール中心であり、工具とともに移動する。解析の対象とする被削物上の点における法線方向をz軸とし、送り方向をy軸とする。このyz平面に垂直で右手系となるようにx軸を定め、これをピックフィード方向と称することとする。実際のピックフィードは必ずしもx軸方向とは一致しないが、前項の様な仮定に基づいて近似的に平面加工と見なすためこのように定義する。工具はその回転軸に対して左ねじ方向に回転するため、以上のようにピックフィード方向を定義すると、正のピックフィードを与える場合は、見かけ上、上向き削り (up cut) になり、負の場合が下向き削り (down cut) になる。

O-xyz座標系において、図2. 2のように傾いている工具姿勢を次の2つの傾斜角で定義する。工具回転軸とy軸を含む平面がyz平面となす角を、「ピックフィード方向傾斜角」と呼び ω_p で表す。この平面内でy軸方向の傾きを「送り方向傾斜角」と呼び ω_f で表す。さらにz軸をy軸周りに ω_p 回転させた方向を z_t 軸としy軸と同一方向を y_t 軸とするO- $x_t y_t z_t$ 座標系を定義する。したがって、O- $x_t y_t z_t$ 座標系において工具回転軸は $y_t z_t$ 平面内にあり、 z_t 軸に対して ω_f 傾斜している。

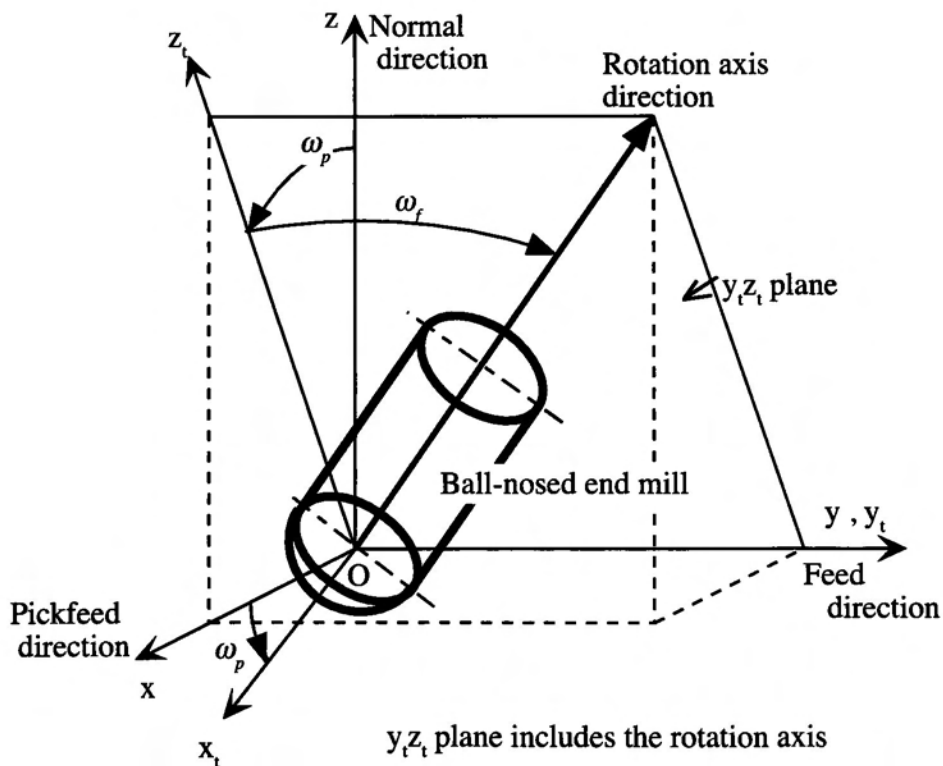


Fig.2. 2 Definition of tool orientation

2・2・3 切取り厚さの定義

切取り厚さの定義および算出の考え方を図2.3に示す。切れ刃上の点Pの位置は、工具回転角度 θ と、切れ刃上の点Pからボール中心までの半径と工具回転軸がなす角 ϕ （以降、切れ刃角度と呼ぶ）で表わすこととする。この切れ刃上の点Pにおける切取り厚さ $h(\theta, \phi)$ は、ボール半径方向に定義する。また、切れ刃上の点とボール中心を結ぶ線分上で被削物の内部と外部の境界の点を「切れ刃干渉点」と呼ぶこととする。切れ刃干渉点は点 Q_1 のように先行する切れ刃によって切削された面（以降、「先行切れ刃切削面」と呼ぶ）上にある場合だけでなく、点 Q_2 のように先行切れ刃切削面以外の面上にある場合がある。したがって、切れ刃干渉点のある位置によって切取り厚さの解析の処理内容を変える必要がある。切れ刃干渉点のある位置は、図2.4に示すように3つに分類できる。先行切れ刃切削面以外に、平面とみなせる「被削材表面」と、近似的に円筒内面と見なす前のパスで加工された面（以降、「前パス加工面」と呼ぶ）である。以降の切取り厚さ解析では、上記3つの分類に従って、切取り厚さの計算と境界処理を行なう。また、切れ刃が被削材と干渉する範囲あるいは被削材を切削する範囲（以降、切れ刃干渉領域と称する）は、この3つの面との干渉の境界である。それぞれの面との境界を図2.4に示すように(i),(ii),(iii)と番号付けする。

以上の各定義に基づいて、本解析に用いるパラメータは表2.1に示す通りとなる。また、以降の説明に用いる記号も示す。1回転当たりの送り量 f 、切り込み a 、ピックフィード量 p は、それぞれ前記のO-xyz座標系で与えるものとする。

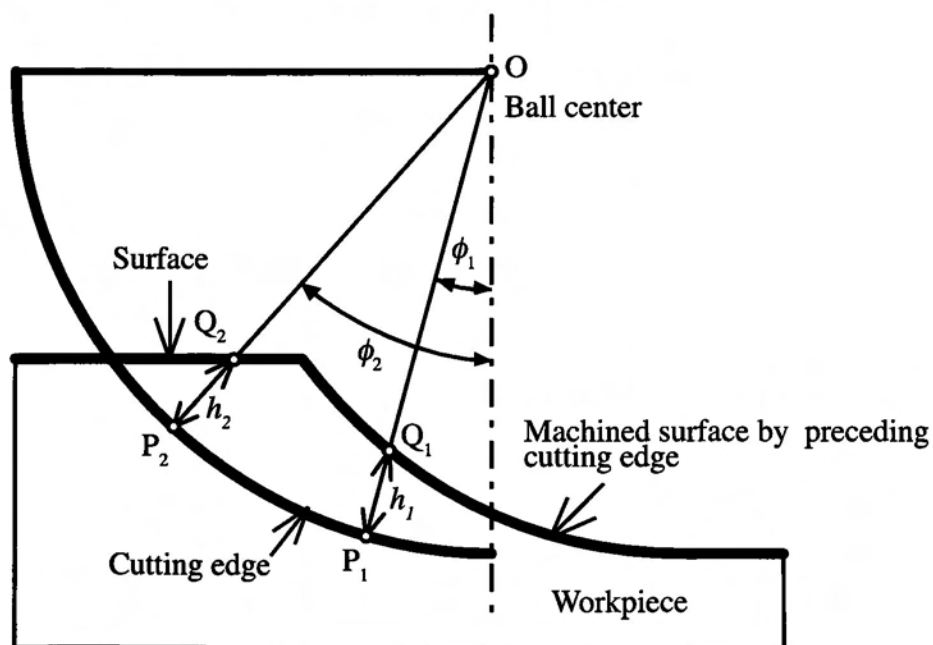


Fig. 2.3 Definition of undeformed chip thickness

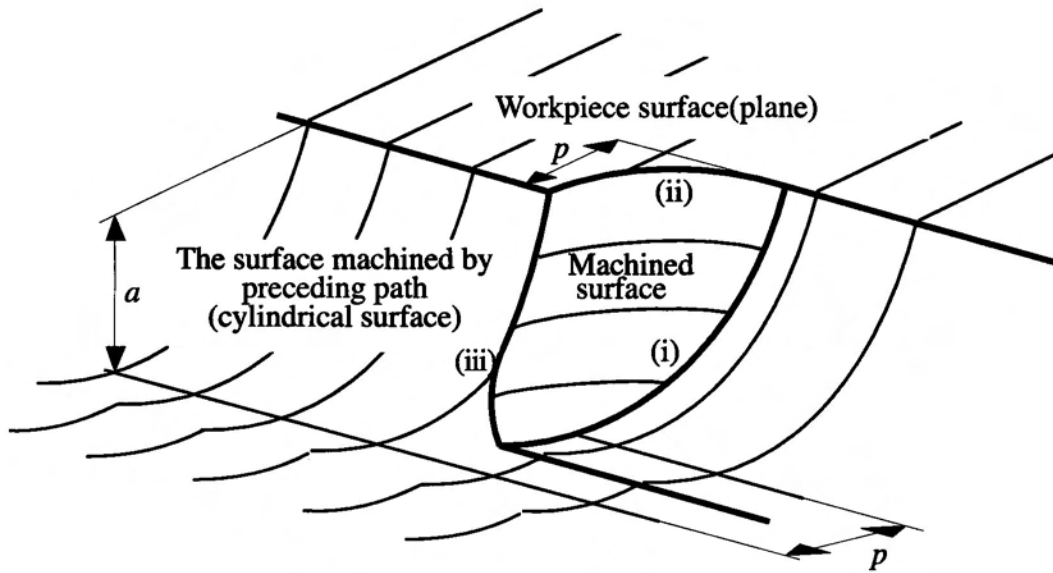


Fig. 2.4 3 types of surface concerned with intersection point

Table 2.1 Notations

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

2.3 切取り厚さ解析

2.3.1 切れ刃干渉点が先行切れ刃切削面上にある場合

図2.5は切れ刃干渉点が先行切れ刃切削面上にある場合の切れ刃の状態をO- $x_t y_t z_t$ 座標系で示している。工具回転軸は z_t 軸に対して ω_f 傾いている。解析対象とする切れ刃を灰色で示している。切れ刃は初期位置から工具回転角度 θ 回転した位置にある。この切れ刃上で先端から切れ刃角度 ϕ の位置の点Pにおける切取り厚さ h を求める。なお、切れ刃初期位置は、 $y_t z_t$ 平面上で y_t 軸の負方向を向いている位置としている。

ボール中心すなわち原点をOとすると、線分OP上に切れ刃干渉点Qがある。切取り厚さ h は線分PQの長さである。点Qは先行切れ刃上の点でもある。この先行切れ刃が点Qを通過する時の工具のボール中心をO'とする。O'は y_t 軸上にあり、工具回転軸は z_t 軸に対して ω_f 傾いている。点Qの存在する先行切れ刃の工具回転角を θ' 、点Qの切れ刃角度を ϕ' とする。また、原点Oから点Qまでの長さを r とする。 r が分かれば、式(2.1)で $h(\theta, \phi)$ が求められる。

$$h(\theta, \phi) = R - r \dots\dots\dots (2.1)$$

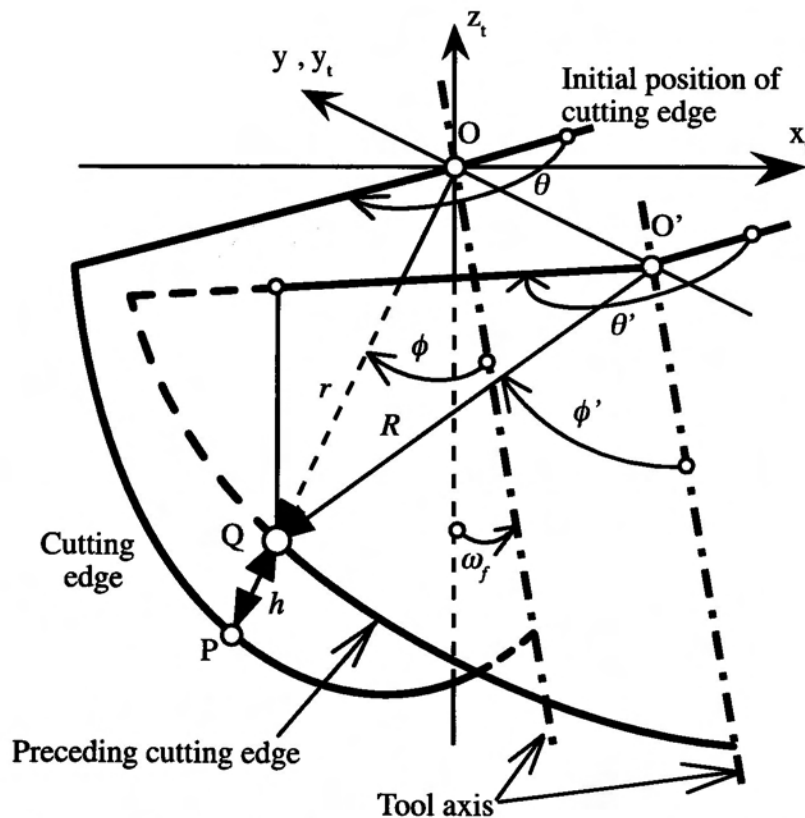


Fig. 2.5 Relationship between the present cutting edge and the preceding one

r は以下の手順で求めることができる。

原点Oからの長さが r であるとして求めた点QのO- $x_f y_f z_f$ 座標系における座標 (x_q, y_q, z_q) は式(2.2)で表される。

$$\left. \begin{aligned} x_q &= -r \sin \phi \sin \theta \\ y_q &= -r(\sin \phi \cos \theta \cos \omega_f + \cos \phi \sin \omega_f) \\ z_q &= -r(-\sin \phi \cos \theta \sin \omega_f + \cos \phi \cos \omega_f) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

点O' と点Qとの距離が R なので、 r は次式を満足すればよい。

$$f'^2 + 2f' \cdot y_q + r^2 - R^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

ただし、 f' は原点Oと先行切れ刃のボール中心O' との距離で次式で求められる。

$$f' = \left(\frac{1}{n} + \frac{\theta - \theta'}{2\pi} \right) f \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、先行切れ刃の回転角 θ' は次のようにして求めることができる。

点Qが点O' からの長さが R であるので、座標Q (x'_q, y'_q, z'_q) はO- $x_f y_f z_f$ 座標系で式(2.5)のように表される。

$$\left. \begin{aligned} x'_q &= -R \sin \phi' \sin \theta' \\ y'_q &= -R(\sin \phi' \cos \theta' \cos \omega_f + \cos \phi' \sin \omega_f) - f' \\ z'_q &= -R(-\sin \phi' \cos \theta' \sin \omega_f + \cos \phi' \cos \omega_f) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

式(2.2)と式(2.5)において、 $x_q = x'_q$ 、 $z_q = z'_q$ であるので、この関係より θ' が求められる。このとき、式(2.3)の解には直接関係しないが、同時に先行切れ刃の切れ刃角度 ϕ' も求められる。 θ' と ϕ' は次式で得られる。

$$\left. \begin{aligned} \theta' &= \pi - \tan^{-1} \frac{-x_q}{z_q \sin \omega_f - \sqrt{R^2 - r^2 + y_q^2} \cos \omega_f} \\ \phi' &= \sin^{-1} \left(\frac{-x_q}{R \sin \theta'} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

以上より、 r は式(2.2), (2.4), (2.6)の条件下で式(2.3)の方程式を解くことで求められる。式(2.3)の解は、解析的には求められないが、解の範囲が分かっている ($R-f \leq r \leq R$) ので、数値解析を使って、所定の精度内で求めることができる。本解析では2分法を用いた。求められた r を式(2.1)に代入して切取り厚さ $h(\theta, \phi)$ が得られる。

以上から、切れ刃干渉点が先行切れ刃切削面上にある場合には、 ω_p は切取り厚さの計算には全く影響を与えないことがわかる。図2. 2のように工具姿勢を定義することにより、2つの工具傾斜角それぞれの切取り厚さに与える幾何的影響が明確になったと考えられる。

また、上記の解法には以下の特徴がある。式(2.3)を解いて切取り厚さ $h(\theta, \phi)$ を求める過程で、切れ刃干渉点Qの先行切れ刃における回転角度 $\theta(\theta, \phi)$ および切れ刃角度 $\phi(\theta, \phi)$ が得られる。このことは、切削点Pだけでなく切れ刃干渉点Qの位置も同時に特定できることを意味する。従来の切取り厚さの近似式や切れ刃軌跡を追跡する解析法などでは、このような先行切れ刃に関する量は求めることができなかった。本解法がボールエンドミル加工の幾何的切屑生成機構を明らかにする上で有効な手法であることを示している。

また、境界(i)は、前述の式(2.2)~(2.6)において $r=R$ とすることで、式(2.7)の回転角 θ と切れ刃角 ϕ との関係が得られる。

$$\theta + \frac{2\pi}{n} - \frac{2RY}{f_\theta} - \pi + \tan^{-1} \frac{X}{Y \cos \omega_f - Z \sin \omega_f} = 0 \quad (2.7)$$

$$\left. \begin{aligned} X &= \sin \phi \sin \theta \\ Y &= \sin \phi \cos \theta \cos \omega_f + \cos \phi \sin \omega_f \\ Z &= -\sin \phi \cos \theta \sin \omega_f + \cos \phi \cos \omega_f \end{aligned} \right\}$$

2・3・2 切れ刃干渉点が被削材表面上にある場合

図2.6は切れ刃と被削材表面との干渉の様子をO-xyz座標系で示す概念図である。切れ刃干渉点Qは被削材表面上にある。原点Oとの距離rを求めて前述の式(2.1)で切取り厚さ $h(\theta, \phi)$ を得ることができる。rの求め方を以下に示す。

被削材表面とz軸および工具回転軸との交点をそれぞれA, Bとする。点Aと切れ刃干渉点Qは共に前加工面上にあるので、線分AQはz軸に対して垂直である。点Aおよび点Qから工具回転軸に降ろした垂線の足をそれぞれC, Dとし、点Qをz軸と工具回転軸を含む平面上に降ろした垂線の足をQ'とする。このとき線分DQ'も工具回転軸に垂直となり $\angle DQ'A = \omega_z$ である。以上の幾何学的関係からrは次式を解けばよい。

$$r \sin\phi_A \cos\theta_A \cos\omega_z - r \sin\phi \cos(\theta - \theta_0) = (R - a) \sin\omega_z \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで、 ω_z は工具回転軸がz軸となす角度、 θ_0 は工具回転角 θ の工具傾斜による補正角であり、次式で与えられる。

$$\omega_z = \cos^{-1}(\cos\omega_f \cos\omega_p) \quad \dots (2.9)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_0 &= \tan^{-1} \frac{\tan\omega_p}{\sin\omega_f} \quad (\omega_f \neq 0) \\ &= 0 \quad (\omega_f = 0) \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

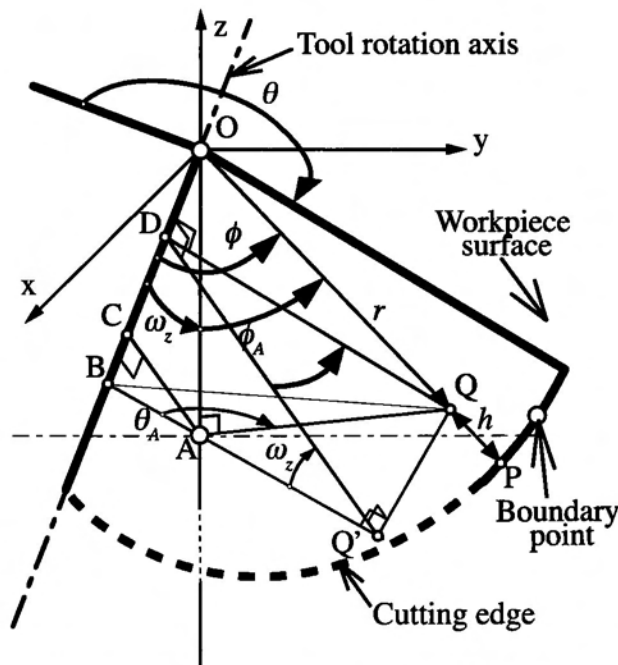


Fig. 2.6 In the case of intersect point on the workpiece surface

また、 ϕ_A は線分 OQ が z 軸となす角度、 θ_A は $\angle QAB$ であり、 ϕ_A と θ_A は次式の関係がある。

$$\sin\phi_A \sin\theta_A = \sin\phi \sin(\theta - \theta_0) \quad (2.11)$$

以上を基に、式(2.8)を解いた結果が式(2.12)である。

$$r = \frac{(R - a)\{\sin\omega_z \sin\phi \cos(\theta - \theta_0) + \cos\omega_z \cos\phi\}}{\cos^2\omega_z \{1 - \sin^2\phi \sin^2(\theta - \theta_0)\} - \sin^2\phi \cos^2(\theta - \theta_0)} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

切れ刃干渉点が被削材表面上にある場合は、2つの工具傾斜角を式(2.8)、(2.9)で ω_z と θ_0 に置き換えて切取り厚さが求められる。特に、 θ_0 は工具回転角の位相にのみ影響していることが分かる。

被削材表面との境界(ii)は、図2.6に示す幾何学的関係から、 $r=R$ とし、式(2.13)を解くことで得られる。

$$1 - \frac{a}{R} = \cos\phi \cos\omega_z - \sin\phi \cos(\theta - \theta_0) \sin\omega_z \quad (2.13)$$

2・3・3 切れ刃干渉点が前パス加工面上にある場合

図2.7はO- $x_i y_i z_i$ 座標系で示した切れ刃と前パス加工面との干渉の概略図である。前パスでの工具送り方向を y' 軸とすると、 y' 軸は y_i 軸に平行で間隔が p であり、半径が R の円筒面の中心軸である。切れ刃干渉点 Q を通る円筒面上の円弧の中心を O_2 とする。 O_2 を通して被削物表面の法線方向に平行な直線 mm' を考える。直線 mm' は z_i 軸に対して ω_p 傾斜している。直線 mm' と $O_2 Q$ のなす角を ϕ_0 とする。図2.7の幾何学的関係から、 r と ϕ_0 は以下の2式を満足する。

$$\left. \begin{aligned} R \sin(\phi_0 + \omega_p) + r \sin \phi \sin \theta &= p \cos \omega_p \\ R \cos(\phi_0 + \omega_p) - r \cos \phi \cos \omega_f + r \sin \phi \cos \theta \sin \omega_f &= -p \sin \omega_p \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

これを解いて r は次式で得られる。この r を式(2.1)に代入して切取り厚さ h が得られる。ただし、

$$r = \frac{A+B}{C_1^2 + C_2^2} \quad (2.15)$$

$$A = p(C_1 \cos \omega_p + C_2 \sin \omega_p)$$

$$B = \sqrt{R^2(C_1^2 + C_2^2) - p^2(C_1 \sin \omega_p + C_2 \cos \omega_p)^2}$$

$$C_1 = \sin \phi \sin \theta$$

$$C_2 = \cos \phi \cos \omega_f - \sin \phi \cos \theta \sin \omega_f$$

である。

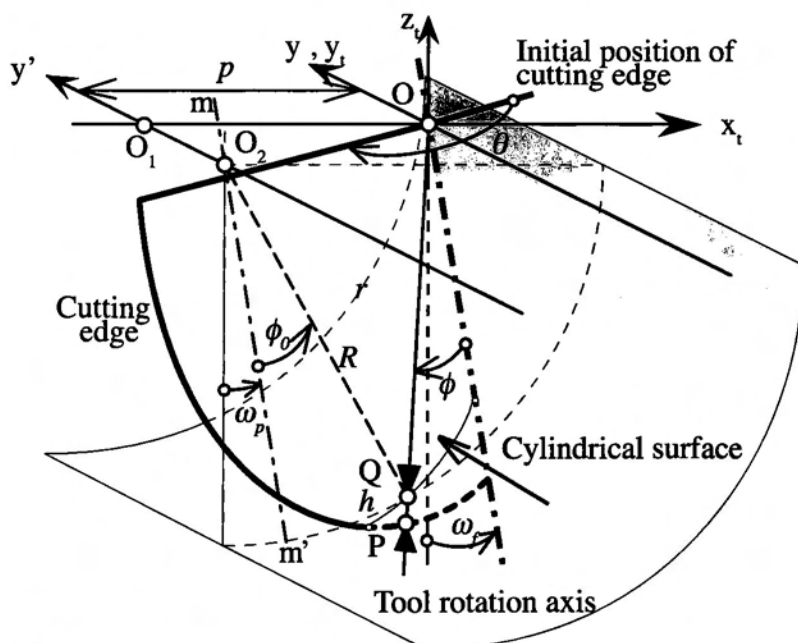


Fig. 2.7 In the case of intersect point on the cylindrical surface

前パスで加工された面との境界(iii)は、図2.7に示す幾何的關係から、 $r=R$ とし次式を解くことで得られる。

$$X_p^2 + Z_p^2 = 1 \quad (2.16)$$

$$\left. \begin{aligned} X_p &= \frac{P}{R} \cos \omega_p - \sin \phi \sin \theta \\ Z_p &= -\frac{P}{R} \sin \omega_p + \cos \phi \cos \omega_f - \sin \phi \cos \theta \sin \omega_f \end{aligned} \right\}$$

2.3.4 ねじれ角の考慮

これまで、切れ刃の形状については直刃として説明してきた。実際のボールエンドミルでは、切れ刃にねじれ角が施されたねじれ刃が多い。本解析では、ねじれ角は図2.8のように、工具先端から切れ刃角 ϕ の切れ刃の位相遅れ角 $\lambda(\phi)$ で定義し解析に導入する。具体的には、これまでに示した解析式中の θ または θ' を次式のように変更する。

$$\theta = \theta + \lambda(\phi), \theta' = \theta' + \lambda(\phi') \quad (2.17)$$

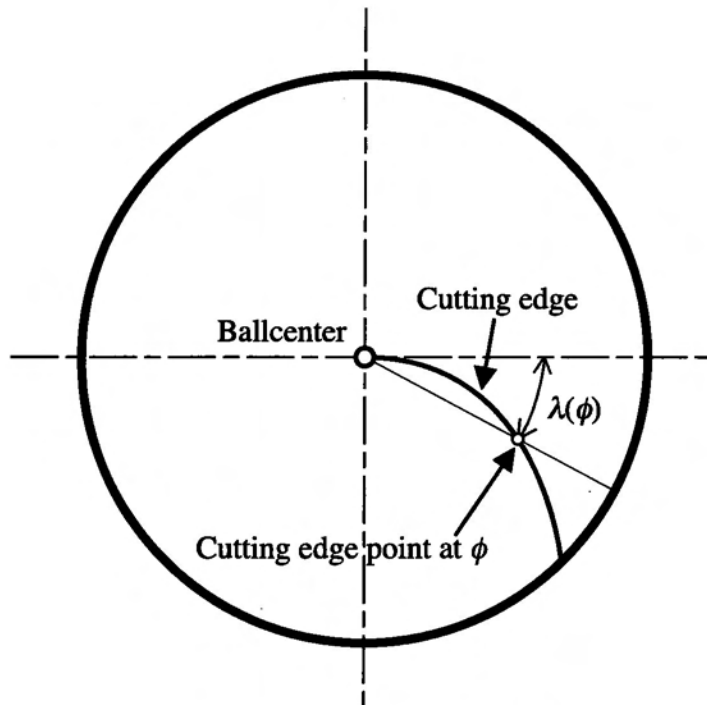


Fig. 2.8 Definition of phase delay angle λ in consideration of helical tooth

2・3・5 計算の流れ

切削点 $P(\theta, \phi)$ における, 切取り厚さ $h(\theta, \phi)$ の解析の流れは以下の通りである.

- 1) 点 $P(\theta, \phi)$ が切削範囲内であるかを判別する. 式(2.7),(2.13),(2.16)を判別式に用いる
- 2) 点 $P(\theta, \phi)$ が切削範囲内であれば, 式(2.3)の方程式を解き, 切れ刃干渉点 Q の θ' と ϕ' を求める.

- 3) θ と ϕ の代わりに θ' と ϕ' を判別式に適用し, 切れ刃干渉点 $Q(\theta, \phi)$ の位置を判別する.

3 1) 切れ刃干渉点 $Q(\theta, \phi)$ が先行切れ刃切削面上にあれば, 式(2.3)の解が切取り厚さとなる.

3 - 2) 切れ刃干渉点 $Q(\theta, \phi)$ が先行切れ刃切削面外にあれば, 切れ刃干渉点の存在する面を判別式で判定する.

3 2 - 1) 被削材表面上にあれば式(2.11)により切取り厚さを求める.

3 2 - 2) 前パス加工面上にあれば式(2.15)により切取り厚さを求める.

以上の解析の流れを図 2. 9 に示す. 付録に全プログラム掲載している.

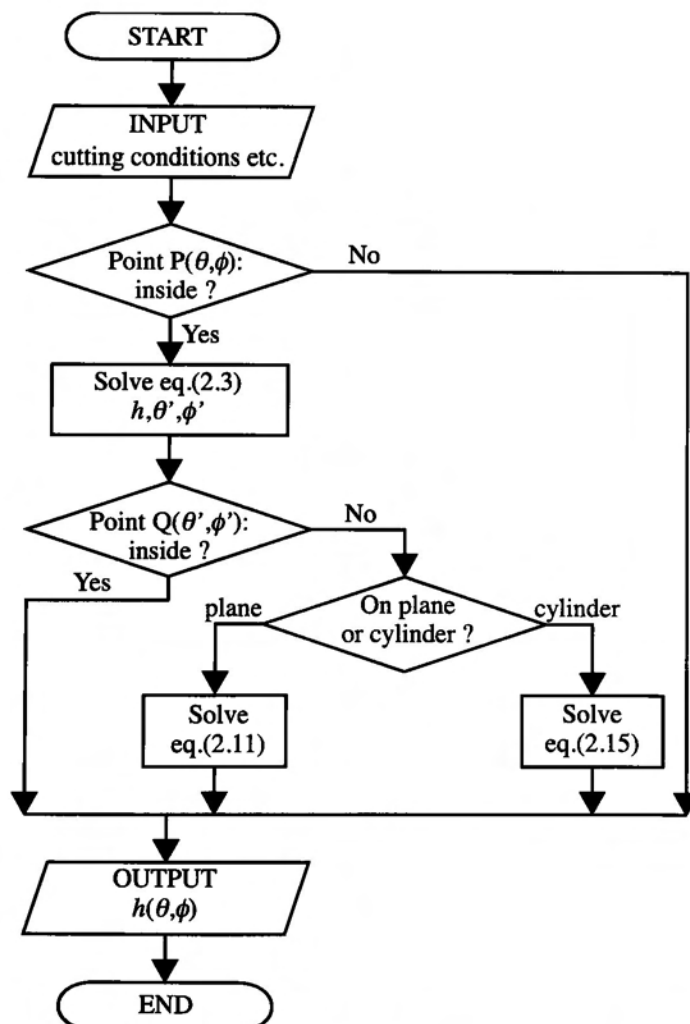


Fig. 2.9 Flowchart of analysis of undeformed chip thickness

2. 4 解析結果と考察

2.4.1 解析環境

本解析では切取り厚さ $h(\theta, \phi)$ を $0 \leq \theta \leq 2\pi(\text{rad.})$, $0 \leq \phi \leq \pi/2(\text{rad.})$ の範囲内で求めることが可能である。 θ , ϕ それぞれ与えられた角度間隔で、切れ刃干渉領域内の切取り厚さ分布を求めている。なお、本解析はボール部の切れ刃のみを対象にしているため、切れ刃干渉領域がボールエンドミル外周切れ刃を含む場合は計算していない。したがって、工具姿勢についてはボール部のみで切削する範囲となる。

以上の切取り厚さ分布解析には、C言語を用いてプログラムを作成した。解析に使用する計算機については、UNIXベースのワークステーションまたはMacintoshいづれでも解析可能である。ちなみに、 θ , ϕ それぞれ $\pi/180\text{rad.}$ 間隔では、クロック周波数700MHzのノート型のMacintoshを用いても、1秒以下で可能ある。解析時間は、解析結果のファイル書き込み時間を除いた純粋な計算時間である。また特に計算時間短縮のための最適化は行っていない。

解析結果である切取り厚さ分布の出力については2通りの方法を採用している。1つは、3次元的な立体形状として表示している。これにはUNIXベースのワークステーションを用い、DESIGN BASEという3次元ソリッドモデルを表示するためのグラフィックライブラリを利用して開発した。開発にはC言語を用いた。この3次元立体表示システムは、切取り厚さ分布だけでなく、実際の除去部分形状も表示可能である。なお、表示には大量の3次元の計算処理を行なうため、計算時間は5～10分程度かかる。ソリッドモデルとして情報を有しているので、一度表示させた後は、任意の方向、任意の縮尺で表示可能である。

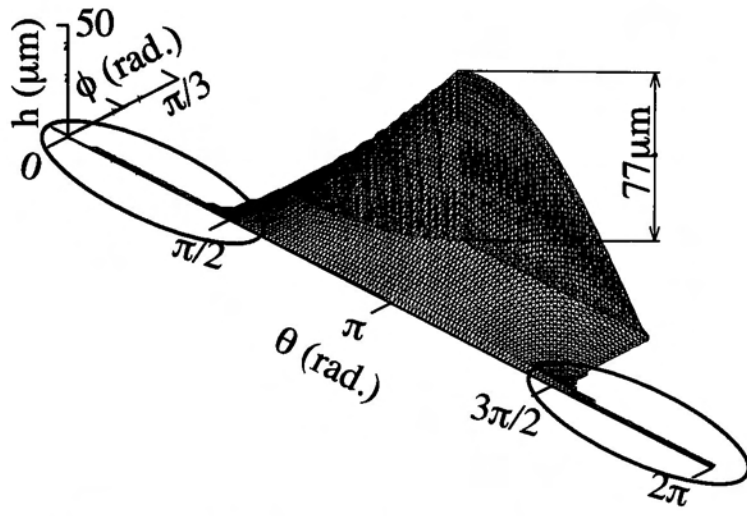
以上の立体的表示の他に、簡易的な方法としてExcelによる等高線表示も併用している。本論文ではこちらの方を多数用いている。

2・4・2 切取り厚さ分布

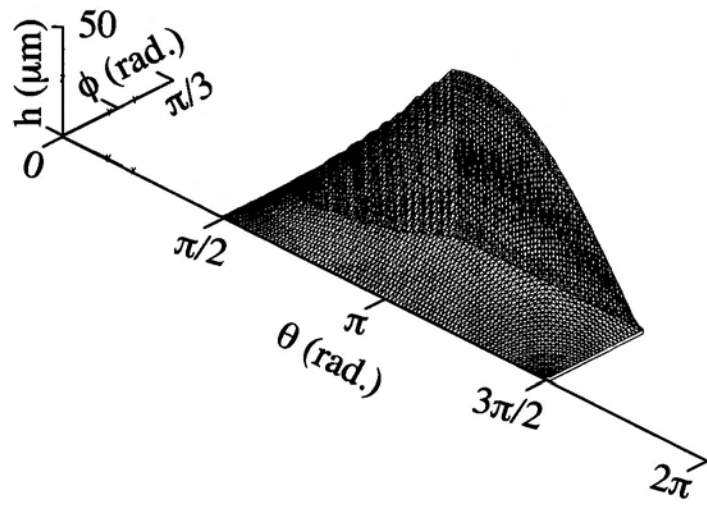
図2.10に切取り厚さ分布の解析例を立体表示したものを示す。図2.10(a)は、これまでに述べた本解析手法による計算結果であり、(b)は比較のために切れ刃軌跡を球面と近似して計算結果である。切削条件は、2つの差が分かりやすい条件として $R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=0.1\text{ mm/rev.}$, $p=3\text{mm}/\text{track}$, $a=2\text{mm}$, $\omega_p=0\text{rad.}$, $\omega_f=0\text{rad.}$, としている。工具回転軸は被削材の法線方向と同一である。また、解析時の θ, ϕ それぞれの角度間隔は $4\pi/180\text{rad.}$ としている。工具回転角 θ は、送り方向の負方向を0としており、切れ刃角 ϕ は、工具回転中心を0としているので大きくなるほど外周に近づくことを意味する。したがって、 θ 軸に垂直な断面は、ある工具回転角 θ における切れ刃の切取り厚さ分布を示すことになる。また、 ϕ 軸に垂直な断面は、切れ刃の一点に着目したとき、工具が一回転する間の切取り厚さの推移を表わしていることになる。

図2.10(a)より、工具回転中心付近の切れ刃は、ほぼ全周に渡って被削材に干渉していることがわかる。一方、切れ刃軌跡を球面近似した場合は、図2.10(b)からわかるように、 $\pi/2 \leq \theta \leq 3\pi/2$ の範囲のみ切れ刃が干渉しているように計算されている。これは、図2.11に示すように、切れ刃軌跡を球面と近似し、 f/n つまり1刃当たりの送り量だけ送り方向に移動させて被削材との干渉量を計算しているため、切れ刃が送り方向と反対側にある場合 ($\theta < \pi/2, 3\pi/2 < \theta$) は最大でも図中の ϕ_0 の範囲のみしか被削材と干渉しないことになるからである。図2.10の切削条件の場合は $\phi_0=0.02\text{rad.}$ であり、解析時の角度間隔の $4\pi/180\text{rad.}=0.07\text{rad.}$ より小さいため、計算されなかったのである。一方、本解析手法においては、同一の角度間隔による解析であるにも関わらず、ほぼ全周に渡って切れ刃と被削材の干渉が示されている。つまり実際には、切れ刃が送り方向と反対側にある場合でも 0.07rad. より大きな範囲で切れ刃が被削材と干渉しており、切れ刃軌跡を球面で近似しては計算できず、工具回転中心付近の切取り量の影響が大きい場合の解析には適用できない。

以上のように、本解析手法により、近似計算では正確に計算できなかった範囲 ($\theta < \pi/2, 3\pi/2 < \theta$) まで算出可能となり、また、従来手を付けられていなかった工具回転中心近くの切れ刃の切取り厚さ分布を明らかにしていることがわかる。



(a) By the spatial geometric analysis developed.



(b) By the approximate analysis proposed previously.

Fig.2. 10 Simulated distribution of undeformed chip thickness
 ($R = 5 \text{ mm}$, $n = 2$, $f = 0.2 \text{ mm/rev.}$, $p = 3 \text{ mm/track}$, $a = 2 \text{ mm}$, $\omega_p = 0 \text{ rad.}$, $\omega_f = 0 \text{ rad.}$)

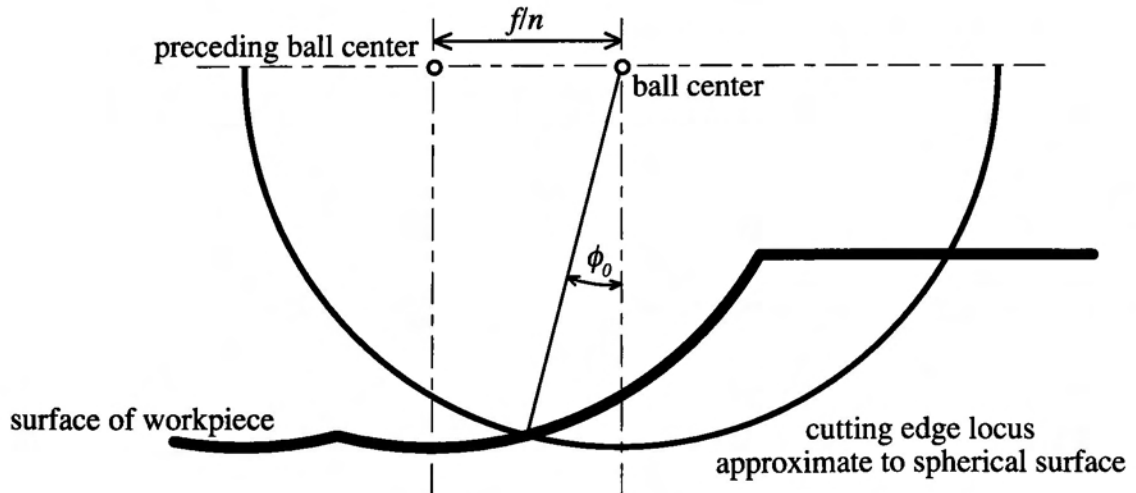
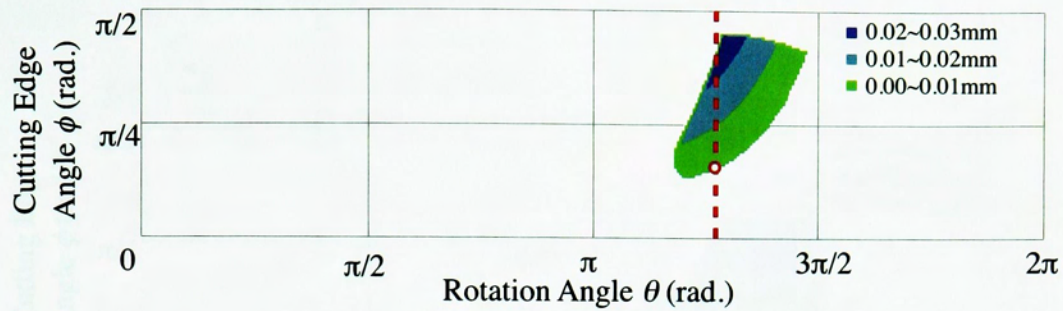


Fig.2. 11 Approximation to spherical surface

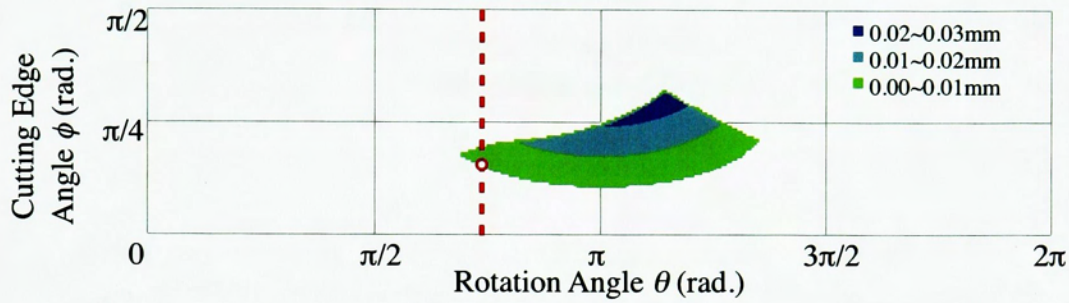
図2. 12に、同一切削条件で工具姿勢が異なる場合の切れ刃一回転における切れ刃各部分の切取り厚さ分布を示す。横軸が切れ刃回転角度 θ 、縦軸は切れ刃角度 ϕ である。すなわち、切れ刃回転に伴う切れ刃各部における切取り厚さ分布の変化の様子を示している。なお、図中の赤い破線は後述する加工面創成点を通過する時の切れ刃位置を示しており、赤い○印が加工面創成点に接する切れ刃位置である。それぞれの工具姿勢について、図2. 12. (a)は $\omega_f=\pi/9\text{rad.}, \omega_p=\pi/9\text{rad.}$ 、(b)は $\omega_f=\pi/9\text{rad.}, \omega_p=-\pi/9\text{rad.}$ (c)は $\omega_f=-\pi/9\text{rad.}, \omega_p=-\pi/9\text{rad.}$ である。

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2. 12 (a)に示すように、切れ刃が切取り厚さが大きな方からくい込み、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2. 12 (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2. 12 (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2. 12 (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2. 12 (c)の場合の切削断面積の変化を図2. 13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。さらに、工具回転中心近くの切れ刃は $\theta=0\text{rad.}$ から $2\pi\text{rad.}$ まで全周に渡って被削材と干渉している。これは切屑が連続していることを意味しており、一般的には断続切削と言われている加工方法であるにも関わらず部分的には連続切削になっている。

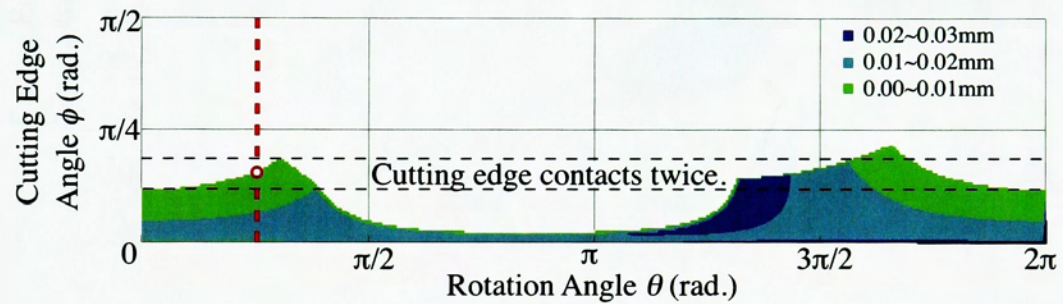
図2. 14は同一の切削条件で上記以外の工具姿勢の場合の切取り厚さ分布解析結果を示している。工具姿勢によって切れ刃と被削材との干渉の様子が大きく異なることが分かる。図2. 15に切れ刃角度 $\phi=\pi/6, \pi/4\text{rad.}$ それぞれにおける切取り厚さの変化の様子を示す。切れ刃の位置により切取り厚さの変化が異なっている。図2. 15 (a)の $\phi=\pi/6\text{rad.}$ において、 $\omega_f=-\pi/9\text{rad.}, \omega_p=-\pi/9\text{rad.}$ の工具姿勢のとき上述のように工具一回転中に2回被削材に干渉していることが分かる。また、図2. 15 (a)の $\phi=\pi/4\text{rad.}$ において、ほとんどの工具姿勢で $\theta=\pi\text{rad.}$ から $\theta=3\pi/2\text{rad.}$ の間で切れ刃が被削材に干渉していることが分かる。



(a) $\omega_f = \pi/9 \text{ rad.}, \omega_p = \pi/9 \text{ rad.}$



(b) $\omega_f = \pi/9 \text{ rad.}, \omega_p = -\pi/9 \text{ rad.}$



(c) $\omega_f = -\pi/9 \text{ rad.}, \omega_p = -\pi/9 \text{ rad.}$

Fig.2.12 Distribution of undeformed chip thickness
($R=5\text{mm}, n=2, f=0.1\text{mm/rev.}, p=1.0\text{mm/track}, a=2.0\text{mm}$)

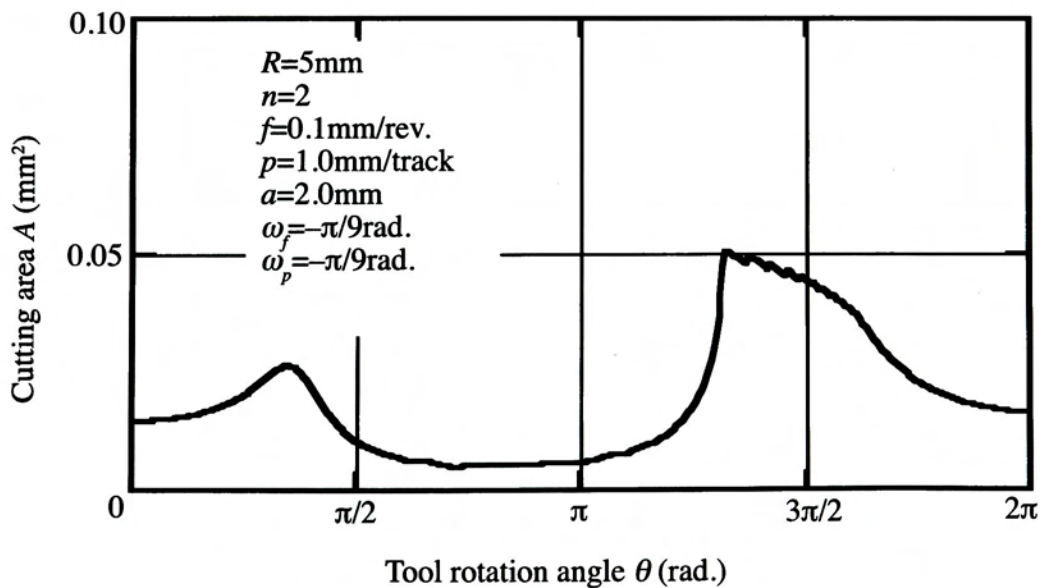


Fig.2.13 Cutting area diagram ($\omega_f = -\pi/9 \text{ rad.}, \omega_p = -\pi/9 \text{ rad.}$)

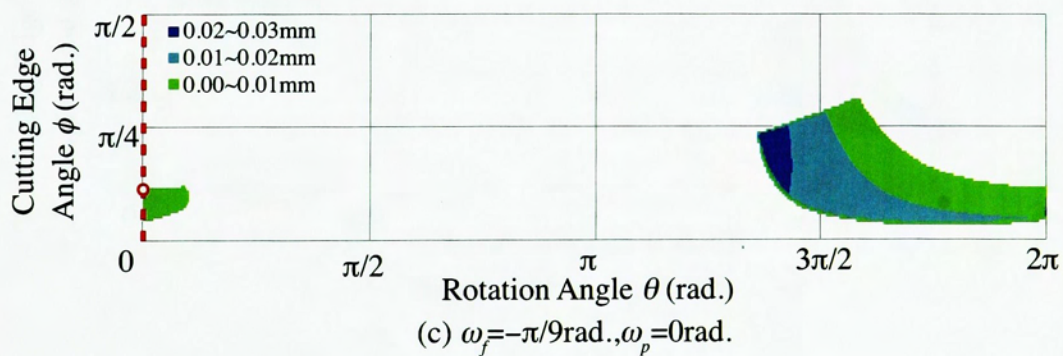
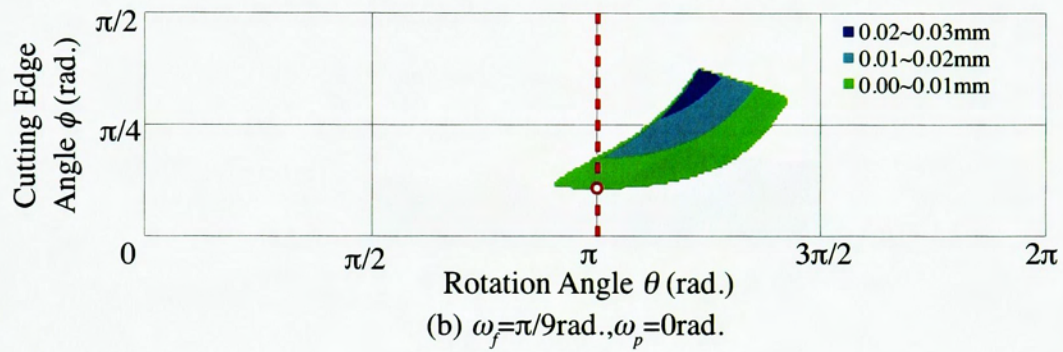
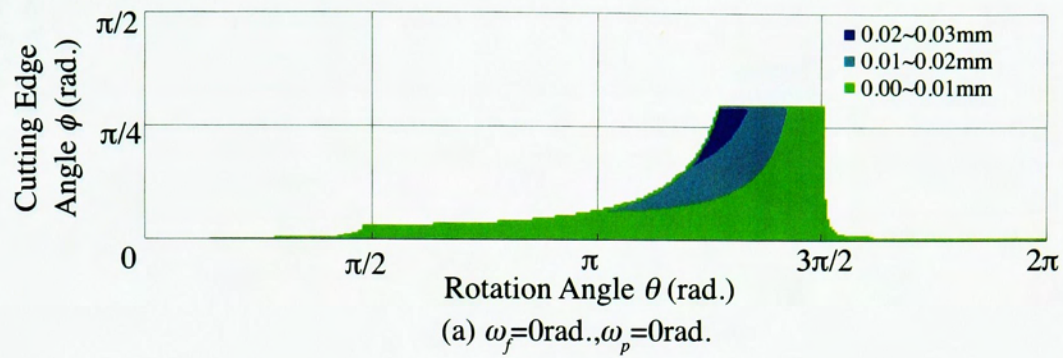


Fig.2.14-1 Distribution of undeformed chip thickness
 ($R=5\text{mm}, n=2, f=0.1\text{mm/rev.}, p=1.0\text{mm/track}, a=2.0\text{mm}$)

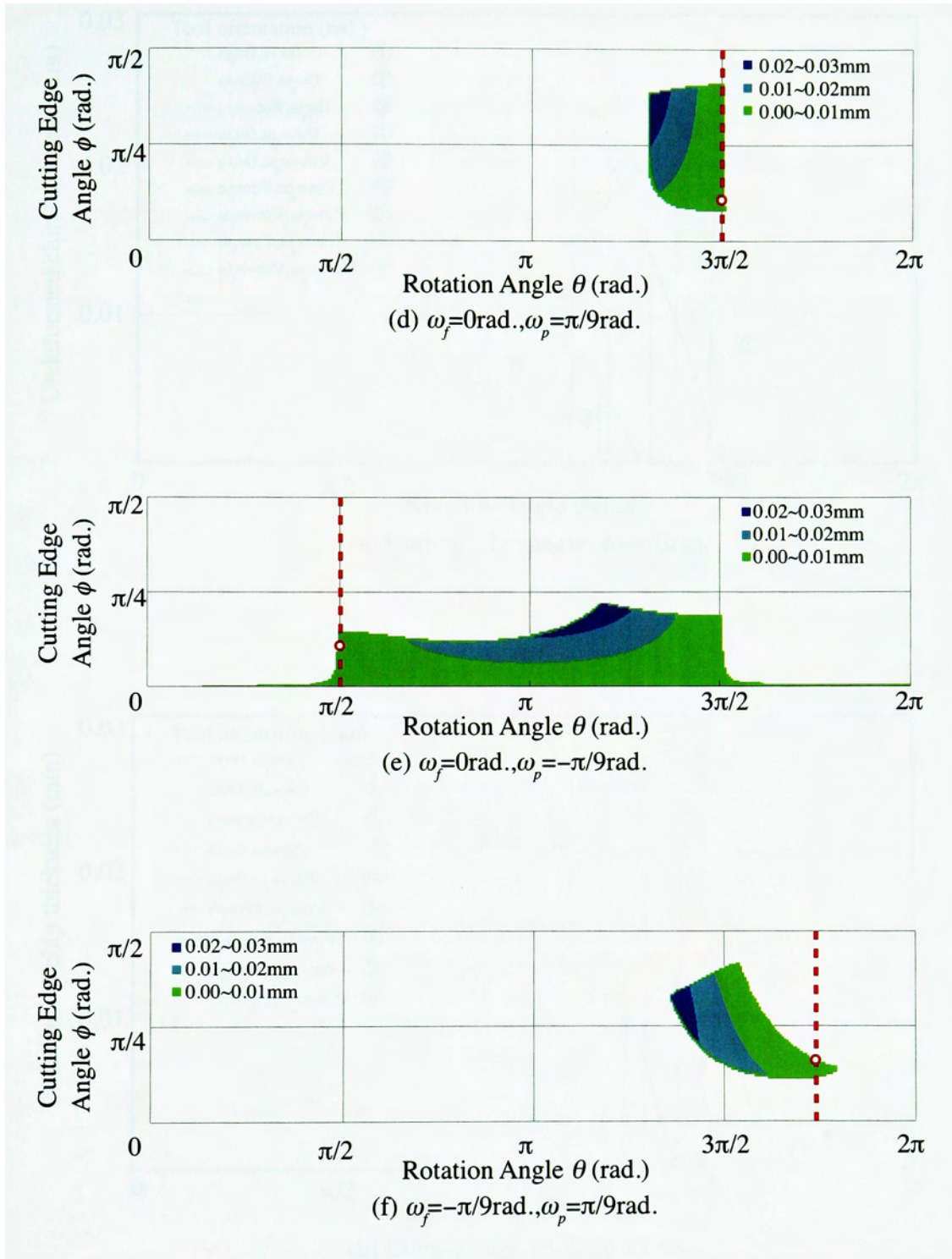
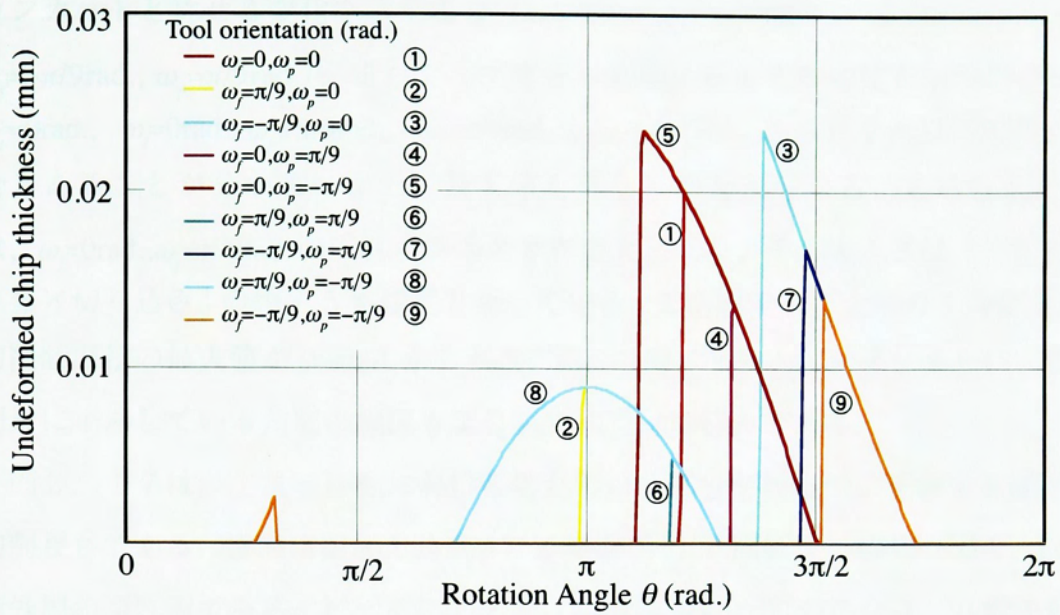
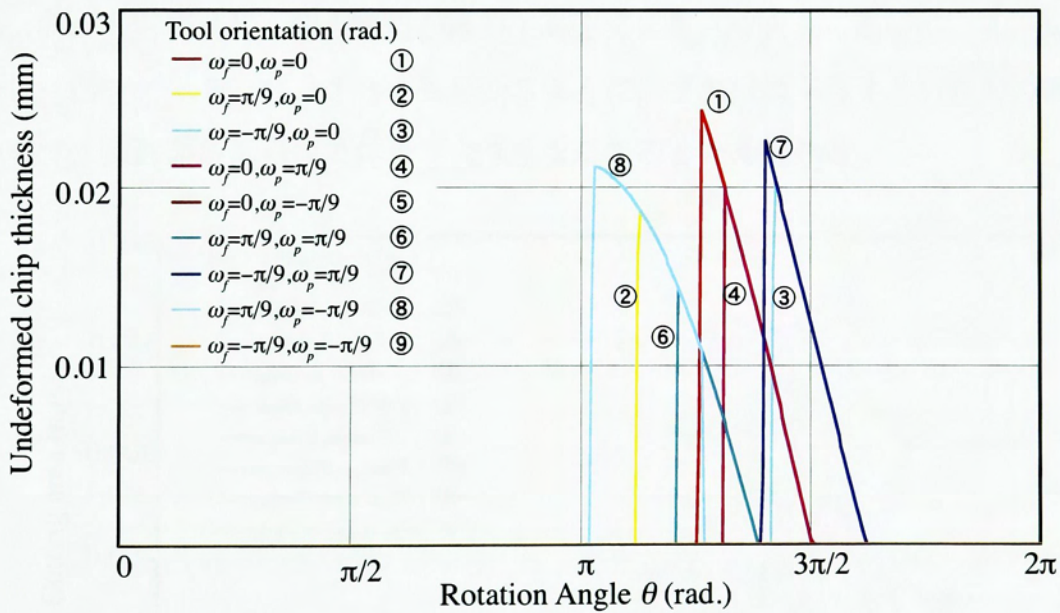


Fig.2.14-2 Distribution of undeformed chip thickness
 ($R=5\text{mm}, n=2, f=0.1\text{mm/rev.}, p=1.0\text{mm/track}, a=2.0\text{mm}$)



(a) Cutting edge angle $\phi = \pi/6$ rad.



(b) Cutting edge angle $\phi = \pi/4$ rad.

Fig.2.15 Undeformed chip thickness at certain cutting edge
 ($R=5\text{mm}, n=2, f=0.1\text{mm/rev.}, p=1.0\text{mm/track}, a=2.0\text{mm}$)

図2.16は、それぞれの工具姿勢における工具一回転中の切削断面積の変化の様子を示している。工具姿勢により切削断面積の変化の様子が異なっている。前述の様に、ダウンカットと称せる変化を示す場合 ($\omega_f = -\pi/9 \text{rad.}$, $\omega_p = 0 \text{rad.}$, $\omega_f = 0 \text{rad.}$, $\omega_p = -\pi/9 \text{rad.}$, $\omega_f = -\pi/9 \text{rad.}$, $\omega_p = \pi/9 \text{rad.}$)、またアップカットと称せるような変化を示す場合 ($\omega_f = 0 \text{rad.}$, $\omega_p = 0 \text{rad.}$, $\omega_f = 0 \text{rad.}$, $\omega_p = \pi/9 \text{rad.}$, $\omega_f = \pi/9 \text{rad.}$, $\omega_p = -\pi/9 \text{rad.}$)、さらにそれ以外の変化を示す場合もあることが分かる。また、最大値も異なることが分かる。この切削条件の場合、 $\omega_f = 0 \text{rad.}$, $\omega_p = \pi/9 \text{rad.}$ の工具姿勢のときが最大となり、その大きさは「一刃当たりの送り量×切り込み」の約75%程度となっている。また解析した全ての工具姿勢において、切削断面積の最大値が $\theta = \pi \text{rad.}$ から $\theta = 3\pi/2 \text{rad.}$ の間に集中している。さらに、切れ刃が被削材に干渉している角度の範囲も工具姿勢によって様々である。

図2.17は、工具一回転における切れ刃の各部分が被削材に干渉する長さすなわち切削長さである。横軸は切れ刃角度 ϕ で $\phi = 0 \text{rad.}$ が工具回転中心の切れ刃で、 $\phi = \pi/2 \text{rad.}$ が最外周の切れ刃である。ピックフィード方向傾斜角 ω_p が負の場合は、いずれも切削長さが長い切れ刃の部分が存在している。他の工具姿勢では切れ刃各部分における切削長さはほぼ均等であるが、 ω_p が負の場合は最大値が2倍程度になっている。図2.18は、工具一回転における切れ刃各部分の除去体積である。これも、切削長さと同様の傾向を示し、 ω_p が負の場合に、除去体積が他の工具姿勢に較べて大きくなっている。 ω_p が負の場合は、図2.17, 2.18から分かるように、被削材に干渉する切れ刃の範囲が小さいので、切れ刃各部の除去体積が大きくなるためと考えられる。

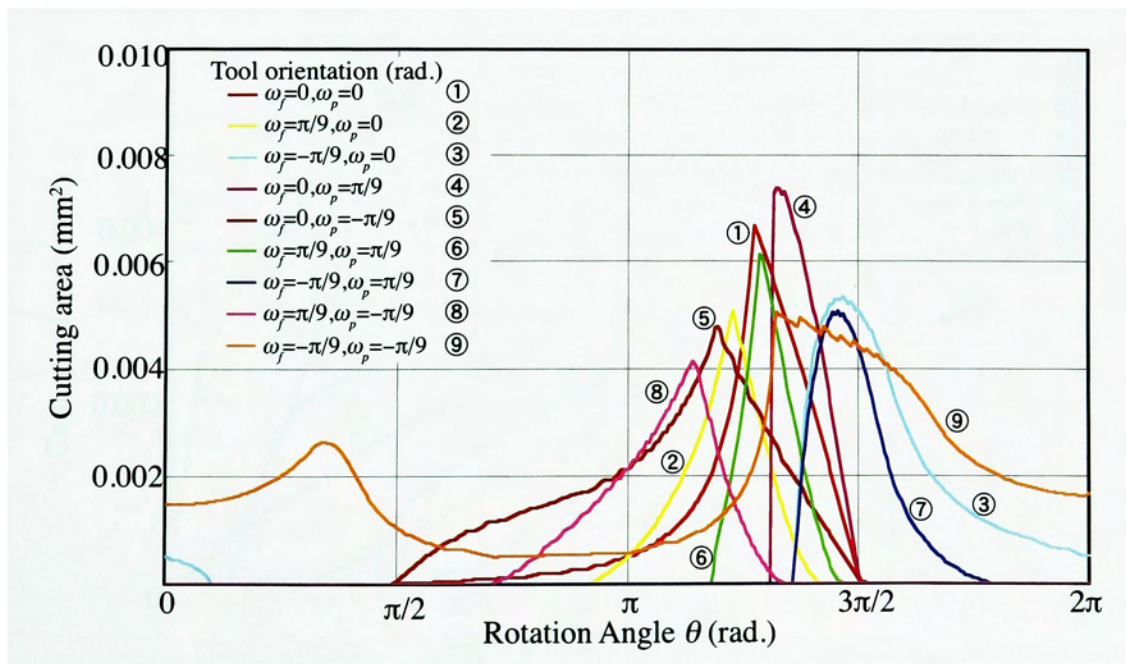


Fig.2.16 Cutting area diagram
($R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=0.1\text{mm/rev.}$, $p=1.0\text{mm/track}$, $a=2.0\text{mm}$)

以上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り厚さや切削断面積の変化の様子や切れ刃各部分の切削長さや除去体積が異なっている。したがって、ボールエンドミル加工における切れ刃と被削材の干渉については、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、これまで示したような工具姿勢の影響を含めた幾何的特性を十分に考慮して検討する必要がある。

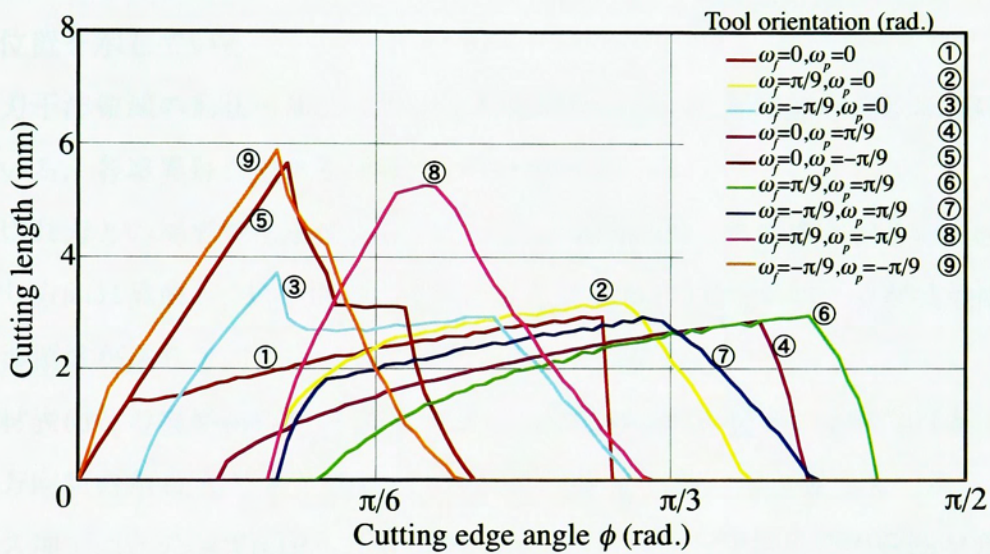


Fig.2.17 Cutting length of cutting edge
 ($R=5\text{mm}, n=2, f=0.1\text{mm/rev.}, p=1.0\text{mm/track}, a=2.0\text{mm}$)

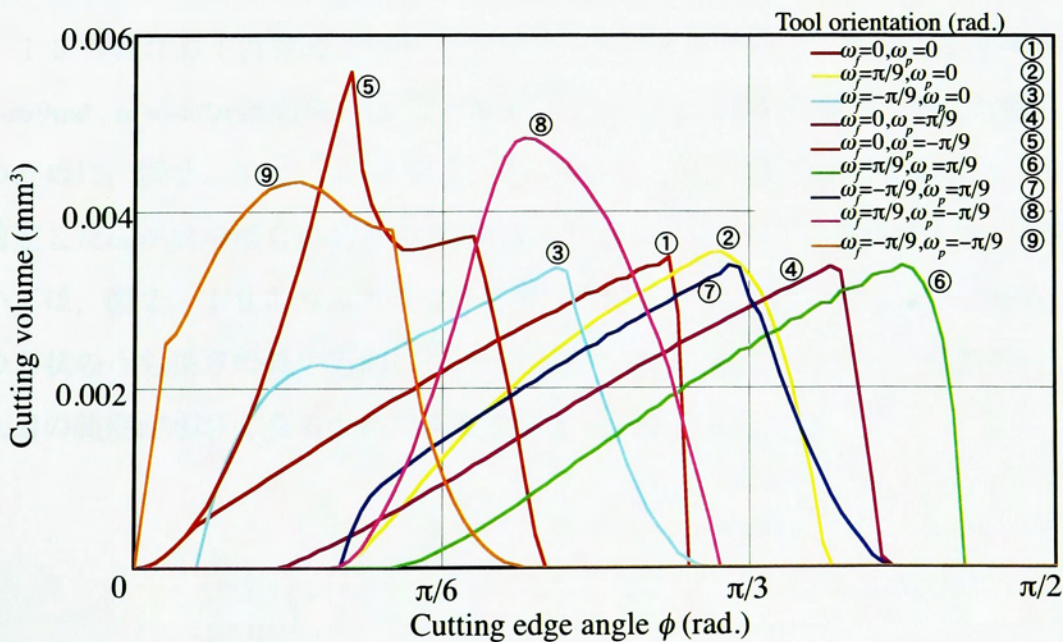


Fig.2.18 Cutting volume of cutting edge
 ($R=5\text{mm}, n=2, f=0.1\text{mm/rev.}, p=1.0\text{mm/track}, a=2.0\text{mm}$)

2・4・3 切れ刃干渉領域

図2. 19は、工具姿勢を様々に変えた場合の切れ刃干渉領域を工具軸垂直平面へ投影して示している。図の中心からの距離は、切れ刃の回転半径をボール半径で除した無次元量で示している。図中の色のついた線は、図2. 4で示した(i)～(iii)の各境界であり、これら境界で囲まれた薄墨で示した範囲が「切れ刃干渉領域」である。送りは紙面左方向、ピックフィードは送り方向に対して右側で見かけ上ダウンカットである。切れ刃は直刃で、その初期位置は送りの負方向で、紙面上では右方向である。切削条件は前述の図2. 12～図2. 18と同一である。また、図中の□印は後述する「加工面創成点」の位置を示している。

切れ刃干渉領域の形状自体には大きな変化は無いが、工具回転中心との相対位置が異なっている。各境界毎にその影響について考察する。

先行切れ刃との境界である境界(i)は、送り方向傾斜角 ω_f の影響が大きい。 ω_f が正の場合は送り方向に湾曲し、負の場合は逆に湾曲している。したがって、 ω_f が負の場合は、切れ刃干渉領域が送り方向の反対側に移動することになる。

被削材表面との境界(ii)は、その大きさは切り込み a の影響を大きく受ける。その位置が送り方向傾斜角 ω_f とピックフィード方向傾斜角 ω_p に伴って移動している。

前パス加工面との境界(iii)は、工具姿勢に伴ってもっとも大きくその範囲が変化している。また、送り量やピックフィード量によっても大きく変化する。

図2. 12 (a) (b) (c) に示した、工具姿勢による切取り厚さ分布の違いは、図2. 19の切れ刃干渉領域を切れ刃がどのように通過するかを見ることで理解できる。 $\omega_f = -\pi/9\text{rad.}$ 、 $\omega_p = -\pi/9\text{rad.}$ の場合は、工具回転中心が切れ刃干渉領域の内部に位置している。そのために、図2. 12 (c)、図2. 13の様に、複雑な干渉状態を示す。

前述した ω_p が負の場合に切れ刃各部における切削長さや除去体積が大きくなる現象については、図2. 19より以下のように考えられる。 ω_p が負の場合はいずれも、除去部分の形状のうち長さの長い方向に切れ刃が掃引している。そのため、被削材に干渉する切れ刃の範囲が小さくなるためであると考えられる。

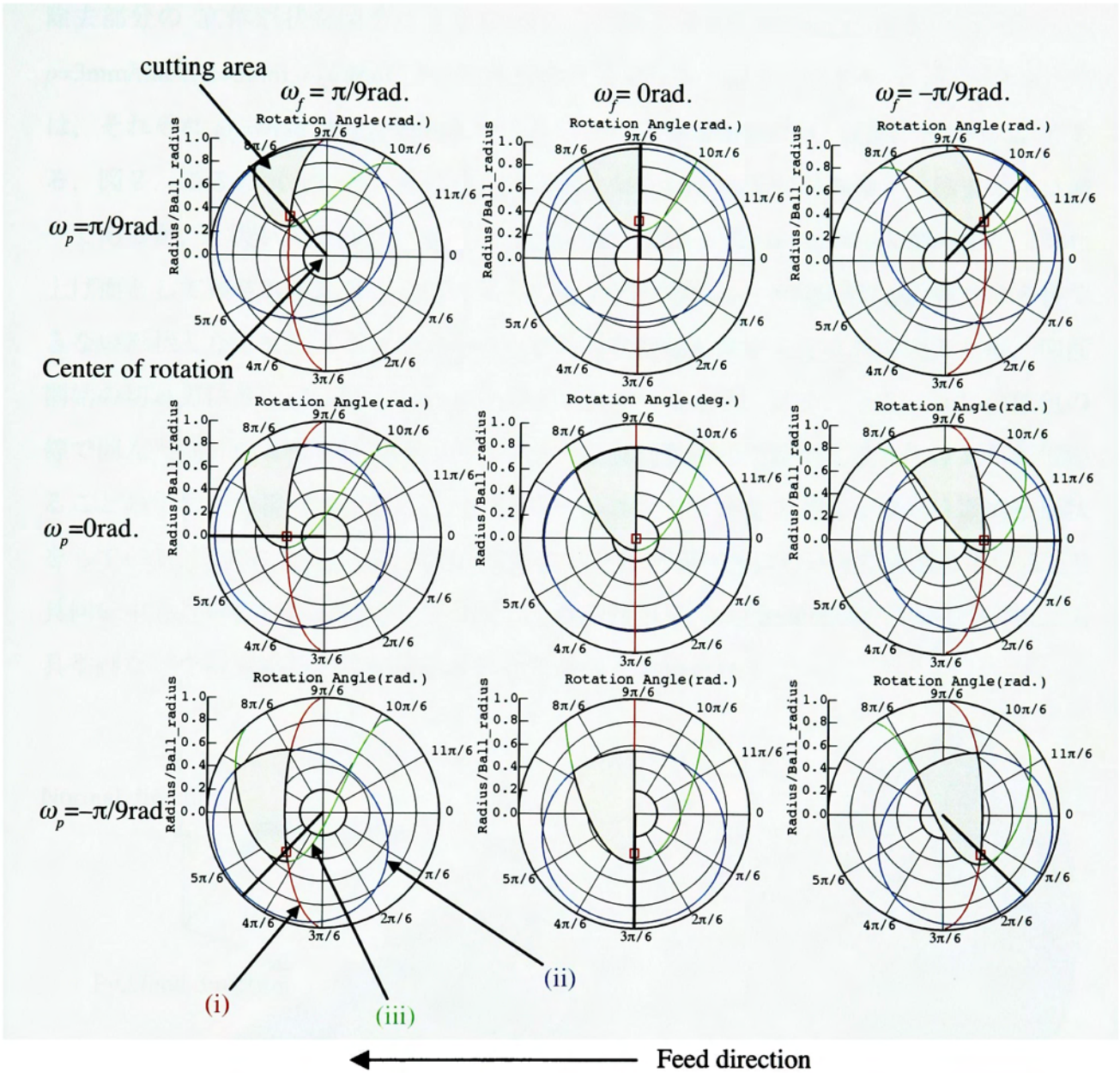


Fig.2.19 The diagram of interference area with cutting edge
 ($R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=0.1\text{mm/rev.}$, $p=1.0\text{mm/track}$, $a=2.0\text{mm}$)

2・4・4 除去部分形状

切れ刃が1回転する間に被削物から削りだす部分の形状を、切屑形状と区別して、「除去部分形状」と呼ぶこととする。切れ刃1回転間の切取り厚さ分布解析結果から求めた除去部分の立体形状を図2.15に示す。切削条件は、 $R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=1\text{mm/rev.}$, $p=3\text{mm/track}$, $a=3\text{mm}$, $\omega_p=0\text{rad.}$ で、切れ刃は直刃である。図2.15の(a)と(b)では、それぞれ $\omega_f=0\text{rad.}$ と $\omega_f=30\text{rad.}$ である。計算の角度間隔は θ, ϕ 共に $\pi/180\text{rad.}$ である。図2.15の(a)と(b)では、工具姿勢の違いのみであるので、除去体積は同一であるが、形状が異なっている。特に $\omega_f=0\text{rad.}$ の場合、工具回転中心近傍の切れ刃で仕上げ面として残される部分を切削する際の除去部分形状が、球面による近似では表現できない形状となっていることがわかる。切れ刃が回転しながら送られているため、切削開始の切れ刃位置と終了時の切れ刃位置がずれているため、図2.15(a)の灰色の線で囲んだ部分のように段差が生じている。工具回転中心近傍では送りを与えられていることの影響が無視できないことを示すボールエンドミル加工ならではの特徴的な形状をしている。このことは、加工面生成機構に関する研究^{(4)~(6)}において指摘されている、工具回転中心近傍の切れ刃による削り残しなどの現象を、切屑生成機構の面から解明し、工具挙動などを解析する上で今後重要になるものと予測される。

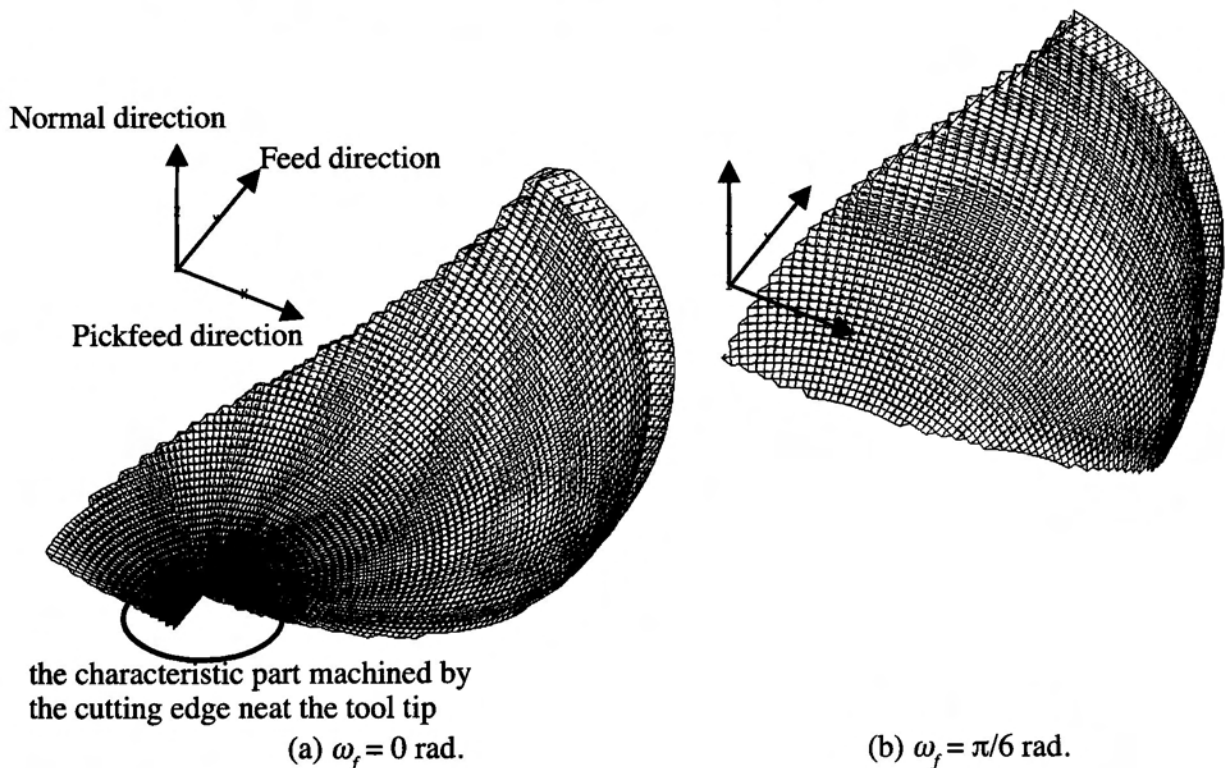


Fig. 2.15 Three dimensional shape of undeformed chip
($R=5\text{ mm}$, $n=2$, $f=1\text{ mm/rev.}$, $p=3\text{ mm/track}$, $a=3\text{ mm}$, $\omega_p = 0\text{ rad.}$)

2. 5 第2章のまとめ

本章ではボールエンドミルによる曲面加工を対象とし、局所的に接平面に平行な平面加工であると近似できる場合を想定した上で、切取り厚さに関する理論解析を通じて、以下の結論を得た。

- 1) 任意のボール半径, 切れ刃数, 切り込み, 一回転当たり送り量, ピックフィード, 工具姿勢, 切れ刃のねじれを考慮し, 任意の切れ刃位置における軌跡の式を明らかにし, 切取り厚さを幾何的に求める解析手法を明らかにした。
- 2) 解析手法の特徴として, 切れ刃干渉点の存在する面を3つに分類し, 各々の計算式を明らかにしている点, 切れ刃干渉点の先行切れ刃における工具回転角と切れ刃角度が特定できる点が挙げられる。
- 3) 自由曲面の任意の加工点における工具姿勢を, 法線方向に対する送り方向傾斜角とピックフィード方向傾斜角の2つの角度で定義した。先行切れ刃との干渉量の計算には送り方向傾斜角のみが影響することを明らかにした。
- 4) 切取り厚さ分布の幾何解析により, これまで明確にされていなかったボールエンドミル加工特有の切屑生成機構を明らかにすることができた。たとえば, 切れ刃各部の切り取厚さの変化に着目すると, 必ずしも見掛け上のアップカット, ダウンカットとは一致しない削り方を示す。また, 同一切削条件でも工具姿勢によっては一回転中に切削断面積のピークが2回生じる場合が存在するなど, 工具姿勢によって切削機構が大きく変化することが明らかになった。
- 5) 切取り厚さ解析結果を基に, 切削断面積および切れ刃各部分における切削長さや除去体積を求め, 工具姿勢の影響を定量的に明らかにした。特に, ピックフィード方向傾斜角が負の場合は, 切れ刃各部分における切削長さや除去体積が他の工具姿勢に較べて大きくなることが明らかになった。これは, 除去部分を通過する切れ刃の向きが工具姿勢によって変化するためである。

第2章の参考文献

- (1) G.Yücesan and Y.Altıntas, Prediction of Ball End Milling Forces, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 118, 1 (1996-2) 95.
- (2) Hsi-Yung Feng and Chia-Hsiang Menq, A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 118, 4 (1996-11) 461.
- (3) H. El Mounayri, A. D. Spence and M. A. Elbestawi, Milling Process Simulation - A Generic Solid Modeller Based Paradigm, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 120, 2(1998-5)213-221.
- (4) Y. Altıntas and P. Lee, Mechanics and Dynamics of Ball End Milling, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 120, 4(1998-11)684-692.
- (5) 藤井義也・寺井丈浩, ボールエンドミルシミュレータに関する研究 一切削抵抗解析 - , 精密工学会誌, 54, 12 (1988-12) 2301-2306.
- (6) Ismail Lazoglu and Steven Y. Liang, Modeling of Ball-End Milling Forces With Cutter Axis Inclination, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122, 1(2000-2)3-11.
- (7) B. M. Imani and M. A. Elbestawi, Geometric Simulation of Ball-End Milling Operations, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123, 2(2001-5)177-184.
- (8) Rixin Zhu, Shiv G. Kapoor and Richard E. DeVor, Mechanistic Modeling of the Ball End Milling Process for Multi-Axis Machining of Free-Form Surface, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123, 3(2001-8)369-379.
- (9) たとえば益子正巳ほか, フライス削りとフライスの設計, 大河出版(1964) 6.
- (10) 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 (2001-10) 266-273.
- (11) 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 (2002-1) 69-82.

第3章 工具回転中心近傍の切屑生成機構

3.1 はじめに

従来より，ボールエンドミルの先端部すなわち工具回転中心近傍で切削された加工面にはいわゆる「荒れ」が発生して，表面粗さが悪くなると言われている．その原因としては，工具回転中心では切削速度が0になるいわゆる「ヌルポイント」での切削になるため，「むしれ」などの切削不良が生じるためとされていた⁽¹⁾．そのため，生産現場では，ボールエンドミル加工においては，できるだけ工具回転中心近傍での加工を避けるように加工条件や工具経路が検討されている⁽²⁾⁽³⁾．しかしながら，被削材形状や工作機械の制御軸数などの都合で，工具回転中心近傍での切削が避けられない場合が多く，工具回転中心近傍での切削現象について詳しく把握する必要がある．

したがって，工具回転中心近傍の切削機構の解明を目指して，様々な研究が行なわれている．岸浪らの研究において，ボールエンドミル加工において工具回転中心近傍において，切れ刃に対する切削速度が負方向になる現象が存在することが指摘されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾．また，高崎らによる工具軌跡の解析⁽⁶⁾，および桑原らに端を発する一連の工具軌跡を追跡する解析⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾によって，工具回転中心の切れ刃の動きに伴い，幾何的に「削り残し」が加工面上に発生することが明らかにされた．工具回転中心近傍切れ刃による加工面上の「削り残し」に関しては，郝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⁽¹¹⁾⁽¹²⁾により，定量的に解明され，また逃げ面による押しつぶしについても明らかにされた．

以上のように、ボールエンドミル加工における工具回転中心近傍の切れ刃による、特有の加工面創成機構については解明されている。しかしながら、このように特徴的な加工面創成時の切れ刃による切屑生成機構については、いまだ明らかにされていない。特に、岸浪らが指摘している切れ刃の逃げ面側から接触する「ラビング現象」や「すくい面と逃げ面が同時に被削材に食い込む「押し込み現象」⁽⁴⁾については、工具損傷や加工精度の観点からも、切れ刃に対する影響を明らかにすることは重要である。

本研究では、工具回転中心近傍の切れ刃と被削材との干渉状態を幾何的に解析および検討し、工具回転中心近傍における切屑生成機構を明らかにする。

3. 2 切れ刃退行現象

本章では、工具回転軸が加工面に垂直で、工具先端部分で加工する場合を例に説明する。図3. 1に工具回転中心近傍における切れ刃と被削材との干渉状況を示す。図3. 1 (a)は、切れ刃が送り方向右側（ダウンカット側）に回ってきた直後の様子を示している。切れ刃の回転半径が小さく周速が送り速度より小さい部分で、切れ刃の逃げ面側へ退くように移動している。本研究では、この現象を「切れ刃退行現象 (backward cutting)」と呼ぶこととする。

図3. 1 (b)は (a) から少し進んだ場合である。工具回転中心近傍で切れ刃退行現象が発生しているのは同じである。切れ刃退行現象により切れ刃と被削材の干渉部分が完全に除去されると仮定すると、その部分の上部に再度切れ刃が来るため被削材と干渉しない切れ刃の領域が存在することになる。本研究では、切れ刃のこの部分を「非接触切れ刃領域 (non contact area)」と呼ぶこととする。図3. 1 (b)に示しているように、工具回転中心側近の切れ刃で切れ刃退行現象が発生し、その外側に非接触切れ刃領域が位置する。その外側では正常な切削が行なわれていると考えられる。ただし、実際には切れ刃退行現象が発生した場合は、逃げ面側で被削材の塑性変形がどのように生じるかは現在のところ明らかにされていない。したがって、非接触切れ刃領域の切れ刃がどのように被削材と干渉しているか否かその詳細は不明である。本報告は幾何的検討を主目的としているため、この切れ刃退行現象に起因して被削材側に生じる塑性変形などの物理的現象については対象とせず、非接触切れ刃領域については、その存在の指摘のみにとどめる。なお、岸浪らの研究⁽⁴⁾では、切れ刃退行現象のことを逃げ面が擦られるとの意味から「ラビング現象」と称している。本研究では切れ刃のみに着目しており、運動を直接表現できる上記の呼称をあらたに用いることとする。また、「押し込み現象」に関しても、すくい面や逃げ面を考慮しないため、本研究では対象としない。

以上のように、ボールエンドミル加工は、工具回転中心近傍では「切れ刃退行現象」が発生し、これに起因した「非接触切れ刃領域」が存在し、複雑な切屑生成機構および加工面創成機構を有する加工方法である。この様に複雑な切削機構を有する加工方法は他にはほとんどなく、ボールエンドミル加工の大きな特徴であり、工具回転中心近傍の切削現象を明確にすることは極めて重要である。

本章では、切れ刃は直刃のみを対象とし、上記「切れ刃退行現象」に着目し、その詳細な発生機構や発生条件、さらには回避するための考え方について検討する。

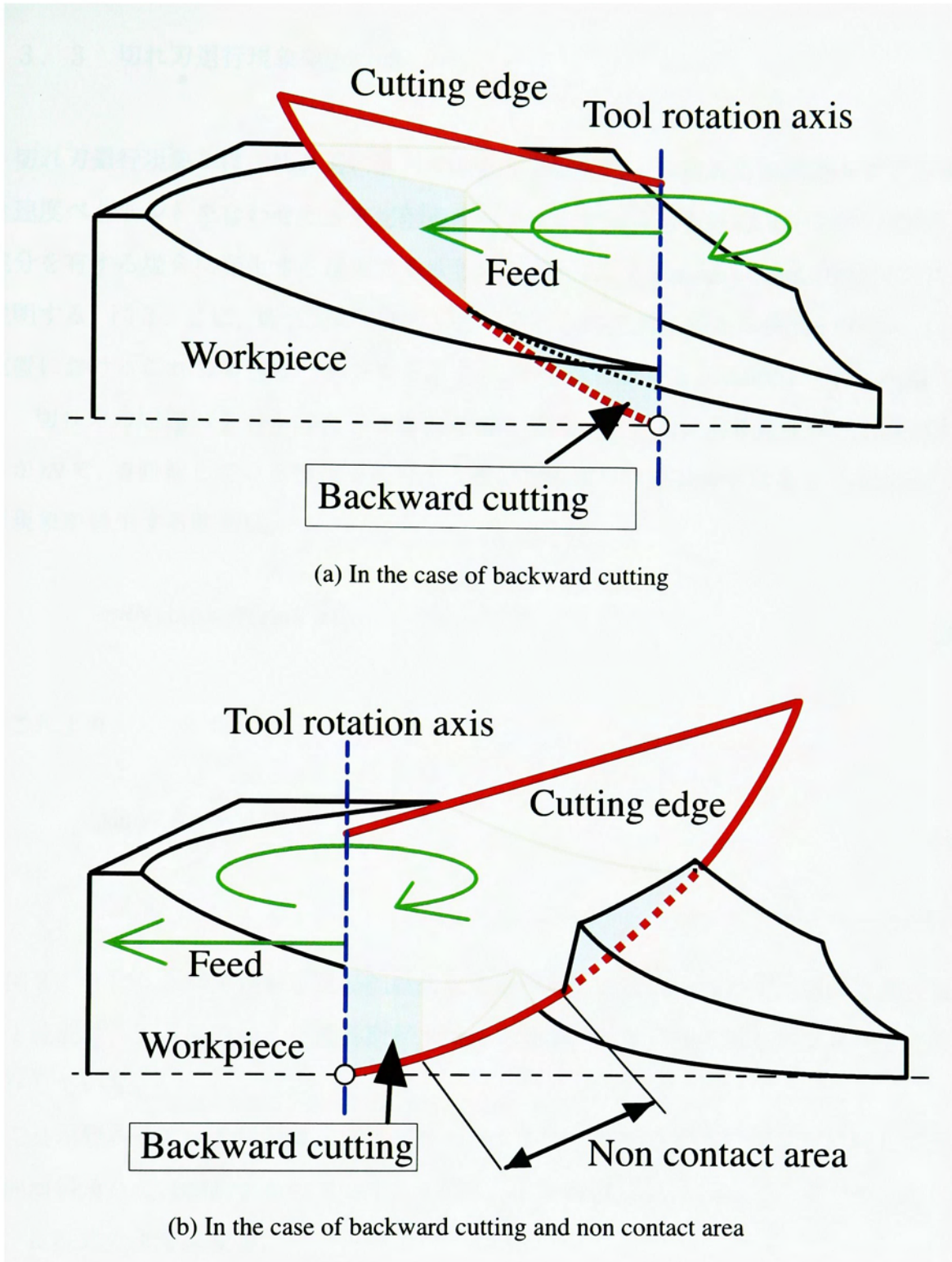


Fig.3.1 Model of interference between cutting edge and workpiece around the center of tool

3. 3 切れ刃退行現象発生範囲

切れ刃退行現象とは、切れ刃に着目すると工具回転による切れ刃の周速ベクトルと送り速度ベクトルとを合わせた合成切削速度ベクトルが切れ刃主分力方向に対して「負」の成分を有する場合に発生する現象であると考えられる。まず $\omega_f = \omega_p = 0$ rad.の場合について説明する。図3. 2に、切れ刃が θ 回転しているときの工具先端から角度 ϕ の切れ刃上の位置におけるこれらの速度ベクトルを示す。この位置における工具回転半径は $R\sin\phi$ であり、切れ刃の周速ベクトルの大きさは $2\pi RN\sin\phi$ となる。また、送り速度ベクトルは大きさが fN で、 θ 回転している切れ刃に対する接線方向成分は $fN\sin\theta$ となる。したがって退行現象が発生する範囲は、

$$2\pi RN \sin\phi + fN \sin\theta < 0 \quad (3.1)$$

これより、

$$\sin\phi < -\frac{f}{2\pi R} \sin\theta \quad (3.2)$$

となる。

図3. 3に、この範囲を工具回転軸に垂直な平面への投影で表わす。切れ刃退行現象発生範囲は、工具回転中心を通る直径 $f/(2\pi)$ の円で、送り方向に対しダウンカット側に存在している。

工具が傾斜している場合は、送り速度ベクトルが切れ刃上の点の回転面に対して送り方向傾斜角 ω_f だけ傾斜するので、送り速度ベクトルの成分が $fN\cos\omega_f$ となるため、式(3. 2)は次式のようになる。

$$\sin\phi < -\frac{f \cos\omega_f}{2\pi R} \sin\theta \quad (3.3)$$

また、工具軸に垂直な平面へ投影した場合の円の直径が $f \cos\omega_f / 2\pi$ になる。ピックフィード方向傾斜角 ω_p は影響しない。

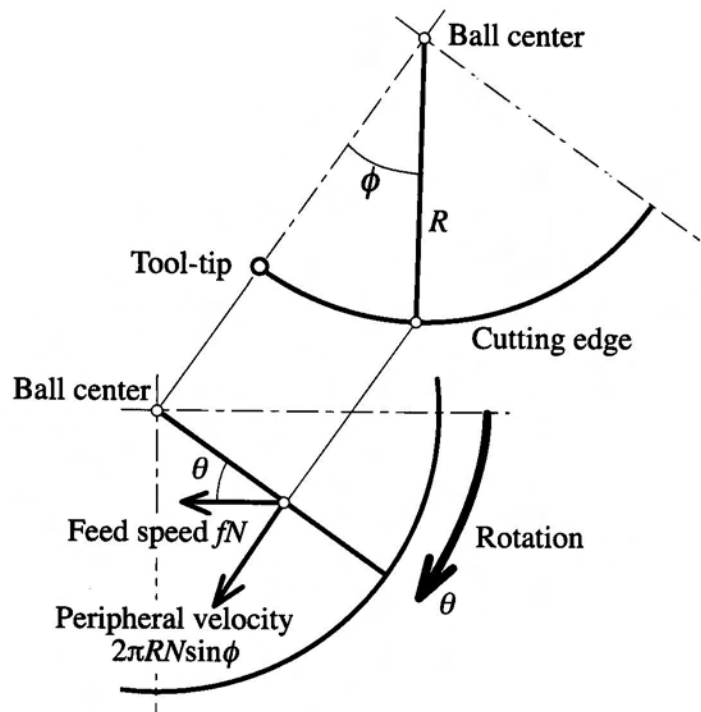


Fig.3.2 Cutting speed at cutting edge

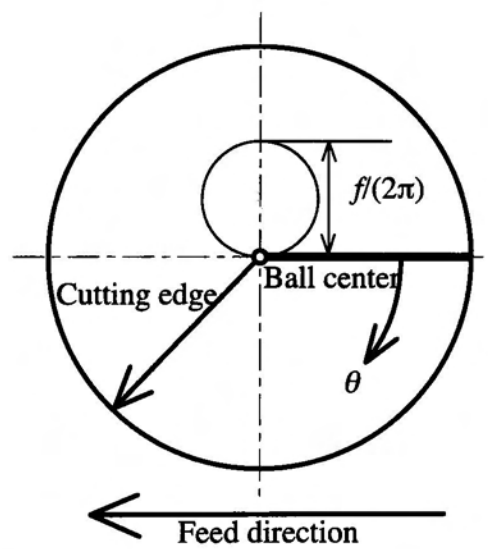


Fig. 3.3 Area of backward cutting

3. 4 切れ刃退行現象発生時の干渉量

切れ刃退行現象発生時の切れ刃と被削材との干渉量を求める。解析方法は第2章に示した切削面との切取り厚さを求める場合とほぼ同様である。ただし、切れ刃退行現象が発生する場合は、切れ刃が先行切れ刃ではなく現回転における切削面と干渉するため、 f' が θ と θ' との差のみで求める必要があるため、 f' の計算には式(2.5)ではなく式(3.4)を用いる。

$$f' = \frac{\theta - \theta'}{2\pi} f \quad (3.4)$$

また、切れ刃退行現象によって切れ刃と被削材が干渉した部分は完全に除去されるものとして解析している。したがって、非接触切れ刃領域も解析的に求められる。

図3. 4は、上記の切れ刃退行現象発生時の切れ刃と被削材との干渉を考慮して解析した結果を立体的に表示したものである。切削条件は、 $R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=1.0\text{mm/rev.}$, $p=1.0\text{mm/track}$, $a=0.1\text{mm}$, $\omega_f=\omega_p=0\text{ rad.}$ である。切れ刃退行現象発生部分の干渉範囲を強調するために、一刃当たりの送り量 f を大きく切り込み量 a を小さく取っている。図3. 4(a)は切取り厚さ分布と、切れ刃退行現象が発生している部分では切れ刃と被削材との干渉量分布を同時に示している。切れ刃退行現象は $\theta=\pi\text{ rad.}$ で発生し始め、 $\theta=3\pi/2\text{ rad.}$ で範囲が最大となり干渉量が大きくなりながら範囲は小さくなって $\theta=2\pi\text{ rad.}$ まで存在している。すなわち、切れ刃が送り方向に対して右側(ダウンカット側)にある時は切れ刃の回転中心近傍では常に切れ刃退行現象が発生している。非接触部分は $\theta=3\pi/2\text{ rad.}$ で発生しはじめ、 $\theta=2\pi\text{ rad.}$ までその範囲は大きくなっていく事がわかる。

図3. 4(b)は、除去部分の実形状である。切れ刃退行現象による切れ刃と被削材との干渉部分が扇型のような形状で、通常の切削による除去部分の下部に位置している。上述の通り、ダウンカット側で切れ刃退行現象が発生していることがわかる。

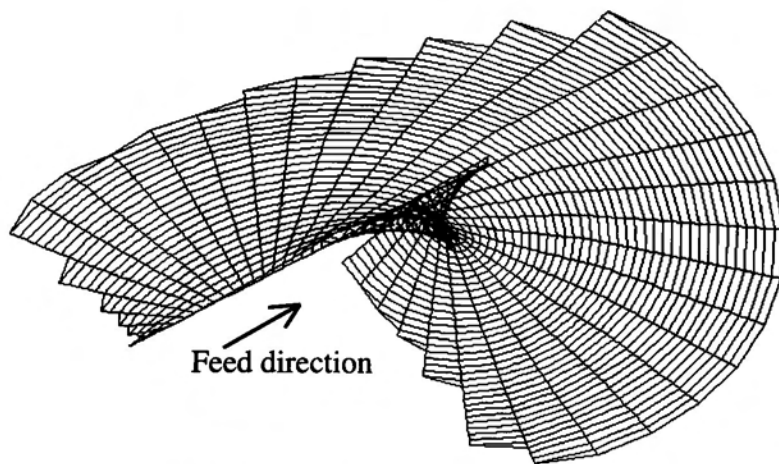
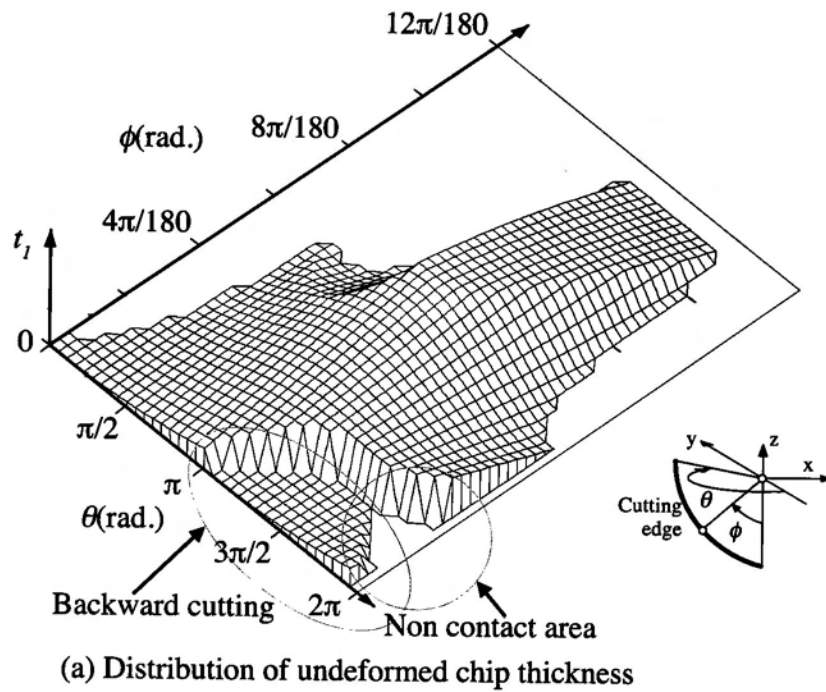


Fig. 3.4 Simulation result of undeformed chip
 ($R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=1.0\text{mm/rev.}$, $p=1.0\text{mm/track}$, $a=0.1\text{mm}$, $\omega_f=\omega_p=0\text{rad.}$)

3. 5 切れ刃退行現象回避条件

「切れ刃退行現象」発生範囲を工具回転軸に垂直な平面で詳細に検討する．図3.5に，切れ刃干渉領域を示す．なお切削条件はボール半径で除して無次元化している． $\omega_f = \pi/18 \text{ rad.}$ で，ダウンカットしている．

切れ刃干渉領域は，式(2.7),(2.13),(2.16)で得られた θ と ϕ の関係で示された境界で囲まれた領域である．それぞれの式で示される境界線を図3.5に色別で示している．切れ刃退行現象は工具回転中心のダウンカット側にあり，この切削条件の場合ではその直径は約0.032である．図3.5においては，この切れ刃退行現象発生範囲は非常に小さく，そのままの寸法では表示困難であるため，おおよその位置を○印で示している．この○印の大きさが切れ刃退行現象発生範囲の大きさを示しているわけではないことに注意されたい．

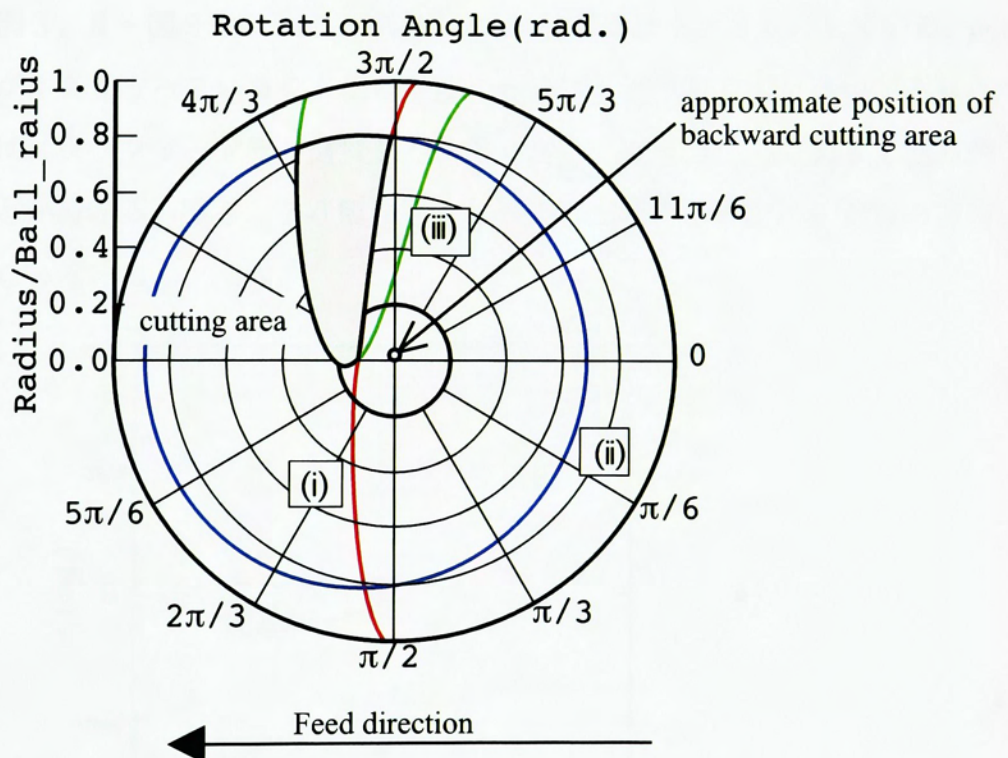


Fig. 3.5 Cutting area and backward cutting area
($R=5\text{mm}$, $f=1\text{mm/rev.}$, $a=2\text{mm}$, $p=0.2\text{mm/track}$, $n=2$, $\omega_f=\pi/18 \text{ rad.}$, $\omega_p=0 \text{ rad.}$)

図3. 5の場合は、切れ刃の干渉領域が退行現象発生範囲を含んでいないため、幾何的には「切れ刃退行現象」が回避されていることになる。切れ刃干渉領域をこのように示すことで、「切れ刃退行現象」発生の有無を把握できる。

切れ刃退行現象は、その発生範囲が送り f のみで決定される。さらに必ず工具回転中心に接する領域で発生するため、送り、切り込み、ピックフィードを変えても切れ刃退行現象の影響を回避するのは困難である。したがって、工具回転中心近傍が切れ刃干渉領域に含まれないように工具姿勢を変えることが有効であることが分かる。そのためには、図3. 5のように工具姿勢と切れ刃干渉領域の関係を幾何的に正確に求めて検討する必要がある。

図3. 6は、図3. 5と同一切削条件において切れ刃退行現象が発生する工具姿勢の範囲を示している。この切削条件はいわゆるダウンカットであるため、工具姿勢をピックフィード方向に対して反対方向すなわち ω_p が負の方向に傾けると工具先端が切削領域内に入る。したがって、図3. 7に示すようにアップカットにすると、逆になり ω_p が正の方向に傾けたとき切れ刃退行現象が発生する。図3. 6に対して他の切削条件を変えた場合の結果を図3. 8～図3. 10に示す。図3. 8は送りを $1/10$ にしている。 ω_p が正の範囲の幅が小さくなっていることがわかる。それ以外にはほとんど違いがみられない。図3. 9はピックフィードを5倍にした結果である。 ω_p が負の方に大きく範囲が広がっていることが分かる。図3. 10切り込みを半分した結果である。 ω_p が負の方向の範囲が小さくなっている。

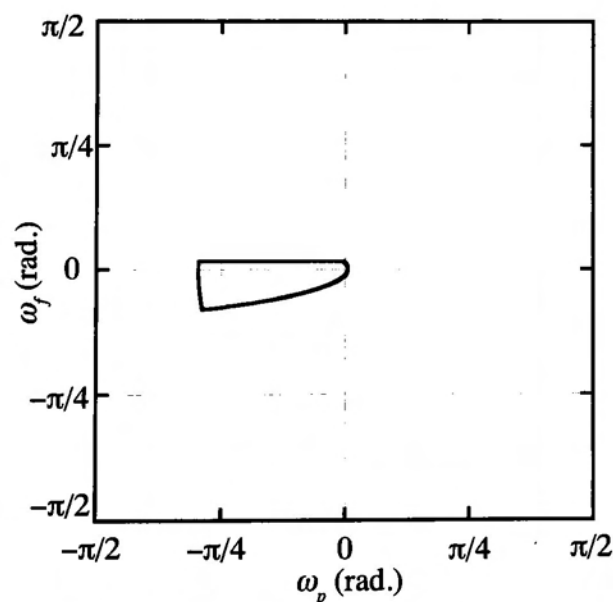


Fig.3.6 Area of tool orientation in backward cutting
($R=5\text{mm}$, $f=1\text{mm/rev.}$, $p=0.2\text{mm/track}$, $a=2\text{mm}$, $n=2$)

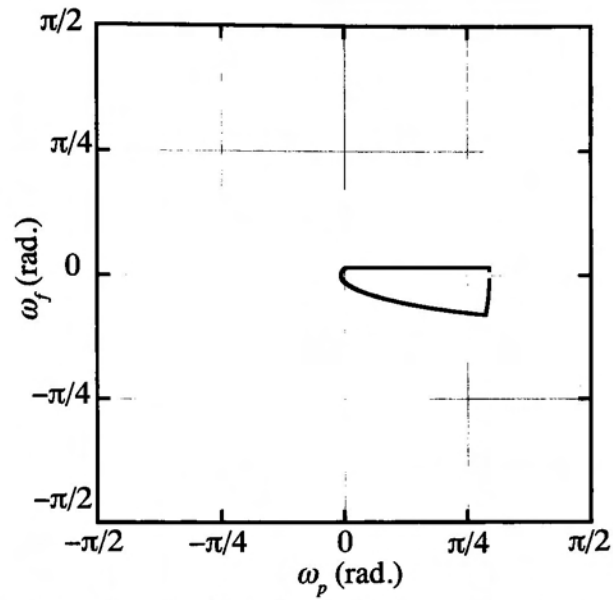


Fig.3.7 Area of tool orientation in backward cutting (up-cut)
 ($R=5\text{mm}, f=1\text{mm/rev.}, p=-0.2\text{mm/track}, a=2\text{mm}, n=2$)

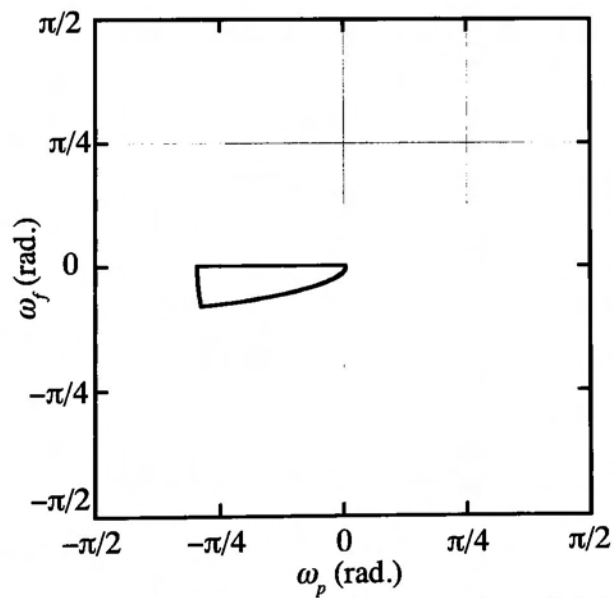


Fig.3.8 Area of tool orientation in backward cutting ($f=0.1\text{mm/rev.}$)
 ($R=5\text{mm}, f=0.1\text{mm/rev.}, p=0.2\text{mm/track}, a=2\text{mm}, n=2$)

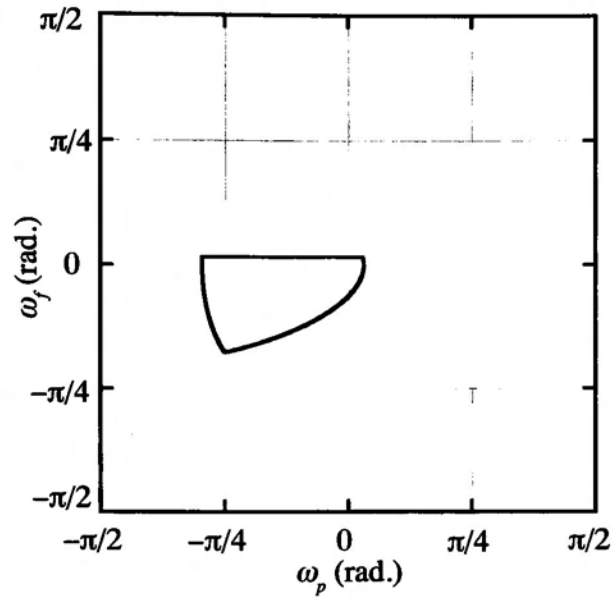


Fig.3.9 Area of tool orientation in backward cutting ($p=1\text{mm/track}$)
 ($R=5\text{mm}, f=1\text{mm/rev.}, p=1\text{mm/track}, a=2\text{mm}, n=2$)

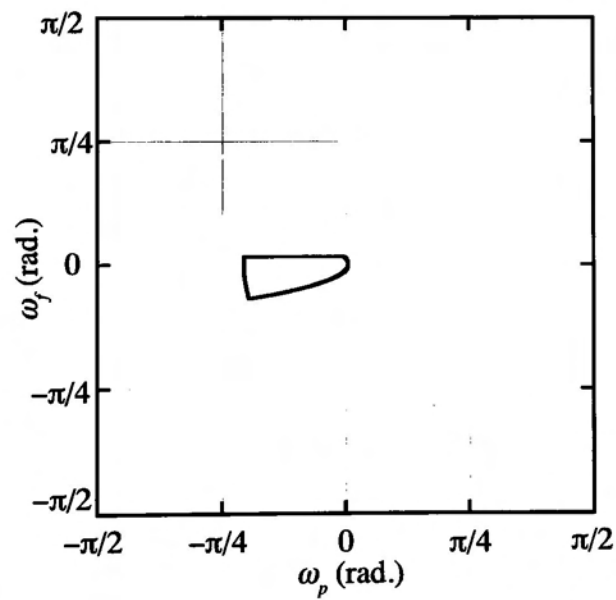


Fig.3.10 Area of tool orientation in backward cutting ($a=1\text{mm}$)
 ($R=5\text{mm}, f=1\text{mm/rev.}, p=0.2\text{mm/track}, a=1\text{mm}, n=2$)

3. 6 表面粗さに与える切れ刃退行現象の影響

3. 6. 1 実験方法

切れ刃退行現象が加工面性状に与える影響について、実験的に検討する。切削実験は、5軸制御のマシニングセンタを用いて、図3. 11に示すように送り方向のみ工具回転軸を傾けた傾斜切削を行なった。切削条件は表3. 1に示すとおりである。被削材には一般的な炭素鋼S45Cを用い、工具材には超硬合金を使用した。 ω_f は $-\pi/4\text{rad.}$ から $\pi/4\text{rad.}$ まで $\pi/36\text{rad.}$ きざみで変化させた。加工面の送り方向の表面粗さを触針式表面粗さ計で測定し、最大高さ R_y を求めた。

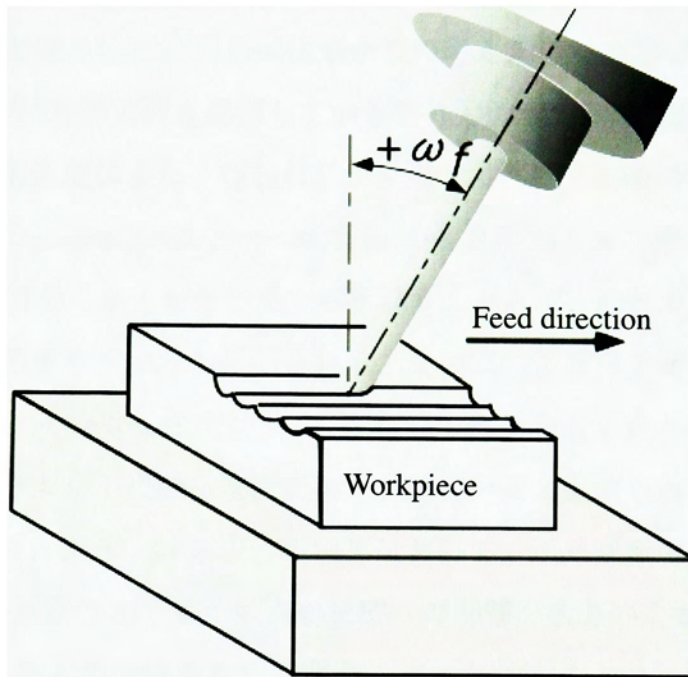


Fig. 3.11 Cutting test

Table 3.1 Cutting conditions

Workpiece	S45C
Tool	cemented carbide
Ball radius	5mm
No. of teeth	2
Cutting fluid	(Dry)
Feed per rev.	0.05mm/rev.
Spindle speed	4800rpm
Tool orientation	$\omega_f = -\pi/4 \sim \pi/4 \text{ rad.}, \omega_p = 0\text{rad.}$
Depth of cut	0.5mm
Pickfeed	0.5mm/track (up cut, down cut)

3・6・2 実験結果

送り方向傾斜角 ω_f と最大高さ R_y の関係を図 3. 1 2 に示す。 $\omega_f=0\text{rad.}$ では前述の通り、理論的にも削り残し等が発生するため、 $R_y=60\mu\text{m}$ と大きな値になっている。特徴的なのは工具の傾斜が正方向と負方向とで R_y の傾向が大きく異なっていることである。正方向に傾けると $\pi/36\text{rad.}$ 程度のわずかな傾きでも、大きく傾けた場合と同程度の小さな表面粗さが得られている。これに対し、負方向へ傾ける場合では $-\pi/36\text{rad.}$ から $-\pi/12\text{rad.}$ の範囲で R_y が大きくなっている。工具回転中心近傍での切削面は表面粗さが悪いことは経験的に知られており、 $\omega_f<0$ の場合の実測結果はこのことを示している。このように表面粗さが悪くなる原因として、従来は切削速度が 0 もしくは極めて小さいため正常な切削が行なわれず、いわゆる「むしれ」が発生するためであると考えられてきた。しかしながら、 $\omega_f>0$ の場合の表面粗さの実測結果は従来からの考えだけでは説明できない。工具傾斜の絶対値が等しいので、加工面を切削している切れ刃の周方向の切削速度は同一である。したがって、低切削速度による「むしれ」が原因であれば、 $\omega_f<0$ の場合と同様の表面粗さを示すべきである。 $\omega_f=\pi/18\text{rad.}$ と $\omega_f=-\pi/18\text{rad.}$ のときの加工面の様子を図 3. 1 3 に示す。 $\omega_f=\pi/18\text{rad.}$ では、「むしれ」が生じているとは考えられず、切れ刃の切削跡が明瞭に残っており正常に切削されていると推測される。このため表面粗さが小さくなっていると考えられる。一方、 $\omega_f=-\pi/18\text{rad.}$ では、「むしれ」であるかどうかという判断は困難であるが、切削痕と言うより不規則な塑性変形を受けていると推測される様子を示している。

以上のことから、ボールエンドミル加工において、工具回転中心近傍における加工面は、わずかな工具傾斜の差でもその表面状態への影響が大きいことが明らかになった。これは、「むしれ」などの物理的な切削現象の違いと考えるより、切削機構そのものが異なっているためであると推測される。工具傾斜による加工面の違いには、これまでに述べている「切れ刃退行現象」が大きく関与していると想像される。

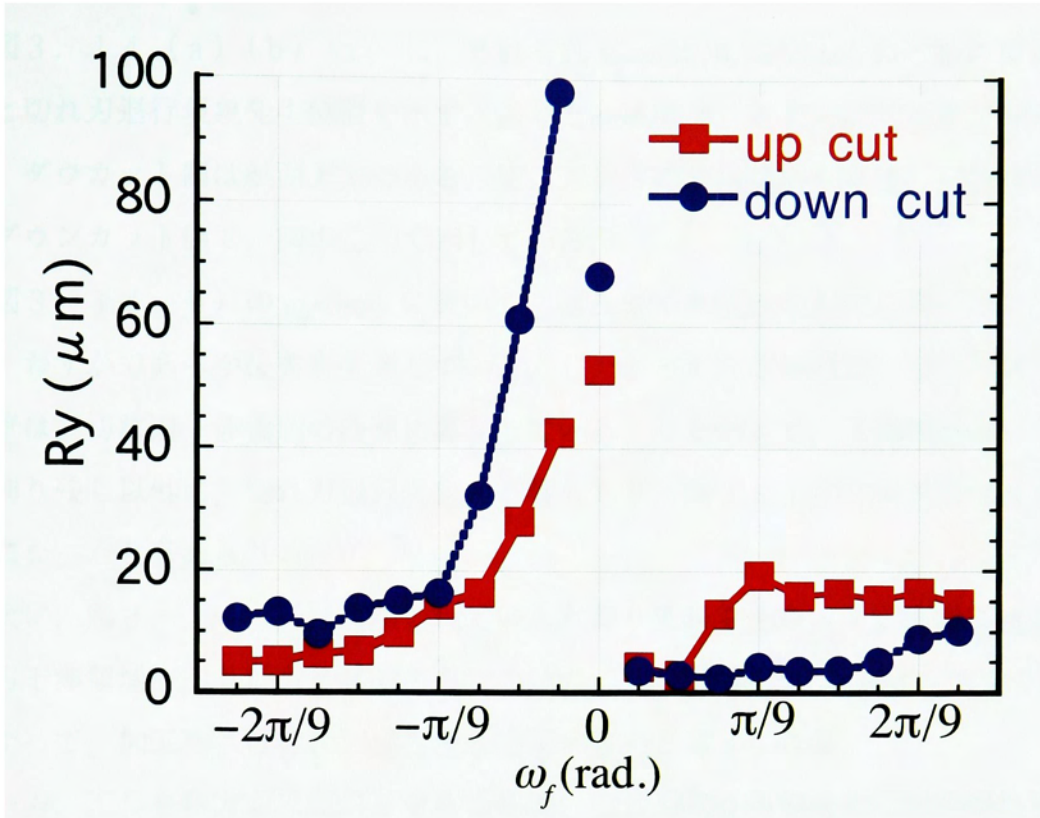
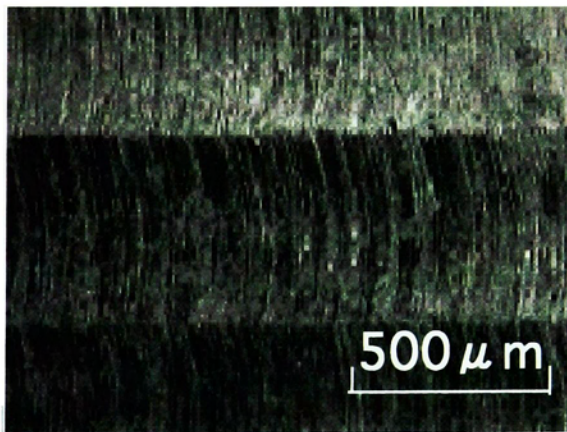
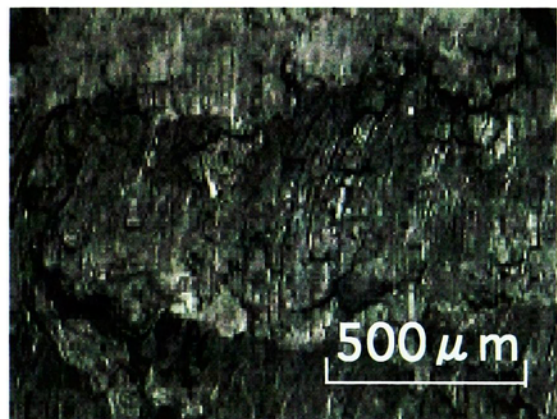


Fig. 3.12 Relationship between surface roughness and ω_f



(a) $\omega_f = \pi/18$ rad. downcut



(b) $\omega_f = -\pi/18$ rad. downcut

Fig.3.13 Machined surface in cutting experiments

3・6・3 切れ刃退行現象発生範囲との関係

図3. 14 (a) (b) (c) に、それぞれ $\omega_f = \pi/18, 0, -\pi/18 \text{rad.}$ のときの切れ刃干渉領域と切れ刃退行現象発生位置を示す。送り方向は図3. 5と同様に紙面左方向であるので、ダウカット側は紙面上方である。切れ刃退行現象の発生位置は、工具回転中心の側近ダウカット側で、図中○印で示している。

図3. 14 (b) の $\omega_f = 0 \text{rad.}$ において、切れ刃干渉領域は主に工具中心の前方に分布し、わずかであるが後方も分布している。したがって、この場合、切れ刃退行現象発生位置は、切れ刃干渉領域の内部に存在している。したがって、工具回転中心近傍における削り残し以外に、切れ刃退行現象の影響もあり、図3. 12に示された大きな表面粗さになったと考えられる。

次に、図3. 14 (a) に示されているとおり工具を送り方向正方向に傾けると、切れ刃干渉領域が工具前方に移動するため、切れ刃退行現象発生範囲から大きく離れる。したがって、加工面には切れ刃退行現象影響が無いと考えられる。

一方、工具を負方向に傾斜させる場合は、切れ刃退行現象発生位置が切れ刃干渉領域から外れるためには、ある程度以上傾ける必要がある。図3. 14 (c) に示すとおり $\omega_f = -\pi/18 \text{rad.}$ では、切れ刃退行現象発生位置は切れ刃干渉領域から僅かに離れているものの $\omega_f = \pi/18 \text{rad.}$ と比べて接近しており、加工面に切れ刃退行現象に起因した工具逃げ面の押しつけなどによる被削材の塑性変形などの影響が生じていると推察される。

図3. 15に、この切削条件において切れ刃退行現象が発生する工具姿勢の範囲を示す。これより、図3. 12に示した ω_f が負の場合、退行現象発生範囲よりも少し外側でも表面粗さが悪くなっている。したがって、実際には退行現象によって加工面に影響を与える範囲が広がる可能性を示している。また、図3. 16に $\omega_f = \pi/18 \text{rad.}$ と $\omega_f = -\pi/18 \text{rad.}$ の場合の切取り厚さ分布を示す。この図からも、 $\omega_f = -\pi/18 \text{rad.}$ の場合は、切削範囲は工具中心切れ刃に近接しており、さらに工具中心に近い方が切取り厚さが厚いことが分かる。

以上より、少なくとも、図3. 12に示された工具傾斜方向による表面粗さの違いは、切れ刃退行現象の影響が大きく関わっていることを示していると考えられる。また、切れ刃退行現象発生位置を正確に把握し、切れ刃干渉領域から離れるように適切な工具傾斜を与えることで、表面粗さを小さく維持できることが可能であることが明らかになった。

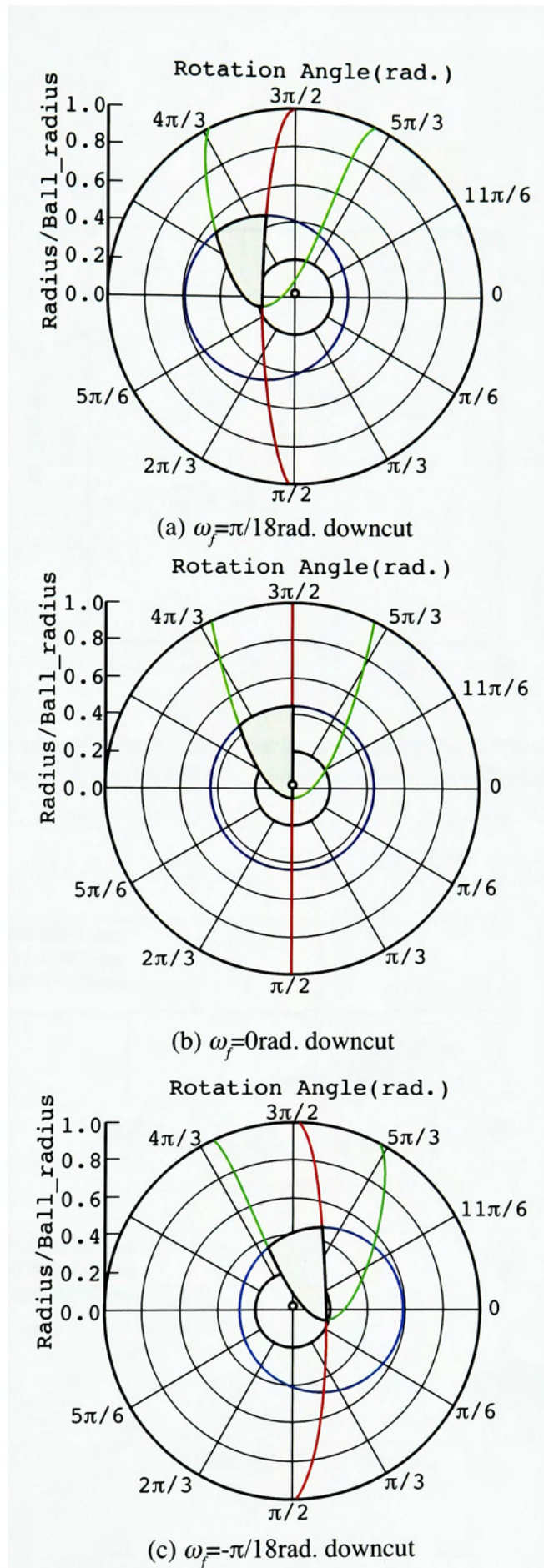


Fig.3.14 Backward cutting area and cutting area at some inclination angles
(Cutting conditions are shown in Table 2)

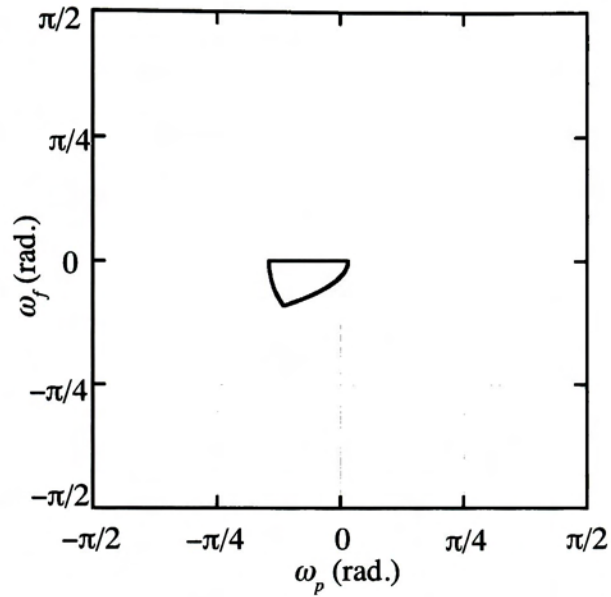


Fig.3.15 Area of tool orientation in backward cutting for machining experiments
 $R=5\text{mm}, f=0.05\text{mm/rev.}, p=0.5\text{mm/track}, a=0.5\text{mm}, n=2$

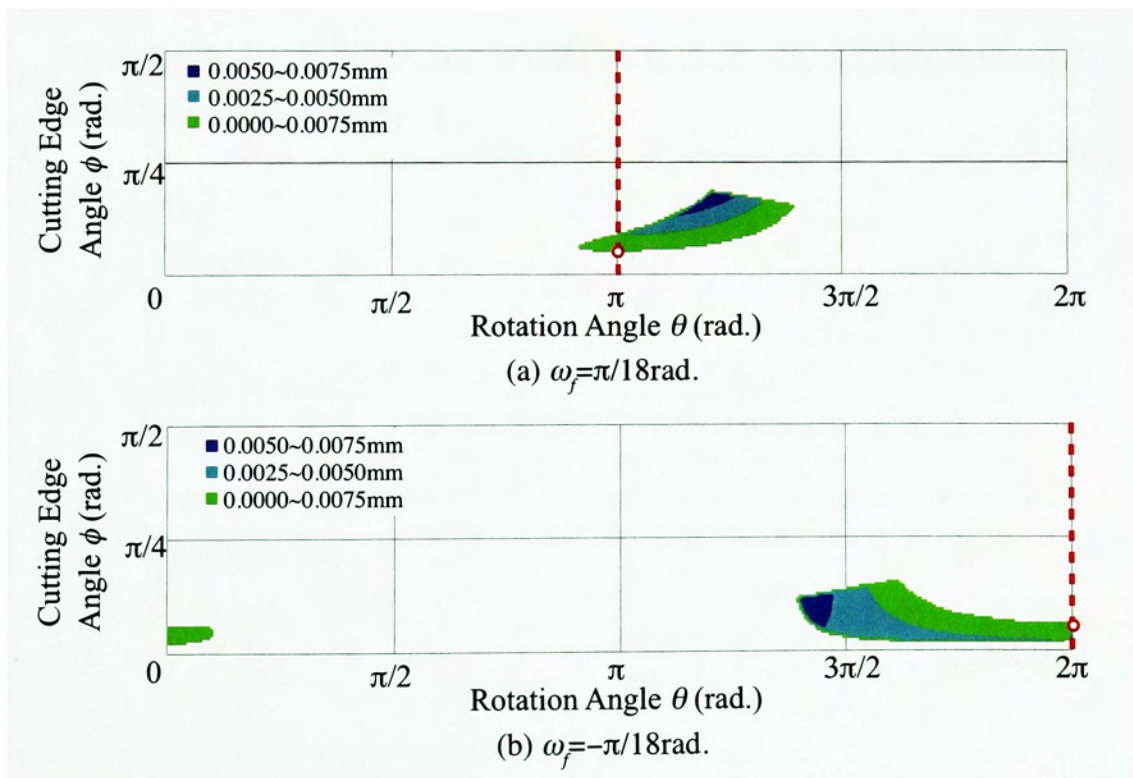


Fig.3.16 Distribution of undeformed chip thickness for machining experiments
 $R=5\text{mm}, f=0.05\text{mm/rev.}, p=0.5\text{mm/track}, a=0.5\text{mm}, n=2, \omega_p=0\text{rad.}$

3・7 3章のまとめ

本章では、ボールエンドミル加工における工具回転中心近傍の幾何的切屑生成機構を詳細に検討した結果、下記の事柄が明らかになった。

- 1) 工具回転中心近傍のダウンカット側に、切れ刃退行現象が発生する。切れ刃退行現象とは、切れ刃の周速より送り速度の周方向成分が大きい場合に、工具逃げ面側から被削材に干渉する現象である。この切れ刃退行現象発生範囲は、工具回転中心側近ダウンカット側に位置し、直刃の場合は工具回転中心に垂直な平面への投影上で直径 $f \cos \omega_f / (2\pi)$ の円形である。
- 2) 切れ刃退行現象発生位置が切れ刃干渉領域内もしくはその近傍に存在すると、切れ刃退行現象の影響により、 $-\pi/9(\text{rad.}) < \omega_f < 0(\text{rad.})$ で表面粗さが大きくなることが明らかになった。また、一般的には、工具送り方向に僅かに傾斜させるだけで、切れ刃退行現象の影響を避けることが可能である。
- 3) 切れ刃退行現象が発生する場合、切れ刃との干渉部分が全て除去されると仮定すると、理論上は切れ刃上に非接触領域が存在する。ただし、切れ刃退行現象が発生すると、逃げ面で被削材が押し込まれるため、被削材上が塑性変形すると想像され、実際に存在するかは不明である。切り込み量が小さく一刃当たりの送り量が大きく切れ刃退行現象の影響が大きい切削条件の場合は、この非接触領域の存在は無視できない事であると想像される。

第3章の参考文献

- (1) 内藤国雄・大庫和孝・小長哲郎・阿部忠之・神田敬一・松岡和彦, 金型の高品位・高能率仕上切削法の開発, 精密工学会誌, 59,4(1993-4)649-654.
- (2) 高津戸光雄・貴志浩三, ボールエンドミルによる傾斜最適送りの実現, 日本機械学会論文集 (C編), 56,521(1990-1)189-194.
- (3) 高津戸光雄・古沢利明・高田昇・貴志浩三, 傾斜最適送りによるボールエンドミル加工に関する研究, 精密工学会誌, 56,2(1990-2)299-304.
- (4) 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 (1980-10) 1303-1310.
- (5) 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 (1981-4) 459-465.
- (6) 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
- (7) 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.
- (8) 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 (1990-3) 139-142.
- (9) 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 (1993-9) 1537-1542.
- (10) 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 (1996-7) 1019-1105.
- (11) 郝明暉・浅尾晃通・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 (1999-10) 1476-1480.
- (12) 郝明暉・浅尾晃通・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 (2000-7) 1150-1154.
- (13) 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(2002-8) 2457-2463.

第4章 幾何解析に基づく加工面創成機構

4.1 はじめに

ボールエンドミルを含むエンドミル加工において、加工誤差を発生させる主な原因の一つとして、切削抵抗による工具系の弾性変形が挙げられている⁽¹⁾⁽⁵⁾。これは、被削材との干渉を避けるためにエンドミルの形状が細長くならざるを得ないため、避けることができず、エンドミル加工の本質的な課題である。したがって、エンドミル加工の高精度化を検討するために、これまでエンドミル加工の切削抵抗についてさまざまな解析がなされてきている⁽²⁾⁽⁵⁾。ボールエンドミル加工に関しては、加工精度に関しては実験的研究のみ⁽¹⁾⁽⁶⁾で、解析的な検討は未着手である。

スクエアエンドミルは通常ねじれ刃がよく用いられているので、仕上面には常にいずれかの切れ刃が接触している。したがって、工具一回転中の切削抵抗の変動が全て加工精度に影響するため、全ての工具回転角における切削抵抗を正確に知る必要がある。

一方、ボールエンドミル加工では、加工精度を決定する被削材上の点を加工するのは切れ刃一回転中の一瞬である。加工精度を検討するためには必ずしも、すべての工具回転角における切削抵抗、工具挙動を知る必要は無い。この特徴を利用して、本章ではこれまでに述べた幾何解析手法を利用して、加工面創成機構、その中でも加工精度について検討することとする。

4. 2 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のことを本論文では「加工面創成点 (point of machined surface generation)」と称することとする。図4. 1に示すように、加工後の被削材上には、この加工面創成点近傍の一刃当たり送り量×ピック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。このように、加工面創成点が離散的に存在し加工面を創成する機構を有する加工法は、ボールエンドミル加工以外では歯切りの一部くらいであり、ボールエンドミル加工の切削機構上大きな特徴の一つであると考えられる。このことから、ボールエンドミル加工に関しては、特に加工後の形状精度を検討する上で、切れ刃が加工面創成点を通過する瞬間における被削材との干渉状態を把握することは極めて重要であると考えられる。しかしながら、これまではこの加工面創成点を切れ刃が通過する時に着目して検討された例は皆無である。

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4. 2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 とピック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4. 2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(4.1)式で表わされる。なお、 $\omega_f = \omega_p = 0$ の場合は、加工面創成点と工具先端が一致するため切れ刃は常時加工面創成点に接触しており θ_G を定めることができないが、便宜上0rad.とした。

$$\left. \begin{aligned} \theta_G &= \tan^{-1} \frac{\tan \omega_p}{\sin \omega_f} + \pi \quad (\text{except } \omega_f = \omega_p = 0) \\ &= 0 \quad (\omega_f = \omega_p = 0) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

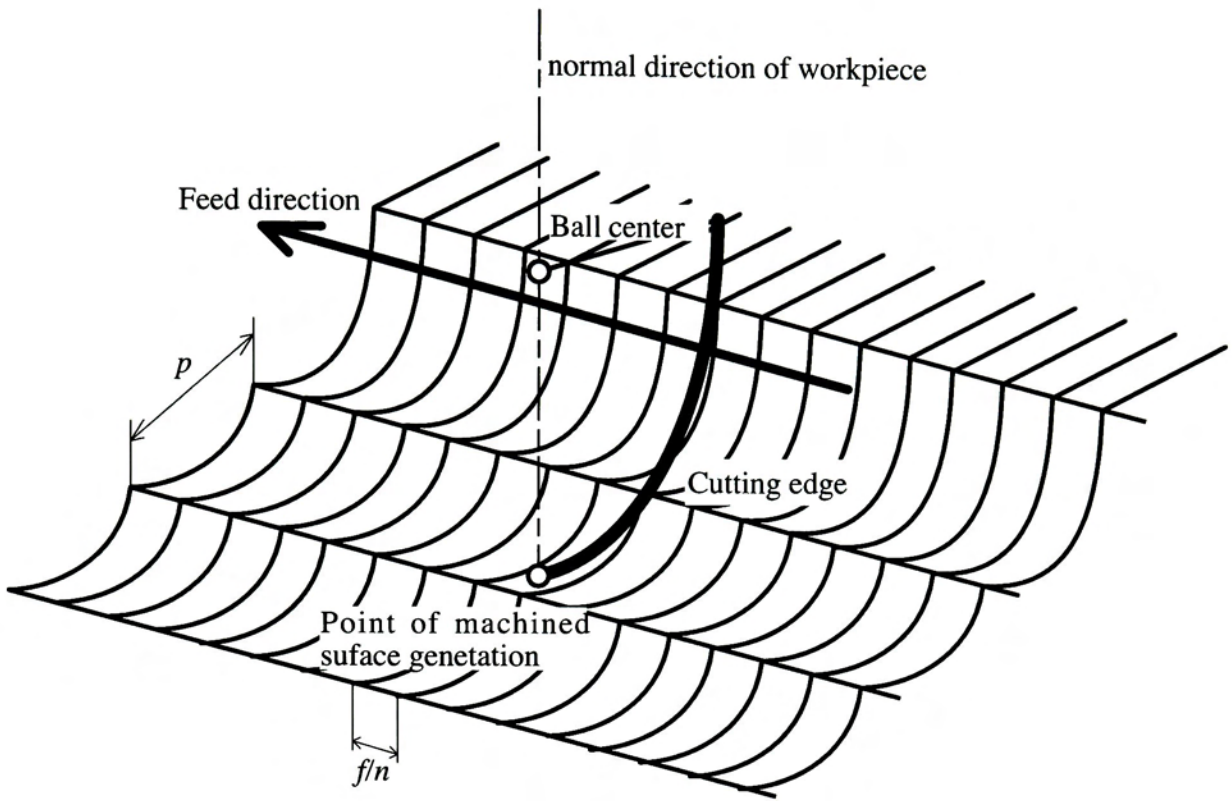


Fig.4.1 Definition of point of machined surface generation

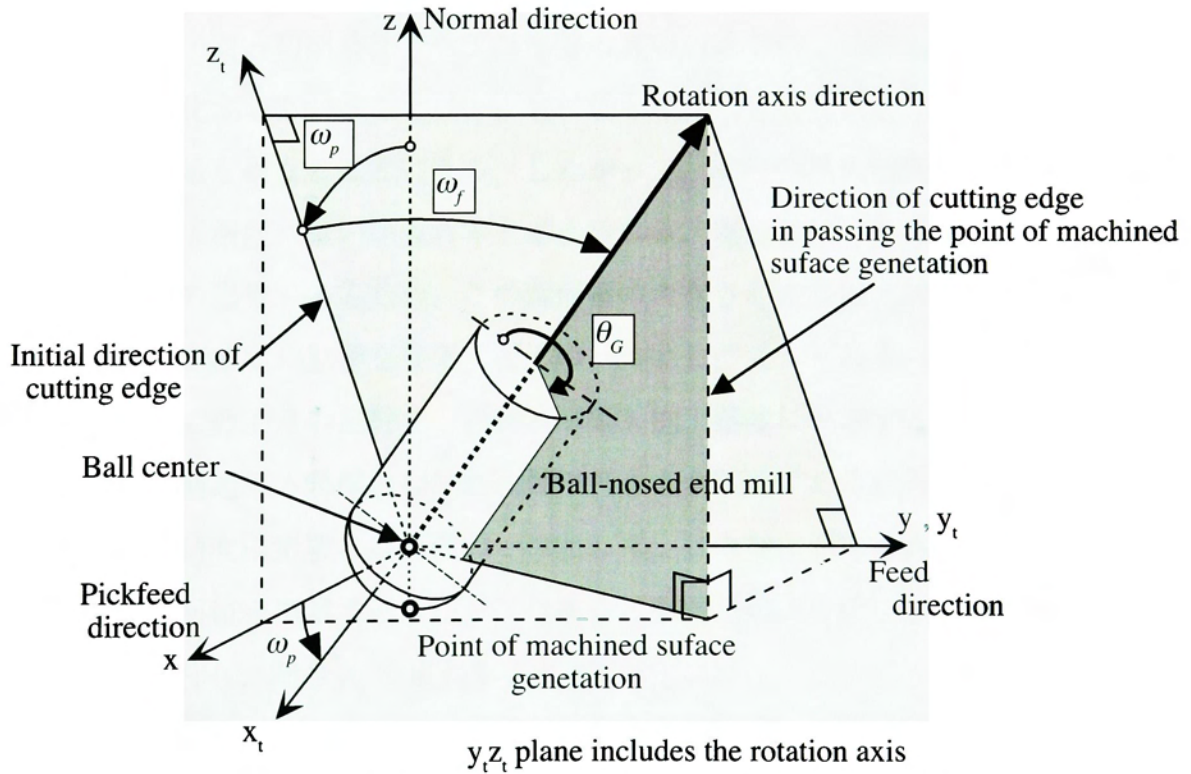


Fig.4.2 Definition of tool inclination angle and θ_G

4. 3 切削断面形状

図4. 3は同一加工条件で工具姿勢が異なるとき、切れ刃が加工面創成点を通過する瞬間の被削材の除去部分と切れ刃との干渉状態を模式的に示している。なお、本章においては説明を容易にするために直刃を対象としているが、考え方はねじれ刃の場合でも同様である。工具姿勢が異なると、切れ刃による被削材の除去部分形状は全く同一ではないが通常の切削条件の範囲ではその違いはわずかであるので、説明上同一形状の図を用いることとする。ただし、ボール中心の位置を定めると、工具姿勢に関わらず、加工面創成点の位置は同一である。

図4. 3 (a)では、工具先端が紙面左手前にある。この工具先端とボール中心を結ぶ直線が工具回転軸となる。工具回転軸と加工面創成点を含む面内に切れ刃が位置するときに、切れ刃が加工面創成点を通過する瞬間である。このときの、切れ刃と被削材除去部分との干渉範囲すなわち「切削断面」を薄墨で示している。

図4. 3 (b)では、工具先端が紙面右手前に位置しているため、被削材除去部分を掃引する方向が異なり、切削断面は図のように図4. 3 (a)とは異なった形状となっている。したがって、切れ刃が加工面創成点を通過する瞬間の切削断面は、工具姿勢によって異なった形状になり、その面積も異なることがわかる。

以上のように、同一切削条件でも工具姿勢の違いのみで加工面創成点を通過する瞬間の切削断面が変化するということは、工具に加わる切削抵抗も異なり、工具もしくは被削材の弾性変形量も異なることになる。したがって、弾性変形に起因する加工誤差に影響を及ぼし、加工精度に違いが表れると考えられる。実際には、切削抵抗の向きや工具の変形方向などの影響もあるため、この断面積の大きさが直接加工誤差に比例するわけではないが、加工精度に影響を与える因子の一つとして考えられる。また、加工面創成点を通過するまでの工具の振動などの動的挙動も加工精度に影響するが、第一義的には加工面創成点を通過する瞬間の切削断面積の大きさが重要であると考えられる。そこで、本研究では、加工精度に影響する指標の一つとして、この加工面創成点を切れ刃が通過する瞬間の切削断面積を提案する。なお、以降この断面積のことを「加工面創成点通過時切削断面積」と称し、記号 A_g で表わすこととする。

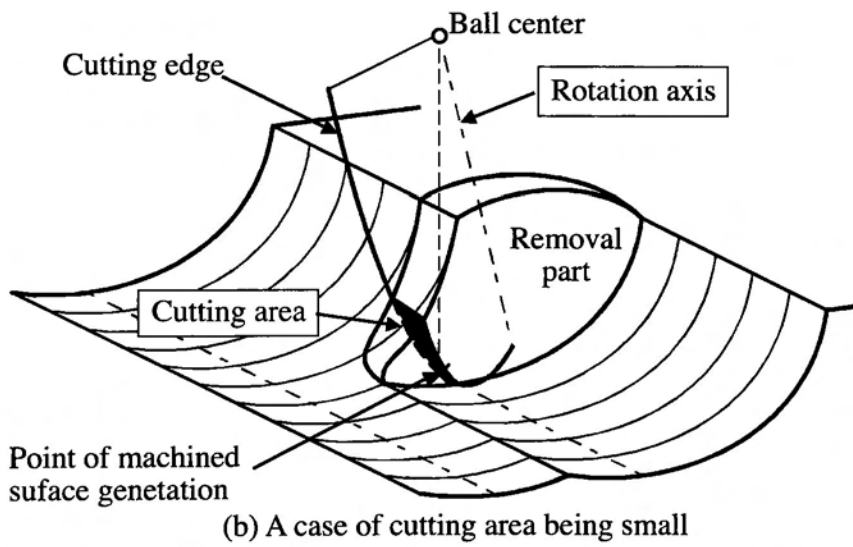
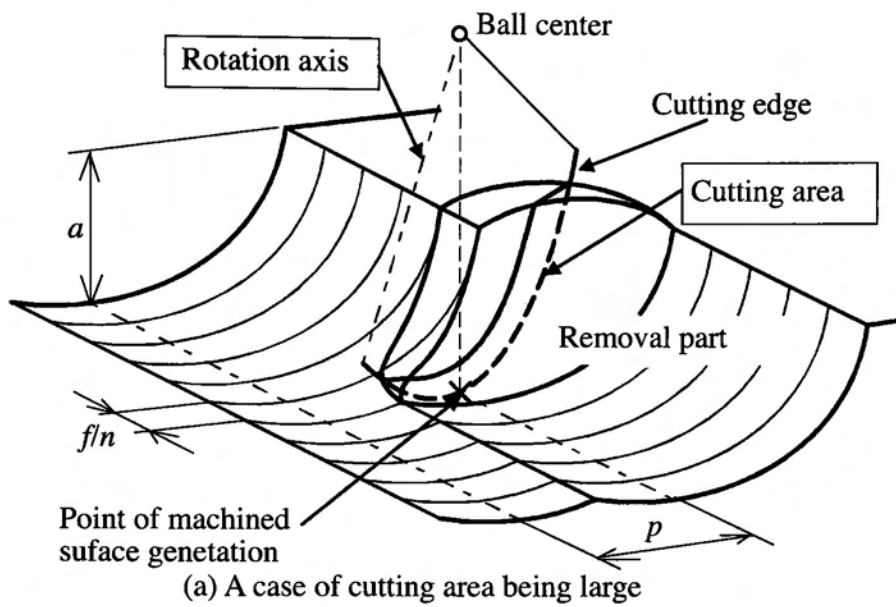


Fig.4.3 Cutting area model at the point of machined surface generation

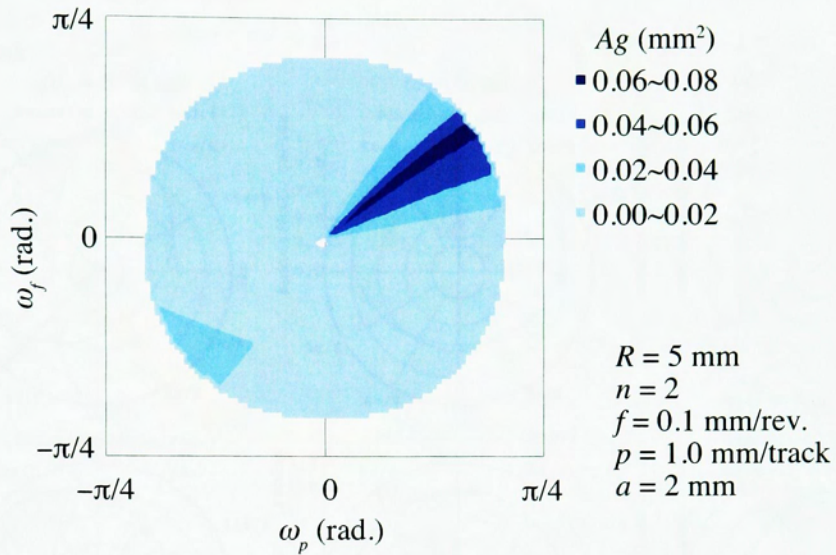
4. 4 工具姿勢と加工面創成点通過時切削断面積

図4.4に送り方向傾斜角 ω_f とピックフィード方向傾斜角 ω_p を変えた場合の加工面創成点通過時切削断面積 A_g の解析例を示す。ピックフィード以外の切削条件は $R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=0.1\text{mm/rev.}$, $a=2\text{mm}$ である。図4.4(a)は $p=1.0\text{mm/track}$ でのピックフィード加工, 図4.4(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。 ω_f と ω_p はそれぞれ $-\pi/4$ から $\pi/4$ の範囲で, 間隔は $\pi/180\text{rad.}$ で計算している。また, 本解析では球面上の切れ刃のみを解析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。

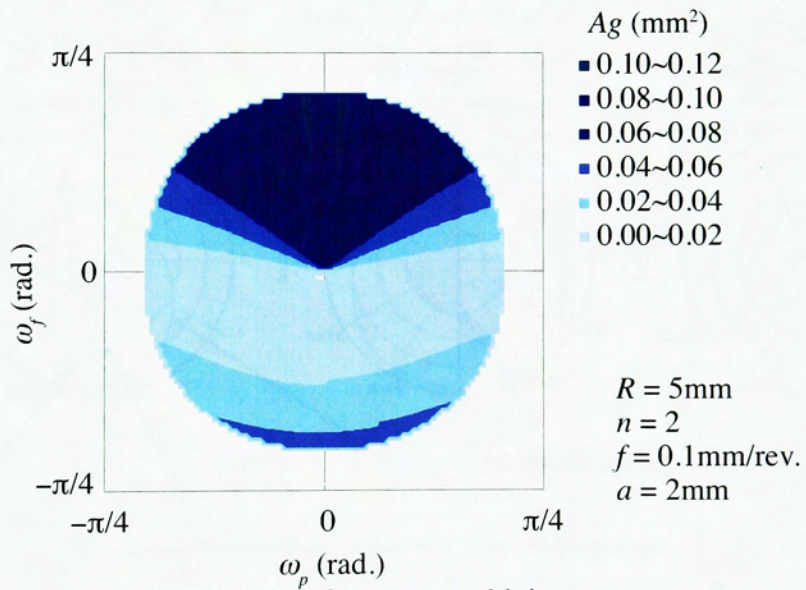
図4.4(a)では $0<\omega_f, 0<\omega_p$ の範囲に A_g が大きな範囲が存在しており, これ以外の範囲では全般に小さな値となっている。本解析条件では, A_g の最大値と最小値には100倍以上の差がある。図4.5は, 本解析条件と同一切削条件における数種の工具傾斜における切れ刃干渉領域を示している。□印が加工面創成点である。したがって, 図4.5において工具回転中心と□印を結んだ線分が, 加工面創成点通過時の切れ刃の位置であり, この切れ刃と切れ刃干渉領域が重なっている部分が切削断面になる。図4.5より, $0<\omega_f, 0<\omega_p$ の範囲では切れ刃と切れ刃干渉領域が重なっている部分が大きく, これ以外の部分では小さいことがわかる。 $0>\omega_f, 0>\omega_p$ の範囲では, 工具先端が切れ刃干渉領域内にあり全体を横断していないため, A_g が小さい。したがって, ω_f と ω_p の絶対値が大きくなり, 工具先端が切れ刃干渉領域から外れ, 切れ刃が全体を横断するようになると A_g が大きくなっている。

図4.4(b)の溝加工の場合は, 切れ刃干渉領域が工具進行方向のみに分布するため, $0<\omega_f$ の範囲で A_g が大きく, $0>\omega_f$ では小さくなることがわかる。また, $\omega_f=0$ では ω_p を変化させても A_g は小さいままで, 大きな変化はない。これは, ピックフィード加工でも同様である。

以上から A_g の大きさが工具姿勢によって極端に異なることが明らかになった。前述の通り, A_g に比例して加工誤差が変化するとは限らないが, この様に大きな違いがあるということは, 加工精度に影響することが十分推測できる。したがって, 加工条件や工具経路を検討する際に A_g を小さくなるように設定する方が高い加工精度が得られると考えられる。



(a) Example of pickfeed machining



(b) Example of groove machining

Fig.4.4 Distribution of A_g

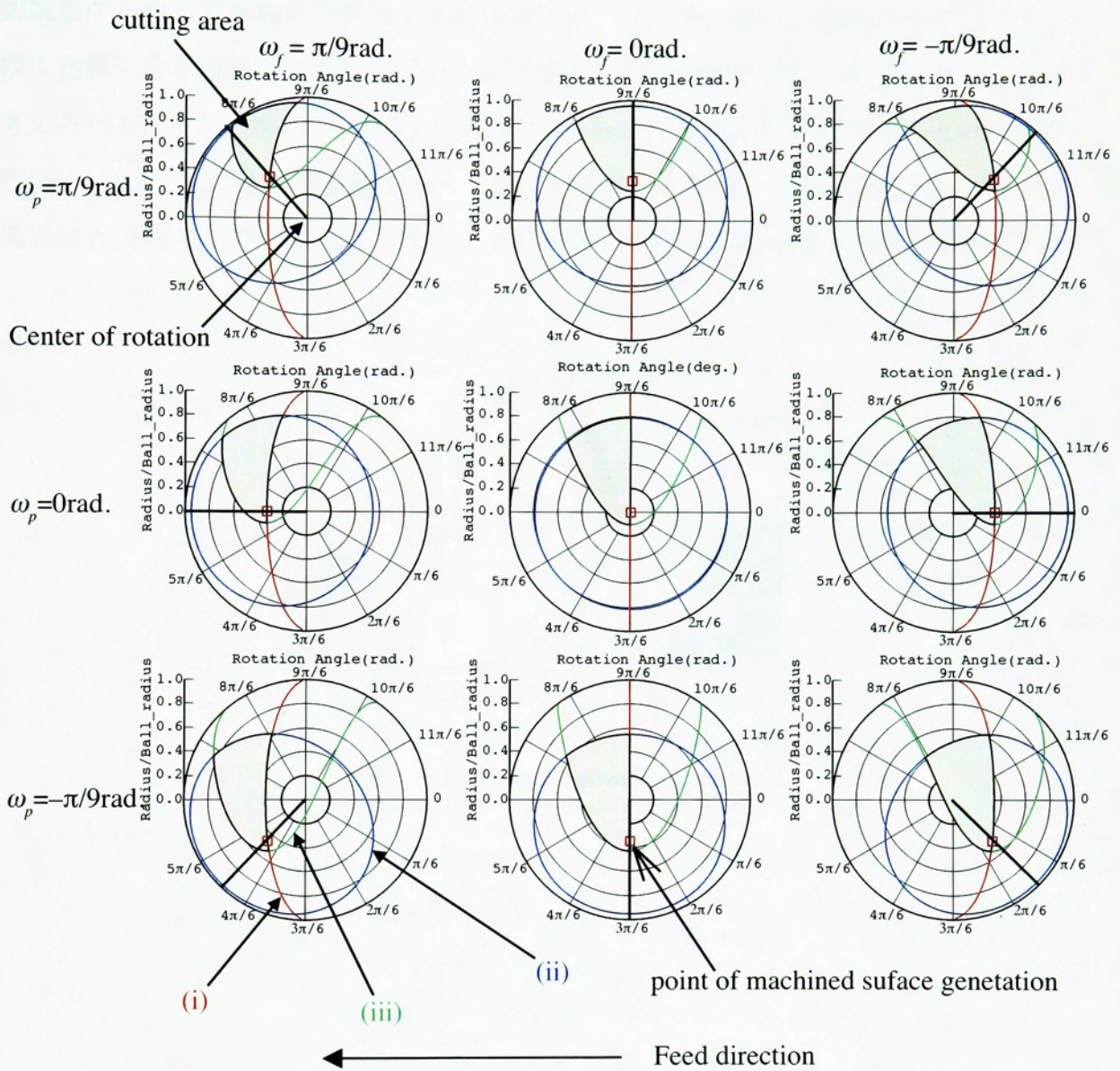
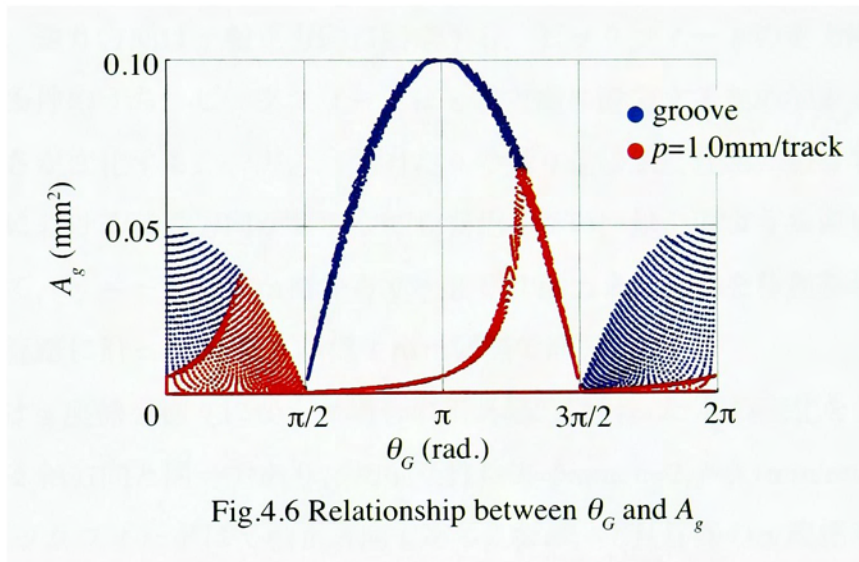


Fig.4.5 The diagram of cutting edge interference area
 ($R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=0.1\text{mm/rev.}$, $p=1.0\text{mm/track}$, $a=2.0\text{mm}$)

図4.4(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 が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4.6に示す。図4.6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4.3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。また、図4.6より、 $\theta_G=\pi/2$ と $\theta_G=3\pi/2$ において必ず A_g が0に近い値を取っている。すなわち、工具回転軸を送り方向に対して左右いずれかに傾けて加工の方が、確実に A_g が小さい状態で加工できることになり、加工誤差が小さくなると予測される。



4. 5 楕円面を加工する場合の解析例

実際の形状を加工する場合に工具経路に沿って A_g がどのように変化するかを、楕円面の加工を例に解析を試みる。対象は3軸制御加工とし、工具経路は代表的な走査線加工と等高線加工の2種類とする。それぞれの加工方法において、 A_g がどのように変化するか解析する。

4.5.1 走査線加工時の A_g の変化

図4. 7は楕円面の形状と座標系を示している。本解析では x, y, z それぞれの方向の半径を、 $a=100\text{mm}, b=200\text{mm}, c=50\text{mm}$ とする。工具経路は、図4. 8に示すような走査線加工を行なう。送り方向は y 軸正方向に固定する。ピックフィードの正方向を x 軸方向とする。切削条件のうち、ピックフィードは x 軸方向に設定するため加工点の接平面内ではその大きさが変化する。一方、一刃当たりの送り量は工具経路に沿って一定であるとし、加工点における法線方向が異なっても変化しない。以上のような設定の下で、 x 座標を固定して、 $y=-200\text{mm}$ から $y=200\text{mm}$ まで工具を移動させ加工することとし、工具経路に沿った A_g を y 座標 1mm 間隔で解析した。

図4. 9は x 座標を様々に変えた場合の工具経路に沿った A_g の変化を示している。工具回転軸は z 軸方向と同一であり、切削条件は $R=5\text{mm}, n=2, f=0.1\text{mm/rev.}, p=2\text{mm/track}, a=2\text{mm}$ でピックフィードは x 軸正方向である。なお、工具経路の x 座標が正の場合はいずれも工具経路全体にわたって A_g の値が 0.001mm^2 程度で極めて小さく、図4. 9と同じスケールでは示すことができないため省略している。

図4. 9に示しているように、工具経路の x 座標が負の場合は、いずれも y 座標が負の範囲では A_g が大きく、正の範囲では非常に小さな値になっている。具体的には、 x 座標が負で y 座標が負、すなわち送り方向ピックフィード方向いずれも z 座標の大きい方へ登りながら加工している時が A_g が大きくなっている。また、工具経路の x 座標が負の範囲では、 x 座標が0に近づくと A_g の最大値を示す y 座標が z 軸上すなわちその経路上の頂点に近づくことが分かる。

この傾向について検討する。本解析において、工具軸は z 軸と同一方向で固定されているが、被削材の加工点法線方向に対しては傾斜している。したがって、加工点の法線方向に対する ω_r, ω_p は工具経路に沿って変化している。この工具経路に沿った ω_r, ω_p の変化

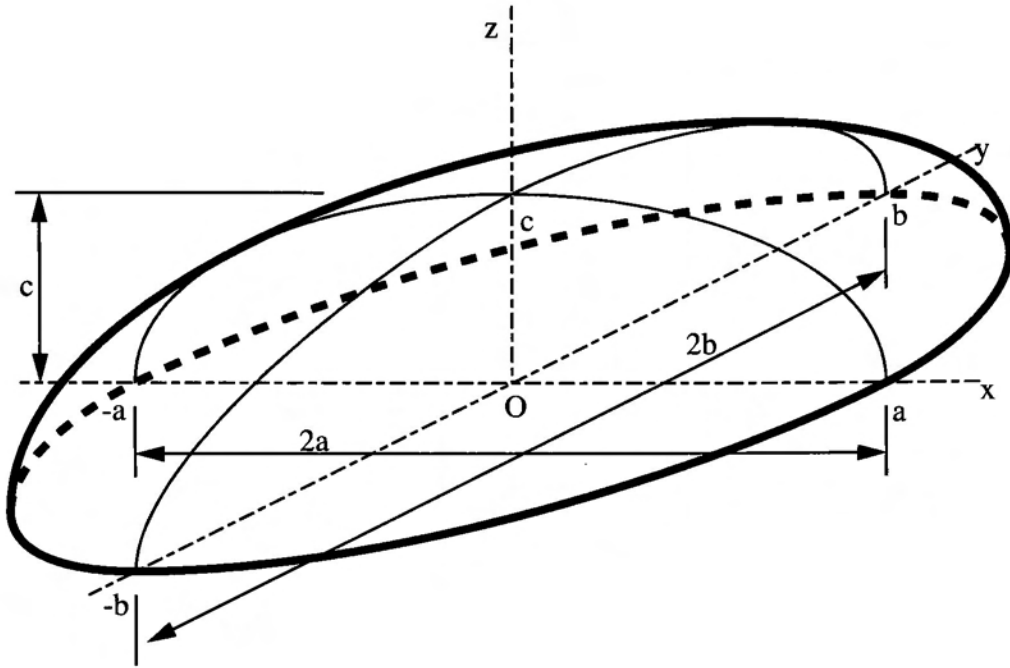


Fig.4.7 Machining shape in the simulation of undeformed chip and A_g (ellipsoid)
 ($a=100\text{mm}$, $b=200\text{mm}$, $c=50\text{mm}$)

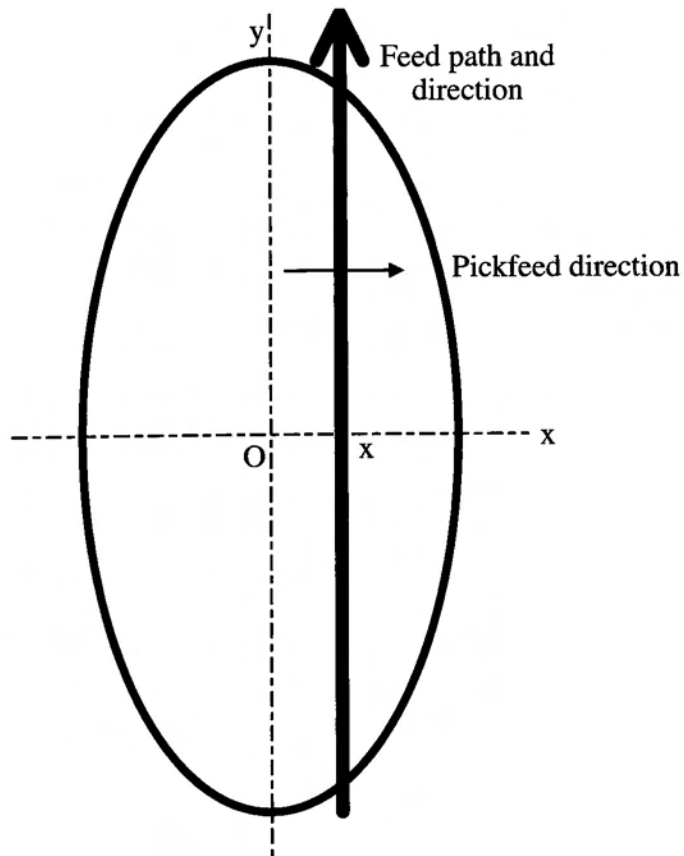


Fig. 4.8 Definition of tool path in the simulation of undeformed chip and A_g (xy-plane)

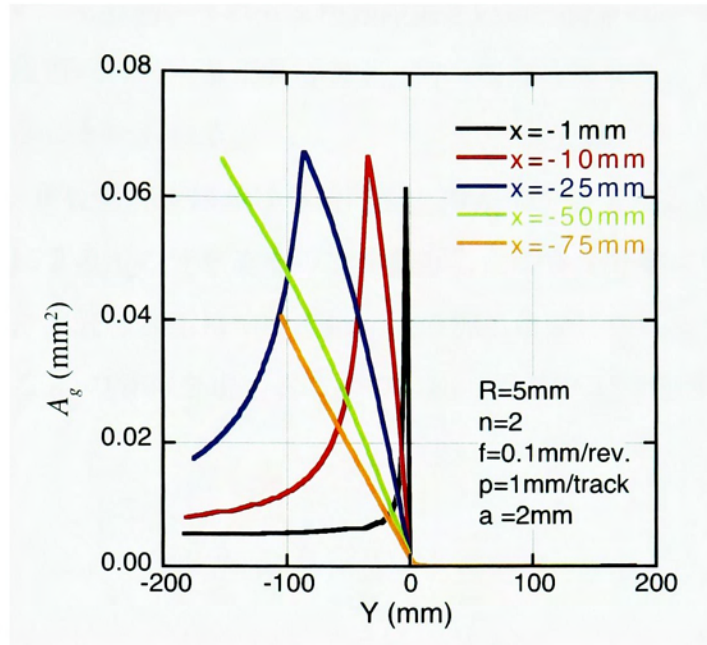


Fig.4.9 Results of A_g analysis in scanning machining of ellipsoid

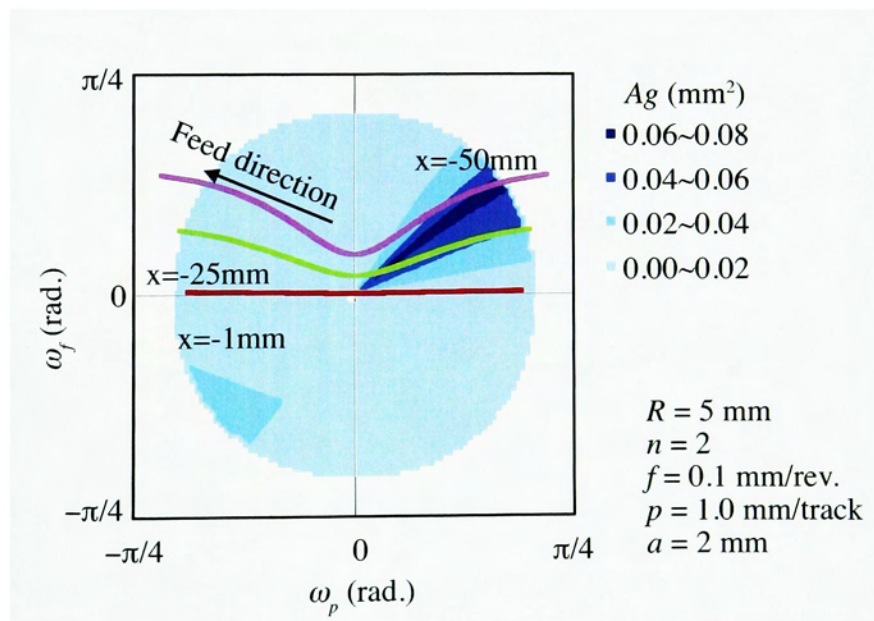


Fig.4.10 Relationship between tool path and A_g distribution

の様子を前掲の工具姿勢による A_g 分布の図に重ね合わせて示したのが図4.10である。なお、工具経路に沿ったピックフィードの値も変化するので、図4.10の A_g 分布が正確に適用できるわけではなく、あくまで検討のための参考値である。図4.10より、送り方向ピックフィード方向いずれも z 座標の大きい方へ登りながら加工している時は、加工点における法線方向に対する工具姿勢が、同一切削条件における A_g が大きい範囲に位置するためであることがわかる。

図4.11は、走査線加工における楕円面上の A_g の分布を示している。これは、図4.10の工具姿勢による A_g の分布をそのまま転写したような分布になっていることがわかる。したがって、走査線加工については、他の加工条件についても、図4.10のように工具姿勢による A_g の分布を求めることで、加工面上の A_g 分布が予想可能である。

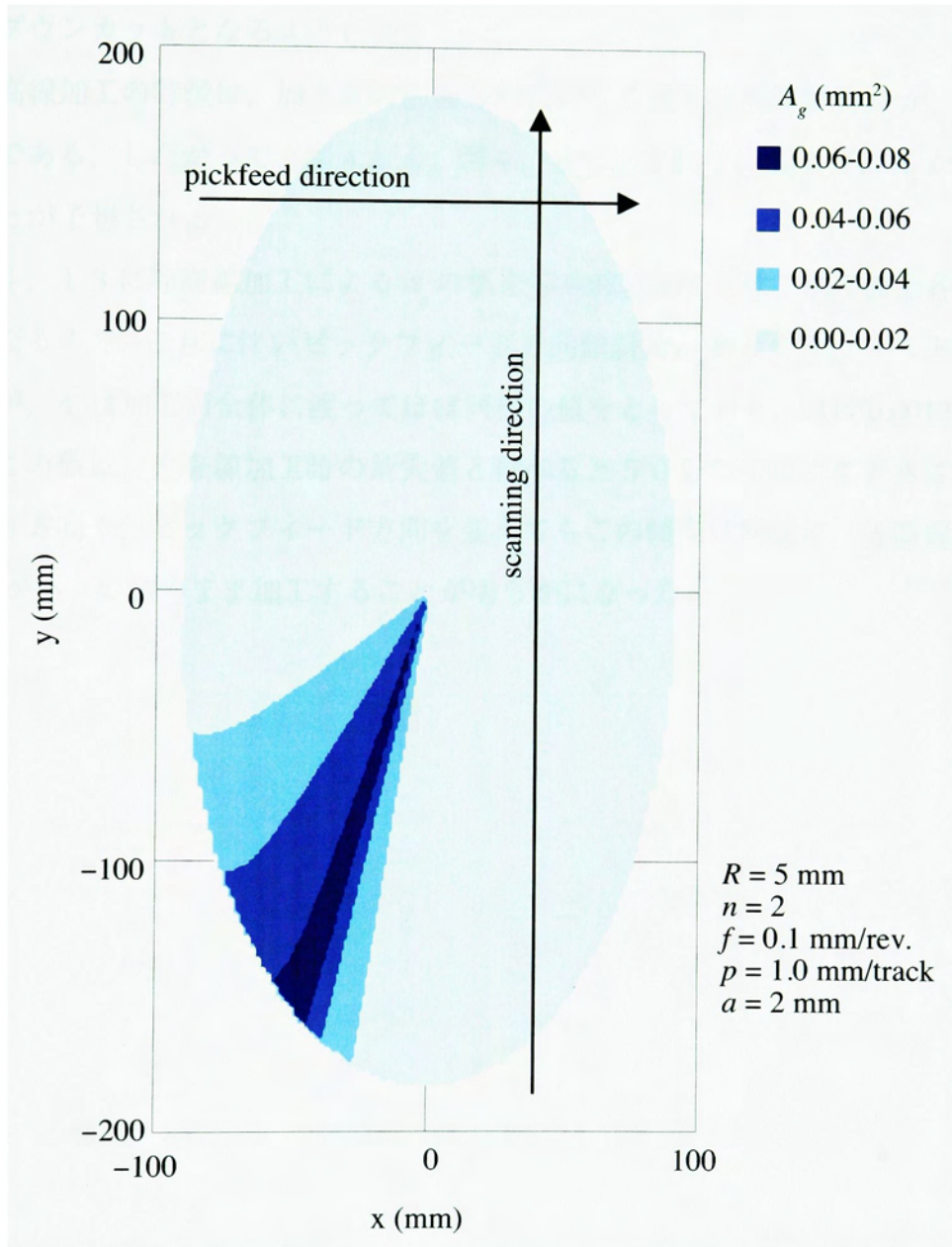


Fig.4.11 A_g distribution in scanning machining of ellipsoid

4.5.2 等高線加工時の A_g の変化

次に、図4.12に示す等高線加工について工具経路に沿った A_g 分布を求める。切削条件は、 $R=5\text{mm}$, $n=2$, $f=0.1\text{mm/rev.}$, $a=2\text{mm}$ で、等高線の間隔 Δz は 1mm とした。ピックフィード量は、加工点における法線方向に伴って変化する。送りは図4.13に示すように反時計周り、ピックフィードは低い方から高い方へ登り方向とし、走査線加工と同様にダウンカットとなるように設定した。

等高線加工の特徴は、加工点の法線方向に対する送り方向傾斜角 ω_f が、常に0となることである。したがって、図4.4、図4.6で示されているように A_g が小さな値になることが予想される。

図4.13に等高線加工による A_g の値を等高線表示で示す。加工面上各点で法線方向が異なるので、これに伴いピックフィード方向傾斜角 ω_p やピックフィード量は変化しているが、 A_g は加工面全体に渡ってほぼ同様の値をとっており、ほぼ 0.0012mm^2 程度である。この値は、走査線加工時の最大値と較べると50分の1以下の大きさである。

送り方向や、ピックフィード方向を変えてもこの傾向は同様で、等高線加工では、常に A_g が小さい値のまま加工することが明らかになった。

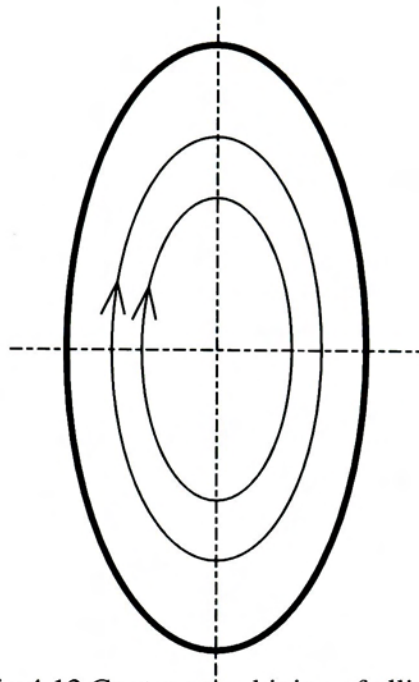


Fig.4.12 Contour machining of ellipsoid

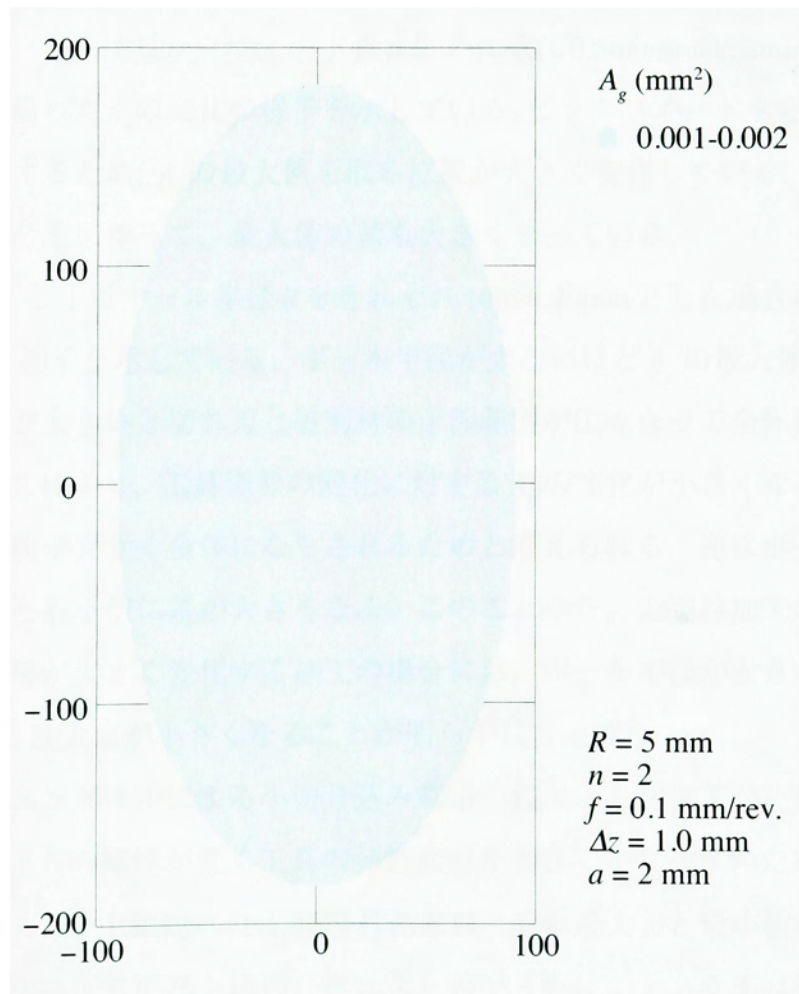


Fig.4.13 A_g distribution in contour machining of ellipsoid

4. 6 切削条件の影響

楕円面の走査線加工を例にとり、種々の切削条件の影響について検討する。

図4. 14, 図4. 15は切り込み量 a をそれぞれ0.5mm,1mmとした場合の工具経路に沿った A_g の変化の様子を示している。切り込み量にほぼ比例して A_g の値が変化している。また、 $x=-25\text{mm}$ に着目すると、最大値を示すときの y 座標が切り込み量が小さくなるに伴って、 y 軸負方向に移動し、さらに工具経路に沿った A_g の変化が小さくなっていることがわかる。したがって、削り代をできるだけ小さくする方が加工点法線方向に対する工具姿勢の影響が小さくなり、加工精度の面で有利であると考えられる。

図4. 16, 図4. 17は一回転当たり送り量 f をそれぞれ0.2mm/rev, 0.05mm/rev.とした場合の工具経路に沿った A_g の変化の様子を示している。切り込みとの関係と同様に f の値にほぼ比例して A_g の値が変化している。また $x=-25\text{mm}$ の場合の最大値をとる y 座標の値にはほぼ変化が無い。したがって、送りについては全体的な A_g の値を変化させることが明らかになった。

図4. 18, 図4. 19はピックフィード量 p をそれぞれ0.5mm/track, 2mm/trackとした場合の工具経路に沿った A_g の変化の様子を示している。ピックフィードを変えると、除去部分の範囲が変化するため、 A_g の最大値を取る位置が大きく変化している。また、ピックフィードが大きくなるに伴って、最大値の値も大きくなっている。

図4. 20, 図4. 21はボール半径 R をそれぞれ10mm,20mmとした場合の工具経路に沿った A_g の変化の様子を示している。ボール半径が大きいほど A_g の最大値が小さい。これは、ボール半径が大きいと切れ刃と被削材の干渉範囲が広がって全体に切取り厚さが薄く拡がる。これにより、工具姿勢の変化に対する A_g の変化が小さくなり、 A_g の最大値は小さく、最小値が大きく全体にならされるためと考えられる。逆にボール半径が小さい場合は最大値と最小値に差が大きくなる。このことから、走査線加工のように加工面に対する工具姿勢が大きく変化する加工の場合には、ボール半径が大きな工具の方が A_g の変化が小さく最大値が小さくなることが明らかになった。

現在、小径ボールエンドミルによる小切り込み高送りによる高速加工が注目されている。小径工具では、工具の剛性が低く工具の弾性変形が大きくなりやすいため、 A_g の影響が大きいと推測される。上に述べた A_g の解析結果は、 A_g の最大値と最小値の差が大きいことより、工具経路や工具姿勢を適切に選ぶことができれば、大きな工具径の場合よ

りも A_g が小さくできる可能性があること示している。このため、小径工具による加工では、加工精度に関して加工点法線方向に対する工具姿勢について検討しておくことが重要であると考えられる。また、小切り込み高送りに関しては、上記の通り A_g は切り込み送りそれぞれに対してほぼ比例するため、加工能率が同一であるならば、 A_g に関しては明確な違いは指摘できない。

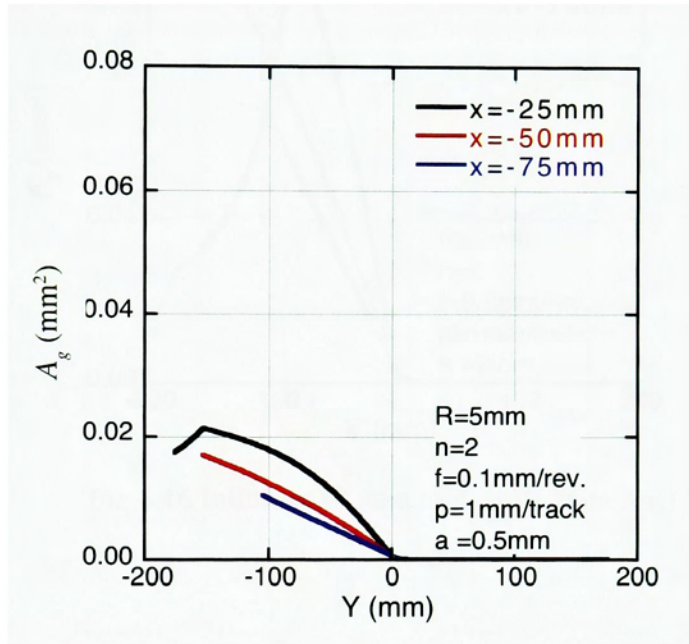


Fig.4.14 Influence of depth of cut to A_g ($a=0.5\text{mm}$)

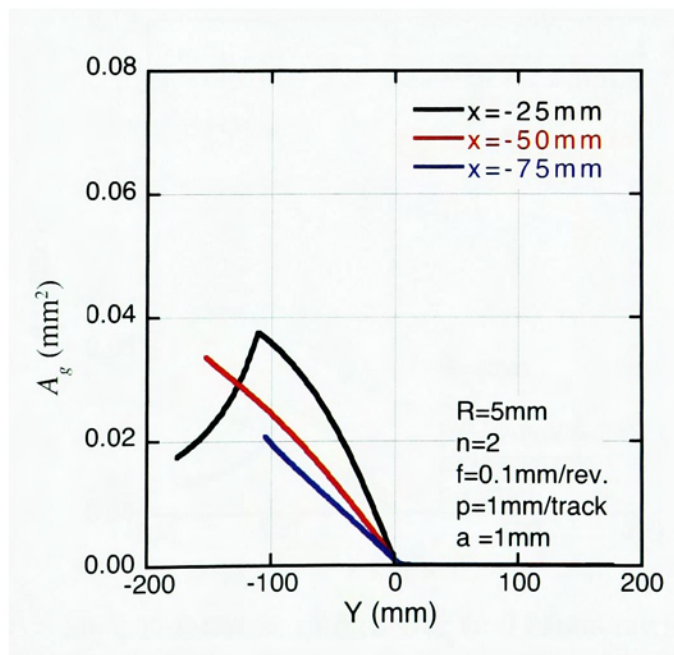


Fig.4.15 Influence of depth of cut to A_g ($a=1\text{mm}$)

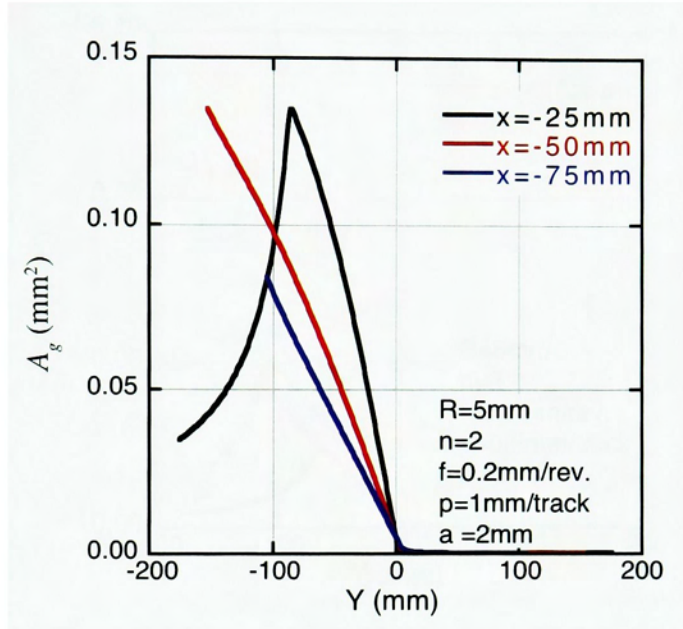


Fig.4.16 Influence of feed to A_g ($f=0.2\text{mm/rev.}$)

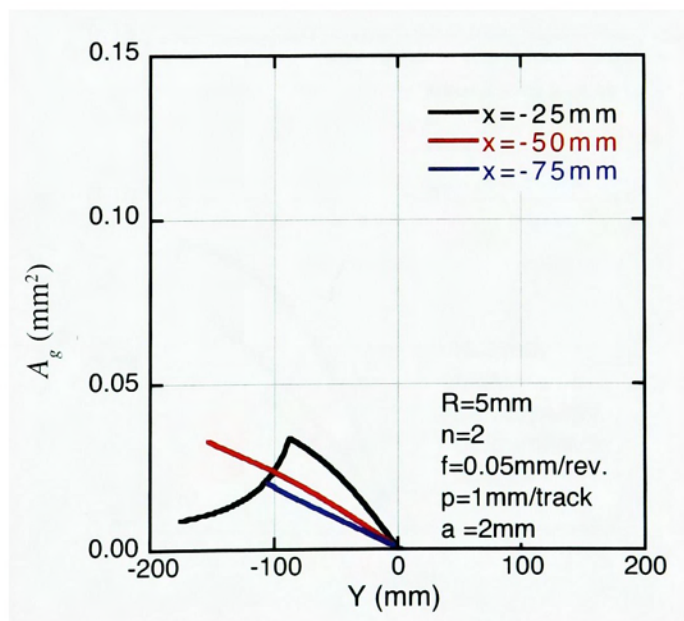


Fig.4.17 Influence of feed to A_g ($f=0.05\text{mm/rev.}$)

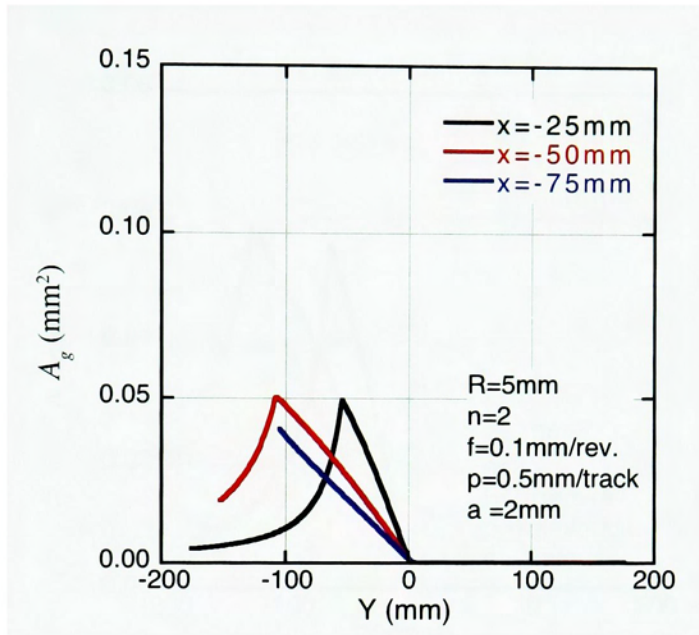


Fig.4.18 Influence of pickfeed to A_g ($p=0.5\text{mm/track}$)

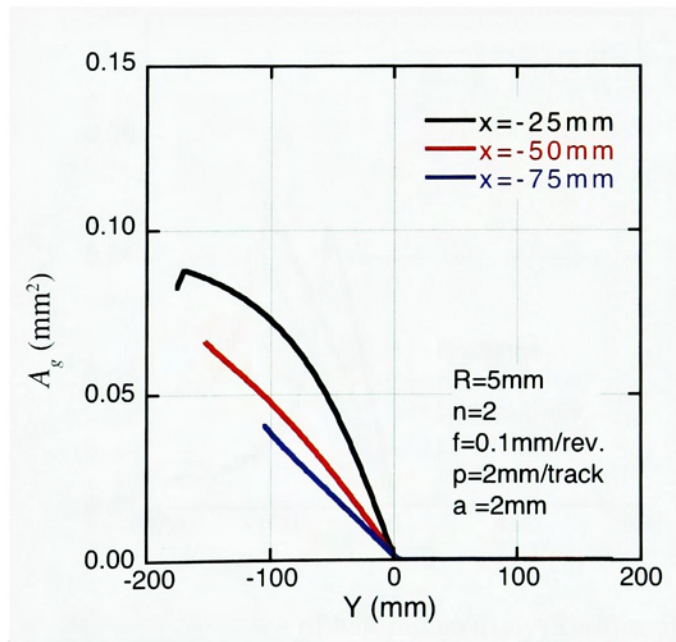


Fig.4.19 Influence of pickfeed to A_g ($f=2\text{mm/track}$)

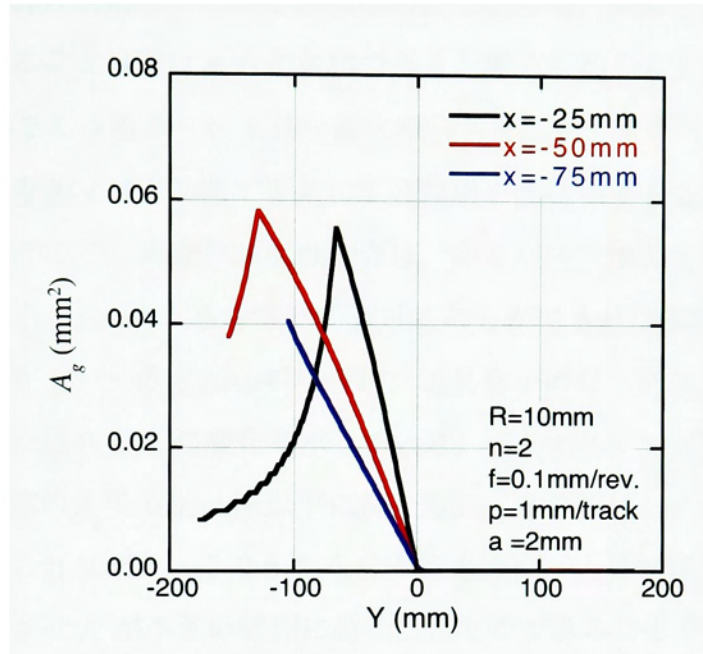


Fig.4.20 Influence of ball radius to A_g ($R=10\text{mm}$)

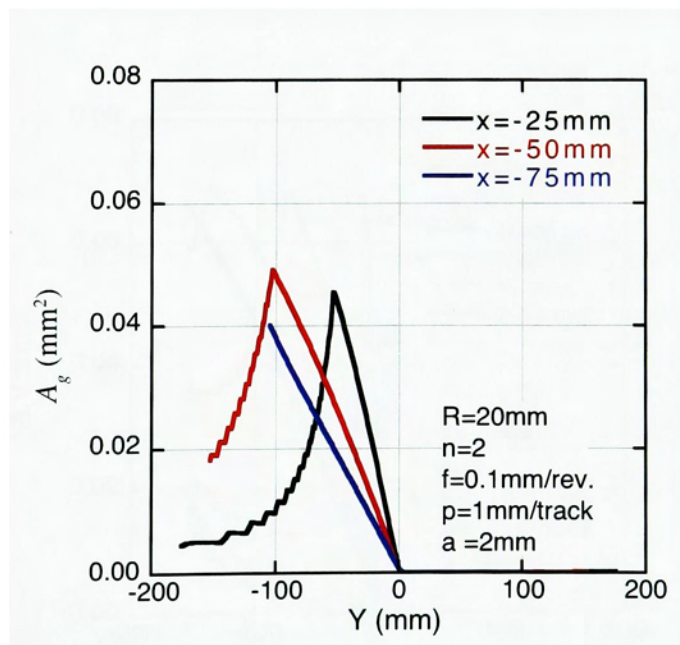


Fig.4.21 Influence of ball radius to A_g ($R=20\text{mm}$)

4. 7 予め工具傾斜を与えた場合

同一工具経路上で A_g が極端に異なるということは、工具に加わる切削抵抗さらにこれに伴う工具系の弾性変形への影響も異なると推察される。実際上は、このように経路上で大きく変化することは避ける方が有利であると考えられる。そのためには、各加工点において A_g が小さくなるように工具を逐次傾斜させて加工する方法が考えられる。しかしながら、この方法では実時間で正確に工具傾斜を変化させる必要があり、実際上は実現困難である。そこで、走査線加工の場合は、あるパスを加工する間の工具傾斜を一定に保ったまま加工し、 A_g の大きな変化を避けることができれば実用上便利である。図4.22は工具経路が $x = -50$ mmの場合に、工具を予めピックフィード方向に傾斜させた場合を想定した場合の A_g の変化を示している。ピックフィード方向に -18° 以上傾けることで、全体の A_g を 0.02mm^2 以下に抑えられ、途中でピークが発生することもないことが分かる。これは図4.22からも分かるように、工具経路全体の工具傾斜が変化する範囲を移動させ A_g が小さい範囲に納めることができることを示している。工具経路を求めるときに事前に A_g の分布を求めておけば、 A_g 大なる範囲を避けるように各パスの工具傾斜を定めることが可能である。

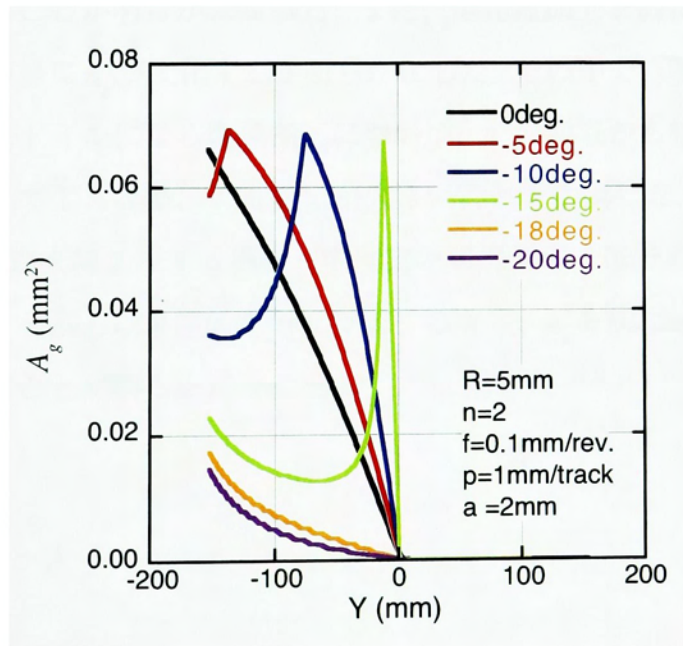


Fig.4.22 Influence of tool inclination

4. 8 4章のまとめ

本章では、切取り厚さの幾何解析結果を基に、加工面創成機構について、特に加工精度について加工面創成点通過時の切削断面積 A_g に着目して検討した結果、下記の知見を得ることができた。

- 1) 切れ刃が加工面創成点を通る瞬間の切削断面形状は、切削条件および工具姿勢によって大きく異なることが明らかになった。またその面積 A_g も大きく異なり、加工精度への影響が大きいものと推測される。したがって、本研究においては、高い加工精度を得るためには A_g が小さくなる加工条件特に工具姿勢を選定すべきであることを提案する。実質的には A_g を小さくするには工具回転軸をピックフィード方向のみに傾斜させることが確実に A_g を小さくできることを明らかにした。
- 2) 直刃の場合、送り前面での A_g の大きさは加工面創成点を通る時の工具回転角 θ_G でほぼ一意に決定されることが明らかになった。
- 3) 楕円面を加工する場合を例に、工具経路による A_g の変化の違いを検討した。走査線加工の場合は、ピックフィードが上り方向で送りも上り方向の場合に A_g が大きくなることが明らかになった。等高線加工の場合は、送り方向傾斜角が0になるため、加工面全面に渡って、ほぼ一定でその大きさも走査線加工の A_g に較べて非常に小さな値を取ることが明らかになった。また、走査線加工を例に、切削条件や工具径によってどの様に A_g が変化するか明らかにした。その中で、現在注目されている小径ボールエンドミルによる高速加工について、 A_g の観点から検討し、大きな工具径の場合に較べて工具姿勢による変化が大きいことを指摘した。
- 4) 楕円面を走査線加工する場合、本研究の切削条件では予め工具をピックフィード方向に -18 deg. 以上傾斜を与えておくことで、 A_g を 0.02 mm^2 以下に抑えることが可能であることが明らかになった。

第4章の参考文献

- (1) 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との関係 (第1報) -加工誤差生成機構-, 精密機械, 43,7(1977-7)807-813.
- (2) W. A. Kline, R. E. DeVor and I. A. Shareef, The Prediction of Surface Accuracy in End Milling, ASME Journal of Engineering for Industry, 104, 3(1982-8)272-278.
- (3) 松原十三生・山本久隆・水本洋, エンドミル加工精度に関する研究 (第1報) -エンドミルの剛性と側面加工における加工精度-, 精密工学会誌, 52,4(1986-4)667-672.
- (4) 白瀬敬一・稲村豊四郎・安井武司, エンドミル加工における加工誤差の要因分析と定量化, 精密工学会誌, 52,4(1986-4)705-712.
- (5) M. Y. Yang and J. G. Choi, A Tool Deflection Compensation System for End Milling Accuracy Improvement, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 120, 2(1998-5)222-229.
- (6) 藤井義也・岩部洋育, ボールエンドミルによる切削力曲線と加工精度との関係, 精密機械, 48,5(1982-5)649-654.
- (7) Krzysztof Marciniak, Geometric Modelling for Numerically Controlled Machining, Oxford University Press, (1991) ISBN 0-19-856353-1.
- (8) 小林昭七, 曲線と曲面の微分幾何 (改訂版), 裳華房 (1995).
- (9) 矢野健太郎ほか, モノグラフ公式集, 科学振興新社 (1996).

第5章 結 論

これまで明らかにされていなかったボールエンドミル加工の切取り厚さを初めて幾何的に解析した。ボールエンドミル加工における切れ刃と被削材の干渉を詳細に幾何解析した結果、下記の成果や知見を得た。

- 1) 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に関して、幾何解析の方法と解くべき関係式を明示し、任意工具姿勢における切取り厚さの算出法を確立した。解析において、第2章で示した2つの傾斜角で工具姿勢を定義することで先行切れ刃による切削面と切れ刃の干渉量には送り方向傾斜角のみが影響することを明らかにした。
- 2) 切取り厚さを解析した結果、同一切削条件でも工具姿勢によってその分布が大きく異なることが明らかになった。特に工具回転中心が除去部分の内部にある場合は切れ刃の一部に一回転中に2回被削材と接触する場合があり、さらに切削断面積のピークが1回転中に2回発生することが明らかになった。また、ピックフィード方向傾斜角が負の場合には、切削長さが他の工具姿勢と較べて2倍になり除去体積も大きくなる切れ刃の部分が生じることを示した。
- 3) 工具回転中心近傍においては、切れ刃の向きと逆方向に移動する部分が存在し、切削工具としては不適切な被削材との干渉機構を有する。これを、回避するためには、工具姿勢を変更し工具先端部分が切削範囲に含まれないようにする必要がある、

本研究では、任意の切削条件において切れ刃退行現象が発生する工具姿勢範囲を図示し明確にした。

- 4) 切れ刃が加工面創成点を通過する瞬間の切削断面形状は、切削条件および工具姿勢によって大きく異なることが明らかになった。またその面積 A_g も大きく異なり、加工精度への影響が大きいものと推測される。したがって、本研究においては、高い加工精度を得るためには A_g が小さくなる加工条件特に工具姿勢を選定すべきであることを提案する。実質的には A_g を小さくするには工具回転軸をピックフィード方向のみに傾斜させることが確実に A_g を小さくできることを明らかにした。

5. 1 本論文の要約

第2章では、ボールエンドミルによる曲面加工を対象とし、局所的に接平面に平行な平面加工であると近似できる場合を想定した上で、切取り厚さに関する次のような理論解析を提案した。

- 1) 任意のボール半径、切れ刃数、切り込み、一回転当たり送り量、ピックフィード、工具姿勢、切れ刃のねじれを考慮し、任意の回転角、切れ刃位置における切取り厚さを幾何的に求められる解析手法を明らかにした。
- 2) 解析手法の特徴として、切れ刃干渉点の存在する面を3つに分類し、各々の計算式を明らかにしている点、切れ刃干渉点の先行切れ刃における工具回転角と切れ刃角度が特定できる点が挙げられる。

以上の解析により下記のような結果を得た。

- 1) 自由曲面の任意の加工点における工具姿勢を、法線方向に対する送り方向傾斜角とピックフィード方向傾斜角の2つの角度で定義した。先行切れ刃との干渉量の計算には送り方向傾斜角のみが影響することを明らかにした。
- 2) 切取り厚さ分布の幾何解析により、これまで明確にされていなかったボールエンドミル加工特有の切屑生成機構が明らかにすることができた。たとえば、切れ刃各部の切取り厚さの変化に着目すると、必ずしも見掛け上のアップカット、ダウンカットとは一致しない削り方を示す。また、同一切削条件でも工具姿勢によっては一回転中に切削断面積にピークが2回生じる場合が存在するなど、工具姿勢によって切削機構が大きく変化することが明らかになった。

3) 切取り厚さ解析結果を基に、切削断面積および切れ刃各部分における切削長さ
と除去体積を求め、工具姿勢の影響を定量的に明らかにした。特に、ピックフィード
方向傾斜角が負の場合は、切れ刃各部分における切削長さ
と除去体積が他の工具姿勢に比べて大きくなる
ことが明らかになった。これは、除去部分を通
過する切れ刃の向きが工具姿勢によって変
化するためである。

第3章では、ボールエンドミル加工にお
ける工具回転中心近傍の幾何的切屑生成機
構を詳細に検討した結果、下記の事柄が明
らかになった。

1) 工具回転中心近傍のダウンカット側
に、切れ刃退行現象が発生する。切れ刃退
行現象とは、切れ刃の周速より送り速度
の周方向成分が大きい場合に、工具逃げ
面側から被削材に干渉する現象である。
この切れ刃退行現象発生範囲は、工具回
転中心側近ダウンカット側に位置し、直
刃の場合は工具回転中心に垂直な平面へ
の投影上で直径 $f \cos \omega_f / (2\pi)$ の円形
である。

2) 切れ刃退行現象発生位置が切れ刃干
渉領域内もしくはその近傍に存在すると、
切れ刃退行現象の影響により、 $-\pi/9(\text{rad.}) < \omega_f < 0(\text{rad.})$
で表面粗さが大きくなる
ことが明らかになった。また、一般的には、
工具送り方向に僅かに傾斜させるだけで、
切れ刃退行現象の影響を避けることが可
能である。

3) 切れ刃退行現象が発生する場合、切
れ刃との干渉部分が全て除去されると仮
定すると、理論上は切れ刃上に非接触領
域が存在する。ただし、切れ刃退行現象
が発生すると、逃げ面で被削材が押し込
まれるため、被削材上が塑性変形すると
想像され、実際に存在するかは不明であ
る。切り込み量が小さく一刃当たりの送
り量が大きく切れ刃退行現象の影響が大
きい切削条件の場合は、この非接触領域
の存在は無視できない事であると想像さ
れる。

第4章では、切取り厚さの幾何解析結
果を基に、加工面創成機構について、特
に加工精度について加工面創成点通過時
の切削断面積 A_g に着目して検討した結
果、下記の知見を得ることができた。

1) 切れ刃が加工面創成点を通
過する瞬間の切削断面形状は、切削条件
および工具姿勢によって大きく異なるこ
とが明らかになった。またその面積 A_g
も大きく異なり、加工精度への影響が大
きいものと推測される。したがって、本
研究においては、高い加工精度を得るた
めには A_g が小さくなる加工条件特に工
具姿勢を選定すべきであることを提案す
る。実質的には A_g を小さくするには工
具回転軸をピックフィード方

向のみに傾斜させることが確実に A_g を小さくできることを明らかにした。

2) 直刃の場合、送り前面での A_g の大きさは加工面創成点を通過するときの工具回転角 θ_g でほぼ一意に決定されることが明らかになった。

3) 楕円面を加工する場合を例に、工具経路による A_g の変化の違いを検討した。走査線加工の場合は、ピックフィードが上り方向で送りも上り方向の場合に A_g が大きくなることが明らかになった。等高線加工の場合は、送り方向傾斜角が0になるため、加工面全面に渡って、ほぼ一定でその大きさも走査線加工のに較べて非常に小さな値を取ることが明らかになった。また、走査線加工を例に、切削条件や工具径によってどの様に変化するか明らかにした。その中で、現在注目されている小径ボールエンドミルによる高速加工について、 A_g の観点から検討し、大きな工具径の場合に較べて工具姿勢による変化が大きいことを指摘した。

4) 楕円面を走査線加工する場合、本研究の切削条件では予め工具をピックフィード方向に -18 deg. 以上傾斜を与えておくことで、 A_g を 0.02 mm^2 以下に抑えることが可能であることが明らかになった。

5. 2 今後の課題

現在のところ、幾何解析が可能なのは工具先端のボール部のみであるため、側面切れ刃の除去機構を考慮できるよう改良していく必要がある。ただし、本論文における解析では切れ刃形状を曲座標系で表現していたが、側面切れ刃については円柱座標系が適しているため、切れ刃形状を統一的に表現して解析できる工夫が必要である。

また、本研究の対象が三次元的で複雑であるため、一般的に理解されにくい面がある。本研究成果を工学的工業的に広めるためには、三次元的な切れ刃動きや被削材との干渉の状況などを理解しやすくする工夫が必要である。

さらに、加工精度への影響をさらに深く検討できるようにするためには、工具回転軸の偏心や振動の影響を考慮できるようにしていく必要がある。そのためには、ボール中心のズレ量などを幾何的な関係式中に取り込む工夫が必要である。

第4章で触れた、楕円面の加工シミュレーション結果を受けて、実加工実験を行ない、幾何的な切削機構で説明できる現象をそうでない現象とを区別して、加工誤差発生原因に関して詳細に検討するために、実際の加工面形状と解析結果の比較も重要である。

謝 辞

本論文を結ぶに当たり、本研究に関し終始ご指導ご鞭撻いただきました九州工業大学工学部水垣善夫教授には、心より篤く感謝申し上げます。

また、本研究のきっかけを与えていただき、常に研究に対して前向きな助言をいただき氏の存在無くしては本研究はなし得なかった、九州共立大学工学部 郝明暉教授には、深く感謝申し上げます。

北九州工業高等専門学校前校長で西日本工業大学学長坂本正史先生には、学生時代から恩師として、また時には上司として、常に本研究に関して多くの示唆に富んだ助言をいただき、心より感謝申し上げます。

研究遂行に当たり、北九州工業高等専門学校機械工学科浅尾晃通助教授、九州工業大学工学部吉川浩一講師お2人には、数々のご協力ご助言をいただき心より感謝申し上げます。

また、北九州工業高等専門学校制御情報工学科の担当研究室の卒業生諸氏、さらには九州工業大学工学部機械知能工学科生産加工研究室の諸氏にも、ご協力いただき感謝申し上げます。

最後に、日ごろの研究生活に励まし応援してくれた、妻知香、娘なゆかに感謝いたします。

付 録

○ボールエンドミル加工切取り厚さ幾何解析プログラム

○プログラム

```
/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include "cutcond.h"

double R_ball, Feed, Pick, A_z, A_z0 ;
int Z_blade ;
double InclIF, InclIFrad, InclIP, InclIPrad ;
double OZrad, OZdeg, OZlim ;
double Ra ;
double TGrad, TGdeg ;
double ThGrad, ThGdeg ;
double Ths, The ;
double F_t, PhyU, PhyUdeg, Rmax ;
double Dtheta, Dphy ;
int Ntheta, Nphy, NphyU ;
double Dlimit, Alimit ;
double **TIt ;
double *At ;
int ForB ;

main()
{
    double ozmax;
    input3() ;
    initialize() ;

    ozmax=M_PI/2.0-OZlim ;
    printf("ozmax=%f OZrad=%f\n",ozmax,OZrad);

    if( OZrad>ozmax )
    {
        printf("out of border.\n");
    }
    else
    {
        trocalc4() ;
        calcAREA() ;
    }
    save_data( TROCHOID );
    save_At( TROCHOID );

    printf("Complete.\n");
    return 0 ;
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "cutcond.h"

void input3()
{
    double azlim, thl ;
    int mr=0 ;

    FILE *fp ;
    printf("1.Manual Input or 2.Read File? (1 or 2)=");
    while( mr!=1 && mr!=2)
    {
        scanf ("%d",&mr) ;
        if( mr==1)
        {
            printf ("R (mm) ="); scanf("%lf",&R_ball ) ;
            printf ("n      ="); scanf("%d" ,&Z_blade);
            printf ("f(mm/rev)="); scanf("%lf",&Feed ) ;
            printf ("p(mm/tr) ="); scanf("%lf",&Pick ) ;
        }
    }
}
```

```

printf ("a (mm) ="); scanf("%lf",&A_z );
printf ("Dth(deg) ="); scanf("%lf",&Dtheta );
printf ("Dph(deg) ="); scanf("%lf",&Dphy );
printf ("Dlim ="); scanf("%lf",&Dlimit );
printf ("wp(deg) ="); scanf("%lf",&IncliP );
printf ("wf(deg) ="); scanf("%lf",&IncliF );

```

```

fp=fopen("InputDATA","w");
fprintf(fp,"R (mm) =%lf\n", R_ball );
fprintf(fp,"n =%d\n", Z_blade);
fprintf(fp,"f(mm/rev)=%lf\n", Feed );
fprintf(fp,"p(mm/tr)=%lf\n", Pick );
fprintf(fp,"a (mm) =%lf\n", A_z );
fprintf(fp,"Dth(deg)=%lf\n", Dtheta );
fprintf(fp,"Dph(deg)=%lf\n", Dphy );
fprintf(fp,"Dlim =%12.9lf\n", Dlimit );
fprintf(fp,"wp(deg) =%lf\n", IncliP );
fprintf(fp,"wf(deg) =%lf\n", IncliF );
fclose(fp);

```

```

}
else if( mr==2)

```

```

{
fp=fopen("InputDATA","r");
fscanf (fp,"R (mm) =%lf\n",&R_ball );
fscanf (fp,"n =%d\n",&Z_blade);
fscanf (fp,"f(mm/rev)=%lf\n",&Feed );
fscanf (fp,"p(mm/tr)=%lf\n",&Pick );
fscanf (fp,"a (mm) =%lf\n",&A_z );
fscanf (fp,"Dth(deg)=%lf\n",&Dtheta );
fscanf (fp,"Dph(deg)=%lf\n",&Dphy );
fscanf (fp,"Dlim =%lf\n",&Dlimit );
fscanf (fp,"wp(deg) =%lf\n",&IncliP );
fscanf (fp,"wf(deg) =%lf\n",&IncliF );
fclose (fp);
}
}

```

```

A_z0 = A_z ;

```

```

printf("R (mm) =%lf\n", R_ball );
printf("n =%d\n", Z_blade);
printf("f(mm/rev)=%lf\n", Feed );
printf("p(mm/tr)=%lf\n", Pick );
printf("a (mm) =%lf\n", A_z );
printf("Dth(deg)=%lf\n", Dtheta );
printf("Dph(deg)=%lf\n", Dphy );
printf("Dlim =%12.9lf\n", Dlimit );
printf("wp(deg) =%lf\n", IncliP );
printf("wf(deg) =%lf\n", IncliF );

```

```

/* Constant DATA */

```

```

F_t = Feed/(2.0*M_PI) ; /* feed/Radian (mm/rad.) */
printf(" F_t=%lf\n", F_t );

```

```

/* Calculation conditions */

```

```

Ntheta = 360.0/Dtheta ; /* KAITEN no BUNKATSU KAISUU */
Nphy = 90.0/Dphy ; /* KIREHA no BUNKATSU KAISUU */

```

```

IncliPrad = IncliP*M_PI/180.0 ;
IncliFrad = IncliF*M_PI/180.0 ;

```

```

Ra = sqrt( 2.0*R_ball*A_z - A_z*A_z );
OZlim = asin( Ra/R_ball );

```

```

/* inclination */

```

```

OZrad = acos( cos( IncliFrad)*cos( IncliPrad ) );
OZdeg = OZrad*180.0/M_PI ;

```

```

A_z = A_z0 ;
azlim = R_ball*( 1.0 - sin(OZrad) );
if( A_z>azlim )

```

```

{
    printf("WARNING: A_z is too large! Change A_z(%6.2f) to %6.2fmm(OZ=%8.3fdeg.)\n",A_z,azlim,OZdeg)
    A_z = azlim ;
}

if( InclIF==0.0 && InclIP==0.0 )
    TGrad = 0.0 ;
else if( InclIF>=0.0 )
    TGrad = atan( tan(IncliPrad)/sin(IncliFrad) ) ;
else
    TGrad = M_PI - atan( tan(IncliPrad)/sin(IncliFrad) ) ;
TGdeg = TGrad*180.0/M_PI ;

if( OZrad > OZlim )
    thl = asin( Ra/(R_ball*sin(OZrad)) ) * 180.0/M_PI ;
else
    thl = 180.0 ;
Ths = 180.0 - thl ;
The = 180.0 + thl ;

if( InclIF==0.0 && InclIP==0.0 )
    ThGrad = 0.0 ;
else
    ThGrad = atan2(tan(IncliPrad),sin(IncliFrad)) + M_PI ;
ThGdeg = ThGrad*180.0/M_PI ; printf("ThG=%f TGdeg=%f\n",ThGdeg,TGdeg) ;

}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
/*
#include <malloc.h>
*/
#include "cutcond.h"

void initialize()
{
    int it, *point ;

    T1t = (double **)calloc( Ntheta+1, sizeof(point) ) ;
    for( it=0; it<=Ntheta ; it++ )
    {
        T1t[it] = (double *)calloc( Nphy+1, sizeof(double) ) ;
    }
    At = (double *)calloc( Ntheta+1, sizeof(double) ) ;
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include "cutcond.h"

void trocalc4()
{
    int it, ip ;
    double th, thd ;
    double phy, phyd ;
    double t1 ;
    int mk ;

    int itdeb, ipdeb ;
    ForB = FRONT ;

    itdeb = 0 ;
    ipdeb = 0 ;
    for( it = itdeb ; it<=Ntheta ; ++it )
    {
        thd = it*Dtheta ;

```



```

th = thd*M_PI/180.0 ;

for( ip = ipdeb ; ip <=Nphy ; ++ip )
{
  phyd = ip*Dphy ;
  phy = phyd*M_PI/180.0 ;

  t1calc4( th, phy, &t1, &mk ) ;

  if( mk != 0 )
  {
    T1t[it][ip] = t1 ;
  }
  else
  {
    T1t[it][ip] = 0.0 ;
  }
}
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <time.h>
#include "cutcond.h"

void calcAREA()
{
  int it, ip ;
  double A, sum, phy, phyd, R2, DphyR;
  double thetad, theta ;

  /* 切削断面積の計算 */
  DphyR = Dphy*M_PI/180.0 ;

  for( it = 0 ; it <= Ntheta ; ++it )
  {
    thetad = it*Dtheta ;
    theta = thetad*M_PI/180.0 ;
    sum=0;
    for( ip = 0 ; ip < Nphy ; ++ip )
    {
      phyd = ip*Dphy ;
      phy = phyd*M_PI/180.0 ;

      R2=((R_ball-T1t[it][ip])+(R_ball-T1t[it][ip+1]))/2;

      A=((R_ball*R_ball*DphyR)/2)-((R2*R2*DphyR)/2);
      sum=sum+A;
    } /* ip loop end */
    At[it] = sum;
  } /* it loop end */
  return ;
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include "cutcond.h"

void save_data( int id_data )
{
  int it, ip ;
  double thetadeg, phydeg ;
  char title[2][9] = { "TROCHOID", " SPHERE " } ;
  char filename[2][25] = { "t1t.dat", "t1s.dat" } ;
  FILE *fp;

```

```

printf("**** Saving %8s DATA ****\n", title[id_data] );
fp = fopen( filename[id_data], "w" );
fprintf( fp, "***** %8s *****\n", title[id_data] );
fprintf( fp, "TOOL RADIUS R =%5.2f mm   \n", R_ball );
fprintf( fp, "FEED/REV.  f =%5.2f mm/rev. \n", Feed );
fprintf( fp, "PICK FEED  p =%5.2f mm/track\n", Pick );
fprintf( fp, "Axial depth a =%5.2f mm   \n", A_z );
fprintf( fp, "NO of BLADE n =%3d\n", Z_blade );
fprintf( fp, "Keisha pick  =%5.2f deg.\n", InclIP );
fprintf( fp, "Keisha feed  =%5.2f deg.\n", InclIF );
fprintf( fp, " Dtheta =%5.1f deg. \n", Dtheta );
fprintf( fp, " Dphy  =%5.1f deg. \n", Dphy );
fprintf( fp, " Dlimit =%12.9f   \n", Dlimit );

fprintf( fp, " Angle(deg.)," );

for( ip = 0 ; ip <= Nphy ; ++ip )
{
    phydeg = ip*Dphy ;
    fprintf( fp, "%f," ,phydeg );
}
fprintf( fp, "\n" );

for( it = 0 ; it <= Ntheta ; ++it )
{
    thetadeg = it*Dtheta ;
    fprintf( fp, " %6.1f", thetadeg );
    for( ip = 0 ; ip <= Nphy ; ++ip )
    {
        fprintf( fp, "%f", T1[it][ip] );
    }
    fprintf( fp, "\n" );
}
fclose(fp);
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "cutcond.h"

double Theta2, Phy2 ;
double r_search2( double, double ) ;
double lambda( double ) ;
int  boundary( double, double ) ;
double r_func2( double, double, double ) ;

double r_TOP( double, double ) ;
double r_CYL( double, double ) ;

void t1calc4( double th, double phy, double *t1, int *mk )
{
    double thd, thc, thcd, r, phyd ;
    double rTOP, rCYL ;
    double phyB, phyc ;
    int  INorOUT, INorOUT0 ;

    double DEG ;
    DEG = 180.0/M_PI ;

    thd = th *180.0/M_PI ;
    phyd = phy*180.0/M_PI ;

    phyB = acos( 1.0 - A_z/R_ball ) ;

/* Delay angle lambda considered */
thc = th + lambda(phy) ;
thcd = thc*DEG ;

```

```

*t1 = 0.0 ;
*mk = OUTSIDE ;

INorOUT = boundary( thc, phy ) ;
if( INorOUT == INSIDE )
{
    ForB = FRONT ;
    r = r_search2( thc, phy ) ;
    if( r>0 )
    {
        INorOUT0 = boundary( Theta2, Phy2 ) ;

        if( INorOUT0!=INSIDE )
            printf("th=%8.3fdeg phy=%8.3fdeg r=%8.5fmm: Theta2=%8.3fdeg. Phy2=%8.3fdeg.
INorOUT0=%d\n",thcd,phyd,r,Theta2*DEG,Phy2*DEG,INorOUT0) ;

        if( INorOUT0 == INSIDE )
        {
            *t1 = R_ball - r ;
            *mk = ONTROCHOID ;
        }
        else if( INorOUT0 == ONTOPPLANE )
        {
            rCYL = r_CYL( thc, phy ) ;
            phyc = asin( (Pick*cos(IncliPrad) - rCYL*sin(phy)*sin(thc))/R_ball ) - IncliPrad ;

            printf(" CYL: rCYL=%f phyc=%f phyB=%f :%n",rCYL, phyc*DEG, phyB*DEG) ;

            rTOP = r_TOP( thc, phy ) ;
            printf(" rCYL=%f rTOP=%f\n",rCYL,rTOP) ;
            if( rCYL > rTOP )
            {
                if( r > rCYL && r<R_ball )
                {
                    *t1 = R_ball - r ;
                    *mk = ONTROCHOID ;
                }
                else
                {
                    *t1 = R_ball - rCYL ;
                    *mk = ONCYLINDER ;
                }
            }
            else
            {
                if( r < rTOP && rTOP<R_ball )
                {
                    *t1 = R_ball - rTOP ;
                    *mk = ONTOPPLANE ;
                }
                else
                {
                    *t1 = R_ball - r ;
                    *mk = ONTROCHOID ;
                }
            }
        }
        else if( INorOUT0 == ONCYLINDER )
        {
            rCYL = r_CYL( thc, phy ) ;
            /*
            printf(" B CYL: rCYL=%f :",rCYL) ;
            */
            *t1 = R_ball - rCYL ;
            *mk = ONCYLINDER ;
        }
    }
}
return ;
}

```

```

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "cutcond.h"

double r_func2( double, double, double );

/* 二分法による r の探索 */
double r_search2( double theta, double phy )
{
    double r_s, r_m, r_l, func_s, func_m, func_l ;
    double ret_value ;
    int count ;

    double t1s ;
    double fz, fsc ;

    fz = Feed/Z_blade ;
    fsc = fz*sin(phy)*cos(theta) ;

    t1s = R_ball - fsc - sqrt( fsc*fsc - fz*fz + R_ball*R_ball ) ;

    r_s = R_ball - Feed/Z_blade ;
    r_l = R_ball*0.999999 ;

    func_s = r_func2( theta, phy, r_s ) ;
    func_l = r_func2( theta, phy, r_l ) ;

    if( (func_s*func_l)<0.0)
    {
        count = 0 ;
        do
        {
            r_m = r_s + ( r_l - r_s)*func_s/( func_s - func_l ) ;
            func_m = r_func2( theta, phy, r_m ) ;

            if( (func_s*func_m)<0.0 )
            {
                r_l = r_m ;
                func_l = func_m ;
            }
            else
            {
                r_s = r_m ;
                func_s = func_m ;
            }
            ++count ;
        } while( fabs(func_m)>Dlimit ) ;
        ret_value = r_m ;
    }
    else
    {
        ret_value = -1 ;
    }
    return ret_value ;
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "cutcond.h"

extern double Theta2, Phy2 ;
double lambda( double ) ;

double r_func2( double theta, double phy, double r )
{
    double xq1, yq1, zq1 ;

```

```

double fdash, func ;
double theta0, phy0 ;

xq1 = -1.0*sin(phy)*sin(theta) ;
yq1 = -1.0*( sin(phy)*cos(theta)*cos(IncliFrad) + cos(phy)*sin(IncliFrad) ) ;
zq1 = -1.0*( -sin(phy)*cos(theta)*sin(IncliFrad) + cos(phy)*cos(IncliFrad) ) ;

theta0 = atan2( sin(phy)*sin(theta),(zq1*sin(IncliFrad)-sqrt( R_ball*R_ball/r/r -xq1*xq1-zq1*zq1 )*cos(IncliFrad) ) ) ;
if(theta0<0.0) theta0=theta0+2.0*M_PI ;

if( theta0==0.0 || theta0==2.0*M_PI )
{
phy0 = acos( r*cos(phy+IncliFrad)/R_ball ) - IncliFrad ;
}
else if( fabs(theta0-M_PI)<0.000001 )
{
phy0 = asin( (r*sin(phy-IncliFrad) + Feed/Z_blade)/R_ball ) + IncliFrad ;
}
else
{
phy0 = asin( r*sin(phy)*sin(theta)/(R_ball*sin(theta0)) ) ;
}

if( ForB == FRONT )
fdash = ( 2*M_PI/Z_blade + theta - lambda(phy) - theta0 + lambda(phy0) )*F_t ;
else
fdash = ( theta - lambda(phy) - theta0 + lambda(phy0) )*F_t ;
func = fdash*fdash + 2.0* r * yq1 *fdash + r*r - R_ball*R_ball ;

Theta2 = theta0 ;
Phy2 = phy0 ;

return func ;
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "cutcond.h"

int boundary( double thc, double phy )
{
double th0, th0d ;
double thcd, phyd, x0, z0, l0 ;
double x1,y1,z1,z2 ;

phyd = phy*180.0/M_PI ;
thcd = thc*180.0/M_PI ;

th0d = thcd - TGdeg ;
if( th0d<0 )
th0d = th0d + 360.0 ;
else if( th0d>360.0 )
th0d = th0d - 360.0 ;
th0 = th0d*M_PI/180.0 ;

if( th0d>=Ths && th0d<=The )
{
x1 = -R_ball*sin(phy)*sin(thc) ;
y1 = -R_ball*( sin(phy)*cos(thc)*cos(IncliFrad)+cos(phy)*sin(IncliFrad) ) ;
z1 = -R_ball*(-sin(phy)*cos(thc)*sin(IncliFrad)+cos(phy)*cos(IncliFrad) ) ;

z2 = -x1*sin(IncliPrad) + z1*cos(IncliPrad) ;
if( z2 < (A_z-R_ball) )
{
x0 = Pick/R_ball*cos(IncliPrad) - sin(phy)*sin(thc) ;
z0 = -Pick/R_ball*sin(IncliPrad) + cos(phy)*cos(IncliFrad) - sin(phy)*cos(thc)*sin(IncliFrad) ;
l0 = sqrt( x0*x0 + z0*z0 ) ;

if( l0>=1.0 )

```

```

        {
            return INSIDE ;
        }
        else
        {
            return ONCYLINDER ;
        } /* cylinder in/out judge if-block end */
    }
    else
    {
        return ONTOPPLANE ;
    } /* phy if-block end */
}
else
{
    return OUTSIDE ;
} /* th0d if-block end */
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "cutcond.h"

double r_TOP( double thc, double phy )
{
    double th0, th0d ;
    double thcd, phyd, r, r1, r2, bunbo ;

    phyd = phy*180.0/M_PI ;
    thcd = thc*180.0/M_PI ;

    th0d = thcd - TGdeg ;
    if( th0d<0 )
        th0d = th0d + 360.0 ;
    else if( th0d>360.0 )
        th0d = th0d - 360.0 ;
    th0 = th0d*M_PI/180.0 ;

    bunbo = cos(OZrad)*cos(OZrad)*(1.0-sin(phy)*sin(phy)*sin(th0)*sin(th0))
            -sin(phy)*sin(phy)*cos(th0)*cos(th0) ;
    r1 = (R_ball-A_z)*(sin(OZrad)*sin(phy)*cos(th0)+cos(OZrad)*cos(phy))/bunbo ;
    r2 = (R_ball-A_z)*(sin(OZrad)*sin(phy)*cos(th0)-cos(OZrad)*cos(phy))/bunbo ;

    printf("== r_TOP: r1=%f r2=%f\n",r1,r2) ;
    r = r1 ;
    return r ;
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "cutcond.h"

double r_CYL( double thc, double phy )
{
    double thcd, phyd, r, r1, r2 ;
    double a, b, c, ss, pa, sq ;

    phyd = phy*180.0/M_PI ;
    thcd = thc*180.0/M_PI ;

    ss = sin(phy)*sin(thc) ;
    pa = cos(phy)*cos(IncliPrad) - sin(phy)*cos(thc)*sin(IncliPrad) ;

    a = ss*ss + pa*pa ;
    b = Pick*( ss*cos(IncliPrad) + pa*sin(IncliPrad) ) ;
    c = Pick*( ss*sin(IncliPrad) - pa*cos(IncliPrad) ) ;

```



```

sq = sqrt( R_ball*R_ball*a - c*c );

r1 = ( b + sq )/a ;
r2 = ( b - sq )/a ;

printf("==r_CYL: r1=%f r2=%f\n",r1,r2);

r = r1 ;

return r ;
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "cutcond.h"

void ph_range( double th0, double *phy1, double *phy2 )
{
double AA, BB, CC, C0 ;
double S1, S2 ;
AA = R_ball*(sin(th0)*sin(th0)*cos(OZrad)*cos(OZrad) + cos(th0)*cos(th0)) ;
BB = -(R_ball-A_z)*sin(OZrad)*cos(th0) ;
C0 = Ra*Ra - R_ball*R_ball*sin(OZrad)*sin(OZrad)*cos(th0)*cos(th0) ;
CC = cos(OZrad)*sqrt( C0 ) ;

S1 = (BB+CC)/AA ;
if( S1 > 1.0 ) S1 = 1.0 ;
else if ( S1 < -1.0 ) S1 = -1.0 ;
S2 = (BB-CC)/AA ;
if( S2 > 1.0 ) S2 = 1.0 ;
else if ( S2 < -1.0 ) S2 = -1.0 ;

*phy1 = asin( S1 ) ;
*phy2 = asin( S2 ) ;

return ;
}

/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "cutcond.h"

double lambda( double phy )
{
double lam ;

lam = 0.0*phy ;

return lam ;
}

```

○ヘッダファイル (ファイル名: cutcond.h)

```
/*
BALL END MILL : Uncut-Chip-Thickness Calculation
*/
#include <SIOUX.h>
void initialize();
void precalc();
void calcAREA();
void trocalc3();
void input3();
int boundary( double, double );
void t1calc( double, double, double *, int * );
void ph_range( double, double *, double * );
double r_CYL( double, double );
double r_func2( double, double, double );
double r_search2( double, double );
double r_TOP( double, double );
double lambda( double );

#define TROCHOID 0
#define SPHERE 1

#define ENTO_GAIBU 0
#define ENTO_NAIBU 1
#define ENTO_BORDR 4
#define JOUMEN 2
#define UPPER 5
#define LOWER 6
#define BLANK 7

/* definitions for Mark of point */
#define OUTSIDE 0
#define ONTROCHOID 1
#define ONTOPPLANE 2
#define ONCYLINDER 3
#define BACKSIDE 8
#define INSIDE 9

#define FRONT 0
#define BACK 1

#define M_PI 3.141592654

extern double R_ball, Feed, Pick, A_z, A_z0;
extern int Z_blade;
extern double InclIF, InclIFrad, InclIP, InclIPrad;
extern double OZrad, OZdeg, OZlim;
extern double Ra;
extern double TGrad, TGdeg;
extern double ThGrad, ThGdeg;
extern double Ths, The;

extern double F_t, PhyU, PhyUdeg, Rmax;

extern double Dtheta, Dphy;
extern int Ntheta, Nphy, NphyU;
extern double Dlimit, Alimit;

extern double **T1t;
extern double *At;
extern int ForB;
```

○入力データ用ファイル(ファイル名: INPUTDATA)

R (mm) =5.000000
Z =2
f(mm/rev)=0.100000
p(mm/tr) =1.00000
a (mm) =2.00000
Dth(deg) =1.000000
Dph(deg) =1.000000
Dlim = 0.000001000
wp(deg) =0.000000
wf(deg) =0.000000