新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程

平成26年度 博士論文



在 籍 番 号	F11K006D		氏	名	藤	田		岡山	
指導教官	職名	教 授	氏	名	岩	部	洋	育	

目 次

1. 緒 論	1
2. 傾斜面の等高線加工における主軸傾斜による影響	19
2.1 緒 言	19
2.2 三次元 CAD による切削機構および切削特性の検討	19
2.2.1 切削モデル	19
2.2.2 切削断面積の計算方法	21
2.2.3 評価値の計算方法	21
2.2.4 計算結果と考察	22
2.3 高能率で高精度な加工法の提案と検証実験	24
2.3.1 切削機構および切削特性に基づく加工法の提案	24
2.3.2 実験条件および方法	25
2.3.3 実験結果および考察	25
2.3.3.1 切削力	25
2.3.3.2 切削トルク	26
2.3.3.3 仕上げ面粗さ	27
2.4 高能率・高精度加工を実現する切削条件	28
2.4.1 レーダチャートを用いた切削性能の総合評価	28
2.4.2 総合指数による切削条件の検証	29
2.5 結 言	30
参考文献	31
3. 傾斜面の直線加工における工具送り方向による影響	32
3.1 緒 言	32
3.2 三次元 CAD を活用した切削モデルの作成	32
3.3 実験条件および方法	33
3.4 計算および実験結果と考察	34
3.4.1 切削断面積	34
3.4.2 切削力	36
3.4.3 評価値と切削トルク	37
3.4.4 仕上げ面粗さ	38
3.5 高能率・高精度加工を両立する切削条件および加工法の検討	39
3.5.1 加工法が成立する切削条件	39
3.5.2 レーダチャートを用いた切削性能の総合評価による検討	40
3.6 結 論	··· 41
参考文献	42

4. p	凸曲	面の等高線加工における工作物曲率半径による影響 43
4.1	緒	言
4.2	Ξ	次元 CAD を活用した切削モデルの作成43
4.3	実	験条件および方法
4.4	計	算および実験結果と考察
4	.4.1	切削断面積
4	.4.2	切削力
4.5	結	言
参表	考文前	鈬
5. Ť	結	論
	射	辞

1. 緒 言

1.1 研究背景および概要

近年,消費者ニーズの多様化によって工業製品は多品種少量生産へと移行し, そのライフサイクルは短くなる傾向にある.そのために,生産リードタイムの 短縮化が強く望まれ,各種金型に対して直彫り加工が試みられており,ボール エンドミルは不可欠な工具である.一方,5軸制御加工機やCAD/CAMなどの ソフトウェアの発展が著しく,切削工具には高能率で高精度な加工が期待され ている.これまでにボールエンドミルに関する研究成果は多く報告されており, その一部の文献に関して以下のように分類を試みた.

a) 切削力測定に関する研究

文献(1)では、細井により発明されたうず巻状刃先をもつボールエンドミルに 関し、超硬合金を刃先に用いても破損を生ずることなく高能率な加工が行える 切削作用の特徴を明らかにする目的で、標準的と考えられる刃先形状をもつボ ールエンドミルを比較対象として2種類の工具を用いた構造用炭素鋼 S45C を切 削する実験が行われ、ストロボ撮影により切りくずの生成過程などの切削状況 を観察するとともに切削3分力の変動を測定された報告がなされている.

文献(2)では、藤井らにより金型に対する高精度・微細化の要求を実現するた めに切削工具の切削機構を明らかにし、工具が加工時に直接加工精度に及ぼす 影響を考えた加工シミュレーションをコンピュータ統合生産システム CIM の末 端に組み入れることで切削時のたわみ誤差などの諸問題に対応すること、加工 誤差に及ぼす要因の解析を行うことを想定して、ボールエンドミルの切削中に おける切削抵抗が切削面積および切削実験を伴う極値探索法により推定された 比切削抵抗により解析的に誘導され、シミュレーションが行われた報告がなさ れている.

文献(3)では、宮口らにより小径ボールエンドミルによる高回転ミーリング時 における高周波帯域の切削力の動的な 3 分力測定をそれぞれ個別に測定する測 定方法が提案され、この方法により焼入れ鋼の高回転ミーリング時の切削力測 定が行われ、主軸回転数や一刃当たりの送りの切削力への影響について実験検 討するとともに、主軸の消費動力により比切削エネルギーを測定し、上記の切 削力からの試算結果と対比した報告がなされている.

文献(4)では、笠原らにより横向きカールを考慮した切削模型をボールエンド ミル切削の場合に拡張し、切れ刃に沿う切れ刃傾斜角、直角すくい角、せん断 角、切りくず流出角や諸速度の変化を考慮して切りくず生成状態と切削抵抗の 予測を試み、その切削機構、切削現象の検討を行うとして、工具すくい面と切 れ刃形状の幾何的取扱いについて述べられ、切れ刃傾斜角と直角すくい角の切 れ刃に沿う変化を明らかにするとともに、この切れ刃形状の解析結果に基づい て切削模型が構成され、この切削模型とエネルギー解法が用いられて得られた 切りくず生成状態の報告がなされている.

文献(5)では、芦らにより後述する文献(50)で開発され工具の試作と高速切削実験によってシステムの有効性が確認された工具を設計・作成する工具研削 3D-CAD/CAM システムに比べ、自在に工具形状の創成ができ、工具形状が切削加工に及ぼす影響を定量的に扱うことが可能な、ボールエンドミルを設計、製作する CAM システムが開発された報告がなされている.

文献(6)では、大塚らにより実用的なボールエンドミルの切削抵抗の予測や制 御に使用可能な数学モデルを構築するため、その切削抵抗の簡易推定式につい て研究することとして、2次元平面内におけるボールエンドミルによる高硬度材 の切削加工について、近似化手法である応答曲面法を適用して切削抵抗の予測 式が構築され、変形前の最大切りくず厚さ、切削円弧長および先端切削関与角 を 3 つのパラメータとする本予測式により、直線部切削および円弧部切削を含 む 2 次元平面内の輪郭加工での切削抵抗の予測や制御が可能となることが示さ れるとともに、本予測式が、前述の刃先の場所ごとに切削特性が変化する問題 や、切りくずが薄くなる微小切削の場合にも適用可能となる報告がなされてい る.

文献(7)では、寺本らによりボールエンドミル加工において、モニタリングな どによって計測される実切削力データをもとに、加工モデルを逐次高精度化す るモデル学習の枠組みを適用して高精度な切削力予測を行う手法について報告 されている.

文献(8)では、松村らにより切削動力が最小となる方向に切りくずが流れるものとして、切りくず流出方向と切削速度方向を含む平面における二次元切削を 重ね合わせて切りくず生成過程をモデル化し、切削力を解析する手法を適用す ることによって、曲線で定義された切れ刃形状のエンドミル加工に対して、切 削力を予測する手法が示されるとともに、曲線切れ刃エンドミルの最も単純な 適用例として、ボールエンドミルの解析とその妥当性が示された報告がなされ ている.

文献(9)では、山田らによりボールエンドミルの傾斜面加工において安定的な 加工状態となる工具姿勢(傾斜角 α,送り方向角 β)およびピックフィード方向 *V*_fpの違いによるボールエンドミルの加工状態モデルが構築されるとともに、α, β,*V*_fpをパラメータとした5軸工作機械上での切削力測定実験から、送り方向を 基準として定義した工具姿勢の変化による加工状態の加工安定性を評価し、加 工状態モデルの検証及び安定的な加工状態となる工具姿勢が導出された. 文献(10)では、笠原らにより平面を一定の切削深さで溝削りする場合が取り上 げられ、種々の工具姿勢における切削過程での幾何学料と切削速度の工具姿勢 による変化・差異が明らかにされるとともに、この幾何学量に基づいた切削模 型を適用して得られる切削抵抗の計算結果と実験結果との比較をとおし、計算 結果の妥当性が検証され、工具姿勢による切削抵抗の変化、両者の関連につい て系統立てた説明が試みられ、切削抵抗の変動軽減に有利な工具姿勢も探られ た報告がなされている.

文献(11)では、浜口らによりマイクロボールエンドミル加工における振れの影響を明らかにするため、振れ量を変化させた切削加工実験が行われ、振れ量と工具直径の割合から摩耗形態および切削抵抗について評価された報告がなされている.

b) 特殊な切れ刃を有する工具に関する研究

文献(12)では、岸浪らにより円すい面のみですくい面を構成する「円弧切れ刃 ボールエンドミル」が提案され、市販されているねじり角のないボールエンド ミル、及び工具先端部に強い曲率を持つ超硬曲線切れ刃ボールエンドミルがこ の円弧切れ刃の特殊な形態であることが明らかにされ、円弧切れ刃形状の幾何 学的特性、特に各切れ刃点での切削状況を明らかにするため任意の円弧切れ刃 ボールエンドミルの三次元運動下におけるすくい面解析が行われ、望ましいボ ールエンドミルの切れ刃形状と使用切削条件の体系化を目的とした報告がなさ れている.

また,文献(13)の第2報では,ボールエンドミルの切削性を評価するには工具 1回転における切削に寄与する範囲,いわゆる切削作用角を明らかにすることが 重要であるとして,種々の切れ刃形状,切削条件,前加工面に対して切削作用 角が理論的に求められ,その切削性能を明らかにすることを目的とした報告が なされている.

さらに、文献(14)の第3報では、切削抵抗、切削動力、切りくず生成機構から みたボールエンドミルの切れ刃形状と切削性を理論的に予測することは困難で あるため、実験的にボールエンドミルの切れ刃形状と切削性の関係を明らかに する必要があるとして、試作された種々の切れ刃形状の創成を可能とする拡大 円弧切れ刃ボールエンドミル模型により、パラフィン、低重合ポリエチレン、 炭酸カルシウム混合体を被削材とする切削実験が行われ、ボールエンドミル形 状と切削性を明らかにするとともに切削性が良好とされる2種類の切れ刃形状 が明らかにされている.

文献(15)では、青山らによりボールエンドミルの再研磨後に半径が再研磨量だけ小さくなり、切れ刃形状の管理が容易でなかった問題に対し、再研磨作業が

極めて単純であり,再研磨後も再研磨以前と同一の切れ刃形状が得られる楕円 柱とその断面で切れ刃を構成する楕円ボールエンドミルが提案され,その成形 方法の確立,切削抵抗力が最小となるような最適な切れ刃形状を決定するため の六四黄銅拡大モデルを使用したワックス切削実験が行われるとともに,その 結果を検証するために切れ刃角 β が異なる 2 種類の超硬楕円エンドミルが試作 され金属切削における実験が行われた報告がなされている.

文献(16)では、岡崎らによりダイヤモンド電着工具を陰極に使用し、焼結ダイ ヤモンド (PCD) に対して放電ならびに研削加工を行うことにより、半径が 50μm の PCD 製ボールエンドミルが試作されるとともに、切れ刃の稜線を滑らかに成 形することにより、試作した工具をマイクロ荒加工だけでなく中仕上げ加工に も用いることが試みられた報告がなされている.

文献(17)では、仙波らによりナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)に対してレーザ 粗成形と研削仕上げ成形が行われ、欠けのない鋭利な切刃を成形できる工具成 形技術の開発が行われるとともに、NPD だけでなく、単結晶ダイヤモンド(SCD) 製のマイクロボールエンドミルが試作され、これらの工具をビッカース硬さが 1350Hvの超硬合金に対する断続切削に使用した報告がなされている.

c) 加工精度に関する研究

文献(18)では、田中らにより任意の方向に工具を送る切削が実際の3次元曲面の加工において重要と考えられることから、円筒の軸に対して一定の角度で工具に切削送りを与える加工を対象として、主に加工誤差に及ぼす工具送り方向の影響が理論的・実験的に明らかにされた報告がなされている.

文献(19)では、笠原らにより円筒部の切れ刃形状の取扱いと切削模型の構成に ついて述べられ、次いで斜面を工具が上昇あるいは加工しながら溝削りする場 合の切削過程の幾何学量、切削抵抗と切りくず生成状態に関する計算結果の一 例が示され、斜面の傾き、工具移動方向による切削機構、切削現象の変化・差 異について予備的な検討がなされている.

文献(20)では、西川らによりボールエンドミルの3軸加工を対象に工具動たわ みと形状誤差に起因する加工誤差を加工前に予測し、NCデータを修正するシス テムが開発され、円筒面加工と金型モデルに適用された事例について報告がな されている.

d) 工具摩耗,寿命判定に関する研究

文献(21)では、自動生産システムにおいて1台の工作機械に生じた異常事態が システム全体に及ぼす影響がきわめて大きく、工具の損傷状態を無人運転下で 検出して処理をすることが必要になってくるとして、高津戸らにより固体が塑 性変形あるいは破壊するときに弾性波を生じる現象, すなわちアコースティッ クエミッション(AE)に着目し, 切削場から得られる AE 信号によって工具の 摩耗を主として検出し,工具寿命を判定することが試みられ, 流体の中を AE 信 号が伝播すること,および流体の中は縦波だけしか通らないことを利用して流 体伝播 AE 検出装置を開発し,工具から直接非接触で AE 信号を検出し, 定量的 にボールエンドミルの寿命測定を行ったことが報告されている.

文献(22)では、高橋らにより小径コーテッド超硬ボールエンドミルによる金型 用鋼材の超高速ミーリングにおける工具回転数、半径方向切込み量、軸方向切 込み量および工具半径などの各種切削条件が、工具摩耗に及ぼす影響を調査す る切削実験が超高速ミーリング機である High Speed Cutting Advanced RIKEN Technology (HICART)を用いて遂行され、金型用鋼材の超高速ミーリング特性 を明らかにし、これにより高速ミーリングにおける最適な切削条件選定のため の指針を得ることを目的とした報告がなされている.

文献(23)では、香山らによりあらかじめ生成しておいた工具経路を基に、切削 シミュレーションにより工具摩耗が逐次推定され、その摩耗量を用いて元の工 具経路位置を補正することにより工具摩耗量を考慮した精度の高い工具経路位 置を求める方法が検討されており、傾斜平面切削モデルを用いて摩耗推定量算 出の基本的な考え方、任意の工具移動切削モデルへの拡張方法とその定式化、 工具摩耗を考慮した曲面加工のための工具経路生成法が述べられるとともに本 手法の妥当性に関する検証実験とその結果が報告されている.

e) 仕上げ面に関する研究

文献(24)では、後述する文献(48)の検討に加え、輪郭形状測定器および顕微鏡 写真による表面性状の観察が行われた報告がなされている.

文献(25)では、高能率化のため 0.5 mm/刃以上の高い送りが使用され、ピック フィードとボールエンドミルの工具半径 r によって決定される表面粗さである カスプだけでなくそれよりも大きいと指摘され、解析されていた送り方向の表 面粗さを考慮しなければならなくなっていた状況で、是田らによりボールエン ドミルの切れ刃の軌跡を計算機で時々刻々と追跡して、表面粗さの生成機構を 幾何学的に幾何学的に解析し、その結果ボールエンドミルの回転中心付近で加 工する際に切れ刃がスパイラルに運動するため削りの腰が生じること、その削 り残しの高さは 1 刃あたりの送り量が大きいほど高くなること、削り残しは主 軸の高速化による 1 刃あたりの送り量の低減、ボールエンドミルの回転軸の傾 斜、工具先端部の切れ刃の平坦化、さらには往復切削化などにより改善できる ことが明らかにされている.

文献(26)では、趙らによりボールエンドミルによる平面加工時の表面粗さが検

討され、工作物および工作物間の傾斜角βを0°から50°まで1°ごとに変えて求 められた51個の表面粗さの中で最小となる傾斜角を、一方向送りの場合に最適 傾斜角、双方向送りの場合に臨界傾斜角とする概念がそれぞれ示されて最適傾 斜角と臨界傾斜角、最適傾斜角による表面粗さの改善率と臨界傾斜角による表 面粗さの改善率が比較された.そして、ニューラルネットワークを利用して任 意の切削条件下における最適傾斜角と臨界傾斜角の求め方が提案されるととも に、その有効性が確認され、(1)一方向送りの場合には工具を最適傾斜角に、双 方向送りの場合には工具を臨界傾斜角に傾けて切削を行うと、表面粗さは垂直 加工の場合より小さくなる、(2)一方向送りの場合の工具軸の傾斜角は双方向送 りよりも小さくでき、しかも表面粗さが小さくなる、と報告されている.

また,文献(27)では,文献(26)の検討に加え,被切削面を凸,凹球面,切削方 式を等高線切削と仮定して加工時の表面粗さをシミュレーションにより検討す ると共に任意切削条件化における球面等高線加工時の最適傾斜角と最小表面粗 さの計算式を無制約最適化設計問題として提案し, Powell の共役方向法に基づ いてその有用性を確認した報告がなされている.

さらに、文献(28)では、文献(26)および(27)の検討に加え、主軸の半径方向振 れ、軸方向の動き、刃先の形状及び位相差が加工面形状、表面粗さを生成する 要因でもあることが提案され、更にこれらの要因を考慮したシミュレーション の有効性を切削実験により確認した報告がなされている.

文献(29)では、郝らによりボールエンドミルによる球面加工を対象とし、工具 経路を平面曲線(例えば走査線、等高線等)と想定した上で、その加工面形状 の創成機構を目的に、工具の座標変換式から解析的に加工面形状を算出する方 法が提案され、工具の平面切れ刃の掃引により生成された形状である加工面と、 対象形状の法線方向に沿った加工面と対象形状との差である誤差形状に関する 理論的解析を通じて、加工面・誤差形状の基本形の概念の提案、創成機構の解 明、シミュレーションシステムの開発が行われるとともに、従来の算出方法と 比較して算出時間の短縮が確認されている.

文献(30)では、齋藤らによりボールエンドミル加工において工具の移動時間を 管理して切れ刃の位相差を制御し、偏心量を任意の値に設定することによって 仕上げ面を任意の凹凸模様で創成できることが示されるとともに、ボールエン ドミルの偏心量、工具切れ刃の位相差および工具傾斜角度などと仕上げ面の凹 凸模様および表面粗さとの関係についてシミュレーションと実験とを行った詳 細な検討が報告されている.

文献(31)では、郝らにより文献(29)での検討に加え、平面切れ刃による加工面 形状創成の概念が拡張され、ねじれ切れ刃に適用する手法が提案されるととも に、工具逃げ面による加工面形状への影響およびその発生限界について明らか にされ、シミュレーションシステムの開発を論じた報告がなされている.

文献(32)では、吉川らにより文献(29)および(31)に引き続き、工具回転軸の傾 斜と加工面形状の幾何学的な関係を明らかにすることを目的として、加工創成 面が満たすべき幾何的な条件式に基づいて、リード角とチルト角の異なる組合 せについて加工面が算出され、それらの形状誤差や加工面を通過する工具切れ 刃の位置姿勢が分析された報告がなされている.

文献(33)では、岩部らにより小径ボールエンドミルによる高硬度材の高速加工 が行われ、切削力が測定されるとともに、FEM を用いて工具のたわみに基づい た加工面の形状が解析され、実験結果との比較により加工面生成機構の検討が 行われた報告がなされている.

文献(34)では、廣垣らにより最も基本となる3軸制御マシニングセンタを用いた走査線パスにおいて、ボールエンドミル刃先 R 形状の不連続性に着目し、自由曲面の仕上げ要素を多く含んだ半円筒形状の加工時に起こる現象の考察と、均一な鏡面仕上げを目指すために、工具、加工条件、工作機械などを統合的に判断する手法として、円筒仕上げ面の魔鏡検査を提案し、その適応性を評価した結果が報告されている.

文献(35)では、廣垣らにより5軸制御マシニングセンタの回転軸制御とボール エンドミルの組合せで加工時の加工面と刃先R部の接触角度を一定(切削点角 度一定)化して創成した1/4円筒加工面に魔鏡検査が行われ、その効果が実証さ れるとともに、切削点角度を一定化して得られた加工面の解析を遂行し、鏡面 に近い加工面では工具のピック方向だけでなく送り方向の面粗さも考慮する必 要があることが示され、最後にそれらの結果を基にして、鏡面に近い仕上げ面 を得るための高能率な仕上げ加工条件の設定法が提案された.

文献(36)では、笠原らにより切削模型とエネルギー解法を利用して得られた工 具軸に垂直な切削抵抗分力を用いて、球体部と円筒部の切れ刃が同時に切削に 関与し工具が等高線に沿って移動しながら溝削りする場合とピックフィードを 伴う場合の工具挙動の解析が試みられ、解析結果の妥当性が検証されるととも に工具移動方向によって生じる工具挙動の差異が明らかにされた報告がなされ ている.

また、文献(37)の第2報では文献(36)に引き続き、工作物表面の傾き(斜面傾 斜角と呼ぶ)を種々変化させた場合の工具たわみ量の解析結果と実験結果との 比較をとおして、解析モデルや予測手法の適用性を検証し、工具挙動に及ぼす 斜面傾斜角の影響について述べるとともに、切れ刃の移動軌跡に基づいて理想 的に得られる仕上げ面の形状、加工誤差の斜面傾斜角による変化・差異、たわ みによって生じる工具挙動と加工誤差との関係が明らかにされた.

f) びびり振動に関する研究

文献(38)では、田中らにより、スクエアエンドミル加工の再生びびり振動理論 を、切削送りを傾斜面に沿って水平に与える切削方式でのボールエンドミル加 工に適用して、動的切削力および切れ刃ねじれ角を考慮した切削面における振 動発生領域が調べられるとともに、振動発生限界に及ぼす切削パラメータ(切 削速度、切込み、ピックフィード、被削材傾斜角、エンドミル支持系特性)の 影響について考察された報告がなされている.

文献(39)では、田中らにより文献(38)の理論解析結果を実験解析により調べ、 理論の妥当性と提案した振動発生限界図の実用性が検討されており、切削面に おける振動発生領域を実験的に調べるとともに、切削速度、切込み、ピックフ ィード、被削材傾斜角などの主要な切削パラメータを変化させた系統的な実験 を行い、振動発生限界に及ぼす影響を調べた報告がなされている.

文献(40)では、赤澤らにより再生びびり振動安定限界が高い工具傾斜角度を選 択することで、再生型びびり振動を抑制し、より高能率な加工を達成すること を最終的な目的として、低剛性工作物を加工する場合において、切削送り方向 周りの工具傾斜を考慮して再生びびり振動安定限界を予測する数値解析モデル の構築および実験的検証、すなわち、まず傾斜角をもつボールエンドミル加工 において、切削力増分モデルを構築し、振動方向に微小変位を仮定した場合の 平均的な切削力増分が算出され、次にこの切削力増分と、低剛性工作物のコン プライアンス伝達関数測定値から再生びびり振動安定限界を解析するとともに、 加工実験により解析モデルの妥当性を検証した報告がなされている.

g) 切削機構に関する研究

文献(41)では、寺井らによりボールエンドミル加工においてこれまで十分に明 らかにされていなかった切取り厚さに関しての幾何的な理論解析として、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、直刃のボールエンドミルを対象に工具姿勢が切取り厚さに与える 影響が検討され、さらに切取り厚さ分布のシミュレーションシステムについて 論じた報告がなされている.

文献(42)では、寺井らによりボールエンドミル加工において工具回転中心近傍 の切れ刃と被削材の干渉状態について幾何的に考察され、「切れ刃退行現象」の 発生範囲ならびに回避条件について明らかにされた報告がなされている.

h) その他

文献(43)では、山田らによりボールエンドミルに軸方向の超音波振動を付与した場合の基礎的切削特性について実験的に調べられ、また小径ボールエンドミルに対して超音波振動を付与した場合のセンターウエブ部での加工面および工

具のたわみに関する切削特性について調べられたことにより,超音波振動の援 用が同加工における前記切削特性向上に大きく寄与することが明らかにされた.

文献(44)では、成田らによりトライ&エラーからなる試し削り工程を省略する ことを目的として、ボールエンドミル加工における NC プログラムを解析し、切 削力によって発生する工具たわみに起因する加工誤差を事前に予測し、切削条 件、特に工具経路を自動修正するシステムの開発のうち予測システムの開発に ついての報告がなされている.

文献(45)では、児玉らにより工具カタログに記載されているボールエンドミル のデータ群に対して、刃部に関する新たな変数を非階層型クラスタリング手法 である K-means 法において導入され、カタログマイニングシステムを適用する ことにより、中粗加工用ボールエンドミル切削条件の決定に有意な変数の抽出 およびその支援システムが提案されるとともに、切削条件決定式によって導入 された切削条件の有用性を検証するために、直彫り用の金型鋼(DH31S 焼き入 れ材硬さ HRC53) に対して、汎用工具を用いて、被削材の傾斜角度を変えなが ら切削実験が行われ考察された結果の報告がなされている.

文献(46)では、藤井らによりボールエンドミルによる加工精度について、その 切れ刃形状が正確に測定されていないこと、加工面の生成に関与する切削力曲 線の範囲を決定することが困難であることから十分な資料が得られていない問 題点を解決することを目的として、形状の異なる2種類のエンドミルの先端部 の切れ刃形状の測定、切れ刃の切削開始から切削終了までの切削過程、切削実 験による切削力および加工誤差の測定が行われた報告がなされている.

文献(47)では、高津戸らにより複雑な三次元曲面からなる金型のボールエンド ミル加工で、加工時間に大きく影響する送り速度が一定とする方法しか行われ ていない現状が下り傾斜加工時の工具は先の部分の負荷を多くし、工具摩耗、 工具損傷の大きな原因となっていること、また、それに応じて現場では、送り 速度を抑えて使用しているのが一般的であるが、必ずしも最善ではないという 観点から、自由曲面加工での時々刻々と変わる傾斜加工の中で、切削する方向 の傾斜に対して、傾斜角が計算され、その角度に対して係数を演算子傾斜に対 して常に最適な送り速度となる条件、およびそれらの実現化を図ることを工具 摩耗、仕上げ面粗さを用いて検討された報告がなされている.

文献(48)では、竹内らにより仕上げ工程においてボールエンドミルの側面切れ 刃で切削できる場合は側面切れ刃で、側面切れ刃で削れない場合に先端切れ刃 を使用する新しい加工法が提案され、このような加工を行うのに必要となる CL データを工具干渉を考慮したうえで生成するアルゴリズムを考案するとともに、 それに基づいて作成したソフトウェアを用いて加工実験を行うことで加工精度 と加工能率の向上が確認されたとの報告がなされている. 文献(49)では、 芦らにより高速ミーリングの場合に不要な工具側刃を無くした 任意形状切れ刃をもつボールエンドミルを研削するための CAD/CAM システム を開発するため、ボールエンドミルの刃先形状を変化させ、異なる形状のボー ルエンドミルが3次元 CAD 上で設計され、設計した工具形状に基づき工具研削 盤を用いて製作されるとともに、高速切削実験および工具形状測定により工具 形状と加工効果の関係を調べ、高速ミーリングに適する工具形状を提案する報 告がなされている.

文献(50)では、笠原らにより文献(27)で導いた切削抵抗と切りくず生成状態を 解析的に求める諸式を用いて具体的計算を行い、得られた計算結果と実測結果 との比較をとおしてボールエンドミルによる溝削りの場合の切削機構、切削抵 抗および切りくず生成状態に関する検討が行われるとともに、径の異なるボー ルエンドミル間で幾何学的相似が成立することに着目し、直径が変化する場合 の切削抵抗の簡便な予測方法についても検討された報告がなされている.

文献(51)では、寺井らにより文献(41)で述べられた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と文献(42)で述べられた工具回転中心近傍の複雑 な切削機構についての詳細な解析手法を基に、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された報告 がなされている.

文献(52)では、江頭らにより放電加工では問題とされる電極角部の消耗現象を 逆に利用し、研削による従来の手法では作成が困難であったボール半径 10 μm の極小径ボールエンドミルが製作され、切削シミュレーションおよび黄銅への 平面切削による表面粗さ、工具寿命刃部形状の検討が行われた.

文献(53)では、芦らにより文献(49)および(5)に引き続き、高速ミーリングに適 する工具形状の開発を目的として、過去の実験結果に基づき、更なる長寿命工 具形状を提案するため、刃先ランド形状を創成する CAM の開発および高速ミー リング実験を用いた検証が行われた.

文献(54)では、岩部らにより汎用のNCフライス盤に高速主軸装置を取り付け て簡易的に主軸の高速回転を実現させた、小径ボールエンドミルによる高硬度 材の高速切削が行われ、切削の進行に伴う逃げ面摩耗幅および摩耗した切れ刃 による仕上げ面の粗さが測定され、基本的な切削特性が明らかにされるととも に、切削方式および微量の冷却材をミスト状に与えることの効果について検討 された.また、三次元 CAD を用いてボール部の切れ刃が工作物を通過する実切 削長さが計算され、逃げ面摩耗幅の形状に及ぼす影響について検討されるとと もに、加工面の生成に関与する切れ刃位置の摩耗幅と仕上げ面粗さの関係につ いても比較検討が行われている. 文献(55)では、笠原らにより円筒部の切れ刃形状の取扱いと切削模型の構成に ついて述べられ、次いで斜面を工具が上昇あるいは加工しながら溝削りする場 合の切削過程の幾何学量、切削抵抗と切りくず生成状態に関する計算結果の一 例が示され、斜面の傾き、工具移動方向による切削機構、切削現象の変化・差 異について予備的な検討を行った報告がなされている.

また,文献(56)の第2報では文献(55)に引き続き,斜面の傾きを種々に変化さ せた場合の切削抵抗,切りくず生成状態に関する計算結果と切削実験結果との 比較をとおして計算結果の妥当性を検証するとともに,斜面の傾き,工具移動 方向による切削機構,切削現象の変化・差異について述べられた報告がなされ ている.

文献(57)では、笠原らによる文献(56)に引き続く第3報では、ピックフィード を伴って斜面を上りあるいは下り加工をする場合がとりあげられ、切削抵抗の 計算結果と実験結果および切削過程の幾何学量との比較をとおして、切削模型 の適用性と切削機構、切削現象に及ぼすピックフィードの影響について検討さ れた報告がなされている.

文献(58)では、笠原らによる文献(57)に引き続く第4報では、工具が斜面上を 一定の高さで移動する等高線加工の場合に上記の切削模型とエネルギー解法を 適用し、斜面の傾きを種々変化させて得られた切削抵抗の計算結果と実験結果 との比較から切削模型の適用性が検証されるとともに、工具移動方向に向かっ て工作物表面が右上がりになる場合と左上がりになる場合の切削過程の幾何学 量、切削抵抗と切りくず生成状態の変化・差異について明らかにされた報告が なされている.

文献(59)では、小野塚らにより金型作成時の熱処理や専用工具製作の工数を削減することを目的として、標準工具を用いた焼入れ鋼への小径穴の直接加工が検討され、硬さHRC58の焼入れ鋼への、小径ボールエンドミルを用いたヘリカル送りによる小径テーパ穴の効能率加工を実現するために、工具の送り方向が工具寿命と加工精度に及ぼす影響を実験検討した報告がなされている.

その他, 文献(60)~(65)も発表されている.

しかし、切れ刃形状が複雑なため切削機構は十分に解明されているとは言い がたく、工具の切削特性に応じた有効活用も不十分な状況にある.複雑な三次 元輪郭形状は微小平面の連続体であることから、自由曲面における切削現象を 明らかにする上で傾斜面加工に基づく基礎的な検討は重要である.

そのような中,岩部らにより三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる 切削機構の解析方法が提案されている.これは,工具および工作物をモデリン グし,両者を切削が実現する形で結合させるとともに1回の切削で除去される ことになる切りくず立体と回転する切れ刃を干渉させながら切削の進行に伴っ て変化する切削断面積等の解析を行う方法であり,複雑な形状定義が容易化したことにより簡易的な方法としての切削性能評価が実現されている⁽⁶⁰⁾.しかしながら,5軸制御加工を想定した場合に切削条件が限定的であることや,解析結果の妥当性を検証するための切削実験が行われていなかった.本論文ではそれらの点を踏まえ,三次元 CAD(SolidWorks)を用いてボールエンドミルの5軸制御加工を想定した切削条件における切削機構を幾何学的に解析し,切削トルクに相当する評価値を定義および計算した.また,切削実験により得られた切削三分力に基づいて切削トルクを算出し,評価値の妥当性を検討した.さらに,切削機構および切削特性に基づいて良好な切削性能が期待できる条件を検討するとともに高能率・高精度加工法の提案を行い,その有用性について実験に基づく検証を行った^{(67), (68)}.図 1.1 に研究概略を示す.

1.2 本論文の構成

第1章「緒論」ではボールエンドミルのおかれた現状,これまでに発表された主な研究対象と解明が不十分な点,本研究および本論文の概要を述べている. 第2章「傾斜面の等高線加工における主軸傾斜による影響」では傾斜した平面



Fig. 1.1 Summary of this study

の等高線方式のピックフィード加工において,主軸を送り方向に傾斜させた切 削条件での切削性能評価を行う.第3章「傾斜面の直線加工における工具送り 方向による影響」では傾斜した平面のピックフィードを伴う直線加工において, 工具の送り方向を変化させた切削条件での切削性能評価を行う.第4章「凸曲 面の等高線加工における工作物曲率半径による影響」では凸テーパ面および凸 半球面の等高線方式のピックフィード加工において,工作物の曲率半径が変化 する切削条件での切削性能評価を行う.第5章「結論」では本研究で得られた 結論を総括する.

参考文献

- (1) 細井俊明, 星鐵太郎, "うず巻き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), Vol. 44, No. 378 (1978), pp. 722-731.
- (2) 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, Vol. 54, No. 12 (1988), pp. 2301-2306.
- (3) 宮口孝司, 嶽岡悦雄, 桝田正美, 岩部洋育, "小径ボールエンドミルを用いた高回転ミーリングにおける動的切削力", 精密工学会誌, Vol. 67, No. 3 (2001), pp. 450-455.
- (4) 笠原和夫,広田明彦,笹井洋介,"ボールエンドミル切削における切りくず 生成状態と切削抵抗の予測(第1報)(球体部の切れ刃形状と切削模型)", 精密工学会誌, Vol. 69, No. 3 (2003), pp. 396-401.
- (5) 笠原和夫,広田明彦,笹井洋介,"ボールエンドミル切削における切りくず 生成状態と切削抵抗の予測(第2報)(計算結果と実験結果との比較検討お よび幾何学的相似性に基づく切削抵抗の予測)",精密工学会誌, Vol. 69, No. 4 (2003), pp. 524-529.
- (6) 大塚裕俊,山路伊和夫,垣野義昭,中川平三郎,"焼入れ鋼のエンドミル加 工に関する研究(第3報)(ボールエンドミルの切削抵抗の簡易推定式とそ れによる切削抵抗の一定化制御)",精密工学会誌, Vol. 69, No. 4 (2003), pp. 549-553.
- (7) 寺本孝司,小野里雅彦,"モデル学習によるボールエンドミル加工の高精度 切削力予測",精密工学会誌, Vol. 69, No. 8 (2003), pp. 1098-1103.
- (8) 松村隆,古木俊充,臼井英治,"曲線切れ刃形状エンドミル加工における切削力解析(第1報,切削力解析手法とボールエンドミル加工の解析例)", 機械学会論文集(C編), Vol. 69, No. 688 (2003), pp. 3396-3402.
- (9) 山田誠,田中文基,近藤司,岸浪建史,"5 軸 NC 工作機械による主軸傾斜曲 面加工法に関する研究(第3報,ボールエンドミル傾斜加工における切削力 解析による工具姿勢評価)",精密工学会誌, Vol. 73, No. 5 (2007), pp. 563-567.

- (10) 笠原和夫,村田圭介,鈴木千博,広田明彦,"ボールエンドミル加工での切 削抵抗および工具挙動に及ぼす工具姿勢の影響(第1報)(工具を1および2 軸で傾斜させた切削過程の幾何学量と切削抵抗)",精密工学会誌, Vol. 77, No. 10 (2011), pp. 966-971.
- (11) 浜口和也,平山明宏,静弘生,奥田孝一,"マイクロボールエンドミルの回転振れが摩耗特性および切削抵抗に及ぼす影響",機械学会論文集(C編), Vol. 78, No. 791 (2012), pp. 2689-2697.
- (12) 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(円弧切れ刃エンドミルの切削機構に関する研究(第1 報))",精密機械, Vol. 46, No. 10 (1980), pp. 1303-1310.
- (13) 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(円弧切れ刃エンドミルの切削機構に関する研究(第2報))",精密機械, Vol. 47, No. 4 (1981), pp. 459-465.
- (14) 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れ刃形状 と切削性能(円弧切れ刃エンドミルの切削機構に関する研究(第3報))", 精密機械, Vol. 48, No. 7 (1982), pp. 906-912.
- (15) 青山英樹, 岸浪建史, 斎藤勝政, "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, Vol. 53, No. 3 (1987), pp. 461-466.
- (16) 岡崎隆一, 杉谷紀彦, 原田武志, 仙波卓弥, "PCD 製のマイクロボールエン ドミルと超硬合金に関する荒加工への応用", 機械学会論文集 (C編), Vol. 74, No. 739 (2008), pp. 724-730.
- (17) 仙波卓弥, 岡崎隆一, 角谷均, "ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロエンドミル", 機械学会論文集(C編), Vol. 76, No. 763 (2010), pp. 768-776.
- (18) 田中久隆,陸琳,佐藤昌彦,Bernard W. IKUA, "円筒面のボールエンドミル 加工に関する研究(加工誤差に及ぼす工具送り方向の影響)",機械学会論 文集(C編), Vol. 74, No. 744 (2008), pp. 2072-2078.
- (19) 笠原和夫,広田明彦,赤間知,"斜面のボールエンドミル加工の切削抵抗と 切削機構の解析(第1報)(切削過程の幾何学量と切削模型および予備的検 討)",精密工学会誌, Vol. 74, No. 9 (2008), pp. 965-970.
- (20) 西川隆敏, 菊田敬一, 門藤至宏, 筒本隆博, 金子順一, "エンドミル加工の 誤差補償システム(第1報)(動たわみモデルによるボールエンドミル加工 の誤差予測とNCデータ修正)", 精密工学会誌, Vol. 78, No. 11 (2012), pp. 975-979.
- (21) 高津戸光雄,加藤勝彦,貴志浩三,"流体伝播 AE 信号を利用したボールエンドミルの寿命判定",日本機械学会論文集(C編), Vol. 59, No. 560 (1993), pp. 1268-1273.

- (22) 高橋一郎,安斎正博,中川威雄,"10万回転超高速ミーリングにおける超硬 小径ボールエンドミルの摩耗特性",精密工学会誌, Vol. 65, No. 6 (1999), pp. 867-871.
- (23) 香山仁,近藤司,金子俊一,五十嵐悟,"ボールエンドミルの摩耗推定と高 精度曲面加工への応用",精密工学会誌, Vol. 67, No. 9 (2001), pp. 1427-1431.
- (24) 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, Vol. 56, No. 2 (1990), pp. 299-304.
- (25) 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, Vol. 59, No. 9 (1993), pp. 1537-1542.
- (26) 趙暁明,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(仕上げ面粗さを基準にした決定方法とニ ューラルネットワークの応用)",精密工学会誌, Vol. 62, No. 7 (1996), pp. 1019-1023.
- (27) 趙暁明,堤正臣,是田規之,葛 東方,"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(仕上げ面粗さを基準にした球面の場合)",精 密工学会誌, Vol. 63, No. 7 (1997), pp. 992-966.
- (28) 趙暁明, 是田規之, 堤正臣, "5 軸制御ボールエンドミル加工における表面粗 さ生成機構", 精密工学会誌, Vol. 64, No. 12 (1998), pp. 1826-1830.
- (29) 郝明暉,浅尾晃道,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生成機構の理論的解析",精密工学会誌, Vol. 65, No. 10 (1999), pp. 1476-1480.
- (30) 齋藤明徳, 趙暁明, 堤正臣, "ボールエンドミル加工における仕上げ面凹凸 模様の制御方法", 精密工学会誌, Vol. 66, No. 3 (2000), pp. 419-423.
- (31) 郝明暉,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 面生成機構の理論的解析(第2報)(逃げ面干渉を考慮したねじれ刃による 加工面形状の推定)",精密工学会誌, Vol. 66, No. 7 (2000), pp. 1150-1154.
- (32) 吉川浩一,水垣善夫,郝明暉,寺井久宣,"球面のボールエンドミル加工における加工面生成機構の理論的解析(第3報)(加工面形状の工具姿勢角依存性)",精密工学会誌,Vol. 69, No. 3 (2003), pp. 407-411.
- (33) 岩部洋育,名取修司,桝田正美,宮口孝司,"FEM を用いた小径ボールエンドミルのたわみによる加工面生成機構の解析",日本機械学会論文集(C編), Vol. 69, No. 687 (2003), pp. 3108-3115.
- (34) 廣垣俊樹,青山栄一,町中亮二,末田秀則,小川圭二,"ボールエンドミル 走査線パスにより創成された円筒仕上げ面の考察(魔鏡検査手法によるエン ドミル R 精度の影響の評価)",精密工学会誌, Vol. 73, No. 1 (2007), pp. 96-101.

- (35) 廣垣俊樹,青山栄一,小川圭二,川口二俊,末田秀則,須知亮,"5 軸制御マ シニングセンタで創成される仕上げ加工面の考察(ボールエンドミル加工に おける切削点一定化と最適加工条件の設定法)",精密工学会誌, Vol. 75, No. 10 (2009), pp. 1238-1244.
- (36) 笠原和夫,広田明彦,齋藤雅和,田中勇士,"斜面のボールエンドミル加工の工具挙動と仕上げ面生成機構の解析(第1報)(工具挙動の解析モデルおよび解析結果と実験結果との比較)",精密工学会誌, Vol. 76, No. 7 (2010), pp. 791-796.
- (37) 笠原和夫,田中勇士,広田明彦, "斜面のボールエンドミル加工の工具挙動 と仕上げ面生成機構の解析(第2報)(工具たわみに基づく仕上げ面正常と 加工誤差の検討)",精密工学会誌, Vol. 76, No. 8 (2010), pp. 901-906.
- (38) 田中久隆,小幡文雄,足森雅己,松原十三生,"ボールエンドミル加工の再 整びびり振動に関する研究(第1報)(振動発生限界の理論的解析)",精密 工学会誌, Vol. 64, No. 7 (1998), pp. 1047-1051.
- (39) 田中久隆,小幡文雄,足森雅己,森脇栄輔,池沼拓也,"ボールエンドミル 加工の再整びびり振動に関する研究(第2報)(振動発生限界の実験的解析)", 精密工学会誌, Vol. 65, No. 8 (1999), pp. 1179-1183.
- (40) 赤澤浩一, 社本英二, "低剛性工作物のボールエンドミル加工における再生型びびり振動に関する研究(切削送り方向周りの工具傾斜を考慮した解析モデルの構築)", 精密工学会誌, Vol. 75, No. 8 (2009), pp. 984-989.
- (41) 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取り厚さの理論解析",日本機械学会論文集(C編), Vol. 67, No. 654 (2001), pp. 553-558.
- (42) 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学的考察",日本機械学会論文集
 (C編), Vol. 68, No. 672 (2002), pp. 2457-2463.
- (43) 山田眞次郎,神雅彦,金井秀生,村川正夫,"超音波振動ミリング加工に関する研究(第1報)(基礎的特性の検討および小径ボールエンドミル加工への適用)",精密工学会誌, Vol. 69, No. 7 (2003), pp. 939-943.
- (44) 成田浩久,加藤聡,陳連怡,藤本英雄,白瀬敬一,荒井栄司,"予測シミュレ ータを利用したボールエンドミル加工のトライレス化の試み(第1報,加工 工程予測システムの開発)",機械学会論文集(C編), Vol. 71, No. 712 (2005), pp. 3622-3629.
- (45) 児玉紘幸,廣垣俊樹,青山栄一,小川圭二,"工具カタログデータにデータ マイニングを適用したボールエンドミル切削条件決定支援手法の提案",精 密工学会誌, Vol. 79, No. 10 (2013), pp. 964-969.

- (46) 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, Vol. 48, No. 5 (1982), pp. 649-654.
- (47) 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), Vol. 56, No. 521 (1990), pp. 189-194.
- (48) 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, Vol. 61, No. 4 (1995), pp. 561-565.
- (49) 芦毅, 竹内芳美, 三ッ森学, 高橋一郎, 加瀬究, 安西正博, "高速ミーリン グ用ボールエンドミルの創成とその切削特性", 精密工学会誌, Vol. 68, No. 3 (2002), pp. 451-455.
- (50) 芦毅,竹内芳美,高橋一郎,安西正博,加瀬究,"高速ミーリング用ボール エンドミルの創成とその切削特性(異なるねじれ角・すくい角をもつボール エンドミルの実験的・幾何学的評価)",精密工学会誌, Vol. 69, No. 4 (2003), pp. 530-535.
- (51) 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",日本機械学会論文集(C 編), Vol. 69, No. 684 (2003), pp. 2162-2167.
- (52) 江頭快,水谷勝己,"放電加工成形された極小径ボールエンドミルによる切削加工", 精密工学会誌, Vol. 69, No. 10 (2003), pp. 1449-1453.
- (53) 芦毅,竹内芳美,高橋一郎,安西正博,加瀬究,"高速ミーリング用ボール エンドミルの創成とその切削特性(ソリッドボールエンドミルの刃先ランド 処理による工具寿命向上と加工安定化)",精密工学会誌, Vol. 69, No. 11 (2003), pp. 530-535.
- (54) 岩部洋育,山口恒志,清水啓輔,中西賢介,"小径ボールエンドミルによる 高硬度材の高速加工における工具寿命と仕上げ面粗さに関する研究",日本 機械学会論文集(C編), Vol. 69, No. 687 (2003), pp. 2457-2463.
- (55) 笠原和夫,広田明彦,赤間知,"斜面のボールエンドミル加工の切削抵抗と 切削機構の解析(第1報)(切削過程の幾何学量と切削模型および予備的検 討)",精密工学会誌, Vol. 74, No. 9 (2008), pp. 965-970.
- (56) 笠原和夫,広田明彦,赤間知,"斜面のボールエンドミル加工の切削抵抗と 切削機構の解析(第2報)(工具が上昇および下降する切削過程の計算結果 と実験結果との比較検討)",精密工学会誌, Vol. 74, No. 10 (2008), pp. 1068-1073.
- (57) 笠原和夫,広田明彦,"斜面のボールエンドミル加工の切削抵抗と切削機構の解析(第3報)(ピックフィードを伴う斜面の上りおよび下り加工の場合)", 精密工学会誌, Vol. 75, No. 10 (2009), pp. 1216-1221.

- (58) 笠原和夫,広田明彦, "斜面のボールエンドミル加工の切削抵抗と切削機構の解析(第4報)(等高線加工の場合)",精密工学会誌, Vol. 75, No. 11 (2009), pp. 1345-1349.
- (59) 笠原和夫,鈴木千博,大高健太郎,村田圭介,広田明彦,"ボールエンドミル加工での切削抵抗および工具挙動に及ぼす工具姿勢の影響(第2報)(ピックフィード加工の場合の切削抵抗の結果と工具挙動の予備的検討)",精密工学会誌, Vol. 78, No. 10 (2012), pp. 899-904.
- (60) Miyaguchi, T., Masuda M., Takeoka E., Iwabe H., Effect of tool stiffness upon tool wear in high spindle speed milling using small ball end mill, Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 25, (2001), pp.145-154.
- (61) Minyang yang and Heeduck Park, The prediction of cutting force in ball-end milling, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.31, No.1, pp.45-54, 1991.
- (62) Iwabe, H., Miwa, H., Study on cutting mechanism and cutting performance of machining for curved surface by ball end mill using 3D-CAD, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.2, No.4, (2008), pp.513-521.
- (63) Iwabe, H., Natori, S., Masuda, M. and Takashi M., Analysis of Surface Generating Mechanism of Ball End Mill Based on Deflection by FEM, JSME International journal Series C, Vol.47, No.1, (2004), pp.8-13.
- (64) G. Yücesan, Y. Altintas, Prediction of Ball End Milling Forces, Journal of Engineering for Industry, Vol.118, (1996), pp.95-103.
- (65) 松村隆, ガラスのボールエンドミル切削, 2009 年精密工学会秋季大会シンポ ジウム資料, pp.23-26.
- (66) 岩部洋育,清水啓輔,佐々木三宣,"三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる切削機構の解析(傾斜面加工における切削面積と評価値による切削特性)",日本機械学会論文集(C編), Vol. 72, No. 713 (2006), pp. 247-254.
- (67) 藤田剛, 岩部洋育, "三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる傾斜面 加工における切削性能評価に関する研究(切削機構および切削特性に基づく 高能率・高精度加工法の提案)", 日本機械学会論文集(C編), Vol. 79, No. 800 (2013), pp. 1102-1111.
- (68) 藤田剛, 岩部洋育, "三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる傾斜面 の直線加工における切削性能評価に関する研究(送り方向が切削機構に及ぼ す影響)", 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 810, p. DSM0034

2. 傾斜面の等高線加工における主軸傾斜による影響

2.1 緒 言

第2章では、主軸を送り方向に傾斜させる5軸加工を想定した等高線方式に よる傾斜面の直線加工について検討を行った.まず切削断面積および切削トル クに相当する評価値を計算した.次に、切削機構および切削特性に基づいて良 好な切削性能が期待できる切削条件を検討するとともに、ボールエンドミルの 先端部の切れ刃を上記の切りくず立体に関与させた加工法の提案を行った.ま た、切削実験により得た切削力、切削トルクおよび仕上げ面粗さに基づいて提 案した加工法の有用性について検証した.さらに、レーダチャート方式⁽¹⁾を用い てそれぞれ独立した複数項目による切削性能の簡易的な総合評価を試み、高能 率で高精度な加工を実現する切削条件の妥当性について考察を行った.

2.2 三次元 CAD による切削機構および切削性能の検討

2.2.1 切削モデル

解析に用いる切削モデルを三次元 CAD(SolidWorks)によって作成した. 図 2.1 は工具モデルの作成方法を示しており,手順は以下のとおりである.

- (1) 直交3軸の主軸座標系(X'-Y'-Z')を定義し,原点をOc(0,0,0)とする.
- (2) Z'軸を中心軸として O₁(0, 0, -R_c)および O₂(0, 0, R_c)を Z'軸上に定義する.
- (3) X'-Y'面上に半径 R_cの四分円 O₁P₁P₂を定義する.
- (4) 四分円 O₁P₁P₂を Z'軸の正方向へ右ねじれ角が η となるように回転させ ながら点O₂まで移動させ, すくい面O₁P₂P₂'O₂を含む立体O₁P₁P₂O₂P₁'P₂' を定義する.
- (5) 原点 O_cおよび半径 R_cの四分円弧を含む図形 O₁Q₁Q₂Q₃Q₄を Y'-Z'面に定 義する.
- (6) 図形 O₁Q₁Q₂Q₃Q₄ を Z'軸周りに回転させ, 手順(4)までに定義された立体 から干渉する部分を除去する.
- (7) Z^{*}軸の正方向に半径および高さが R_cの円柱を,負方向に原点 O_cを中心 とした半径 R_cの半球を定義し,それぞれ手順(6)までに定義された立体 と合成する.
- 図 2.2 は工作物モデルの作成方法を示しており、手順は以下のとおりである.
 - (8) 直交 3 軸の工作物座標系 (X-Y-Z) および Y 軸上に長さ 4*R*_cの直線 ST を定義する.
 - (9) 直線 ST を底辺とし, 斜辺との角度が α となる直角三角形 STU を定義する.



(10) 直角三角形 STU を X 軸の正方向に移動させ、立体 STUU'T'S'を定義する.

図 2.3 は三次元 CAD で作成した工具モデルから計測した切れ刃形状と,後述 する切削実験で用いた市販のボールエンドミルの先端部の切れ刃形状をデジタ ルマイクロスコープ(KEYENCE VH-6300)によって測定した結果を比較したも のである.図は2枚の切れ刃のうち1枚の切れ刃をX'-Y'面に投影しており,最 小二乗法を用いて測定値と推定値を重ねると両者はほぼ一致している.また, 両者の回転方向の誤差 *δ*.の標準偏差は 3.3°以内と小さく,作成した工具モデル が妥当なものであったといえる.

図 2.4 は工具および工作物モデルを組み合わせた切削モデルであり,座標軸お よび使用した記号も併記している.図において,*abcd*は一回の切削で除去され る部分であり,未切削切りくず立体と定義する.また,破線は切れ刃, λは送り 方向の主軸傾斜角(前傾姿勢: 正(+),後傾姿勢:負(-))を示している.なお, 本報は等高線方式のピックフィード加工を対象としており,ピックフィードを



Fig.2.4 Cutting model of ball end milling for inclined workpiece Fig.2.5 Calculation method of cross-sectional cutting area

傾斜面の下方向に与える図 2.4 の場合をステップダウン,上方向に与える場合を ステップアップと定義する.また,上向きおよび下向き切削を考慮すると切削 方式は計4通りの組み合わせが存在し,図 2.4 はステップダウン,下向き切削に よる後傾姿勢の場合である.

2.2.2 切削断面積の計算方法

図 2.5 は図 2.4 に示した点線枠内の拡大図であり,一回の切削で除去される部 分である未切削切りくず立体 *abcd* と立体 *abcd* を通過する切れ刃(破線)との関 係および切削断面積の計算方法を示している.切削断面積Aは切りくず立体 *abcd* と切れ刃のすくい面(工具軸直角断面におけるすくい角を 0°とする面)が干渉 する部分(斜線部 *klmn*)と定義している.また,工具回転角 θの基準は,工作 物座標系のY軸と工具座標系のY'軸の方向が一致する位置を θ=0°とする.なお, 計算および後述する切削実験には表 2.1 に示す条件を用いた.

2.2.3 **評価値の計算方法**

切削性能を検討する指標として評価値 E_d を式(1)で定義する⁽²⁾. 図 5 において 切削力が切削断面積 A の重心点 G に集中荷重として作用し、切削力が A に比例 すると仮定するとき、A に工具中心軸から点 G までの距離 L_G を乗じた E_d の値は 切削トルクに相当する値と考えることができる.

 $E_d = A \times L_G$

(2.1)

2.2.4 計算結果と考察

図 2.6 は横軸を工具回転角 θ とした切れ刃の回転に伴って変化する切削断面積 Aの計算結果の一例である.ステップダウン,工作物傾斜角 $a=0^{\circ}$ の条件では, $\lambda=0^{\circ}$ であるときにAの値が上向き切削で 0.0840 mm²,下向き切削で 0.0795 mm² とい ずれも最大値を示し、主軸の傾斜に伴って最大値 A_{max} はそれぞれの 62~74 %に 減少している.一方、横軸より切削に関与する工具回転角を θ_{cut} とすると、 $\lambda=0^{\circ}$ では上向き切削、下向き切削ともに $\theta_{cut}=360^{\circ}$ であり、常に切削を行う連続切削 となることを意味している.これは、工具回転軸が図 2.5 に示した未切削切りく ず立体 *abcd* を通過するために生じる現象である.なお、主軸を傾斜させた他の 条件では、工具先端部の切れ刃が未切削切りくず立体に関与しなくなるため、 λ の絶対値が増加するにつれて θ_{cut} の値は 20~37°と大幅に減少している.

図 2.7 は図 2.6 と同様の座標軸および条件における評価値 E_d の計算結果である. $\alpha=0^\circ$, $\lambda=0^\circ$ の条件で E_d の値は上向き切削で 0.191 mm³,下向き切削で 0.183 mm³ といずれも最小値を示し,主軸の傾斜に伴ってその最大値 E_{dmax} は 105~243 %に 増加している.これは、 λ の絶対値の増加によって未切削切りくず立体が工具中 心軸から遠ざかり、 L_G の値が増加するためである.

図 2.8 は上向き切削の条件における工作物傾斜角 α および主軸傾斜角 λ に対す る最大切削断面積 A_{max} の変化である.図 2.8(a)のステップアップでは λ が正とな る条件で A_{max} が大きな値を示し、ピーク値は λ 軸に対し反時計回りに約 45°の方 向に分布している.また、 λ が負となる条件では α が小さな条件を除き A_{max} は小 さな値を示している.

一方,図 2.8(b)のステップダウンでは λ =-15~-5°の条件で A_{max} はピーク値を示 す傾向にあり,主軸の傾斜が大きくなるにつれて A_{max} の値が減少している.な お, α =15°の条件で λ が負の小さな条件では,他の α の条件に比べて A_{max} が小さ な値を示しているが,未切削切りくず立体 *abcd*の Y 方向の長さに対してそのほ ぼ中間を工具中心軸が通過することで,1回の切削において A_{max} の増減が平均化



Fig.2.6 Cutting cross-sectional area (Stepped down, $\alpha=0^{\circ}$)

 $\begin{array}{c} -\mathbf{D} \cdot \mathbf{U}, \lambda = -60^{\circ} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{D}, \lambda = -60^{\circ} \cdot \mathbf{\nabla} \cdot \mathbf{U}, \lambda = -30^{\circ} \cdot \mathbf{\nabla} \cdot \mathbf{D}, \lambda = -30^{\circ} \\ \hline \bullet \bullet \mathbf{U}, \lambda = 0^{\circ} \quad \bullet \bullet \mathbf{D}, \lambda = 0^{\circ} \quad \bullet \bullet \mathbf{U}, \lambda = 30^{\circ} \cdot \bullet \mathbf{D}, \lambda = 30^{\circ} \\ \hline \bullet \bullet \mathbf{U}, \lambda = 60^{\circ} \quad \bullet \bullet \mathbf{D}, \lambda = 60^{\circ} \end{array}$



Fig.2.7 Evaluation value (Stepped down, $\alpha = 0^{\circ}$)



Fig.2.8 Maximum cutting cross-sectional area A_{max} (Up milling)



Fig.2.9 Maximum evaluation value *E*_{dmax} (Up milling)

されたためと考えられる.

図 2.9 は図 2.8 と同様の座標軸に対する評価値 E_{dmax} である.図 2.9(a)のステッ プアップでは、 α および λ が大きくなると E_{dmax} の値が増加する.これは、両傾 斜角が増加するとともに L_G の値も大きくなるためである.一方、 α を増加させ た場合の各 λ の条件および λ の絶対値を増加させた場合のそれぞれの α における 条件では、 E_{dmax} の変化の傾向が図 2.8 に示した A_{max} の変化の傾向と類似してい る.これは、前述の条件で L_G の値の変動幅が小さく、 A_{max} の変化が E_{dmax} の変化 に強く影響しているためと考えられる.一方、図 2.9(b)のステップダウンでも同 様の傾向を示しているが、 A_{max} が小さな値を示した α =15°の条件を含む図中の点 線の領域内では E_{dmax} の値が 0.1 mm³以下を示しており、この近傍の α および λ の条件の組み合わせにより良好な切削特性が期待できる.

2.3 高能率で高精度な加工法の提案と検証実験

2.3.1 切削機構および切削特性に基づく加工法の提案

ボールエンドミルにより表 2.1 に示した条件で傾斜面加工を行うと,図 2.10 に示す実線および破線で囲んだ領域内の切削条件で工具先端部が未切削切りく ず立体内部存在し,切削に関与する.このうち,ステップダウンの条件では評 価値 Edmax が小さな値を示す条件とほぼ一致している.そこで,高能率で高精度 な加工を実現させるため,図 2.11 に示すようなボールエンドミルの先端部を切 削に関与させた加工法を提案する.一般に,ボールエンドミル加工において周 速がゼロとなる先端部の切れ刃を用いると,構成刃先の発生により加工面にむ しれが生じ,仕上げ面粗さは悪化する.そのため,高精度加工の実現には加工 面を傾斜させたり、5 軸制御加工機を用いることで先端部を切削に関与させない 方法が選択されている.しかし,先端部を用いることで以下の3 つの特徴を活 用することが可能となる.

- a) 小径工具を用いた場合には先端部の切れ刃が切りくずの切削点に拘束さ れるのでびびり振動の発生を抑制できる⁽³⁾.
- b) 図 11 において工具剛性は X'および Y'方向に比べて Z'方向で高いだけで なく、工具中心軸方向に加わる分力 F_z'が大きく、かつ、分力 F_x'および F_y'が相対的に小さくなり X'-Y'面における工具変形の抑制を期待できる.
- c) 工具中心軸が未切削切りくず立体の内部を通過するものの, α と λ の組み 合わせによって工具先端部を仕上げ面の創成に関与させないことができ る.

そこで,以上のことから提案した加工法の有用性を明らかにするため,図 2.10 の黒丸を付した条件で検証実験を行い,切削力,切削トルクおよび仕上げ面粗 さについて比較検討を行った.



2.3.2 実験条件および方法

実験条件は、先に述べた表 2.1 の計算条件と同様であり、主な使用機器は表 2.2 に示すとおりである. 切削実験は図 2.12 に示すようにベッド型 NC 万能フラ イス盤のテーブル上に据え付けた圧電式工具動力計(KISTLER 9257B)に、傾 斜面をもつ治具(図 2.12 に示す $a=45^{\circ}$ の場合: $85\times100\times64.5$ mm)を介して板状 の工作物を固定し、X 軸方向に送りを与える等高線加工方式で行った. なお、工具は突出し長さが 75 mm、偏心量が 2 μ m 以下となるように主軸に取り付けて いる. 切削は工作物外周側から開始するように工具に送りを与えており、後に 仕上げ面粗さを測定するために 1 条件につき溝加工 1 回、ピックフィード加工 を 6 回行っている. 切削三分力(F_x, F_y, F_z)はピックフィード加工中のものを工 作物に作用する力として測定しており、工具動力計、アンプ(KISTLER 5015A) およびオシロスコープ(GRAPHTEC WR300)を経由させてパソコンに記録した. 仕上げ面粗さは触針式粗さ測定機を用いてピックフィード方向に測定した.

Table 2.2 In	struments for	experiment
--------------	---------------	------------

Machine tool	NC universal milling machine NIIGATA MACHINE TECHNO 2UMD-SN
Tool	Carbide solid ball end mill (TiAl)N coating, 2 teeth
Workpiece	0.45% carbon steel (S45C) (70×50×10 mm)
Roughness tester	TOKYO SEIMITSU SURFCOM 130A



Fig.2.12 Set up of experiment

2.3.3 実験結果および考察

2.3.3.1 切削力

実験で得た切削三分力は,工具に作用する力を検討するために式(2.2)を用いて 主軸座標系(X'-Y'-Z')に変換した.

((F_x')	ſ	$\cos \lambda$	0	$\sin \lambda$	(F_x)
	F_{y} '	=	0	1	0	F_{y}
	F_z'		$-\sin\lambda$	0	$\cos \lambda$	$\left(F_{z}\right)$

図 2.13 は工具先端切れ刃が未切削切りくず立体内部に存在するステップダウンの条件について、主軸座標系における切削三分力および切削合力の最大値 $F_{x'\max}, F_{y'\max}, F_{z'\max}$ および F_{\max} を示している. F_{\max} はそれぞれの α に対して上



Fig.2.13 Maximum component forces and maximum resultant force (Stepped down)

向き切削および下向き切削による差は少なく、同様の値を示している.しか しながら、 $\alpha=0\sim15^{\circ}$ では上向き切削、 $\alpha=15\sim25^{\circ}$ では下向き切削の条件で、図中 に星印を付けたように $|F_{z}'_{\max}|$ が $|F_{x}'_{\max}|$ および $|F_{y}'_{\max}|$ よりも大きくなっている.こ れらの条件は、図 2.10 に示した破線の領域内の条件にほぼ一致していることか ら、提案した加工法の効果 b)を発揮できるものと考えられる.

2.3.3.2 切削トルク

切削トルク*T*は,主軸座標系(X'-Y'-Z')における切削三分力から工具の接線 分力 F_t を計算し,式(2.3)により求めた.

 $T = F_t \times L_G$

(2.3)



図 2.14 は工作物傾斜角 α および主軸傾斜角 λ に対する最大切削トルク T_{max} を示した図であるが、図 2.10 に示した工具先端部が切削に関与する条件に限定している. T_{max} の値は $\alpha=0\sim15^{\circ}$ にかけて一度減少し、 $\alpha\geq15^{\circ}$ の条件で増加する傾向にある.一方、上向き切削、下向き切削ともに λ を負方向に傾斜させることにより T_{max} の値は減少しているが、これは前述のように工具先端部の切れ刃が未切削切りくず立体内部に存在することで連続切削となり、工具一回転における切削時間が増加し、最大切削断面積が抑制されるためと考えられる.

2.3.3.3 仕上げ面粗さ

ボールエンドミルの先端部切れ刃による加工面生成の幾何学的な解析は是田 ら⁽⁴⁾や吉川ら⁽⁵⁾によって解明が試みられているが、本報ではピックフィード方向 の理論粗さ R_{th} を、円筒部ならびに先端部の切れ刃が仕上げ面の創成に関与しな い条件において式(4)により定義している.なお、式(2.4)に表 2.1 に示した条件 (P_f = 0.8 mm, R_c = 8.0 mm)を代入すると R_{th} =10 μ m となる.

$$R_{th} = \frac{P_f^2}{8R_o}$$

(2.4)

図 2.15 はステップダウンの条件における粗さ曲線の一例であり、図 2.15(a)に 両者とも傾斜の無い $\alpha=0^{\circ}$ 、 $\lambda=0^{\circ}$ の条件、図 2.15(b)に両者に傾斜を与えて工具先 端部を用いる $\alpha=15^{\circ}$ 、 $\lambda=-10^{\circ}$ の条件、および図 2.15(c)に両者に傾斜を与えながら 工具先端部を用いない $\alpha=60^{\circ}$ 、 $\lambda=60^{\circ}$ の条件による結果を示している.図 2.15(a)





では、むしれの発生によりツールマークの山部と谷部が崩れた形状を示しており、最大高さも *Rz*=11.7 µm と理論粗さに比べて少し大きい. 図 2.15(b)および(c) では、むしれの発生が少なく明瞭なピックフィードによるツールマークが確認でき、*Rz*=8.3 および 7.3 µm と *R*thより小さな値を示している. この理由は、図 2.15(b)では最終の仕上げ面となる位置に周速ゼロの切れ刃が存在していないため、および図 2.15(c)ではさらに周速ゼロの切れ刃位置も切削に関与していないためと考えられる.

図 2.16 は a および λ に対する最大高さ Rz を示しており,工具先端部が切削に 関与する条件についてまとめたものである. Rz は上向き切削,下向き切削のい ずれの条件でも a の増加とともに増加し, λ の負方向への傾斜に伴って減少する 傾向を示している.また, $a=15\sim20^{\circ}$ および $\lambda=-15\sim-10^{\circ}$ の条件では Rz が破線で 示した理論粗さ R_{th} (=10 μ m)に比べて小さく,むしれの発生がほとんど無い良好 な仕上げ面が得られていた.これより,提案した加工法によって良好な仕上げ 面が得られると期待できる.なお,切削方式で比較すると,下向き切削に比べ 上向き切削で Rz が R_{th} よりも小さな値を示す条件が多く,逃げ面のバニシング 効果によるものと考えられる.

2.4 高能率・高精度加工を実現する切削条件

2.4.1 レーダチャートを用いた切削性能の総合評価

提案した加工法を実現するための切削条件の総合評価には文献(1)で用いているレーダチャート方式の適用を試みる.評価対象は切削実験の結果より得た主軸方向分力 $F_{z'max}$,最大切削トルク T_{max} および仕上げ面の最大高さ Rz とし,各パラメータは式(2.5)から(2.7)に示すようにそれぞれの最大値により正規化することで各比率を評価指数 r_F , r_T および r_R と定義する.なお, T_{max} および Rz は小さな値が望ましく,指数 r_T および r_R はしにかさい値で良好な効果が期待でき

る. 一方, $F_{z'max}$ は工具剛性の最も大きい主軸方向に作用する分力であり,この 分力が増加することによって工具の曲げ変形に影響を与える分力 F_x および F_y が 相対的に減少する傾向にある.そのため, $F_{z'max}/(F_{z'max})_{max}$ の値は1に近づくこ とが望ましく,指数 r_F に関しても r_T および r_R と同様な変化を示すような式(2.5) を用いている.これにより,独立した複数項目による切削性能の評価が可能と なり,高能率・高精度を両立する切削条件を導き出すことできる.

$$r_F = 1 - \frac{F_z'_{\text{max}}}{(F_z'_{\text{max}})_{\text{max}}}$$

$$(2.5)$$

$$r_T = \frac{T_{\text{max}}}{(T_{\text{max}})_{\text{max}}}$$
(2.6)

$$r_R = \frac{Rz_{\max}}{(Rz_{\max})_{\max}}$$
(2.7)

また,図 2.17 は各評価指数を結んで描いたレーダチャートであり,内部の三角形の面積(網かけ部)は総合指数 *S* として,式(2.8)により定義する.

$$S = \frac{\sqrt{3}}{4} (r_F \times r_T + r_T \times r_R + r_R \times r_F)$$
(2.8)

図 2.17 はステップダウン,上向き切削, α =15°におけるレーダチャートおよび 総合指数 S の変化であり,主軸傾斜角 λ による影響を比較している.図より, λ の負方向への傾斜が増加するにつれて r_F および r_T が大きく減少し, r_R も λ =-10° の条件で減少している.その結果,総合指数 S も減少し, λ =-10°の条件では S=0.0303 と最も小さな値を示している.



Fig.2.17 Cobweb chart for overall evaluation (Stepped down, Up milling, α =15°)

2.4.2 総合指数による切削条件の検証

図 18 は工具先端部を用いて切削するステップダウンの条件における総合指数 S である.評価指数 r_F , r_T および r_R がそれぞれ 0.3 の場合,式(2.8)により S=0.117 となる.この値を閾値とすると、図より上向き切削,工作物傾斜角 α =10°,主軸



傾斜角 λ =-5°および α =15°, λ =-10°の条件において *S* は閾値を下回る. なお, 仮 定した値 0.3 および式(5)~(7)の妥当性については, さらに実験データの蓄積に よって検討しなければならないと考えているが, これらの仮定によれば前述の 条件で高能率・高精度加工を実現し,良好な切削性能が期待できると考える.

2.5 結 論

- (1) 三次元 CAD を用いて作成した切削モデルにより,主軸を送り方向に傾斜 させた条件での傾斜面の等高線加工における切削断面積および切削トル クに相当する評価値 Ed を精度よく計算した.
- (2) 最大切削断面積 Amax は、ステップダウン、上向き切削、工作物傾斜角 α=15°の条件で主軸傾斜角 λ によらず小さな値を示し、評価値の最大値 Edmax は前述の条件のうちおよそ λ=-20~5°の範囲で小さな値を示した.
- (3) 切削機構および切削特性の解析結果に基づいて工具先端切れ刃を未切削 切りくず立体の内部に存在させつつ,最終的な仕上げ面として創成される 領域では切削速度がゼロとならないような加工法を提案し,高能率・高精 度な加工が実現できることを示した.
- (4) 提案した加工法の有用性を明らかにする検証実験を行い,以下に示す結果 を得た.
 - a) 工具先端部を切削に関与させることで、 $|F_{z'max}|$ が $|F_{x'max}|$ および $|F_{y'max}|$ よりも大きな値を示す切削が実現された.
 - b) 最大切削トルク T_{max} は、 $\alpha=0\sim15^{\circ}$ 、 $\lambda=0^{\circ}$ の条件で小さな値を示すが、 その他の条件でもさらに λ を負方向に傾斜させることでそれぞれ大き く減少する.
 - c) 最大高さ Rz は, λ を負方向に傾斜させることにより減少し, α=15~20° および λ=-15~-10°の条件で理論粗さ R_{th}(=10 µm)以下の良好な仕上げ 面が得られた.
- (5) レーダチャート方式による切削性能の総合評価を試み,提案した加工法を

利用したステップダウン,上向き切削, $\alpha=10^{\circ}$, $\lambda=-5^{\circ}$ および,ステップダ ウン, $\alpha=15^{\circ}$, $\lambda=-10^{\circ}$ の条件で良好な切削特性が期待されることを示した.

参考文献

- (1) 山根八洲男, 関谷克彦, "難削指数による難削性の評価", 精密工学会誌, Vol. 70, No. 3 (2004), pp. 407-411.
- (2) 岩部洋育,清水啓輔,佐々木三宣,"三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる切削機構の解析(傾斜面加工における切削面積と評価値による切削特性)",日本機械学会論文集(C編), Vol. 72, No. 713 (2006), pp. 247-254.
- (3) 嶽岡悦雄,宮口孝司,岩部洋育,"高硬度材のボールエンドミル加工に関する研究(第3報)一切削の安定性に及ぼす工具突出し長さの影響と簡易安定判別試験法の提案―",精密工学会誌,Vol. 65, No. 8 (1999), pp. 1131-1135.
- (4) 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, Vol. 59, No. 9 (1993), pp. 1537-1542.
- (5) 吉川浩一,水垣善夫,郝 明暉,寺井久宣,"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3報)一加工面形状の工具姿勢角依 存性一",精密工学会誌, Vol. 69, No. 3 (2003), pp. 407-411.

3. 傾斜面の直線加工における工具送り方向による影響

3.1 緒 言

第3章では傾斜面の直線加工における工具の送り方向を変化させることにより、5軸制御加工を想定した高能率で高精度な切削条件について検討した.具体的には後述する工具の送り方向角 $\beta \approx 0 \sim 180^\circ$ まで変化させており、等高線加工 (β =0°、180°)および走査線加工(β =90°)を含む切削条件で検討を行っている ⁽¹⁾.第2章と同様に、三次元 CADを活用した解析方法により、工具および工作物をモデリングし、両者を切削が実現するように組み合わせるとともに1回の 切削で除去されることになる未切削切りくず立体と回転する切れ刃を干渉させ ながら、切削の進行に伴って変化する切削断面積および切削トルクに相当する 評価値を計算した.次に、切削実験を行い切削力および仕上げ面粗さを測定し、 得られた切削力を用いて切削トルクを計算した.最後に、工具先端切れ刃を未 切削切りくず立体内部に存在させる加工法が成立する切削条件でレーダチャー ト方式による切削性能の総合評価を行い、通常はトレードオフの関係にある高 能率・高精度加工を両立する切削条件について検討した.

3.2 三次元 CAD を活用した切削モデルの作成

図 3.1 は 2.2.1 項と同様にして作成した工具および工作物モデルを組み合わせ た切削モデルであり、座標軸および使用した記号も併記している.図において、 破線は切れ刃,角度 α は工作物傾斜角を示しており,角度 β は工具の送り方向 角として図に示すように X 軸に平行な位置を基準とし傾斜面に対して右回りを 正とする. そのため、 $\beta=0^{\circ}$ または $\beta=180^{\circ}$ の条件が等高線加工であり、 $\beta=90^{\circ}$ の条 件が走査線加工となる.また、切削方式として工具の送り方向を斜面上方に与 える図 3.1 の場合をゴーアップ, 斜面下方に与える場合をゴーダウンと定義して おり、上向きおよび下向き切削を考慮すると切削方式は計4通りの組み合わせ が存在する.なお、等高線加工ではゴーアップ、ゴーダウンの定義はできない が、B=0°はB<90°の定義、B=180°はB>90°の定義に属するものとし、両条件では 工具の送り方向が逆となる.また,各切削方式において α および β を増加させ ると上向きおよび下向き切削のいずれにも分類できない工具先端部が立体 abcd 内に存在する状態や上向きおよび下向き切削の関係が逆転する条件も発生する. 本章では簡易的に α=0°および β=0°の条件における定義を基準として上記の分類 を行っているが、切削条件と切削方式の詳細な分類に関しては今後の検討課題 である. 切削断面積および評価値の計算方法は第2章と同様であり、計算およ び後述する切削実験には表 3.1 に示す条件を用いた.



Fig.3.1 Cutting model of ball end milling for inclined workpiece

Table 3.1 Calculation and cutting conditions

Cutter radius	· R.	8 () mm
	. <i>R</i> c	0.0 mm
Helix angle	:η	30°
Radial depth	$: R_d$	0.8 mm
Feed rate	$: S_z$	0.16 mm / tooth
Pick feed	$: P_f$	0.8 mm
Workpiece inclination angle	:α	0 - 75°
Feed direction angle	:β	0 - 180°
Spindle revolution	: N	1363 min ⁻¹
Coolant		Machine oil (1.5 l/min)

3.3 実験条件および方法

実験条件は先に述べた表 3.1 の計算条件と同様である.また,実験方法は第2章と同様であり,表 3.2 は主な使用機器,工具および工作物を,図 3.2 は切削実験の様子を示している.

Table 3.2	Instruments	for ex	periment
-----------	-------------	--------	----------

Machine	NC universal milling machine 2UMD-SN		
tool	NIIGATA MACHINE TECHNO		
Tool	Carbide solid ball end mill (TiAl)N coating, 2 teeth		
Workpiece	0.45% carbon steel (S45C) (70×50×10 mm)		
Roughness tester	SURFCOM 130A Tokyo SEIMITSU		



Fig.3.2 Experimental setup

3.4 計算および実験結果と考察

3.4.1 切削断面積

図3.3 は横軸を工具回転角 θとした切れ刃の回転に伴って変化する切削断面積 Aの計算結果であり、ゴーダウン、下向き切削の条件における一例を示している. また、図3.4 および3.5 はそれぞれ図3.3(a)および(b)と同条件における未切削切 りくず立体と切れ刃位置関係を示しており、破線はそれぞれ斜線部で示した最 大切削面積 Amax を得る位置での切れ刃を示す.



図 3.3(a)に示す工作物傾斜角 $a=15^{\circ}$ の条件では、工具の送り方向角 β の増加に伴って切削に関与する工具回転角(以下, θ_{cut} とする)が減少し、 A_{max} が増加している.これは、 β が大きくなり送り方向が変化すると図 3.4 に示すように未切削切りくず立体 *abcd* が右回りに回転し、切れ刃の通過位置も変化することで切削に関与する切れ刃長さが増加するためと考えられる.aが小さな条件では、工具先端近傍の切れ刃を用いるためにこの傾向がみられる.一方、図 3.3(b)に示す $a=60^{\circ}$ の条件では、 $\beta=60^{\circ}$,120°で $\beta=0^{\circ}$,180°の条件に比べて θ_{cut} が大きく、Aが小さな値を示している.これは前述と同様に、 β の増加により図 3.5 に示すように立体 *abcd* が右回りに回転し、図には示していないが $\beta=90^{\circ}$ 前後では未切削切りくず立体が工具回転方向に横長となることで、切削に関与する切れ刃長さが減少するためと考えられる.aが大きな条件では工具側面近傍の切れ刃を用いるためにこの傾向が顕著となる.

図 3.6 は α および β に対する最大切削面積 A_{max} の変化を示す.図(a)の上向き 切削では、 $\alpha=0^\circ$ かつ $\beta=0\sim180^\circ$ 、 $\alpha=0\sim75^\circ$ かつ $\beta=90\sim180^\circ$ の条件において A_{max}





が大きな値を示しており,最大値はゴーアップ, $\alpha=30^{\circ}$, $\beta=135^{\circ}$ の条件で 0.103 mm²を示している.また,図(b)の下向き切削では, $\alpha=0^{\circ}$ かつ $\beta=0\sim180^{\circ}$, $\alpha=0\sim75^{\circ}$ かつ $\beta=0\sim45^{\circ}$,135~180°の条件において A_{\max} が大きな値を示しており,最大値はゴーダウン, $\alpha=60^{\circ}$, $\beta=15^{\circ}$ の条件で 0.098 mm²を示している.一方,4 つの切削方式に共通して A_{\max} が小さな値を示す条件は $\alpha=30\sim75^{\circ}$ かつ $\beta=60\sim75^{\circ}$ であり,その値は $A_{\max}=0.048\sim0.055$ mm²となる.このうち A_{\max} の最小値は,ゴーアップ,下向き切削, $\alpha=75^{\circ}$, $\beta=75^{\circ}$ の条件で 0.048 mm²を示しており,角度を与えない $\alpha=0^{\circ}$, $\beta=0^{\circ}$ の条件における A_{\max} の値(上向き切削: $A_{\max}=0.084$ mm²)と比較するとその減少率は約40%となる.図に示すように A_{\max} が大きく変化する理由は,先に述べたように α および β の両角度により未切削切りくず立体 *abcd*と切れ刃の位置関係が変化するためと考えられる.

3.4.2 切削力

図 3.7 は実験で得られた切削三分力の変化を示しており、ゴーダウン、下向き 切削の場合である. 横軸の切削時間は工具が半回転する時間 (0.022 s) にほぼー 致している. 図(a-1), (b-1), (c-1)に示した a が小さな 15°の条件では、 β の増加 に伴って各分力および切削合力 $F (=\sqrt{F_x^2+F_y^2+F_z^2})$ の絶対値の最大値が増加し、 切削が行われている正味切削時間が減少する傾向を示している. これは 3.4.1 項 で述べた切削断面積の変化と同様の傾向を示しており、その理由も同様に未切 削切りくず立体 abcd と切れ刃の位置関係の変化によるものと考えられる. 図 (a-1)における α =15°, β =15°の条件では切削力が常に作用しており連続切削を示 しているが、この理由は工具中心軸が立体 abcd を通過しているためである.

一方,図(a-2),(b-2),(c-2)に示した α が大きな 75°の条件では,βの増加に伴って各分力および切削合力 Fの絶対値の最大値が減少しているが,正味切削時



Fig.3.7 Three component cutting forces and resultant force (Go down, Down milling)

間にはあまり変化がみられない. なお、 α =75°、 β =15°の条件では切削が終了す る直前に切削力曲線が乱れており、この他の α =60°、75°におけるいくつかの条 件でも同様の現象がみられたが、これはびびりの発生によるものと考えられ、 工作物の加工面に縞状のびびりの発生痕が確認された.

3.4.3 評価値と切削トルク

図 3.8 および 3.9 はそれぞれ、上向き切削の条件における工作物傾斜角 a および工具の送り方向角 β に対する評価値の最大値 E_{dmax} とその値を伴う L_G (以下、 $L_G(E_{dmax})$ とする)の変化を示す。図 3.8 より E_{dmax} は a が大きくなると増加する 傾向を示しており、この理由は、図 3.9 に示すように L_G の値が a とともに増加 するためである。また、 E_{dmax} は a が大きな条件で大きな値を示す領域が存在す るが、これは図 3.6(a)に示した A_{max} の傾向と類似している。この理由は、図 2.13 に示すように aの増加に伴って $L_G(E_{dmax})$ の変化が緩やかになり、その変動幅が



Fig.3.9 Distance from tool center axis to the point G with E_{dmax} $L_G(E_{dmax})$ (Up milling)



Fig.3.10 Maximum cutting torque T_{max} (Up milling)

減少するためと考えられる.なお、 E_{dmax} はゴーダウン、上向き切削、 $\alpha=15^\circ$ 、 $\beta=150^\circ$ の条件で最小値 0.042 mm³を示している.

図 3.10 は図 3.9 と同様の座標軸における最大切削トルク Tmaxの変化を示す. *T*_{max}はゴーダウン,上向き切削, *α*=15°, *β*=150°の条件で最小値 76.8 N·mm を示 しており,図 3.9 に示した Edmax の変化と比較すると、その傾向はほぼ一致して いる. そのため, 定義した評価値 Ed の最大値により簡易的な切削性能を検討す ることの妥当性が示された.

3.4.4 仕上げ面粗さ

ボールエンドミル加工におけるピックフィード方向の仕上げ面の理論粗さは 第2章の場合と同様に計算でき, R_{th}=10 μm となる.

図 3.11 はゴーアップ,下向き切削における仕上げ面の粗さ曲線の一例を示す. 図(a-1)に示した α=30°, β=0°の条件では、むしれの発生によりピックフィードに よるツールマークが不明瞭であるが,図(c-2)の α=60°, β=120°の条件ではむしれ が少なくツールマークが確認できる. 図の6条件を比較すると, α および β の増







加により仕上げ面のむしれが減少し、その結果、最大高さ Rz は減少する傾向を示している.この理由の一つには、両角度の増加に伴って切削速度の大きい工具外周側の切れ刃により切削が行われることが考えられる.同様の傾向は図に示されていない他の3 つの切削方式においてもみられるが、むしれの発生および Rz の値が減少する切削条件はそれぞれ異なっている.なお、Rz の値は図(a-1)の $a=30^\circ$, $\beta=0^\circ$ の条件を除き、ほぼ R_t と同等の値を示している.

図 3.12 は上向き切削の条件における a および β に対する Rz の変化を示す. 図 中に示す点線は $R_{th}=10 \mu m$ を示しているが, ゴーアップに比べてゴーダウンの条 件で点線により囲まれる領域が約 4.5 倍大きい. 特に, ゴーダウンの条件では $a=45\sim75^\circ$, $\beta=90^\circ$ 近傍の条件で $Rz=6.0 \mu m$ 程度と非常に小さな値を示しており, 工具逃げ面によるバニシングによる効果は確認されているが, 両者の因果関係 ならびにそのメカニズムは明らかでなく今後の検討課題である.

3.5 高能率・高精度を両立する切削条件および加工法の検討

第2章においては、主軸を送り方向に傾斜させた条件での傾斜面の等高線加 工において工具先端切れ刃を未切削切りくず立体内部に存在させる加工法を提 案し、高能率・高精度を両立する加工が実現できることを示した.この加工法 は、本章で検討している傾斜面の工具送り方向を変化させた加工においても適 用可能である.そこで、工具先端切れ刃を用いる加工法が成立する切削条件を 明らかするとともに切削性能の総合評価を行い、その有用性について以下に検 討する.

3.5.1 加工法が成立する切削条件

提案している加工法を成立させるためには、工具中心軸が未切削切りくず立





Fig.3.14 Cobweb chart for overall evaluation (Go down, Up millng, α =15°, β =150°)

体を通過することが条件となる. 図 3.13 は 4 つの切削方式において工具中心軸 が未切削切りくず立体を通過する α および β に関する切削条件を領域で示して いる. 図より, 4 つの領域は上向きおよび下向き切削に関して β=90°を基準とし てほぼ左右対称の形を示すが,ゴーアップに比べてゴーダウンの条件で大きな 領域となる. 図中には実験を行った領域内の条件についてそれぞれ記号で示し ており,次にこれらの条件についての切削性能の総合評価ならびに工具先端切 れ刃の使用に関する有用性を検討する.

3.5.2 レーダチャートを用いた切削性能の総合評価による検討

切削性能の総合評価には,第2章と同様にレーダチャート方式を用いた.評価対象は切削実験の結果より得られた主軸方向分力 *F*_{zmax},最大切削トルク *T*_{max} および仕上げ面の最大高さ *Rz* とし,各パラメータは式(3.1)から(3.3)に示すよう にそれぞれの最大値により正規化することで各比率を評価指数 *r*_F, *r*_T および *r*_R と定義する.

$$r_F = 1 - \frac{F_{z_{\text{max}}}}{(F_{z_{\text{max}}})_{\text{max}}}$$
(3.1)

$$r_T = \frac{T_{\text{max}}}{(T_{\text{max}})}$$
(3.2)

$$(T_{\max})_{\max}$$

$$r_{\infty} = \frac{Rz_{\max}}{R_{\max}}$$
(3.3)

$$(3.3)$$

また,図18は各評価指数を結んで描いたレーダチャートの一例であり,内部の三角形の面積(網かけ部)は総合指数Sとして,式(3.4)により定義する.

$$S = \frac{\sqrt{3}}{4} (r_F \times r_T + r_T \times r_R + r_R \times r_F)$$
(3.4)



図 3.15 は工具先端切れ刃を用いる切削条件における *S* の変化を示す. 既報⁽¹⁰⁾ と同様に r_F , r_T および r_R がそれぞれ 0.3 の場合の *S*=0.117 を条件選定の閾値とし て用いると,図中に星印を付けたゴーダウン,上向き切削, α =15°, β =135~165° の条件およびゴーダウン,下向き切削, α =15°, β =15~45°の条件で *S* の値が閾 値(図中の破線)を下回る.

すなわち,これらの切削条件を選択することで高能率・高精度を両立する加 工を実現でき,良好な切削性能が期待できると考えられる.

- 3.6 結論
 - (1) 三次元 CAD により切削モデルを作成し、ボールエンドミルによる傾斜面 の直線加工において工具の送り方向を変化させた場合の切削断面積 *A* お よび評価値 *E*_dを求めた.
 - (2) 工作物傾斜角 α または工具の送り方向角 β の増加により,最大切削断面積 Amax を減少させることが可能であり,α=30~75°かつ β=60°~75°の条件で は4 つの切削方式のいずれでも Amax が小さな値を示した.
 - (3) 実験で得られた切削力の変化は、ゴーダウン、下向き切削、a=15°の条件 で切削断面積の変化と同様の傾向を示したが、その理由は未切削切りくず 立体 abcd と切れ刃の位置関係の変化によるものと考えられる.
 - (4) 切削トルクの最大値 T_{max} と評価値の最大値 E_{dmax}の傾向はほぼ一致しており,評価値 E_dによる簡易的な切削特性の評価について妥当性が示された.
 - (5) 仕上げ面粗さは α および β の増加によりむしれが減少するため最大高さ Rz が減少する傾向を示した.また、上向き切削の条件ではゴーアップに 比べてゴーダウンの条件で理論粗さ R_{th}=10 μm を満たす切削条件が多く得られた.
 - (6) 工具先端切れ刃を未切削切りくず立体内部に存在させる加工法が成立する切削条件でレーダチャート方式による切削性能の総合評価を行い,ゴーダウンにおける上向き切削,α=15°,β=135~165°および下向き切削,α=15°,

β=15~45°の条件で高能率・高精度を両立する加工を実現でき、良好な切 削性能が期待されることを示した.

参考文献

(1) 藤田剛, 岩部洋育, "三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる傾斜面 の直線加工における切削性能評価に関する研究(送り方向が切削機構に及ぼ す影響)", 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 810, p. DSM0034

4. 凸曲面の等高線加工における工具経路の曲率半径による影響

4.1 緒論

三次元輪郭形状の加工に不可欠なボールエンドミルはその特性を活かすため に球面や円筒面での研究結果も報告されている⁽¹⁻⁷⁾.第4章では、凸曲面、特に 凸テーパ面および凸半球面において等高線加工を行う場合に工具経路の曲率半 径の影響について検討した.第2章および第3章と同様に、三次元 CAD を活用 した解析方法により工具および工作物をモデリングし、両者を切削が実現する ように組み合わせるとともに1回の切削で除去されることになる未切削切りく ず立体と回転する切れ刃を干渉させながら、切削の進行に伴って変化する切削 断面積および切削トルクに相当する評価値を計算した.次に、切削実験を行っ て切削力を測定し、得られた切削力を用いて切削トルクを計算した.さらに、 両結果を比較することにより良好な切削性能が期待できる切削条件の検討を行った.

4.2 三次元 CAD を活用した切削モデルの作成

図 4.1 は 2.2.1 項と同様にして作成した工具および工作物モデルを組み合わせ た切削モデルであり,図(a)が凸テーパ面,図(b)が凸半球面の場合である.図の 破線は切れ刃,角度 a は工作物傾斜角を示しており,座標軸および使用した記 号も併記している.切削断面積および評価値の計算方法は第2章と同様であり, 計算および後述する切削実験には,凸テーパ面は表 4.1,凸半球面は表 4.2 に示 す条件を用いた.



for tapered surface

Fig.4.2 Cutting model of ball end milling for spherical surface

Cutter radius	$: R_c$	8.0 mm
Helix angle	:η	30°
Radial depth	$: R_d$	0.8 mm
Feed rate	$: S_z$	0.16 mm / tooth
Pick feed	$: P_f$	0.8 mm
Workpiece inclination ang	$\operatorname{le}: \alpha$	0 - 75°
Spindle revolution	: N	1363 min ⁻¹
Coolant		Machine oil (1.5 l/min)

 Table 4.1
 Calculation and cutting conditions

Table 4.2	Calculation	and cutting	conditions
14010 1.2	Curculation	and catting	contantionio

Cutter radius	$: R_c$	8.0 mm
Helix angle	:η	30°
Radial depth	$: R_d$	0.8 mm
Feed rate	$: S_z$	0.16 mm / tooth
Pick feed	$: P_f$	0.8 mm
Workpiece radius	$: ho_w$	20 mm
Spindle revolution	n : N	1363 min ⁻¹
Coolant		Machine oil (1.5 l/min)

4.3 実験条件および方法

実験条件は先に述べた表 4.1 および 4.2 の計算条件と同様である.また,実験 条件は第 2 章および第 3 章とほぼ同様であるが,使用した工作機械には NC 立形 フライス盤 大隈豊和 FNB-400 を用いた.この理由は,本論文では検討できて いないが,前章までの実験で用いた NC 万能フライス盤では直線補間から曲線補 間もしくはその逆への移行の際にテーブルの動作が瞬間的に停止し,連続した 切削力の測定ができなかったことに因る.その他,工具および工作物の緒言は 表 4.3 のとおりであり,図 4.3 は凸テーパ面における切削実験の様子を示してい る.なお,凸曲面における切削実験に用いた工作物は,図 4.3 に示すように 4 つ の切削方式 (ステップアップおよびステップダウン,上向き切削および下向き 切削の組み合わせ)全ての切削力測定が可能な形状としたが,得られた切削力 は図 4.1 の切削モデルで定義した工作物座標系(X-Y-Z)に合うように座標変換を 行った.

	Table 4.3 Instruments for experiment
Machine tool	NC vertical milling machine FNB-400 OKUMAHOWA
Tool	Carbide solid ball end mill (TiAl)N coating, 2 teeth
Workpiece	0.45% carbon steel (S45C) (110×110×45 mm)



Fig.4.3 Experimental setup

4.4 計算および実験結果と考察

4.4.1 切削断面積

図 4.4 は横軸を工具回転角 θ とした切れ刃の回転に伴って変化する切削断面積 A の計算結果であり、凸テーパ面、ステップアップ、 α =45°で工具経路の曲率半 径 ρ_r =16.5, 25.0, 41.9 mm および参考として平面(ρ_r =∞)の条件について示す.図 (a)に示す上向き切削では切削開始角(θ_s とする)は ρ_t によらずほぼ同値を示し ているが、 ρ_t の減少に伴って切削に関与する工具回転角 θ_{cut} が減少し切削終了角

図 4.5 は凸テーパ面の ρ_tに対する A_{max} の変化を示す. いずれの切削方式におい ても ρ_tの減少に伴って A_{max} の値が減少する傾向を示しているが, この理由は前 述のとおりである.一方, αによる変化は, いずれの切削方式においても白抜き 記号で示した平面加工の場合と同様の傾向を示しており, ステップアップでは, αの増加に伴い A_{max} の値は減少し, ステップダウンではその逆を示している.



Fig. 4.4 Cross-sectional cutting area (Tapered surfaceb) Stepplerglown



Fig. 4.5 Maximum cross-sectional cutting area (Tapered surface)

図 4.6 は横軸を工具回転角 θ とした A の計算結果であり、凸半球面、下向き切 削で工具経路の曲率半径 ρ_s =6.7, 19.4, 26.1 mm の条件について示す. これらの条 件では、工具中心軸と半球部の中心 Oc から工作物に下ろした垂線のなす角 (α ' とする) はそれぞれ α '=14.3°, 45.4°, 74.0°であり、傾斜面加工における工作物 傾斜角に相当する角度である. 図(a)に示すステップアップでは ρ_s の変化によら ず θ_{cut} および A_{max} はほぼ一定の値を示している. 一方、 ρ_s の減少に伴って θ_s な いし θ_f が負方向へ移動しているが、これは α 'の減少により、切れ刃のねじれの 影響が少ない工具先端方向へ切削点が移動するためと考えられる. 次に図(b)に



Fig. 4.6 Cross-sectional cutting area (Tapered surface, Up milling)





示すステップダウンでは ρ_s の増加に伴って θ_{cut} が減少しており、これは切削点が 工具先端から外周部へと移動するためと考えられる.一方、 A_{max} は ρ_s が増加す ると減少する傾向を示した.

図 4.7 は凸半球面の *ρs*に対する *A*max の変化を示す.ステップアップでは上向き切削,下向き切削ともに *ρs* の変化によらずほぼ一定の値を示している.一方,ステップダウンでは *ρs* の増加に伴って上向き切削では一度減少した後増加しており,下向き切削ではその逆の変化を示している.

4.4.2 切削力

図 4.8 は実験で得られた凸テーパ面の切削三分力の変化の一例であり、それぞれ図 4.1 に示した工作物座標系(X-Y-Z)のX 軸から右回りに 45°の位置付近での結果を示している.切削合力 F は各座標軸方向の分力 F_x , F_y , F_z を用いて $F=\sqrt{F_x^2+F_y^2+F_z^2}$ で求めており、工具が1回転する周期は 0.044 s である.図のステップアップの場合、 F_x , F_y , F_z および F は図(a)に示す上向き切削、図(b)に示す下向き切削ともに工具経路の曲率半径 ρ_t によらず同様の変化をしており、最大切削力 F_{max} はそれぞれ 254~275 N, 281~413 N を示している.なお、F の変



Fig. 4.8 Cutting component forces and maximum force (Tapered surface, Stepped up)



Fig. 4.9 Cutting component forces and maximum force (Spherical surface, Down milling)

化は図 4.4 に示した A の変化と傾向がほぼ一致しており, 図には示していないが ステップダウンの場合もその傾向がみられた.

一方,図4.9は凸半球面における切削三分力の変化の一例であり,凸テーパ面 と同じ切削位置での結果を示している.下向き切削の場合,図(a)に示すステッ プアップでは工具経路の曲率半径 ρ_sの増加に伴って F_zが負の値から正の値へと 変化しているが,この理由は切削点が工具先端から外周部へと移動し,ねじれ 刃により工作物をすくい上げる力が発生するためと考えられる.



図 4.10 は凸テーパ面における $\rho_t \ge F_{max}$ の関係を示しており、比較のため A_{max}





Fig. 4.11 F_{max} and A_{max} (Spherical surface)

の結果も示す. F_{max} はステップアップ,上向き切削で 247~279 N,ステップダウン,下向き切削で 374~428 N,ステップダウン,下向き切削で 256~304 N と ρ_t の変化によらずほぼ一定となる傾向を示している.一方,ステップアップ,下向き切削では F_{max} の値がばらついており,254~339 N の群と 363~435 N の二極化がみられる. F_{max} と A_{max} を比較すると,ステップアップ,下向き切削の条件を除き,両者はほぼ同様の傾向を示している.しかし,ステップアップ,下向き切削では両者の傾向はあまり一致しておらず,その詳細は今後の検討課題である.

図 4.11 は半球面における $\rho_s \& F_{max}$ および A_{max} の関係を示している. F_{max} は, ピックフィードの進行により ρ_s が減少するステップアップの条件において,急 増した後,その変化がゆるやかになる傾向を示している. しかし,ステップア ップ,下向き切削の条件では凸テーパ面の場合と同様に F_{max} の値がばらついて いる. 一方,ピックフィードの進行により ρ_s が増加する条件においては,上向 き切削で微増,下向き切削で微減する傾向を示している. $F_{max} \& A_{max}$ を比較す ると,凸テーパ面と同じくステップアップ,下向き切削の条件を除き,両者は ほぼ同様の傾向を示しているが,ステップアップ,下向き切削では両者の傾向 はあまり一致しておらず,その詳細は今後の検討課題である.

4.5 結 論

- (1) 三次元 CAD により切削モデルを作成し、ボールエンドミルによる凸テー パ面および凸半球面の曲面加工において切削断面積 *A* を求めた.
- (2) F_{max}およびA_{max}は凸テーパ面および凸半球面のいずれでもステップアップ, 下向き切削の条件を除き,両者はほぼ同様の傾向を示した.

参考文献

- (69) 郝明暉,浅尾晃道,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生成機構の理論的解析",精密工学会誌, Vol. 65, No. 10 (1999), pp. 1476-1480.
- (70) 郝明暉,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 面生成機構の理論的解析(第2報)(逃げ面干渉を考慮したねじれ刃による 加工面形状の推定)",精密工学会誌, Vol. 66, No. 7 (2000), pp. 1150-1154.
- (71) 吉川浩一,水垣善夫,郝明暉,寺井久宣,"球面のボールエンドミル加工における加工面生成機構の理論的解析(第3報)(加工面形状の工具姿勢角依存性)",精密工学会誌,Vol. 69, No. 3 (2003), pp. 407-411.
- (72) 田中久隆,陸琳,砂糖昌彦,Bernard W. IKUA, "円筒面のボールエンドミル 加工に関する研究(加工誤差に及ぼす工具送り方向の影響)",機械学会論 文集(C編), Vol. 74, No. 744 (2008), pp. 2072-2078.
- (73) 廣垣俊樹,青山栄一,小川圭二,川口二俊,末田秀則,須知亮,"5 軸制御マ シニングセンタで創成される仕上げ加工面の考察(ボールエンドミル加工に おける切削点一定化と最適加工条件の設定法)",精密工学会誌, Vol. 75, No. 10 (2009), pp. 1238-1244.
- (74) 廣垣俊樹,青山栄一,小川圭二,川口二俊,末田秀則,須知亮,"5 軸制御マ シニングセンタで創成される仕上げ加工面の考察(ボールエンドミル加工に おける切削点一定化と最適加工条件の設定法)",精密工学会誌, Vol. 75, No. 10 (2009), pp. 1238-1244.
- (75) 西川隆敏,菊田敬一,門藤至宏,筒本隆博,金子順一,"エンドミル加工の 誤差補償システム(第1報)(動たわみモデルによるボールエンドミル加工 の誤差予測とNCデータ修正)",精密工学会誌, Vol. 78, No. 11 (2012), pp. 975-979.

5. 結 言

本論文では第2~4章において以下の結論を得た.

第2章

- (1) 三次元 CAD を用いて作成した切削モデルにより,主軸を送り方向に傾斜 させた条件での傾斜面の等高線加工における切削断面積および切削トル クに相当する評価値 Ed を精度よく計算した.
- (2) 最大切削断面積 Amax は、ステップダウン、上向き切削、工作物傾斜角 α=15°の条件で主軸傾斜角 λ によらず小さな値を示し、評価値の最大値 Edmax は前述の条件のうちおよそ λ=-20~5°の範囲で小さな値を示した.
- (3) 切削機構および切削特性の解析結果に基づいて工具先端切れ刃を未切削 切りくず立体の内部に存在させつつ,最終的な仕上げ面として創成される 領域では切削速度がゼロとならないような加工法を提案し,高能率・高精 度な加工が実現できることを示した.
- (4) 提案した加工法の有用性を明らかにする検証実験を行い,以下に示す結果 を得た.
 - a) 工具先端部を切削に関与させることで、 $|F_{z'max}|$ が $|F_{x'max}|$ および $|F_{y'max}|$ よりも大きな値を示す切削が実現された.
 - b) 最大切削トルク T_{max} は、 $\alpha=0\sim15^{\circ}$ 、 $\lambda=0^{\circ}$ の条件で小さな値を示すが、 その他の条件でもさらに λ を負方向に傾斜させることでそれぞれ大き く減少する.
 - c) 最大高さ Rz は, λ を負方向に傾斜させることにより減少し, α=15~20° および λ=-15~-10°の条件で理論粗さ R_{th}(=10 µm)以下の良好な仕上げ 面が得られた.
- (5) レーダチャート方式による切削性能の総合評価を試み,提案した加工法を 利用したステップダウン,上向き切削, α=10°, λ=-5°および,ステップダ ウン,α=15°,λ=-10°の条件で良好な切削特性が期待されることを示した.

第3章

- (1) 三次元 CAD により切削モデルを作成し、ボールエンドミルによる傾斜面 の直線加工において工具の送り方向を変化させた場合の切削断面積 *A* お よび評価値 *E*_dを求めた.
- (2) 工作物傾斜角 α または工具の送り方向角 β の増加により,最大切削断面積 A_{max} を減少させることが可能であり, $\alpha=30\sim75^\circ$ かつ $\beta=60^\circ\sim75^\circ$ の条件で は 4 つの切削方式のいずれでも A_{max} が小さな値を示した.

- (3) 実験で得られた切削力の変化は、ゴーダウン、下向き切削、α=15°の条件 で切削断面積の変化と同様の傾向を示したが、その理由は未切削切りくず 立体 *abcd* と切れ刃の位置関係の変化によるものと考えられる.
- (4) 切削トルクの最大値 T_{max} と評価値の最大値 E_{dmax} の傾向はほぼ一致しており,評価値 E_dによる簡易的な切削特性の評価について妥当性が示された.
- (5) 仕上げ面粗さは α および β の増加によりむしれが減少するため最大高さ Rz が減少する傾向を示した.また、上向き切削の条件ではゴーアップに 比べてゴーダウンの条件で理論粗さ R_{th}=10 μm を満たす切削条件が多く得 られた.
- (6) 工具先端切れ刃を未切削切りくず立体内部に存在させる加工法が成立する切削条件でレーダチャート方式による切削性能の総合評価を行い、ゴーダウンにおける上向き切削、α=15°,β=135~165°および下向き切削、α=15°,β=15~45°の条件で高能率・高精度を両立する加工を実現でき、良好な切削性能が期待されることを示した.

第4章

- (1) 三次元 CAD により切削モデルを作成し、ボールエンドミルによる凸テー パ面および凸半球面の曲面加工において切削断面積 *A* を求めた.
- (2) Fmax および Amax は凸テーパ面および凸半球面のいずれでもステップアップ, 下向き切削の条件を除き,両者はほぼ同様の傾向を示した.

謝辞

本研究をはじめとして様々な面においてご指導いただきました新潟大学工学部 機械システム工学科 岩部 洋育 教授に深く感謝の意を表します.また,多くの ご助言をいただきました新潟大学工学部機械システム工学科 新田 勇 教授,鳴 海 敬倫 教授,新潟大学大学院自然科学研究科 安部 隆 教授,東京電機大学 松村 隆 教授に感謝申し上げます.さらに,多方面にわたり助言いただきまし た新潟大学創造工房技官,同研究室院生および学部生の方々に厚く御礼申し上 げます.