

博 士 論 文

『ヘール工具を用いた精密仕上げ加工に関する研究』

吉丸 将史

要 旨

本研究は、金型製作工程や部品加工工程での精密仕上げ加工が可能となるヘール加工法の確立を目的としている。ヘール加工法は、非回転工具と多軸制御の組み合わせにより工具の刃先を任意の位置姿勢による軌跡で加工を行うことを特徴とする加工法である。最近の製品では自由曲面を多く含み、仕上げ加工に通常用いられるエンドミル切削加工では、加工残りが発生するために仕上げ作業が必須となる。ヘール加工法においては、非回転工具の微小切込み切削が被加工物の形状に沿って切削加工が行われるために、高品質仕上げが可能となる。またマシニングセンタによる段取りレス化が実現されるため、仕上げ作業の短縮・解消へ効果的な加工法である。

本論文では、従来研究においては材質や用途が限定されていたヘール加工法を、金型製作工程や部品加工工程での精密仕上げ加工にも適用可能となるように、超音波振動を付加することで金型用の鋼材や精密部品を対象とした硬脆材や高硬度材での加工を実現している。

第3章では、アルミ合金を対象としたヘール加工システムによる鏡面仕上げについて、工具姿勢の変化による加工面への影響について、安定した加工が可能となる条件を明らかにしている。具体的な加工事例として、アルミ合金を対象とした多面体や自動車用ボンネット形状などの曲面体の鏡面仕上げ加工結果を示している。

第4章では、超音波振動を用いたヘール工具による金型部品の仕上げ加工についてまとめている。単結晶ダイヤモンド工具による仕上げ加工は、鏡面加工の実現が期待できるものの、工具と鋼との親和性の高さのために激しい摩耗が発生し、実用的な鋼の加工には不適とみなされていた。本研究においては工具の刃先に超音波振動を付加することで、切削抵抗値の低減、工具刃先における摩耗の低減を図っている。金型用鋼材を対象とした加工実験により、工具材種や切削条件を変化させた場合における超音波振動の影響を比較し、表面粗さの向上、切削抵抗値の低減、工具刃先における摩耗の低減について最良となる条件を示している。具体的な適用事例として、超音波振動を付加した単結晶ダイヤモンド工具による鋼材（NAK80）の多面体加工を行い、 $0.2\mu\text{m}$ 以下の表面粗さとなる鏡面仕上げを実現し、金型用鋼材へ適用可能なことを示している。

第5章では、部品製作におけるヘール加工技術の適用とその仕上げ効果について論じている。医療用マイクロリアクターや押し出しピン、真空チャンバー装置用シール溝の仕上げ加工に対してヘール加工を適用している。ヘール工具による仕上げ面の品質比較は、要求される仕上げ品質を満たしていることが確認され、ヘール工具を用いた仕上げ加工の有用性を示している。

第6章は、各章における結論を総括し、型技術、精密加工技術における仕上げ品質の向上と自動化を実現するための手法として、ヘール加工技術が加工品質や微細形状への適用、幅広い材料へ適用可能であり本手法が有効であることを示している。

目次

第一章 緒論	1
1. 1 本研究の背景と目的	1
1. 1. 1 本研究の背景	1
1. 1. 2 本研究の目的	2
1. 2 本論文の概要	2
第二章 従来の仕上げ加工技術と課題	4
2. 1 金型の仕上げ加工に関する研究	5
2. 1. 1 金型磨き作業支援エキスパートシステム	5
2. 1. 2 ロボットによる磨き作業の自動化	9
2. 1. 3 粉末混入放電加工による磨きレス金型の製作	12
2. 2 部品加工技術に関する研究	15
2. 2. 1 ELID 研削加工技術	15
2. 2. 2 非回転工具を用いた超精密マイクロ溝の創成	18
2. 2. 3 ガラスのエントミル加工によるマイクロチャネルの製造	20
2. 3 仕上げ加工技術に関する課題	23
<参考文献>	24
第三章 ヘール加工システムの開発	26
3. 1 ヘール加工システムの概要	27
3. 1. 1 ヘール工具	27
3. 1. 2 ヘール工作機械	30
3. 1. 3 周辺装置	32
3. 2 ヘール加工における加工条件	34
3. 2. 1 切り込み深さによる加工面への影響	34
3. 2. 2 工具の傾斜角による加工面への影響	35
3. 3 ヘール加工によるアルミ合金の鏡面仕上げ加工	42
3. 4 本章の結論	43
<参考文献>	44

第四章	超音波振動を用いたヘール工具による金型部品の仕上げ加工	45
4.1	工具材種による加工面への影響	46
4.2	超音波振動による加工面への影響	48
4.2.1	切り込み深さと切削速度の変化による比較	50
4.2.2	ピックフィード量の変化による比較	64
4.2.3	工具摩耗領域への影響	74
4.3	超音波振動を用いたヘール工具による鋼材の仕上げ加工	76
4.4	本章の結論	79
	<参考文献>	82
第五章	部品製作におけるヘール加工技術の適用と仕上げ効果の検証	83
5.1	異形シール溝加工工程におけるヘール加工技術の適用	83
5.1.1	シール溝形状と従来加工方法	84
5.1.2	多軸ヘール加工用CAMシステムの開発	86
5.1.3	逆テーパ溝加工用ヘール工具の開発	88
5.1.4	切り屑排出を考慮した加工プロセス	89
5.1.5	シール溝の品質評価	91
5.2	硬脆材を対象としたヘール加工技術による仕上げ加工	94
5.2.1	回転工具とヘール工具による加工面の比較	96
5.2.2	超音波振動による加工面への影響	97
5.2.3	ヘール工具によるマイクロリアクタの加工	100
5.3	高硬度材を対象としたヘール加工技術による部品加工	101
5.3.1	超音波振動による加工面への影響	101
5.3.2	評価と課題	108
5.4	本章の結論	109
	<参考文献>	110
第六章	結論	112

謝辞

第一章 緒 論

1. 1 本研究の背景と目的

1. 1. 1 本研究の背景

日本におけるものづくり技術は、世界における先進的な役割りを担ってきた。特に、高度経済成長期における自動車や家電製品を中心とした生産能力の拡大は目覚ましいものであったが、近年の諸外国における製造技術の広がりや地域性を活かした低コストでの大量生産の浸透を受け、国内におけるものづくりには新たな技術開発によるさらなる発展が求められている。

工業製品については、急速な機能の高度化と低価格化により高品質な製品を容易に入手できるようになった。開発、設計、製造などの工程ではコンピュータを用いた多くのシステムが普及しており、計算機処理能力の画期的な進歩によって以前では膨大な時間を必要とした作業においても、人的なばらつきの無い一定品質にて行うことが可能となった。特に、設計工程における CAD (Computer Aided Design) システムや、製造工程における CAM (Computer Aided Manufacturing) システム、CNC (Computed Numerical Control) 加工機の普及は著しいものがある。CAD システムの普及では、部品の標準化や過去のデータの再利用による設計や作図作業の効率化、過去のデータの蓄積や解析、あるいは CAE (Computer Aided Engineering) システムでの数値解析による効率的設計を行うことが可能となった。また、CAM システムでは、CAD システムによって設計された製品形状や加工図面に基づいて、加工工程、加工領域、加工順序、使用工具、加工条件などの決定、工具経路の創成、および CNC 加工機を制御するための NC データの作成を行う。CNC 加工機はこの NC データによって動作し、要求される加工形状に製品を自動的に加工する。近年の工業製品に要求される品質、コスト、納期を満たすためには、このような CAD システムや CAM システム、CNC 加工機は必要不可欠となっている。

また、多種多様な工業製品は、品質を均一に保証しながら生産コストを低く保つため、金型による大量生産方式が用いられることが多い。金型には一般に鉄系素材が用いられ、その素材を機械的加工法あるいは電氣的加工法によって、必要とされる形状に加工して製作する。製品の形状には曲面が多く高品質な形状が要求されることから、その原形となる金型には、製品以上の精度や品質が要求される。また、金型を用いずに製造される工業製品についても、高い品質が要求されるだけでなく生産コストの低減も求められる。

現状の機械加工では回転工具による効率的な加工が主流となっている。しかし、曲面加工では円弧形状の切れ刃を持つボールエンドミルが用いられるが、その加工面には常に使用工具の切れ刃形状が転写され、工具半径以下の凹部における加工残りや工具先端形状が転写された山形の加工残りが残存する。加工ピッチを細かく設定することにより加工残りを幾何学的に軽減することはできるが、ある一定以下の加工面粗さに抑えることは

できない。回転工具を用いる場合には、工具中心軸から任意の切れ刃位置までの回転半径が異なることから均一な加工面粗さを得ることが困難であり、特に回転中心軸近傍では切削速度が限りなくゼロに近い為、良好な加工状態を得られず面粗さを悪化させる原因となる。そこで、回転工具による加工面粗さを低減し加工残りを除去するための工程として、磨き作業が必要となる。しかしながら、面粗さの異なる面を磨いた場合、面粗さの大きな部分は面粗さの小さな部分に比べて深い除去が必要であり、CNC 加工機などで加工された前加工面の形状品質を低下させることになる。金型や部品の加工において要求される精度や品質を満たすためには、回転工具による不均一な面粗さにも対応できる新たな加工法の導入が望ましい。

近年では、急速に広まるグローバル化社会において、情報の伝達と共に技術やノウハウが海外へ流出することが深刻な問題となっている。さらに日本国内では、団塊の世代を中心とした熟練技能者が減少していく傾向が予測されており、今後の金型製作や部品加工において、新たな加工法の導入により荒加工から磨き作業までを機械化し、要求される精度や品質を満たすことができれば、工業製品に要求される品質、コスト、納期を向上させることが可能となり、より付加価値の高いものづくり技術を確立することができるものとする。

1. 1. 2 本研究の目的

本研究の目的は、金型や部品の荒加工から仕上げ加工、高精度仕上げ加工までを同一の工作機械上で行い、段取り工程数の削減や誤差の発生防止、磨き作業の低減による工程の省力化、加工曲面の品質向上、製品の製作納期短縮を実現するための新たな手法として、ヘール工具を用いた精密仕上げ加工技術の確立を行うことである。

1. 2 本論文の概要

本論文では、金型や部品の機械加工において、回転工具による加工残りを除去する非回転工具を用いた加工法、および非回転工具を用いた高精度仕上げ加工の適用事例について述べる。その全体構成は、図 1-1 に示す通りである。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景と目的、概要などについて述べる。次に、第 2 章では、仕上げ加工技術と研削加工技術に関する従来の研究について、それぞれの問題点を整理した上で課題を提示する。第 3 章では、非回転工具による高精度仕上げ加工システムの概要について述べた上で、アルミ合金を対象とした加工条件の導出結果と仕上げ加工事例について紹介する。第 4 章では金型の仕上げ工程への適用事例として、超音波振動を用いた鋼材の加工実験結果についてまとめる。第 5 章では部品加工への適用事例として、硬脆材、高硬度材を対象とした加工やシール溝加工への適用についての実験結果をまとめた上で、仕上げ工程における作業低減の効果について検証する。第 6 章では、本研究で得られた結果を総括し、結論とする。

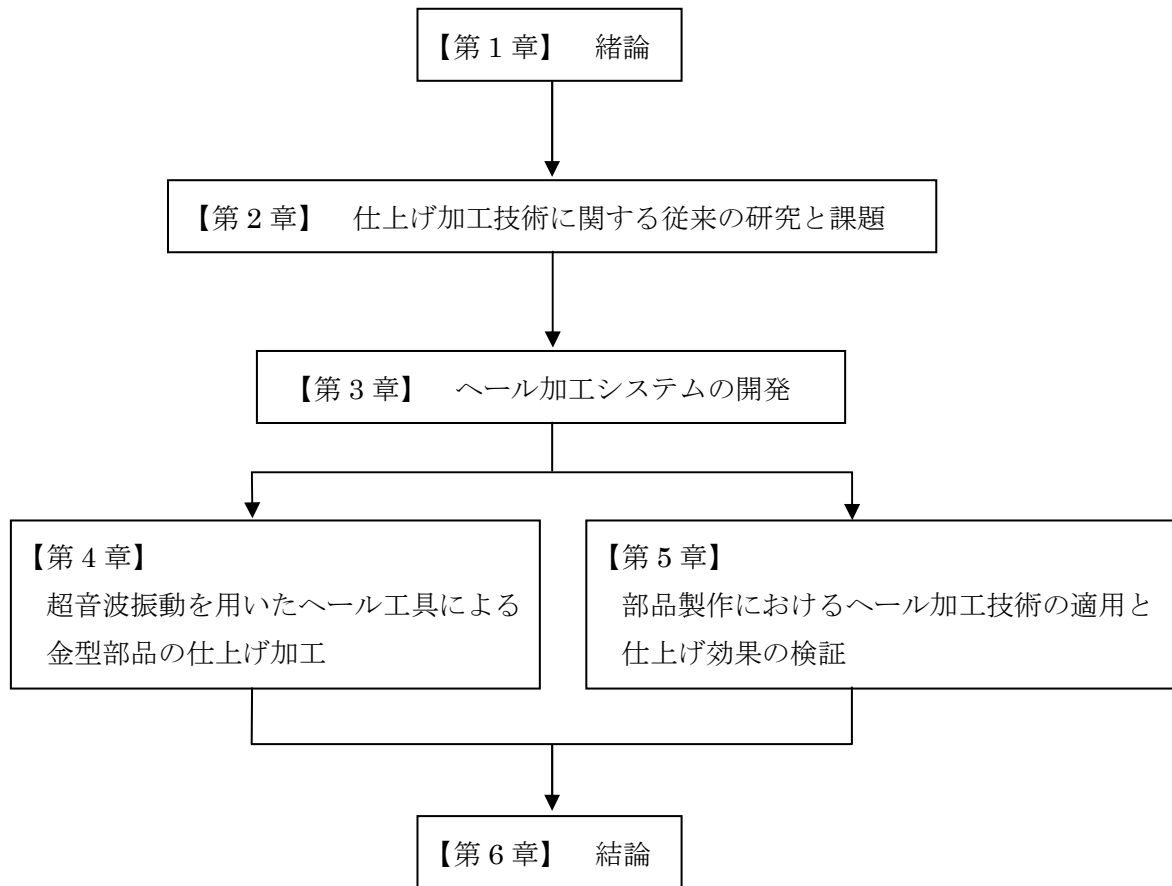


図 1-1 本論文の全体構成

第二章 従来の仕上げ加工技術と課題

製品の多様化に伴い、製造過程における高品位、高能率、低コスト化の要求はより一層強まる傾向がみられる。一般的な製品の加工工程としては、CAD 等で定義された形状データに応じて、切削加工や放電加工を中心とした形状加工が行われる。リブ形状や凹部のコーナーエッジが要求される形状の場合は放電加工が用いられるが、一般には加工効率が高く加工変質層が小さい切削加工法を用いる場合が最も多い。²⁻¹⁾

金型製作を例とした一般的な加工工程を図 2-1 に示す。形状加工工程では、CAD システムによって定義された製品形状データを基に、CAM システムによって算出された工具経路データと NC フライス盤やマシニングセンタ、およびボールエンドミルなどの回転工具を用いて切削加工が行われる。ここで得られる面粗さは、 $10\sim 100\ \mu\text{mRy}$ (最大高さ：基準長さにおける山頂線と谷底線との間隔) であるため、次工程である平滑加工工程において $3\ \mu\text{mRy}$ 程度の滑らかな曲面に仕上げられる。さらに、鏡面仕上げ加工工程では、要求精度 (面粗さと光沢、つや) に達するまで、手作業を中心とした磨き作業が行われる。^{2-2) 2-3)}

この章では、金型の仕上げ加工に関する研究、および部品加工技術に関する研究について述べた上で、仕上げ加工技術に関する課題についてまとめる。

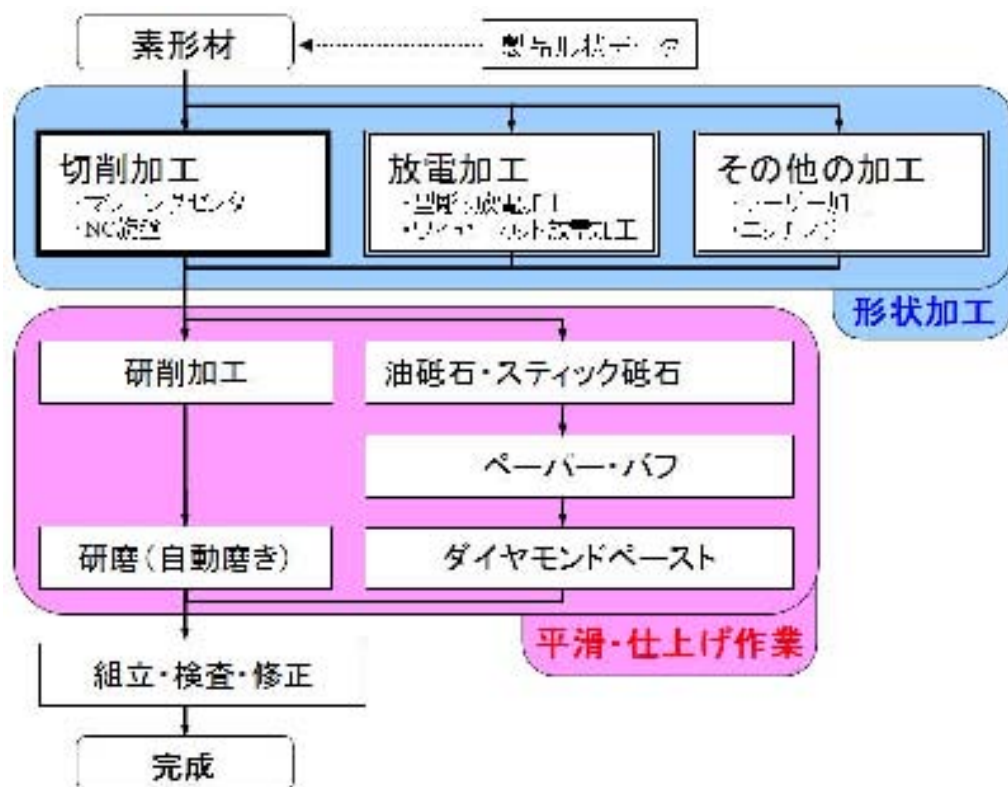


図 2-1 一般的な加工工程

2. 1 金型の仕上げ加工に関する研究

2. 1. 1 金型磨き作業支援エキスパートシステム

金型製造における設計と加工工程の自動化、効率化、高精度化のために、多種多様な CAD/CAM システムが開発され利用されている。しかし、金型加工工程の約 30%を占める磨き加工については、その知識や技術が体系化されておらず、コンピュータ支援技術の適用が極めて難しい作業工程となっている。しかも金型磨き作業者は慢性的に不足しており、金型ユーザーからは、製品の多様化に伴う納期の短縮や、製造コストの引下げ、さらには構造部品の精度向上による金型機能の複合化、機能化、そして商品価値を高めるための感能部品の美的高度化などが要求されている。

このような要求に対応するために、金型磨き熟練工（エキスパート）が持っている専門的な知識や技術を科学的に分析し、それらを基にして金型磨き作業の自動化を図るとともに金型磨きの非専門家に対して最も効率的な磨き工具の使用法、磨き手順を教示できるエキスパートシステムの開発が行われた。^{2-4) 2-5)}

金型磨き作業では、前加工面に存在する粗さ傷を次第に粒度の細かい工具によって改善する作業を繰り返しながら所望の表面状態を得ていることから、個々の磨き工具による表面状態、工具の組合せによる面粗さや傷深さの推移、および必要となる磨き時間を考えながら、要求仕上げ面粗さと傷深さに至るまでの過程を追っていくことが金型磨き工程設計の基本的な考え方である。工具の組み合わせによる磨き時間と仕上げ面粗さの遷移を図 2-2 に示す。エキスパートシステムでは、個々の磨き工具の仕上げ能力すなわち表面粗さの改善能力、前加工面の粗さや傷の除去能力、さらに工具自身がつける傷深さを把握した上で、最大限それらの能力を活かすように各工具の選択順序と磨き回数を教示する。

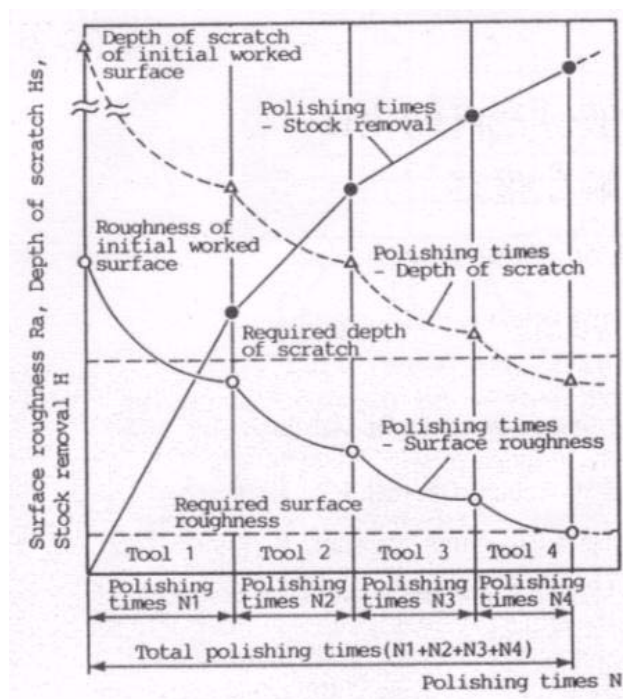


図 2-2 磨き時間と仕上げ面粗さの遷移

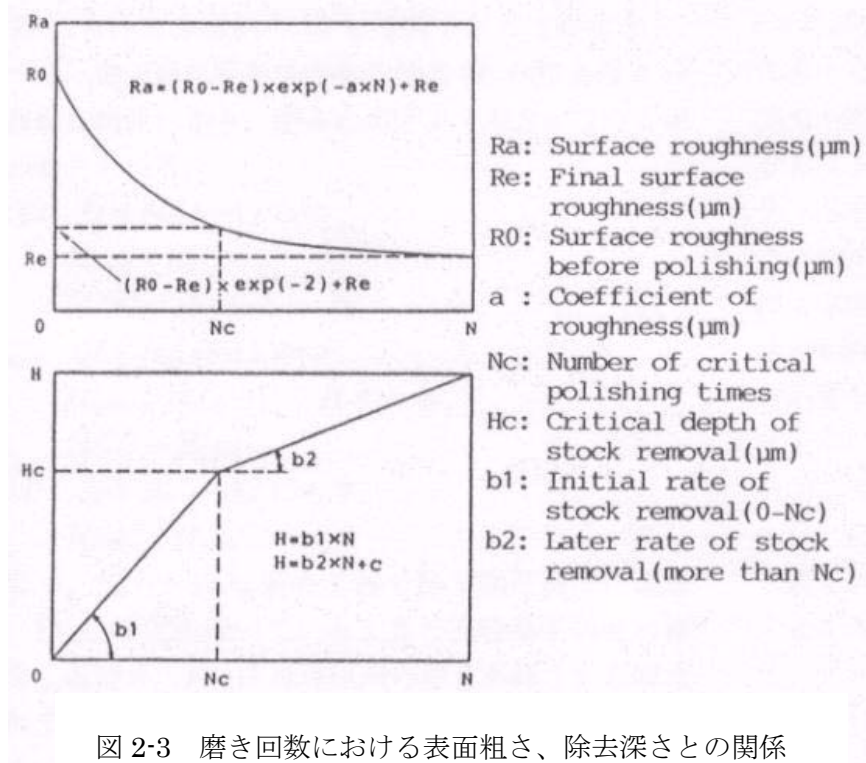


図 2-3 磨き回数における表面粗さ、除去深さとの関係

磨き回数 N と表面粗さ R_a および除去深さ H との間には図 2-3 に示すような関係がある。磨き回数 N と表面粗さ R_a との間には指数関数的な関係があり、前加工面粗さを R_0 、最終仕上げ面粗さ R_e 、指数定数を a とすると R_a と N の間は次式のように表すことができる。

$$R_a = (R_0 - R_e) \times \exp(-a \times N) + R_e \quad (\text{式 2-1})$$

除去深さ H と磨き回数 N の関係は 2 本の直線で表すことができ、その傾きをそれぞれ b_1 、 b_2 とすると次式のようになる。

$$\begin{aligned} H &= b_1 \times N & (N \leq N_c) \\ H &= b_2 \times N + C & (N > N_c) \end{aligned} \quad (\text{式 2-2})$$

ここで、 N_c は除去能率が変わる臨界磨き回数であり、前加工面粗さをほぼ除去できる回数すなわち仕上げ面粗さが 90% 程度改善される磨き回数であり、工具の交換を決める重要な回数である。本システムでは見極め基準のための磨き回数は N_c を参照して決定することとした。また、式 2-1 において $\exp(-a \times N_c) = \exp(-2) = 0.135$ (87% 改善) と近似的におくことができることから、指数定数 a は、 $a = 2/N_c$ と表すことができる。なお、仕上げ面粗さは磨き回数と粗さの実験データから最小二乗法にて推定される。

加工面に存在する傷の深さ H_s は除去深さ H と密接な関係にあり、図 2-4 に示すように 3 通りの場合が考えられる。その 1 としては、除去深さと工具による傷の深さが共に前加工面における傷深さよりも浅い場合であり、この段階では次の工具への交換は不適となる。その 2 としては、除去深さは前加工面における傷深さよりも浅いものの、工具による傷の深さが前加工面における傷深さに達している場合である。また、その 3 としては、除去深さが前加工面における傷深さよりも深い場合である。これら 3 通りの条件に従って加工後の傷深さを決定することで、適切な工具交換時期を判定する。

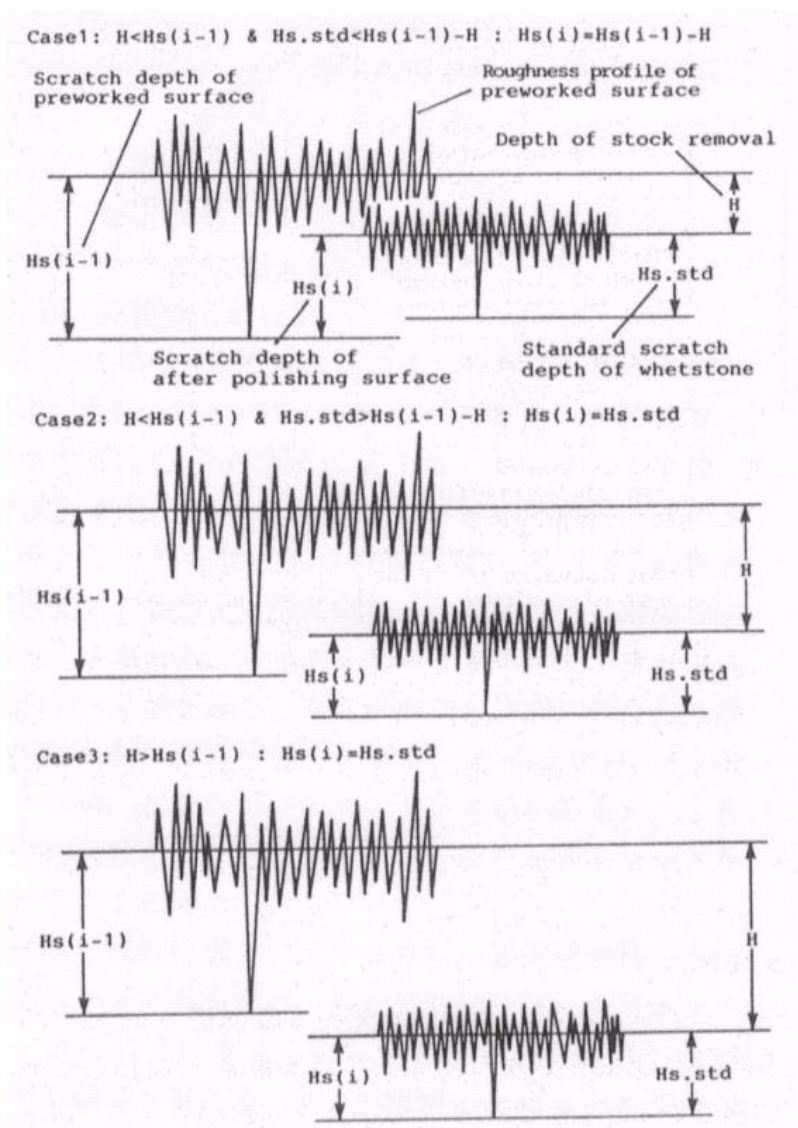


図 2-4 前加工面に対する除去深さと傷深さの関係

例題研究として金型材 S55C をフェースミルで切削した平面（表面粗さ $1.2\mu\text{mRa}$ 、傷深さ $3.0\mu\text{m}$ ）を表面粗さ $0.15\mu\text{mRa}$ 以内、傷深さ $0.8\mu\text{m}$ 以内に仕上げる磨き工程の推論実験を行った。本システムによって得られた 3 通りの推論結果を図 2-5 に示す。磨き回数が最小の工程は 220 回で 2 通りあり、■印の工程は 4 つの工具全てを用い、表面粗さと傷を同時に改善しているように見られる。一方、●印の工程では SL#400 の工程を省略する代わりに、最終工程の SL#900 で 80 回多く磨いており、主に傷を除去する作業工程と見られる。目標の表面状態に仕上げるために幾通りかの工程が導出されたが、磨き回数の総和が最も少ない加工手順が能率的で良い工程と考えられる。しかし、工程数や工具価格なども評価基準に入れるといずれの工程を選択するかはユーザー側の意志決定事項であることを考慮して、本システムでは全ての可能解を出力し考察できるようにした。以上の推論結果の妥当性を検証するために、磨き加工実験を行った。図 2-6 の破線で囲まれたデータが実験地であり、推論値より多少良い値が得られているものの、粗さ、傷が改善されていく傾向は良く一致している。

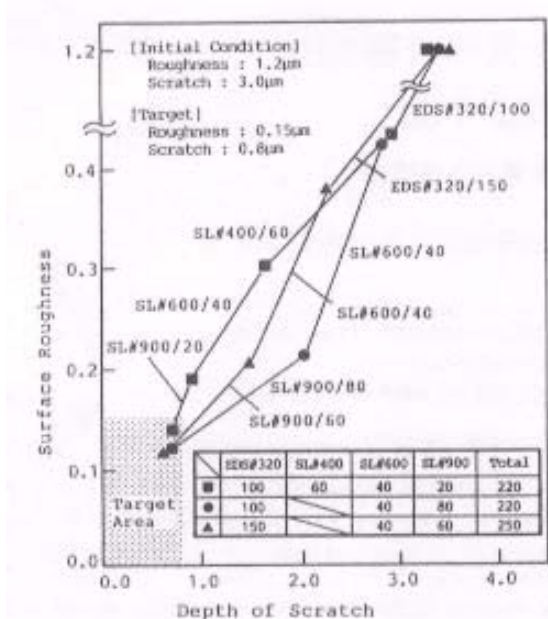


図 2-5 エキスパートシステムによる推論結果

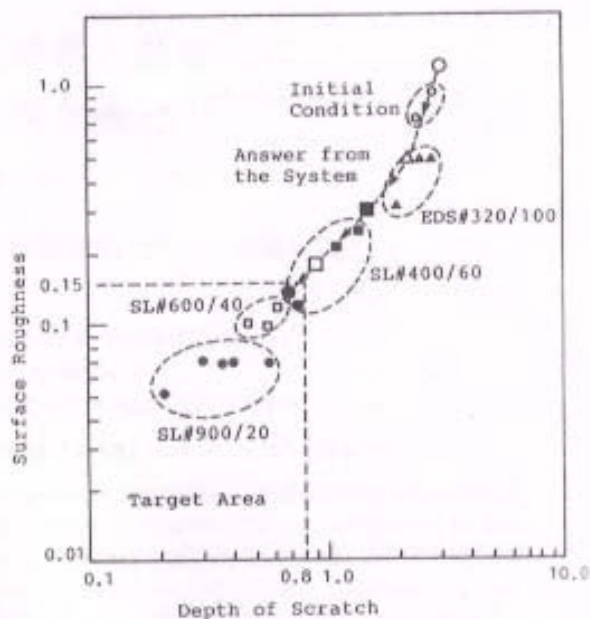


図 2-6 推論結果と実験結果による比較

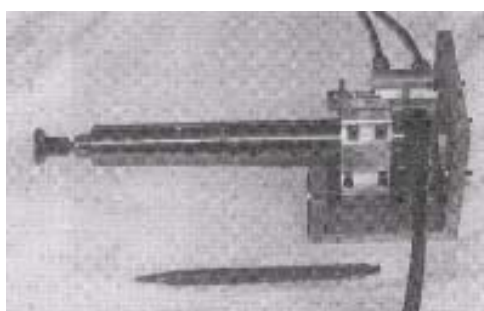
本研究事例では、金型熟練工の持つ経験的な知識を抽出し、それらの内容を分析して得られた知識データベースを基にして、平面ではあるが、前加工面の粗さ、傷を能率良く除去し、要求仕上げ面を得るためのエキスパートシステムの構築を行った。その結果、多種多様な磨き工具とその特性データに対処できる知識表現の提案、全可能解を探索することができるシステムの構築、金型磨き作業における工具選択順序と磨き回数の決定が可能なることを実験的に検証した。

2. 1. 2 ロボットによる磨き作業の自動化

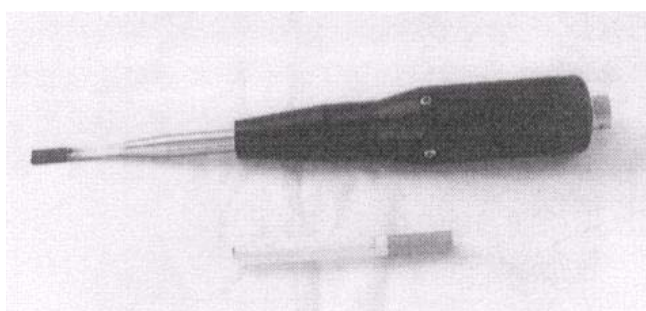
機械加工後に行われる仕上げ加工は、形状精度を保ちながら要求される精度まで磨いていく作業であり、技能と感覚に裏付けされた分野ゆえに手作業に頼って行われていることが多い。設計、加工、検査と自動化が進むなかであって、仕上げ工程だけがその特異性のために依然として自動化が遅れている。特に、デザイナーの意匠設計に基づく金型は、複雑な自由曲面を持つ上に高い精度の面粗さが要求されるので、その仕上げ工程の占める比率も高い。金型の需要は増大しており、仕上げ工程の自動化が迫られている。

本研究は、6自由度をもつ多関節ロボットを用いて、CADシステムから生成された干渉を回避した磨き経路に基づいて作動する磨きの自動化システムを述べたものである。²⁻⁶⁾

使用したロボット（富士通製 FAROT-M6-315）は、アーム全長が 790mm、可搬重量は 2kgf の垂直 6 関節形ロボットであり、各軸の動きは専用コントローラによって制御されている。本システムでは、ロボットの動作範囲を広げるために門形のフレームに逆さに吊り下げる形でロボットを設置し、ロボットアームの先端に磨き工具が取り付けられる。対象加工物に関する形状データは、自作の CAD/CAM システムである P-CAPS によって EWS（オムロン製 LUNA）上で作成されるが、それをホストコンピュータとなるパーソナルコンピュータ（日本電気製 PC-9801）に送っている。生成された工具経路データはパーソナルコンピュータからロボット専用コントローラへ RS-232C を経由して転送され、工具を指定位置へ移動させて磨きを行う。^{2-7) 2-8) 2-9)} 本システムにて磨きに用いる工具としては、回転工具と超音波振動工具²⁻¹⁰⁾を用意し、状況に応じて使い分ける。ロボットによる自動磨きのための回転工具、および超音波振動工具の概観を図 2-7 に示す。



(a)回転工具



(b)超音波振動工具

図 2-7 ロボットによる自動磨き用工具の概観

ロボットによる磨き作業において、良好な形状精度と面粗さの加工物に磨き上げるためには、磨き面に沿って工具の姿勢を制御することが重要である。磨き経路は、5軸制御のNCデータ²⁻¹¹⁾とほぼ同様な考え方で得ることができ、様々な曲面形状に対応することができる。ただし、工具形状によっては図2-8に示すように工具中心位置が変化することがある。球体の工具の場合、工具軸ベクトルが変化しても工具中心位置Oは変化しないが、フラットな工具などでは、工具軸ベクトルに対して磨き位置Cを一致させるためには工具中心位置Oが違ってくる。そこで、工具軸ベクトルTと磨き位置Cから単位ベクトルGを求め、フラット形工具中心点Oの空間位置を定めている。これにより本システムでは工具形状が異なっても磨き位置を変化させないような工具中心位置と軸方向を求める。

また、磨き工具がその姿勢を保ちながら経路上を移動する場合、形状によっては工具の接触点以外の部分が加工物と干渉することがある。磨き工具が常に磨き面に接触しながら干渉を回避するために、内外判別法を用いて対処している。内外判別とは、ワーク座標系において、工具表面に設けられたチェックポイント全点が加工物形状の内部に存在しているかどうかを判別することである。チェックポイントがすべて外部に位置している場合には、工具と加工物の干渉は生じていないと判断され、工具軸方向を変化させる必要はない。一方、チェックポイントの中に加工物内部に位置するものが存在する場合には干渉が発生すると判断され、工具軸方向を変える回避操作を行う必要がある。回避操作としては、図2-9に示すように、加工物との干渉が生じている部分を黒丸で表し、内外判別を行いながら工具姿勢を変化させ、全てが白丸で表され干渉回避の状態となる工具軸ベクトルを求める。

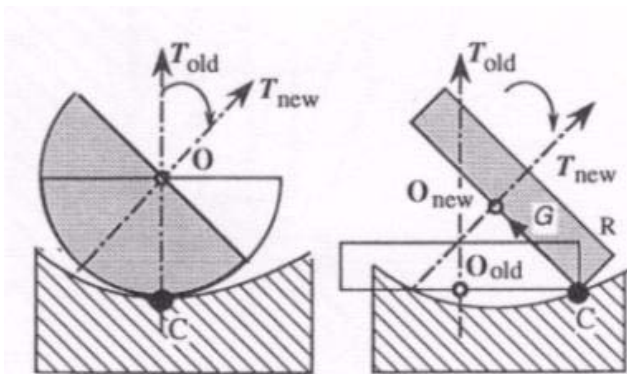


図 2-8 工具形状による中心位置の変化

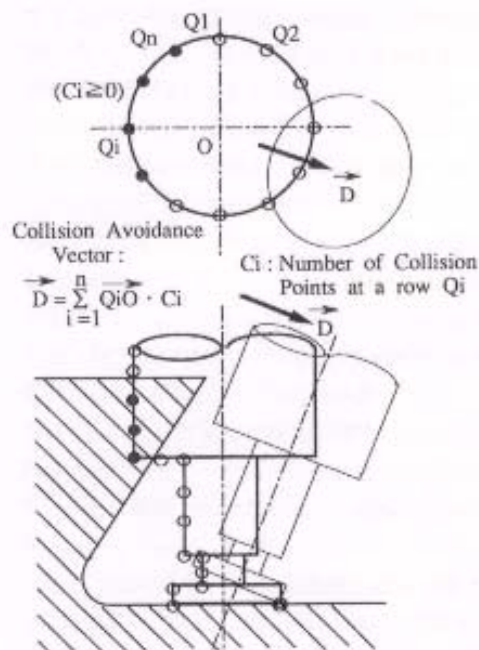


図 7 干渉回避ベクトルの求め方

図 2-9 干渉回避のための内外判別

Collision Avoidance Vector :

$$\vec{D} = \sum_{i=1}^n \vec{Q_i O} \cdot C_i$$

C_i : Number of Collision Points at a row Q_i

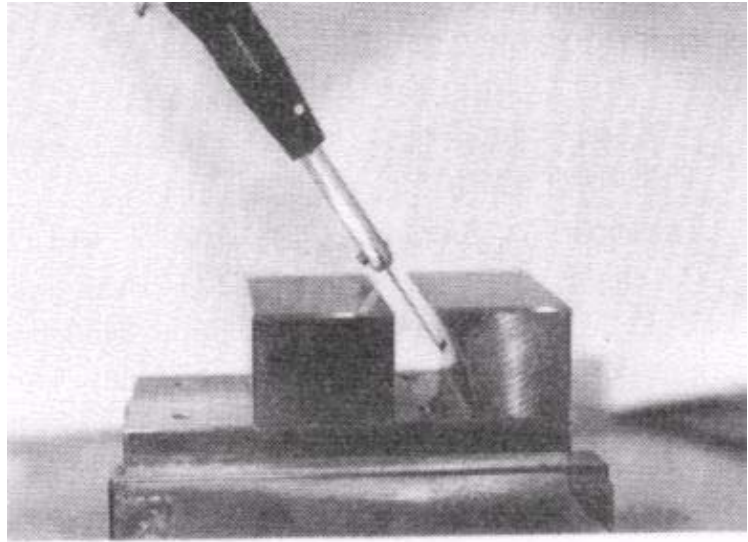
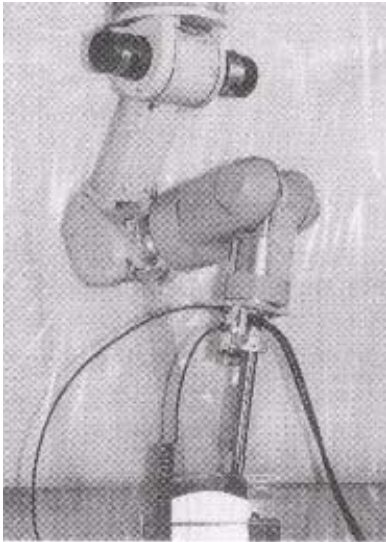


図 2-10 回転工具によるロボット磨き

図 2-11 超音波振動工具によるロボット磨き

作成した磨き経路により磨き実験を行った。回転工具により凸形の自由曲面を磨く様子を図 2-10、超音波振動工具によりオーバーハングを伴う形状を磨く様子を図 2-11 に示す。

凸形の自由曲面は、ブラウン管に似た形状で緩やかな曲面で構成された S55C 材で、磨き開始時の表面粗さは約 $0.5 \mu\text{m}$ (Rz) である。フェルトとダイヤモンドペースト(#1500~50000)を使用し、回転数 4600rpm、押付け力 0.15N、送り速度 40mm/min で約 550 分の磨きを行うことで表面粗さ $0.05 \mu\text{m}$ (Rz) の面を得た。回転工具によるロボット磨き面を図 2-12 に示す。

オーバーハングを伴う形状は、S55C 材のオーバーハング横壁部を $\phi 6$ のボールエンドミルでピックフィード 2mm にて加工した面を磨くものとする。工具の送り速度は 1.0mm/s、押付け力は仕上げの度合に応じて 1.60~0.85N と変化させている。超音波振動工具の振動モードは、たわみ振動をチップ長手方向に使用するモードとし、磨き工具の使用角度範囲は $15\sim 30^\circ$ とした。磨きを行う前の表面粗さ $51 \mu\text{m}$ (Rz) の右側部に比べ、435 分の磨きにより $5.3 \mu\text{m}$ (Rz) の面を得た。超音波振動工具によるロボット磨き面を図 2-13 に示す。

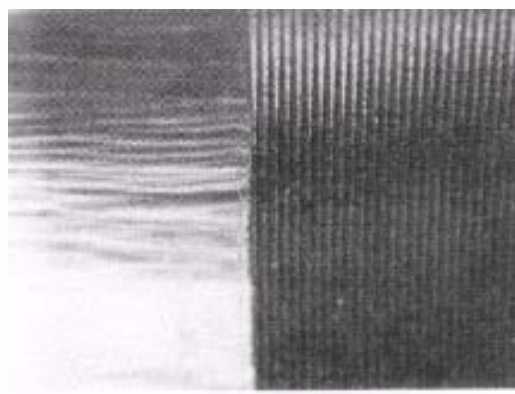
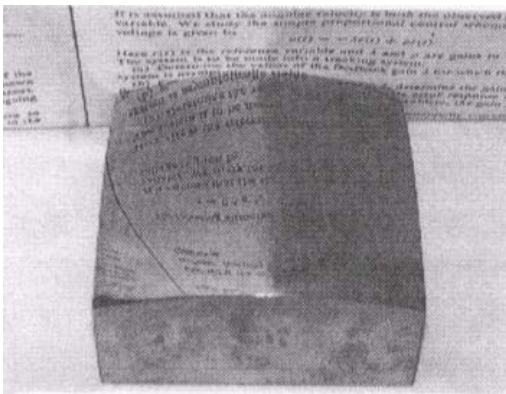


図 2-12 回転工具による磨き面

図 2-13 超音波振動工具による磨き面

2. 1. 3 粉末混入放電加工による磨きレス金型の製作

近年において、放電加工の役割は大きく変化してきた。従来、放電加工にて行われた荒加工の工程は大部分が切削加工へと置き換わり、手磨きで行われた最終仕上げ工程の一部が放電加工へと移ってきている。ここでは、放電加工において粉末を混入することで、高品質な光沢面を得ることのできる技術を用いた、金型の磨きレスを実現するための研究事例²⁻¹²⁾について紹介する。

通常の放電加工では面粗さが粗く表面にクラックが発生する場合があるが、粉末混入放電加工による仕上げ面は、クラックがなく均一な面に仕上がり平坦度も増す。その理由としては、通常の放電加工においては加工面積がある程度大きくなると放電が局所的に集まりながら加工されるのに対し、粉末混入放電加工では放電が均一に分散するためである。²⁻¹³⁾ また、粉末の混入により加工液中のシリコンが工作物に侵入することで、耐蝕性も高くなることが知られている。²⁻¹⁴⁾ 通常の放電加工面、および粉末混入放電加工による仕上げ面の比較を図 2-14 に示す。

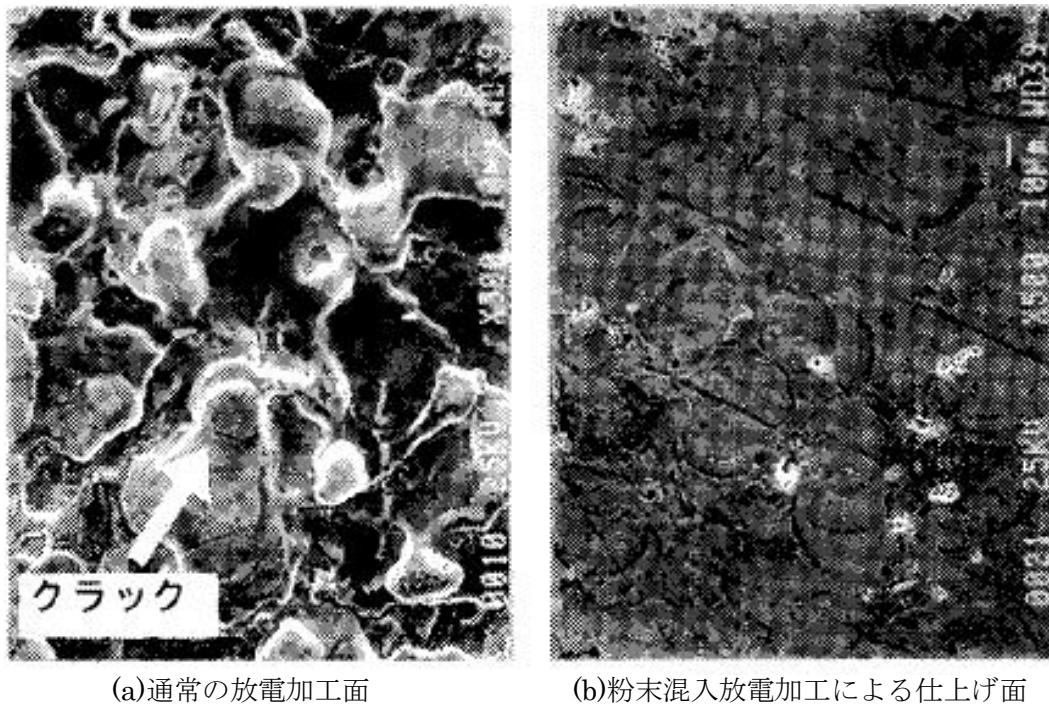


図 2-14 超音波振動工具による磨き面

粉末混入放電加工により所望の仕上げ面が得られても、複雑な形状を加工する場合には、前加工面における傷や加工屑の排出不良により、面の一部にピットなどが残る場合がある。ピットの生成原理としては、傷や加工屑を介して電極と工作物が短絡されることで発生した磁界により、放電集中が起こるためである。FP 電源は、放電パルスの休止時間ごとに極間の短絡状態をチェックし、短絡の場合には放電パルスをカットし加工屑が集まるのを防ぐ働きを持っている。これにより、荒加工・中仕上げ加工における加工速度と加工面品質を向上させることができる。従来電源による加工面と FP 電源による加工面の比較を図 2-15 に示す。

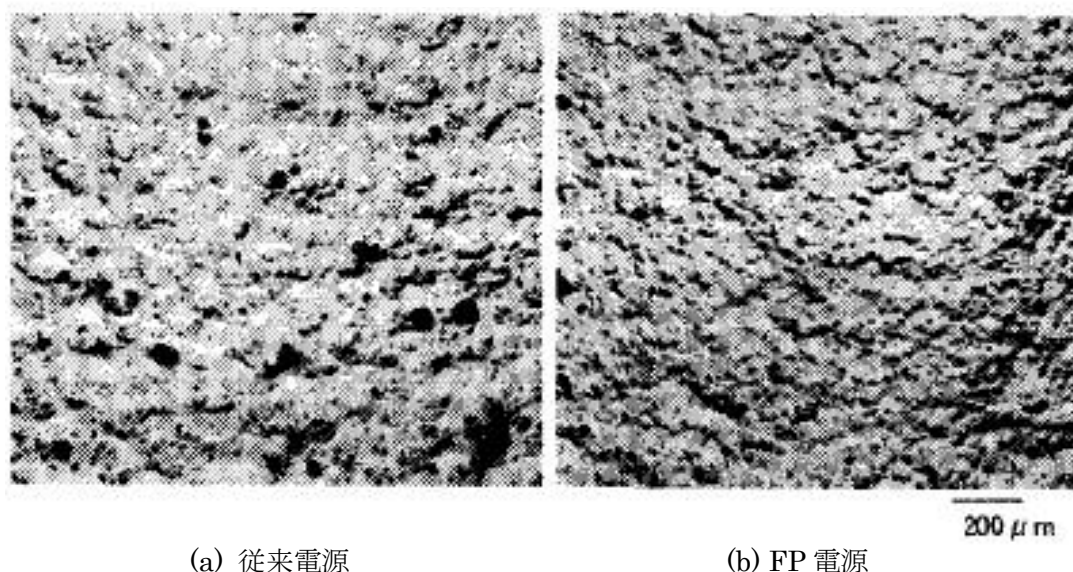


図 2-15 加工面の比較

粉末混入放電加工を用いた仕上げ加工への適用として、プラスチック金型を対象とした事例を図 2-16 に示す。電極は銅、被削材は SKD61 である。加工時間は 1 つの計上当たり荒加工 17 分、粉末混入放電加工による仕上げ加工が 8 分である。面粗さは $0.8 \mu\text{m}$ (Rz) まで仕上がっており、磨きレスが実現できている。同様に、冷間鍛造金型を対象とした事例を図 2-17、スピーカーパネル用金型を対象とした事例を図 2-18 に示す。仕上げ面品質の向上により型寿命も延長され、手磨きが困難となる複雑形状においても磨きレスが実現された。

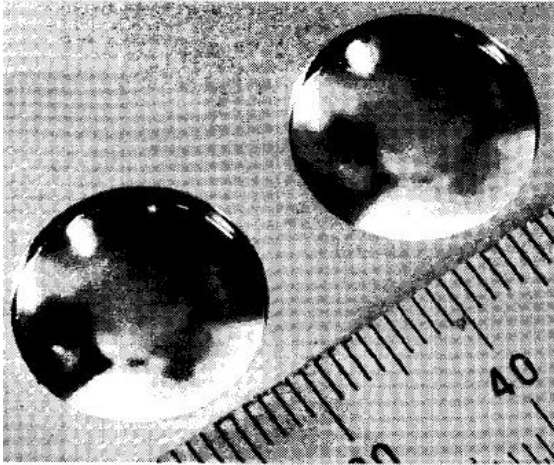


図 2-16 プラスチック金型への適用例



図 2-17 冷間鍛造金型への適用例

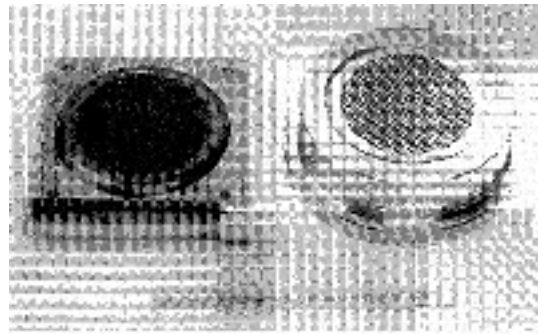


図 2-18 スピーカーパネル金型への適用例

2. 2 部品加工技術に関する研究

2. 2. 1 ELID 研削加工技術

電子・光学部品の多くは硬脆材料からなり、その加工は遊離砥粒加工から固定砥粒加工への転換が進んでいる。精密研削は鏡面研削へと進化し、さらには超精密研削技術へと発展しつつある。「ELID（エリッド）研削」はメタルボンド砥石に電解インプロセスドレッシング（ELID=ELctrolytic In-process Dressing）を複合して実現された高精度・高効率研削であり、加工面粗さ、形状精度、表面品位、能率などの各パフォーマンスを効果的に実現する技術として、実用化が進んでいる。^{2-15) 2-16) 2-17)} ELID 研削の基本原理を図 2-19 に示す。

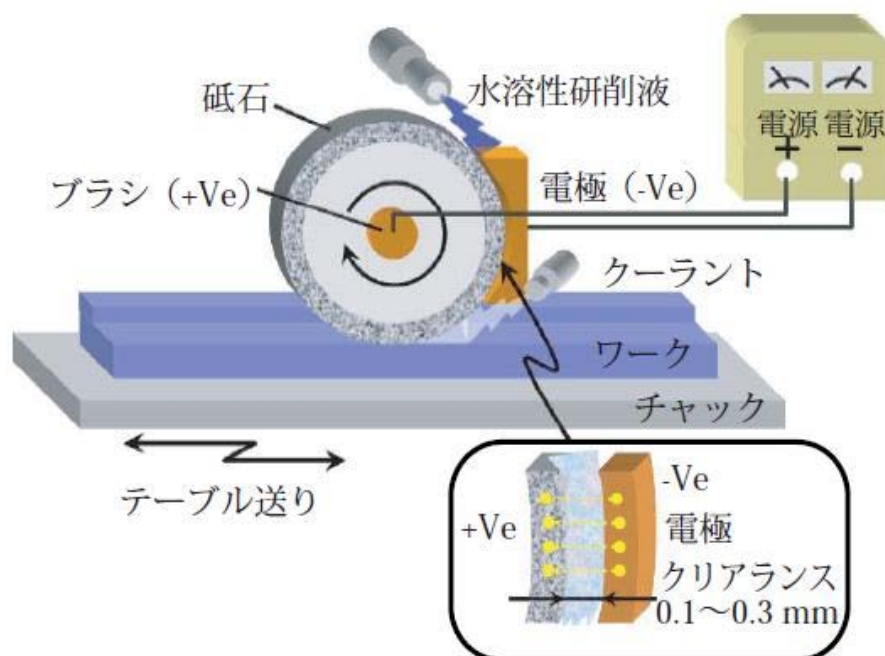


図 2-19 ELID 研削法の基本原理

ELID 研削は硬脆材料の加工に適しており、主に砥粒保持力・ボンド材強度の高い鉄系メタルボンド砥石を用いる。メタルボンド砥石の電解と不導体化をバランスさせるために、主にパルス波形を発生する電解電源と、非線形電解現象を伴う水溶性研削液を組み合わせ、図 2-19 のようなメカニズムが実現される。メタルボンド砥石はツルーイング作業後、電解によりメタルボンド材を溶出させて砥粒を突出させる。この電解現象では、ボンド材が必要量流出後、速やかに不導体被膜による絶縁層が砥石面に形成されることで、過度の溶出を防止する。研削開始後、被加工物がこの不導体被膜に接触し、砥粒が摩耗した分だけ被膜が剥がれる。ELID 法は、①砥石、②電源、③電極の装着により容易に実現でき、粗加工から仕上げ加工に幅広く適用できる。代表的な加工方式の例を図 2-20 に示す。

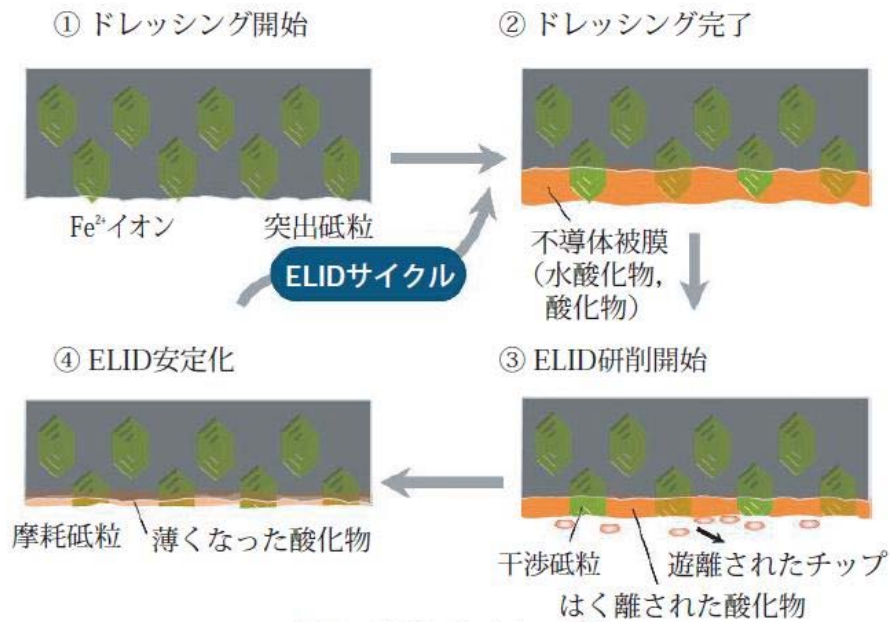


図 2-19 ELID のメカニズム

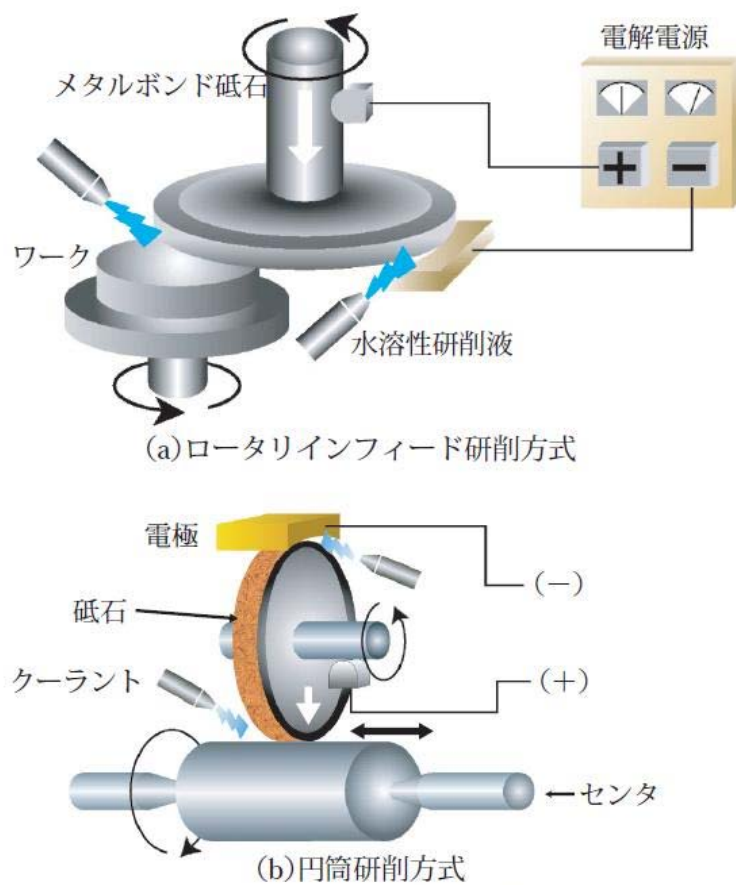
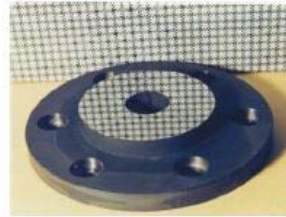


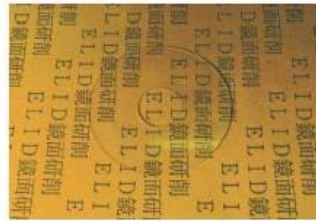
図 2-20 ELID 研削方式の例



(a) シリコンウェーハ



(b) 超硬合金金型



(c) ガラス基板



(d) SiC ロール



(e) ステンレス鋼電鋳金型



(f) ガラス非球面レンズ



(g) ジルコニアフェルール



(h) 超硬合金マイクロツール

図 2-21 ELID 鏡面加工事例

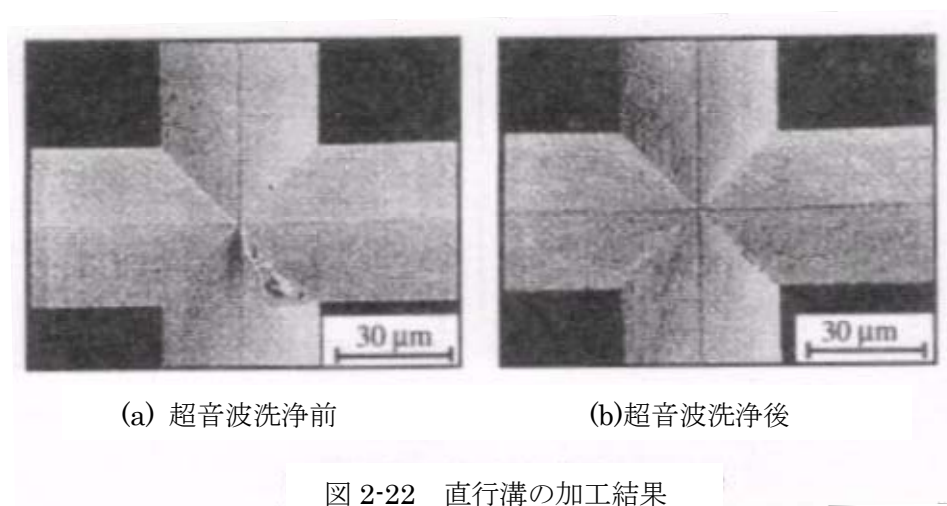
ELID 研削による加工事例を図 2-21 に示す。これまでに、単結晶シリコンやゲルマニウム、光学ガラス、セラミックス、超硬合金や鋼材などが加工されており、さまざまな工程で実用化が進んでいる。近年では、研削により特殊光学素子の製作も可能となっており、バイオインプラント材料加工への適用や、破壊起点の生じない高品位加工面により、マイクロツールの加工も実現されている。

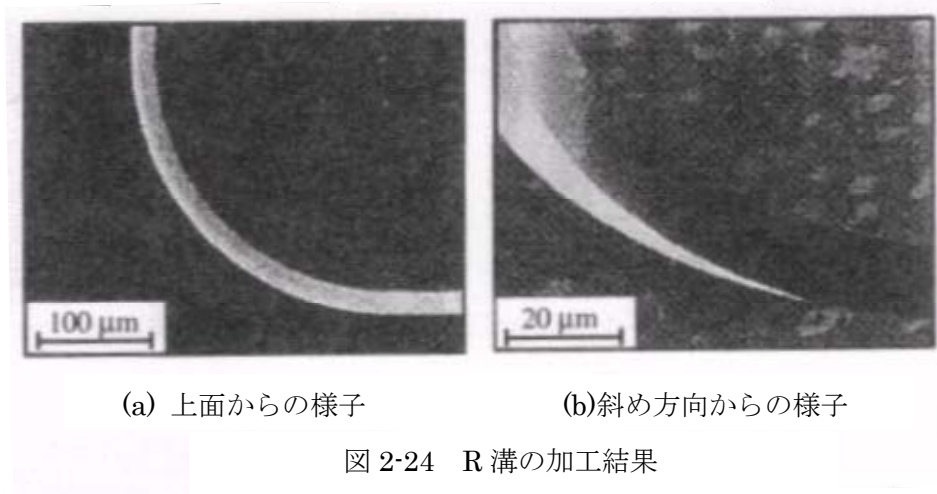
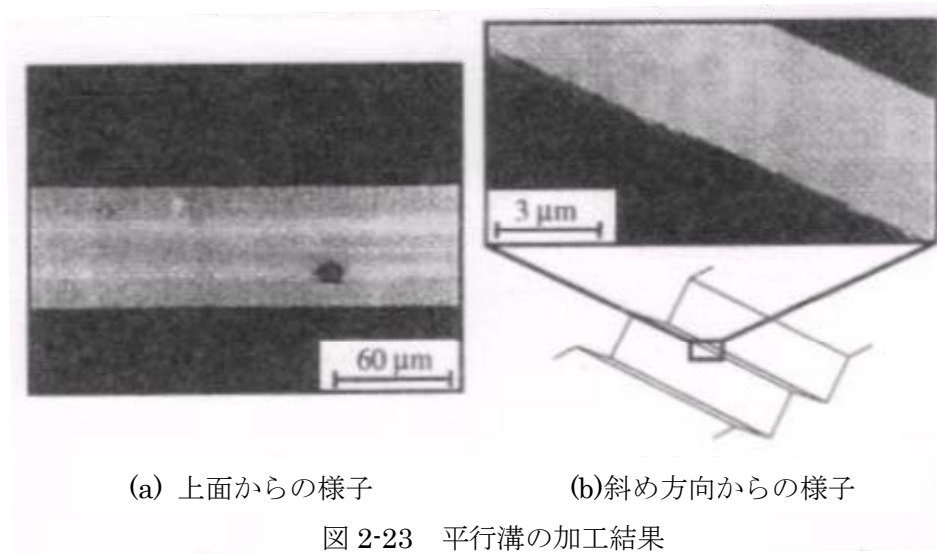
2. 2. 2 非回転工具を用いた超精密マイクロ溝の創成

マイクロ溝の加工法は、フォトリソグラフィとエッチング技術をベースとした半導体製造技術を基礎としているものと、機械加工技術によるものに大別できる。これまでに行われてきた機械加工によるマイクロ溝の加工は、一般的には旋盤系の加工機を用いることが多く、加工可能な溝形状は限定されていたが、最近では4軸制御超精密加工機を用いた自由度の高いマイクロ溝加工も試みられている。ここでは、非回転工具を用いた加工を行うことにより、連続的に変化する様々な曲率の溝を対象とした加工や、複雑な溝形状を持ち光学素子加工への応用についての可能性を検討する。²⁻¹⁸⁾

工具には単結晶ダイヤモンド工具を使用し、被削材に対して 7° の角度で切り込み深さ $20\mu\text{m}$ のV溝を創成する。バリの少ない良好な加工を行うためには、断面がV形状で波形にうねった切り屑をいかにして生成させるかに掛かっている。²⁻¹⁹⁾ここでは、低速領域においても良好な切削は可能であり、すくい角 0° 、1回の切り込み量 $0.5\mu\text{m}$ 、送り速度 $40\text{mm}/\text{min}$ 程度が適当な加工条件として割り出された。^{2-20) 2-21)}また、マイクロV溝の加工において、総切り込み量が小さいときの切り屑は厚く、直線的で、加工面には多くのバリが生じるが、総切り込み量が大きくなると切り屑は薄い波状となり、良好な切削が行われた。

直行溝を加工するために、1本の溝を深さ $20\mu\text{m}$ まで完全に加工した後、被削材を 90° 回転して交差させる溝を加工することにより、2本の溝を直角に交差させた形状の加工を行ったところ、2本目の溝を加工する際に、工具が1本目の溝斜面を抜ける部分でバリが見られた。このバリは超音波洗浄にて取り除くことができたが、溝稜線には非常に微小な歪みが生じている。2本目の溝を加工する際の送り速度を変化させても、バリの発生に顕著な変化は見られなかった。直行溝の加工結果を図2-22に示す。





平行溝を加工するために、1本の溝を深さ $20\mu\text{m}$ まで完全に加工した後に、Y 軸を $40\mu\text{m}$ 上昇させて2本目の溝を加工することにより、2本の溝が並んだ形状を加工した。平行溝においても大きなバリは生じなかったが、2つの溝が接する部分の稜線では溝全長にわたって微小な歪みが生じていた。その原因としては、溝の稜線が工具との切削抵抗を受けて変形したものと思われる。また、溝の後半では小さなバリも発生していた。平行溝の加工結果を図 2-23 に示す。

R 溝を加工するために、工具を被削材に切り込んで 1mm 送った後に、C テーブルを 90° 回転し、再び工具を 1mm 送ることにより直線の溝と半径 $220\mu\text{m}$ の R 溝が組み合わさった形状を加工した。バリもなく良好な加工が行われたことが確認された。R 溝の加工結果を図 2-24 に示す。

以上のように、マイクロ溝を利用した基礎的な形状を比較的良好に加工できたことから、非回転工具を用いた光学素子加工への応用も期待できるものと考えられる。^{2-22) 2-23) 2-24)}

2. 2. 3 ガラスのエンドミル加工によるマイクロチャネルの製造

微量サンプルの分析デバイスとして注目されているマイクロ TAS は、現在その殆どがエッチング処理によって製造されている。しかしながら化学反応に依存するこの製造方法では生産性が低いこと、マスクを使用するためにその製造コストが高いなどの問題がある。ここでは、ガラス基板に対してエンドミルによるマイクロチャネルの切削加工を試み、その特性を明らかにすることを目的としている。²⁻²⁵⁾

マイクロチャネルの加工工程は、ガラスに対してエンドミルがチャネルの深さ方向に切り込む過程と、横方向に送る過程から構成される。このようなエンドミル加工においては、1切れ刃当たりの送りが最大切削厚さになる。ガラスは $1\mu\text{m}$ 以下の切削厚さになると金属と同様の切り屑が形成され、脆性亀裂が発生せずに加工できる²⁻²⁶⁾ことから、エンドミル加工においては1切れ刃当たりの送りを $1\mu\text{m}$ 以下に設定する。

図 2-25 に示すように、マシニングセンタの主軸頭に最高回転数 80000rpm のブラシレスモータのスピンドルを取り付け、切削実験を行う。ここでは、切削液が十分に供給されるように、被削材を水槽内に保持している。²⁻²⁷⁾ ²⁻²⁸⁾ 工具には、 $\phi 0.3\text{mm}$ の TiAlN コートの 2 枚刃超硬スクエアエンドミルを用い、通常スライドガラスとして使用されるクラウンガラスに矩形断面のマイクロチャネルの作成を試み、溝縁部の脆性損傷状態を観察した。

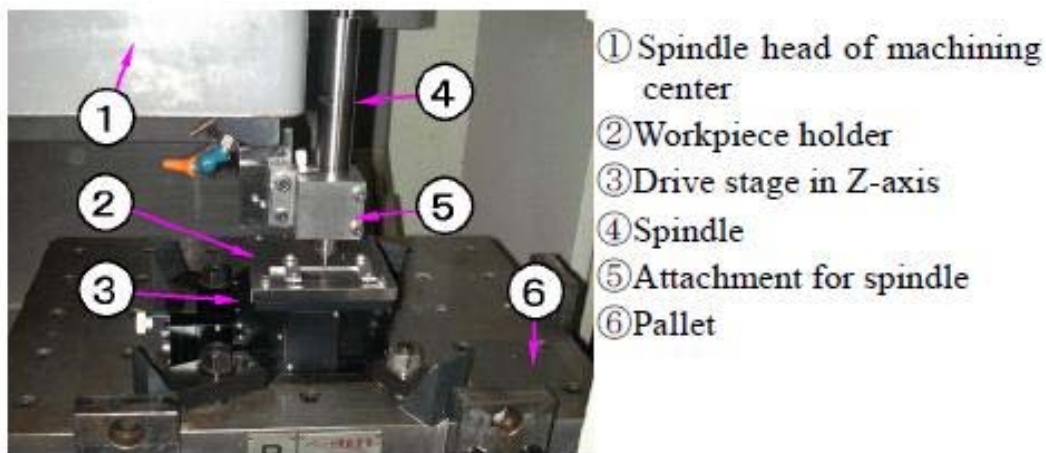


図 2-25 切削実験装置の概観

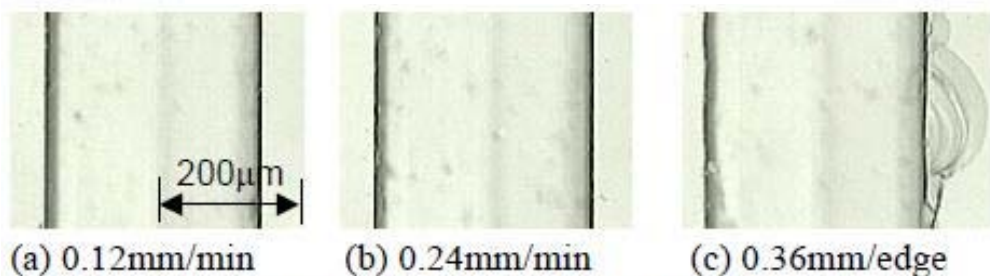


図 2-26 送り速度の変化による加工面への影響

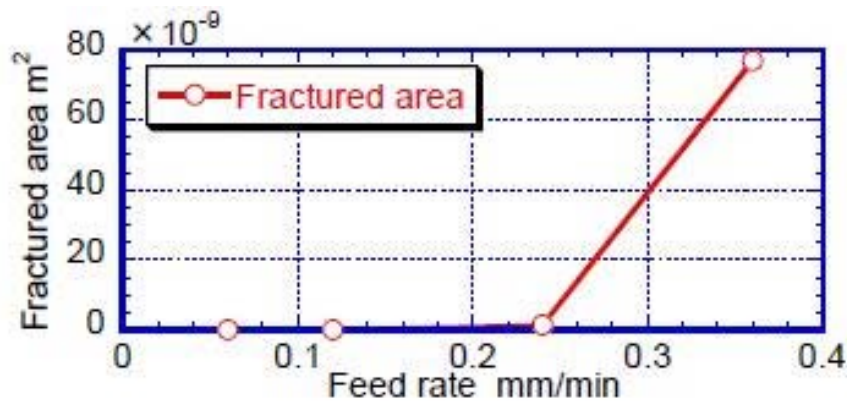


図 2-27 送り速度の変化による脆性損傷の総面積

回転数 20000rpm において、工具送り速度が加工面に及ぼす影響を図 2-26 に示す。また、送り速度に対して、溝端部に発生した脆性損料の総面積を図 2-27 に示す。送り速度の増加とともに溝縁部に観察される脆性損傷の大きさと数が増え、0.36mm/min ではかなりの脆性損傷が確認されている。送り速度を 0.48mm/min とし、工具回転数に対する加工面の比較を図 2-28 に示し、脆性損傷部の面積を図 2-29 に示す。低回転数では脆性損傷が生じているが、回転数の増加に伴い一切れ刃あたりの送り速度が小さくなり、50000rpm 以上の高回転数になると脆性損傷のない良好な加工面が得られている。この結果は、いずれも脆性損傷の有無に対して、一切れ刃あたりの送りの影響が大きいものと考えられ、一切れ刃あたり 4.8~6nm/edge の送り速度で脆性損傷のない加工が可能であることが明らかとなった。

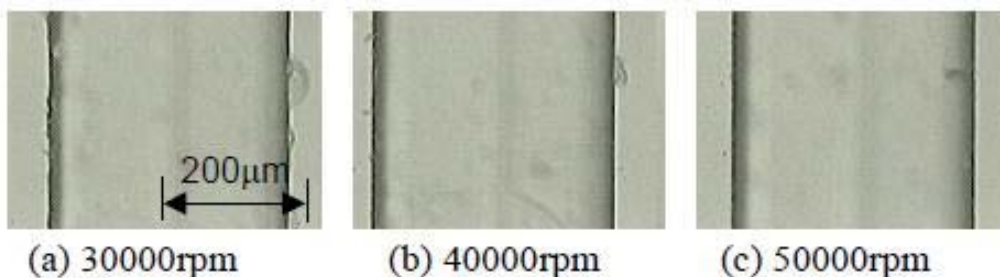


図 2-28 工具回転数の変化による加工面への影響

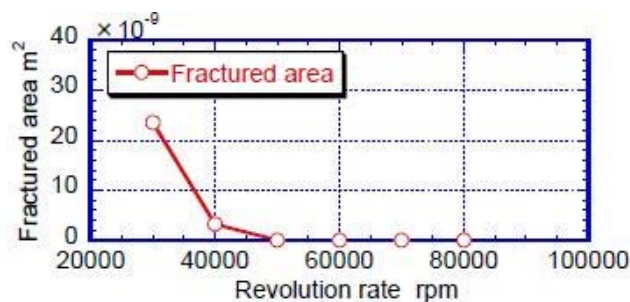


図 2-29 工具回転数の変化による脆性損傷の総面積

現在、医学などの研究機関におけるガラス基板としては、パイレックスガラスや石英ガラスの使用が一般的である。ここではパイレックスのガラス基板に対して、マイクロチャンネルの加工を試みた。切削条件は回転数 20000rpm、送り速度 0.12mm/min とし、水中で加工した。加工ワークの概観を図 2-30 に示す。(a)には縦および横に深さ $20\mu\text{m}$ のチャンネルを4本交差させ、 3×3 のマイクロアスペリティを加工した例、(b)には幅 0.3mm、深さ 0.1mmの矩形断面を持つ深溝のチャンネルを加工した例、(c)にはマイクロリアクターを想定した深さ $20\mu\text{m}$ のY字型のチャンネルを加工した例、(d)には深さ $30\mu\text{m}$ の渦巻状チャンネルを加工した例を示す。いずれも加工開始時点では脆性損傷はなく良好な加工面が得られているが、加工距離とともに溝幅及び深さが小さくなっている。レーザー顕微鏡にて、チャンネルの開始点と終点の断面形状を比較したものを図 2-31 に示す。

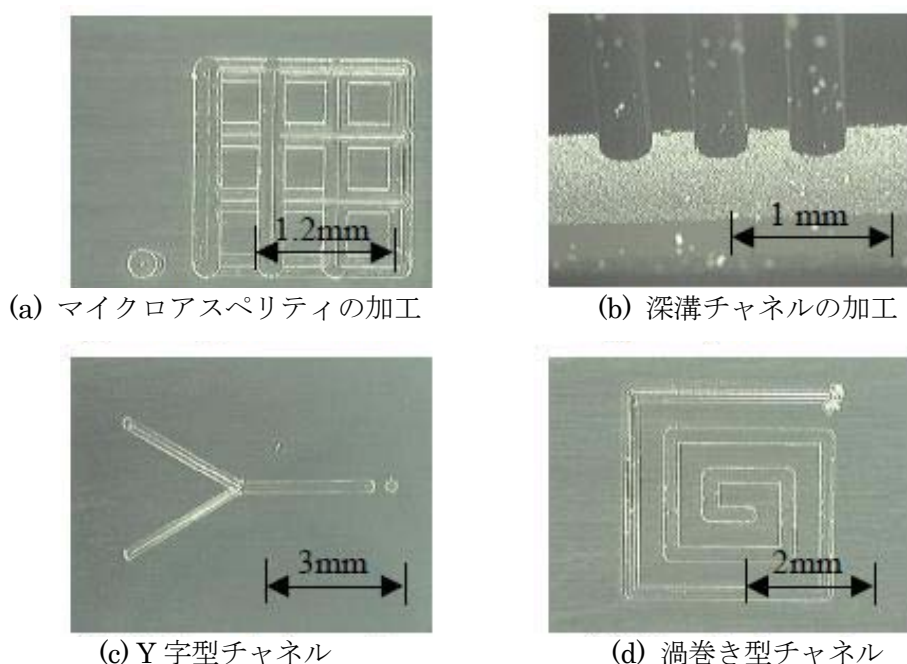


図 2-30 パイレックスガラス基板への加工事例

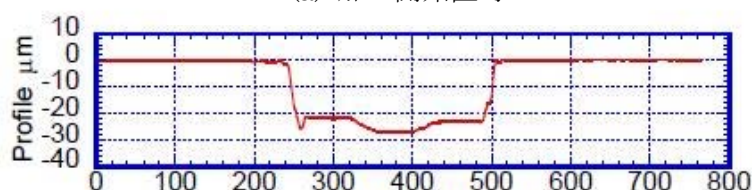
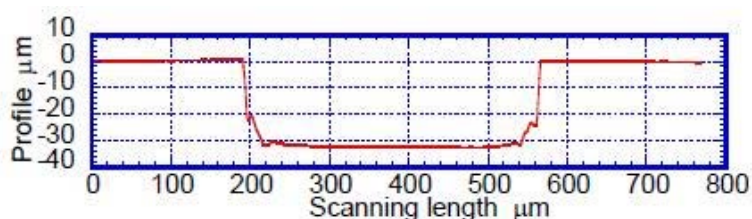


図 2-31 チャンネルの加工開始点と終了点の断面比較

2. 3 仕上げ加工技術に関する課題

本章では、金型の仕上げ加工と部品加工に関する従来の研究成果について述べた。

金型の仕上げ加工に関する研究では、磨き作業支援を目的としたエキスパートシステムの構築から、ロボットを用いた自動磨きシステム、粉末混入放電加工による磨きレス金型の製作に至るまで、様々な手法による成果が確認されている。しかしながら、これらの研究成果において現在の作業現場では実用化されないものも数多く含まれていることが現状である。また、部品加工に関する研究成果では、ELID 研削加工技術から、非回転工具による超精密マイクロ溝の創成、ガラスのエンドミル加工によるマイクロチャネルの製造に至るまで、高品質な加工技術による実用化が試みられている。しかしながら、その実現には多大な設備費用や工具寿命に関する課題が残されている。各研究事例において確認された課題について以下にまとめる。

- 課題 1) 金型や部品加工における仕上げ工程では、手磨き作業同等の表面粗さを得る機械仕上げ加工技術の実現が求められている。
- 課題 2) 機械加工による形状加工（荒加工）を行った後の段取り換えを省略できる仕上げ加工システムの実現が望ましい。
- 課題 3) 幅広い材種の被削材に対応でき、加工距離と工具寿命の増加が可能となる加工条件が明確であること。
- 課題 4) 限られた形状のみでなく、自由曲面や複雑形状に対応した高精度仕上げ加工システムが必要。
- 課題 5) 精密加工、自動磨き作業を行う際には、工具やロボット部の加工物への干渉回避は絶対条件となる。
- 課題 6) 硬脆材に対する精密仕上げ加工において、良好な加工面は得られているもののマイクロクラックの除去方法については未解明な部分が残されている。

以上の課題を解決することにより、現状では手磨き作業に委ねられている工程において機械仕上げ加工技術を導入した自動化が実現し、型技術、精密加工技術の開発に伴うものづくり技術の活性化が図られるものとする。

<参考文献>

- 2-1) 奥田長三：TRC800 金型加工トータルシステム，機械と工具，3(1987)42.
- 2-2) 三好隆志ほか：非接触 3-D デジタイジングシステムの開発研究，精密工学会誌，56，6(1990)1021.
- 2-3) T.Miyoshi et al. : Polishing Mechanism and Properties of a Dual-Axis Spherical Polishing Tool for Mold and Cavities, Proc. 6th ICPE, Osaka,(1989)7.
- 2-4) 佐々木哲夫、三好隆志、斎藤勝政、加藤木修：金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究（第1報）－金型熟練工の手磨き特性，精密硬学会誌，57,3(1991)497.
- 2-5) 佐々木哲夫、三好隆志、斎藤勝政、加藤正則：金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究（第2報）－金型磨きエキスパートシステム，精密硬学会誌，57,12(1991)2151.
- 2-6) 竹内芳美、浅川真紀、葛東方：ロボットによる磨き作業の自動化（第1報，磨きロボットシステムの構成），日本機械学会論文集，58,545,C(1992)289.
- 2-7) 葛東方、竹内芳美、浅川真紀：ロボットによる磨き作業の自動化（第2報，干渉回避した磨き経路の自動生成），日本機械学会論文集，59,561,C(1993)1574.
- 2-8) 葛東方、竹内芳美、浅川真紀：ロボットによる磨き作業の自動化（第3報，L形回転工具による6軸制御磨き），日本機械学会論文集，60,571,C(1994)1084.
- 2-9) 浅川真紀、竹内芳美：ロボットによる磨き作業の自動化（第4報，面粗さの測定とそれに基づく磨き），日本機械学会論文集，61,584,C(1995)1715.
- 2-10) 浅川真紀、大井大介、竹内芳美：ロボットによる磨き作業の自動化（第5報，超音波振動工具による6軸制御磨き），日本機械学会論文集，61,590,C(1995)4049.
- 2-11) Y.Takeuchi, M.Sakamoto, Y.Abe, and R.Orita : Development of a Personal CAD/CAM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques, *Annals of the CIRP*, 38-1(1989),429.
- 2-12) 後藤昭弘：粉末混入放電加工による磨きレス金型の製作，砥粒加工学会誌，44,6(2000)264.
- 2-13) 毛利尚武、斎藤長男、成宮久喜、河津秀俊、尾崎好雄、小林和彦、恒川好樹：粉末混入放電加工液による放電加工，電気加工学会誌，25,49(1991)47.
- 2-14) 後藤昭弘、湯沢隆、真柄卓司、小林和彦：放電加工層による加工特性の劣化とその防止に関する研究，電気加工学会誌，29,62(1995)49.
- 2-15) 大森整：ELID 研削加工技術，精密工学会誌，70,6(2004)757.
- 2-16) H.Ohmori, and T.Nakagawa : Mirror Surface Grinding of Silicon Wafer with Electrolytic In-process Dressing, *Annals of the CIRP*, 39,1(1990)329.
- 2-17) 大森整：超精密鏡面加工に対応した電解インプロセスドレッシング(ELID)研削法，精密工学会誌，59,9(1993)1451.

- 2-18) 前田真児、竹内芳美、沢田潔、河合知彦、佐田登志夫：非回転工具を用いた超精密マイクロ溝の創成，精密工学会誌，66,9(2000)1456.
- 2-19) 辻内順平：ホログラフィ実用技術とその展望，精密工学会誌，56,10(1990)1771.
- 2-20) 沢田潔、河合和彦、竹内芳美、佐田登志夫：超精密マイクロ溝加工の研究（V形状格子溝の製作），日本機学会論文集（C編），64,627(1998)4440.
- 2-21) 上田勝宣、住谷充夫：微細溝の超精密切削加工，精密工学会誌，52,12(1986)2016.
- 2-22) 森田晋也、山形豊、守安精、樋口俊郎：ホログラム光学素子の超精密切削加工に関する研究，型技術，13,8(1998)33.
- 2-23) 久門哲也、石田徹、竹内芳美、河合和彦、沢田潔：非回転工具を用いた超精密マイクロV溝加工，精密工学会誌，70,10(2004)1301.
- 2-24) 鈴木浩文、樋口俊郎、和嶋直、北嶋孝之、奥山繁樹、山崎洋：マイクロフレネルレンズ成形型の超精密研削，精密工学会誌，65,8(1999)1163.
- 2-25) 大野威徳、松村隆：ガラスのエンドミル加工によるマイクロチャネルの製造，精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2004)1013.
- 2-26) 松村隆、埜友宏：ガラスのナノ切削加工に関する研究（第1報）-ナノ切削加工機の試作と二，三の加工例-，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2002)314.
- 2-27) 横尾一将、柿沼康弘、青山藤詞郎、松村隆、角野充彦：マイクロエンドミルによるガラスの切削加工-工具先端位置センシングおよび切削液の化学的影響-，精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2006)1029.
- 2-28) 松村隆、小澤秀之、大野威徳：エンドミルのシャンク形状がガラス切削の脆性損傷に及ぼす影響，精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2008)153.
- 2-29) 田村昌一、松村隆、鈴木庸介、篠原尉浩、富田正機、橋本雅和、本田竜未、大橋利仙、森和男：小径ボールエンドミルを用いたガラスの切削加工，精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2007)61.
- 2-30) T.Matsumura and T.Ono：Glass Machining with Ball End Mill，Trans.of the NAMRC/SME，33(2005)319.

第三章 ヘール加工システムの開発

近年における自動車部品や家電製品の生産では、より高品質な製品を短納期にて大量に製造する必要性が高まっている。特に金型や精密部品などの製造には、回転工具を始めとする機械加工を活用することにより効率的な生産が行われるようになった。しかしながら、円弧形状の切れ刃を持つボールエンドミルやフラットエンドミルを使用した場合、その加工面は常に使用工具の切れ刃形状が転写された円弧状の回転痕が残った加工面となる。また、回転工具による加工では、工具中心軸から任意の円弧状の切れ刃位置に対してその回転半径が異なることから、切削速度と切削方向は一定とならない。特に、回転中心軸近傍においては、その切削速度はほぼゼロとなるため、良好な加工状態を得ることはできず、表面の粗い加工面となる。最終的な加工面に $1\ \mu\text{m}$ 以下のオーダーが要求される加工においては、残存した面粗さと加工残りを除去するための二次的な仕上げ工程が必要不可欠となる。この仕上げ工程は、熟練した職人による手磨きにより行われていることが現状であり、納期の短縮や低コスト化を実現するために、機械仕上げ加工の適用による手磨き作業の解消が有効とされる。

本章では、非回転工具を用いたヘール加工システム^{3-1) 3-2)}について紹介する。ヘール加工は工具を回転させずに材料を削ることにより、良好な仕上げ面を得ることが可能となることから、古くから直線形状や円形形状の溝入れ加工に利用されてきた。ヘール加工の利点は、刃先が仕上げ面の形状となっているため、エンドミル加工では不可能となるような断面形状の加工も可能となる所にある。しかし、従来ではプレーナやシェーバ、旋盤や割り出しテーブルなどにより加工を組み合わせなければならず、NC 工作機械上での使用を目的としたヘール加工技術の開発^{3-3) 3-4) 3-5)}が求められた。本研究にて用いるヘール加工システムは、多軸工作機械へ非回転工具用制御装置を付加することにより、精密なテーブル割り出しによる自由曲面形状への仕上げ加工を実現することが可能となる。ボールエンドミルによる加工とヘール工具による加工の模式図を図 3-1 に示す。

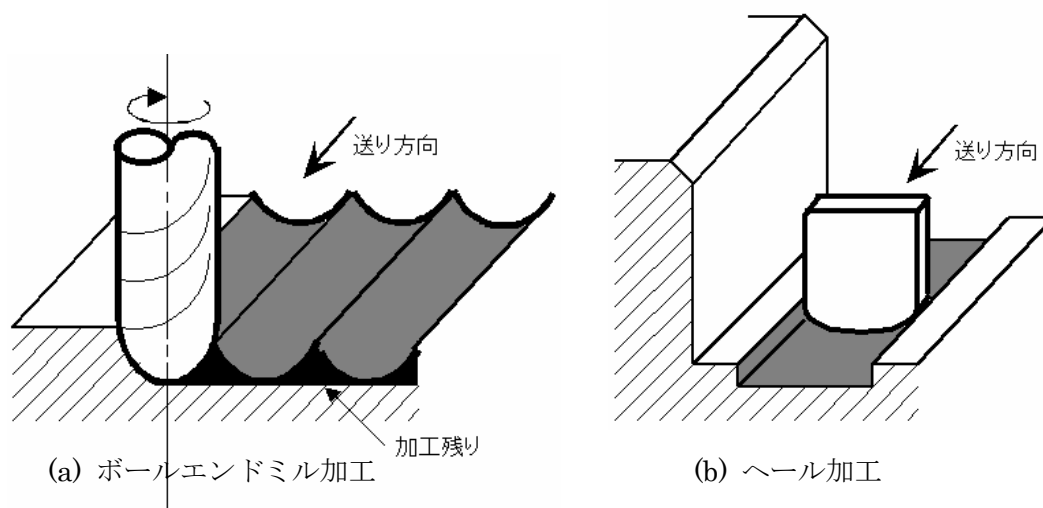


図 3-1 ボールエンドミル加工とヘール加工の模式図

3. 1 ヘール加工システムの概要

3. 1. 1 ヘール工具

切削加工において、高品質な加工面を得るための条件として、工具の選定は非常に重要な課題となる。本研究にて使用した工具には、超硬合金、単結晶ダイヤモンドに加えて、超音波振動用工具としてサーメット、バインダレス cBN、単結晶ダイヤモンドを用いた。

超硬合金は、タングステンカーバイトとコバルトの混合材を高温で焼き固めることにより造られ、硬さはダイヤモンドとサファイアの間程に位置し、重さは鉄の2倍近くとなる。これより、強い衝撃や高熱に耐えうることが可能な超硬合金は、現在の工具材料の主力となっている。

サーメットはセラミック成分と金属成分を含有しており、焼結や分散などの方法により製造される。航空機産業や原子力工業、及びミサイルの製造などに使用され、炉や金属の鋳造にも用いられる他、軸受けやブレーキのライニング等の製造にも使用されている。主要なサーメットは、次の物品から得られる。

- (1) 金属と酸化物：鉄と酸化マグネシウム、ニッケルと酸化マグネシウム等
- (2) ボロライト：ホウ化ジルコニウム、ホウ化クロム
- (3) ジルコニウム、クロム、タングステン等の炭化物にコバルト、ニッケル又はニオブを混合したもの
- (4) アルミニウムクラッド：ボーライルサーメット（炭化ホウ素とアルミニウム）

バインダレス cBN は、結合のためのバインダや焼結助剤を含まず、立方晶窒化ホウ素のみから形成され、 $0.5\mu\text{m}$ 以下の微細な粒子の結合により、高度や熱伝導性が高く、耐熱性に優れている。cBN は、ダイヤモンドに次ぐ高い硬度、熱伝導率を有する物質であり、鉄系材料との反応性が低く、 1000°C の高温下においても酸化しないなど、熱的・化学的にダイヤモンドよりも安定している。この cBN 粉末を結合材と共に超高压高温下で焼き固めた cBN 焼結体は、cBN 本来の特性と、結合材の化学的特性との相乗効果により、優れた性能を発揮するため、焼入れ鋼や鋳鉄など、鉄系材料に対する、高能率加工用切削工具の素材として、広く用いられている。しかしながら、ヘール加工に使用する工具へのコーティングとして、通常の cBN を塗布した場合、バインダ部分からの剥離が生じることがある。このバインダによる剥離を防ぐため、バインダ含有率が1%以下となるバインダレス cBN をコーティングしたヘール工具を用いた。

ダイヤモンドは、現存する物質の中でもっとも硬度の高いものとされており、切削用工具として用いる場合には、チップ先端の鋭度を高く仕上げるのが可能となる。しかし、硬質材の切削への使用を行う場合には、非常に脆い性質を持ち合わせており、特に鋼材を始めとする鉄系材料との反応性が高く、金型の切削での使用は不適とされている。現状では、ダイヤモンド工具による鋼材の切削としては、超音波加振を伴う切削に限り、適用の実績が報告されている。

本研究では、アルミ合金を対象とした切削に対しては、超硬合金、単結晶ダイヤモンドを用いたヘール工具を使用し、鋼材を対象とした切削に対しては、超音波振動装置に対応したサーメット、バインダレス cBN、及びダイヤモンドを用いたヘール工具を使用した。

実験で使用したヘール工具の形状を図 3-2、図 3-4 に示す。

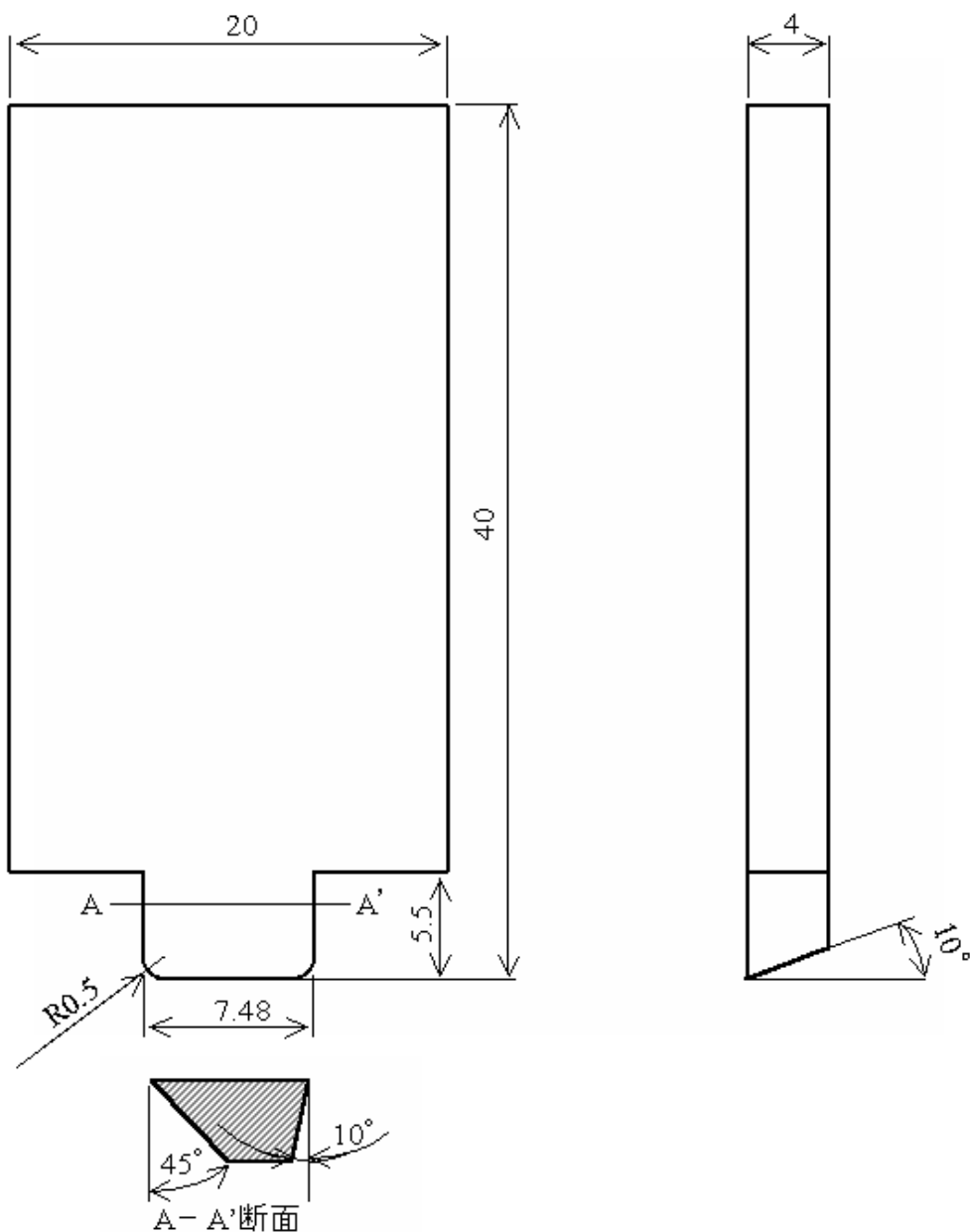


図 3-2 超硬ヘール工具

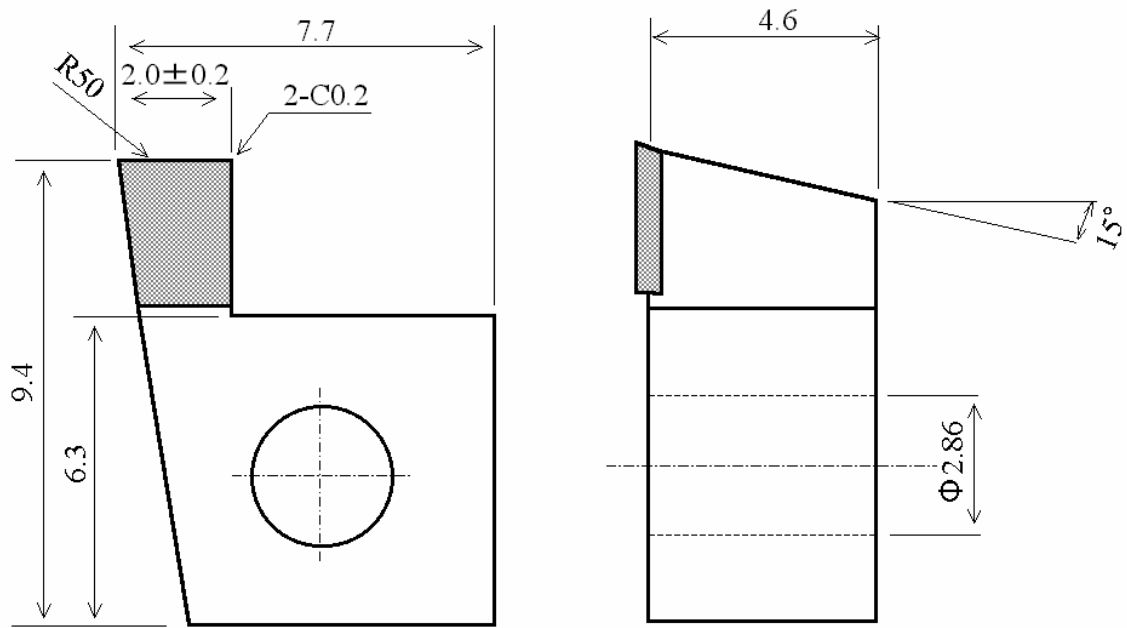


図 3-3 超音波振動装置用サーメットヘール工具
 (バインダレス cBN、ダイヤモンドチップはグレー部にコーティング)

3. 1. 2 ヘール工作機械

実験で用いたヘール工作機械は、(株)松浦機械製作所製の縦型フライス盤 MAM72-3V (改良型)、(株)PMT 製の縦型フライス盤 MNF2005 の 2 台である。

MAN72-3V は、平成 12 年度地域コンソーシアム研究開発事業³⁻⁶⁾にて実施した「6 軸高精度ヘール加工システムの開発」にて構築された加工装置であり、本来 5 軸制御仕様である制御部分に工具軸の割り出し制御装置を追加することにより、計 6 軸制御が可能となる NC 装置を取り付けたものである。6 軸サーボ制御用 NC として、(株)安川電機製の数値制御装置 YASNAC-J100ISA を使用した。写真 3-4 に MAM72-3V の概観を示す。

MNF2005 は、2005 年度「マイクロ・ナノファブ리케이션技術の開発」にて構築された加工装置であり、リニアスライドにて材料の位置決めを行う 3 軸制御に加えて、工具軸の割り出し制御装置を追加することにより、計 4 軸制御を可能としている。写真 3-5 に MNF2005 の概観を示す。



図 3-4 ヘール工作機械 MAM72-3V の概観



図 3-5 ハール工作機械 MNF2005 の概観

3. 1. 3 周辺装置

本実験では、金型部品の仕上げ加工を実施するにあたり、超音波振動装置を用いた加工実験を行った。超音波加振には幾つかの方法があり、上下振動、前後振動、楕円振動などが挙げられる。上下振動や楕円振動を用いる場合には、切込み深さ方向の位置決めが定まらないため、今回の実験では、切込み深さ方向の変移が極力微小となる前後振動を用いる。加振原理としては、ホルダ外周に取り付けられたハール工具に主軸円周方向の捻り振動を与えることにより、局所的な前後振動を発生させる。超音波振動装置には富士工業製ダクテロイを使用した。超音波振動装置の概観を図 3-6 に示す。

また、加工中の切削動力を測定する際には、キスラー社製切削動力計 9256A を用いた。工作機械へ超音波振動装置、および切削動力計を取り付けた装置概観を図 3-7 に示す。

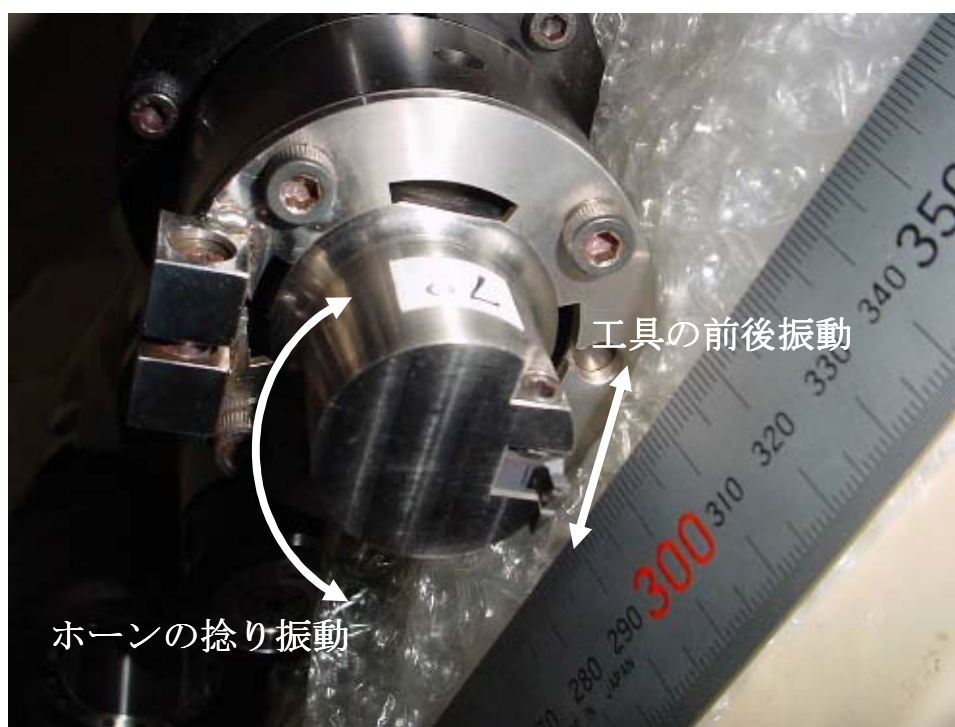


図 3-6 超音波振動装置の概観

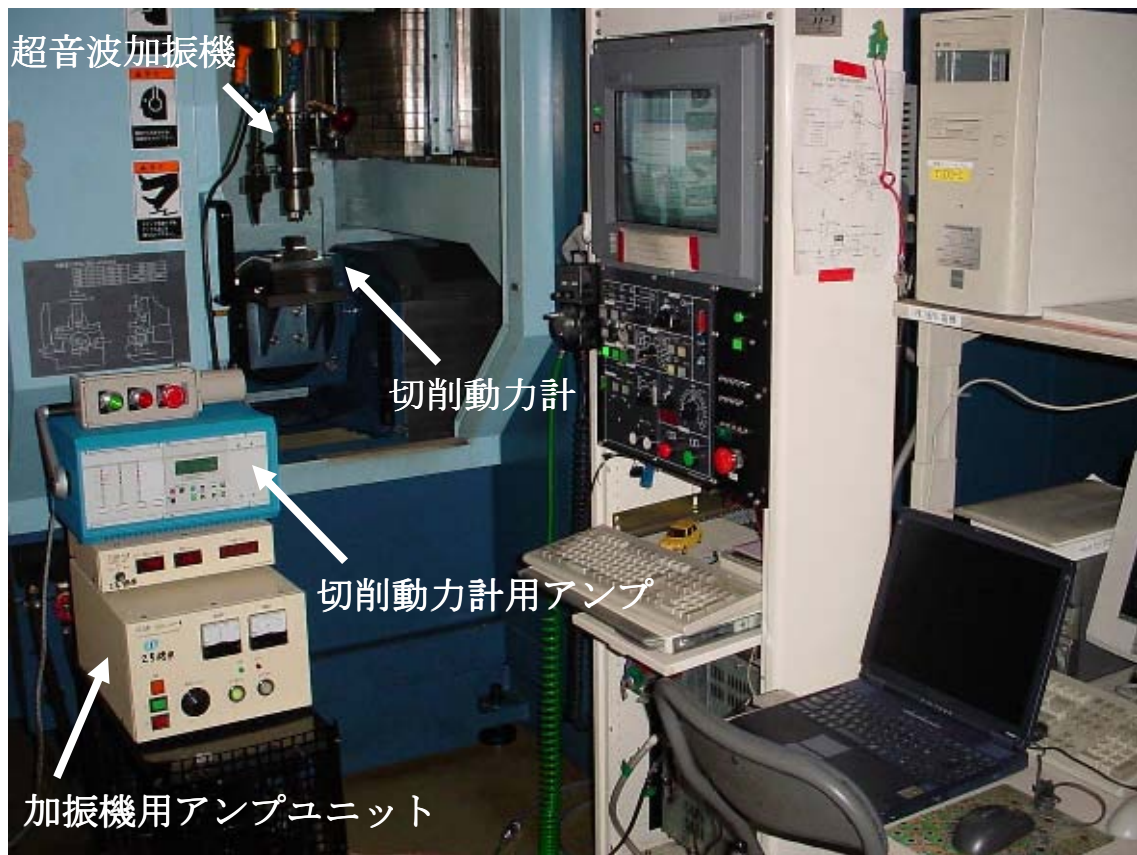


図 3-7 実験装置の概観

3. 2 ヘール加工における加工条件

3. 2. 1 切り込み深さによる加工面への影響

切削加工において、切り込み深さの設定は工具への負担を左右するだけでなく、加工面の仕上がり影響が大きい。工具への負担を抑えながら加工時間を短縮し、かつ加工面の仕上がり品質を考慮するためには、最適な切り込み深さの設定が必要となる。ここでは、切り込み深さの変化が加工面へ及ぼす影響について、表面粗さの比較により評価する。

実験条件として、被削材にアルミ合金 A2017 材、超硬ヘール工具と単結晶ダイヤモンドヘール工具による直線切削を行った。実験結果を図 3-8 に示す。

実験結果より、工具の切り込み深さが微小になるにつれて工具送り方向、工具送り直角方向共に表面粗さが低減され、良好な加工面が得られていることが確認された。また、超硬工具による加工面に比べ、単結晶ダイヤモンド工具による加工面は極めて良好であり、サブミクロンレベルでの鏡面仕上げ加工が実現されたことが確認できる。

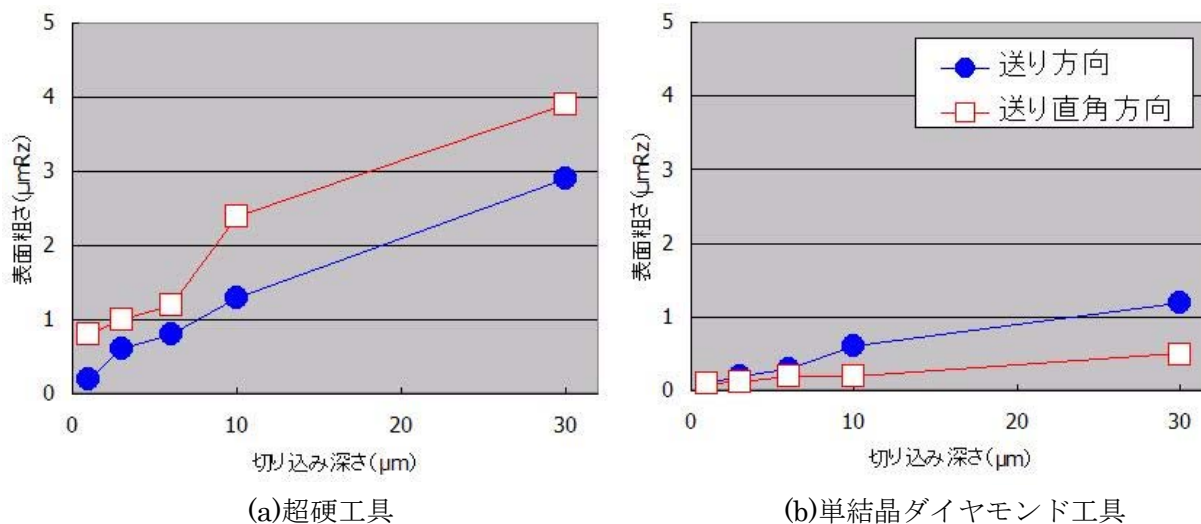


図 3-8 切り込み深さの変化による加工面への影響

3. 2. 2 工具の傾斜角による加工面への影響

非回転工具によるヘール加工では、加工中にビビリにより微小な振動痕が加工面に残ることがある。高硬度材の切削や切削幅が大きい条件での加工の場合では、ビビリ現象が生じやすい。ビビリのメカニズムとしては加工面の状態や切削条件により、様々なものが原因として考えられている。ここで工具の傾斜角度によるビビリへの影響を考えた場合、一般に工具すくい角が正であればビビリが生じやすく、工具すくい角が負であればビビリは少なくなるが、加工面のむしれが生じやすいという傾向が考えられる。

ここでは、ヘール加工による仕上げ加工を行うにあたり、工具姿勢の変化（C軸の変化）、およびテーブル姿勢の変化（すくい角の変化）を行った際の加工面への影響を把握するために、傾斜切削を行った際の加工面への影響を調べた。

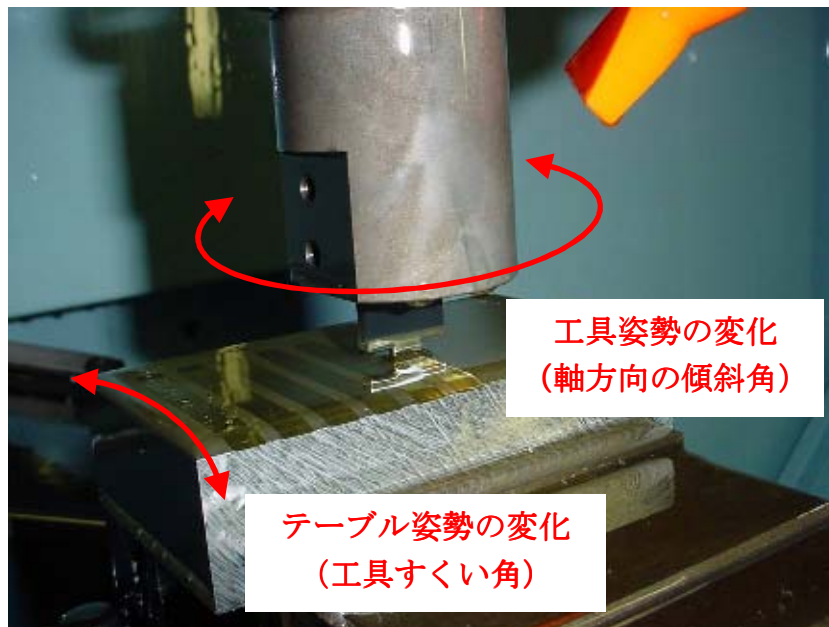


図 3-9 傾斜切削実験の概要

(1) 軸方向の工具傾斜角による加工面への影響

ヘール加工の特徴として、加工を行う際の工具軸姿勢を制御することができる。平坦な平面の仕上げ加工を行う際には、ピックフィード量を細かく設定するなどの加工条件により、面精度の仕上がりや加工時間の調整が可能となるが、曲面形状や複雑形状の仕上げ加工を行う場合には、工具を傾斜状態の姿勢に保ったままの加工を行う必要性が生じる。

ヘール工具を軸方向に傾斜させた状態の加工では、工具底面部分の切削幅が変化するため、切削加工面における面精度への影響が考えられることから、工具軸の傾斜状態が加工面に及ぼす影響を確認する。

被削材にはアルミ合金 A2017 を用い、超硬ヘール工具による加工を行う。2次元の直線切削において、工具姿勢 (C 軸) を -5 度から 30 度へと 5 度刻みで変化させた場合の加工面の状態及び、表面粗さの測定による評価を行う。切込み深さを $2.0\mu\text{m}$ 、切削速度を $1.5\text{mm}/\text{min}$ に設定する。またオイルクーラントとして、植物性油 JIS 第二種スペシャルカットを使用する。切削モデルを図 3-10、実験を行った加工面の概観を図 3-11、表面粗さの測定結果を図 3-12 に示す。

軸方向の傾斜実験においては、工具姿勢の変化による加工面の概観や表面粗さへの大きな影響は確認されなかった。これにより、加工形状による工具幅の制約が生じた場合、工具姿勢を変化させた状態での加工は有効であることが明らかとなった。

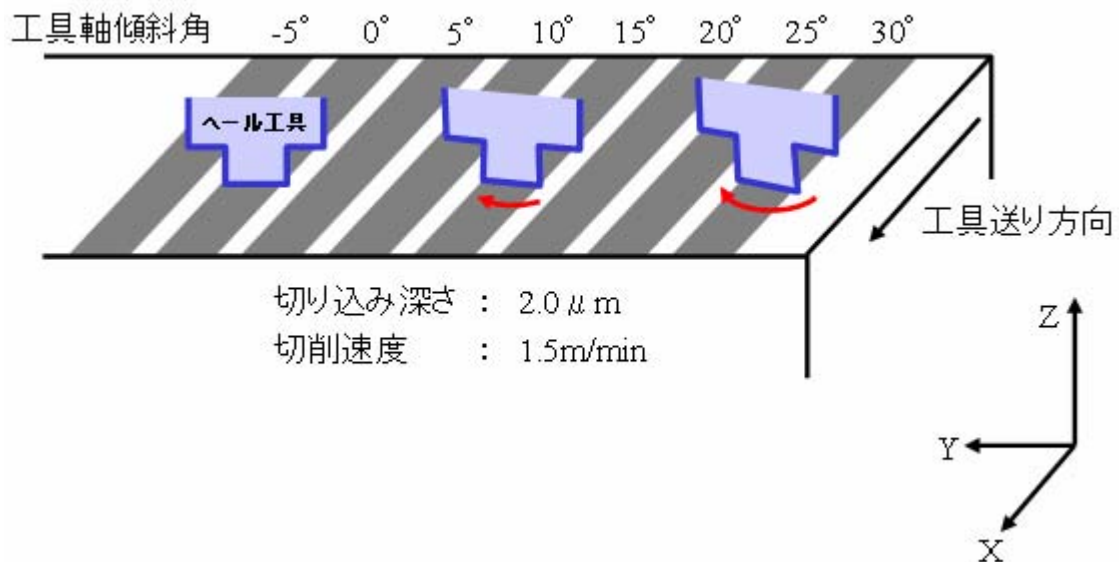


図 3-10 軸方向の傾斜切削実験モデル

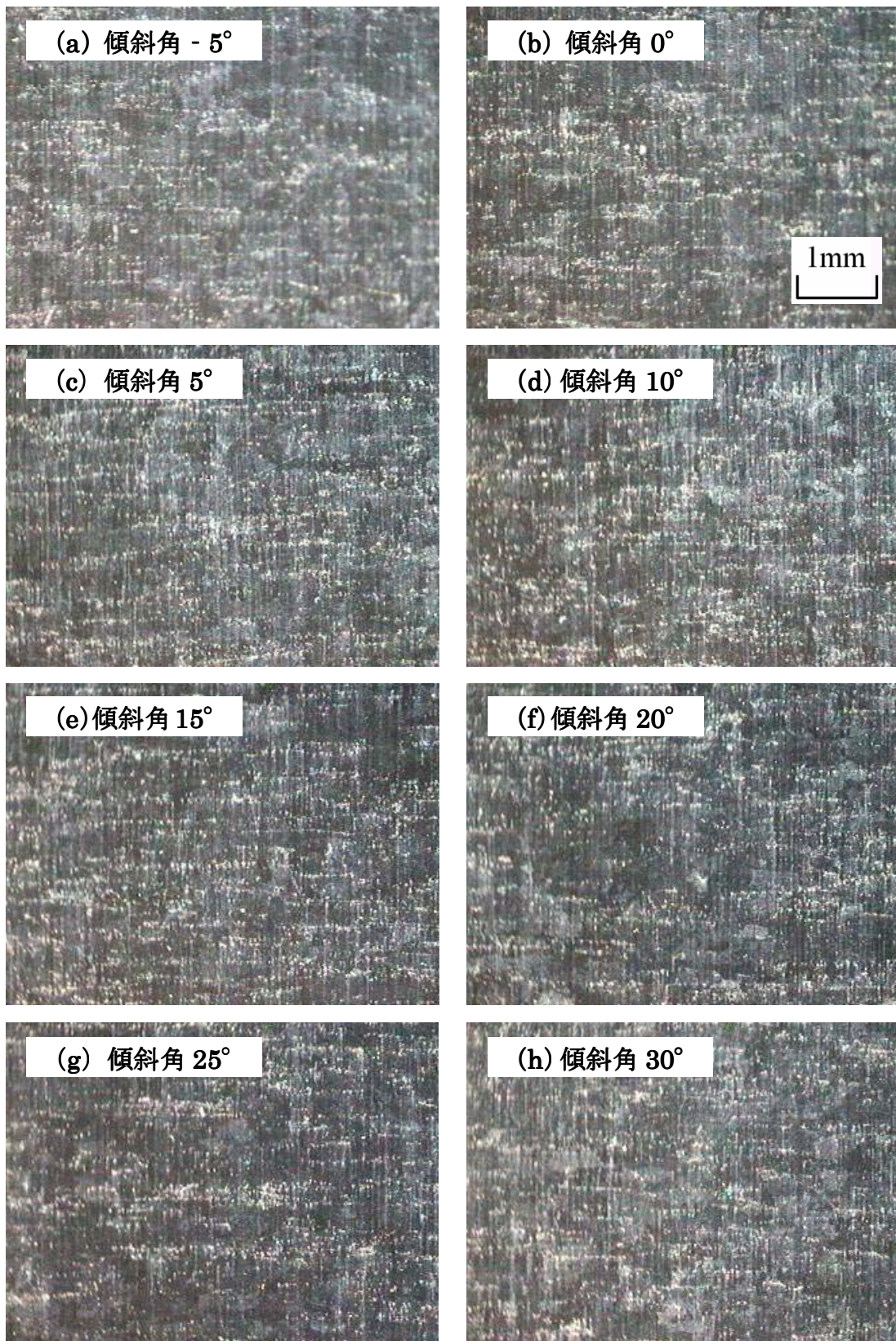


図 3-10 軸方向の傾斜切削実験結果 (加工面の概観)

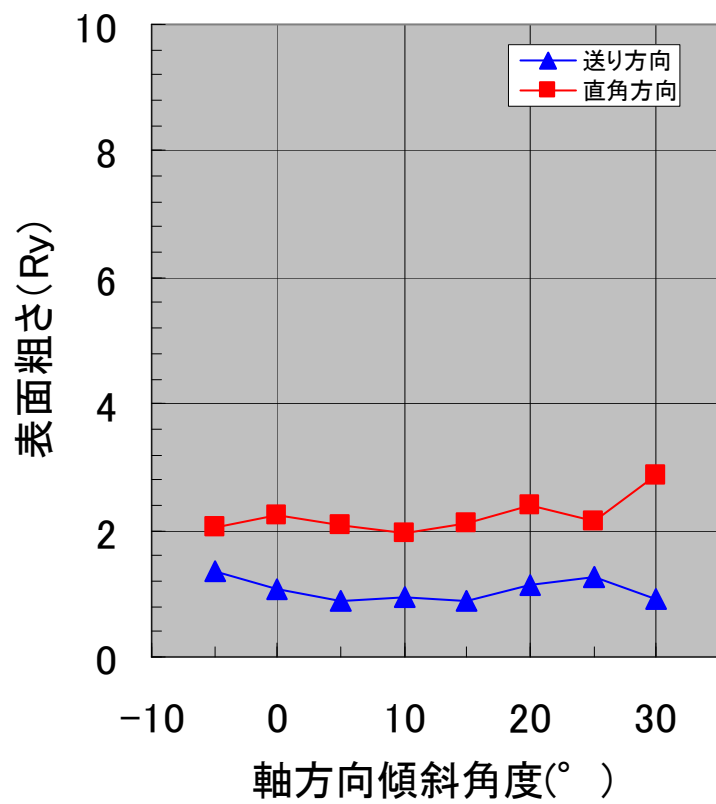


図 3-12 軸方向の傾斜切削実験結果 (表面粗さの測定結果)

(2) すくい角方向の工具傾斜角による加工面への影響

ヘール加工を行う際の要素として、工具刃先のすくい角の決定が必要となる。工具刃先のすくい角を正にした場合、切り屑せん断角が増加すると共に加工状況としては良好なものとなるが、加工時における工具たわみにより切り込み深さが増加する傾向となる上、ビビリ現象が生じやすくなる。一方、工具刃先のすくい角を負にした場合、ビビリ減少を抑えることができる反面、切り屑せん断角が減少し、圧縮応力の増加により加工面へのむしれ減少が生じやすくなる。

ここでは、工具すくい角によるビビリ現象、及びむしれ現象が、加工面の表面粗さに与える影響について確認する。

加工条件としては、軸方向の傾斜加工実験と同様とし、工具すくい角（テーブル旋回角）を -15 度から 15 度へと 5 度刻みで変化させた場合の、加工面の状態及び、表面粗さの測定による評価を行う。切削モデルを図 3-13、実験を行った加工面の概観を図 3-14、表面粗さの測定結果を図 3-15 に示す。

すくい角方向の傾斜実験においては、特にすくい角が正となる領域において、加工面におけるビビリの発生が確認された。一方、すくい角が負となる領域においては、明確なむしれ現象は確認されないが、加工面における光沢（つや）に差が生じたことから、むしれの度合いに変化が生じたと考えられる。これにより、ビビリやむしれの発生が共に少ない、工具すくい角 0 度近傍の領域が安定した切削が行えることから最適な加工条件であることが明らかとなった。

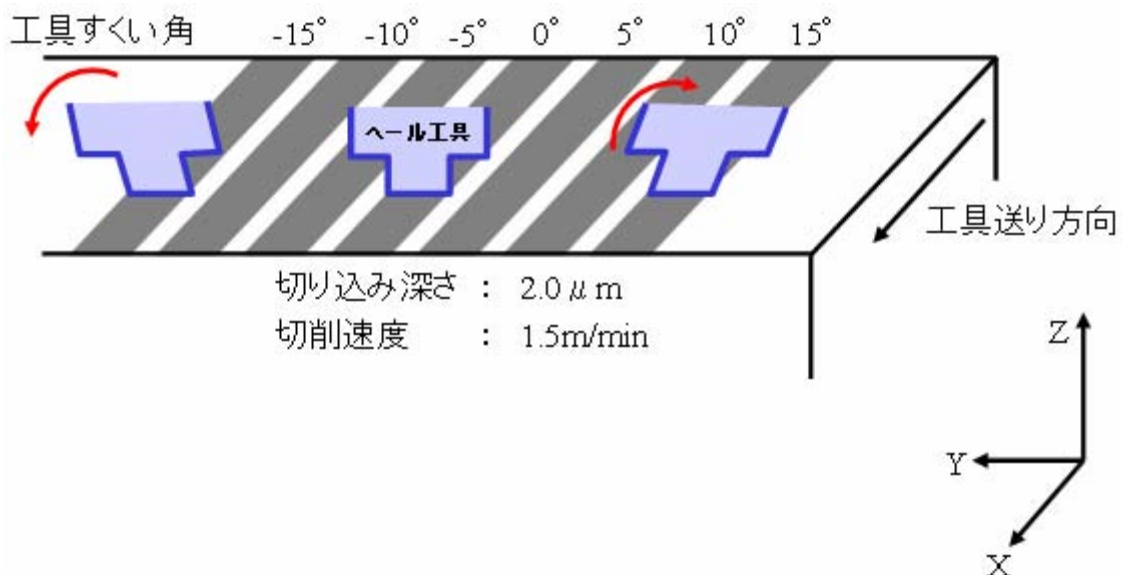


図 3-13 すくい角方向の傾斜切削実験結果（表面粗さの測定結果）

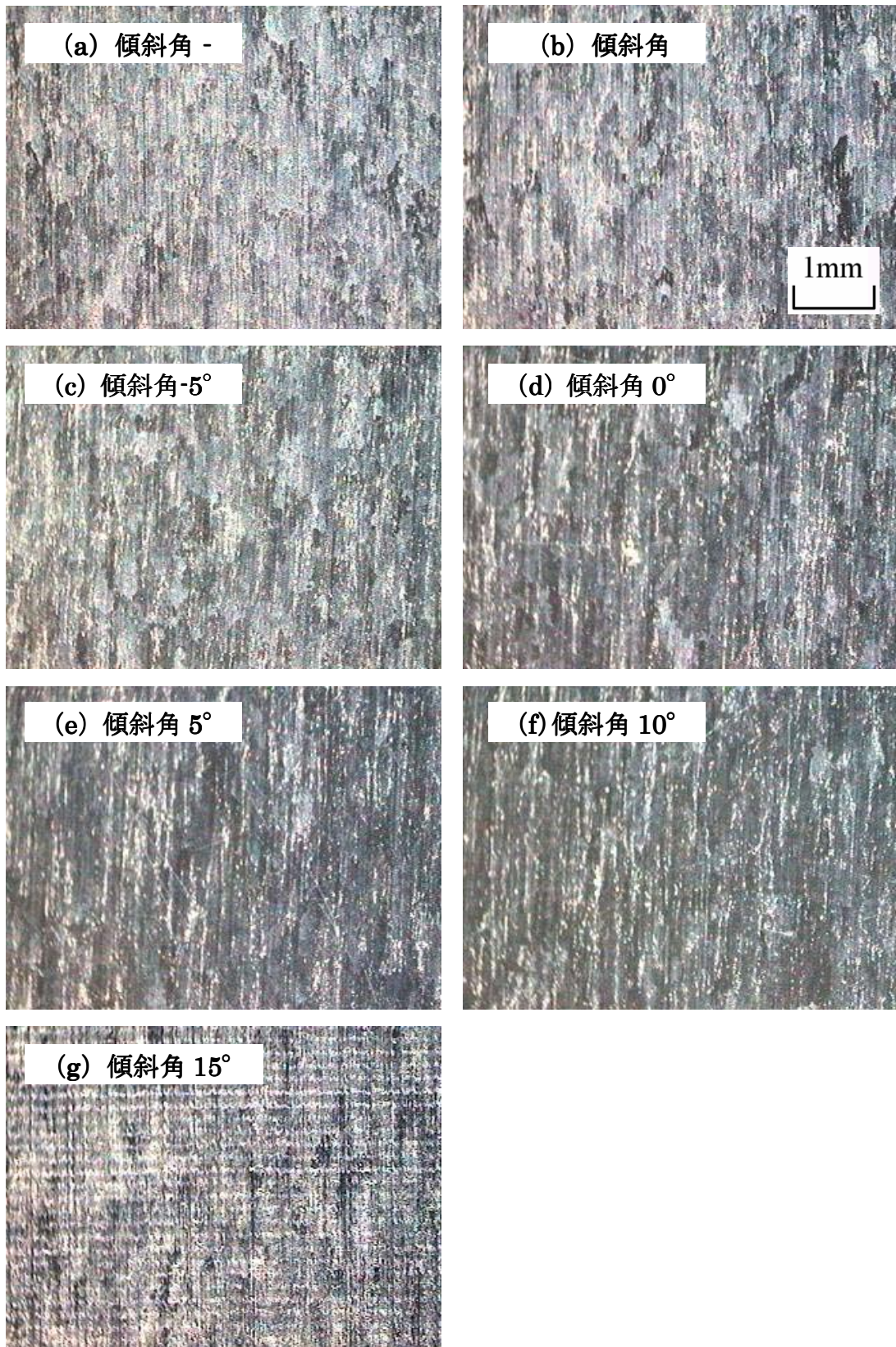


図 3-14 すくい角方向の傾斜切削実験結果 (加工面の概観)

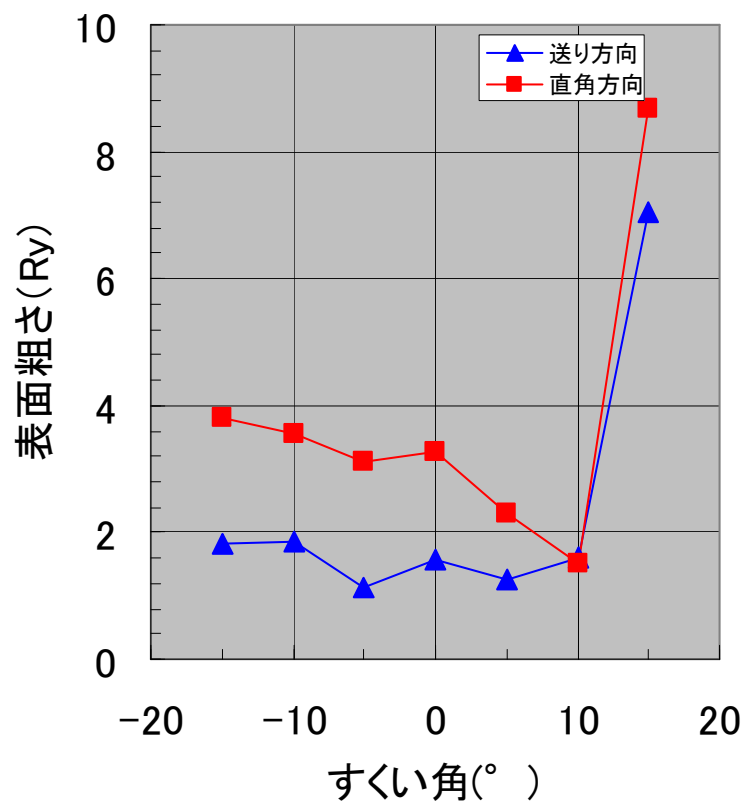


図 3-15 すくい角方向の傾斜切削実験結果（表面粗さの測定結果）

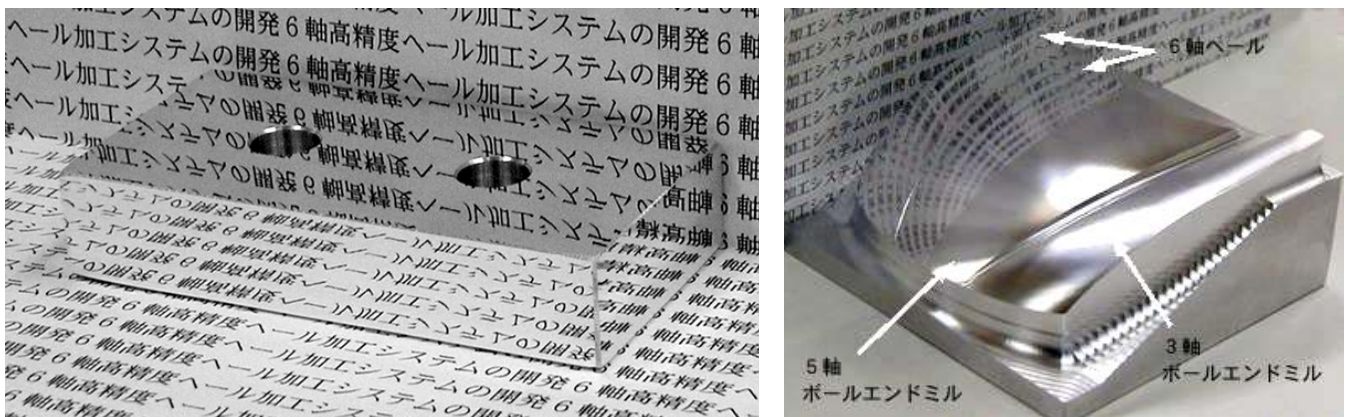
以上の結果より、ヘール加工を行う際には、工具軸方向の傾斜を伴う切削には特別な制約は生じないが、すくい角方向の傾斜については0度近傍における加工が望ましいことから、特に曲面仕上げにおけるヘール加工を実施する際には、常に加工面に対する工具の姿勢を正確に制御する必要があることが明らかとなった。

3. 3 ヘール加工によるアルミ合金の鏡面仕上げ加工

前節にて、アルミ合金を対象とした非回転工具によるヘール加工では、工具の選定や切り込み深さ、工具姿勢の制御を最適に行うことにより、高品質な鏡面仕上げ加工が可能となることを確認した。ここでは、具体的な加工事例としてアルミ合金を対象とした多面体の鏡面仕上げ加工、およびボンネット形状の曲面仕上げ加工の成果について報告する。

平面の鏡面仕上げ加工では、半導体製造装置の関連部品で多く用いられるアルミ合金 A2017 の直方体形状の上面と側面に対して、単結晶ダイヤモンド工具を用いたヘール加工により、切り込み深さを荒加工で $20\mu\text{m}$ 、仕上げ加工で $1\mu\text{m}$ とし、切削速度を $5\text{m}/\text{min}$ の加工条件下で加工を施した。加工面粗さは工具送り直角方向で約 $0.06\mu\text{mRz}$ の鏡面仕上げ加工が実現された。

同様に曲面の鏡面仕上げ加工では、ボンネット形状を対象として単結晶ダイヤモンド工具を用いたヘール加工を施した。形状の領域を 3 分割した上で、3 軸ボールエンドミル加工、5 軸ボールエンドミル加工、単結晶ダイヤモンドヘール加工による仕上げ品質の比較を行った。各加工ワークの概観を図 3-16 に示す。



(a) 多面体の鏡面加工ワーク

(b) 曲面の鏡面加工ワーク

図 3-16 アルミ合金を対象とした鏡面加工ワークの概観
※2000 年度地域コンソーシアム研究開発事業成果

3. 4 本章の結論

切削加工における高品質な仕上げを実現するため、非回転工具を用いたヘール加工システムの開発を行い、加工条件の変化や工具姿勢による加工面への影響について確認した上で、アルミ合金を対象とした鏡面仕上げ加工実験を実施した。

その結果、工具軸方向に対する工具姿勢については、 $-5\sim 30^\circ$ の範囲においては加工面への明確な影響は見られないことから、自由度の高い加工が可能となることが明らかとなった。また、工具すくい角方向に対する工具姿勢については、むしろやびびりの発生を抑えるために、すくい角 0° 付近での加工が望ましいことが明らかとなった。ヘール加工システムによる仕上げ加工に関して、アルミ合金を対象とした平面形状、曲面形状については共にサブミクロン以下の高品質な鏡面仕上げ加工が実現できることが確認された。しかしながら、多岐に広がる機械加工事例において仕上げ工程への適用を行うためには、汎用的な工作機械による高品質な仕上げ加工の実現が求められ、工作機械の主軸部への工具姿勢制御装置の付加や使用工具の製作における費用の低減、加工時の温度管理や湿度、雰囲気に至るまで多くの条件をコントロールする必要がある。

以上の結果に基づいて、第 4 章以降では金型部品や精密部品を対象とした幅広い適用を実現するための研究成果について述べる。

<参考文献>

- 3-1) 鈴木裕、桑野義正、後藤勝征、竹内芳美、佐藤眞：5軸加工用CAMシステムの開発，精密工学会誌，60, 6(1994)431.
- 3-2) 竹内芳美、佐藤眞、鈴木裕：New Concept of Machining by Means of 6-Axis Control, Annals of the CIRP, 43, 1(1994)431.
- 3-3) 鈴木裕、是澤宏之、原槇真也、林朗弘：金型型面実時間加工システムの開発，日本機械学会論文集，60, 577(1994)2900.
- 3-4) 竹内芳美、横山信人、久木達也、鈴木裕、佐藤眞：6軸制御による自由曲面平滑加工，精密工学会誌，60, 12(1994)1786.
- 3-5) 神谷昌秀、佐藤裕一、林朗弘、鈴木裕：倣いシミュレーションに基づくCAMシステムの開発（境界表現法への適用とその高能率加工），日本機械学会論文集 C 編，63(1997)608.
- 3-6) 6軸高精度ヘール加工システムの開発，地域コンソーシアム研究開発事業報告書(1998-2000)，新エネルギー・産業技術総合開発機構.

第四章 超音波振動を用いたヘール工具による 金型部品の仕上げ加工

製品の量産に用いられる金型には様々な種類があるが、その多くはプラスチック製品の射出成形金型や自動車ボディ成形などのプレス型に代表される。主な金型の種類毎に要求される加工面積と面粗さの関係を図 4-1 に示す。金型部品の加工工程においては工作機械による自動化が成されているが、その加工面の粗さを μm 以下のオーダーに仕上げするためには、熟練技術者による手磨き仕上げに頼らざるを得ないことが現状である。近年では精密金型の需要増加に伴い、金型部品表面の粗さを低減するための精密加工の必要性がより一層増している。

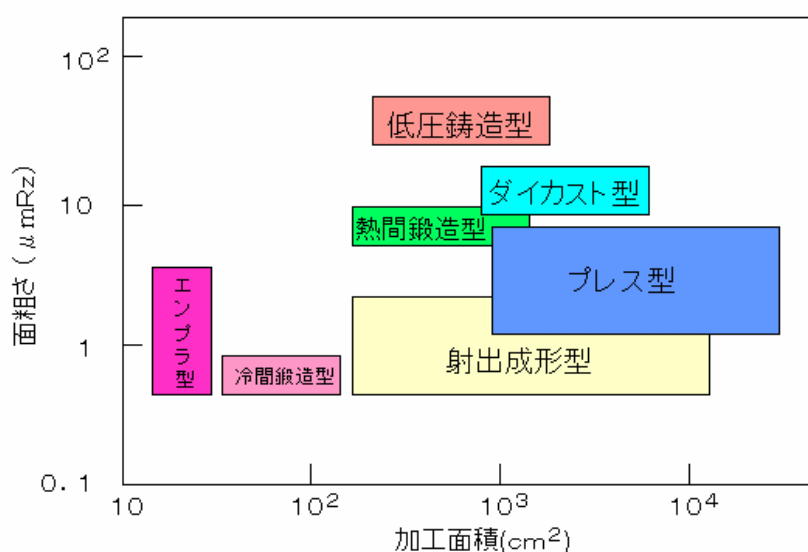


図 4-1 金型の種類と要求面粗さ

金型部品の加工には回転工具による機械加工が多く用いられており、高速ミーリングによる加工時間の短縮や高い生産効率が利点として挙げられる。しかしながら、その加工面には刃先の回転による特有の加工痕や、刃先形状の転写による加工残りが発生する。このような加工面における形状精度と共に、表面粗さの低減を実現するために、ヘール加工による機械仕上げ加工を行う。

ヘール加工は、非回転工具による微小切込みを一定の切削方向に与えることにより、サブマイクロメートルの機械仕上げ加工を行うことができ、手磨き作業の低減が期待されるものである。ヘール加工を行う場合には、刃先を鋭利に生成することができる単結晶ダイヤモンド工具を用いることにより、加工面の仕上がりが最も良好となることが確認^{4-1) 4-2) 4-3) 4-4)}されている。しかし、金型部品の素材として用いられる鋼材を切削する場合に限っては、単結晶ダイヤモンドが脆性材料であること、また鉄系の材料との親和性が高いことから、サブミクロンの機械仕上げの確立はこれまで不可能とされてきた。

本章では、ヘール加工実験を行う上で超音波振動の付加による加工面への影響について確認し、ヘール工具による鋼材の仕上げ加工についての有用性を明らかとする。

4. 1 工具材種による加工面への影響

金型部品の素材として用いられる鋼材を対象としたヘール工具による仕上げ加工を行うにあたり、超硬工具、TiAlN コーティング、DLC コーティング、CrN コーティング、バインダレス cBN コーティング、そして単結晶ダイヤモンドの計 6 種の工具による加工面の比較を行った。被削材は S55C とし、切り込み深さは $3.0\mu\text{m}$ (単結晶ダイヤモンド工具のみ $1\mu\text{m}$ に設定)、工具送り速度は $1000\text{mm}/\text{min}$ 、ピックフィード量 0.1mm 、工具すくい角 0° の加工条件とし、切削油に JIS 第 2 種 13 号スペシャルカットを使用した。

各工具による仕上げ加工面概観を図 4-2、表面粗さの測定結果を図 4-3 に示す。

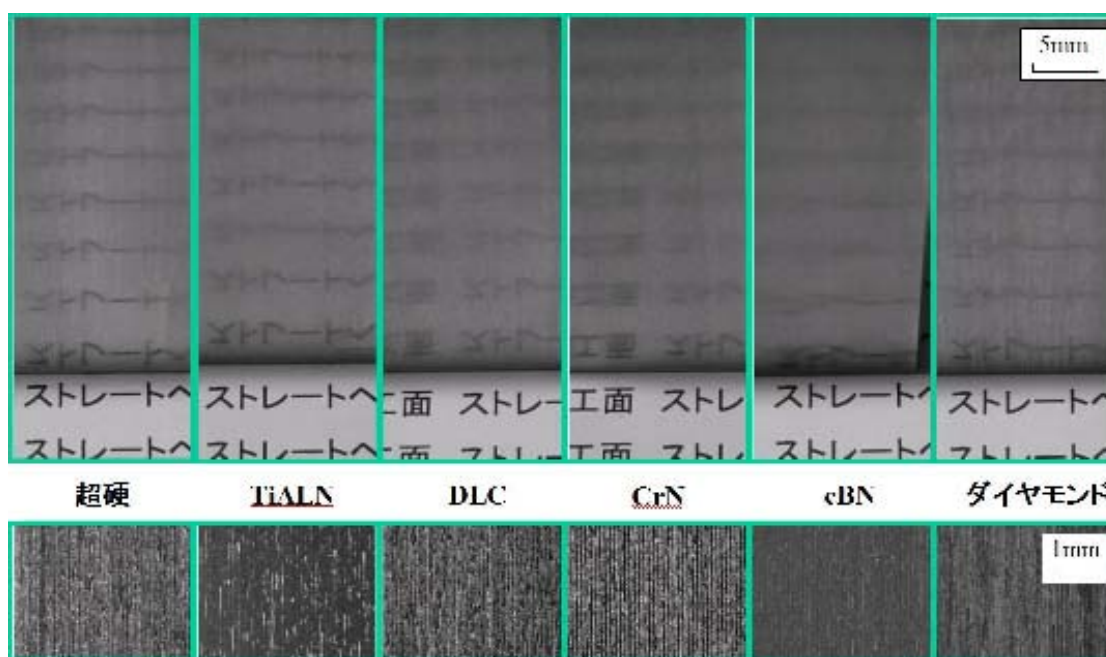


図 4-2 各工具による加工面の概観写真

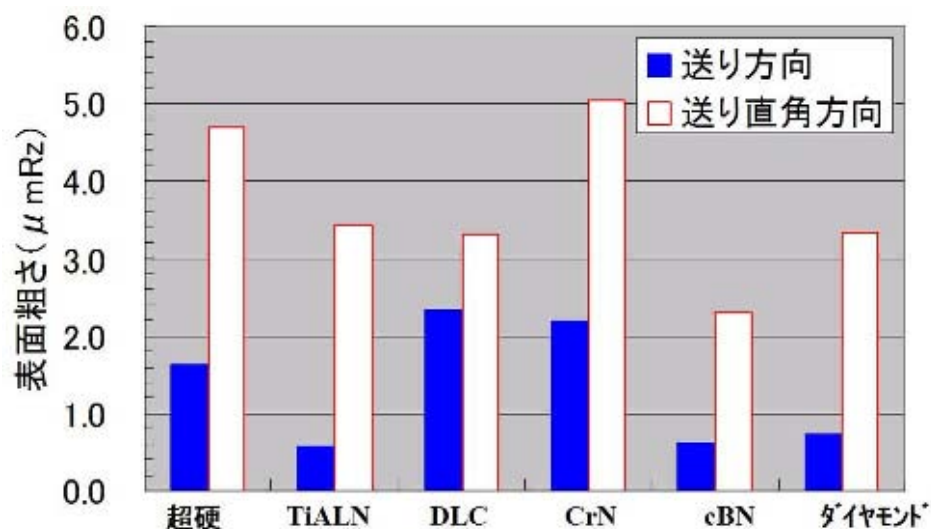


図 4-3 表面粗さの測定結果

この結果より、工具材種によっては送り方向の表面粗さを $1\mu\text{mRz}$ 以下に抑えることはできるものの、送り直角方向の表面粗さについてはいずれも $2\mu\text{mRz}$ 以上の値であることが確認された。また、4種類のコーティング工具の刃先には、すくい面におけるコーティング材の剥離が確認された。特に、アルミ合金を対象としたヘール加工実験では鏡面仕上げが可能であった単結晶ダイヤモンド工具を用いた加工面については、送り直角方向の表面粗さは $3.4\mu\text{mRz}$ となり、工具すくい面には激しい摩耗が見られた。鋼材の加工前後における単結晶ダイヤモンド工具の刃先拡大写真を図4-4に示す。

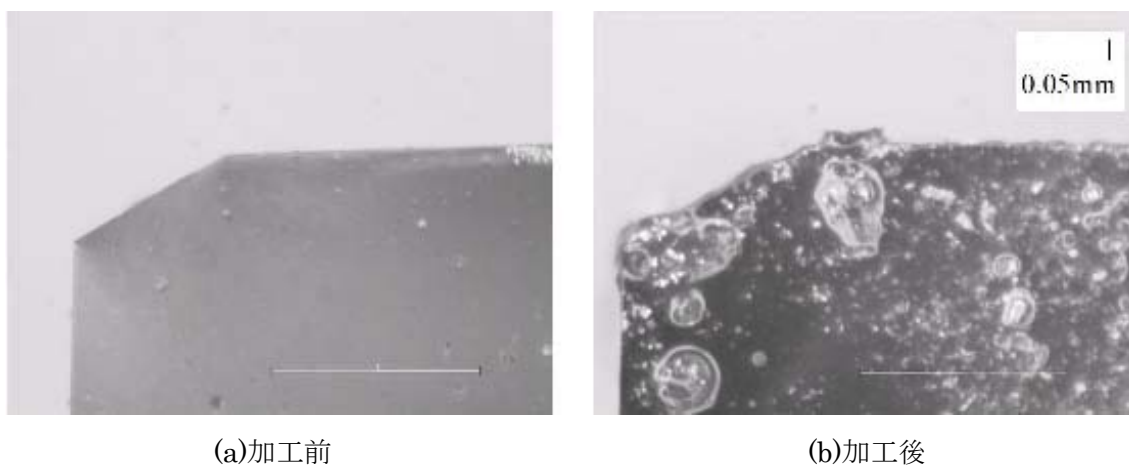


図 4-4 単結晶ダイヤモンド工具刃先の拡大写真

ヘール工具を用いた仕上げ加工では、工具送り直角方向における表面粗さの低減が必要不可欠となる。工具刃先においてクラックやチッピングなどの欠陥が発生すると、その刃先形状が直接加工面へ転写されることにより、工具送り直角方向における表面粗さの悪化へとつながる。鋼材を対象とした単結晶ダイヤモンド工具による高品質なヘール加工を実現するためには、刃先へのダメージを減少させるための手段が必要であり、表面粗さの低減と工具寿命の向上についての評価が求められる。

そこで、鋼材を対象とした単結晶ダイヤモンド工具によるヘール加工を行うにあたり、超音波振動の付加による加工面への影響や工具刃先における損傷の比較を行うことにより、ヘール工具による金型部品の仕上げ加工についての有用性について立証する。

4. 2 超音波振動による加工面への影響

過去の実験結果より、超音波加振による効果として切削抵抗値の大幅な減少が確認⁴⁻⁵⁾
⁴⁻⁶⁾ ⁴⁻⁷⁾ されている。超音波加振を付加したヘール加工を実現するために、主軸と工具の
 間に超音波加振装置を組み込んだホルダーを用いる。加振のメカニズムとしては、振動部
 であるホーン内部のピエゾ素子にパルス波の電流を流すことで、工具取り付け部全体が
 数〜数十 μm 捻られる。これにより、工具刃先が局部的に前後振動することで切削と離脱
 を繰り返し、超音波振動切削を実現する。超音波振動切削における切削時間と工具位置の
 関係を図 4-5 に示す。

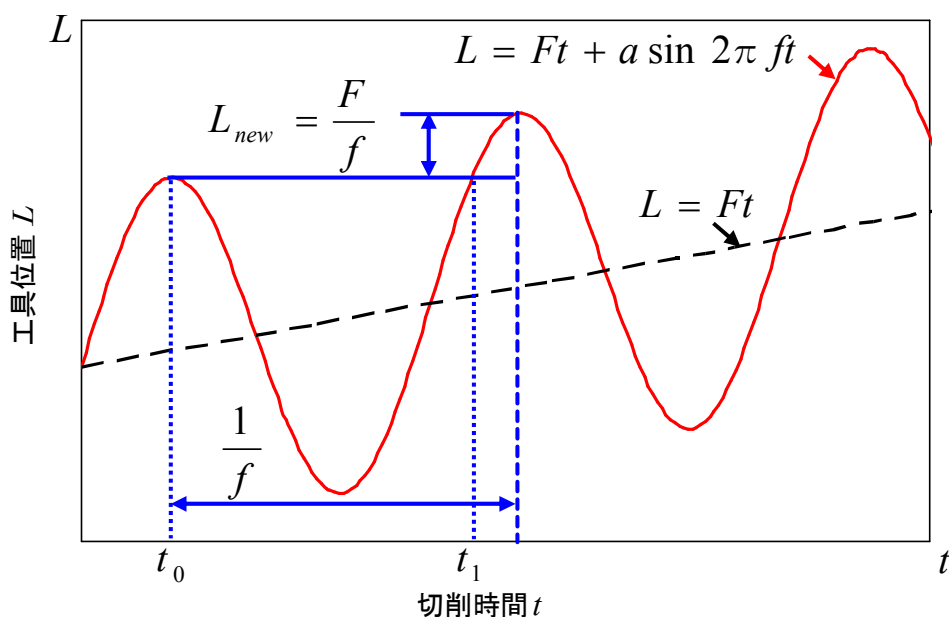


図 4-5 超音波振動切削における工具位置のグラフ

超音波振動切削での切削開始点から時間 t を経た時の工具位置 L は式 4-1 で表せる。

$$L = Ft + a \sin 2\pi ft \quad \dots (4-1)$$

ただし、 F は工具送り速度、 f は振動数、 a は振幅である。また、刃先速度 V は式 4-2 のようになる。

$$V = F + 2\pi af \cos 2\pi ft \quad \dots (4-2)$$

このとき、振動切削の最大切削速度 V_{\max} は式 4-3 で表すことができる。

$$V_{\max} = F + 2\pi af \quad \dots (4-3)$$

振動切削の特徴は、切りくずと工具すくい面が規則的に振動することで空隙ができ、切れ刃の冷却効果や潤滑効果が期待される。ただし、刃先の切削速度が常に正となる為には式4-4の関係が成り立つ必要がある。

$$F < 2\pi af \quad \dots (4)$$

刃先が被削材を切削した後、次に切削するまでの時間間隔は $(t_1 - t_0)$ であり、 t_1 は図4-5より式4-5で求められる。

$$Ft_0 + a \sin 2\pi ft_0 = Ft_1 + a \sin 2\pi ft_1 \quad \dots (5)$$

4. 2. 1 切り込み深さと切削速度の変化による比較

本実験では、ヘール工具による鋼材の加工を行った際の工具刃先における損傷を低減させるために超音波加振装置を用いるにあたって、切り込み深さの増加や切削速度の変化における加工面への影響について、通常切削(超音波加振を与えない切削)と超音波加振切削との比較を行う。切削条件を以下に示す。実験の加工モデルを図 4-7、加工面の概観を図 4-8、加工面の拡大写真を図 4-9 より、切り屑の概観を図 4-13 より示す。

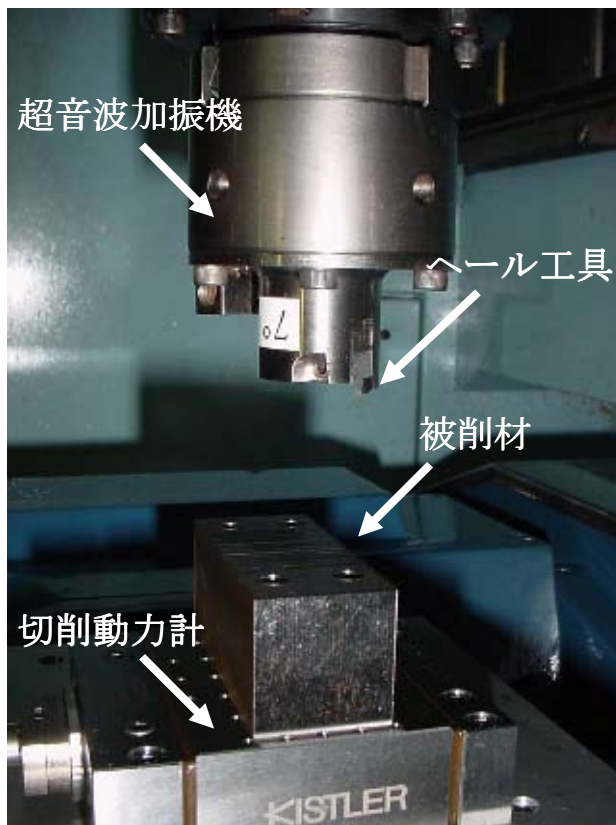


図 4-6 工具と被削材

[切削条件]

使用工具 : サーマット工具

被削材 : NAK80, S55C

切り込み深さ : 1~10 μm

切削速度 : 500~2000mm/min

切削方法 : ピックフィード無

加振振幅 : 20 μm
(周波数 27kHz)

評価項目 : 切り屑形態
切り屑せん断角
表面粗さ(Rz)
切削抵抗値(N)

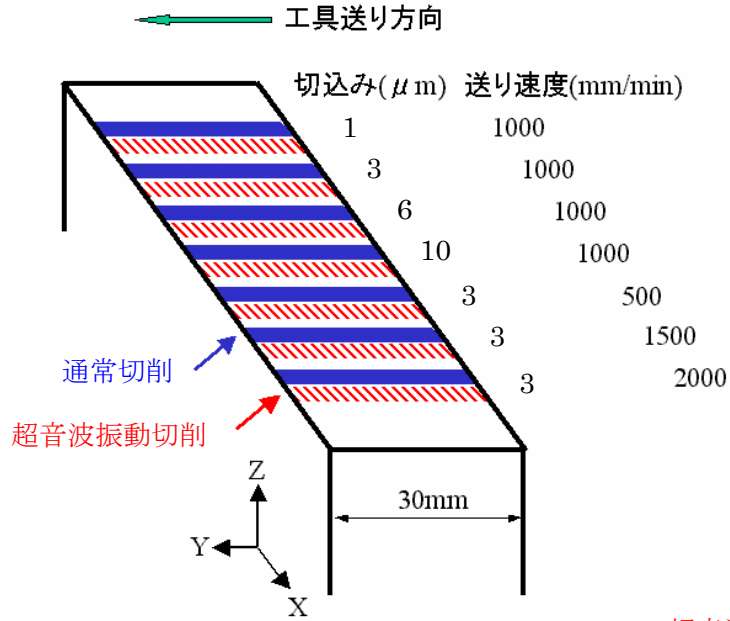
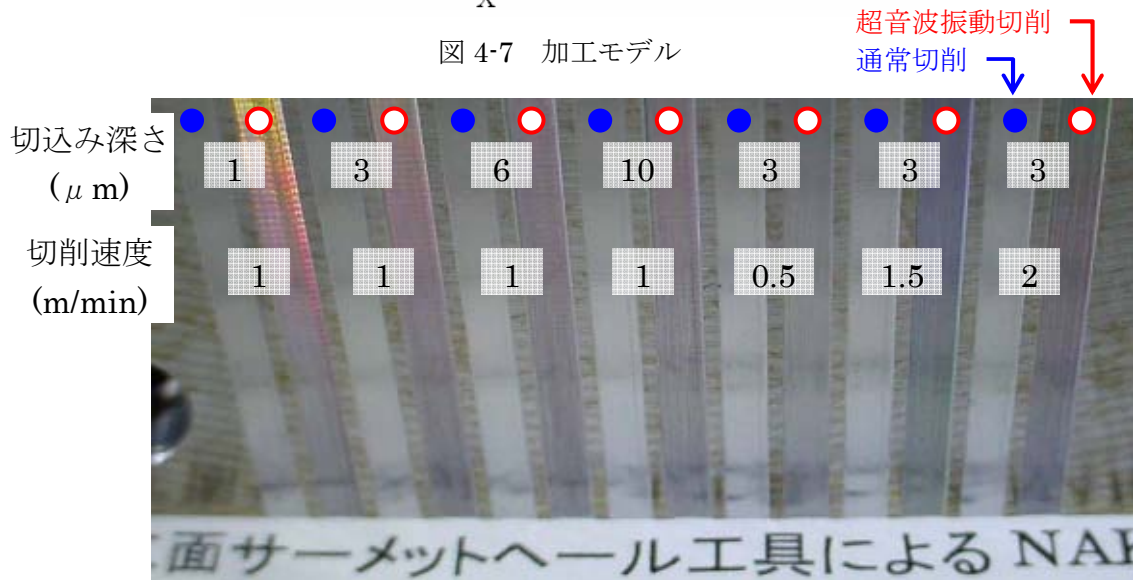
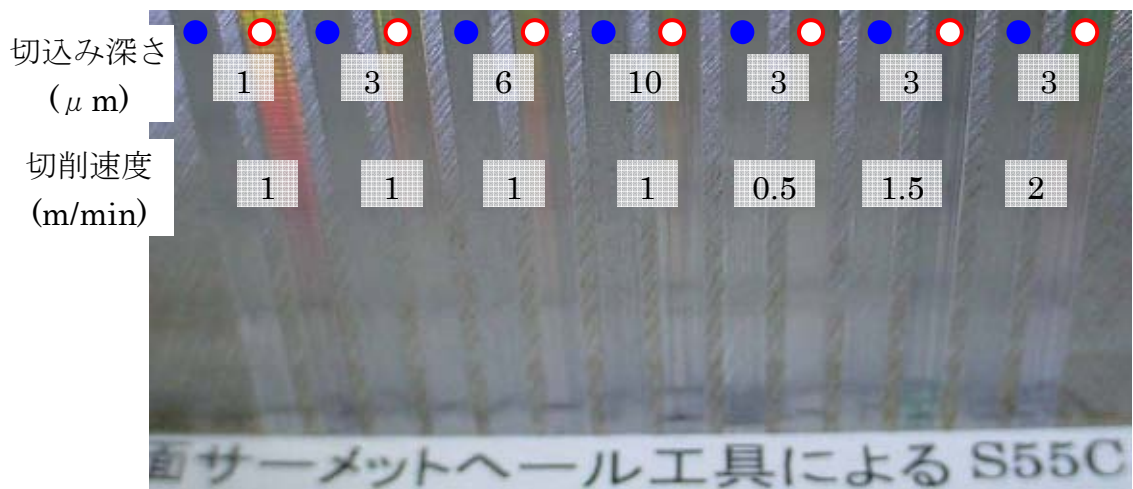


図 4-7 加工モデル



(a) NAK80 の加工面



(b) S55C の加工面

図 4-8 加工面の概観

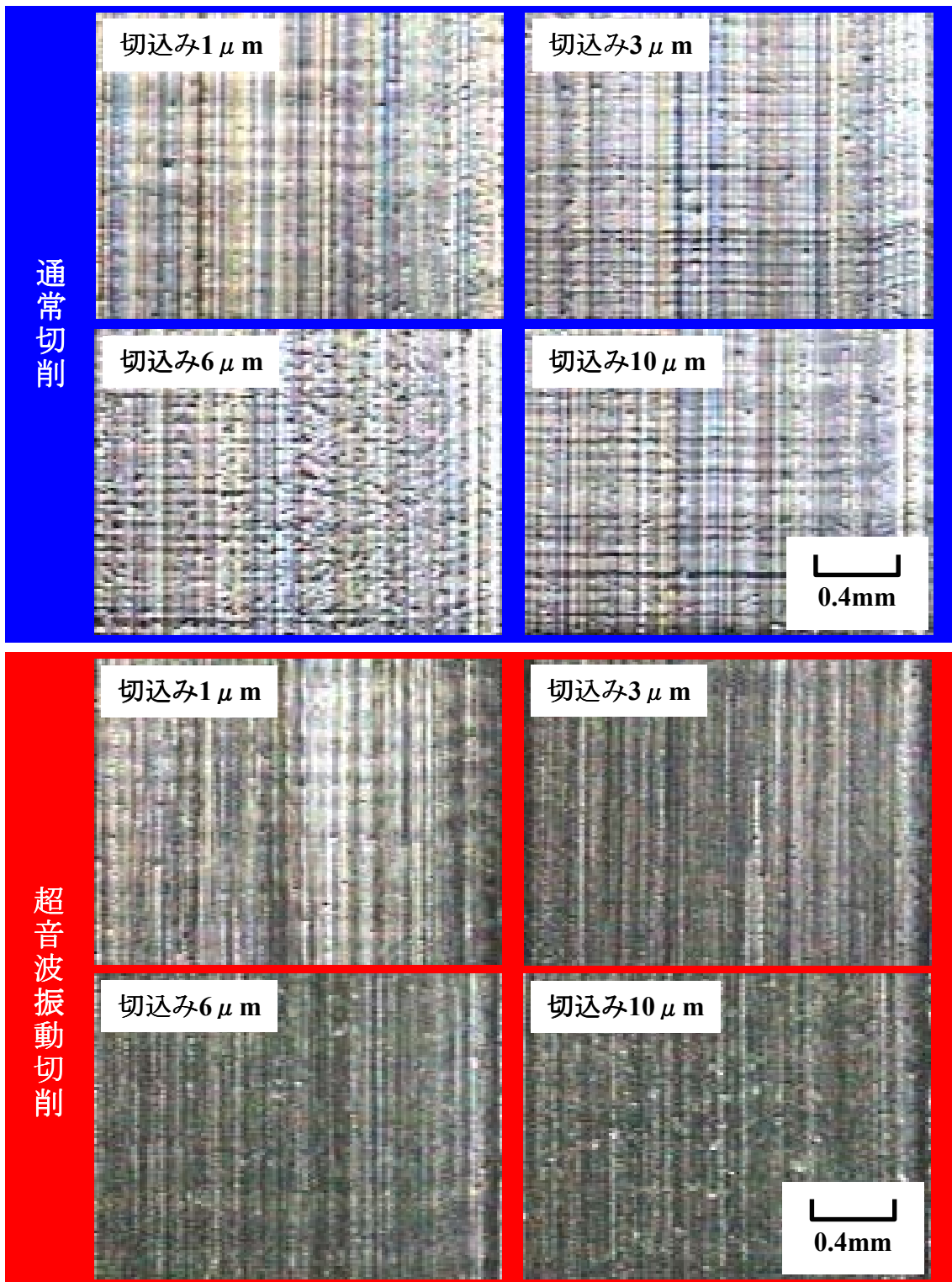


図 4-9 NAK80 の加工面拡大写真 (切り込み深さによる影響)

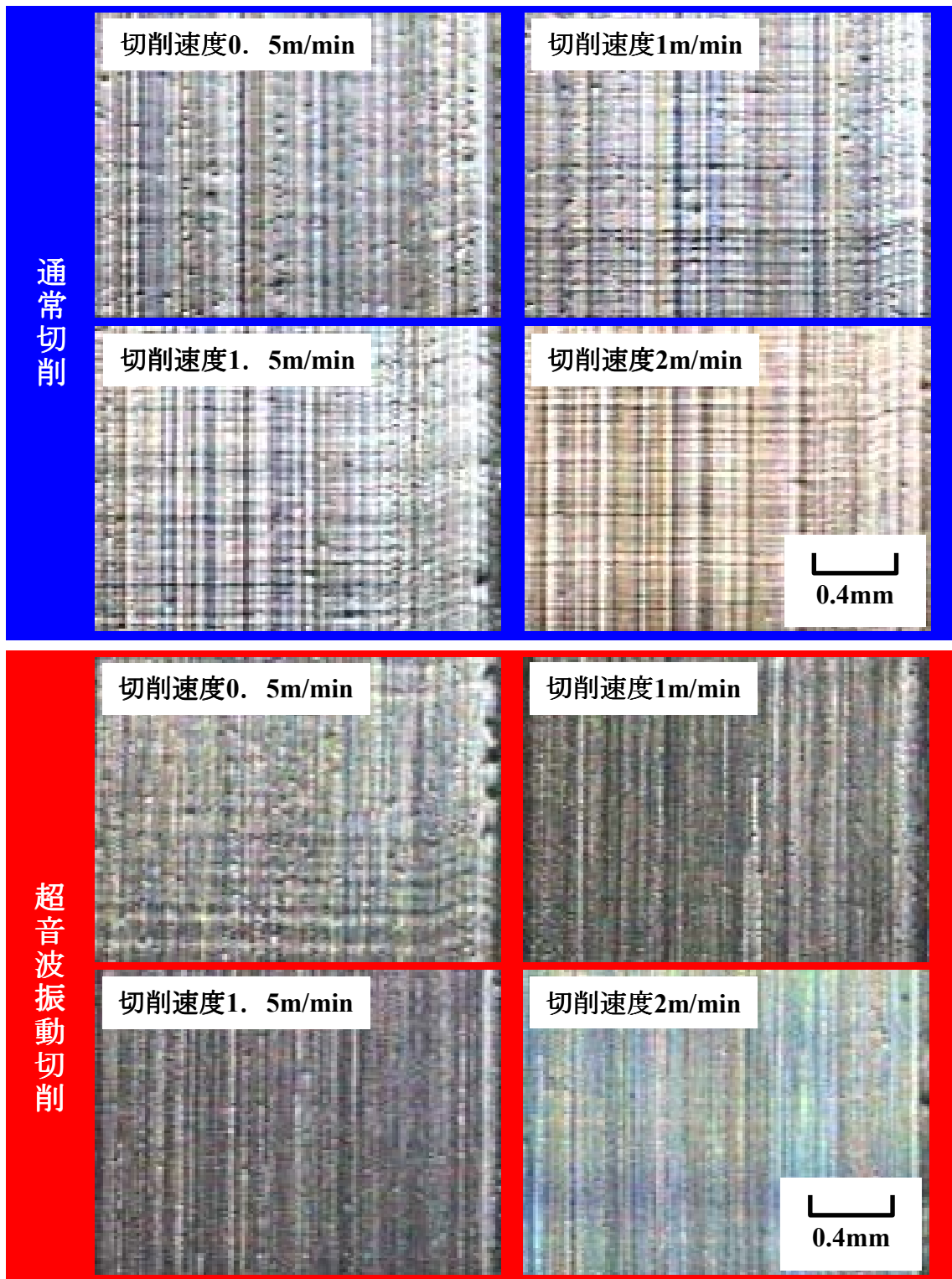


図 4-10 NAK80 の加工面拡大写真（切削速度による影響）

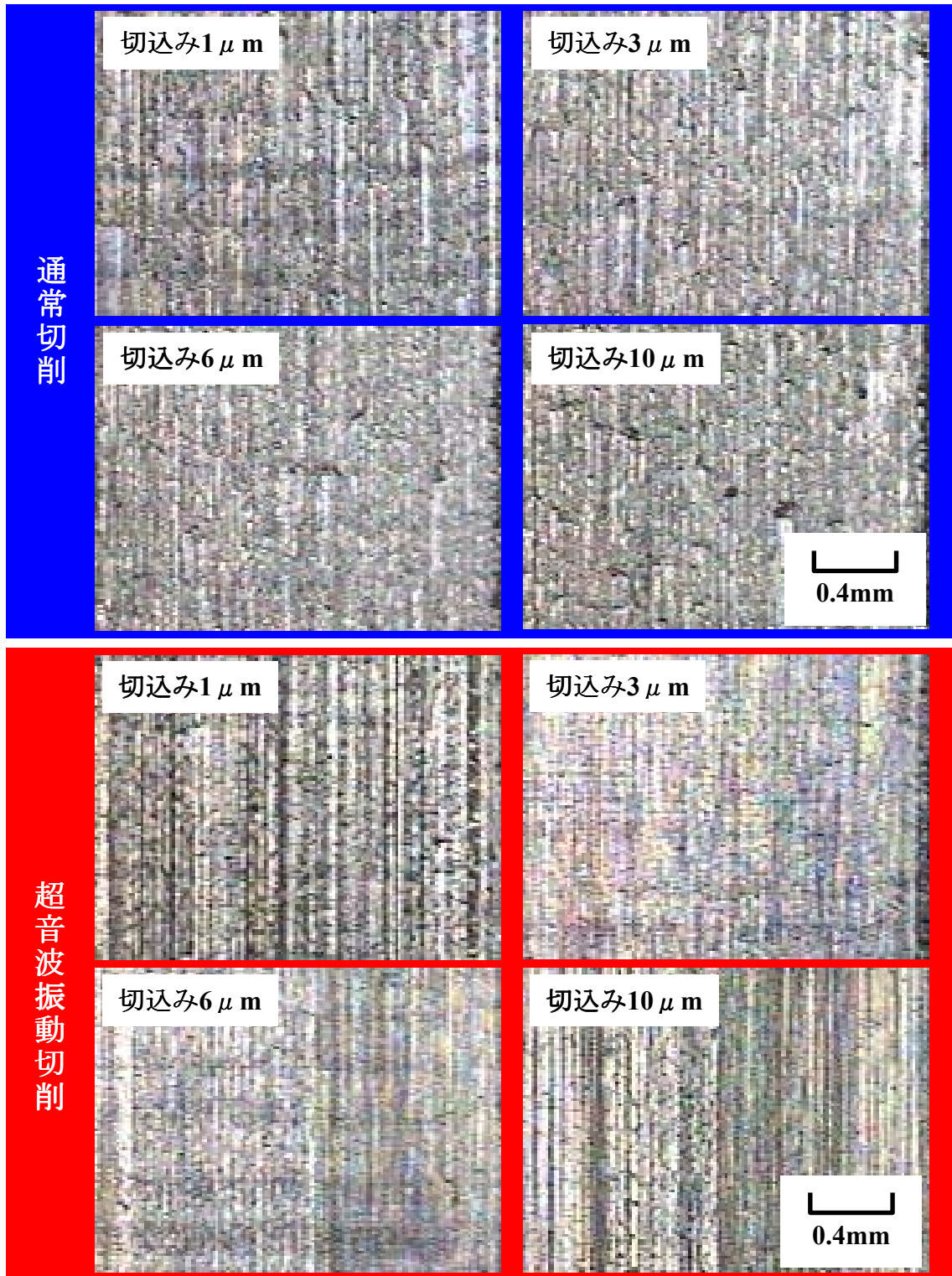


図 4-11 S55C の加工面拡大写真 (切込み深さによる影響)

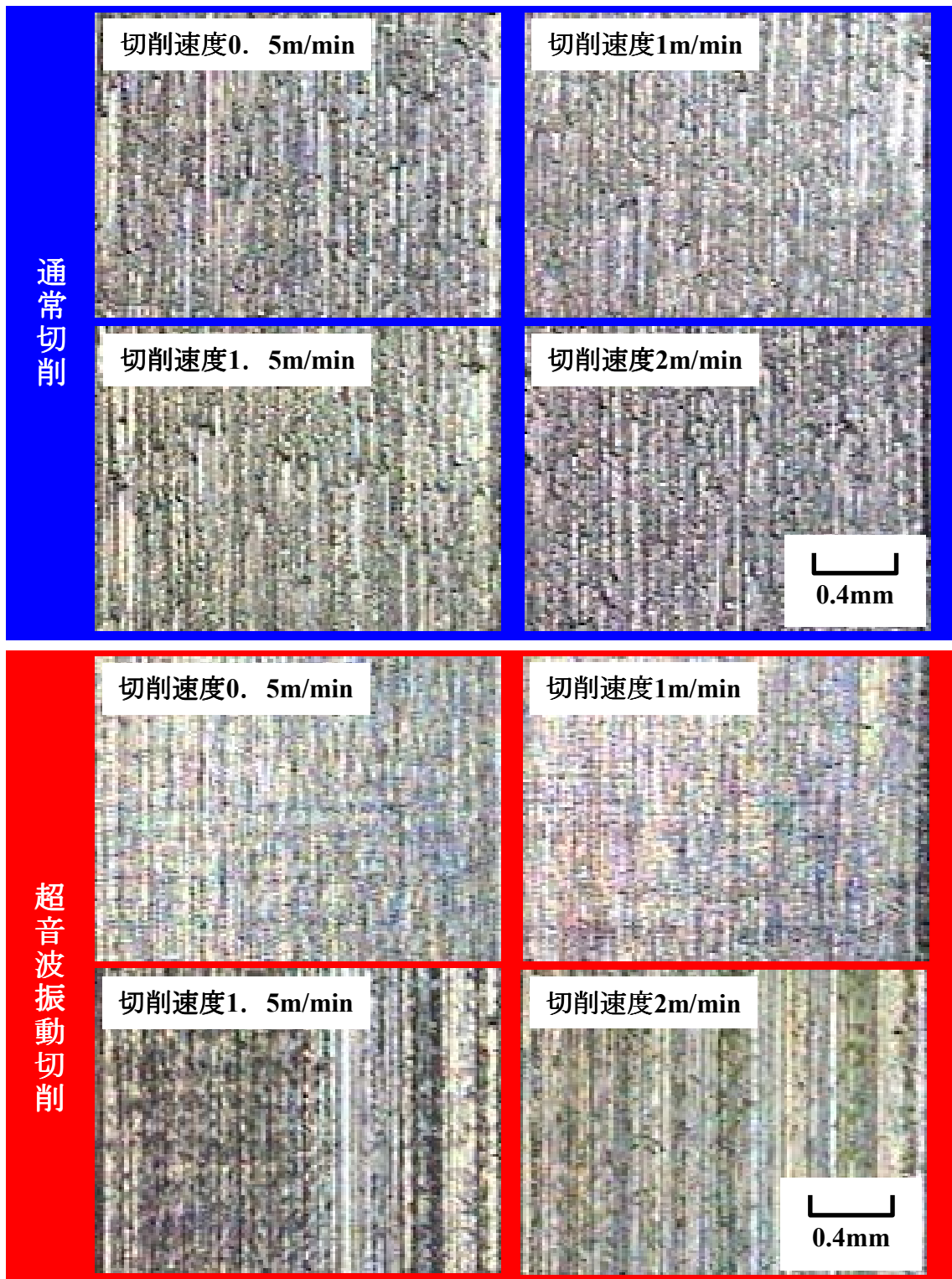


図 4-12 S55C の加工面拡大写真（切削速度による影響）

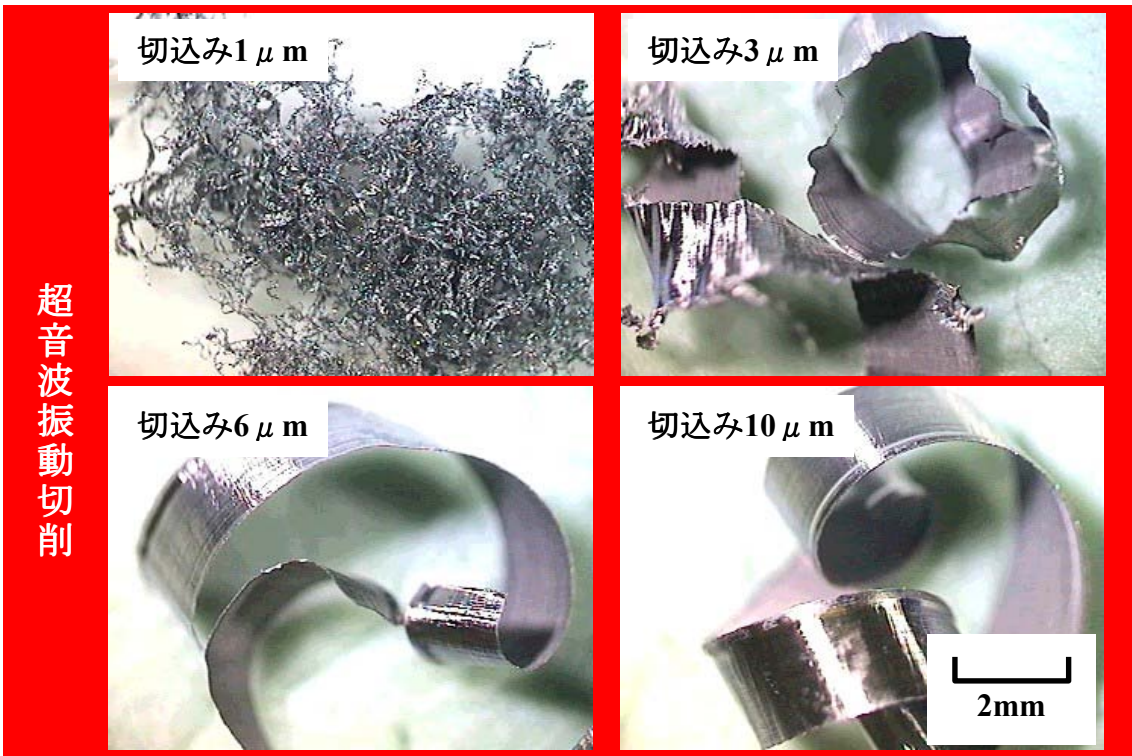


図 4-13 NAK80 の切り屑概観 (切り込み深さによる影響)



図 4-14 NAK80 の切り屑概観 (送り速度による影響)

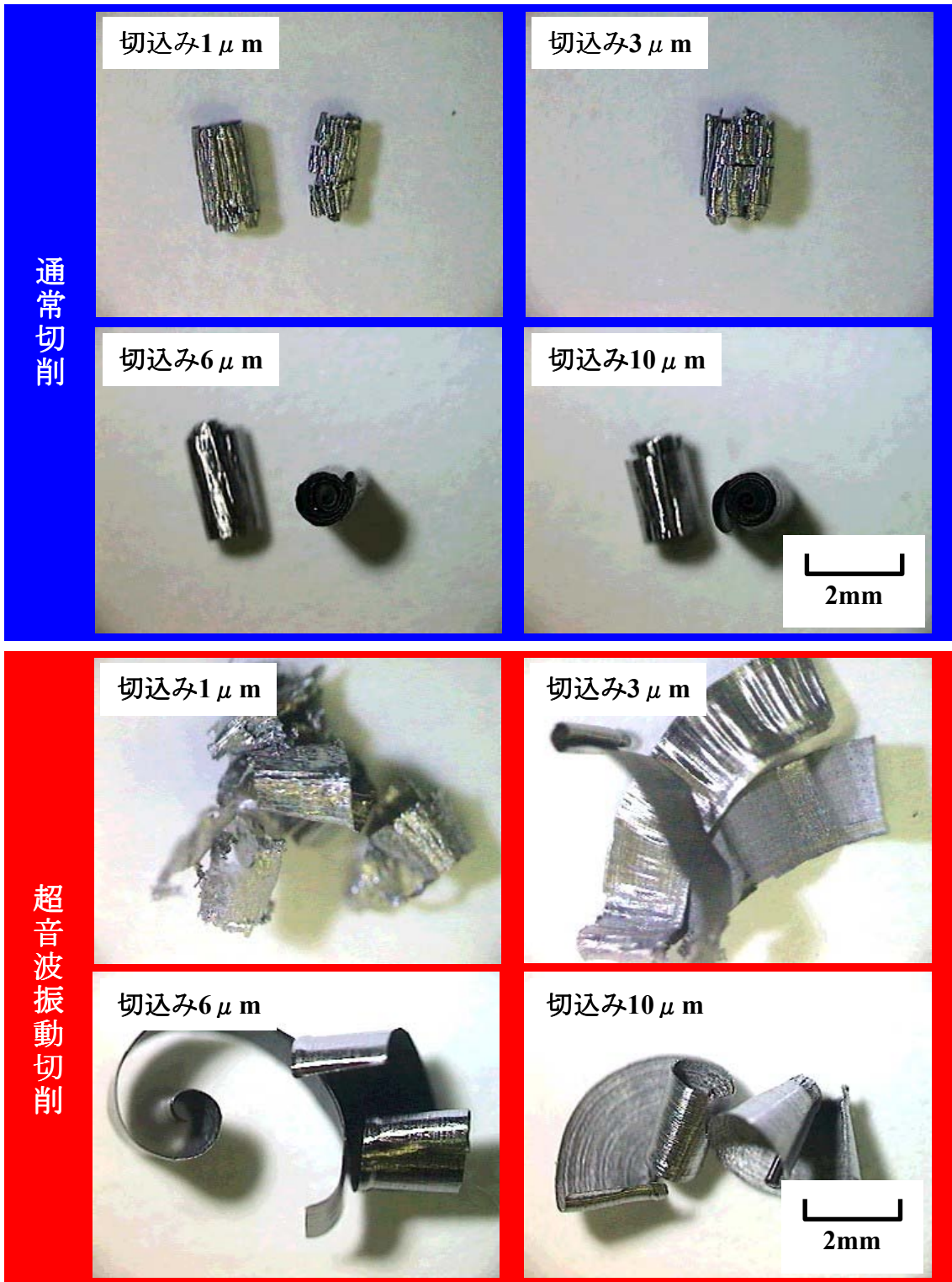


図 4-15 S55C の切り屑概観 (切り込み深さによる影響)

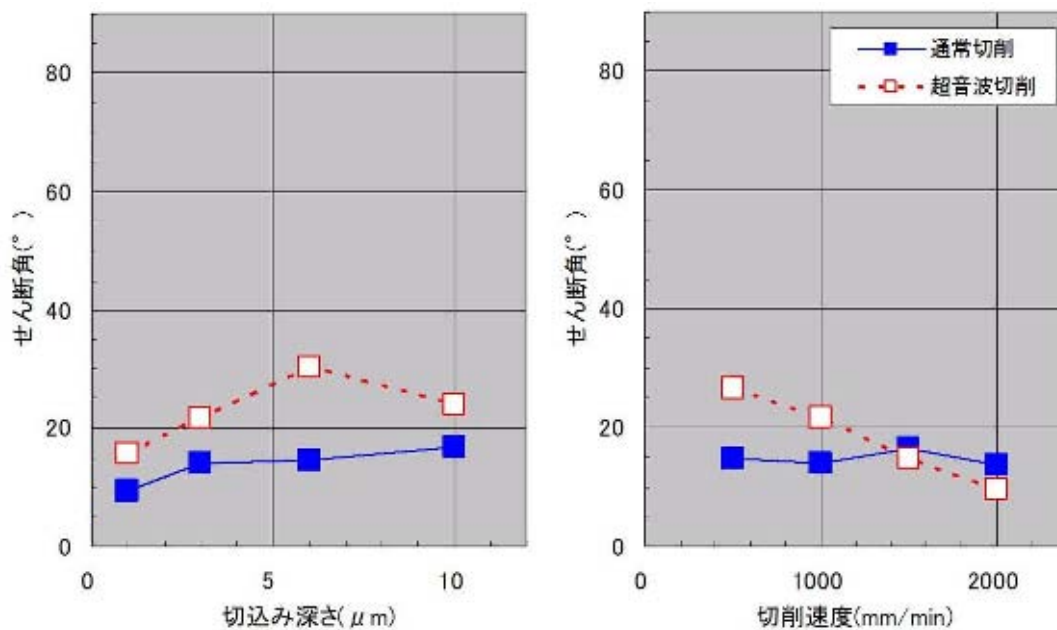


図 4-16 S55C の切り屑概観 (送り速度による影響)

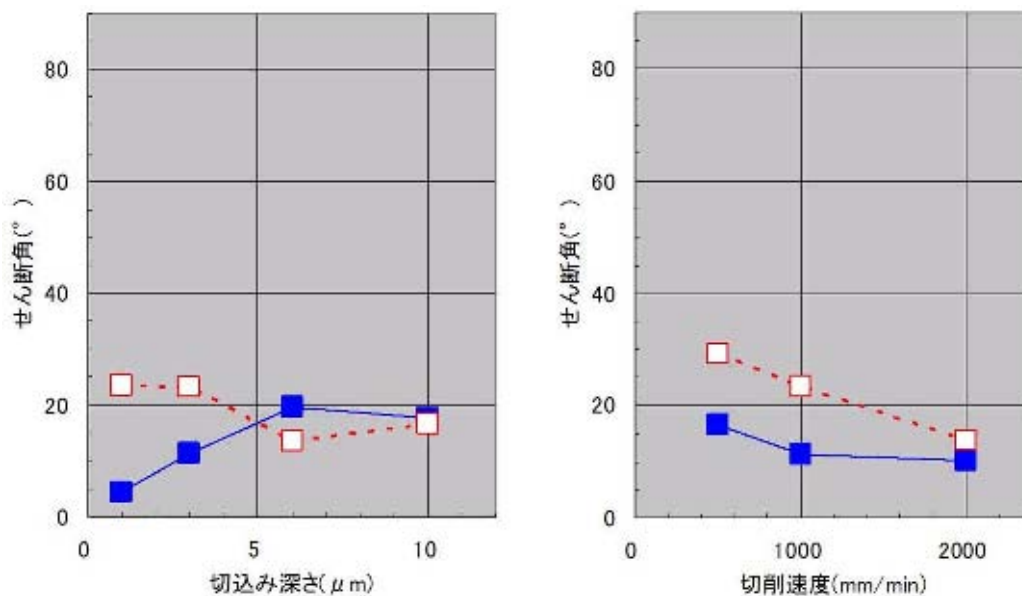
各条件における切り屑の厚さを測定することにより、切り屑せん断角を導出した。せん断角については、式 4-6 を用いることにより算出する。切り屑せん断角の算出結果を図 4-17 に示す。

$$\phi = \arctan(t1/ t2) \quad \dots (4-6)$$

- ϕ : せん断角(°)
- t 1 : 切り込み深さ(mm)
- t 2 : 切り屑厚さ(mm)



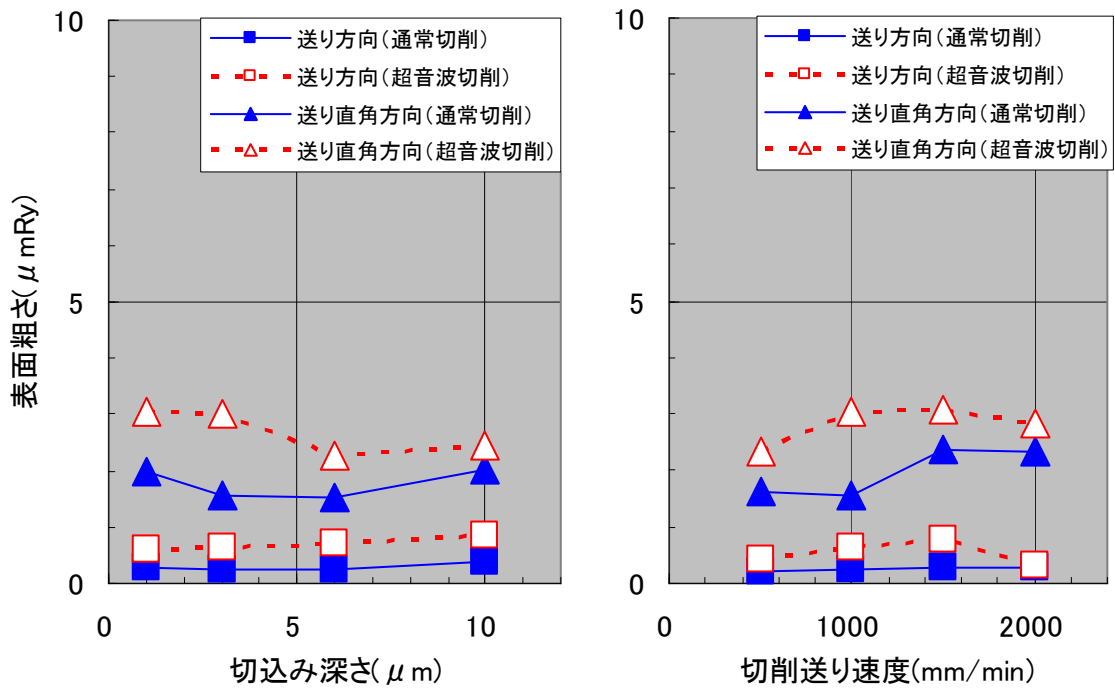
(a) NAK80 の切り屑せん断角



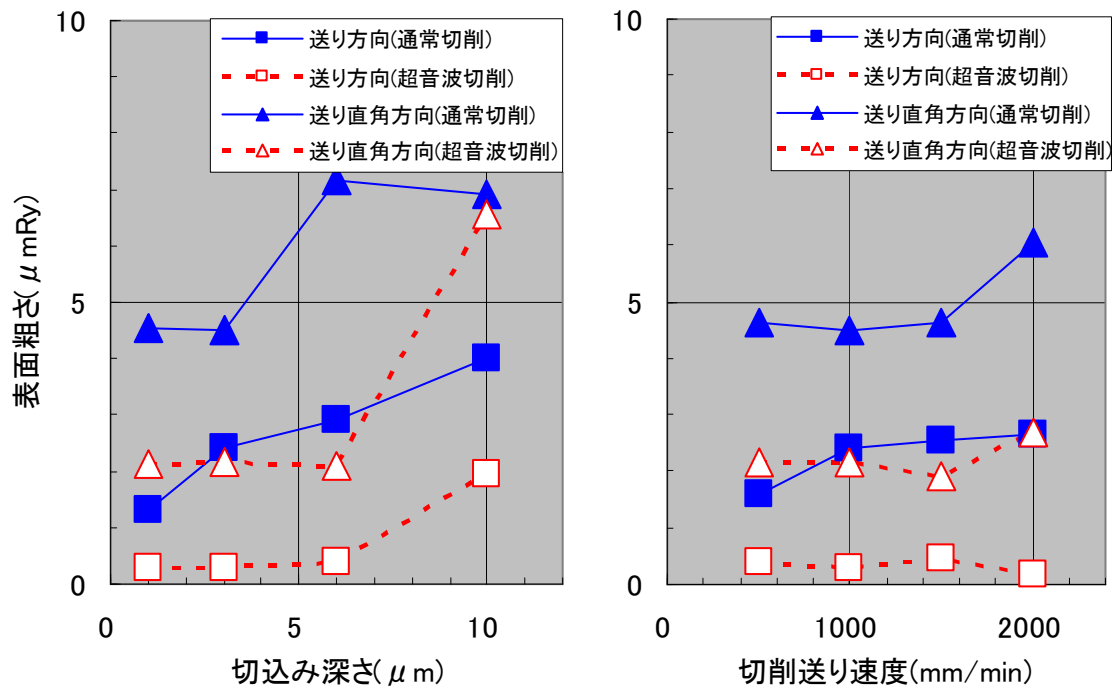
(b) S55C の切り屑せん断角

図 4-17 切り屑せん断角の算出結果

各条件における加工面の表面粗さについて、測定結果を図 4-18 に示す。



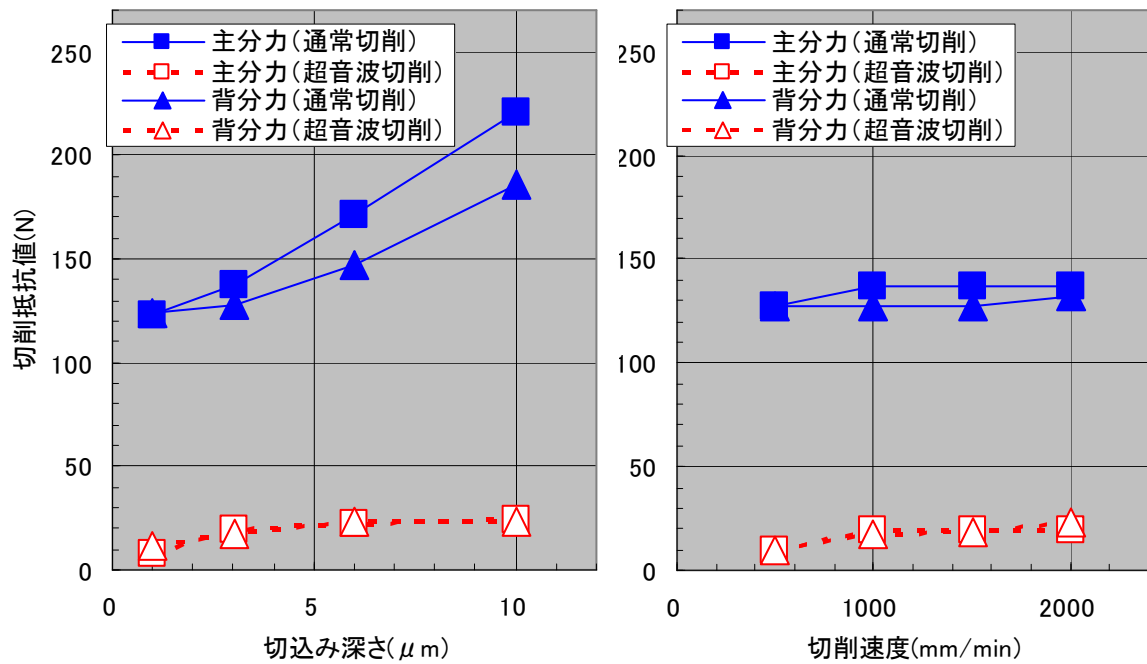
(a) NAK80 の表面粗さ



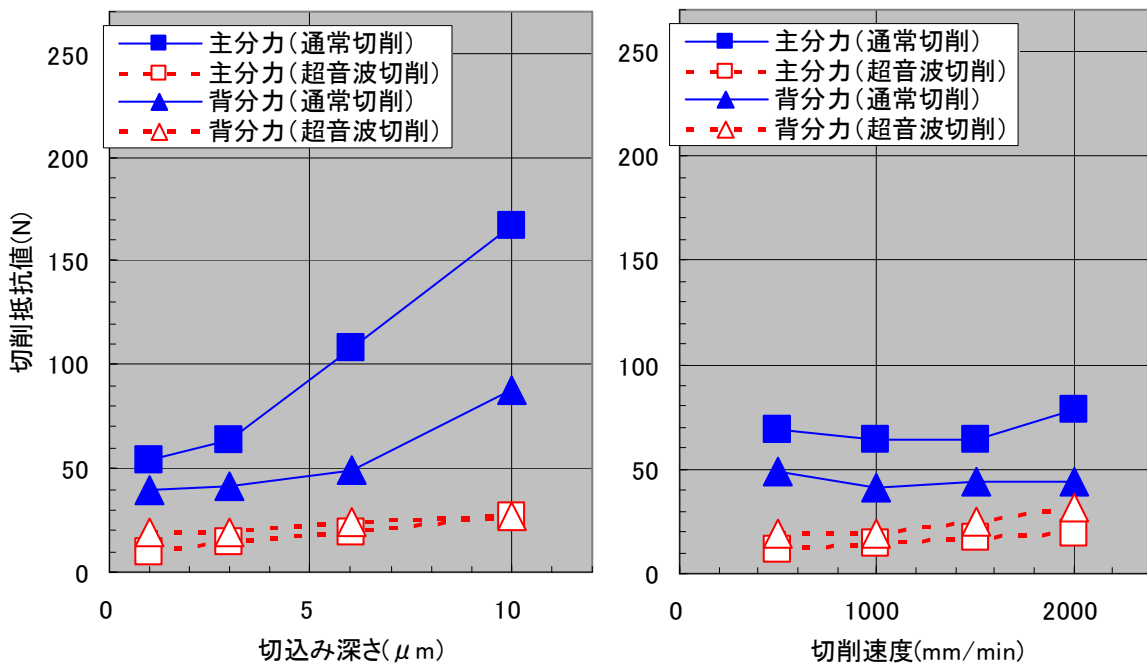
(b) S55C の表面粗さ

図 4-18 表面粗さの測定結果

各条件における工具刃先の切削抵抗値について、測定結果を図 4-19 に示す。



(a) NAK80 の切削抵抗値



(b) S55C の切削抵抗値

図 4-19 切削抵抗値の測定結果

超音波加振を利用した加工実験より、通常切削と比べて切りくずの発生、せん断角、表面粗さ、切削抵抗値の全ての評価項目において違いが生じた。特に切削抵抗値の比較を行った場合、超音波切削においては通常切削の 2 分の1以下の値になることが確認された。このことから、超音波加振による工具の超寿命化の効果が証明された。表面粗さに関しては、S55C の加工については超音波加振による明確な改善が確認されたが、NAK80 の加工については、超音波加振により表面粗さが悪化するといった結果となった。この原因としては、プリハードン鋼である NAK80 は非常に粘性の強い材質であるため、超音波加振切削の特徴である、工具刃先の接触/非接触（切削/非切削）を伴う間欠切削が困難となることから、良好な加工状態を作り出すことができなかったためと考えられる。全体の傾向としては、超音波加振を使用した上で、切込み深さを極力小さく設定することで、最良の加工面が得られることが実験結果より確認された。

4. 2. 2 ピックフィード量の変化による比較

前節の結果を基に、工具幅以上の広域切削実験を行った。広域切削においてはピックフィード量の設定値により、特に工具送り直角方向の加工面の粗さが左右されるため、仕上げ面の要求精度と加工時間を考慮した設定値を設ける必要がある。

アルミ合金を対象とした加工実験では、ピックフィード量 0.1mm の条件において、サブマイクロメートルの鏡面仕上げを実現している。本実験では、鋼材の加工にあたりアルミ合金同等の仕上げ面精度を目標としており、ピックフィード量を 0.1mm, 0.5mm, 1mm に変化させた場合の全てにおいて、超音波加振の効果と比較する。実験装置は前節と同環境にて行う。切削条件を以下に、加工モデルを図 4-20 に示す。

[切削条件]

使用工具：

サーメット，
バインダレス cBN，
単結晶ダイヤモンド

被削材：

NAK80, S55C

切込み深さ：

1 μ m

切削速度：

1000mm/min

加振振幅：

20 μ m(周波数 27kHz)

ピックフィード量：

0.1mm, 0.5mm, 1mm

評価項目：

表面粗さ (Rz)

切削抵抗値

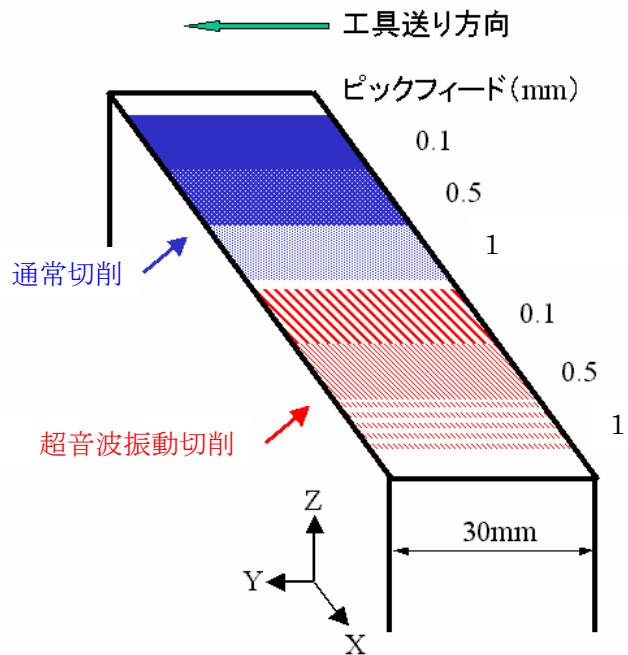
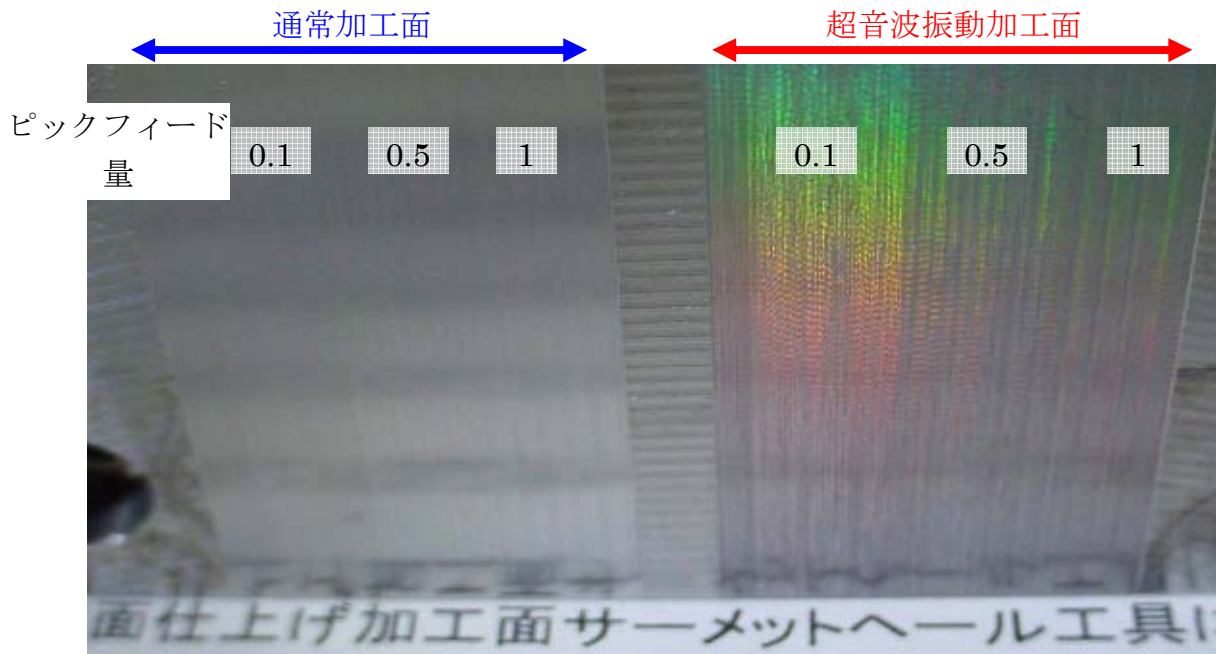
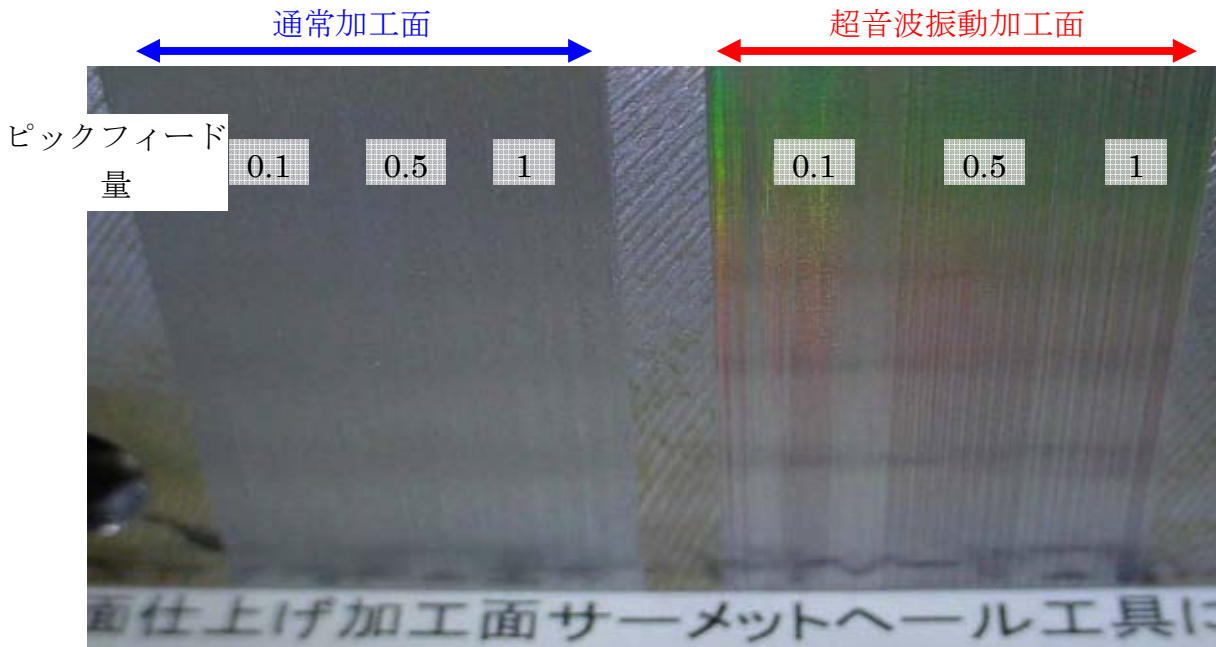


図 4-20 加工モデル

各使用工具による加工面の概観、および加工面の拡大写真を図 4-21 より示す。

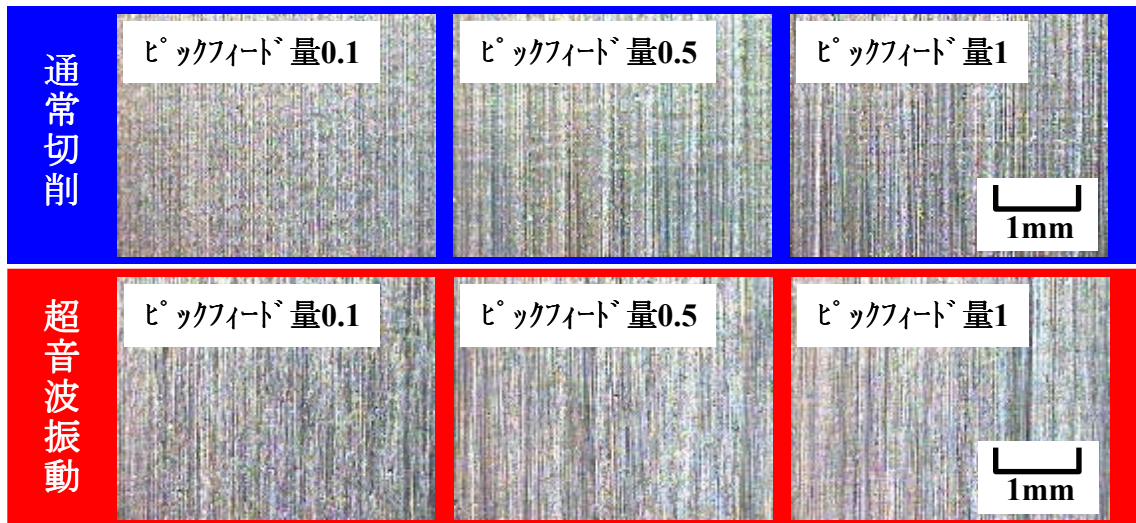


(a) NAK80 の加工面

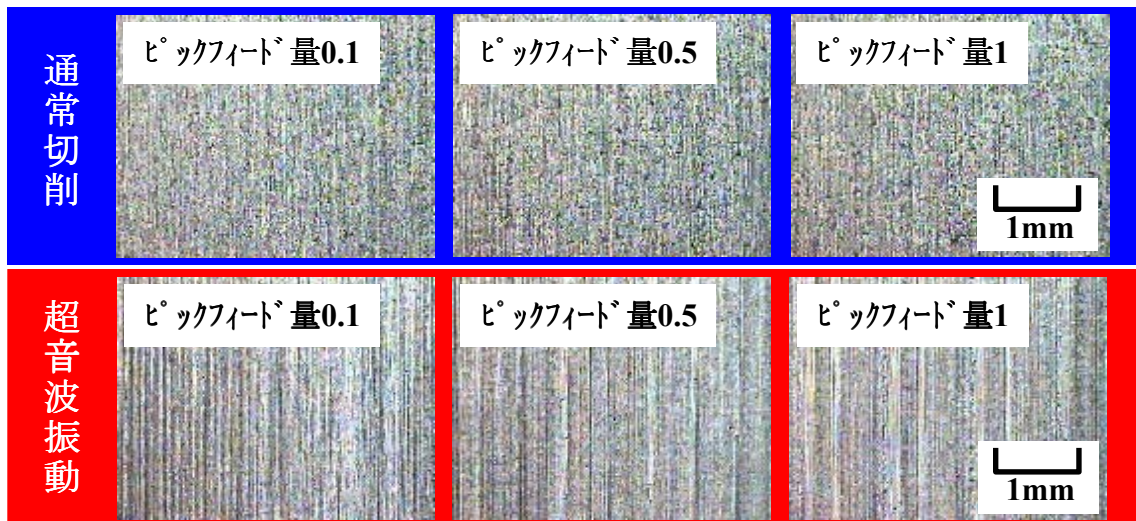


(b) S55C の加工面

図 4-21 サーマット工具による加工面の概観

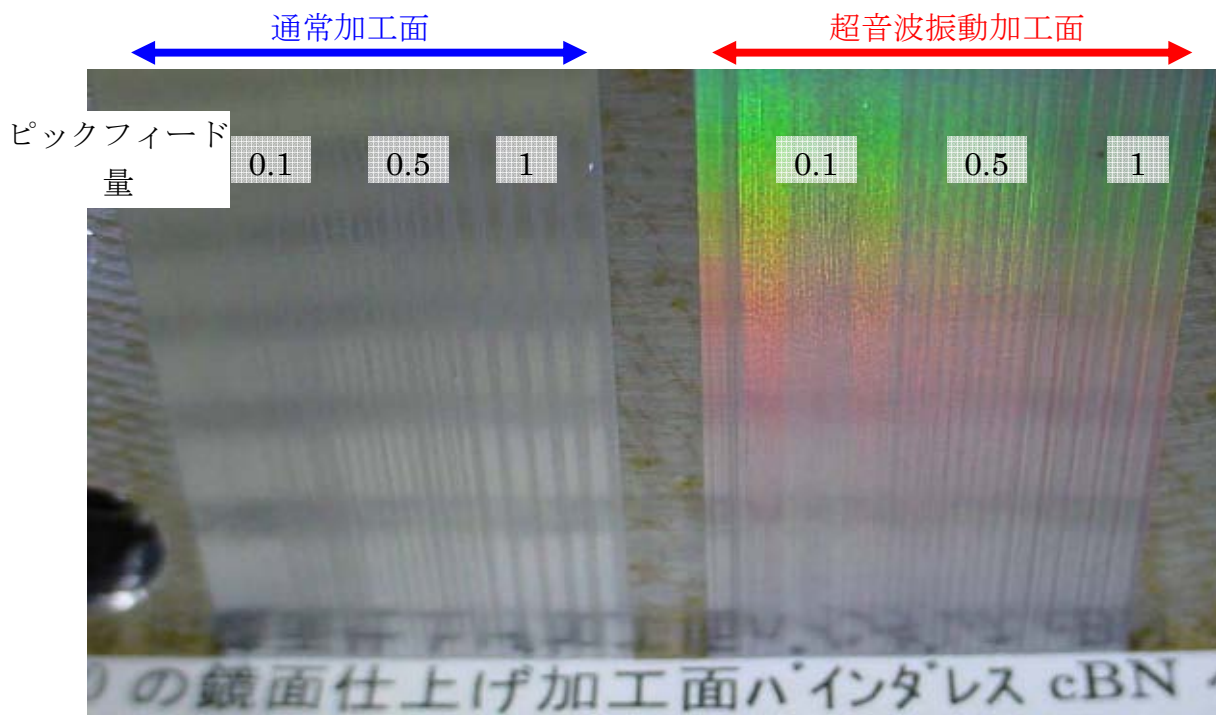


(a) NAK80 の加工面拡大写真

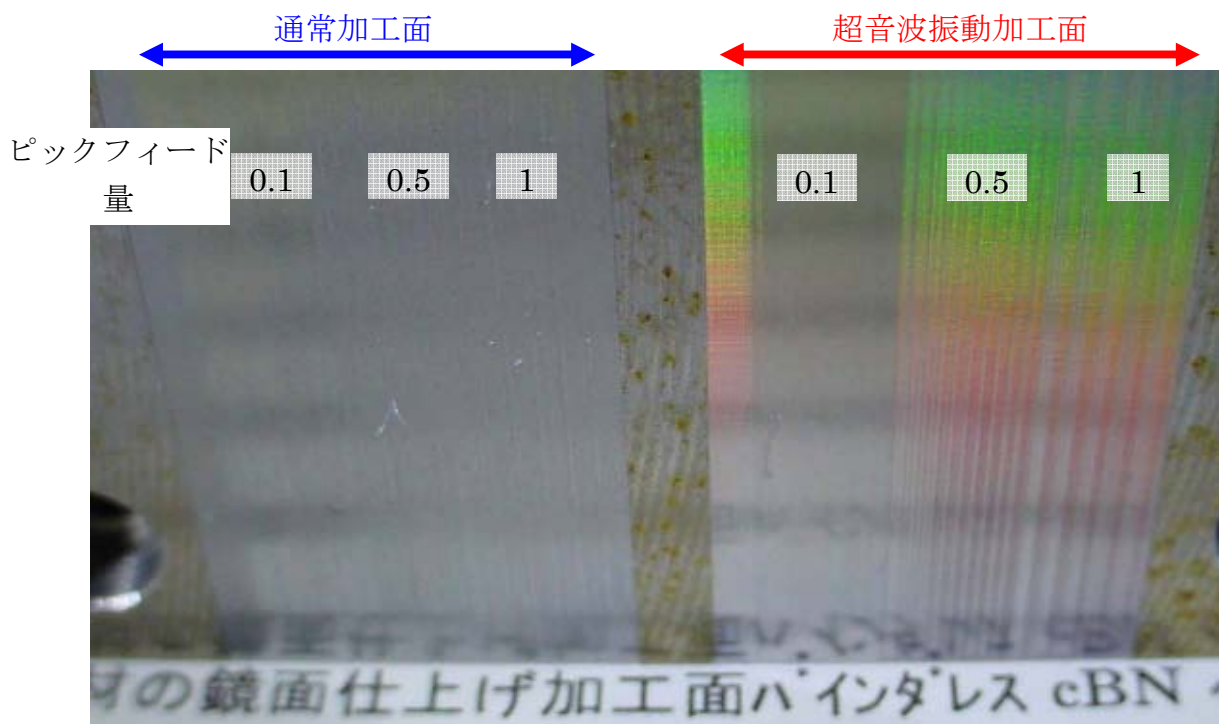


(b) S55C の加工面拡大写真

図 4-22 サーマット工具による加工面拡大写真

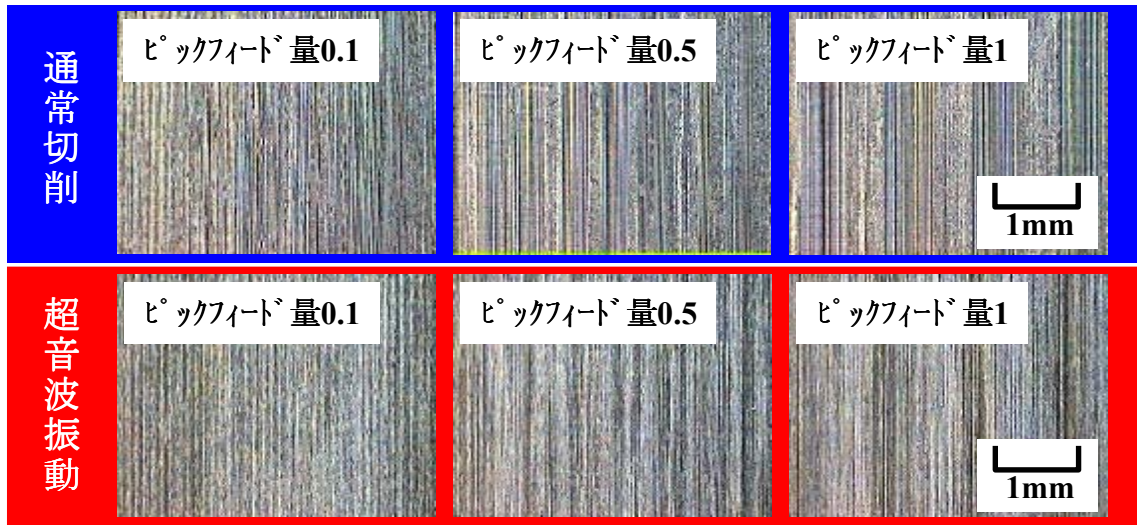


(a) NAK80 の加工面

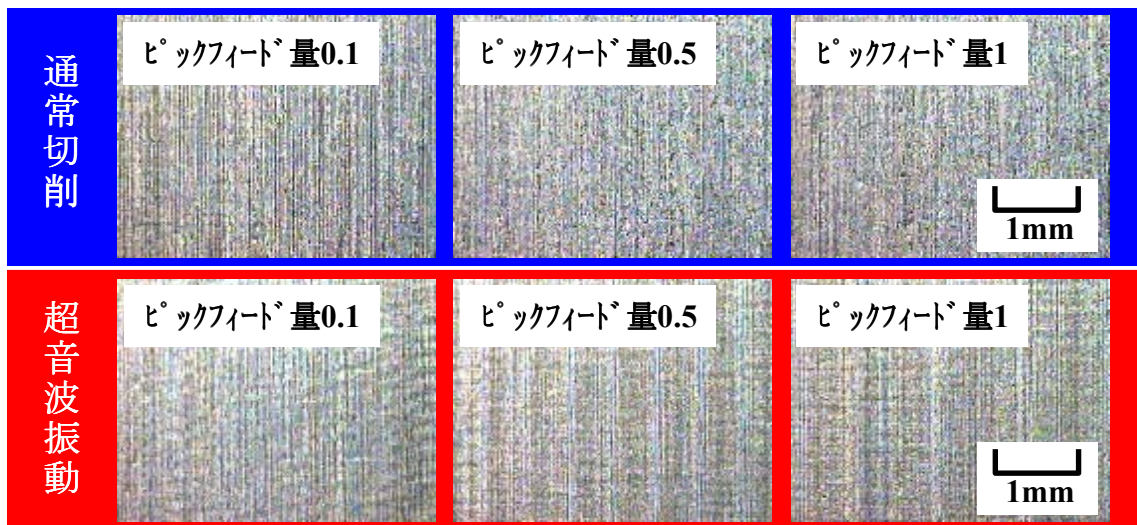


(b) S55C の加工面

図 4-23 バインダレス cBN 工具による加工面の概観

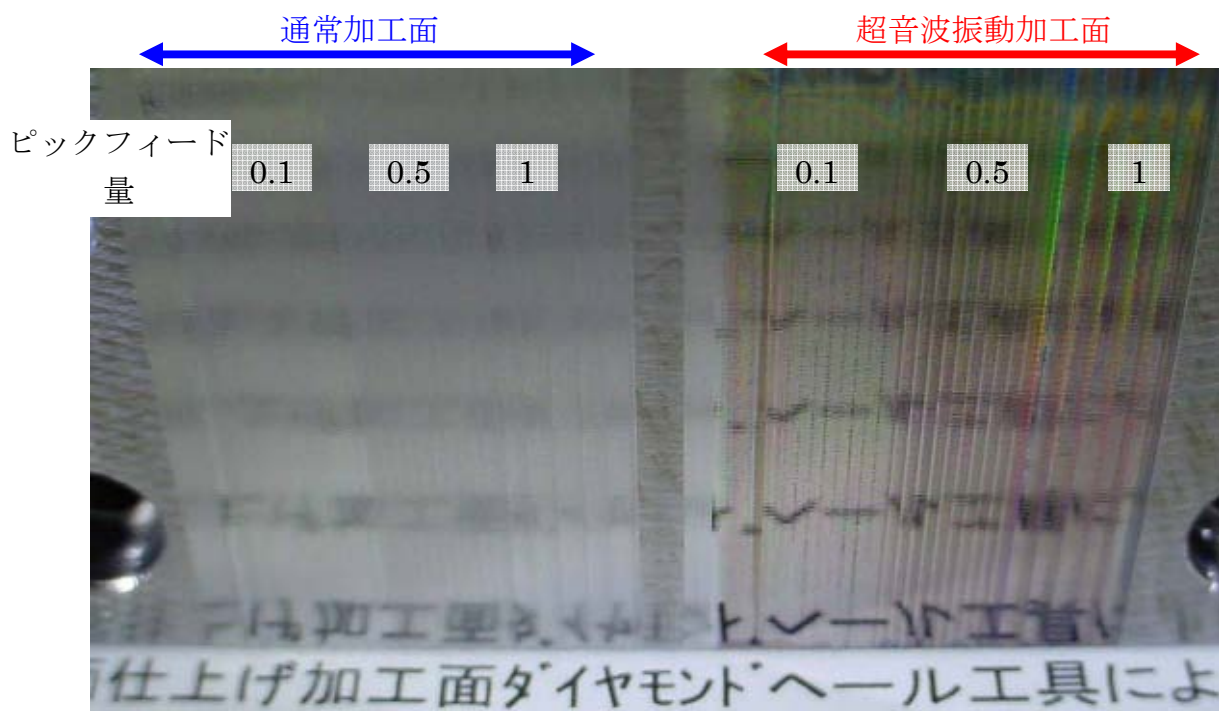


(a) NAK80 の加工面拡大写真

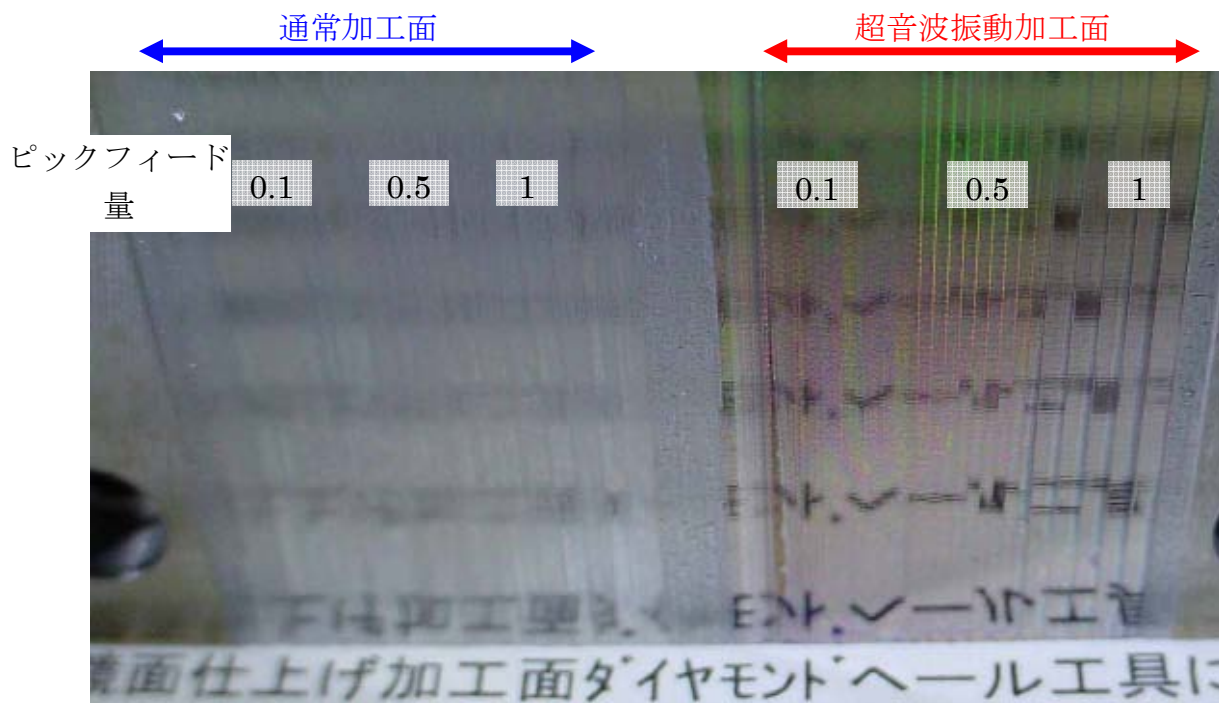


(b) S55C の加工面拡大写真

図 4-24 バインダレス cBN 工具による加工面拡大写真

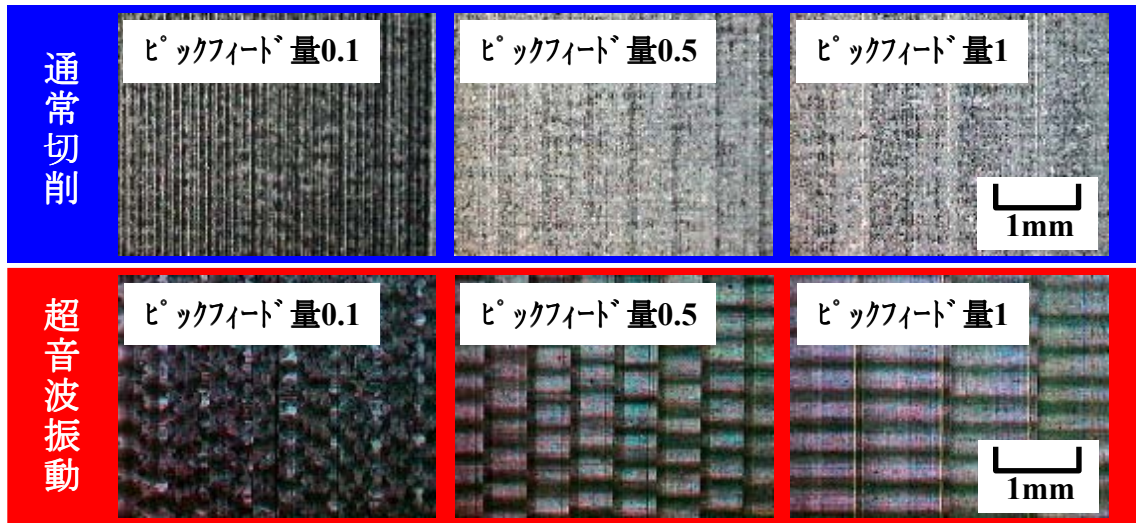


(a) NAK80 の加工面

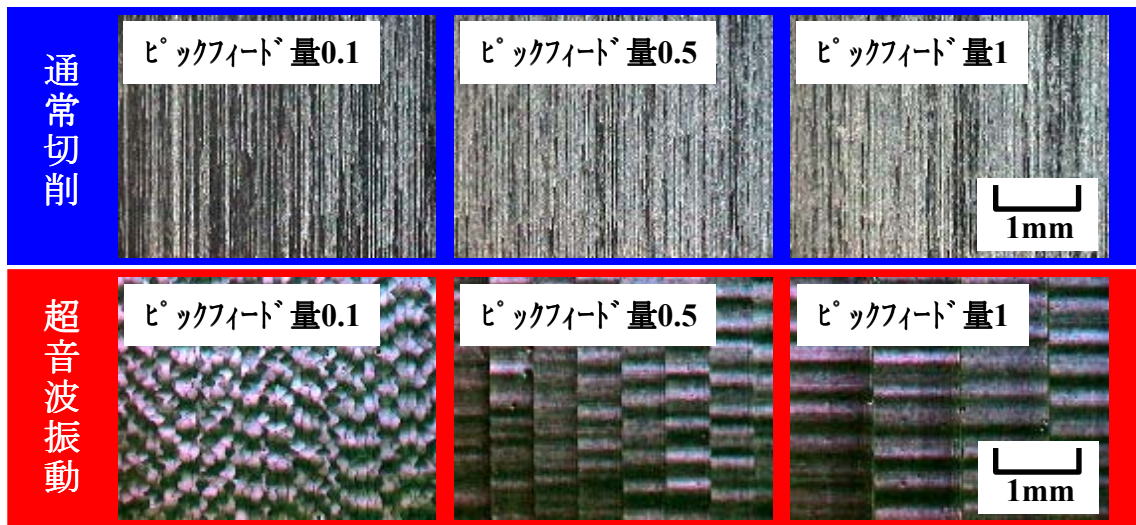


(b) S55C の加工面

図 4-25 ダイヤモンド工具による加工面の概観



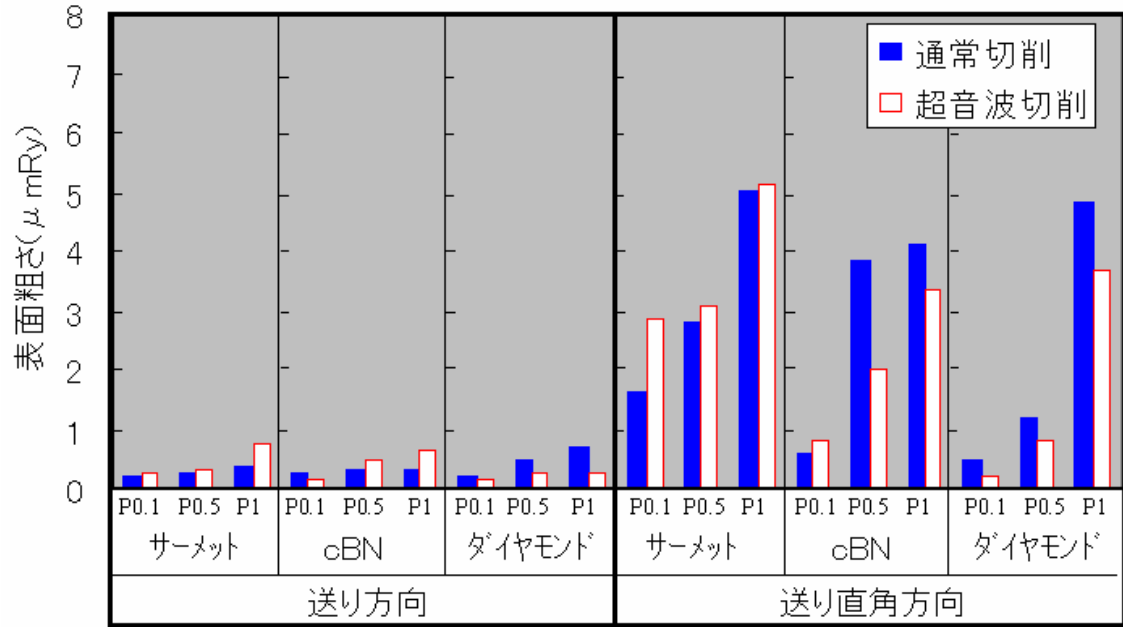
(a) NAK80 の加工面拡大写真



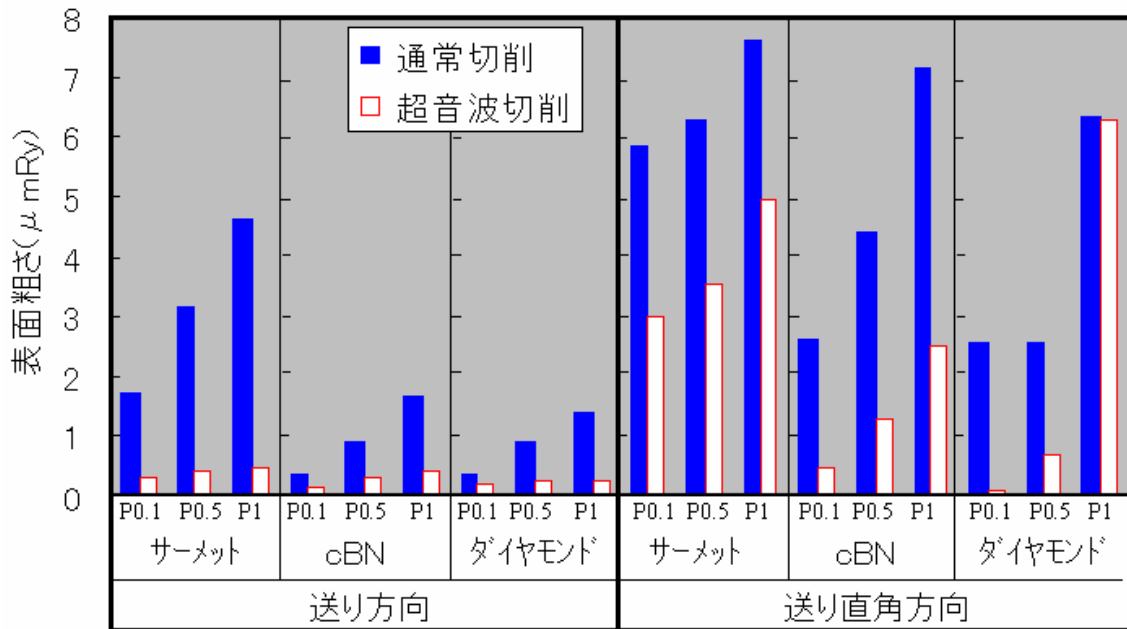
(b) S55C の加工面拡大写真

図 4-26 ダイヤモンド工具による加工面拡大写真

各使用工具におけるピクフィード量の変化による表面粗さへの影響について測定結果を図 4-27 に示す。



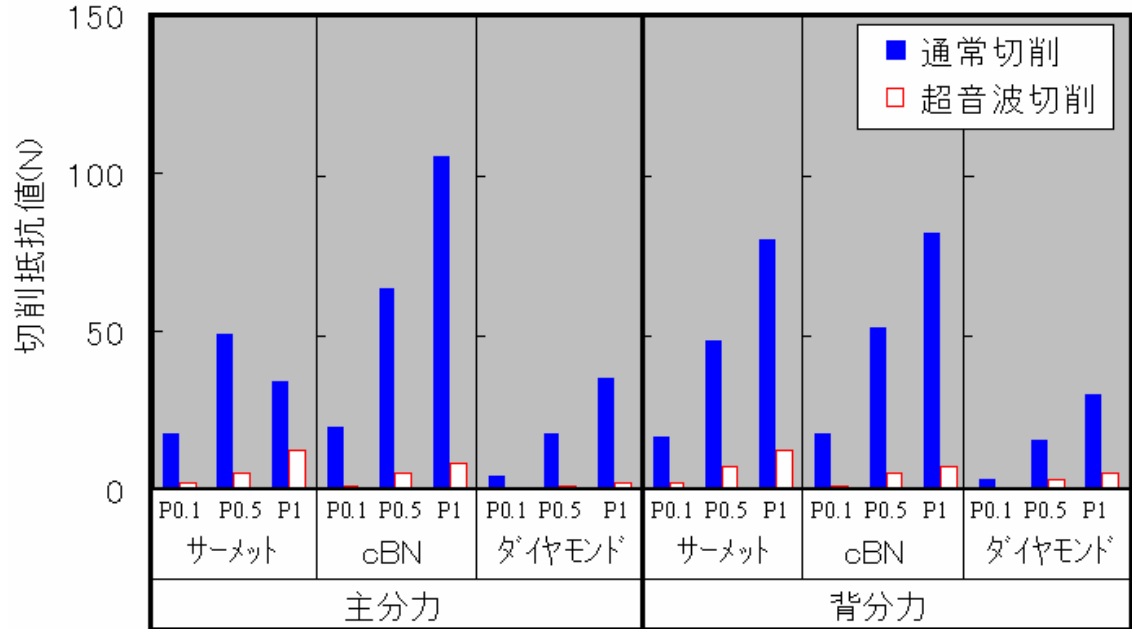
(a) NAK80 の表面粗さ (P : ピクフィード量)



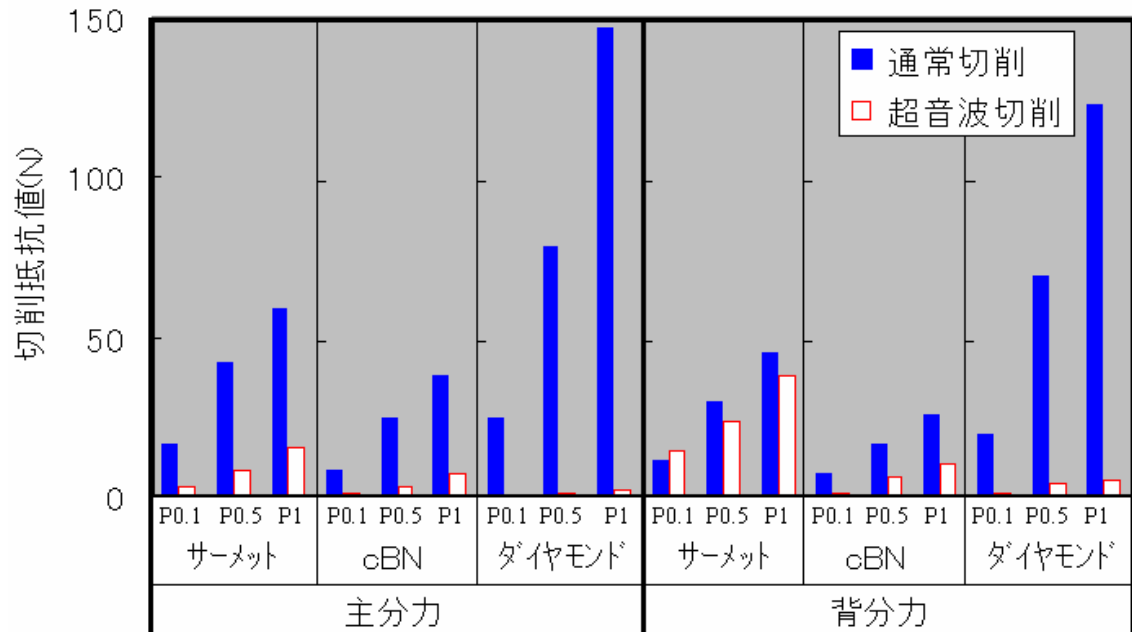
(b) S55C の表面粗さ (P : ピクフィード量)

図 4-27 表面粗さの測定結果

各使用工具におけるピックフィード量の変化による切削抵抗値への影響について測定結果を図 4-28 に示す。



(a) NAK80 の切削抵抗値 (P : ピックフィード量)



(b) S55C の切削抵抗値 (P : ピックフィード量)

図 4-28 切削抵抗値の測定結果

ピックフィードの変化による加工面への影響を見ると共に、パインダレス cBN とダイヤモンド工具を加えた上で、超音波加振による加工面への効果を比較した結果、全ての条件下においてピックフィードを狭く設定することで加工面の表面粗さを低減することができることが確認された。サーメット工具による加工面については、S55C 材においては超音波加振により良好な加工面を得ることが可能となり、NAK80 においては超音波加振により表面粗さが悪化することが確認された。パインダレス cBN 工具による加工面については、全ての条件においてサーメット工具以上の良好な加工面を得ることができたものの、NAK80 に対する送り直角方向の表面粗さが若干大きなものとなった。ダイヤモンド工具による加工面については、超音波加振により限りなく鏡面に近い仕上げ面を実現することが可能となり、NAK80 に対しては、ピックフィード 0.1mm の条件下において、送り方向、送り直角方向共に、サブミクロンの仕上げ加工面を実現した。

各ピックフィード量において、通常切削に比べ超音波加振切削では切削抵抗値を大幅に低減できることが確認され、特に鋼材切削におけるダイヤモンド工具の有用性を確立するための有効な手段となることが立証された。今回の実験条件では、切削面積として 30(mm)×15(mm) 領域の仕上げ加工に要する時間が約 90 分(ピックフィード 0.1 以上の場合)となったが、超音波加振による加工時の切削抵抗値が極めて微小であることから、臨界条件(より大きな切込み深さと、高速領域)における加工の実現が可能となることから、ヘール加工による高精度機械仕上げの確立へとつながることが明らかとなった。

4. 2. 3 工具摩耗領域への影響

サーメット工具にて、切込み深さ $10\mu\text{m}$ 、切削速度 $1.0\text{m}/\text{min}$ の条件下で、NAK80 の加工を行った際の工具逃げ面について、通常切削と超音波切削の場合における摩耗状況の比較を行った。工具刃先の概観を写真 4-29、摩耗領域の比較を図 4-30 に示す。

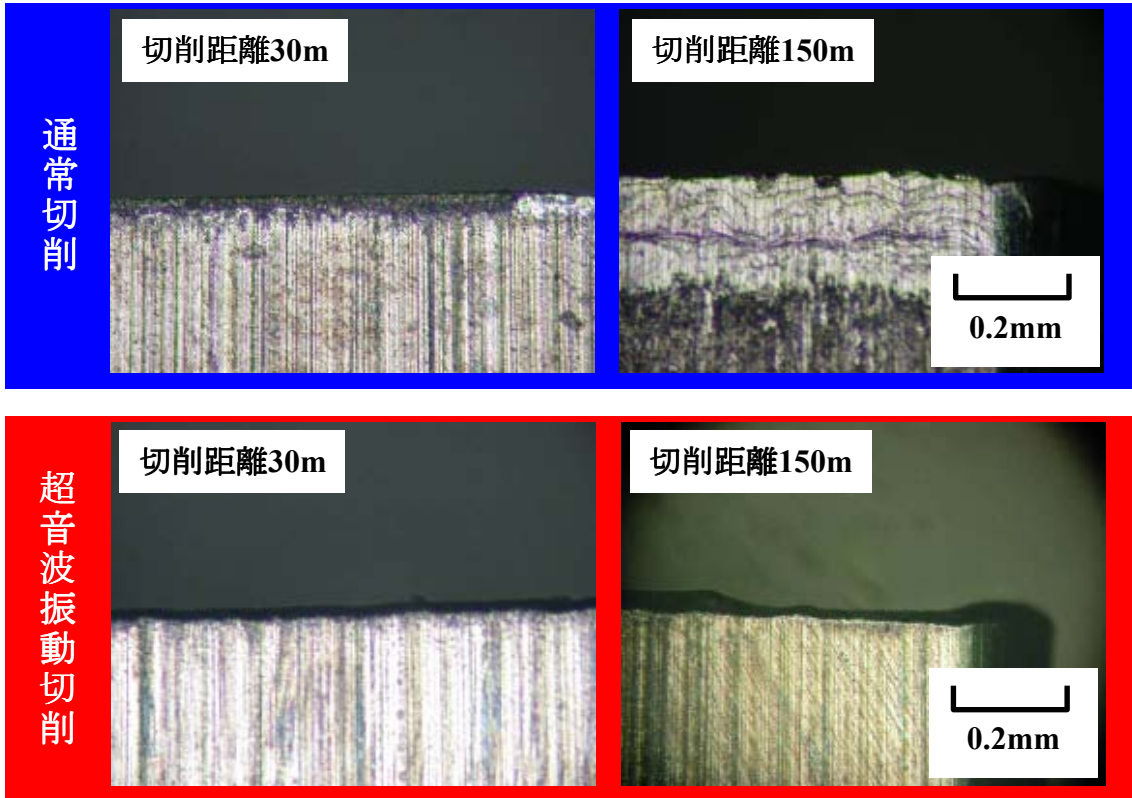


図 4-29 工具刃先の概観

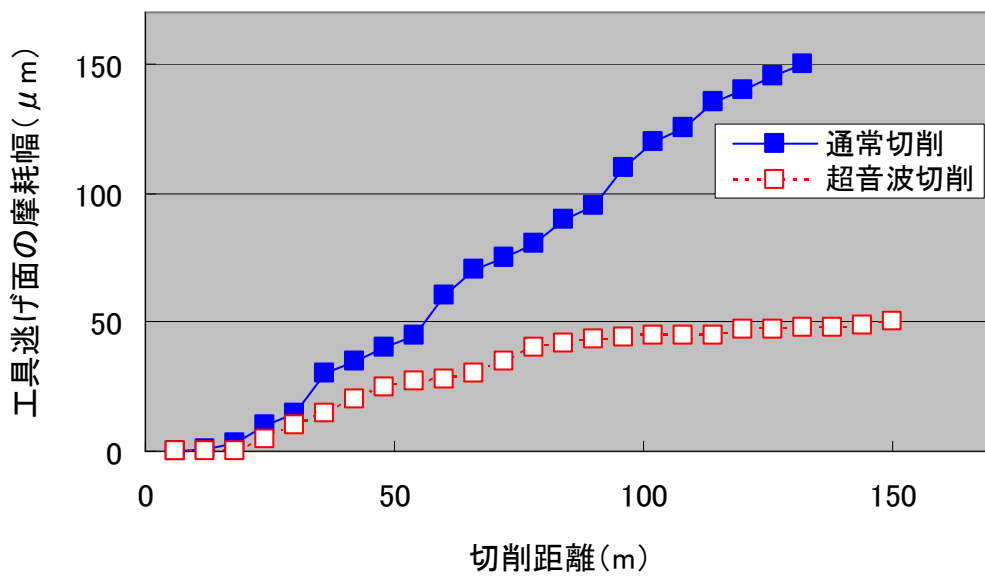


図 4-30 工具摩耗領域の比較

超音波振動の付加により、表面粗さの低減と切削抵抗値の大幅な減少に加えて、工具刃先における摩耗状況についても、超音波振動の付加による明確な効果が確認された。超音波振動により工具摩耗を低減できることから、切削距離の延長だけでなく、切り込み深さや切削速度、ピックフィード量を含めた加工条件の自由度が広がることで、工程全体における能率の向上が期待される。

4. 3 超音波振動を用いたヘール工具による鋼材の仕上げ加工

多軸工作機械を用いる利点として、曲面形状の被削材に対して工具姿勢を常に一定に保つことができる他、テーブル旋回により移動軸に対する被削材の姿勢を正確に設置でき、さらに被削材の取り付け/取り外し作業が不要となることが挙げられる。本節では、多面形状に対して、超音波振動を用いた鏡面仕上げ加工を行った上で、3次元の曲面金型における機械仕上げの可能性について検討する。切削条件を以下に示す。また、加工モデルを図 4-32 に示す。

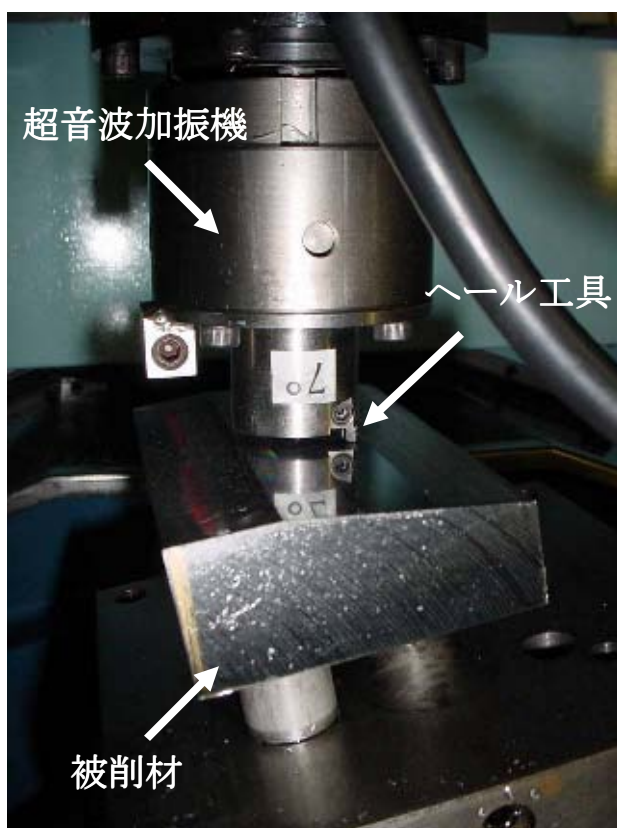


図 4-31 工具と被削材

[切削条件]

使用工具：

単結晶ダイヤモンド

被削材：

NAK80

切込み深さ（仕上げ加工）：

$1\ \mu\text{m}$

切削速度：

$1000\text{mm}/\text{min}$

加振振幅：

$20\ \mu\text{m}$ (周波数 27kHz)

ピックフィード量：

$0.1\ \mu\text{m}$

評価項目：

表面粗さ (R_z)

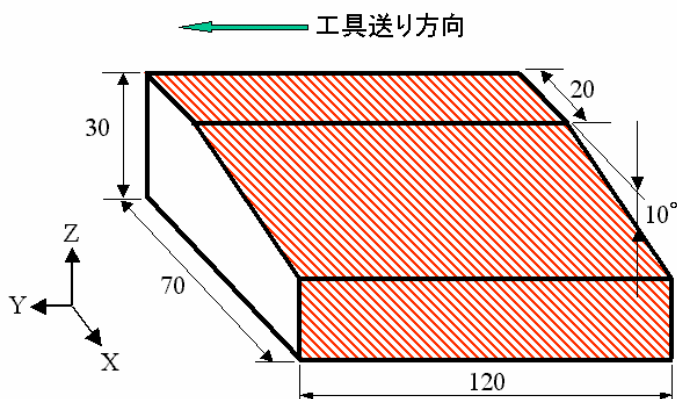


図 4-32 加工モデル

加工モデルに対する多面加工の工程を図 4-33 に示す。



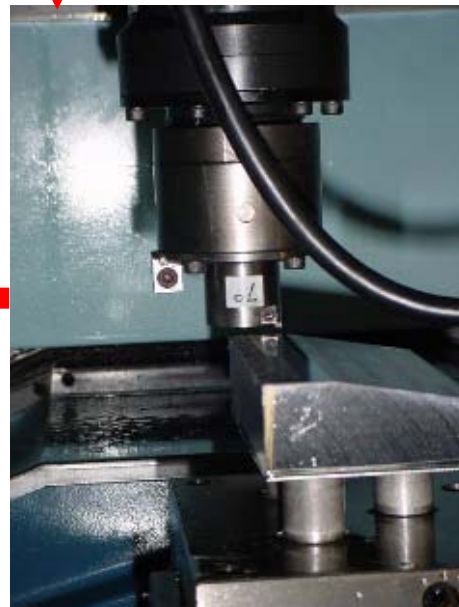
(a) 加工開始



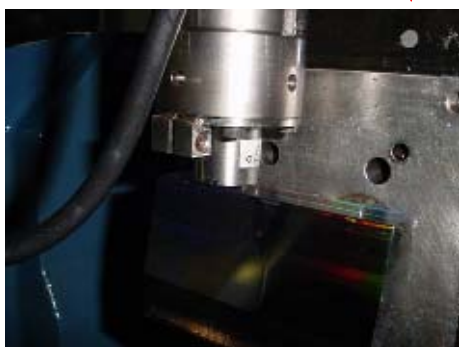
(b) 回転工具による粗加工



(d) 傾斜面の仕上げ加工



(c) 上面の仕上げ加工



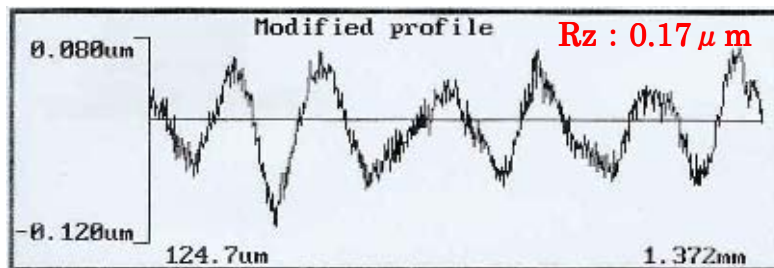
(e) 前面の仕上げ加工

写真 4-33 多面加工の工程

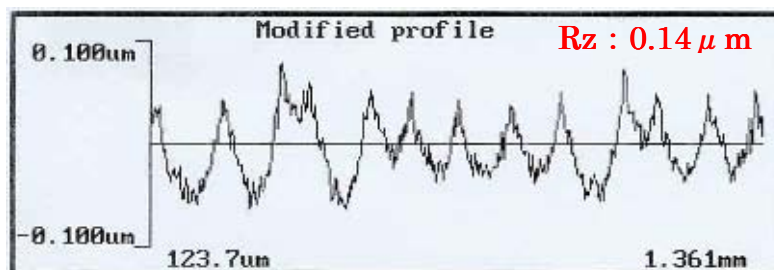
多面加工モデルの加工面概観を図 4-34、表面粗さの測定結果を図 4-35 に示す。



写真 4-34 多面加工面の概観



(a) 送り方向の表面粗さ



(b) 送り直角方向の表面粗さ

図 4-35 表面粗さの測定結果（傾斜面部分）

以上の結果より、鋼材を対象とした多面モデルのハール加工において、工具送り方向では $0.17 \mu m$ 、工具送り直角方向では $0.14 \mu m$ の表面粗さとなり鏡面仕上げを実現した。これにより、鋼材の仕上げ加工におけるハール工具の適用において、超音波振動の付加が極めて有効であることが確認された。

4. 4 本章の結論

ヘール工具を用いた仕上げ加工において、金型部品などに用いられる鋼材に対しては、工具材種として単結晶ダイヤモンドを用いた場合には、材料面での親和性により良好な加工が行えないことが一般的である。本実験では、超音波振動を付加することにより、単結晶ダイヤモンド工具による鋼材へのヘール加工を行い、表面粗さの低減、切削抵抗値の減少、工具刃先における摩耗状況の変化を確認した。これにより、最適切削条件を導出した上で多面体の鋼材に対する仕上げ加工実験を行い、サブミクロンの鏡面仕上げを実現した。本章の結果より、金型を構成する鋼材部品に対する仕上げ加工工程において、超音波振動を付加したヘール工具を適用する有用性が確認されたが、具体的な実用化を行う場合には多くの課題が残されている。その課題について以下に述べる。

ヘール加工の制約として、工具進行方向に垂直な上下方向(Z 軸方向)に対しては、起伏が緩やかな形状に限り加工が可能といったものが挙げられる。これは、本論の第3章にて述べた通り、工具すくい角が正の領域ではビビリ現象が発生し、工具すくい角が負の領域ではむしろ現象が発生しやすいためである。このことから、ヘール加工適用の位置づけとしては、回転工具による粗加工を行った後の仕上げ加工工程における使用が有効となるが、精密金型においては、複雑な曲面形状の加工が必要となる。また、主に凸形状となるコア型に対しては、ヘール加工の使用は比較的容易ではあるが、凹形状を伴うキャビティ型に対しては、角部の工具進行方向の切り替えなどが必要となるため、ヘール加工による機械仕上げは極めて困難となる。

これらの、形状による制約を解消するためには、多軸工作機械による加工が有効となる。多軸加工の利点としては、座標軸の変換を任意に行うことが可能であることから、回転工具の中心近傍を避けることによる、加工面への象限突起の発生を防ぐことが可能となる。しかしながら、同時多軸による制御を行った場合の機械誤差は数ミクロン以上となるため、加工面には特有のうねり模様が残存する。多軸加工の一例として、自動車用サンルーフ形状の縮小モデルの加工事例を図 4-36 に示す。

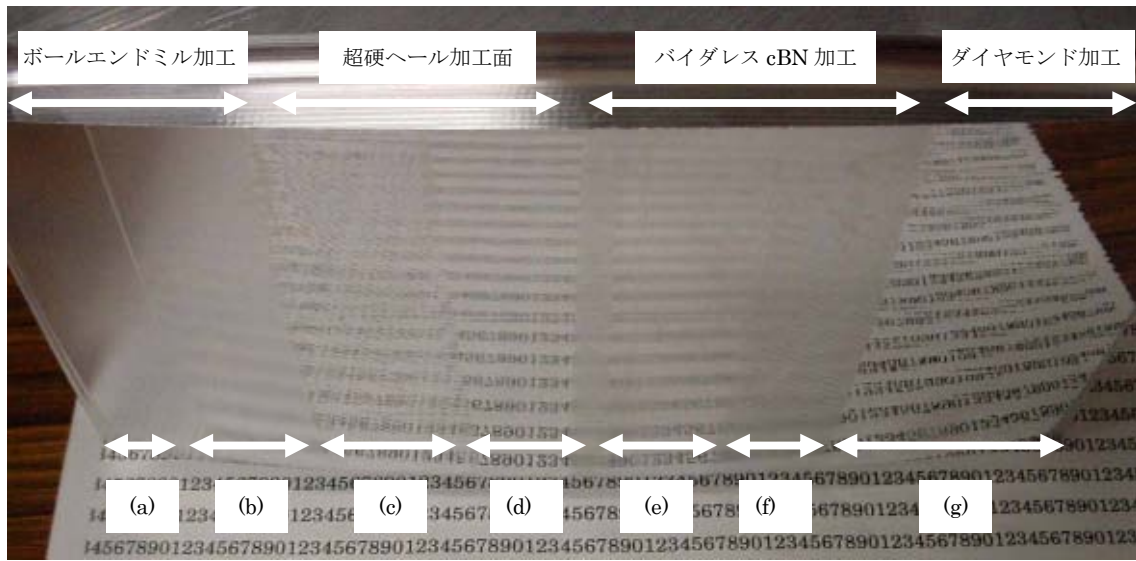


図 4-36 サンルーフモデルの曲面加工 (アルミ合金 A2017)

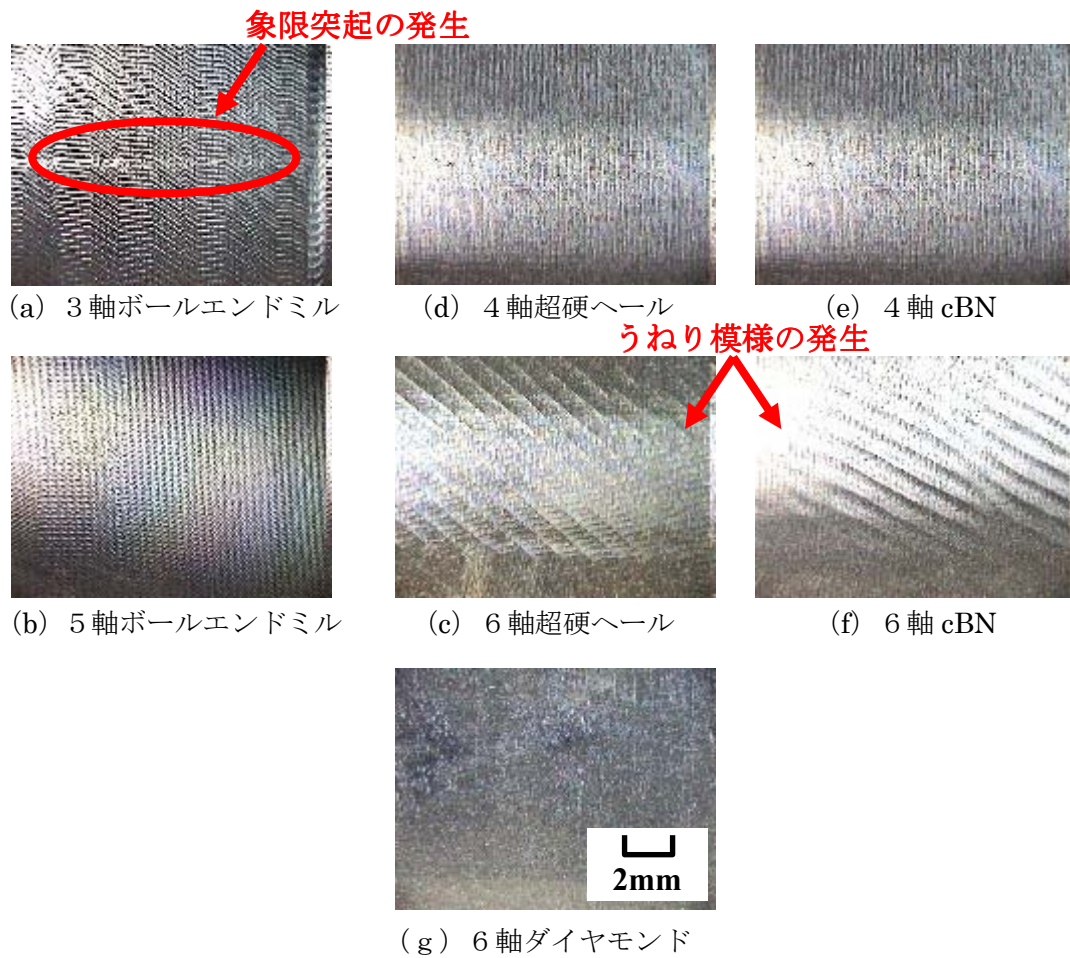


図 4-37 サンルーフモデルの加工面拡大写真

表 4-1 サンルーフ加工面の表面粗さ測定結果 (Rz)

	ボールエンドミル		超硬ヘール工具		cBNヘール工具		ダイヤモンド工具
	3軸	5軸	6軸	4軸	4軸	6軸	6軸
工具送り方向	2.40	3.19	0.43	0.18	0.19	0.80	0.10
工具送り直角方向	2.51	3.87	0.55	0.54	0.99	1.97	0.06

以上のように、多軸加工による曲面の鏡面仕上げを確立するためには、加工面へのうねり模様の発生を解消し、さらなる工作機械の高精度化が必要となることが分かる。また、今回の実験にて使用した捻り振動方式の超音波加振機を使用する場合には、機械の主軸中心と、工具切れ刃の位置が前後左右に異なるため、多軸加工を行う際には、曲面座標変換に対応したポストプロセッサの開発が必要となる。これより、金型の仕上げ加工工程において、多軸ヘール加工による曲面仕上げを実現するためには、工作機械の開発と共に、加振装置の開発が必要となる。

本章では、超音波加振により平面形状の鏡面仕上げ加工を実現したが、今後、金型の高精度化に伴い、機械仕上げ加工技術の必要性がより一層増す中において、本研究におけるヘール加工技術の適用化に向けた工作機械の開発、及び超音波加振機やヘール工具を始めとする周辺装置の開発を、引き続き継続していく必要がある。

<参考文献>

- 4-1) 神谷昌秀、鈴木裕、藤田康宏、伊藤哲史：6軸ヘール加工システムによる鏡面加工，型技術，16,8(2001)22.
- 4-2) Y.Takeuchi and H.Suzuki: Efficient and Accurate Manufacturing by means of Multi-Axis Control Machine Tools, Japan/USA Symposium on Flexible Automation, Vol. 1(1996)ASME, 343.
- 4-3) 久門哲也、石田徹、竹内芳美、河合知彦、沢田潔：非回転工具を用いた超精密マイクロV溝加工，精密工学会誌，70,10(2004)1301.
- 4-4) 米山陽介、石田徹、河合知彦、竹内芳美：非回工具を用いた自由曲面上への6軸制御超精密マイクロ溝加工，精密工学会誌，72,5(2006)647.
- 4-5) 隈部淳一郎、益子正巴：超音波振動切削に関する研究，日本機械学会論文集，24,138(1958)109.
- 4-6) 社本英二、鈴木教和、森脇俊道、直井嘉和：楕円振動切削加工法（第4報）-工具振動制御システムの開発と超精密切削への適用-，精密工学会誌，67,11(2001)1871.
- 4-7) E.Shamoto and T.Moriwaki: Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting Ann. CIRP, 48,1(1999)441.
- 4-8) M.Yoshimaru, Y.Fujita, T.Ito, M.Kouya, and H.Suzuki: Development of Multi-Axis Cutting Method Using Non-Rotational Tool with Ultrasonic Vibration, Journal of Automation Technology, 2,2(2008)105.

第五章 部品製作におけるヘール加工技術の適用と仕上げ効果の検証

製品の仕上げ加工工程におけるヘール加工⁵⁻¹⁾⁵⁻²⁾技術の適用として、第4章では量産技術として欠かせない金型部品を対象とした仕上げ加工を実施し、高品質な仕上げ加工を実現するための加工条件の導出から、曲面を対象とした鏡面仕上げを実現するための課題についてまとめた。

本章では、精密部品の製造分野においては金型を用いることなく製品自体を加工する事例が数多く見られることから、多面切れ刃による切削を必要とする溝加工や、ガラスなどの硬脆材を対象とした仕上げ加工、高硬度材を対象とした部品加工への適用を行った上で、その成果と課題についてまとめる。

5.1 異形シール溝加工工程におけるヘール加工技術の適用

近年、半導体製造装置のクリーン環境への対応は欠かせないものとなっており、特に真空装置においては高い封印効果を持たせるシール溝の加工が不可欠となっている。このシール溝へOリングなどのゴムパッキンを介した締め付けを行うことにより、高い真空度を保つことが可能となる。しかしながら、シール溝の加工を行った際、溝底面部分や溝側面部分において傷やカッターマークが発生した場合には、ゴムパッキンとの密着不足による真空度の低下やリーク状態を招くこととなる。シール溝の加工においては、加工能率の向上と共に仕上げ面の粗さを抑えることが不可欠な条件となっている。

半導体製造に使用される真空チャンバーの概観、およびシールゴムの締め付けを図5-1に示す。

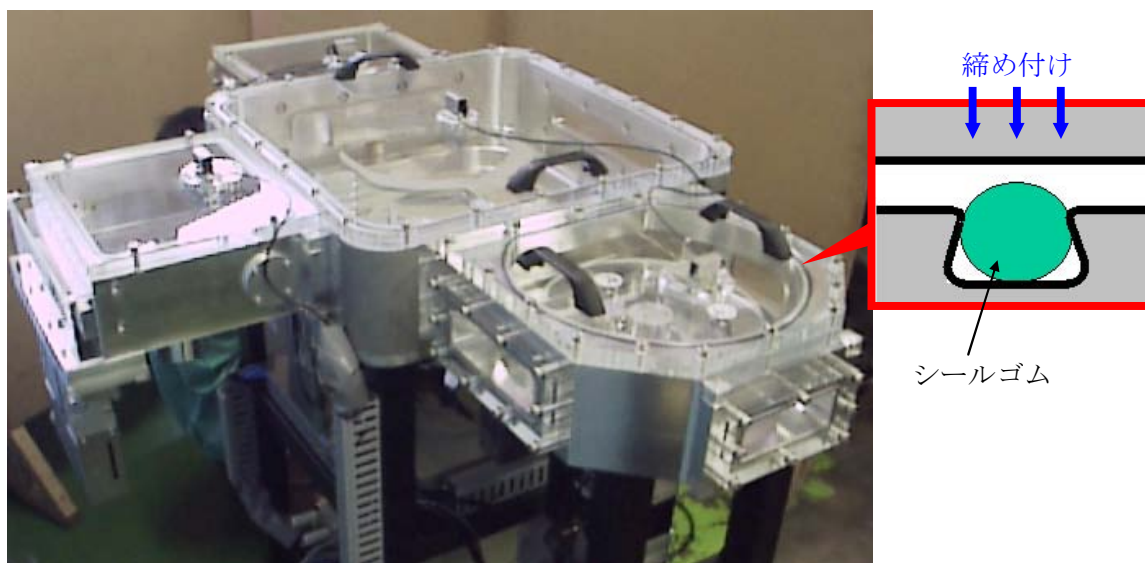


図5-1 真空チャンバーの概観とシールゴムによる締め付け

5. 1. 1 シール溝形状と従来加工方法

シール溝の加工を行う場合、従来方法ではボールエンドミルなどの回転工具を用いた切削が多用される。一般的には封印効果を上げるために手磨きによる溝底面部および溝側面部の仕上げ加工が行われる。

真空チャンバーの上蓋開閉時におけるシールゴムの落下を防止すると同時に、より高い封印効果を実現するための手段として、溝開口部より溝底面部の幅が広い逆テーパ形状のシール溝加工が望まれている。一般的な真空チャンバーに用いられる主なシール溝形状を図 5-2 に示す。

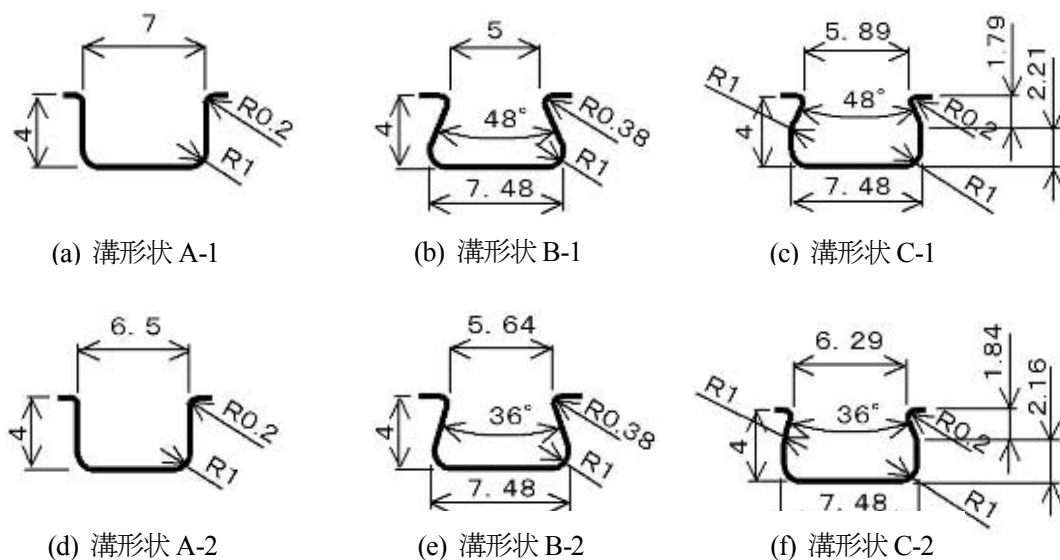
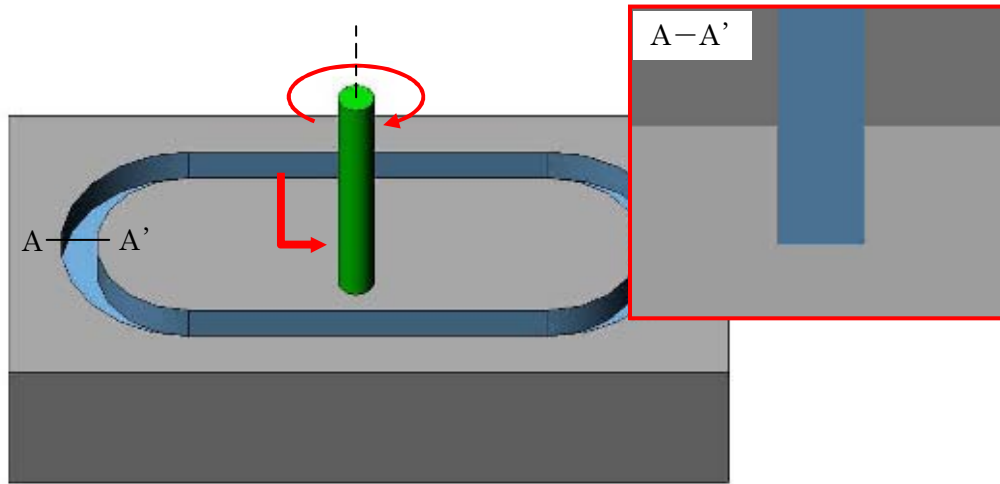


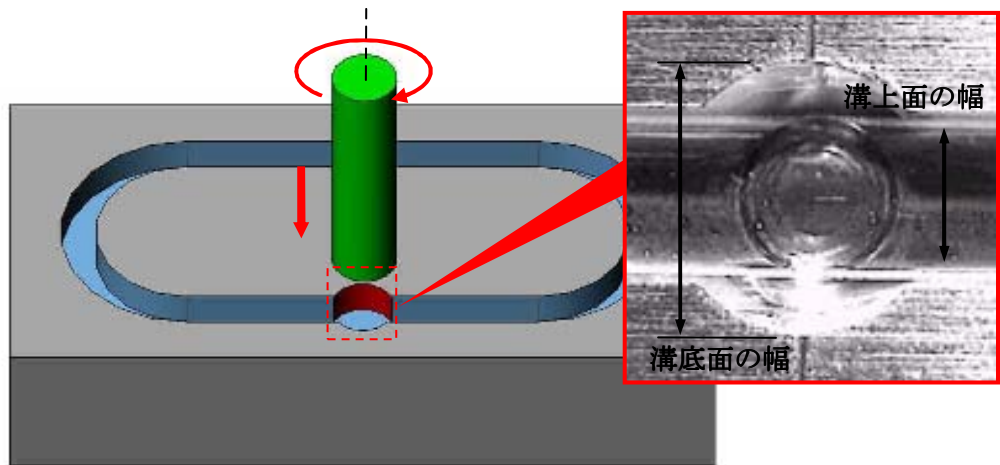
図 5-2 主なシール溝形状

ここで挙げた溝形状は一例ではあるが、基本的な形状としては通常のシール溝、逆テーパ形状のシール溝、および通常と逆テーパ形状の複合の 3 パターンとなっており、規格に合わせてその寸法が変化することとなる。

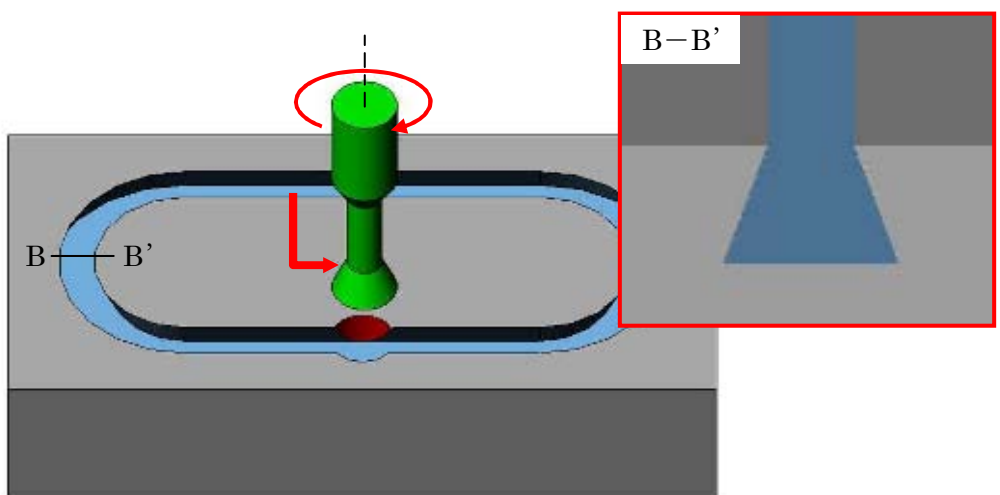
従来における逆テーパ形状のシール溝加工の手順を図 5-3 に示す。まず初めに、溝上面の幅と同じ直径の回転工具により加工を行う。次に、溝底面部と同じ直径の回転工具により、逆テーパ形状の特殊回転工具を挿入するための穴加工を行う。最後に、逆テーパ形状の特殊回転工具（アリ溝工具）にて逆テーパ形状の溝加工を行う。現状の加工方法では、異形溝形状と同じ形状の工具を逐次準備する必要があり、溝形状が変わる度に新たな工具の作成が必要となる。また、異形溝形状の工具を入れるための穴部分においては封印能力の低下が懸念される。さらに、逆テーパ形状のように溝開口部の幅に比べ溝底面部の幅が広い形状の場合には、最終仕上げ工程における手磨き作業は極めて困難なものとなる。



(a) 溝上面と同径の回転工具による加工



(b) 溝底面と同径の回転工具による挿入口の加工



(c) 特殊工具（アリ溝工具）による加工

図 5-3 従来の逆テーパ溝加工手順

5. 1. 2 多軸ヘール加工用 CAM システムの開発

本研究において開発を進めてきた微小切込みによる仕上げ加工が可能なヘール工具⁵⁻³⁾⁵⁻⁴⁾⁵⁻⁵⁾を用いることにより、異形溝形状の工具を入れるための穴加工や手磨き作業を解消すると共に、工具形状以外の溝形状を含めた異形シール溝加工を行うことにより、種々の溝形状に対応できる自由度の高い加工法の開発を行う。

ヘール工具による逆テーパ形状の溝加工を行うために、スピンドル部に取り付けた非回転工具の姿勢を制御⁵⁻⁶⁾⁵⁻⁷⁾し、工具幅を減少させた状態で被削材へのアプローチを可能とする。これにより、逆テーパ形状の溝上部など、工具幅よりも狭い溝の加工が可能となる。加工位置が溝底面部に近づくにつれて、工具軸回りの回転を戻した状態で加工を行う。逆テーパ形状では切削位置より上部の溝幅が狭くなっているため、溝の上部から切削点に工具を降下させる際には溝の側面に工具が干渉しないように工具幅を減少させた状態で移動する必要がある。また、切削後に工具を上昇させる際も同様に工具幅を減少させる。傾斜アプローチによる工具幅の減少について図 5-4 に示す。

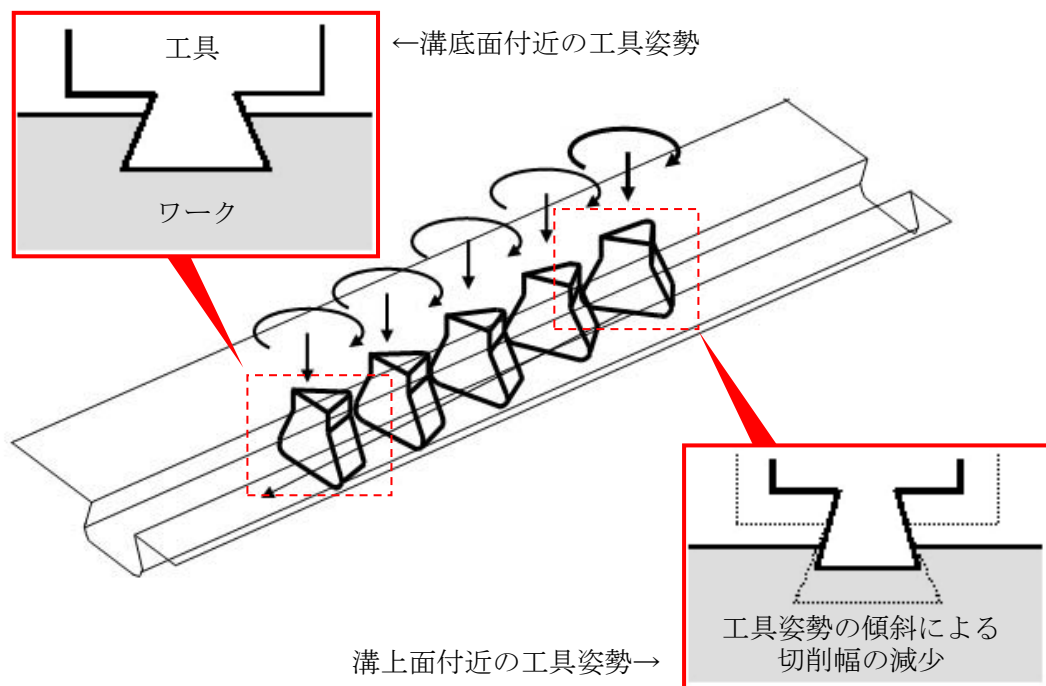


図 5-4 傾斜アプローチによる工具幅の減少

非回転工具を使用した精密加工を実現するために、第4章までに用いた(株)松浦機械製作所の同時5軸制御マシニングセンタ MAM72-3V を使用した。データの最小指令単位は、直動軸 (X, Y, Z 軸) が $0.1\mu\text{m}$ 、回転軸 (A, B 軸) が 0.0001deg 、主軸 (C 軸) が 0.001deg となる。主軸スピンドル部分に、非回転工具の角度制御を付加するための制御装置として、(株)安川電機製の YASNAC-J100ISA を使用した。加工用プログラムについては、商用システムの CAMTOOL-C3 をベースとし、溝加工用経路を生成する。溝経路、溝断面、および工具形状については下記の条件を仮定する。

- (1) 溝経路は Z 一定の閉じた曲線とする
- (2) 溝断面の形状は溝経路の中心線に対して左右対称とする
- (3) 図形要素は順序付けされた直線と円弧の列、および円の組合せとする

工具経路の一例を図 5-5 に示す。工具経路の生成は、直線と円弧により表現された溝形状と、工具稜線との接触位置を求めることにより生成する。また、ヘール工具側面の逃げ面と溝との干渉は、濃く具逃げ面の稜線と溝形状が交差した場合、もしくは工具逃げ面の代表点が溝形状の外側に存在する場合に発生するものとし、新たな工具割り出し角による工具稜線を生成する。このように、工具逃げ面と溝との干渉を回避するように、工具割り出し角を変化させながら所定の切り込みを与えた後、工具姿勢を固定した状態での溝加工を行う。加工終了点では切り屑の排出を行うために工具を Z+方向に回避させる。この際、溝上面部と工具との干渉を避けるため、工具回避は切削幅が最小となる傾斜状態にて行う。

また、工具姿勢の変化を伴いながらの移動となる場合(図中の b, d など)、工具の移動速度と割り出し速度の大小から、工具側面の移動速度が負とならないように、工具割り出し速度の上限を決定する。この際にも工具逃げ面と溝側面における干渉チェックを行う。

以上の手順を指定深さに達するまで繰り返した後、最終仕上げとして細かい切削ピッチによる仕上げ加工を行った上で、さらに切り込みを与えないゼロ切削を加えることにより、溝底面における仕上げ精度の向上を図っている。

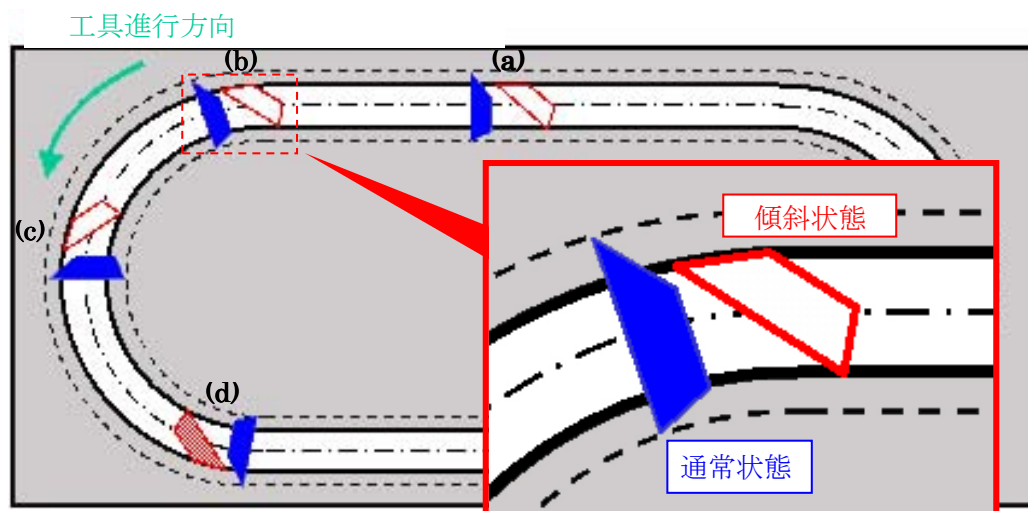


図 5-5 溝経路生成の一例

5. 1. 3 逆テーパ溝加工用ヘール工具の開発

本報告にて紹介する加工方法では、工具を工具軸廻りに傾けることが重要な要素となっており、傾斜角度を大きくとれる工具形状を設計する必要がある。従来のヘール溝加工では溝断面形状と同一の工具を用い、工具のすくい面が工具の進行方向と直角になるような制御と、側面の刃の逃げ面角度は、工具逃げ面が溝側面に干渉しない程度の小さな角度、かつ左右均等の形状にて設計した工具による加工を行った。しかしながら、工具を工具軸廻りに傾ける方式では、傾斜角度以上に逃げ面角度を大きくする必要があり、この場合、工具逃げ面を左右均等に設計にすると、工具の厚みが小さくなることによる工具強度の低下から、ビビリやたわみが発生しやすくなる。このため、工具の進行方向の前方に位置する側面の逃げ面角度のみを大きくし、反対側の側面の逃げ面角度は小さくする、側面の逃げ面形状を左右非対称とすることにより、工具強度を保つと共に工具軸廻りの傾斜角度を大きくとれる形状の設計を行った。この切削方式は、溝の断面形状と同一の工具を使う必要がないことから、溝形状が変わる度に専用工具を作る必要がなく、汎用ヘール工具として使用することが可能となる。

加工条件として、切り込み深さ $30\mu\text{m}$ の粗加工の後、切り込み深さ $2\mu\text{m}$ の仕上げ加工を行い、切削速度は直線部分においては 4000mm/min 、円弧部分においては工具の角度制御を伴う多軸切削となることから、C 軸の最高回転速度に合わせた 750mm/min に設定した。直線部分から円弧部分への切り替え部分では、速度変化は緩やかに行うものとしている。ヘール加工を行う際の切削速度に関しては、速度の変化による加工面への影響は殆ど生じないものの、 4000mm/min 以上の速度ではビビリ現象が発生することが確認されている。このことから、今回の実験では 4000mm/min 以下の領域における可変速度での切削を行った。被削材にはアルミ合金 A2017、工具には超微粒子超硬素材(K10)の逆テーパ形状ヘール工具を用いた。ヘール加工を行う際、工具刃先におけるビビリ現象が発生することがあり、加工面の面粗さ低減を妨げることとなる。そこで今回の実験においては、切削の際に発生するビビリを抑制するために、制振合金素材の主軸ホルダを使用した。逆テーパ溝加工用ヘール工具を取り付けた主軸ホルダの概観を図 5-6 に示す。

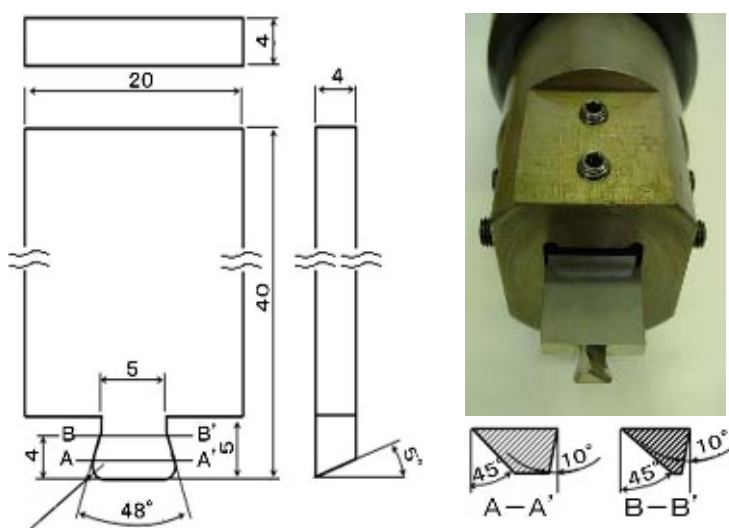


図 5-6 逆テーパ溝加工用工具と制振合金ホルダ

ヘール工具を用いた逆テーパ溝加工では、工具姿勢が傾斜した状態での加工が必要となる。溝側面においては工具進行方向に対し右側面はすくい角が正、左側面はすくい角が負となる。3章での実験結果において、ヘール工具による加工を行う際には、工具姿勢、及び工具すくい角は共に 0° に設定することが望ましいことが確認されている。工具姿勢の変化が加工面に与える影響についての表面粗さの比較結果より、すくい角が $+15$ 度の条件において、ビビリによる表面粗さの悪化が見られたものの、今回の加工において必要となる傾斜角においては、ビビリ現象が発生しない限り、表面粗さへの大きな影響は生じないことが確認された。溝切削においては、すくい角が正となる右側面と、すくい角が負となる左側面が常にバランスを保ちながら加工を行うことにより、明確なビビリ現象の発生は確認されなかった。

5. 1. 4 切り屑排出を考慮した加工プロセス

切削ピッチが大きな粗加工においては比較的厚い切り屑が発生するため、1周の切削毎に工具を上昇させることにより、切り屑の排出を促した。しかし、逆テーパ形状の溝加工では、溝上面部分よりも切り屑の幅が広がるため、ヘール工具のみによる一括加工では切り屑の排出が円滑に行えず、工具刃先部分における切り屑の噛み込みが発生した。これにより切削面が傷付けられ、良好な加工面を得ることができなかった。そこで、工具刃先における切り屑の噛み込みを防ぐために、回転工具による前加工を追加した。回転工具による前加工を施すことにより、ヘール工具による加工では両側面から細い渦巻き状の切り屑が発生し、溝内部に留まることなく排出され、切削面に傷を付けることがなく加工を行うことができた。改善した加工工程を図5-7、加工実験の様子を図5-8に示す。

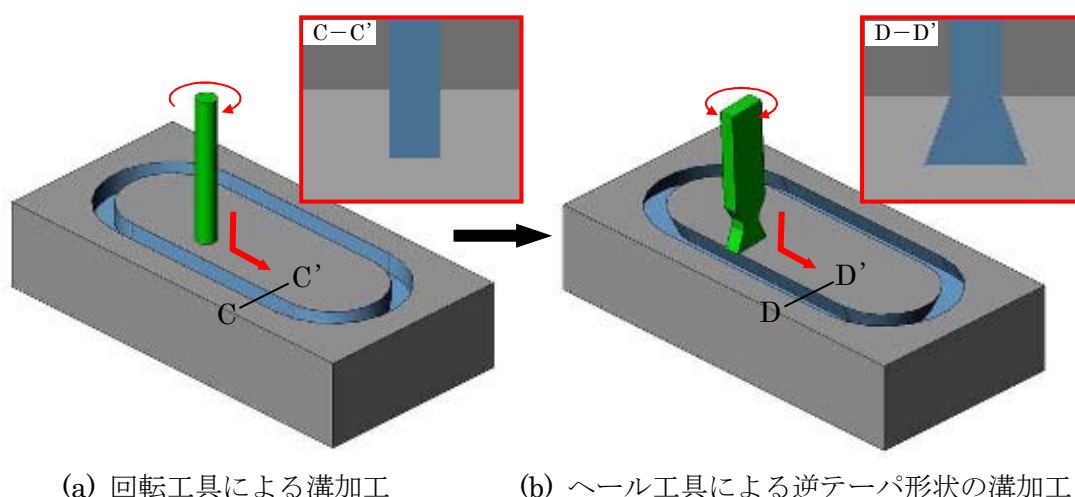
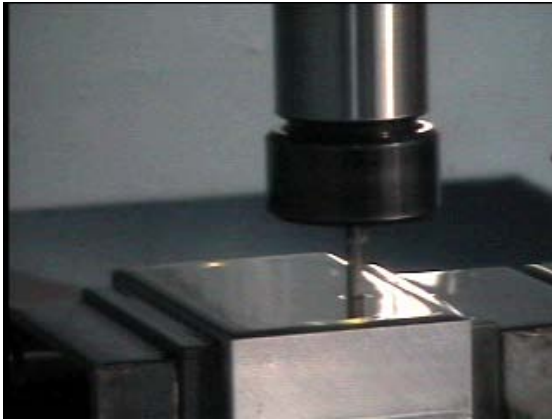


図 5-7 切り屑排出を考慮した加工工程



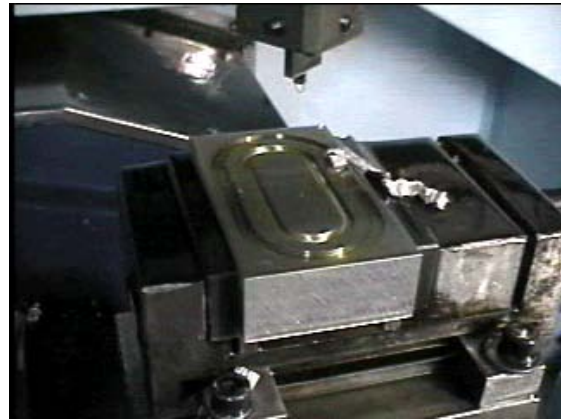
(a) 回転工具による溝加工



(b) ヘール工具による側面切削



(c) 側面切削における切り屑排出



(d) ヘール工具による底面切削

図 5-8 逆テーパ形状の溝加工実験の様子

溝底面部の仕上げ加工においては、発生する切り屑の厚さは極めて薄いことから刃先への噛み込みは発生しなかった。また、粗加工から仕上げ加工までを全てヘール工具にて行った場合と比較すると、回転工具による粗加工を併用することにより、加工時間を大幅に短縮することが可能となった。さらに、切り屑の排出が促進されたことにより、これまでは断続的なせん断状の切り屑が発生していたのに対し、回転工具による前加工を行うことにより、発生する切り屑は連続的な流れ型となっている。これにより、発生する切り屑が円滑に排出され、工具刃先における切削状況が良好となっていることが考えられ、シール溝の底面部分に加え、側面部分の表面粗さ低減につながっていることがわかる。さらに、切り屑の排出が円滑に行われることから、工具刃先における切り屑の蒸着による構成刃先の発生も低減させることができた。これにより、工具刃先の磨耗を低減することができ、工具の長寿命化にもつながることが確認された。以上のことから、シール溝加工におけるヘール加工の適用では、回転工具との併用を行い、主に仕上げ加工工程において用いることが有効であることが明らかとなった。

5. 1. 5 シール溝の品質評価

逆テーパ形状の溝加工に対してヘール工具を用いることにより、同一形状の工具により異なる形状の溝加工を行うことができた。基本形状が大きく異なる限り、加工パスの変更を行うことにより様々な形状の溝加工への適用が可能となる。また、今回の実験では、粗加工において回転工具の併用を行ったが、被削材は機械テーブルに固定したままで行うことができ、段取り換え作業は一切必要としなかった。このことから、従来工程による溝加工作業に比べ、作業効率が向上したことがわかる。さらに、真空チャンバーに使用されるシールゴムの受け面（シール溝の対面側）には、シール溝と同等の表面仕上げが要求されるが、ヘール加工を用いることにより平面の鏡面仕上げ加工を行うことが可能である。逆テーパ形状の溝加工、及び平面部の鏡面仕上げ加工を施したサンプルワークの概観を図 5-9、溝断面の形状を図 5-10 に示す。



図 5-9 サンプルワークの概観



図 5-10 溝断面の形状

溝形状 2 の底面部分において、従来加工方法にて使用される専用回転工具（アリ溝工具）による加工と、ヘール工具による加工によるシール溝底面の概観比較を行った。回転工具による加工面では、刃先の回転による円形のカッターマークが確認され、加工面とシールゴムとの間に隙間が生じることから、密着性の低下が懸念される。これらのカッターマークを除去するためには手磨きなどの二次的作業が必要となる。一方、ヘール工具による加工面では、若干のむしれの発生が確認されるものの、カッターマークの発生は極めて微小であり、その方向は溝形状に添ったものとなっている。このことから、加工面とシールゴムとの密着性の低下は殆ど生じず、手磨き作業などの二次的仕上げ工程の必要性は極めて低いことが予想される。回転工具によるシール溝加工面の拡大写真を図 5-11、ヘール工具によるシール溝加工面の拡大写真を図 5-12 に示す。

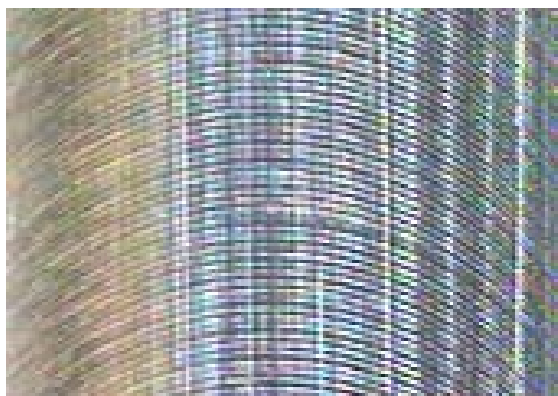


図 5-11 回転工具による溝底面

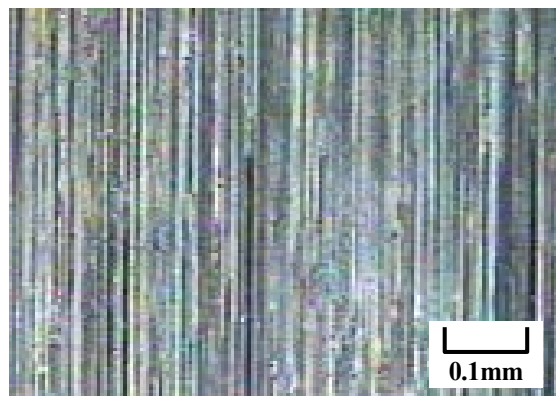


図 5-12 ヘール工具による溝底面

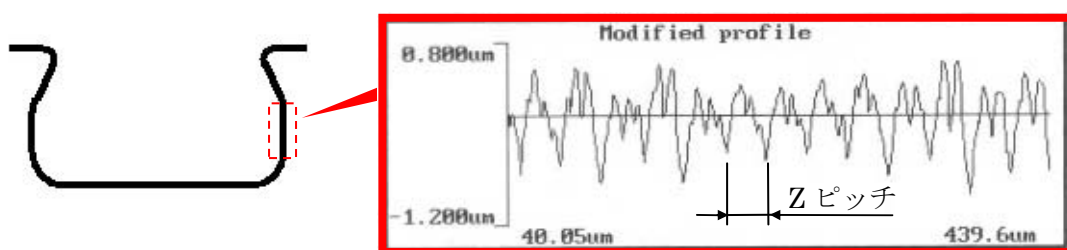


図 5-13 溝側面部の表面粗さ測定結果

シール溝部におけるリークを防止するためには、トラック円周方向における面精度を高める必要がある。本報のようにヘール加工システムを用いたシール溝加工においては、トラック円周方向が切削方向と一致し、カッターマークが常に並行に残存することになる。このことから、シール溝加工へのヘール加工技術の適用は、溝表面の仕上げ面精度の面からも極めて有効となることがわかる。また、今回の実験では 1 周切削毎の Z 方向への切込みピッチを $20\mu\text{m}$ に設定しており、溝側面部において工具側面の R 形状が転写されることによるカプスハイトの発生が確認された。溝側面部の表面粗さ測定結果を図 5-13 に示す。このことから、溝側面部における表面粗さは $1.5\mu\text{mRz}$ 前後となったが、Z 方向への切込みピッチを細かく設定することにより、切削時間が増加するものの、サブマイクロメートル以下の仕上げが可能となる。一般的な真空チャンバーに用いられるシール溝の表面粗さの要求精度を表 5-1、今回の実験でヘール加工による仕上げ加工を施した逆テーパシール溝の加工面粗さの測定結果を表 5-2 に示す。

表 5-1 一般的なシール溝への要求精度

	表面粗さの要求精度
溝底面	1.6~3.2 μ mRz(工具送り方向:0.8 μ mRz)
溝側面	3.2~6.3 μ mRz(工具送り方向:1.6 μ mRz)

表 5-2 ヘール工具による逆テーパ形状のシール溝加工面

		工具送り方向	工具送り直角方向
溝底面	直線部分	0.48 μ mRz	0.62 μ mRz
	円弧部分	0.51 μ mRz	0.64 μ mRz
溝側面	外周部分	0.49 μ mRz	1.45 μ mRz
	内周部分	0.42 μ mRz	1.30 μ mRz

ヘール加工による加工面粗さの測定結果より、溝底面直線部分においては送り方向 0.48 μ mRy、送り直角方向 0.62 μ mRy、円弧部分においては送り方向 0.51 μ mRy、送り直角方向 0.64 μ mRy の面粗さが得られ、溝側面部においては送り方向 0.49 μ mRy、送り直角方向 1.45 μ mRy の面粗さが得られ、実用レベルの要求精度を十分に満たした精度の加工面を得ることができた。

今回の実験条件における加工時間は、回転工具からヘール工具への段取り作業を含め 30 分前後となり、従来加工工程に比べ大幅な時間短縮の実現が確認された。今後、サーボ制御技術の進化や工作機械の高速化により、更なる加工時間の短縮が期待される。以上のことから、ヘール工具による仕上げ加工を施したシール溝において、従来加工工程では不可欠であった手磨きなどの仕上げ加工工程の解消を実現することが可能となることが明らかとなった。

5. 2 硬脆材を対象としたヘール加工技術による仕上げ加工

近年急速な発展を遂げているバイオ分野では、微小流路の組み合わせにより材料の反応を促進させるマイクロリアクタの需要が拡大している。一般的なマイクロリアクタはアクリルなどの樹脂により作成されるが、樹脂軟化点を越える温度下における材料の反応やその過程を観察する場合には、高い耐食性を有する熔融石英ガラスの使用が必要となり、その流路には観察時における利便性に備えて高い仕上げ面精度が求められる。これらを実現するための手法としてエッチングによる加工法が用いられる場合があるが、設備投資への負担は多大なものとなる。

ここでは、マイクロリアクタの一般的な材料として用いられるアクリルと硬脆材である熔融石英ガラスを対象とし、微小流路を切削する加工プロセスにおいて、ヘール工具による仕上げ加工を適用する。マイクロリアクタのサンプル形状を図5-14に示す。

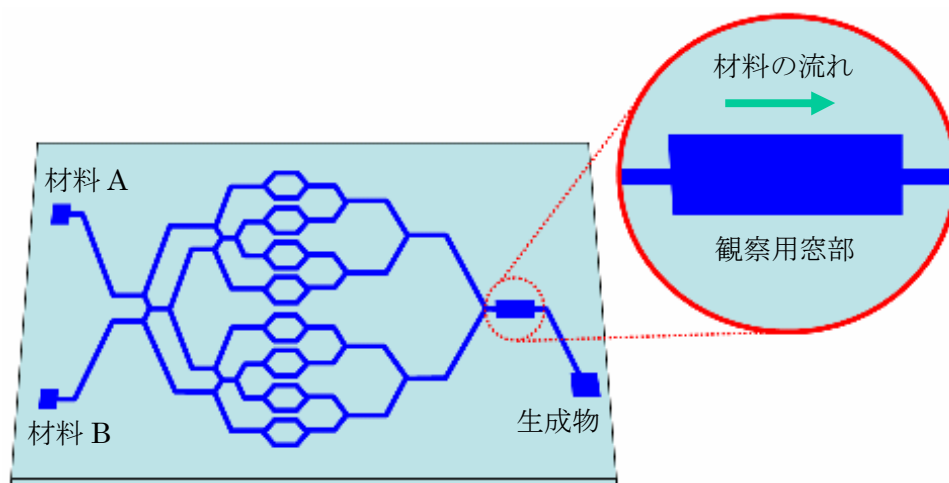


図 5-14 マイクロリアクタのサンプル形状

硬脆材の加工には研削加工が用いられる場合が多く、延性モードでの加工を実現することにより良好な仕上げ面を得ることが可能となる。延性モード研削加工技術に関する研究⁵⁻¹⁰⁾や砥粒先端の切れ刃エッジ形状がクラック深さに与える影響について明らかにした報告⁵⁻¹¹⁾により、破壊機構について解明されている。研削加工では砥石の加工特性により、加工面粗さの低減を追求すれば加工時間が膨大となる。また、エンドミルによる切削加工では、回転痕による精度劣化や工具寿命に起因する工具中心近傍での切削性能の低下が問題となる。これらを解決するために、工具形状や加工経路の変更により効率と精度を追求する種々の研究報告がなされており、ボールエンドミルを加工面に対し傾斜させることにより良好な加工面および工具寿命の延命化を行った報告⁵⁻¹²⁾があるが、矩形溝を対象とした場合においては加工残りが発生する場合がある。ここでは加工残りを抑制することが可能なヘール工具を用い、アクリルと熔融石英ガラスを対象とした硬脆材の仕上げ加工を行った。

流路内観察用窓部の底面の平滑性と幾何学的影響の低減を重視した加工を行う上で延性モード切削の実現が必要不可欠となることから、工具刃先に超音波振動を付加した。超音波振動を用いた切削については、楕円振動切削法の報告^{5-13) 5-14)}においても確認されているように、切削抵抗の減少により工具寿命が延長され良好な加工面を得ることが明らかとなっている。本論文の第4章にて、鋼材を対象としたダイヤモンドヘール工具による仕上げ加工として、超音波振動切削による切削抵抗値の低減と工具寿命の延長、加工面の平滑化に対する効果を確認しており、その結果を踏まえた上で硬脆材を対象とした加工実験を行う。

硬脆材に対する切削を行う際には、延性モードによる切削加工の実現により、良好な加工面を得ることができる。種々の研究結果では、切込み量を微少に設定することにより延性モードによる切削加工の実現が可能となることが報告⁵⁻¹⁵⁾されている。そこで、微少切込みによる切削実験を行い導出された切削条件および工具寿命の増長を目的とした超音波振動切削の適用を行い、延性モードを維持するための切削条件における加工実験を行った。

切削形態は全て一方向の工具送りによる直線切削とし、加工面における光透過率、表面粗さ、切り屑形態、工具刃先の摩耗状況の4点について、超音波振動を伴う場合、および超音波振動を伴わない場合(以下通常切削と呼ぶ)における比較を行った。ヘール工具を用いる際の送り速度は、通常切削を行う場合にビビリ現象が発生しない領域として2000mm/minに設定した。回転工具、及びヘール工具における各切削条件を表2に示す。評価項目として、回転工具とヘール工具による光透過率の比較、および超音波振動による加工面への影響の2点について確認した上で、マイクロリアクタの加工実験を行った。光透過率の測定には紫外可視分光光度計(日本分光製 V-550)を用いた。表面粗さの測定には、Taylor-Hobson社製 FormTarysurf-120L、加工面の状態観察には、KEYENCE 光学式顕微鏡 VHX-100 を用いた。

5. 2. 1 回転工具とヘール工具による光透過率の比較

回転工具とヘール工具(通常切削)により加工を行い、加工面における光透過率の比較を行った。被削材には、マイクロリアクタの材料として一般的に用いられるアクリル材を対象とした。主な加工条件を表 5-3、加工面の拡大写真を図 5-15 に示す。回転工具による加工面にはむしろ痕が発生したが、ヘール工具による加工面に目立ったむしろ痕は確認されなかった。エンドミル加工面、ヘール加工面、および無加工面(研削面)における光波長と透過率の測定結果を図 5-16 に示す。

表 5-3 加工条件

	回転工具	ヘール工具
工具材質	超硬	単結晶ダイヤモンド
工具サイズ	φ 2.0mm	2.0mm
回転数	8000rpm	-
送り速度	100mm/min	2000mm/min
切り込み深さ	0.02mm	0.003mm



(a) 回転工具による加工面



(b) ヘール工具による加工面

図 5-15 アクリルの加工面拡大写真

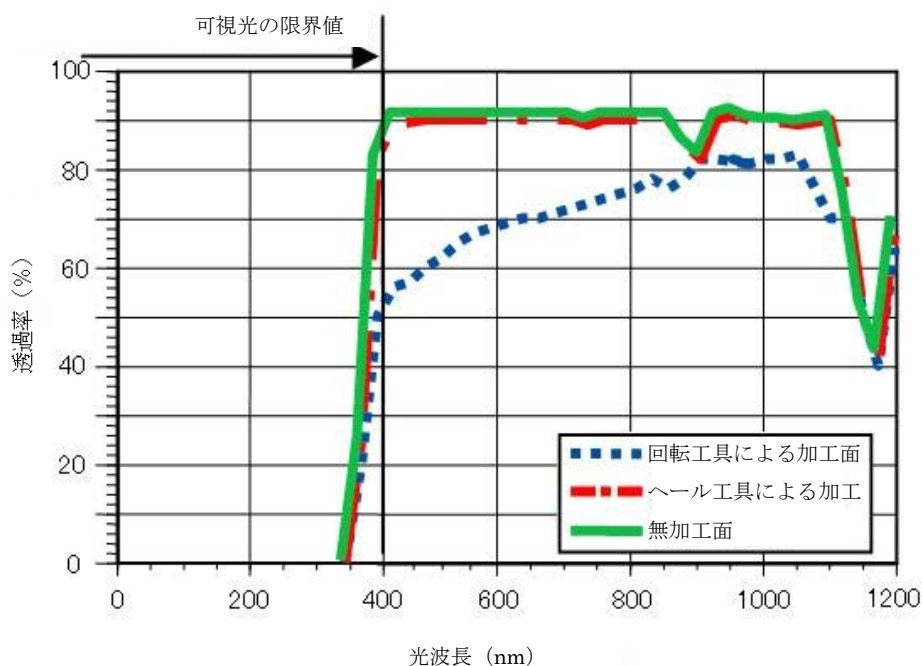


図 5-16 加工面の違いによる光の透過率の比較

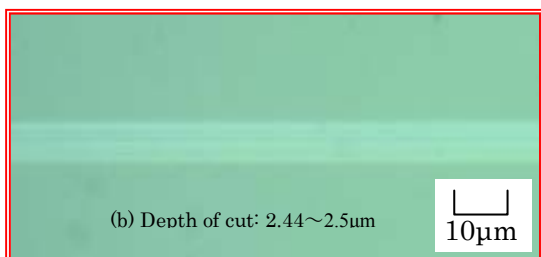
5. 2. 2 超音波振動による加工面への影響

Z方向の切込み量を変化させながら直線切削を行い、超音波振動を伴う場合と通常切削の各条件において、切込み深さの違いが工具刃先と加工面へ与える影響について確認した。被削材には熔融石英ガラスを用いた。加工中に発生する切り屑を効率良く除去することにより、工具刃先の温度上昇を抑制する効果や切削時における切り屑の噛み込みを防止する効果がある。効率的な切り屑除去と温度上昇の抑制を行うため、熔融石英ガラスの加工面を水中に浸した状態での切削を行った。

超音波振動を付加した状態における切り込み深さ $0.1\sim 0.16\mu\text{m}$ 、および $2.44\sim 2.5\mu\text{m}$ の加工面拡大写真を図 5-17 に示す。通常切削における同条件の切込み深さの加工面拡大写真を図 5-18 に示す。この結果より、超音波振動を付加した場合の切削においては、切り込み深さ $2.5\mu\text{m}$ までの条件下では脆性損傷は確認されず、延性モード切削が行なわれていることがわかる。一方、通常切削においては切り込み深さが極めて浅い領域においてのみ延性モード切削が行なわれているものの、切り込み深さが $2.44\mu\text{m}$ の領域では脆性破壊による損傷が発生している。



(a) 切り込み深さ $0.1\sim 0.16\mu\text{m}$

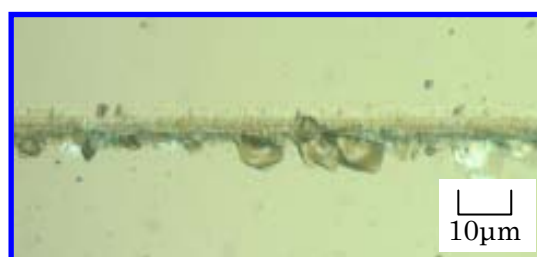


(b) 切り込み深さ $2.44\sim 2.5\mu\text{m}$

図 5-17 超音波振動切削による加工面の概観



(a) 切り込み深さ $0.1\sim 0.16\mu\text{m}$



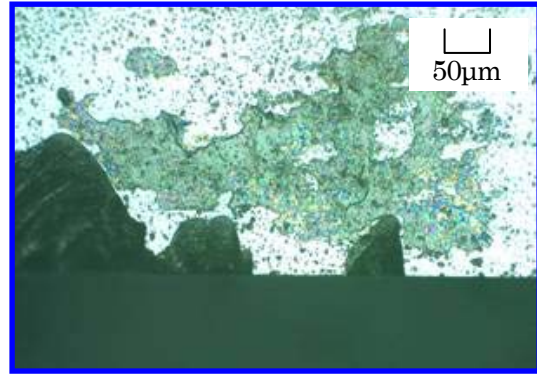
(b) 切り込み深さ $2.44\sim 2.5\mu\text{m}$

図 5-18 通常切削による加工面の概観

工具刃先すくい面の磨耗状況を図 5-19 に示す。超音波振動切削、および通常切削にて切り込み深さ $0.1\mu\text{m}$ の条件において加工を行なった直後の工具磨耗を確認したところ、超音波振動切削では目立った工具磨耗は確認されないが、通常切削では工具刃先へのチップングが確認された。切り込み深さ $1\mu\text{m}$ における加工面概観を図 5-20、切り屑形態を図 5-21 に示す。



(a) 超音波振動切削

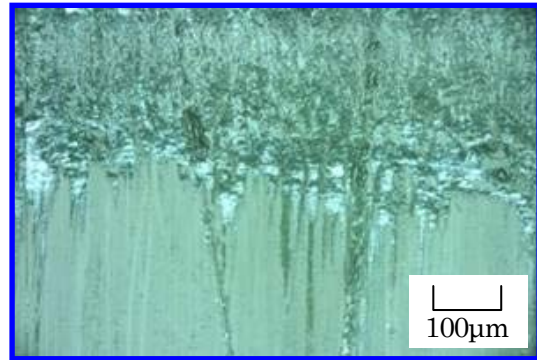


(b) 通常切削

図 5-19 工具すくい面の摩耗状況



(a) 超音波振動切削

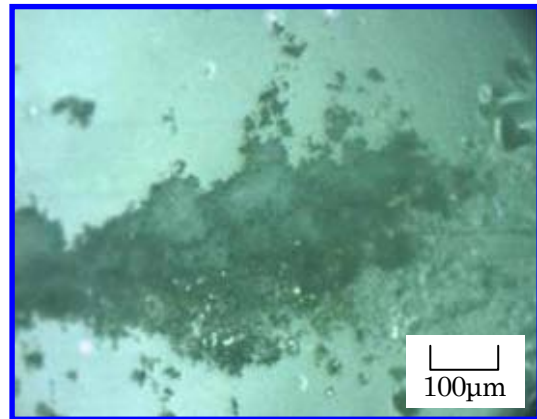


(b) 通常切削

図 5-20 加工面の概観



(a) 超音波振動切削



(b) 通常切削

図 5-21 切り屑形態

超音波振動を付加した状態における切込み深さ $0.1\mu\text{m}$ では脆性損傷は確認されなかったものの、切込み深さ $0.3, 0.5\mu\text{m}$ では加工面に微少な脆性損傷が確認されたが、加工面の表面粗さは各切込み深さの条件において $0.3\mu\text{mRz}$ 以下に抑えることができ、切り込み深さが $0.1\mu\text{m}$ の条件においては $0.12\mu\text{mRz}$ の良好な結果を得た。一方、通常切削においては全ての条件において切削開始と同時に工具摩耗が発生したことから加工面への脆性損傷が確認され、表面粗さは切込み深さが最小の $0.1\mu\text{m}$ の条件において $1.6\mu\text{mRz}$ となり、切り込み深さが増加に伴い脆性破壊が激しくなった。

この結果を踏まえた上で、切込み深さ $0.1\mu\text{m}$ の条件下にて、エアブローおよび水中にて切削した場合の比較を行なった。加工面の概観を図 5-22、通常切削、エアブロー冷却と水中における超音波振動切削による加工面の表面粗さ、光透過率の測定結果を図 5-23 に示す。

測定結果より、超音波振動の付加により表面粗さが低減され、透過率も向上していることが確認できる。超音波振動に加え水中での冷却を行うことにより、表面粗さ $1.7\mu\text{mRz}$ 、透過率 85.8% となり、水中での超音波振動切削はエアブロー冷却の場合に比べ、表面粗さが約 $1/3$ 程度に低減され光透過率も約 4% 向上した。超音波振動を付加した加工を行う場合、発生する切り屑は細かな粉体状となり工具刃先へ付着するため、通常のエアブローや切削液では切り屑を完全に除去することが困難となるが、水中での切削を行うことにより粉体状の切り屑が効率的に除去されることで、工具刃先部への噛み込み現象が起こることなく良好な加工面が得られた。

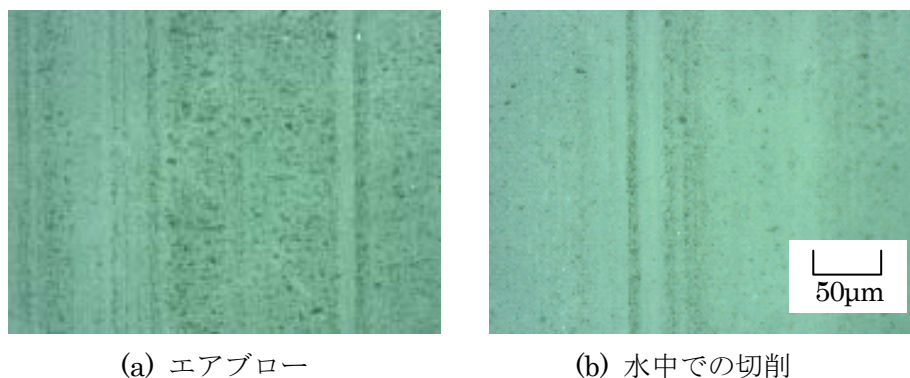


図 5-22 加工面の概観

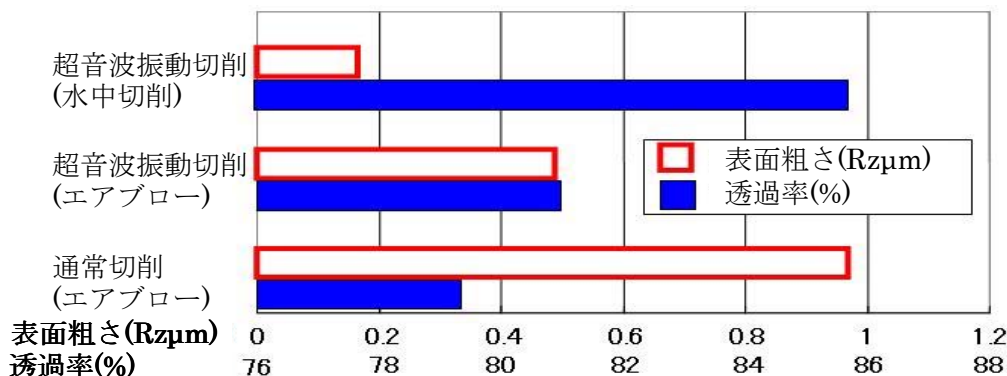


図 5-23 表面粗さ、透過率の測定結果

5. 2. 3 ヘール工具によるマイクロリアクタの加工

前節にて確認した熔融石英ガラスを対象とした最適条件下にて、試作マイクロリアクタへの仕上げ加工適用実験を行った。流路幅は1mm、流路深さは0.5mm、観察用窓部形状は長方形(10×2mm)とし、観察用窓部における光透過率の計測にて評価した。マイクロリアクタの概観を図5-24に示す。エンドミル加工による荒加工を行った後に超音波振動を伴うヘール加工による仕上げを行い、表面粗さと光透過率を測定した。最終仕上げにおける加工条件は、水中での冷却、切り込み深さ0.1 μm 、工具送り速度2000mm/min、加振周波数27kHzに設定した。エンドミルによる加工面、および超音波振動を付加したヘール工具による加工面の概観を図5-25に示す。測定結果より、観察用窓部底面の表面粗さは0.11 μmRz 、透過率は86%となり、良好な加工面が確認された。

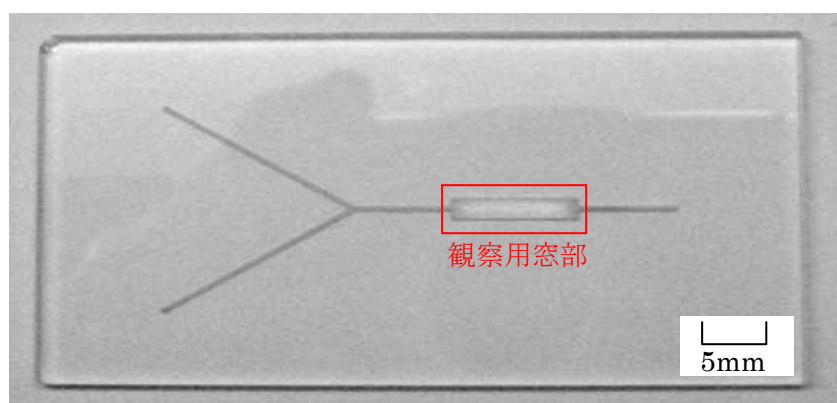


図 5-24 加工を施したマイクロリアクタの概観

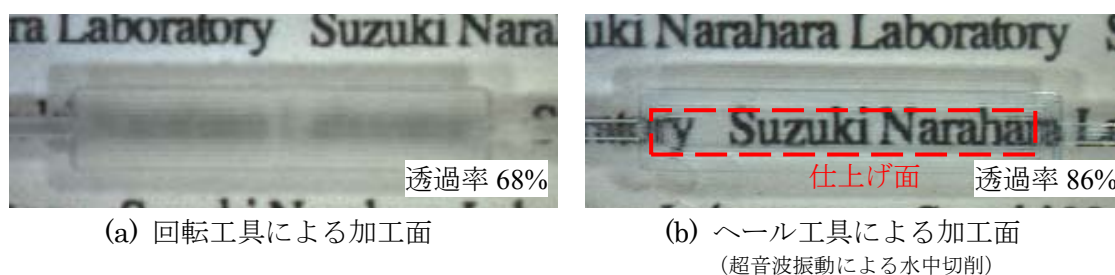


図 5-25 観察用窓部の比較

以上の結果より、超音波振動の付加により切削抵抗値が低減され、延性モード切削の臨界切り込み深さが拡大したことがわかる。また、水中における加工を行うことにより切り屑の排出が効率的に行われ、脆性材の加工精度を向上させる上で、超音波振動を付加したヘール工具による仕上げ加工の適用が有効であることが確認された。

5. 3 高硬度材を対象としたヘール加工技術による部品加工

高速度工具鋼 (High Speed Steel) は耐欠損性や耐熱亀裂性に優れる材種である。主に冷間パンチ用金型材や工具材種として用いられることから、炭素工具鋼や合金工具鋼と比べると、高速度工具鋼の切削は一段と困難となる。高速度工具鋼は Co, W, Mo, Cr, V といった一般的な工具材料と同質の合金元素を多く含有し、超硬合金で切削する場合でも活性で親和性が著しく高い。溶着現象が発生しやすいばかりではなく、切削熱の上昇による切れ刃すくい面の拡散摩耗が進行しやすい。現在では、cBN 焼結体を工具材種、高速度工具鋼を被削材種とした切削事例⁵⁻¹⁷⁾が報告されているが、ヘール加工法における切削条件は明らかではない。主な高速度工具鋼の種類を表 5-4 に示す。

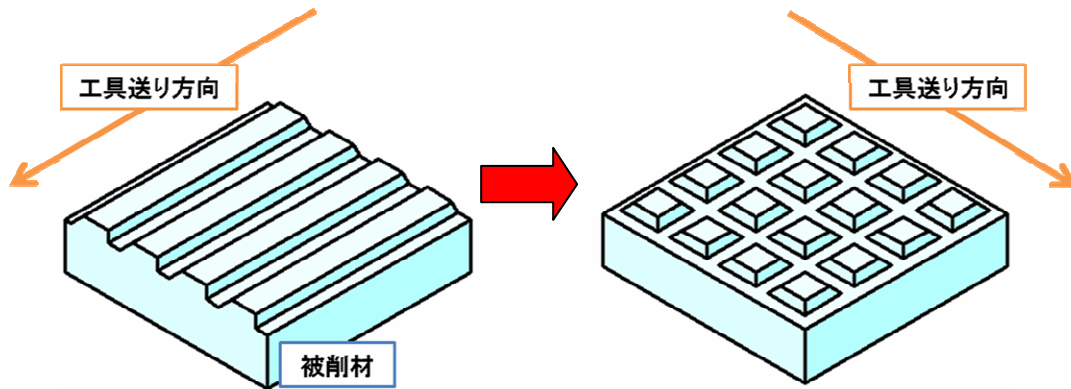
表 5-4 主な高速度工具鋼の種類と分類

種類の記号	分類
SKH2(HS18-0-1) SKH3 SKH4 SKH10	タングステン系高速度工具鋼鋼材
SKH40(HS6-5-3-8)	粉末冶金行程モリブデン系 高速度工具鋼鋼材
SKH50(HS1-8-1) SKH51(HS6-5-2) SKH52(HS6-6-2) SKH53(HS6-5-3) SKH54(HS6-5-4) SKH55(HS6-5-2-5) SKH56 SKH57(HS10-4-3-10) SKH58(HS2-9-2) SKH59(HS2-9-1-8)	モリブデン系高速度工具鋼鋼材

(備考) 種類の記号, 括弧内はISO鋼種記号を示す。

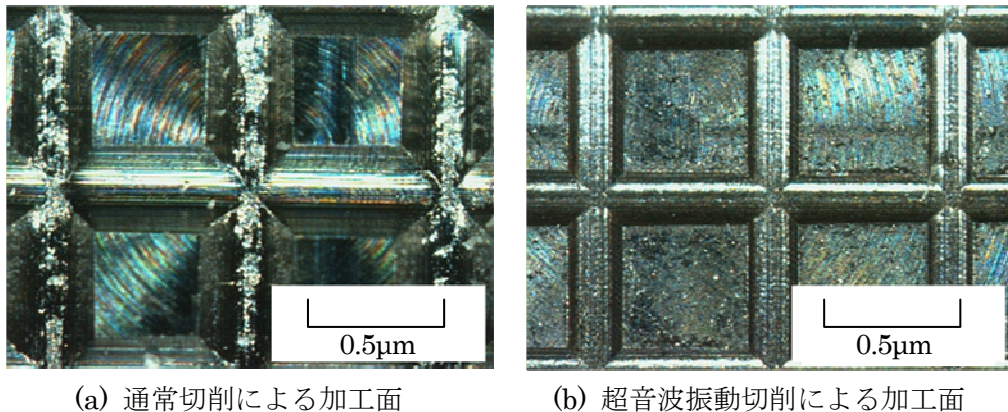
5. 3. 1 超音波振動による加工面への影響

本節では、硬高度材 (SKH51) を対象とした台形四角錐形状の加工を行う。切込み 1.0[μm]、送り速度 1.0[m/min]と設定し、工具には超微粒子超硬合金 (SP10) を使用する。まず初めに工具送り方向を一定として溝加工を行った後、工具送り方向を 90° 変更させて台形四角錐形状を得る。第 4 章にて金型用鋼材に対する効果が得られた超音波加振の有無による影響について確認する。加工モデルを図 5-26 に示す。



(a) 送り方向一定の溝加工（第一工程） (b) 台形四角錐形状の加工（第二工程）

図 5-26 高硬度材の加工モデル

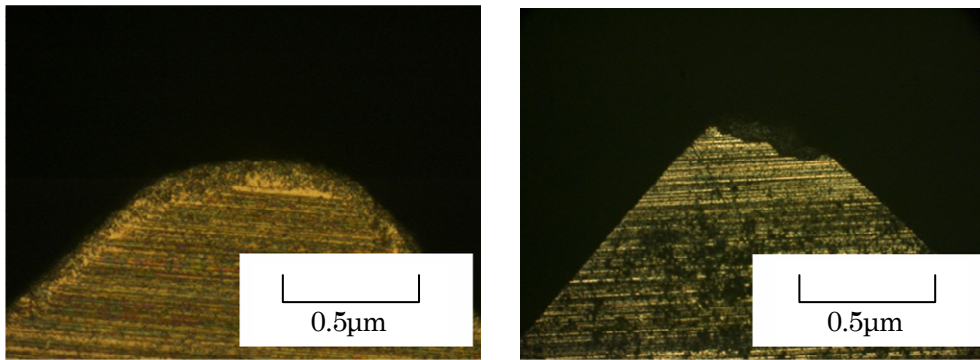


(a) 通常切削による加工面

(b) 超音波振動切削による加工面

図 5-27 高硬度材の加工面概観

加工面の概観を図 5-27、工具刃先の拡大写真を図 5-28 に示す。加工面については、通常切削に比べ、超音波振動切削では安定した加工によりバリの少ない良好な仕上がりとなっていることが確認された。しかしながら工具刃先の拡大写真を確認すると、通常切削では工具刃先に微小な摩耗が確認されたのに対し、超音波振動切削では激しい欠けの発生が確認された。表面粗さの測定では、通常切削による加工面が $1.85\mu\text{mRz}$ であるのに対し、超音波振動切削による加工面は $2.21\mu\text{mRz}$ となり、工具刃先の欠けによる加工面の悪化が明確に現れている。



(a) 通常切削による工具刃先

(b) 超音波振動切削による工具刃先

図 5-28 工具すくい各における摩耗状態

通常切削の加工面状態は、縦方向の加工面が明らかに荒れていることがわかる。一方、写真横方向の加工面は振動切削の場合とほとんど相違が見られず、縦方向の切削においては切りくず排出が行われなかったものとする。一方、超音波振動切削では縦方向、および横方向共に安定した加工面状態であることが確認できる。しかし、工具すくい面の状態を比較すると、通常切削では工具刃先が徐々に削られるような摩耗状態であるのに対し、振動切削では工具刃先部において欠損が生じている。

そこで、条件を再設定して直線台形溝切削を行うことで最適切削条件の導出を試みた。また、工具のアプローチ時における衝撃を緩和するため、被削材に傾斜部を設けて切削を行った。実験条件を表 5-5、加工モデルを図 5-29 に示す。

表 5-5 実験条件

	通常切削	振動切削
被削材	高速度工具鋼(SKH51)	
工具材種	超微粒子超硬合金	
すくい角[deg]	0	
逃げ角[deg]	5	
送り速度[mm/min]	1,000 2,000 3,000	
切込み[μm]	1,0 2,0 3,0	
電圧[V]	—	13.2
振幅[μm]	—	17.8
周波数[KHz]	—	27.283
加工雰囲気	ドライ	

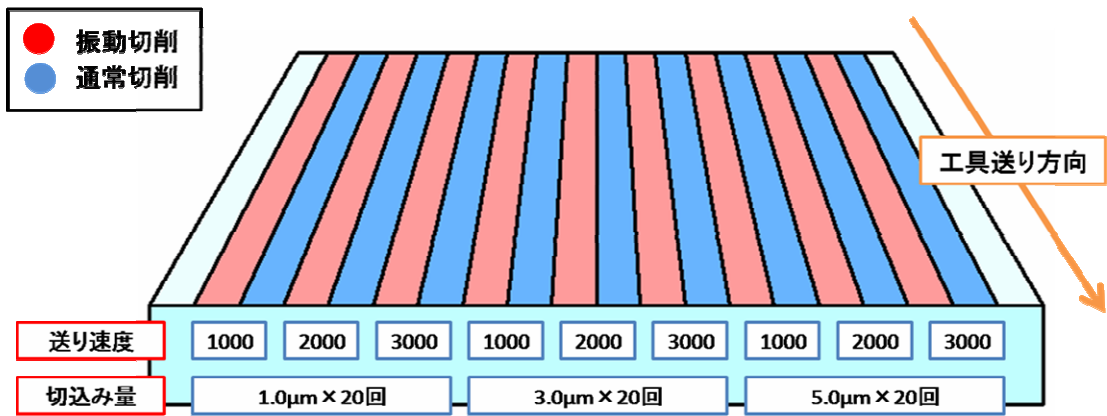


図 5-29 加工モデル

加工面の拡大写真を図 5-30 より示す。超音波振動切削では、送り方向のカッターマークは見られるものの、通常切削で見られるような傷は確認されず、良好な加工面が得られている。

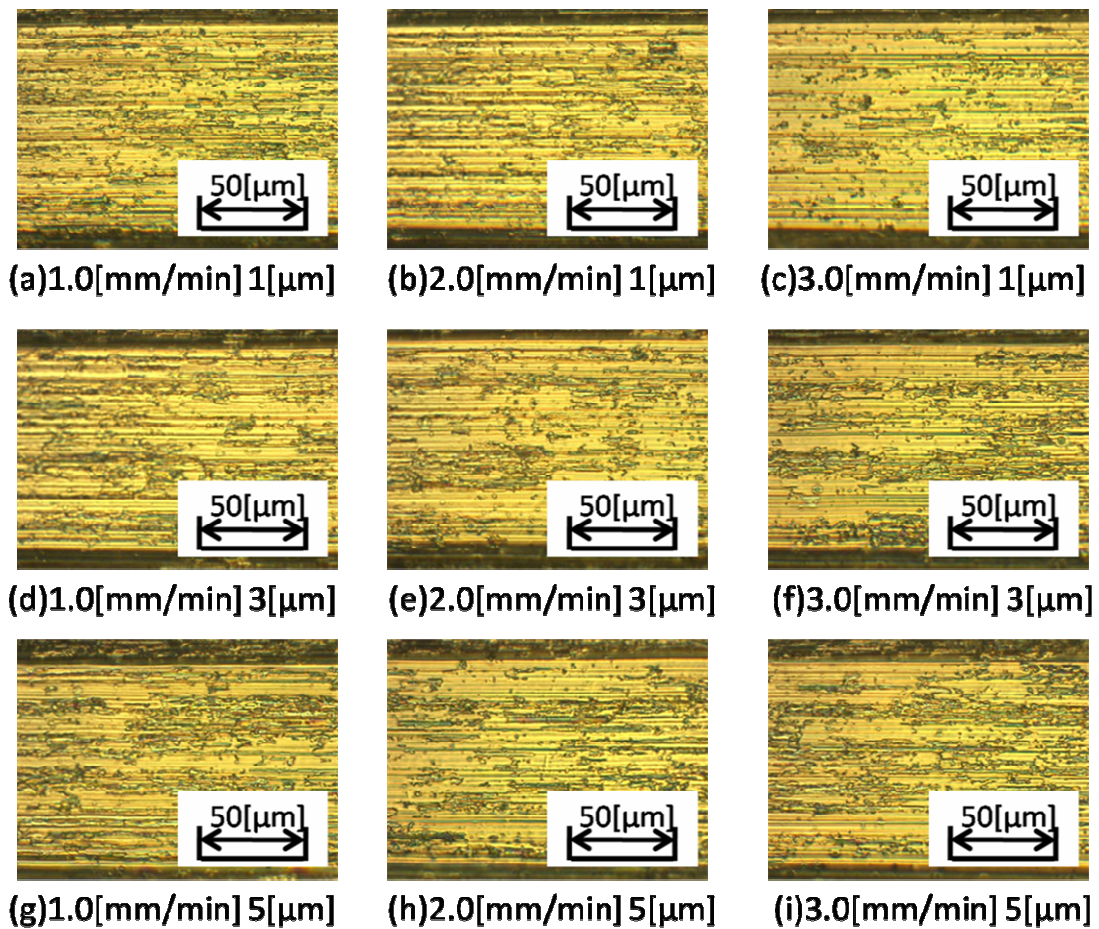


図 5-30 加工面の拡大写真（通常切削）

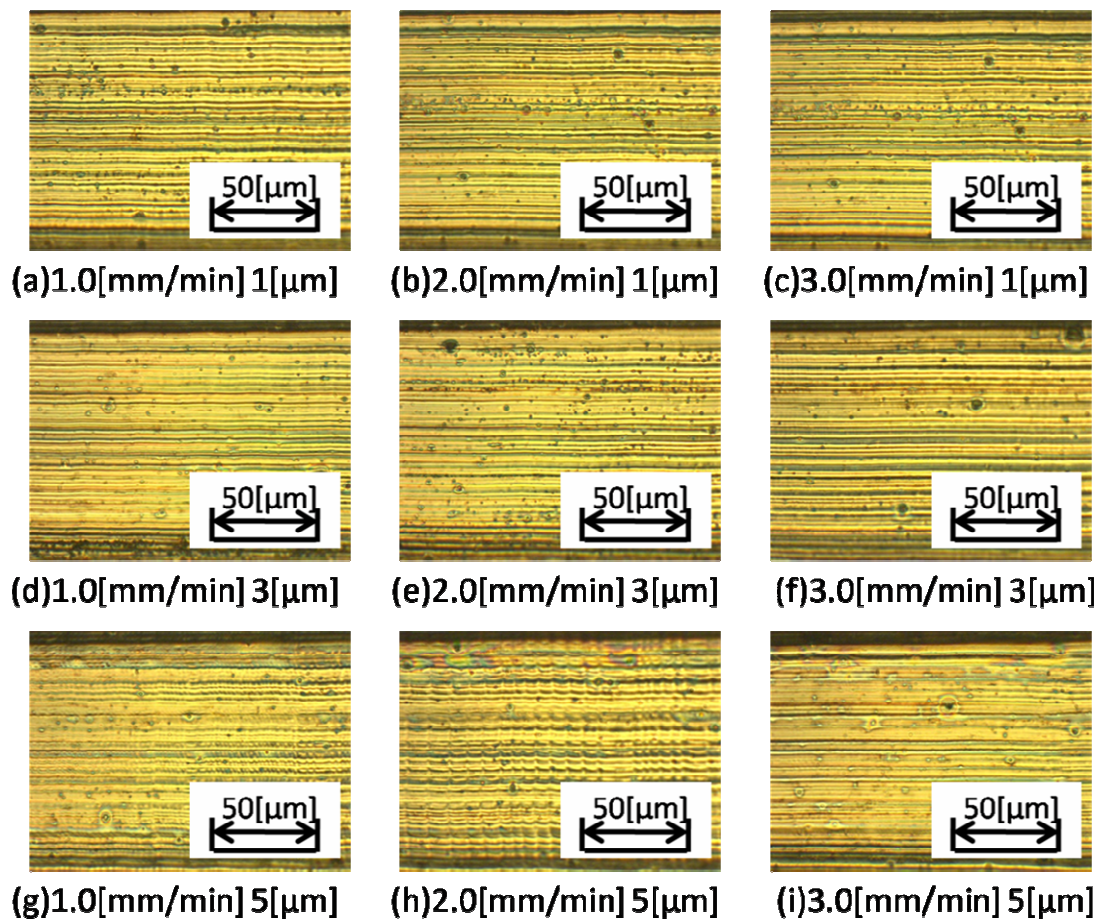


図 5-31 加工面の拡大写真（超音波振動切削）

工具刃先の拡大写真を図 5-32 より、通常切削開始時、および終了時の刃先状態（切りくずを取り除いたもの）の比較を図 5-34 に示す。通常切削では、カール状の切りくずが付着していることが確認される。振動切削では、切りくずの付着は確認されなかった。また、振動切削では工具刃先に欠けが生じ、切削を重ねるごとに領域が広がっていることが確認された。各条件における加工面の表面粗さを図 5-35 に示す。

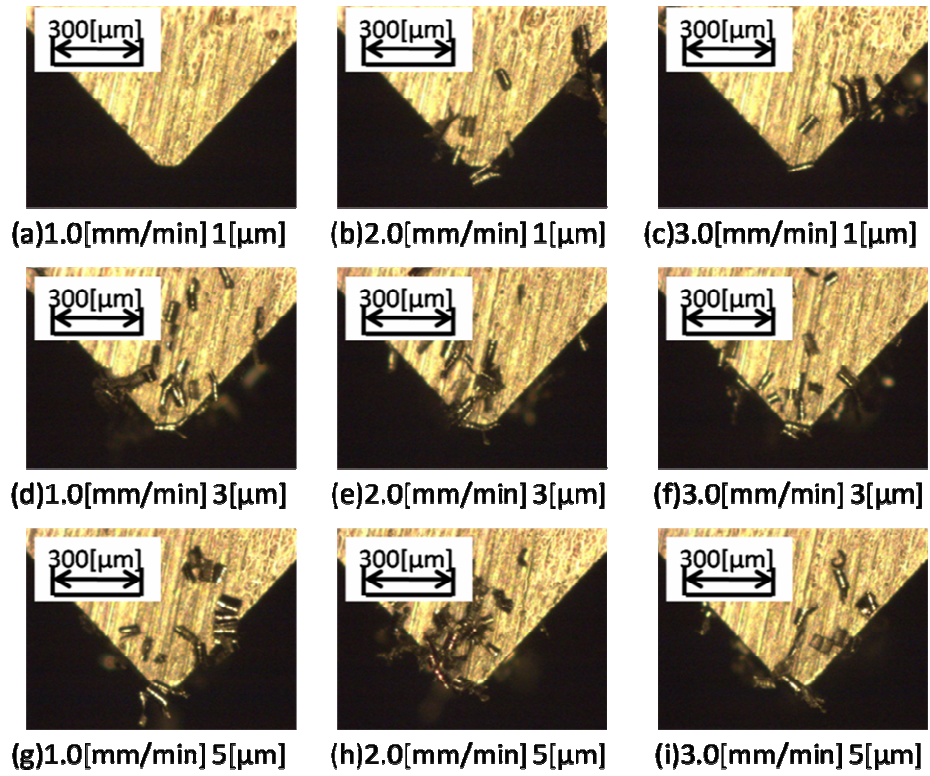


図 5-32 工具刃先の拡大写真（通常切削）

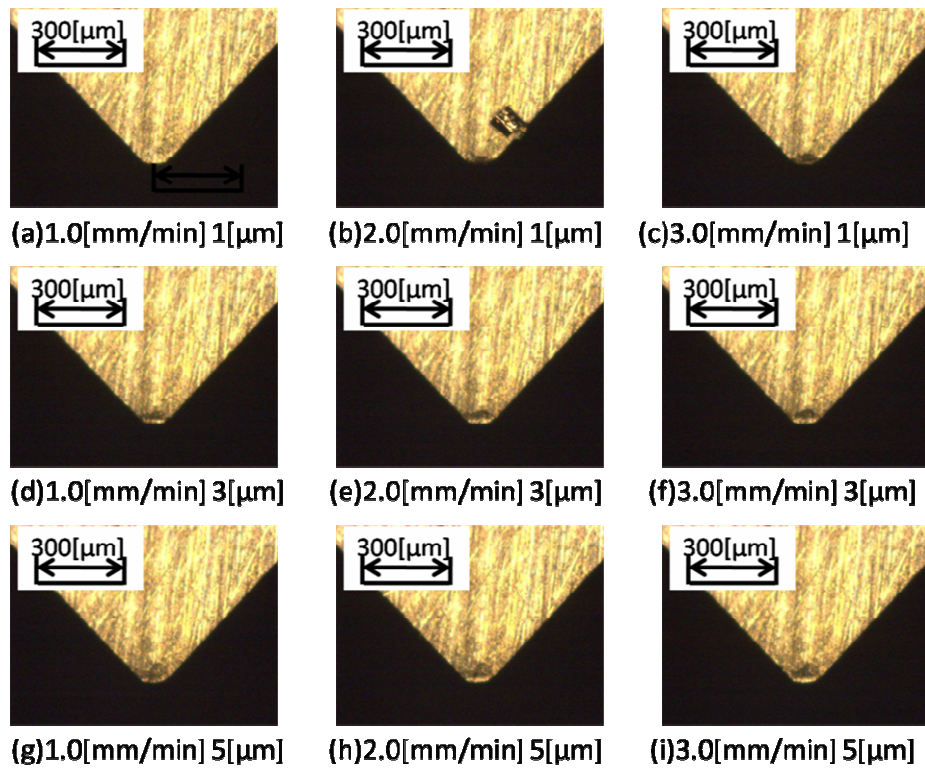
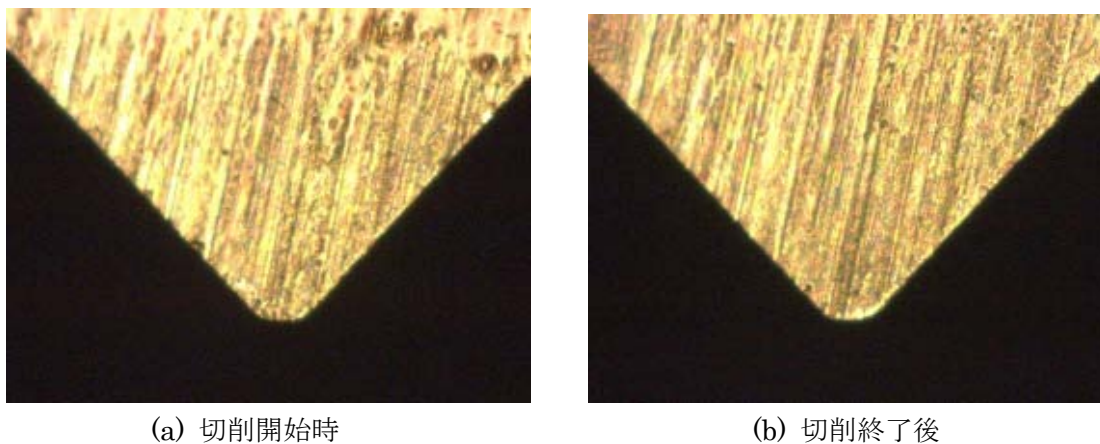


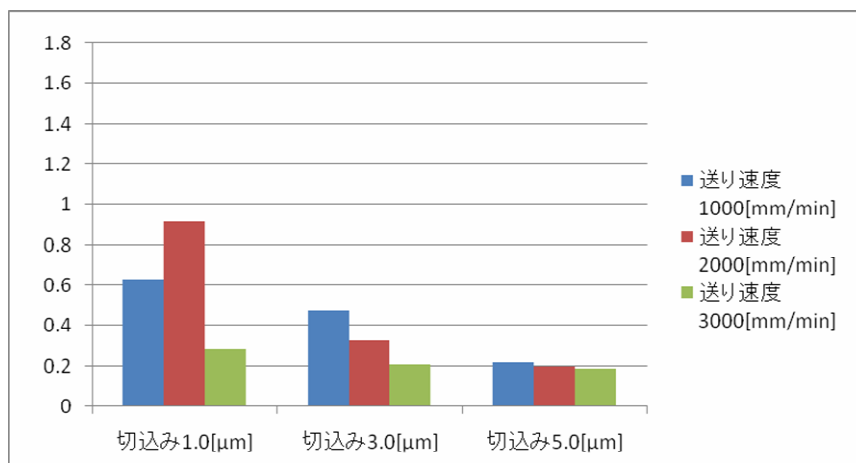
図 5-33 工具刃先の拡大写真（超音波振動切削）



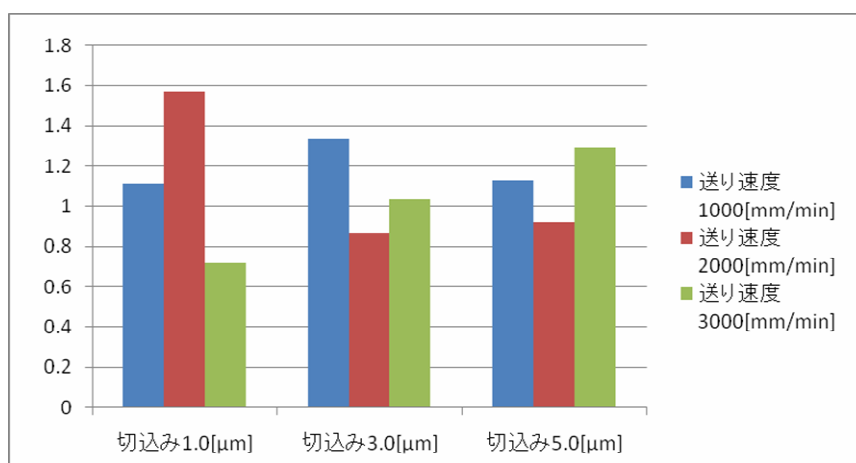
(a) 切削開始時

(b) 切削終了後

図 5-34 工具刃先の拡大写真 (通常切削)



(a) 通常切削



(b) 超音波振動切削

図 5-35 表面粗さの測定結果 (μmRz)

5. 3. 2 評価と課題

今回の実験では送り速度と切込み量の変化による明らかな相違は見られなかった。原因として、パラメータ変化の範囲が限られていたことや、工具損傷や面粗度にさほど影響を与えるパラメータではなかった可能性が考えられる。しかし、超音波振動の有無による底面状態については明らかな相違が見られた。超音波振動切削において、最も良好な面で $0.1855\mu\text{mRz}$ の粗さとなった。

工具状態においても、通常切削では切りくずが工具刃先に付着する傾向が強いのに対し、超音波振動切削では切りくずの付着は見られなかった。この付着した切りくずにより、通常切削と超音波振動切削における加工面の差が生じたものとする。通常切削においては工具刃先にさほど損傷は見られないものの、超音波振動切削では工具刃先における明らかな損傷を確認できる。

この理由として、工具送り方向への捻り振動を発生する超音波振動装置において、上下方向への微小な変位が発生している可能性が考えられる。超音波振動を用いる場合に工具送り方向に対して上下方向への振動が与えられると、工具刃先への損傷が発生することが確認されていることから、振動メカニズムの改善や工具送り方向の変更により工具の損傷を抑えることで、さらなる表面粗さの低減が可能となる。

5. 4 本章の結論

ヘール加工技術の適用として、異形シール溝加工工程、硬脆材を対象としたマイクロリアクタの加工、高硬度材を対象とした部品加工を実施した。

異形シール溝加工工程への適用では、従来工程にて問題とされた溝底面部、および側面部における仕上がり品質の向上と共に、単一工具による複数形状の溝加工への対応、6軸ヘール加工システムの適用による工程の簡略化を実現した。その結果、工具送り方向に対しては溝底面および溝側面共に $0.5\mu\text{m}$ 前後の高品質な仕上げを実現した。また、工具送り直角方向に対しては溝底面が $0.5\mu\text{m}$ 前後、溝側面が $1.5\mu\text{m}$ 前後の高品位な仕上げを実現し、要求される品質を満たした仕上げ面を得た。今後、半導体製造分野をはじめとするクリーン環境にて必要とされる高真空度の実現において、ヘール工具を用いた異形シール溝加工技術による課題解決が有効な手段となることを明らかとした。

硬脆材を対象としたマイクロリアクタの加工では、超音波振動の導入や加工雰囲気の設定など、切削条件の追及を行うことにより加工面において86%の透過率を得た。半導体微細加工では対応が困難となる複雑な三次元形状への適用や莫大な設備投資への費用軽減、製作納期や品質の向上への期待が持てる。ただし、微小なマイクロクラックの残存については機械加工による除去は困難であり、工作機械のさらなる高品質化や新たな手法による対応が必要となる。

高硬度材を対象とした部品加工については、超音波振動切削による工具刃先への損傷が確認されており、工具寿命を念頭に置いた超音波振動方向のコントロールをはじめ、さらなる切削条件の割り出しが必要となる。

ただし、現段階では鏡面には及ばないもののサブミクロンレベルの高品質な加工が実現しており、工具と材料の組合せや加工条件の追及による適用の可能性が多く残されているものとする。

以上の結果より、ヘール加工技術による仕上げ工程の自動化を進めるにあたり、異形シール溝などの複雑形状への適用、硬脆材や高硬度材への適用を試みることにより、その有用性について確認することができた。

<参考文献>

- 5-1) 鈴木裕、桑野義正、後藤勝征、竹内芳美、佐藤眞：5軸加工用CAMシステムの開発，精密工学会誌，60,6(1994)832.
- 5-2) Y.Takeuchi, S.Sato, H.Suzuki : New Concept of Machining by Means of 6-Axis Control, Annals of the CIRP, 43,1(1994)431.
- 5-3) 久門哲也、石田徹、竹内芳美、河合知彦、沢田潔：非回転工具を用いた超精密マイクロV溝加工，精密工学会誌，70,10(2004)1301.
- 5-4) 米山陽介、石田徹、河合知彦、竹内芳美：非回工具を用いた自由曲面上への6軸制御超精密マイクロ溝加工，精密工学会誌，72,5(2006)647.
- 5-5) 竹内芳美、横山信人、久木達也、鈴木裕、佐藤眞：6軸制御による自由曲面平滑加工，精密工学会誌，60,12(1994)1786.
- 5-6) 神谷昌秀、佐藤裕一、林朗弘、鈴木裕：倣いシミュレーションに基づくCAMシステムの開発（境界表現法への適用とその高能率加工），日本機械学会論文集C編，63(1997)608.
- 5-7) 6軸高精度ヘール加工システムの開発，地域コンソーシアム研究開発事業報告書（1998-2000），新エネルギー・産業技術総合開発機構.
- 5-8) 吉丸将史、藤田康宏、伊藤哲、伊藤哲史、鈴木裕：異形シール溝加工におけるヘール加工技術の適用，精密工学会誌，72,6(2006)745.
- 5-9) 神谷昌秀、島田元浩、鈴木裕、竹内芳美、佐藤眞：非回転切削機構を用いた曲面加工用CAMシステムの開発，日本機械学会論文集，62600,C(1996)3326.
- 5-10) 宮下政和：脆性材料の延性モード研削加工-ナノ研削技術への道，精密工学会誌，56,5(1990)782.
- 5-11) 荻原親作、村上讓司、佐野照雄、帯川利之：ダイヤモンド砥粒先端エッジの評価に関する基礎的研究，精密工学会誌，71,5(2005)618.
- 5-12) 大野威徳、松村隆：ガラスのエンドミル加工によるマイクロチャンネルの製造，精密工学会春季大会学術講演会論文集，(2004)94L03.
- 5-13) 隈部淳一郎：精密加工振動切削-基礎と応用-，実教出版.
- 5-14) 社本英二、宋詠燦、佐々謙吾、吉田秀樹、樋野励、森脇俊道：傾斜型楕円振動切削加工の提案とその基本特性，精密工学会誌，69,7(2003)970.
- 5-15) 小倉一郎、岡崎祐一：シングルポイントダイヤモンド旋削による光学ガラスの延性モード切削加工に関する研究，精密工学会誌，66,9(2000)1431.
- 5-16) M.Yoshimaru, H.Koresawa, H.Narahara, and H.Suzuki : Processing Micro Reactor by Non-Rotaional Cutting Tool with Ultrasonic Vibration, International Journal of Automation Technology, 3,5(2009)603.

5-17) 内藤国雄、大庫和孝、高田泰久、渡辺一樹、和田健二：高硬度材（60HRC）の高速切削，豊田中央研究所 R&D レビュー，34,4(1999)35.

第六章 結 論

本研究では、仕上げ工程における自動化を目的として、ヘール加工システムを用いた金型部品の仕上げ加工、および複雑形状や難削材を対象とした仕上げ加工への適用を進めるための研究を展開し、以下の結論を得た。

- I 多軸マシニングセンタをベースとしたヘール加工システムに対し、加工条件や工具姿勢が及ぼす影響について確認した上で、安定した最適切削条件の導出を試みた。その結果、以下の結論を得た。
 - 1) ヘール加工システムによる高精度仕上げ加工を行うための条件として、切り込み深さは極力浅く、微少切り込みを与えることにより高品質な仕上げ加工面が得られることを明らかとした。
 - 2) ヘール加工システムの特徴として、非回転の工具姿勢を任意に制御することができる。工具軸周りの姿勢については、 ± 30 度の範囲内であれば加工面への影響がなく自由度の高い加工が可能となる。工具すくい各方向の姿勢については、工具進行方向に対してすくい角が正の場合には表面粗さが若干低減されるがビビリ現象が発生する恐れがある。一方、工具進行方向に対してすくい角が負の場合には表面粗さが若干悪化するとともに、むしろ現象が発生する傾向が強いことから、すくい角が0度近辺となる工具姿勢を常に保つことにより安定した加工を行えることが明らかとなった。
 - 3) 刃先を鋭利に生成できる単結晶ダイヤモンド工具を用いることで、アルミ合金（A2017）を対象とした平面形状、および緩やかな曲面形状の鏡面仕上げ加工を実現した。
- II 単結晶ダイヤモンド工具を用いたヘール加工により、金型部品に使用される鋼材を対象とした仕上げ加工を行うにあたり、超音波振動を用いることで高品質な仕上げ加工を実現するための加工条件を導出した。その結果、以下の結論を得た。
 - 1) 単結晶ダイヤモンド工具により鋼材の加工を行う場合、通常の切削にて良好な仕上げ面を得ることは困難であることを確認した。
 - 2) 切り込み深さと切削速度の変化による加工面への影響として、切り込み深さが微少になるにつれて加工面の仕上がりが良好となる傾向が強い。切削速度の変化について加工面への明確な影響は見られないが、工具刃先のビビリ現象が発生しない範囲内にて切削速度を設定する必要がある。
 - 3) 超音波振動の有無によらずピックフィード量を細かく設定することにより加工面の仕上がりが良好となるが、加工時間が長くなるため、要求される仕上げ面精度からピックフィード量を設定する必要がある。

- 4) 工具磨耗領域への影響として、超音波振動を付加することにより工具刃先における磨耗を抑制する効果を確認した。これにより、工具寿命の増加による加工領域の拡大、臨界切削条件の範囲拡大が得られることが明らかとなった。
- 5) 超音波振動を用いたヘール工具による鋼材の仕上げ加工を実施し、多面体を対象とした鋼材の鏡面仕上げとして表面粗さ $0.15\mu\text{m}$ 前後の仕上げが可能となることを明らかとした。さらに実際の金型材料への適用を行うにあたって、キャビティ形状などの曲面仕上げ加工を実現するためには、工作機械の高性能化と加工条件の追及が必要となることを示した。

III ヘール加工技術の適用として、異形シール溝加工工程、硬脆材を対象としたマイクロリアクタの加工、高硬度材を対象とした部品加工を実施した。

その結果、以下の結論を得た。

- 1) 単一の工具により複数形状の異形シール溝加工を行うためのシステムを構築し、具体的な加工手順についての最適化を図った。従来工程数の省略や解消、切り屑の噛み込みを防止するための工程を提案し、その有用性を評価した。その結果、一般的なシール溝に対して求められる要求精度を満たした高品質な加工を実現した。
- 2) 硬脆材を対象としたマイクロリアクタの加工において、超音波振動の導入と水中での切削を行うことにより、効果的な切り屑除去、加工面の表面粗さの低減、高い透過率の加工面を得ることが明らかとなった。
- 3) 高硬度材を対象とした部品加工において、サブミクロンレベルの加工を実現できることを確認した。工具刃先における磨耗を抑制するためには超音波振動のコントロールにおいて改善の必要性があるが、加工条件の追及により最適切削条件を導出することで、さらに高品位な仕上げ加工としての適用が可能となることを示した。

以上の結果から、ヘール工具を用いることにより精密仕上げ加工技術が実現することが明らかとなった。型技術、および精密加工分野における本手法の導入により、低価格、短納期、および高品質に対するさらなる需要の増加に対応できるものづくりの実現が可能となることが示された。

謝 辞

本論文は、筆者が平成17年4月から平成23年1月現在まで、九州工業大学大学院情報工学研究科の博士後期課程にて行った研究をまとめた成果であり、この間、多くの諸先生、友人、知人、および関係者各位から、御指導・御助言を賜りました。とりわけ、鈴木 裕 教授、植原弘之教授からは、本研究の遂行ならびに、研究に対する心構えや姿勢、意義など、研究の基礎から本論文のまとめに至るまで、極めて有意義な御指導・御鞭撻を賜りました。また、坂本正史先生をはじめ西日本工業大学の方々には、研究を進めるにあたり学内業務における多大な御配慮を頂きました。更に、実験を行うにあたり、神谷昌秀所長をはじめ福岡県工業技術センター機械電子研究所の方々、京谷忠幸社長をはじめ株式会社ピーエムティーの方々、藤田康宏氏をはじめ株式会社安川電機の方々、並びに伊藤哲史氏には、多他の面で多大なる御指導・御協力を賜りました。ここに心からの感謝の意を表します。