

平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「難削材料/複雑微細形状の高精度橢円振動切削技術の開発と
振動装置の高度化」

研究開発成果等報告書

平成21年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人中部科学技術センター

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	2
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	4
第2章 ハイパワー楕円振動工具の試作・開発	5
2-1 研究目的及び目標	5
2-2 実施内容および結果	5
2-3 研究成果	9
第3章 3次元自由曲面用超音波楕円振動工具の試作・開発	9
3-1 研究目的及び目標	9
3-2 実施内容および結果	9
3-3 研究成果	11
第4章 超音波楕円振動工具用の高速振幅制御装置の評価・改良	11
4-1 研究目的及び目標	11
4-2 実施内容および結果	11
4-3 研究成果	11
第5章 各種形状・材料の専用インサート型工具の試作・開発	12
5-1 研究目的及び目標	12
5-2 実施内容および結果	12
5-3 研究成果	12
第6章 試作・開発した簡易型低コスト恒温室の評価	13
6-1 研究目的及び目標	13
6-2 実施内容および結果	13
6-3 研究成果	13
第7章 高硬度金型材料の(超)精密・微細加工技術の開発	14
7-1 研究目的及び目標	14
7-2 実施内容および結果	14
7-3 研究成果	17
第8章 高硬度金型材料の高精度・自由曲面加工技術の開発	18
8-1 研究目的及び目標	18
8-2 実施内容および結果	18
8-3 研究成果	20
第9章 高硬度金型材料に対する高精度・機能表面創成技術の開発	20
9-1 研究目的及び目標	20
9-2 実施内容および結果	20
9-3 研究成果	21
第10章 工具寿命延長に関する検討	22
10-1 研究目的及び目標	22
10-2 実施内容および結果	22
10-3 研究成果	23

第11章	ガラス等の高精度・微細加工の試み	24
11-1	研究目的及び目標	24
11-2	実施内容および結果	24
11-3	研究成果	24
第12章	ガラスレンズ成形用金型（バインダーレスタングステン合金）の加工評価	25
12-1	研究目的及び目標	25
12-2	実施内容および結果	25
12-3	研究成果	27
第13章	プロジェクトの管理・運営	27
13-1	目的	27
13-2	実施内容および結果	27
13-3	結果概要	27
第14章	事業化の検討	27
14-1	楕円振動工具の事業化の検討結果	27
14-2	専用インサート工具の事業化の検討結果	28
14-3	簡易型低コスト恒温室の事業化の検討結果	28
15-4	難削材料/複雑微細形状の高精度楕円振動切削技術の事業化の検討結果	28
第15章	全体総括	29
15-1	成果の総括	29
15-2	工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況	29
15-3	今後の事業化に向けた取組み	29

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究の目的

Blu-ray Disc のピックアップレンズやマイクロ TAS、光通信機器等を初めとして、金型材料に対する高精度・微細加工の必要性が増している。また、金型の高精度表面仕上げ、小型化、短納期化、低コスト化、環境配慮などの要求も強い。本研究開発では、これらの高精度・微細加工に対する幅広い要求に応えることが可能な新技術として、楕円振動切削技術と振動装置の大幅な高度化を目指すと共に、その周辺技術の開発を行う。

2) 研究の概要

楕円振動切削装置の高度化としては、高能率化を実現するための高出力化、自由曲面加工に対応するための多軸化、機能表面生成のための高速応答制御に取り組む。さらに、本加工法の周辺技術として、楕円振動切削加工法に適した金型材料の開発、各種専用インサート工具の開発、低価格型恒温室の開発を推進する。

3) 実施内容

① ハイパワー楕円振動工具の試作・開発

高精度・微細に対する性能を損なうことなく、高能率化、高信頼性を得るため、実用的なハイパワー（目標とする最大出力：30W）楕円振動工具を試作・開発する。（多賀電気株式会社）

② 3次元自由曲面用超音波楕円振動工具の試作・開発

複雑3次元自由曲面の超音波楕円振動切削を実現するため、実用的な高信頼性の3次元自由曲面用超音波楕円振動工具を試作・開発する。（多賀電気株式会社）

③ 超音波楕円振動工具用の高速振幅制御装置の評価・改良

高硬度金型材料に対して、精密微細形状を含む表面を高精度、高能率に加工するため、昨年度までに開発した超音波楕円振動工具用高速振幅制御装置の評価・改良（目標とする最高応答周波数：300Hz）を行う。（多賀電気株式会社）

④ 各種形状・材料の専用インサート型工具の試作・開発

超音波楕円振動装置に合わせ、共振状態の振動を妨げ難い各種形状の専用インサート型工具を試作・開発する。（株式会社アライドダイヤモンド、多賀電気株式会社）

⑤ 試作・開発した簡易型低コスト恒温室の評価

中小企業において現実的な高精度・微細加工を実現するための基盤技術として、機能を限定して開発した簡易型低コスト恒温室の計測・評価を行う。（新日本空調株式会社）

⑥ 高硬度金型材料の（超）精密・微細加工技術の開発

従来または①で開発する超音波楕円振動工具、③で開発する専用の各種インサート型工具を用い、高硬度金型材料の（超）精密・微細加工技術（金型鋼に対する目標精度と微細寸法：形状精度 $0.2\mu\text{m}$ 以下、寸法 $100\mu\text{m}$ 以下）を開発する。（株式会社三琇ファインツール、株式会社太武製作所、国立大学法人名古屋大学）

⑦ 高硬度金型材料の高精度・自由曲面加工技術の開発

②で開発する3次元自由曲面用超音波楕円振動切削装置および専用工具を用い、高硬度金型材料の高精度・自由曲面加工技術を開発する。（国立大学法人名古屋大学、株式会社三琇ファインツール、株式会社太武製作所）

⑧ 高硬度金型材料に対する高精度・機能表面創成技術の開発

③で開発する超音波楕円振動切削工具用の高速振幅制御装置を用い、高硬度金型材料に対して、表面に精密微細形状を創成する高精度、高能率加工技術（目標とする精度と能率：形状精度 $0.2\mu\text{m}$ 以下で微細形状創成の周波数：300Hz）を開発する。（国立大学法人名古屋大学、株式会社三琇ファインツール）

⑨ 工具寿命延長に関する検討

工具材料、工具刃先形状などの工夫により、高硬度金型材料の楕円振動切削時における、専用工具の寿命延長について検討を行う。(株式会社三琇ファインツール、株式会社太武製作所、国立大学法人名古屋大学)

⑩ ガラス等の高精度・微細加工の試み

楕円振動切削により、ガラス等の難削材に対して、高精度な微細溝加工を試み、適切な加工条件を明らかにする。(株式会社太武製作所、株式会社三琇ファインツール、国立大学法人名古屋大学)

⑪ ガラスレンズ成形用金型（バインダーレスタングステン合金）の加工評価

昨年度までに開発してきた超微粒バインダーレスタングステン合金の楕円振動切削加工を行って加工結果を評価・検討する。(株式会社太武製作所、国立大学法人名古屋大学)

⑫ プロジェクトの管理・運営

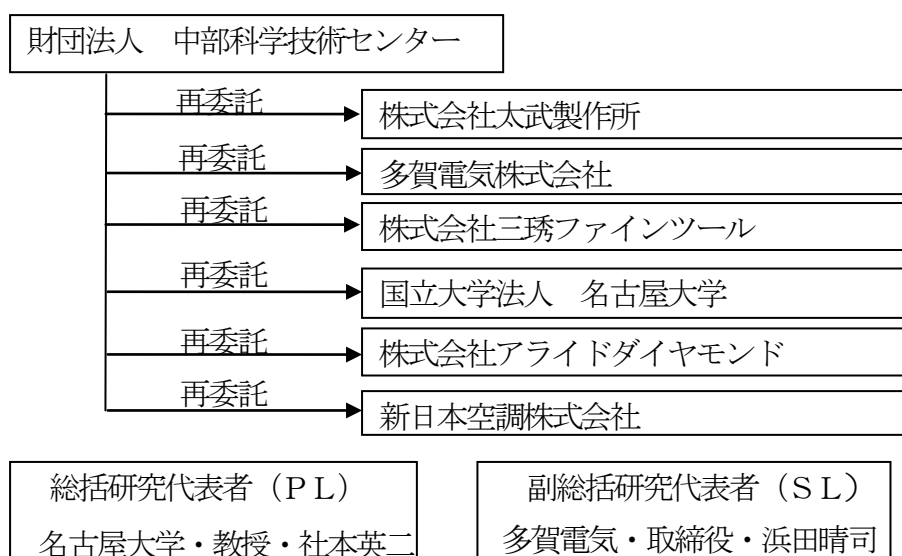
研究・開発目標を達成するため、プロジェクトの計画を遂行する上で必要な管理・運営を行う。(財団法人中部科学技術センター)

⑬ 事業化の検討

3年間の研究成果を踏まえ、本研究で開発した各技術の事業化について検討を行う。(多賀電気株式会社、株式会社太武製作所、株式会社三琇ファインツール、株式会社アライドダイヤモンド、新日本空調株式会社)

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

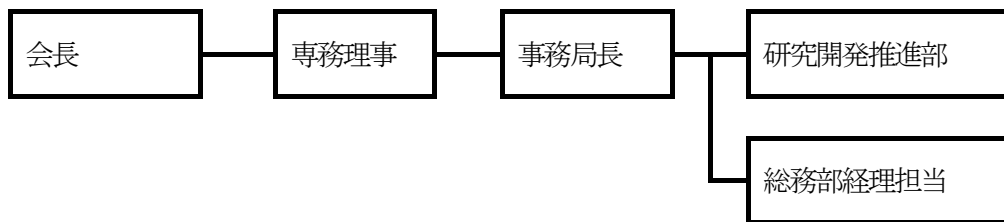
1) 研究体制



2) 管理体制

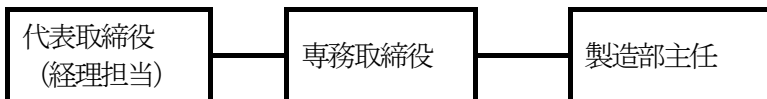
① 事業管理者

財団法人 中部科学技術センター

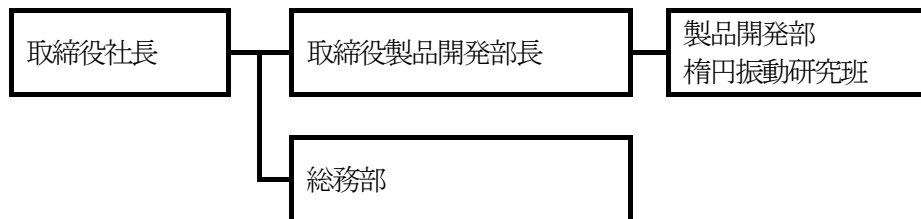


②再委託先

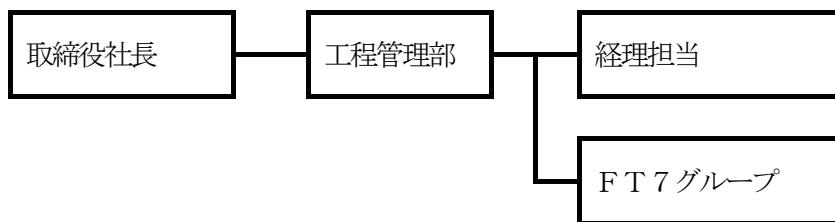
株式会社 太武製作所



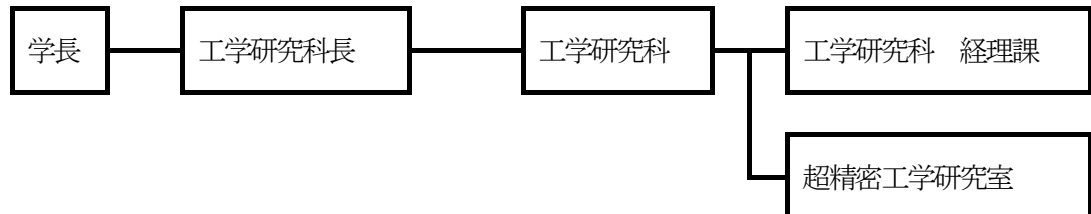
多賀電気株式会社



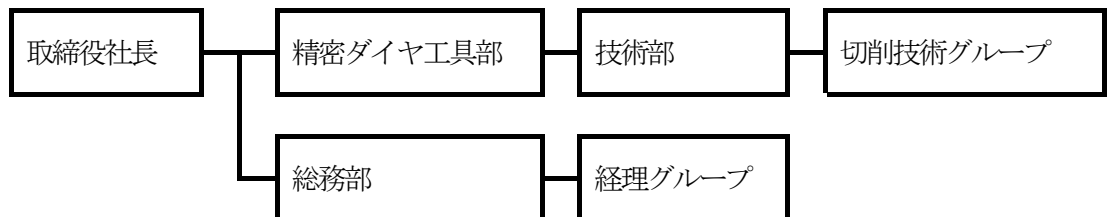
株式会社 三琇ファインツール



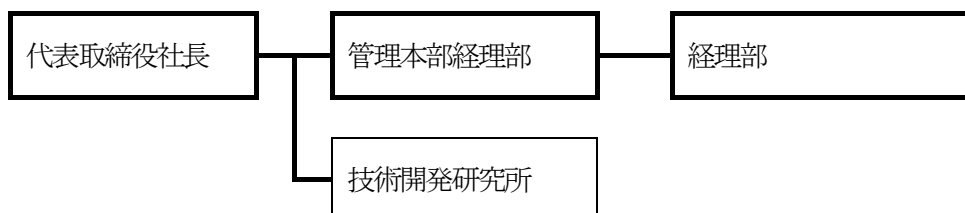
国立大学法人 名古屋大学



株式会社 アライドダイヤモンド



新日本空調株式会社



3) 研究者

株式会社太武製作所

氏 名	所属・役職
太田和義 入山剛一	専務取締役 製造部 主任

多賀電気株式会社

氏 名	所属・役職
浜田晴司 上山崇 島津利匡	取締役製品開発部長 製品開発部 製品開発部

株式会社三琇ファインツール

氏 名	所属・役職
神谷 宗孝 サラスリカルド	代表取締役社長 取締役

国立大学法人名古屋大学

氏 名	所属・役職
社本英二 鈴木教和	工学研究科 教授 工学研究科 助教

株式会社アライドダイヤモンド

氏 名	所属・役職
小嶋一志 吉永実樹	精密ダイヤ工具部 マネージャー 精密ダイヤ工具部 主査

新日本空調株式会社

氏 名	所属・役職
岡崎 徳臣	技術開発研究所 研究員

1－3 成果概要

本年度は、当初計画の通り、まず楕円振動装置の高度化として、高能率化を実現するためのハイパワー振動工具および自由曲面加工に対応する振動工具の開発、また機能表面生成のための高速振幅制御装置の改良に取り組み、それぞれについて実際のハイパワー化、自由曲面对応、安定した高速応答制御を実現するに至った。また、超音波楕円振動装置に合わせ、共振状態の振動を妨げ難い各種形状の専用インサート型工具を試作・開発し、自由曲面用などの特殊形状工具を含めて、所望の楕円振動が得られる実用性の高い工具を試作・開発した。さらに、試作・開発した簡易型低コスト恒温室に対して、センサー類や制御技術の見直しを行い、高い温度安定性と消費電力の大幅な削減を両立する技術開発に成功した。超精密・微細加工や高精度・自由曲面加工、高精度・機能表面創成技術、工具寿命延長に関する検討、ガラス等の高精度・微細加工に関しても、それぞれ多くの加工技術に関する新しい知見を得るに至り、例えば従来手法では困難な金型鋼の3次元ナノメートル彫画を実現した。

以上のように、当初計画に沿って順調に研究を進め、装置技術および加工技術の開発を行ってそれぞれについて多くの知見を得るに至っている。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理者

財団法人中部科学技術センター

研究開発推進部 担当部長 大澤 秀敏 E-mail:h.osawa@cstc.or.jp

TEL:052-231-3043 FAX:052-204-1469

第2章 ハイパワー楕円振動工具の試作・開発

2-1 研究目的及び目標

高精度・微細に対する性能を損なうことなく、高能率化、高信頼性を得るため、実用的なハイパワー（目標とする最大出力：30W）楕円振動工具を試作・開発する。

2-2 実施内容および結果

1) ツール装着面の面粗さが異なるハイパワー楕円振動工具の製作とその面粗さの評価

ハイパワー楕円振動工具の開発に当たって最も重要な目的は、高切り込み加工の安定化が挙げられる。従来実用化されていたインサート工具（単結晶ダイヤモンドバイト）は、バイトシャンク素材に焼入れ鋼を用い、厚みが2.38mm 一辺8mmの正三角形形状の頂点部に単結晶ダイヤモンドがロー付けされている形状であった。（図2-2-1）振動切削において高切り込み加工を行うには、振動するバイトの運動エネルギーを大きくする必要があることが知られており、したがってバイトの振幅を大きくして振動速度を大きくするか、あるいはバイトの質量を大きくすれば高切り込み化が可能となる。



図2-2-1 従来の

単結晶ダイヤモンドバイト

昨年度開発したハイパワー楕円振動工具は市販超硬チップが装着可能であることが大きな特徴である。またこれに装着するインサート工具は、バイトシャンク素材に超硬を用い、厚みが2.38mm 一辺11mmの正三角形形状のものを今年度新たに開発し、搭載可能とすることになった。この超硬の密度は鋼材の約2倍でありさらに体積もほぼ2倍となることでバイトシャンクの質量は従来より約4倍まで増大する。よって、4倍程度の高エネルギー切削加工が可能になると期待できる。一方、超音波領域で高速にて楕円振動するバイトシャンクには大きな加速度が発生し、質量が大きいバイトほどその加速度に耐えられるように確実に固定しなければならない。昨年度開発したハイパワー楕円振動工具の加速度は重力加速度の約12000倍（12000G）にも達し、従来用いられていたM3のねじでは固定しきれない。そこで固定ねじをM5に変更し、各種テストの結果締め付けトルク240cN・mまで高めることでほぼ安定した楕円振動が可能となった。しかし、新しい問題点として、固定ねじ締結の都度に加工テストによるワーク切削面の性状が異なる場合があるなど、振動状態のばらつきが発生する可能性があることが明らかになり、その対策が必要になった。一般には固定ねじの締結トルクをあげることで密着性が増大し、振動特性も向上するが、今回の場合締結トルクはすでにM5の限界に近い値であり、他の対策法で楕円振動子の工具装着面とインサート工具との密着性を向上させるしかない。従来は、楕円振動子のインサート工具装着面の指定面粗さはRz3~5μm程度を目標としていた。精密な楕円振動を得るためには、楕円振動子とインサート工具はほぼ一体構造としなければならず、インサート工具装着部はワイヤカットによる細溝加工でコの字状に平坦な溝を成型していた。しかしこの溝幅は3.3mmと狭いためチップに直に接触する部位の面粗さを正確に把握することが困難であり、製作図面で指定する面粗さは目標値とせざるを得なかった。しかし、質量が従来の4倍もの台金を精密に楕円振動させるにはこの接触面の面粗さを従来より正確に把握する必要があり、今年度新たに導入した3次元形状測定器を用いて接触面の面粗さを測定し、加工能力との関係を定量的に把握することとなった。

今回製作したハイパワー楕円振動子先端溝部とインサート工具とが接する面粗さを段階に分け、各1式計3式楕円振動子を試作した。具体的には、①カッター（回転溝入れ工具）による精密切削仕上げで目標面粗さ12μmRz。（以下「①カッター仕上げ装着面」と表す）

②放電加工（ワイヤカット）による仕上げ加工で、目標面粗さ5μmRz。（以下「②放電加工目標面粗さ5μmRz」と表す）

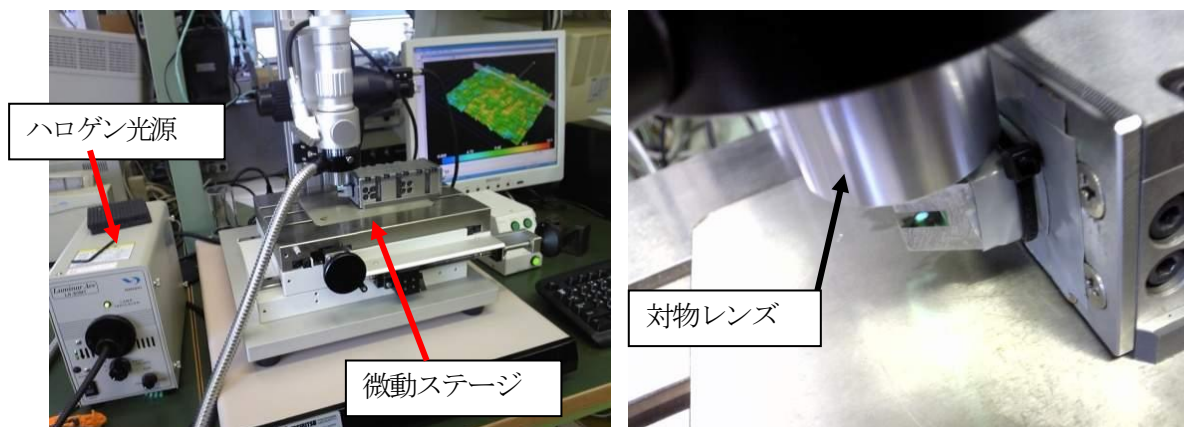
③放電加工（ワイヤカット）による精密仕上げ加工で、目標面粗さ3μmRz。（以下、「③放電加工目標面粗さ3μmRz」と表す）

④後日工具装着面を0.8t-#800CBN砥石にて精密研削処理した楕円振動工具も1式追加製作した。

(以下、「④研磨処理面」と表す)

図 2-2-2 は製作した楕円振動工具におけるインサート工具装着面の面性状を 3 次元形状測定装置を用いて計測している写真である。図 2-2-2-A に示す如く、3 次元形状測定装置の微動ステージに楕円振動工具を搭載し、インサート工具を固定する M5 ねじ穴を通して直下の装着面の面性状を観察する。

図 2-2-2-B はその観察面測定状況を拡大した写真で、ハロゲン光源からの光が青白く反射している部分が面性状測定部位である。



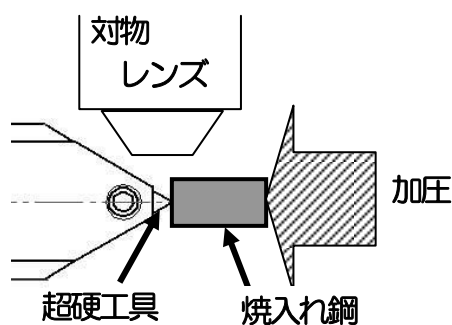
A 導入した 3 次元形状測定装置

B インサート工具装着面の面粗さ観測

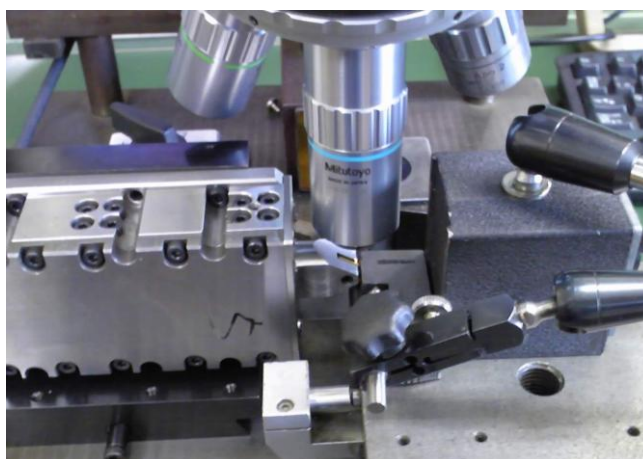
図 2-2-2 3 次元形状測定器によるインサート工具装着面の面性状の観察風景

背分力方向の加圧による楕円振動安定性の評価

上記①～④に示す各装着面を持つ振動子に、インサート工具代替として市販超硬チップを装着し、図 2-2-3A に示す方法にて、切削工具先端部分に焼入れ鋼（硬度 Hrc60）の擬似ワークを軸方向に押し付け、楕円振動の振動軌跡の歪みの程度を観測し、インサート工具装着面の面粗度との関係を探る。これは高脆性材の超精密加工を想定したもので、高硬度になるほど（あるいは高切り込みになるほど）背分力が大きくなり、それによって楕円軌跡に歪が生じ、結果として切削面に悪影響（面粗度の劣化など）を及ぼすことが想定されるので、インサート工具装着面の面粗度との影響が明らかにできれば、従来よりさらに高切り込みが可能となる条件が明らかにされ、より困難な高硬度材の切削が可能



A 加圧テスト概念図



B 実際の加圧テスト状態

図 2-2-3 背分力方向加圧テスト

となる道が開けると想定される。

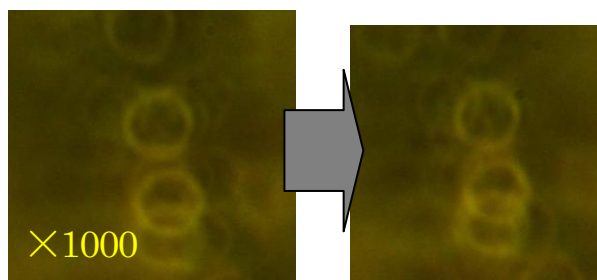
図 2-2-3B は、実際の加圧テスト状態を示した写真で、市販超硬チップを装着した楕円振動工具を移動しないよう強固に固定し、超硬チップ刃先近傍に反射型金属顕微鏡の対物レンズを設置して、刃先の振動状況を観察する。刃先は超音波周波数で高速楕円振動しているため、ごく微細なドット状の

傷は残像効果で楕円軌跡として観察される。擬似ワークである焼入れ鋼は微動ステージに固定され、楕円振動する超硬チップ刃先部分に押し当てられる。

テストは、インサート工具装着面が①～④に示す装着面を持つ楕円振動工具すべてに対して行い、擬似ワークが接触しない無負荷状態より、徐々に微動ステージを移動させ 0N～6N 間で加圧して、楕円振動軌跡の変化を観察した。

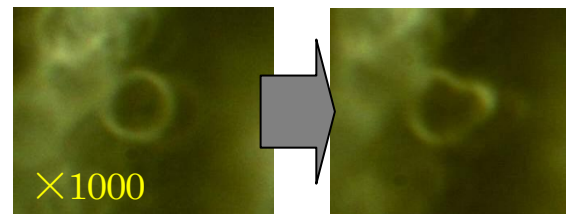
図 2-2-4A は加圧されていない状態の刃先部の楕円振動軌跡の写真で、 $2\mu\text{m}$ の真円振動である。図 2-2-4B は「②放電加工目標面粗さ $5\mu\text{mRz}$ 」(実際は $8.86\mu\text{mRz}$) に於ける 6N の加圧状態での振動軌跡だが、楕円形状に目立った変化は認められなかった。その他「①カッター仕上げ装着面」「③放電加工目標面粗さ $3\mu\text{mRz}$ 」「④研磨処理面」すべてにおいて、0N～6N まで加圧したが、楕円振動軌跡に目立った変化は認められなかった。

但し、金属顕微鏡を用いた楕円軌跡の観察における測定精度は、解像度の関係で $0.1\mu\text{m}$ 程度が限界であり、それを下回る変化は観測不可能である。したがって、いずれの装着面においてもわずかな楕円形状の変動が発生している可能性はある。



A 無負荷状態 B 6N 加圧状態

図 2-2-4 ②放電加工 $5\mu\text{m}$ 面での
振動軌跡の変化



A 無負荷状態 B 1.2N 加圧状態

図 2-2-5 従来の楕円振動工具での
振動軌跡の変化

図 2-2-5 は現在市販されている従来型楕円振動工具を用いた加圧テストの結果である。インサート工具は、一辺の長さが約 8mm 厚さが 2.38mm の正三角形のハイス材である。図 2-2-5A は無負荷状態での楕円振動軌跡で、 $2\mu\text{m}$ の良好な真円振動軌跡を描いているが、軸方向へ僅か 1.2N の加圧で図 2-2-5B に示すように振動軌跡はハート型に変形することが確かめられた。

このことより、今回のハイパワー楕円振動工具は、インサート工具を超硬材に変更し且つ大型化することで、装着面の性状如何に拘らず、従来型楕円振動工具と比較してかなり大きな振動剛性を有することが確認できた。

1) 実際の加工テストによる楕円振動安定性の評価

背分力を想定した軸方向の加圧テストでは、従来の楕円振動工具と比較して大きな振動剛性を有することは確認できたが、インサート工具装着面の面粗さの違いによる振動軌跡変形の差(振動剛性の差)が確認できなかったため、実際に加工テストを行い、加工した面を観察することで工具装着面の面性状の違いによる振動特性への影響を調べることにした。

ワーク素材 SCM435 焼入れ硬度 Hrc35 を被削材として用いたが、この素材は切削性が悪く精密切削が比較的困難な材質であるという理由でこれを選択した。端面加工を行い、切削速度を通常の楕円振動切削による超精密加工(約 1m/min)より高速加工とすることで、より差異化の判別が容易となる設定とした。切り込み深さは、最小切り込み $5\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ ピッチで深くし、最大 $40\mu\text{m}$ まで加工し、その加工サンプルすべてに対して端面最外周部分を 3 次元形

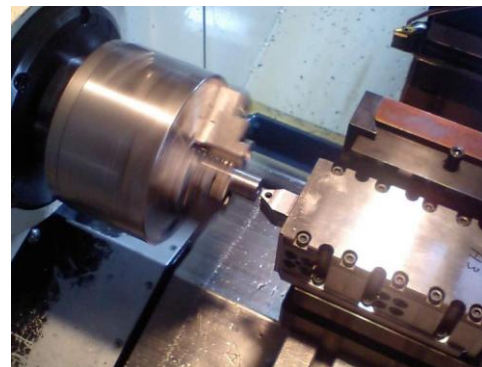


図 2-2-6 実際の加工状況

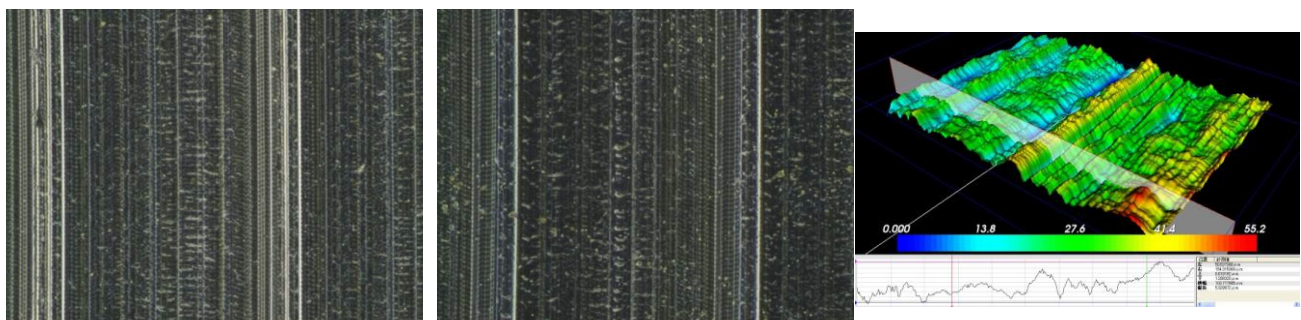
形状測定装置で観察し、加工状況の良否を判別した。

図 2-2-6 に実際に旋盤にて加工を行った状況を示す。なおテストに用いた旋盤は、最小送り精度が $1\mu\text{m}$ 程度のごく一般的な NC 制御櫛刃型旋盤である。

図 2-2-7 は「①カッター仕上げ装着面」の楕円振動工具による加工テスト結果である。図 2-2-7A に示す、切り込み $5\mu\text{m}$ における切削面の拡大写真では一応振動切削特有のウロコ模様が確認できるが、切削状態が場所によって不均一であり良い状態とは言えない。切り込み深さが $10\sim 15\mu\text{m}$ でもほぼ同じ状態である。図 2-2-7B に示す切り込み深さが $20\mu\text{m}$ になるとムシレ状切削跡が目立ち、楕円軌道が変形して切削抵抗が増大したものと思われる。図 2-2-7C は切り込み深さが $20\mu\text{m}$ のときの切削表面を 3 次元形状測定器にて測定した 3 次元データで、切削表面がかなり荒れている状況がわかる。

「②放電加工目標面粗さ $5\mu\text{mRz}$ 」の楕円振動工具による加工テストは、「①カッター仕上げ装着面」と比較してもあまり変化が無く、切り込み深さが $20\mu\text{m}$ になるとやはりムシレ状切削跡が目立ちはじめ、これは楕円軌道が変形して切削抵抗が増大したためと思われる。

「③放電加工目標面粗さ $3\mu\text{mRz}$ 」での楕円振動工具による加工テストでは、「②放電加工目標面粗さ $5\mu\text{mRz}$ 」と比較するとかなり改善され、切り込み深さ $20\mu\text{m}$ までは従来にない良好な切削面が得



A 切り込み $5\mu\text{m}$

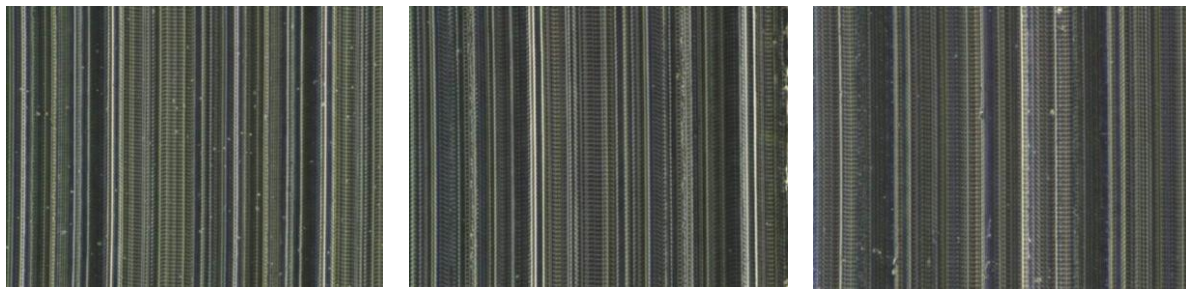
B 切り込み $20\mu\text{m}$

C $20\mu\text{m}$ 切り込み時の切削表面

図 2-2-7 ①カッター仕上げ装着面に超硬チップを搭載した場合の切削性能

られている。しかし、切り込み深さが $25\mu\text{m}$ より深くなるとムシレ状切削跡が目立ちはじめ、楕円軌道が変形して切削抵抗が増大した様相を示す。

図 2-2-8 は「④研削仕上げ装着面」での楕円振動工具による加工テスト結果である。切削面は、切り込み深さ $5\mu\text{m}$ の浅い領域から切り込み深さ $40\mu\text{m}$ の高切り込み領域まで従来にない綺麗な面が得られた。「③放電加工目標面粗さ $3\mu\text{mRz}$ 」と比較して、より切り込みが大きい領域まで正確な幾何学形状が得られている。これは、インサート工具装着面と超硬チップとの間で高い密着性が得られたためと思われる。図 2-2-9 は切り込み深さ $40\mu\text{m}$ における切削面の状態を 3 次元形状測定器で測定した 3D データであるが、かなり均一な切削面が得られ、ムシレなどの不具合は見られない。今後超精密加工装置に搭載して単結晶ダイヤモンドバイトを装着した超精密加工を行った場合、従来にない高切り込みでの超精密加工面が得られると考えられる。このことから、例えば荒加工や準仕上げ加工を省略し、最初から超精密仕上げ加工が可能となることも考えられ、この場合は加工時間の大幅な短縮化が期待できる。従来の楕円振動切削加工は、切削速度が遅いため生産性の観点から適用範囲が限定されるということも一部で指摘されていたが、それらの意見を払拭できる可能性が考えられる。また今回、背分力を想定した加圧テストにおいて、従来の楕円振動工具に対して今年度までに開発したハイパワー楕円振動工具は圧倒的に安定していることが証明されたことより、例えば高脆性材の延性モード超精密楕円振動切削加工の適用範囲が広がることも想定される。超硬材など高脆性材の延性モード超精密楕円振動切削加工は、背分力がかなり大きいと考えられ、従来は楕円振動軌跡が変形していた可能性がある。そのため刃先の磨耗が促進され易いと考えられる。これらは現在仮説に過ぎないが、今後研究を重ねることで解明できると考えている。



A 切り込み $5\mu\text{m}$

B 切り込み $20\mu\text{m}$

C 切り込み $40\mu\text{m}$

図 2-2-8 「④研削仕上げ装着面」に超硬チップを搭載した場合の切削性能

2-3 研究成果

実用的なハイパワー楕円振動工具の開発において、高精度・微細に対する性能を損なうことなく、高能率化、高信頼性を得るため、ハイパワー楕円振動工具のインサート工具装着面の面性状が異なる各種楕円振動子を試作し、各々の楕円振動子に描いて背分力を想定した軸方向加圧テストと、切削速度を通常より高めた切削条件での高切り込み加工テストを行い、以下の成果を得た。

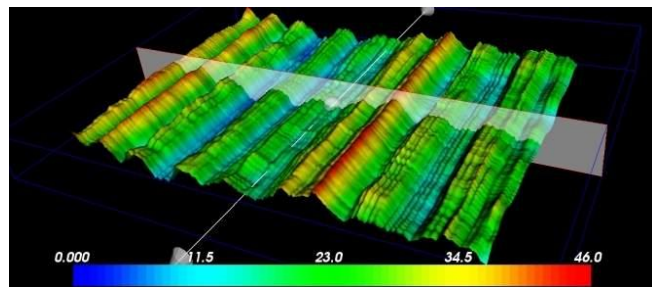


図 2-2-9 ④研削仕上げ装着面に超硬チップを搭載、切り込み深さ $40\mu\text{m}$ の切削面 3D データ

- ・ 背分力を想定した軸方向加圧テストの結果、開発したハイパワー楕円振動工具は、従来の楕円振動工具と比較して、4 倍以上の軸方向加圧でも楕円振動軌跡が安定していることを確認した。
- ・ インサート工具の装着面を少なくとも $3\mu\text{mRz}$ から $1\mu\text{mRz}$ 程度とすることで、従来にない高切り込み加工が可能であり、超精密楕円振動切削における加工時間の大幅な短縮化が期待できることを確認した。さらに、高脆性材の延性モード超精密楕円振動切削加工の適用範囲が広がる可能性が大きいことを確認した。

第 3 章 3次元自由曲面用超音波楕円振動工具の試作・開発

3-1 研究目的及び目標

複雑 3次元自由曲面の超音波楕円振動切削を実現するため、実用的な高信頼性の 3次元自由曲面用超音波楕円振動工具を試作・開発する。

3-2 実施内容および結果

①自由曲面用専用インサート工具の検討

軸振動とたわみ振動を合成した複合振動子である楕円振動子は軸及びたわみ各々の共振周波数を一致させる必要がある。この楕円振動子に工具を装着した場合、工具形状（突き出し長さ・工具シャンク径等）により軸及びたわみ各々の共振周波数の変化量は異なる。また、振動方向や振動振幅等も工具形状により様々な変化をする。即ち多種多様な工具を振動させる事は不可能であり、各特性が良好な専用インサート工具形状を見出さなければならない。

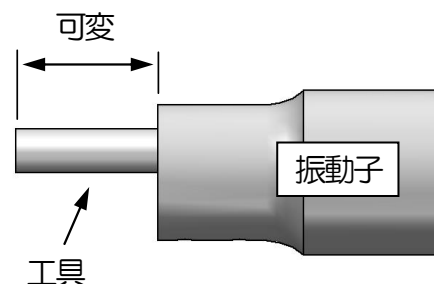


図 3-2-1 工具検討概略図

そこで、数種類の検証用ダミー工具を試作し、工具の検討を行った。図 3-2-1 に工具検討概略図を示す。まず、 $\phi 4$ ハイス製工具を用いて図 3-2-1 に示すように工具突き出し長さを可変させ、その都度各特性を測定し検証を行った。これより軸共振周波数は工具突き出し長さが大きくなるにつれ共振周波数はほぼ直線的に下がる。一方たわみ共振周波数は工具突き出し長さが $10\sim 17\text{mm}$ までは 6 次

モードで徐々に下がり、突き出し長さが 18mm の時に 7 次モードとなり共振周波数は急激に上昇し、それ以降は徐々に下がる。モードが切り替わる近辺では共振周波数が急激に変化し不安定である。また、18mm 以降は軸とたわみの共振周波数が大きく離れてしまい、共振周波数を合わせる対策が必要である。

次に、 $\phi 2$ ハイス製工具について同様に検証を行った。 $\phi 4$ ハイス工具の場合、突き出し長さを大きくすると、軸とたわみの共振周波数が離れ一致させられない問題があった。そこで解決方法として工具径を細くし軽くする事で共振周波数を合わせられないか可能性を探った。これより $\phi 2$ の方が軸共振周波数は高く傾斜も緩やかである事が分かる。例えば突き出し長さ 20mm では 35.3kHz から 37.6kHz となり約 2.3kHz 高い値を示す。これより工具径を $\phi 4$ から $\phi 2$ に細くする事で、突き出し長さが大きい領域に於いて軸とたわみの共振周波数を合わせられる事を確認した。

次に、超硬製工具について同様に検証を行った。ハイスと比較するとたわみ共振周波数はほぼ同等の値であるが、軸共振周波数は 1kHz 程度低い。この事から超硬工具の場合、工具径 $\phi 4$ では軸とたわみの周波数関係が悪い為、工具径を細くする等の対策が必要である。そこで、工具先端径を $\phi 1.8$ まで細くし検討を行った結果、軸とたわみの周波数関係が改善され、安定な振動特性が得られる事を確認した。

②自由曲面用楕円振動子の評価

図 3-2-2 に自由曲面用楕円振動子の加工テスト外観写真を示す。斜面を想定して楕円振動子を Z 軸に対して 0 度・45 度・75 度に傾け、X 軸送りにより端面旋削を行った。被削材は SUS420J2 HRC50 とし、あらかじめたわみ振動子にて面出しを行った後楕円振動子にて加工を行い、0 度・45 度・75 度の状態での各々の仕上げ面性状について評価を行った。

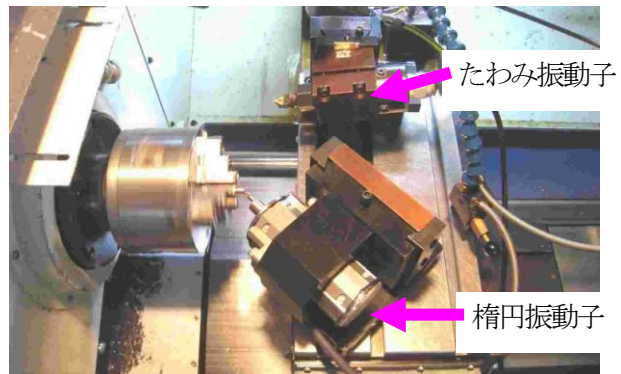
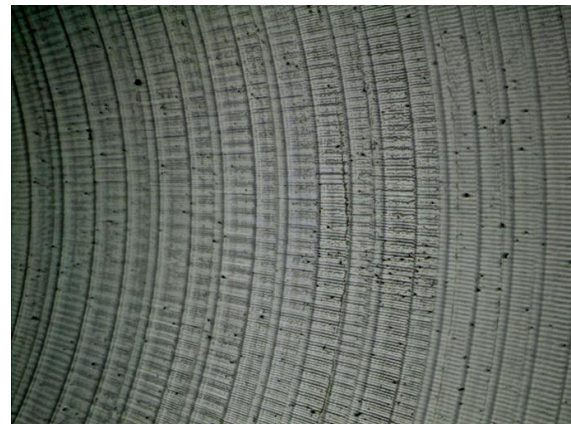


図 3-2-2 加工テスト外観写真

図 3-2-3 に加工後の仕上げ面を 3 次元表面性状解析用顕微鏡により撮影した写真を示す。図に示されるように、振動子傾斜 45 度での加工面は良好な仕上げ面性状が得られている。また、振動子傾斜 0 度に於いても 45 度の場合と同様の仕上げ面が得られた。一方、振動子傾斜 75 度ではびびり振動と思われる数種類の規則的な切り込みの変動が見られる。今後、工具剛性等の検証を行い、高切り込みが可能な振動子を開発継続する予定である。



振動子傾斜 45 度



振動子傾斜 75 度

図 3-2-3 仕上げ面の顕微鏡写真

③振動子保持ケースの開発

前年度開発した振動子保持ケースは発振時ケースに振動が洩れる問題があった。この対策として各

側板の厚みを 1～2mm 程度大きくし高剛性化を図った。実際にレーザドップラ振動計を用いて保持ケースの振動洩れの確認を行った。前年度の保持ケースは工具振幅を $4\mu\text{m}$ 真円で振動させた時、保持ケース後部に於いて最大 150nm の振動洩れがあった。これに対し、高剛性化した保持ケースでは各側板の厚みを大きくした事により最大 30nm 程度まで振動洩れが減少している事を確認した。

3-3 研究成果

3次元自由曲面用超音波楕円振動工具の試作・開発を行い、以下の成果を得た。

- ・ 自由曲面用専用インサート工具の検討を行い、ハイス及び超硬工具の特性を把握する事で、突き出しが長い工具及び超硬製工具の場合、工具径を細くする事が有効である事を確認した。
- ・ 加工テストを行い、一定の条件では良好な仕上げ面性状が得られる事を確認した。
- ・ 振動子保持ケースを構成する各部品を高剛性化する事で振動洩れが抑えられ、安定した加工が可能な振動子保持ケースを開発した。

第4章 超音波楕円振動工具用の高速振幅制御装置の評価・改良

4-1 研究目的及び目標

高硬度金型材料に対して、精密微細形状を含む表面を高精度、高能率に加工するため、昨年度までに開発した超音波楕円振動工具用高速振幅制御装置の評価・改良（目標とする最高応答周波数：300Hz）を行う。

4-2 実施内容および結果

本年度は、高速振幅制御回路内ローパスフィルター機能の ON-OFF 回路の追加とコントローラパネル面に振幅制御電圧波形観察用出力端子（BNC 端子）を設ける改造工事を行った。これによって振幅変調を付与したテスト加工時における、振幅変調波の周波数特性と実際に加工した被切削面の相対的評価が容易になった。青色線で示す部分が今年度改良した部分である。

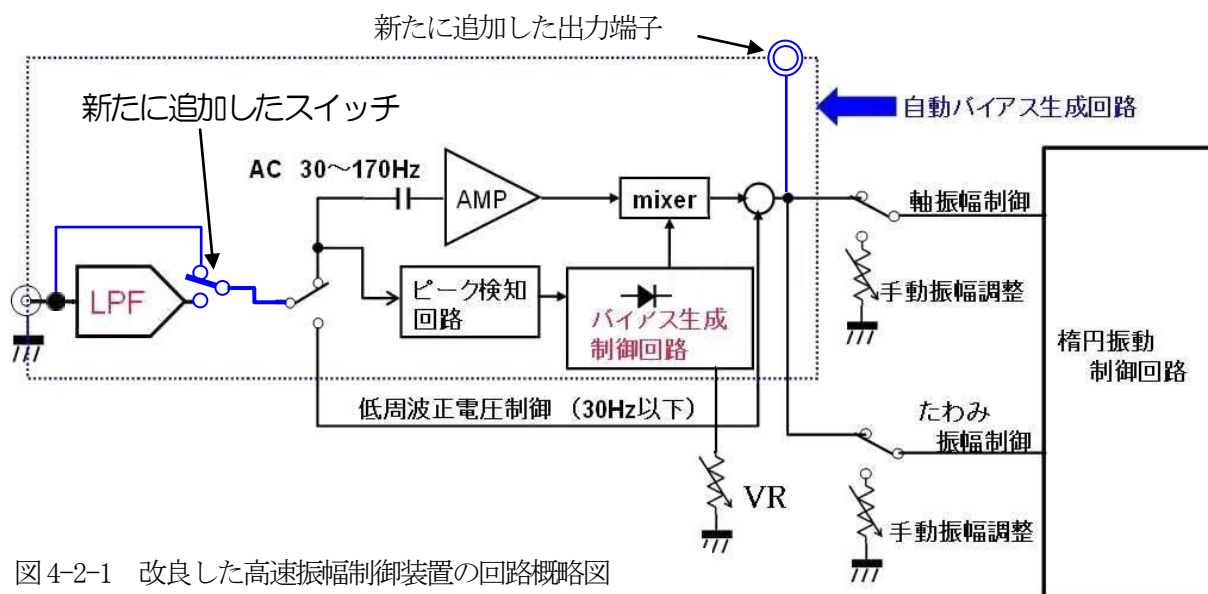


図4-2-1 改良した高速振幅制御装置の回路概略図

4-3 研究成果

高速振幅制御回路内ローパスフィルター機能の ON-OFF 回路の追加と振幅制御電圧波形観察用出力端子を設ける改造工事を行ったことにより、振幅変調を付与した楕円振動切削加工時に、楕円振動子のリングングによる振幅のオーバーシュート現象と、ローパスフィルターを付与することによるオーバーシュート現象防止条件との相関関係を明らかにすることが容易となり、振幅変調による超精密切削加工が容易に実現可能となった。

第5章 各種形状・材料の専用インサート型工具の試作・開発（担当：アライド・多賀電気様）

5-1 研究目的及び目標

超音波楕円振動装置に合わせ、共振状態の振動を妨げ難い各種形状の専用インサート型工具を試作・開発する。

5-2 実施内容および結果

1) ハイパワー楕円振動工具用バイトの試作

2章に示すハイパワー楕円振動工具の開発に伴い、先端角が 60° の単結晶ダイヤモンドバイト（図5-2-1）と、加工適用範囲の拡大を目的として、先端角度が 30° と鋭角な非球面加工用ダイヤモンド切削工具を設計・試作した。このインサート工具の台金の材質は超硬であり、一般に市販されている単結晶ダイヤモンドバイトと同一である。

従来型楕円振動工具用インサート工具は、台金がハイス鋼

（焼入れ鋼）と特殊であり、楕円振動切削専用に設計されているため、製作には特殊なジグが必要で手間が掛かり、製作時間も余計に必要でコスト的にも問題があった。

今回開発したインサート工具は、一般の市販品と同一製造工程で製作可能であり、特殊なジグも不要なため、従来の楕円振動子用に比べて製造が容易である。

この結果、実用的なチップの加工性とコスト低減を実現した。さらにハイパワー楕円振動工具に実際に装着し振動テストを行った結果、良好な楕円振動であることを確認した。図5-2-2は、開発したインサート工具の楕円振動軌跡（振幅 $2\mu\text{m}$ ）である。



図5-2-1

開発したハイパワー楕円振動工具用インサート工具

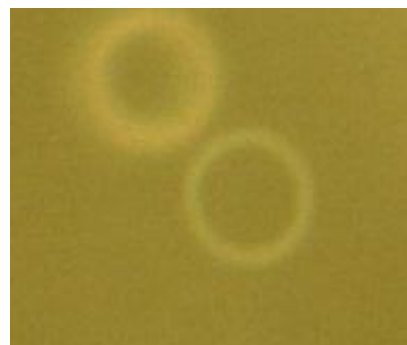


図5-2-2 インサート工具の振動軌跡

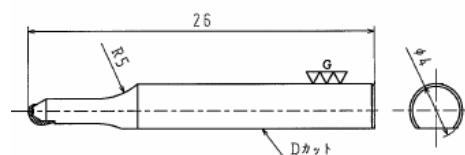
2) 自由曲面用バイトの試作

自由曲面用バイトとして台金サイズが $\phi 4\text{mm}$ の工具を試作し

た。しかし、振動子のハイパワー化に伴い、切れ刃近傍の振動特性が課題となった。そこで、高出力振動に耐え得るダイヤモンド接合強度を維持し、かつ、振動特性を安定させることを検討し、 $\phi 4$ の丸棒から角柱に変更して、切れ刃位置が角柱の中心高さとなり、かつ、先端の重量バランスが均一となるようにろう付け部を設けて、切り屑の排出性も考慮して面取り形状と設計変更し、試作した。

次に自由曲面の微細形状のワークに対応する工具として、先端部を $\phi 1.8$ と細くした工具を設計、試作した。この工具は、設計当初の台金首部が細くなるころの形状が $R9.5\text{mm}$ であったが、図5-2-3のように $R5\text{mm}$ に変更することで、全長で20%短くなり取り付け時の切れ刃突出量が短くなり材質はハイス材から超硬材としている。その結果、台金のたわみが抑制され、振動特性も向上させることができた。また、機上での振動軌跡の確認や取り付け工具の調整作業を効率良く行うため、レーザ計測機で実測できる反射面を台金の工具軸方向とその垂直な方向面に設ける仕様とした。

これにより、工具の位置調整で非接触の計測が可能になり、調整時の工具損傷を防ぐことが可能になった。



5-3 研究成果

鋭角バイトと自由曲面加工用バイトに関する設計、試作を行い以下の結果を得た。

図5-2-3 微細形状の自由曲面用バイト

- ・先端角 30° の非球面加工用バイトにおいて台金形状を変更し、振動特性の向上とコストダウンを実現する工具を設計、試作した。

- ・ハイパワー化に対応する自由曲面用バイトを設計、試作した。
- ・微細形状のワークに対応する自由曲面用バイトで振動特性を向上させ、インライン方式で振動軌跡の確認や位置調整が可能な新台金形状の工具を設計、試作した。

第6章 試作・開発した簡易型低コスト恒温室の評価

6－1 研究目的及び目標

中小企業において現実的な高精度・微細加工を実現するための基盤技術として、機能を限定して開発した簡易型低コスト恒温室の計測

- ・評価を行う。

6－2 実施内容および結果

①試作・開発した簡易型低コスト恒温室の設計仕様

2 種類の仕様が異なる簡易型低コスト恒温室の試作開発を行った

(表 6-1-1)。省エネルギー型の恒温室は使用状況や外気温湿度条件の変化に柔軟に対応し、省エネルギー化を図るべく、省エネ型温度制御技術を導入した。同制御は冷凍機に可変出力が可能な可変速機を採用し、室内温度を維持しつつ、電気ヒータによる再熱量を抑制する制御する方式を採用した。高精度型の恒温室は限定された使用状況で省エネルギー化と温度制御性能が最大限に発揮されるように試作開発を行った。

②省エネルギー型恒温室における室内温度制御性能と省エネルギー性能評価

室内温度分布を表 6-1-2 に示す。この時の室内温度設定値は 22℃、外気温変動幅は 4.4℃であった。表 6-1-2 に示す通り温度偏差は±0.127～0.318℃以内に収まっている。

図 6-1-3 に 08 年 8 月から 09 年 1 月までの消費電力計測値と基準システムの消費電力算出値を比較したものを示す。図より消費電力の削減率は 30～60%となる事がわかり、計測期間の多くで消費電力削減率が 55%前後であることがわかる。

表 6-1-2 室内温度分布 (名古屋大学向け恒温室)

	Ch:1	Ch:2	Ch:3	Ch:4	Ch:5	Ch:6	Ch:7	Ch:8	Ch:9	ch:10
名称	手前 1200	手前 2400	左 1200	左 2400	奥 1200	奥 2400	右 1200	右 2400	吸込み	吹出し
平均温度 ℃	22.514	22.376	22.208	22.229	22.376	22.624	22.251	22.505	22.468	21.519
温度変動幅 ±℃	0.146	0.166	0.195	0.176	0.139	0.197	0.318	0.132	0.127	0.214
Ch9-chn	-0.046	0.092	0.260	0.240	0.092	-0.156	0.217	-0.037	0.0	—

②高精度型恒温室における室内温度制御性能の評価

室内及び周囲温度を表 6-1-3 に示す。この時の設定温度は 23℃、周囲温度変動幅は 0.717℃であった。室内温度は表 6-1-3 に示すとおり、±0.063～0.029℃以内に収まっている。

6－3 研究成果

省エネ型温度制御技術と高精度

表 6-1-1 簡易型低コスト恒温室の設計仕様

項目	名古屋大学向け (省エネルギー型)	三誘ファインツール向け (高精度型)
設置環境	非空調室	空調室 (温度条件: 22～24℃)
室内環境	温度: 24±0.5℃ (分布精度は保証外) 湿度: 成り行き	温度: 24±0.1℃ (分布精度は保証外) 湿度: 成り行き
冷凍機	空気熱源方式可変速機	水熱源方式定速機

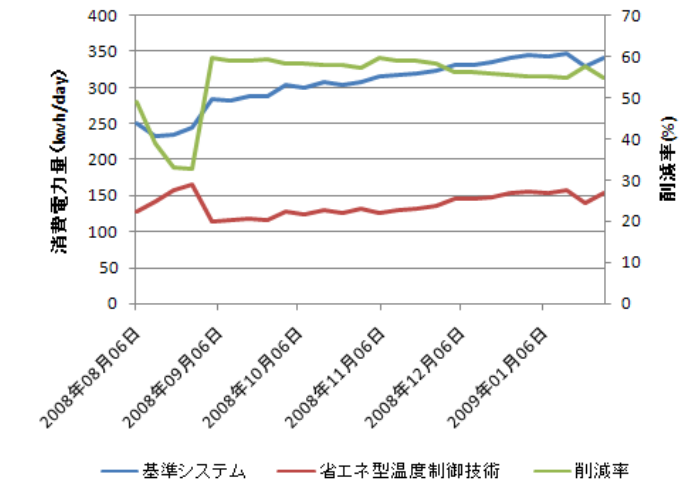


図 6-1-3 基準システムと省エネ型温度制御技術との消費電力比較

温度制御の双方に特徴を持つ簡易型低コスト恒温室の開発試作を行い、性能検証を行い、以下の成果を得た。

- ・ 省エネ型温度制御技術の採用により、温度制御精度を $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以下に抑えつつも、消費電力を08年8月から09年1月までの運転実績より30～60%削減可能である計測データを得た。
- ・ センサー、温度調節計、恒温空気供給装置の仕様見直しを総合的に行うことにより、温度制御精度を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以下に抑える高精度温度制御が達成できた。

	Ch:1	Ch:2	Ch:3	Ch:4	Ch:5	Ch:6
名称	ヒーター部	吹出し	吸込み	ブース中央	ブース右	周囲
平均温度 $^{\circ}\text{C}$	22.840	22.737	22.704	22.940	22.984	23.587
温度変動幅 $\pm^{\circ}\text{C}$	0.058	0.063	0.049	0.040	0.029	0.358
Ch3-chn	-0.136	-0.033	0.000	-0.237	-0.281	

第7章 高硬度金型材料の(超)精密・微細加工技術の開発

7-1 研究目的及び目標

従来または2章で開発する超音波楕円振動工具、4章で開発する専用の各種インサート型工具を用い、高硬度金型材料の(超)精密・微細加工技術を開発する。

7-2 実施内容および結果

7-2-1 レンズの加工技術

フレネルレンズの微細形状を持つ金型部品の加工技術の開発を行った。多数本のリング状プリズム、隣接プリズムの間に $1\mu\text{m}$ 程度の段差があるものの加工を行うため、アライドマテリアル製の工具を使用した。工具はレンズの形状に合わせるため、先端半径 $0.25\mu\text{m}$ 以下工具を用いた。使われた材料は焼入れ焼戻したSUS420である。



図7-2-1：フレネルレンズの顕微鏡写真

加工は超精密加工機ULC-100D(S)に行われた。加工面を顕微鏡で観察した結果、形状および鏡面仕上げを全面にできた(図7-2-1参照)。その良好な加工面を得られるように、工具の取り付けが大きな影響を及ぼす。取り付け面またはネジにて切削油、切り子などの異物があれば、振動子が発熱する傾向を見せた。

7-2-2 非球面レンズの加工

現在の光学技術に不可欠なものとされている非球面レンズを楕円振動加工で試みた。非球形状としてパラボloid面を通常の切削で加工して、超精密加工機で仕上げた。出来上がった加工品を評価するため、形状の測定を行った。測定した輪郭と元の曲線の多項式を比較することにより、形状の誤差を超精密輪郭測定機で求めた。結果として、形状の中央部にて誤差は $1\mu\text{m}$ 程度になった。粗さは $Rz 0.060\mu\text{m}$ 以下の結果を得られた。

7-2-3 溝加工

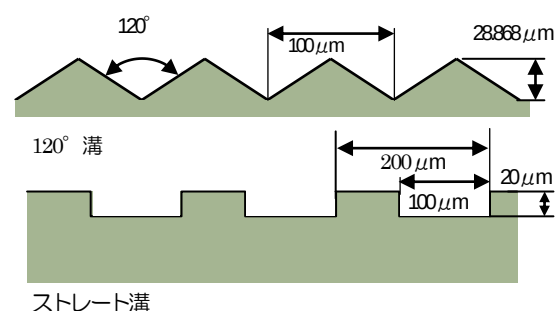


図7-2-2：溝形状

ディスプレイ、光線路のコネクターなどに使われる溝加工を試みた。加工した溝の形状および寸法を図7-2-2に示す。120°溝の場合、形状の測定を表面形状測定器で行った。形状のピッチは平均で $100.1\mu\text{m}$ になり、狙いピッチに対して誤差は0.1%以下になることは制度のよいものができた。形状高さに関して、狙いの $28.688\mu\text{m}$ に対して $28.244\mu\text{m}$ の平均測定値であり、誤差2%程度

となる。実際に角度を測定した結果、 121.0° 程度になり、ほぼ高低差と一致する。ストレート溝の場合、表面形状測定器の端子は溝の高低差を正確にフォローできないため、形状測定は画像測定機で行い、結果として平均ピッチは $200.5\mu\text{m}$ 、溝幅は $110.7\mu\text{m}$ になった。実際の工具幅データ ($110\mu\text{m}$) と比較すると、 0.06% の誤差になり、上記の 120° 溝と同程度。

7-2-4 レリーフ加工

超精密加工機のリニアモーターの微細な制御を使うことにより、浮き彫りと同じようにあるレリーフを加工面に彫り、比較的浅い形状 (数 μm の深さ) の切削技術を開発した。凸形状および凹形状を組み合わせることによって、複雑なレリーフでも実現できた。

図 7-2-3 に示すような一般的な白黒の画像データを (X, Y, Z) ベクトルとして扱われ、画像データから NC プログラムに変換して、加工を行った。結果として、良好な面粗度 ($Ra0.006\mu\text{m}$ 程度、 $Rz0.020\mu\text{m}$ 程度) を得たが、輪郭にて擦り傷のような模様があらわれた。擦り傷の原因は工具の先端 R と工具移動の指令にあることが分かった。



図 7-2-3 :
レリーフ加工

NC プログラムは工具を無次元の点として扱っているが、実際に工具が先端 R があるため、工具が加工面から垂直の動きを行うとき (輪郭の部分) に現れた。擦り傷防止の対策として、画像を操作すること有効ある。輪郭部にて工具が加工面から徐々に離れれば擦り傷がなくなる。

7-2-5 波状溝加工

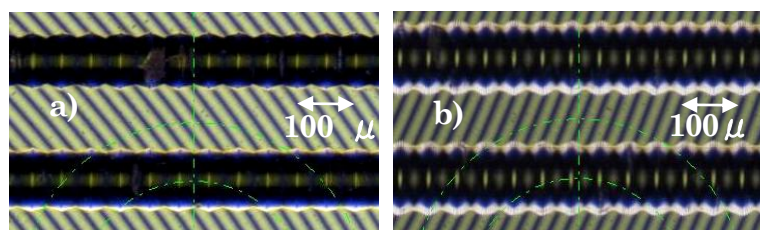


図 7-2-4 : 波状形状・a) ジグザグ b) 正弦

溝が波のような形状を持てれば、トライボロジー、マイクロ流体学などの用途を考えられる。ストレート溝の加工をすでに報告されたが、同じ溝の加工にて工具の切り込み量を変化させれば、溝の底のプロファイルを任意に生成できる。

画像データのマトリックスを 1 列として考えると溝加工はレリーフ加工の一種類である。ただし、今回画像を使わず、加工の NC データをある数式から生成させる。例えば画像がなくてもレリーフを数学的に生成できる。図 7-2-4 に溝の加工結果を示す。溝の側面に加工した波の形がはっきり現れる。波の形状も表面形状測定器で測定した結果、理想のプロファイルに対して、Z 方向に最大 $0.013\mu\text{m}$ があり、かなり良い精度で波の形ができた。

7-2-6 放電加工機での使用を想定した電極の機上成形の検討

①細孔電極の機上成形

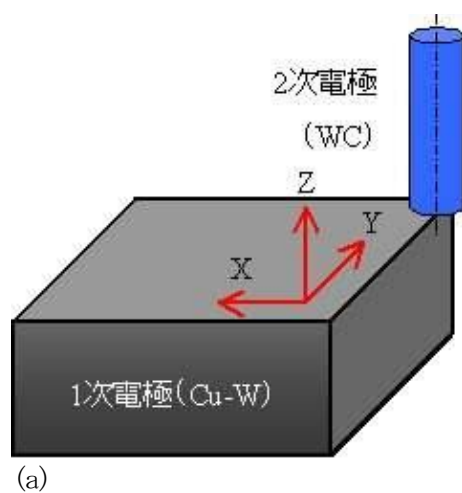
放電加工で $\phi 100\mu\text{m}$ 前後の小径孔を加工する場合、図 7-2-5 のようなキックパイプ電極 (シャンク付パイプ電極) を使用するか、図 7-2-6(a) に示すように、放電加工機上でタングステン、銅タングステンなどの電極材料を機上で成形して加工を行うのが一般的である。機上成形とは、加工機のテーブル上に 1 次電極放を設置し、主軸には孔加工を行うための電極材料をクランプし、所定の径、及び長さまで電極を成形する方法である。図 7-2-6(b) は機上成形で製作した $\phi 20\mu\text{m}$ の微細電極の一例を示すが、①加工時間にバラツキがある、②加工機の電源回路によっては、微細な加工が困難、或いは不可能、③径の制御が困難である、といった問題点が挙げられている。

これらの問題点を解決するために、図 7-2-7 のように楕円振動子を機械のテーブル上に設置し、主軸に取り付けた電極材料に対して図 7-2-8 の切削条件で加工を試みたところ、図 7-2-9 のように $\phi 100\mu\text{m} \times 10\text{mm}$ の高アスペクト比の電極を加工することができた。また、径方向では図 7-2-10 に示すよ

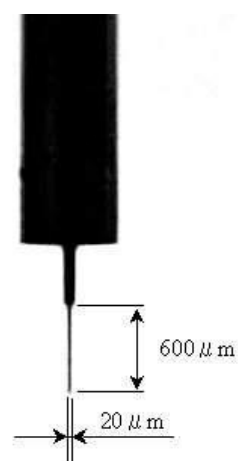
うに $\phi 50\mu\text{m} \times 2\text{mm}$ までの微細電極加工に成功した。その他、切込み角を変化させる事でV溝、R溝形状や、主軸のオリエンテーションを利用する事でDカット形状のような加工も可能である。



図7-2-5 市販のキックパイプ電極



(a)



(b)

図7-2-6 電極の機上成形の方法と加工例

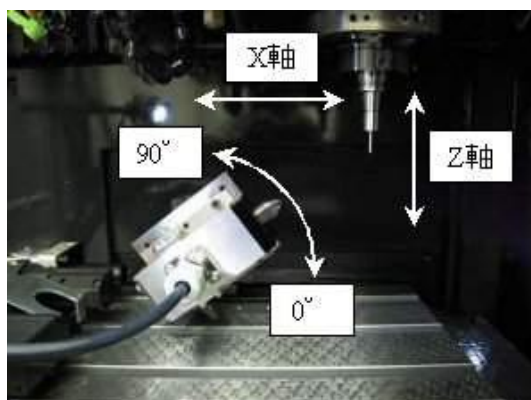


図7-2-7 セッティング状態

回転数	1,000min-1
送り速度	5~10mm/min
切込み量	0.1~0.475mm
工具	TPGT080201M-CF (PR1005)
切削油剤	ミスト (LB-10/ブルーベ)

図7-2-8 切削条件

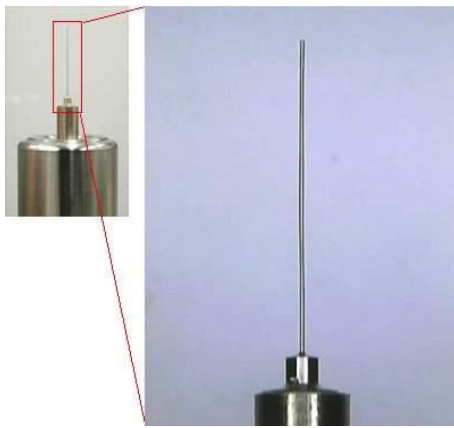


図 7-2-9 加工例-1
($\phi 100\mu\text{m} \times 10\text{mm}$ 、加工時間：3 分)

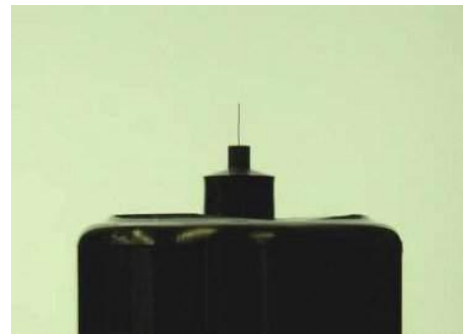


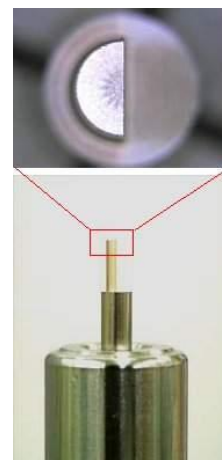
図 7-2-10 加工例-3
($\phi 50\mu\text{m} \times 2\text{mm}$ 、加工時間：6 分)



V 溝



R 溝



D カット

図 7-2-11 加工例-2

②機上成形を行う場合の留意点

機上成形において留意する点としては、加工点における切り屑処理や、工具の切れ味が重要になってくる。市販の超硬工具には、様々なブレーカー形状やノーズ R、工具材種が存在するため、これらに対応できるように楕円振動子を改造した。また、実験機の主軸の最低回転数は当初 $3,000\text{min}^{-1}$ であったが、加工径によっては切削速度がオーバーしてしまうため、パラメータにより最低 500min^{-1} まで指定できるように変更した。また、加工径が小さくなればなるほど材料が座屈を起こしやすく、変形や折損を引き起こしてしまうため、加工点付近にガイドブッシュを設けて、材料の座屈を防止する機構を設けることで、より高アスペクト比の高い加工が可能と思われる。

今回はマシニングセンタを使った加工テストであるが、実際に放電加工機で使用するには、放電加工時に切り屑による 2 次放電を防ぐため、加工層内に切り屑が残留しないための工夫も必要である。

7-3 研究成果

1) 精密と微細形状加工に関する技術開発および形状の評価を行い、以下の成果を得た。

- ・レンズの金型加工において、形状誤差を $1\mu\text{m}$ 以下、表面粗さ R_z を $0.060\mu\text{m}$ 以下に抑えることが出来た。
- ・溝加工において、工具を溝形状に合わせることで、形状誤差 0.06% 以下の加工を出来るようになった。
- ・レリーフ加工において、2 次元画像を 3 次元のレリーフ加工を実現させ、模造品対策、流動学、流体学など、様々な分野での応用が可能になった。

2) 放電加工機での使用を想定した電極の機上成形の検討

電極の機上成形において、以下の成果を得た。

- ・ マシニングセンタのテーブル上に楕円振動子を設置することで、高アスペクト比の旋削加工が可能となり、放電加工での細孔電極として応用できる。
- ・ ツールパスや工具の切込み角を変えることで、異形状の加工も可能である。
- ・ 放電加工面の多くは後工程で仕上げを行うため、面粗度よりもむしろ、同軸度や位相精度の厳しい部品加工に対して、より精度の高い放電加工が期待できる。

第8章 高硬度金型材料の高精度・自由曲面加工技術の開発

8-1 研究目的及び目標

3 章で開発する 3 次元自由曲面用超音波楕円振動切削装置および専用工具を用い、高硬度金型材料の高精度・自由曲面加工技術を開発する。

8-2 実施内容および結果

①名大振動装置におけるシャンク形状と耐負荷特性の評価および金型加工実験

名古屋大で独自に開発してきた圧電板貼付け型の 3 軸楕円振動装置に関して、加工実験に適用するとびり振動が発生してしまうという問題があった。これが、振動子の動剛性に起因すると考え、改良について検討を行った。

まず、振動特性を大きく左右するシャンク部分の最適形状について、有限要素解析の周波数応答解析を利用した評価を行った。解析を行った形状の一例を図 8-1-1 に示す。図に示す振動子の左端に取り付けたシャンクの径や長さ、形状（円柱とテーパ）を変えて周波数応答解析を行い、各パラメータの影響について評価を行った。その結果、シャンクの突き出しが長い条件では、低周波領域において、34kHz の駆動振動モードと比較して極端にコンプライアンスの大きい振動モードが発生することを確認した。これは、シャンク単体を片持ちばりと考えた場合の 1 次のたわみ振動モードと一致しており、シャンクが細長くその剛性が低いため、その共振モードのコンプライアンスも大きくなってしまったことを確認した。また、突出し長さの調整や形状をテーパ等にすることで振動特性を大幅に改善できることを確認した。

次に、この検討結果に基づき、テーパ形状で突出しの短いシャンクを試作し、金型鋼の加工実験に適用した。実験装置の外観写真を図 8-1-2 に示す。耐負荷特性を考慮して、突き出し 5mm のテーパシャンクを用いて加工を行った。なお、突き出しが短すぎるため、加工範囲に制約があり、金型形状において傾斜角が 70° 以下（金型の最大傾斜角は 83° ）となる上側の範囲のみに対して加工を施している。楕円振動の周波数は 34.4kHz で、振幅 $5\mu\text{m}_{\text{pp}}$ の真円を 45° 傾斜した振動平面内で発生して加工を行った。設定切込み量は $5\mu\text{m}$ 、加工トレランスは $0.1\mu\text{m}$ 、スキヤロップ高さは $0.05\mu\text{m}$ としてスパイラル加工を行った。加工後の仕上げ面の外観

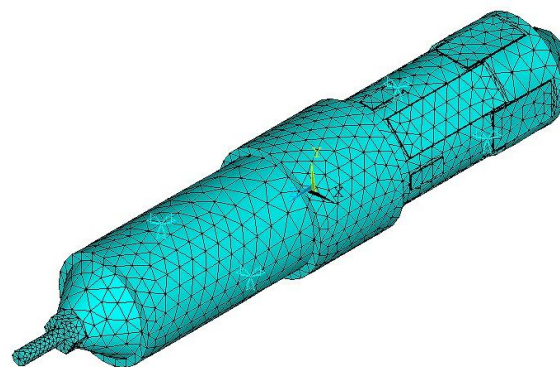


図 8-1-1 解析形状の一例

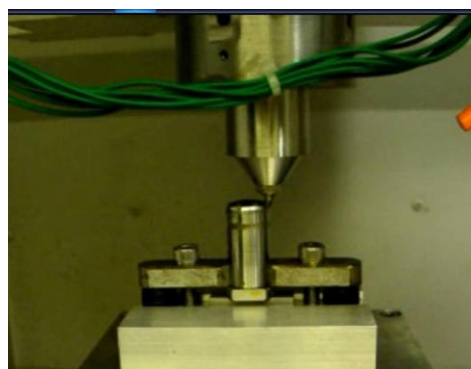


図 8-1-2 加工装置の外観写真



図 8-1-3 金型の外観写真

写真を図 8-1-7 および図 8-1-3 に示す。図に示されるように、良好な鏡面性状が得られており、その粗さは、 $0.12\sim0.17\ \mu\text{mRz}$ 程度であった。また、仕上げ面に若干振動がみられたが、これは加工機のもつ暗振動の影響であり、上記の粗さの測定結果はこの暗振動によるものと考えられる。

次に、3 章で開発した多賀電気製振動装置の耐負荷特性を評価するため、基礎的な平面加工実験を行った。加工機には超精密プレーナ加工機を用い、焼入れ鋼の 0 度水平平面、45 度傾斜平面、90 度垂直平面に対して平面加工を行った。振動周波数は 40kHz、シャンクの突き出し長さは 12mm、振動軌跡は $4\mu\text{m}_{\text{p-p}}$ の真円で振動の傾斜角度は 15° とした。切削速度は 1m/min、ピクフィードは $20\mu\text{m}$ とした。加工実験の結果、切込み深さ $10\mu\text{m}$ 以下の条件においてはすべての加工面方向で良好な加工を行うことができた。しかし、90 度垂直面の加工において、切込み切込みが $20\mu\text{m}$ の場合、びびり振動が生じることを確認した。次に、45 度傾斜面において、切込み深さを $1\sim40\mu\text{m}$ の範囲で変化させて加工を行い、耐負荷特性について評価を行った。その結果、臨界切込みは $28\mu\text{m}$ で、このときの、主/背送り分力はそれぞれ 0.6/0.3/0.1N であった。以上の結果から、本振動装置を用いる場合、切込み深さ $10\mu\text{m}$ 以下の条件では良好な加工を行い得ることを確認した。

以上の結果に基づき、上述の多賀電気製振動装置を用いて焼入れ鋼ボタン金型の加工実験を行った。実験装置の外観写真を図 8-1-4 に示す。シャンクの突き出しは同様に 12mm であり、振動周波数 40kHz、振動振幅 $4\mu\text{m}_{\text{p-p}}$ の真円、振動の傾斜角度 15° で加工を行った。名古屋大の開発装置と異なり、突き出しが大きいため、ここでは金型全面に対して加工を施すことができた。設定切込み量は $5\sim10\ \mu\text{m}$ とし、加工トレランスを $0.1\mu\text{m}$ 、スキヤロップ高さを $0.05\mu\text{m}$ としてスパイラル加工を行った。

加工後の仕上げ面の外観写真および微分干渉顕微鏡写真を図 8-1-5 および図 8-1-6 に示す。図に示されるように、良好な鏡面性状が得られており、その粗さは、 $0.09\sim0.17\ \mu\text{mRz}$ 程度であった。また、仕上げ面において若干振動がみられるが、これは加工機のもつ暗振動の影響であると考えられる。なお、もともと刃先に微小なチッピングがあり、図に示されるように一部の加工面においては加工痕が表面に残ってしまっている。また、側面においては、振動工具の耐負荷特性不足に起因するびびり振動が発生していることを確認した。このため、傾斜の大きい斜面に対しては、 $5\mu\text{m}$ 以下の切込みで加工を行うか、もしくは振動工具の耐負荷特性を改善するのが望ましいと考えられる。ただし、これに起因した工具摩耗などは一切確認できなかった。

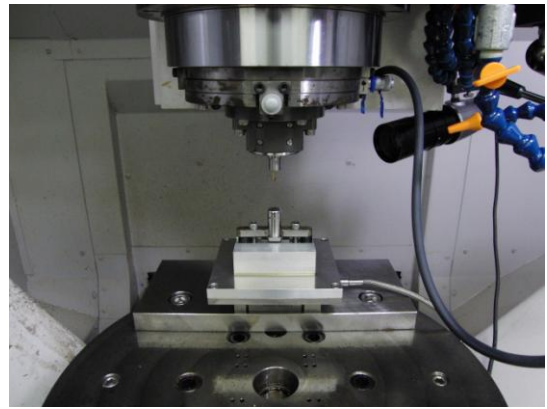


図 8-1-4 加工装置の外観写真



図 8-1-5 金型の外観写真

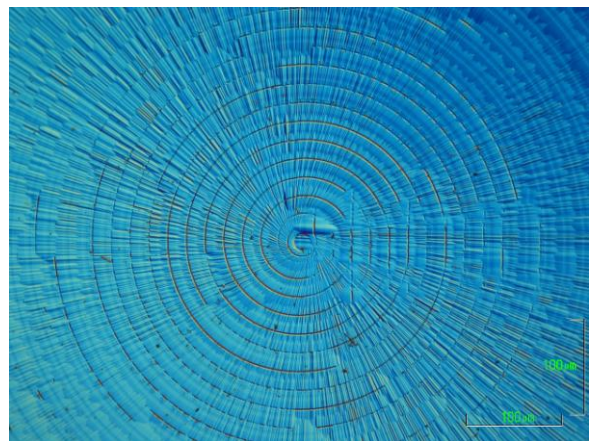


図 8-1-6 加工面の微分干渉顕微鏡写真

8-3 研究成果

名古屋大で独自に開発してきた振動切削装置、および3章および5章で開発した振動切削装置および専用工具を用い、高硬度金型材料の高精度・自由曲面加工について検討を行った。その結果、焼入れ鋼金型の自由曲面加工において良好な鏡面性状を実現できることを確認した。また、実用的な加工を実現する上でびびり振動が問題となり得る可能性があり、シャンク形状の設計が重要であることを明らかにした。

第9章 高硬度金型材料に対する高精度・機能表面創成技術の開発

9-1 研究目的及び目標

4章で開発する超音波楕円振動切削工具用の高速振幅制御装置を用い、高硬度金型材料に対して、表面に精密微細形状を創成する高精度、高能率加工技術を開発する。

9-2 実施内容および結果

4章で開発した振動装置において、外部入力を与えて振動振幅の制御を行い、レーザを用いて刃先に発生する振動軌跡の評価を行った。測定装置としてはレーザドップラ振動計を用いた。軸振動のみを外部入力を用いて制御した際の振動軌跡の測定結果を図9-1-2に示す。正弦波状の外部入力(100Hz)を与えたもので、最上段に外部入力信号を示し、その下に縦振動の振幅、たわみ振動の振幅、位相差、およびそれぞれの入力信号とのリサージュ図形を示している。

図に示されるように、ほぼ縦振動のみが正弦波状に正確に応答していることがわかる。また、それぞれはリサージュ図形において楕円軌跡を描いており、若干位相遅れが発生していることがわかる。なお、さまざまな周波数および波形で応答性を評価したところ、約100Hz程度までであれば顕著な振幅低下は見られなかった。また、このような応答は、制御系の安定化を目的として入力段に挿入されているローパスフィルタの影響であることを確認している。

次に、振動振幅制御を行いながら、焼入れ鋼の溝加工を行い、テクスチャ加工の有効性について検討を行った。加工したワーク(50×30mm)の外観写真を図9-1-3に示す。単結晶Rバイトを用いて楕円振動切削により焼入れステンレス鋼(SUS420J2)の表面の面だし加工を行い(送り20 μm , 切削速度1m/min, 切込み10 μm ×2回), そのままの工具を用いて鏡面上にテクスチャ溝加工を行った。図中の下側の箇所には37本の溝加工を行っている。外部入力は、振動振幅が2~4 μm_{pp} で変化するように電圧の振幅指令を与えており、振動周波数を10~100Hz, 切削速度を

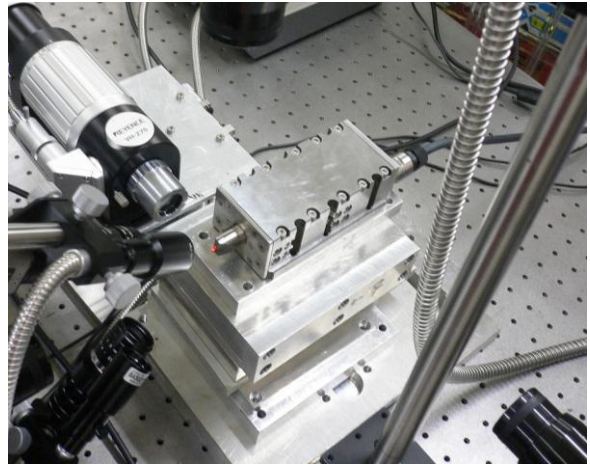


図9-1-1 レーザによる刃先の振動測定

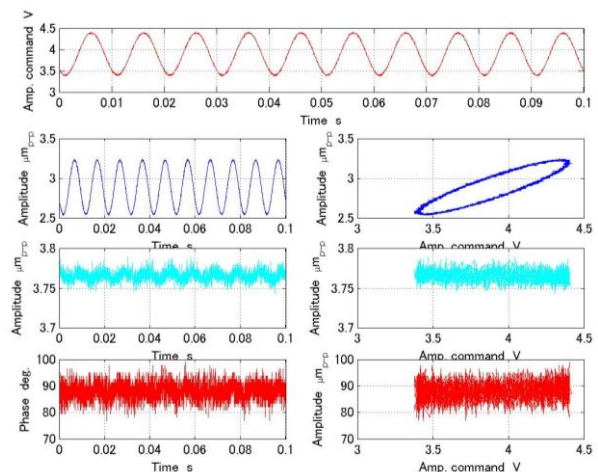


図9-1-2 外部入力による振動振幅制御
(正弦波100Hz Offset: 3.9V, amp.: 1V_{pp})

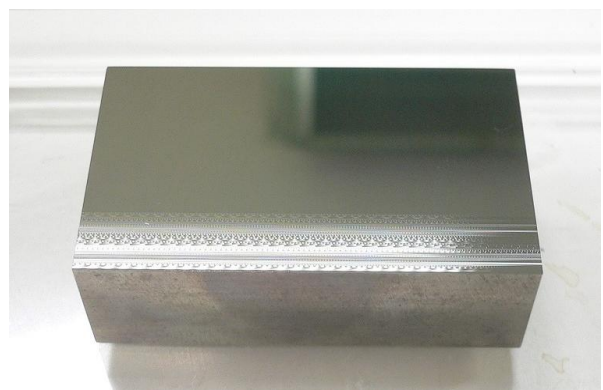


図9-1-3 加工面の外観写真

0.2～1.0m/min の範囲で評価を行った。また、制御波形は正弦波、ランプ波、ジグザグ波として評価を行った。加工面について顕微鏡および形状測定器を用いて詳細に評価を行ったところ、それぞれの溝において切込みが変動してテクスチャが形成されていることを確認した。また、計測された溝の幅から深さ変動は約 $1\mu\text{m}$ 程度であり、設定どおりの切込み変動による良好なテクスチャの転写が行われたことを確認した。さらに、加工後の工具刃先にはチッピングなどはみられなかった。

次に、加工機の動作と同期して 4 章で開発した振動装置の制御を行うことで、平面に対して任意のテクスチャ加工を行うことができる加工システムを開発した。開発した加工システムの概要、および外観写真を図 9-1-4、図 9-1-5 に示す。本システムではリアルタイムに加工機の位置情報を読み込み必要があり、ここでは、NC 制御装置 (FANUC 製) の HSSB 通信機能を利用した。本加工実験では、焼入れ鋼平面 (64×48) に対してプレーナ加工を行い、加工中に加工機の位置を検出して同期を取ることで、所望の加工形状に対応して振動振幅を外部入力で制御しながら加工を行った。このため、加工機に与える動作は通常のプレーナ加工の動作であり、X 軸を切削送り方向、Y 軸をピックアップ方向として、切削速度を 1m/min 、送りピッチを $20\mu\text{m}$ に設定した。そして、助走期間中に HSSB 通信で X 軸の送り位置を演算機 (PC) に読み取って同期を取り、加工形状データに対応する外部出力電圧信号を DA 変換器を用いて出力した。実験では、振動振幅が $2\sim 4\mu\text{m}_{\text{pp}}$ の範囲で変化するように指令値を作成した。従って、切込み深さの総変動量は $1\mu\text{m}$ に対応する。目標の加工形状は 2 種類 (文字と、集合写真) とし、文字の場合は文字の位置で深さが $1\mu\text{m}$ となるように設定し、集合写真ではグレースケールの濃淡に合わせて、暗い場合に深くなるように設定した。データが 8bit であったため、垂直解像度は 4nm となるように設定し、pixel 間は直線的につながるように制御指令を出力した。なお、演算機では OS を Windows としたため、完全なリアルタイム制御を行うことができず、ランダムに割り込みが生じる影響により若干の同期誤差が生じている。

開発した加工システムを用いて加工を行った事例を図 9-1-3 に示す。図から、元画像データと一致する良好な加工形状が得られていることがわかる。また、文字の加工形状のデータから、若干の同期ずれが見られるが、これは上述したように OS に Windows を利用したためであると考えられる。

9-3 研究成果

4 章で開発した超音波楕円振動切削工具用の高速振幅制御装置を用い、高硬度金型材料に対して、表面に精密微細形状を創成する高精度・高効率加工技術の開発を行った。開発した振幅制御装置の応答特性について評価を行った結果、 100Hz 程度までの応答周波数が得られ、干渉は極めて小さい

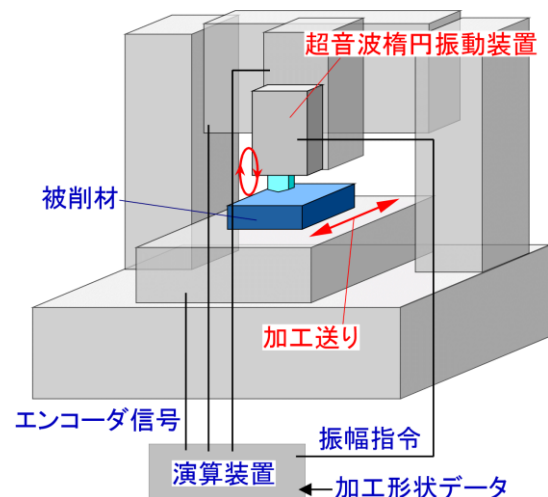


図 9-1-4 加工システムの概要

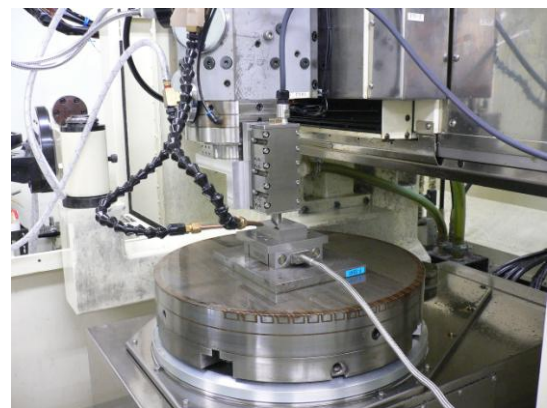


図 9-1-5 加工装置の外観写真

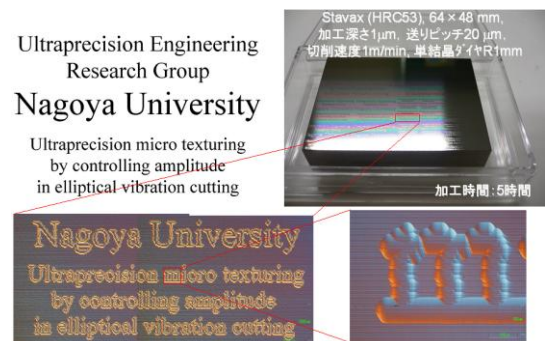


図 9-1-6 文字加工の事例

ことを確認した。さらに、焼入れ鋼に対して基礎的なパターンのテクスチャ溝加工を実現し得ることを確認した。そして、開発した装置を組み込んだテクスチャ加工システムを開発し、焼入れ鋼の平面に対してナノメートルオーダの超精密・微細テクスチャ加工を、高能率で実現し得ることを明らかにした。

第10章 工具寿命延長に関する検討

10-1 研究目的及び目標

工具材料、工具刃先形状などの工夫により、高硬度金型材料の楕円振動切削時における、専用工具の寿命延長について検討を行う。

10-2 実施内容および結果

1) CFRP の加工検討

①溝加工

CFRP は鉄やアルミなどの金属材料に比べて、同じ強度・剛性であっても、より軽量化できる特徴を持つことから、ゴルフクラブのシャフトや釣竿などのスポーツ用途から、航空宇宙産業に拡大し、今後は自動車や家電などへの用途開拓が進んでいる。しかし、被削性が非常に悪く、高能率加工を行うには様々な問題が蓄積している。

そこで、楕円振動子と超硬工具を使って加工検討を行った。使用した素材は水平方向と垂直方向に炭素繊維が交互に直交する3層から成る積層体で、断面の様子を図10-1-1に示す。予備実験として、一般的に行われている超硬ルータービットを使って図10-1-2(a)の切削条件により加工を行ったところ、工具が激しく磨耗したせいか、図10-1-3のように加工面に大きなカエリが発生した。更に20,000min⁻¹以上の高速域で加工すると、加工面が溶けるという現象が発生するため、経済的な加工を行うことは困難である。

次に楕円振動子にコーテッド超硬工具(TiSiN系)を取り付けて、図10-1-2(b)の切削条件により同様の加工を行った。使用工具の形状により、ルータービットに比べて切込量は制限されるものの、図10-1-4に示す通り、刃先にはアブレイシブ磨耗が見られるが、カエリの発生は極めて少なく、実用的な加工をといえる結果を得ることができた。更に工具材種を多結晶ダイヤモンドに変えて慣用切削と比較した。結果を図10-1-5に示すが、慣用切削では刃先付近にチッピングが発生し、加工面もクレーターが確認できたのに対し、楕円振動切削では繊維の破壊も少なく、良好な加工面を得ることができた。

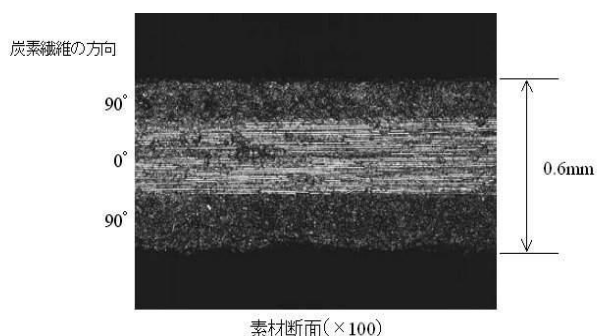


図10-1-1 素材断面

図10-1-2 切削条件

	(a)	(b)
加工方法	ルータービット	楕円振動切削
使用工具	超硬 (φ1.5)	TPGN080204 (TiSiN)
回転数	10,000min ⁻¹	—
切込み量	0.5mm×1回/1本	0.05mm×20回/1本
送り速度	1,000mm/min	
切削油剤	不水溶性 (KC-130/サンワケミカル)	

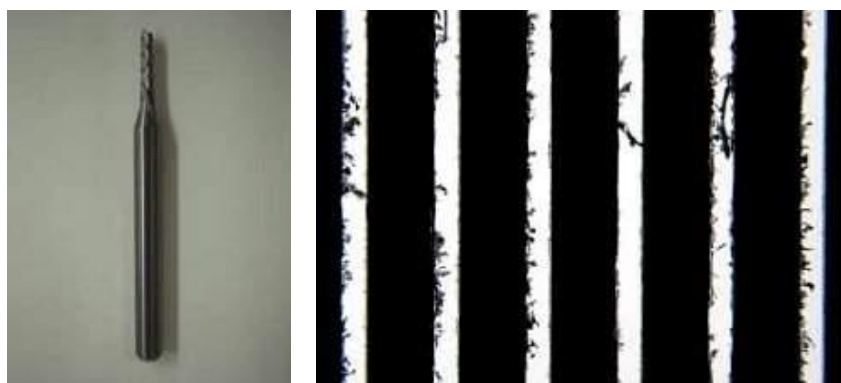


図 10-1-3 超硬ルータービットと加工面

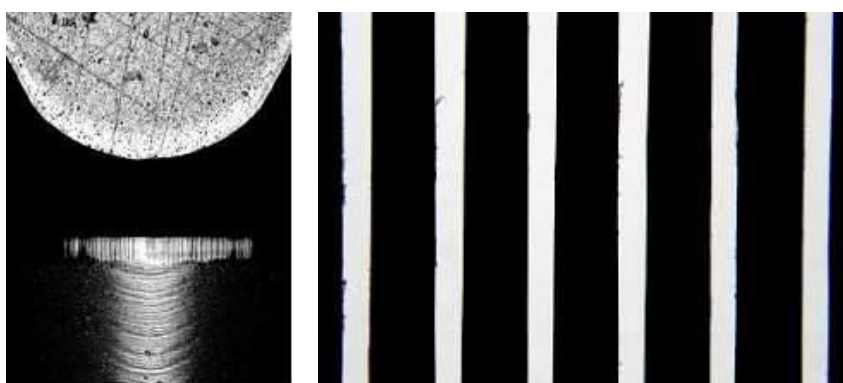


図 10-1-4 楕円振動子による加工後の刃先と加工面

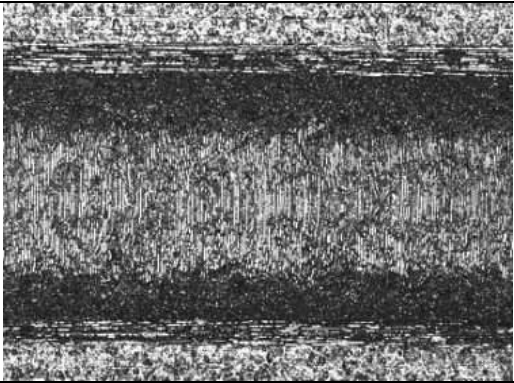
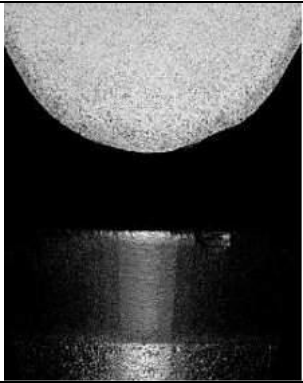
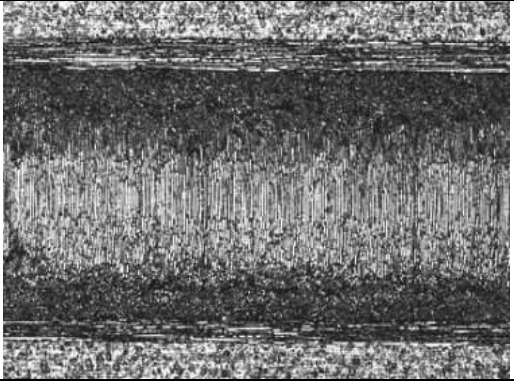
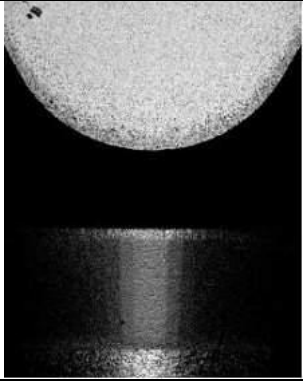
	加工面	刃先
慣用切削		
楕円振動切削		

図 10-1-5 慣用切削と楕円振動との比較

10-3 研究成果

1) CFRP の加工検討

CFRP に対して楕円振動切削を適用したことで、以下の成果を得た。

- ・ 超硬ルータービットを使った加工に比べて、楕円振動切削ではカエリの発生を抑えることができ、工具寿命も大幅に延びた。

- ・ コーテッド超硬工具ではアブレイシブ磨耗の発生が見られたが、多結晶ダイヤモンドを使用することで、更なる工具寿命延長効果が得られた。また、加工面にクレーターの発生や繊維の破壊も無く、良好な加工を得ることができた。

第11章 ガラス等の高精度・微細加工の試み

11-1 研究目的及び目標

楕円振動切削により、ガラス等の難削材に対して、高精度な微細溝加工を試み、適切な加工条件を明らかにする。

11-2 実施内容および結果

①ガラス加工専用加工液に関する検討

これまで、ガラスの切削加工には研削液（ユシローケン・シンセティック#830）を精製水で20倍に希釈して加工を行ってきたが、ガラス加工専用加工液（商品名：グラスグラインド100）を入手して比較を行った。物性を図11-1-1に示す。この加工液の主な特徴としては、トリエタノールアミンを主要成分とし、油成分や亜硝酸塩などを含まず、冷却性能及び錆びの発生を防止する。研削液の時と同様精製水により希釈するが、その際電子天秤と屈折計を使って濃度管理を行った。図11-1-2に示す加工条件により、ソーダ石灰ガラスにR溝を加工した。加工液は自動噴霧装置を使用し、1分に1回0.5秒、加工点に向けて供給した。結果を図11-1-3に示す。板ガラス加工におけるメーカーの推奨希釈倍率は1:80であったが、推奨値通り1:80に希釈したものが磨耗量も小さく、加工面も良好であった。原液或いは希釈率が低いと、液の粘性からくる影響か、切り屑による加工面の傷が目立った。

図11-1-1 物性

沸点	F215 度
蒸気圧	C20 度
蒸気密度	1
水溶性	完全
PH (20 : 1)	8.6±0.3
比重	1.04±0.01
形状	透明琥珀色液体
匂い	甘い香り

図11-1-2 加工条件

工具	TPGN090202 (BN500)
切込み量	0.1 μm×200 回
送り速度	100mm/min
振幅	1 μm

11-3 研究成果

ガラス加工専用加工液を使って加工を行い、以下の成果を得た。

- ・ 従来使用していた研削液よりも工具磨耗は少なく、メーカー推奨の希釈率により、良好な加工面を得ることができた。
- ・ 噴霧供給では切り屑が除去できず、残留した微細な切り屑によって加工面を傷つけることがあるため、液中或いは加工液を循環させる工夫が必要となる。
- ・ 人体に対する影響も無く、尚且つ希経済的に使用できる加工液である。

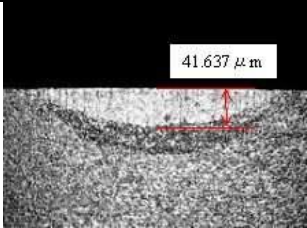
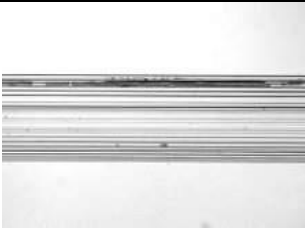
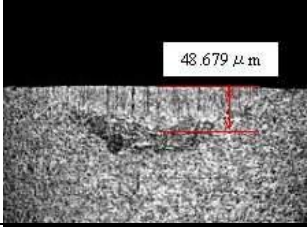
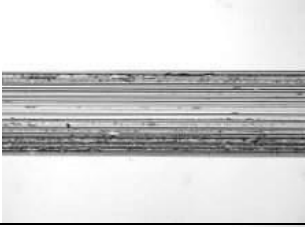
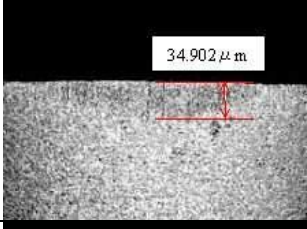
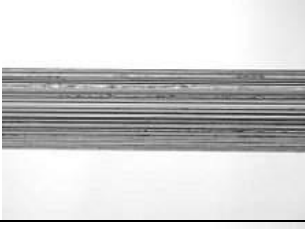
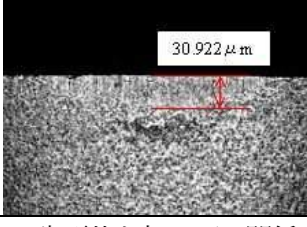
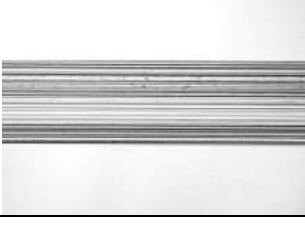
希釈率	刃先	加工面
原液		
1 : 30		
1 : 60		
1 : 80		

図 11-1-3 希釈率、刃先形状と加工面の関係

第 12 章 ガラスレンズ成形用金型（バインダーレスタングステン合金）の加工評価

12-1 研究目的及び目標

超微粒バインダーレスタングステン合金の楕円振動切削加工を行って加工結果を評価・検討する。

12-2 実施内容および結果

単結晶ダイヤモンドによる W 合金の加工では、従来の検討により、工具寿命が短く大面積の加工への適用が困難であることを明らかにしている。このため、工具形状や工具材質の工具寿命に及ぼす影響について評価を行い、工具寿命の延長について検討を行った。ここでは、基礎的な外周旋削実験を行い、切削距離と仕上げ面粗さとの関係について比較を行った。実験装置の外観写真を図 12-1-1 に示す。図に示すように被削材の表面は 3 か所に分け、さらに、切削力の計測が可能となるように軸方向に割を入れている。使用した工具の条件を表 12-1-1 に示す。ここでは工具の刃先ラウンド処理、

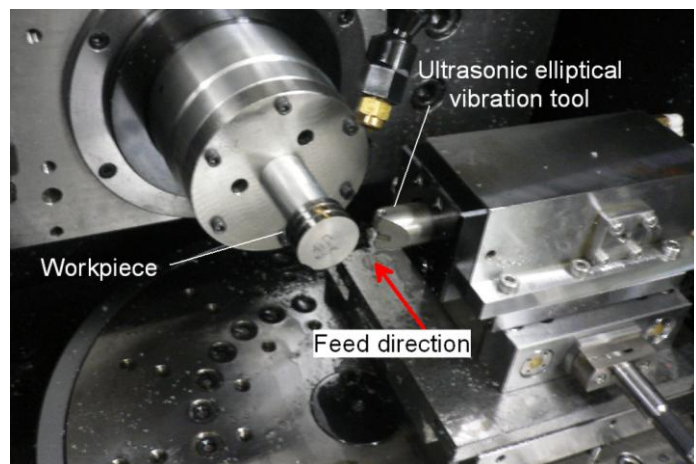


図 12-1-1 実験装置の外観写真

表 12-1-1 工具条件

Experimental No.	1	2	3	4	5
Material	SCD			SCS	SCD
Crystal orientation of rake face	(100)		(110)	-	(100)
Shape	R-shaped (R: 1 mm)				Flat: Adjacent angle 150 deg.
Edge treatment	-	Round treatment	-		
Rake / relief angle	0 / 10 deg.				

SCD: single crystal diamond, SCS: single crystal sapphire

結晶方位、他の素材（単結晶サファイア）、異なる形状（フラット）の違いによる寿命延長効果について比較/評価を行った。それぞれの工具による加工後の被削材の外観写真を図 12-1-2 に示す。また、切削距離と仕上げ面粗さとの関係についても図 12-1-3 に示す。各図に示されるように、チッピング防止のための刃先ラウンド処理(No. 2)ではデフォルトの条件(No. 1)と変化が無く、工具寿命の延長に効果が無いことを確認した。また、単結晶サファイア(No. 4)や新素材ダイヤモンドについても同様に寿命延長の効果は確認できなかった。一方、単結晶ダイヤモンドにおいて、ダイヤモンドの結晶方位をすくい面で(100)→(110)に変更することにより、仕上げ面性状の劣化が抑制されていることがわかる(No. 3)。これは、逃げ面の耐摩耗性が変化したためであり、この結晶方位の変更により工具寿命が3 倍程度延長されることを確認した。さらに、フラットな切れ刃形状(No. 5)を用いる場合の工具摩耗においては、仕上げ面を評価したところ、具体的な工具寿命延長効果は確認できなかったが、被切削抵抗においては切削距離の増加に伴う劣化の傾向が小さいことが分かる。また、フラットバイトを用いた微細溝加工などにおいても一般に工具の寿命は長くなることから、工具寿命の延長の可能性は十分にあると考えられる。

次に、タングステン合金の超精密加工においては、これまでの研究によって、加工中に発生する切りくずのかみ込みを低減することで工具寿命を延長の延長効果が期待されている。そこで、このかみ込みプロセスの抑制を目的とし、メガソニック

ククーラントの適用効果について検討を行った。実験装置の外観写真を図 12-1-4 に示す。切削速度を 1m/min, 切込みを 10 μ m, 送り を 7.5 μ m/rev とし て外周旋削加工を行った。メガソニッククーラントの振動周波数は 1.6MHz とした。

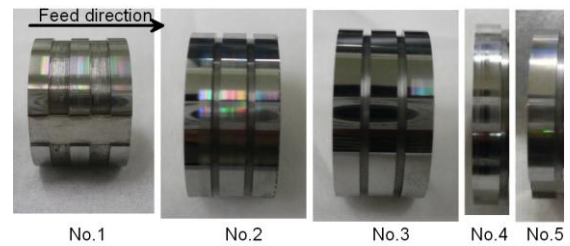


図 12-1-2 被削材の外観写真

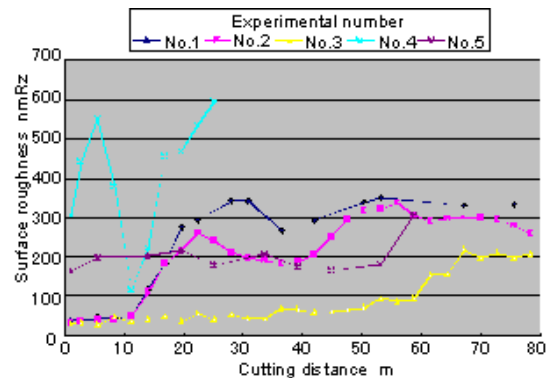


図 12-1-3 切削距離と粗さの関係

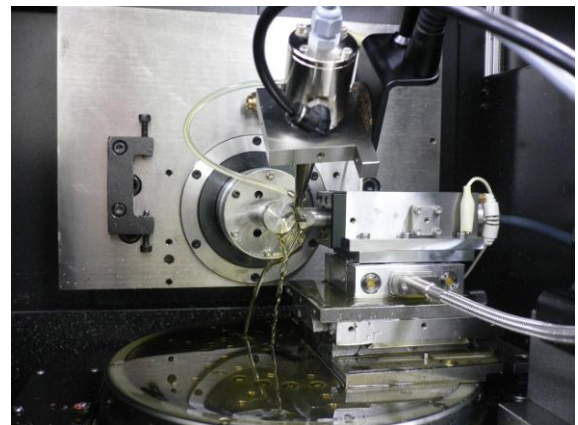


図 12-1-4 実験装置の外観写真

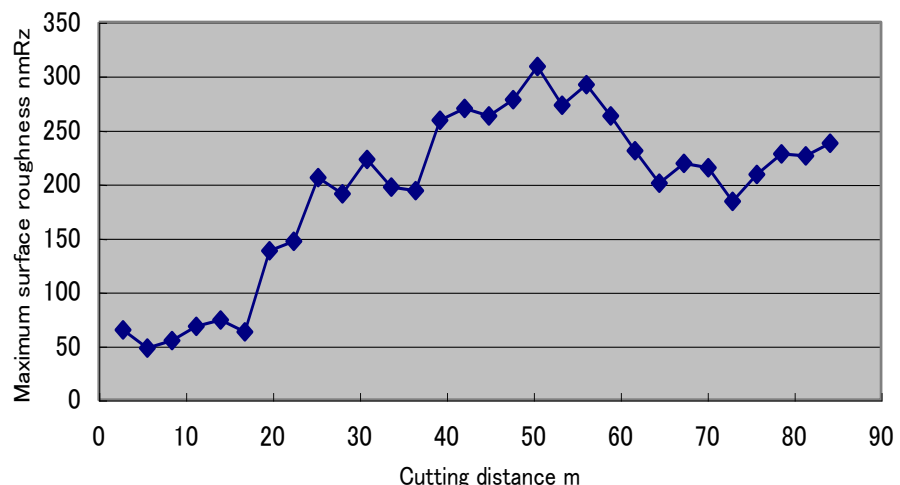


図 12-1-5 累積切削距離と粗さの関係

切削距離と粗さの関係を図 12-1-5 に示す。図から、累積切削距離が 17m を超えると粗さが急激に増大していることがわかる。これは従来の傾向と一致しており、この付近で逃げ面側に損耗が生じてしまったと考えられる。また、加工後の仕上げ面と工具を顕微鏡観察した結果、それぞれの傾向は従来のミストを供給した場合の加工結果とほとんど一致していることを確認した。以上の結果から、本実験条件においてはメガソニッククーラントの供給による工具寿命の延長効果は確認できなかった。

12-3 研究成果

超微粒バインダーレスタングステン合金に対する楕円振動切削技術の開発を行った。主に、工具寿命の改善について検討を行った結果、ダイヤモンド工具の結晶方位を変更し、逃げ面の機械強度を向上することによって従来よりも 3 倍程度工具寿命が延長されることを確認した。一方、工具は先の丸みや、他の単結晶材料（サファイア）の利用、メガソニッククーラントとの併用などについても検討を行ったが、評価を行った範囲では工具寿命延長の効果は確認できなかった。

第13章 プロジェクトの管理・運営

13-1 目的

研究・開発目標を達成するため、プロジェクトの計画を遂行する上で必要な管理・運営を行う

13-2 実施内容および結果

平成20年度は、4回の研究開発委員会を開催し、アドバイザーとして主に川下企業出席のもと活発な議論を行った。

なお、アドバイザーには川下企業を中心に下記の方に委嘱した。

白藤 芳則	日精テクノロジー株式会社 技術顧問
佐伯 優	オリンパス株式会社 研究開発センター生産技術本部先進試作部超精密加工G 課長代理
松尾 真	TOWA株式会社坂東記念研究所マイクロ・ナノセンター 主査
高橋 和宏	TOWA株式会社坂東記念研究所マイクロ・ナノセンター
志水 孝行	東海ゴム工業株式会社商品開発研究所 次席担当員
簗島 涼	東海ゴム工業株式会社商品開発研究所

13-3 結果概要

研究・開発目標を達成するため、プロジェクトの計画を遂行する上で必要な管理・運営を行った。

第14章 事業化の検討

14-1 楕円振動工具の事業化の検討結果

1) ハイパワー楕円振動工具

従来市販している楕円振動切削装置に比べ、少なくとも4倍程度の高剛性化を達成できたことで、従来技術では困難とされていた、より難削性の高い材質の超精密楕円振動切削加工への適用に有効であるとの見通しができた。ここまで開発した技術でほぼ実用化の基礎は完成したと考えているが、事業化のためには量産化での歩留まり向上などの検証を行う必要があると考えているが。

2) 3次元自由曲面用超音波楕円振動工具

3次元自由曲面用超音波楕円振動工具の試作・開発を行い、実際の加工に耐えうる実用的な高出力楕円振動子を開発した。単純な形状の自由曲面加工であれば、現状の装置でも事業化可能と考えられる。ただし、今後量産化ラインに適合させるには、多様な形状に対応できる各種形状のインサート工具を開発しなければならない。さらに、広く利用されるためには、工具を交換した際の位置決め精度の向上を図らなければならない。単純作業で精密にクランプ可能な工具装着方法を今後継続して研究する必要がある。

実際の現場に於いては、微細な部分を剛性の高い工具で切り込みを大きくし精密に仕上げたいと云う

要望が常にあり、市場のニーズに沿った使い勝手の良い装置にするために、今後も継続して研究していく必要があると考えている。

3) 機能表面生成のための高速応答振幅制御装置

今年度、高速振幅制御回路内ローパスフィルター機能の ON-OFF 回路の追加と振幅制御電圧波形観察用出力端子を設ける改造工事を行ったことにより、振幅変調を付与した楕円振動切削加工時に、楕円振動子のリングングによる振幅のオーバーシュート現象と、ローパスフィルターを付与することによるオーバーシュート現象防止条件との相関関係が明らかになり、最適なローパスフィルターの周波数特性や、振幅変調波形の形状とその適切な応用周波数領域などが明らかになりつつある。またこの結果を元に実際に超精密加工を行うと、振幅制御電圧波形に対して忠実に切り込み深さが変化することが確認され、NC 制御との連携によって例えば微細な文字など任意データを高硬度金型鋼などに転写することが可能となった。また、写真データのような濃淡のアナログデータを切り込み深さデータ（楕円振幅データ）に置換するプログラムが名古屋大学で開発されたことによって、高硬度金型鋼などにアナログデータを深さとして精緻に転写する技術が開発された。これらの新技術はすでに完成しており、現在すでに市販されている楕円振動切削装置に搭載し事業化することが可能である。用途開発は今後を待たなければならないが、新しい観点の加工技術でもあり、大きな潜在需要があるものと期待される。

14-2 専用インサート工具の事業化の検討結果

試作、改良した先端角が 60° の単結晶ダイヤモンドバイトと、加工適用範囲の拡大を目的として、先端角度が 30° と鋭角な非球面加工用をはじめ R サイズの大きなチップなどは、非球面レンズや液晶導光盤の金型業界において楕円振動切削の加工可能範囲を広げることができると期待され、楕円振動装置の普及と共に需要が増えると見込まれる。今後、楕円振動切削用超精密ダイヤモンド切削工具として標準化し、平成21年度より順次販売を開始する。

14-3 簡易型低コスト恒温室の事業化の検討結果

今回取り組んだ恒温室の温度制御及び省エネルギー制御技術を同規模の恒温室設計に取り入れ事業化を図る予定である。

14-4 難削材料/複雑微細形状の高精度楕円振動切削技術の事業化の検討結果

例えば、単結晶ダイヤモンドバイトによる、焼入れ鋼の超精密加工に代表されるように、従来では加工が困難、或いは不可能である加工に対しても、実用的な精度を得ることができるのが楕円振動切削の最大のメリットであり、高付加価値加工を求める中小企業にとっては、生産活動の一助となる潜在的な可能性は十分に持ち合わせている。しかしながら、産業界には様々な形状、材質、精度の部品が存在し、それらを加工している工作機械もまた多種多様であるため、現在の楕円振動子で、多くの分野を網羅することは不可能と考える。そのため、事業化への第一歩としては、世の中の中小企業が取り組んでいる現状に対して問題点を把握し、個々の課題に対して装置をカスタマイズできる柔軟性と、工作機械メーカー、工具メーカーと連携をとることが必要不可欠だと考える。

楕円振動加工は超精密加工分野での事業化される可能性十分ある。上記に紹介した精密加工例は市販の超精密加工機でも製作ができるが、楕円振動装置を使うことにより高硬度材の加工の場合、工具の磨耗を少なくできるし、加工時間を短縮することもできる。

レリーフ加工の場合、3次元スキャンを面層データとして使えば、あるサーフェスの再製が出来るようになる。これはリバースエンジニアリングの強力な武器として、製品の開発に十分活躍できると考えられる。具体的に模擬防止、マイクロ流体、光学部品、トライボロジーなどにアプリケーションが多数あると思われる。

実業化の課題として考えられるのは加工機との関係。波状加工やレリーフ加工が加工機の微細な運動能力を使うことにより、加工が可能になった。実際に加工機の運動ではなく、振動子の振幅を制御できれば、超精密加工の依存性が少なくなり、楕円振動加工の導入コストを減少できるであろう。

第15章 全体総括

15-1 成果の総括

本年度も、当初計画の通り、楕円振動装置の高度化（高能率化を実現するための高出力化、自由曲面加工に対応するための多軸化、および機能表面生成のための高速応答制御）、各種形状の専用インサート型工具の試作・開発、低価格型恒温室の評価と制御技術開発、各種加工技術の開発に取り組んだ。それぞれの装置設計および試作・開発を行うとともに、加工技術に関する多くの知見を得るに至っており、順調に本年度の研究を完了した。

15-2 工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況

本年度は、精密工学会秋季大会、砥粒加工学会、第5回切削加工ドリームコンテスト等で対外発表を行った。

なお、「ハイパワー楕円振動工具」「3次元自由曲面用超音波楕円振動工具」「各種形状・材料の専用インサート型工具の試作・開発」「機能表面生成のための高速応答振幅制御装置」の各研究成果は、4月下旬に横浜市にて開催される「レンズ設計製造展」を皮切りに、今後国内で開催される精密加工などに関連する各種展示会において積極的に出展し、PRしていく予定である。さらに名古屋大学協力の下、需要層の要望に応じて「楕円振動切削講習会」を開催し、新技術を織り込んだ楕円振動切削技術を広く啓蒙していく。また、希望する企業などには、設備導入を促進するため積極的に技術指導を行い、希望者には楕円振動切削装置を無償貸し出しするなど、普及活動を行っていく予定である。

15-3 今後の事業化に向けた取組み

振動装置と各種形状の専用工具に関しては、取り組んだ高剛性化、自由曲面对応、高速応答制御、各種工具形状に対する対応手法のすべてについて、すでに実用化に至っている現状の市販装置への搭載を計画している。恒温室については、本成果を、すでに事業化している空調設備の温度制御技術、省エネ技術として取り入れていく予定である。各種加工技術開発については、各種ノウハウや新しいプロセスである楕円振動切削加工について知見を蓄積しており、今後の十分な知識と技術の蓄積を基に事業化を目指す予定である。