

平成 20 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「卓上型（超小型）・超精密リニアステージを利用した  
超音波振動微細切削加工技術の開発（呼称 USM プロジェクト）」

## 研究開発成果等報告書

平成 21 年 3 月

委託者 関東経済産業局  
委託先 タマティーエルオー株式会社

## 目 次

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第1章 研究開発の概要             |    |
| 1.1 研究開発の背景・目標          | 3  |
| 1.2 研究体制                | 7  |
| 1.3 成果の概要               | 10 |
| 1.4 プロジェクトの管理および連絡窓口    | 11 |
| 第2章 本論                  |    |
| 2.1 超精密・超音波マイクロスピンドルの開発 | 12 |
| 2.2 高性能マイクロ切削工具の開発      | 14 |
| 2.3 オリジナル超精密卓上工作機械の開発   | 16 |
| 2.4 超精密・超音波微細加工技術の評価    | 18 |
| 第3章 全体総括                | 22 |
| 3.1 技術開発成果              |    |
| 3.2 事業化展開               | 22 |
| 3.3 おわりに                | 24 |
|                         | 24 |

## 第1章 研究開発の概要

### 1.1 研究開発の背景・目標

自動車および電気機器分野における高精度部品や金型加工の分野では、近年単なる微細、高精度および高能率加工のみならず、精密工作機械、切削工具あるいは加工プログラムなどの最先端の加工技術を駆使しただけでは、容易に実現することができない高度な加工要求がある。すなわち、図1-1に示すような微細で高アスペクト比の形状、溝あるいは穴加工の必要がある。これらの加工には原理的に小径で細長の工具を使用しなければならないという原理的な問題のため、前述の最先端加工技術のみではこれらの要求に答えることが出来ない。

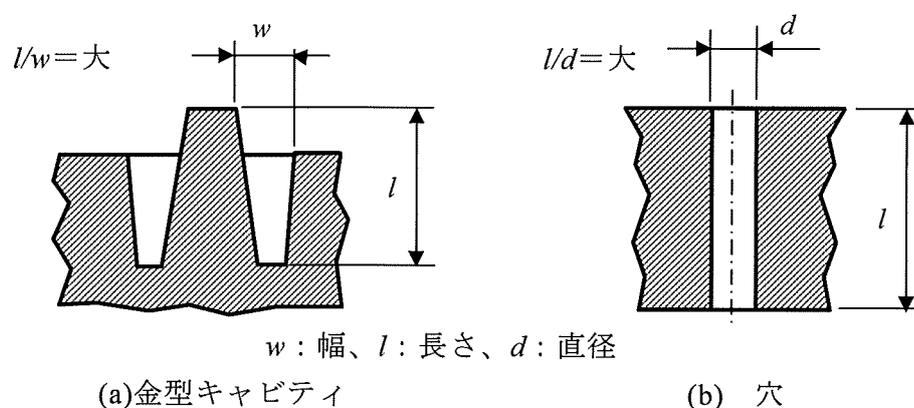


図1-1 微細高アスペクト比加工

具体的な製品イメージを図1-2に示す。

図(a)は、微細で高アスペクト比の精密金型のキャビティ加工を示す。

図(b)は超高压噴射圧力に対応するディーゼルエンジンインジェクタの高アスペクト比工具によるシリンダ内面研削加工を示す。

図(c)は、Si ウエハー、ガラスあるいは高硬度セラミックス製の半導体マスクング部品への多数の微細深穴加工を示す。

図(d)は、燃料電池セパレータ用のプレス金型の微細パターン加工や電子部品深絞り金型の異形状ダイ加工を示す。

これらの部材の精密加工では、使用する工具がそれらの溝幅や穴径に入るように小径で高アスペクト比のエンドミルや研削工具を使用する必要があり、切削や研削抵抗に対する工具の剛性が不足して、工具のたわみやびびり振動が顕著に現れ、現状の加工方式を踏襲しただけでは、高度な機械加工が実現できない。

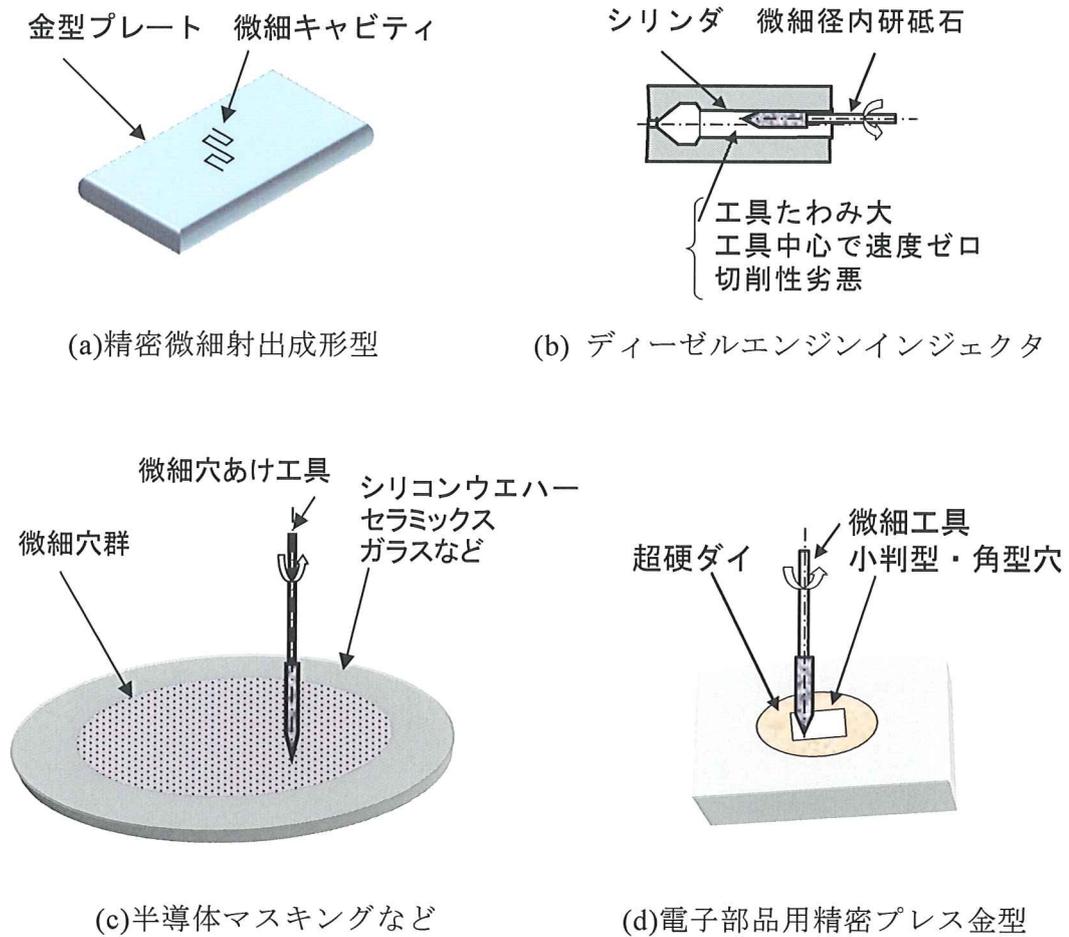


図1-2 微細高アスペクト加工を要求される製品および加工イメージ

このような背景から本委託事業は、超音波振動加工技術を利用して微細で高アスペクト比のエンドミルや研削工具による微細、高精度および高能率加工技術を開発を目的にした。

超音波振動切削（研削の場合も原理は同じ）は、図1-3に示すように、工具や工作物に超音波振動を付加しながら研削する方法である。

研削速度  $v$  を振動速度に対して低くする ( $v < 2\pi af$ ) ことにより、超音波領域の断続研削機構となり、切削研削特性向上効果が得られることが、いくつか報告されている。

微細高アスペクト比のエンドミルや研削工具による微細、高精度および高能率加工に有効であると考えられる理由を以下に示す。

- 1) 図1-4 (b) に示すように研削抵抗がパルス状になり、平均研削抵抗が低減する結果工具のたわみが防止され、図1-5に示すように加工精度が向上する。
- 2) 図1-6に示すように、衝撃的研削抵抗により、セラミックス、ガラスあるいは超硬などの硬脆材料の研削能率が向上する。

$f$ : 振動数  
 $a_c$ : 切削方向振幅  
 $a_t$ : 背分力方向振幅  
 $a_f$ : 送り分力方向振幅  
 $v$ : 切削速度

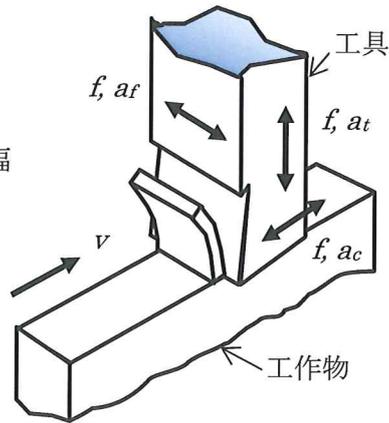


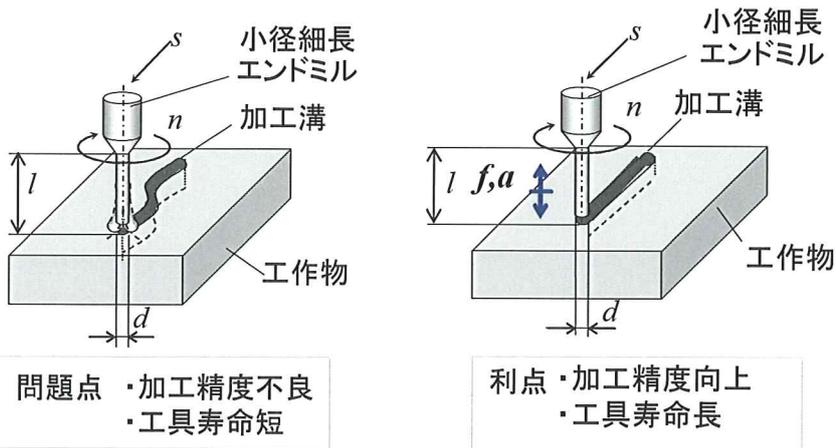
図1-3 超音波振動研削法



(a) 慣用切削 (研削)

(b) 超音波振動切削 (研削)

図1-4 パルス状研削抵抗



$n$ : 回転数、 $d$ : 工具径、 $l$ : 工具長、 $s$ : 送り、 $f$ : 周波数、 $a$ : 振幅

(a) 従来の加工

(b) 超音波振動切削加工

図1-5 小径高アスペクト比工具による溝加工のイメージ

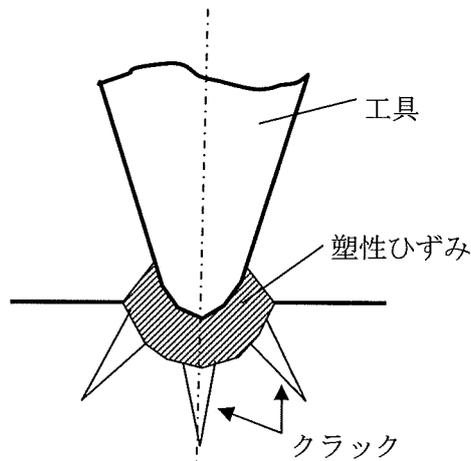


図 1-6 衝撃的研削抵抗による硬脆材料の微小破砕

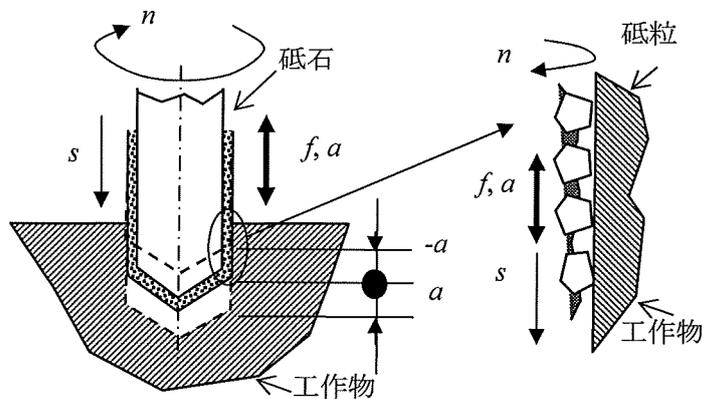


図 1-7 超音波振動研削による磨き効果

- 3) 超音波振動の加速度により、切りくず排出性が向上し、工具の目詰まりを低減する。
- 4) 研削液を利用した加工では、液に超音波振動が付加されることにより、洗浄効果が向上する。
- 5) 超音波振動は砥石にも作用し、砥粒が適度に脱落する効果により研削能率や加工精度が向上する。
- 6) 図 1-7 に示すように、工具の回転の動きに対し、振動の動きが重畳されるため、研削面の磨きの効果が得られる。

一方、デメリットとしては、以下のものが考えられ、実用化にはこれらを補う工夫が必要になる。

イ) 切削効率が向上する分、工具への負荷も強くなるため、最適工具の選定や工具コストの検討が必要である。

ロ) 工具や工作物に超音波振動を付加するために専用設計された特殊な装置を用いる必要があり、装置や管理コストが大きくなる。

## 1. 2 研究体制

最終目的を実現するために、以下の3つのコアおよびサブテーマを設定し、各テーマはそれぞれの技術に精通した担当者により開発を行なうこととした。

### ①超精密・超音波マイクロスピンドルの開発（コアテーマ1）

担当：日本工業大学、(株) industria

### ②高性能マイクロ切削工具の開発（サブテーマ1）

担当：(株) 日進工具

### ③オリジナル超精密卓上工作機械の開発（サブテーマ2）

担当：(株) industria

最終的には、開発した①～③の工作機械と工具とを用いて技術開発の最終目標である高アスペクト比工具による微細、高精度および高能率加工を実現するために、技術開発目標として、次のように掲げた。

### ④開発技術を総合した、わが国独自の超精密・微細切削技術の実現（コアテーマ2）

技術開発の実施体制を図1-8に示す。コアテーマ1を中心に、2つのサブテーマの技術開発を行い、それらの統合により、最終的なコアテーマ2の目標を達成する体制とした。①～③の各コアおよびサブテーマおよび④の最終目標コアテーマを確実に遂行するために、内面研削加工技術と工作機械の制御に精通した2名に技術および川下アドバイザーをお願いした。

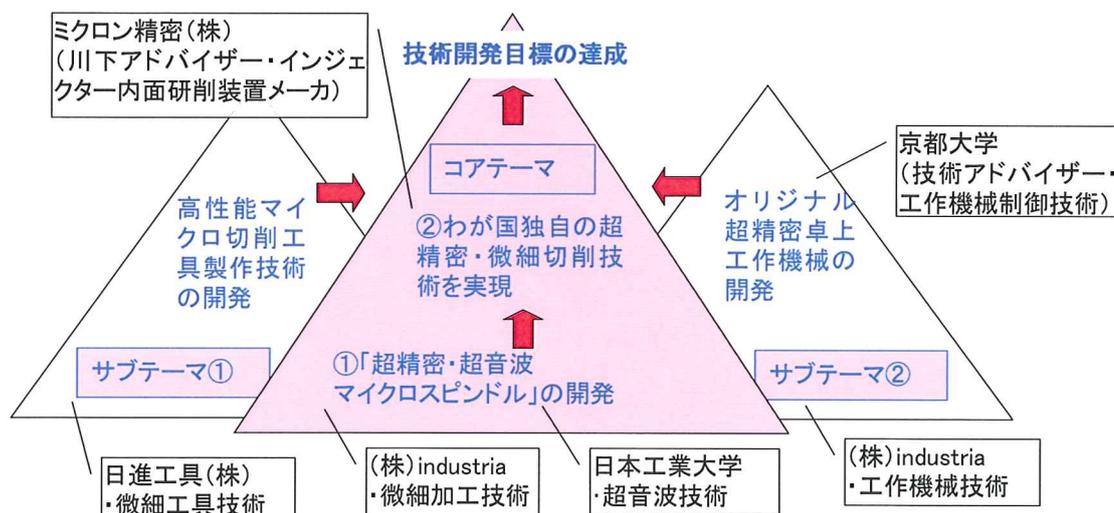
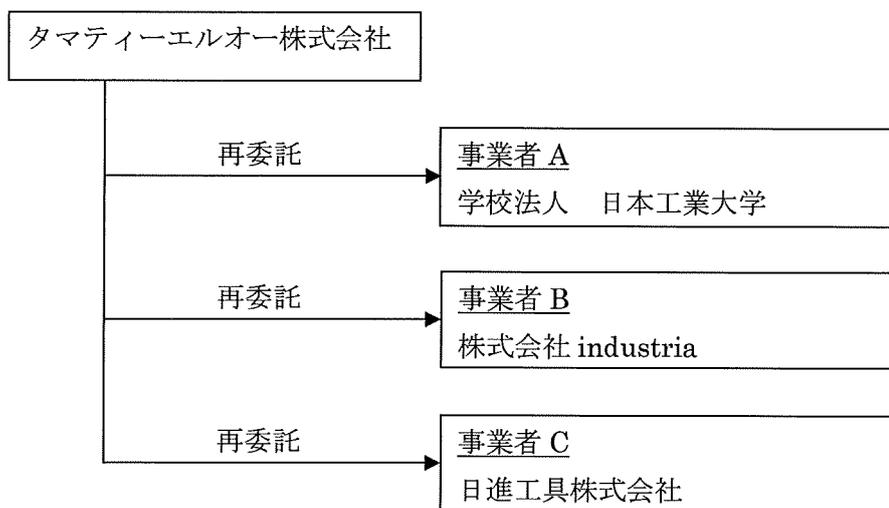


図1-8 研究テーマ構成および実施体制のイメージ

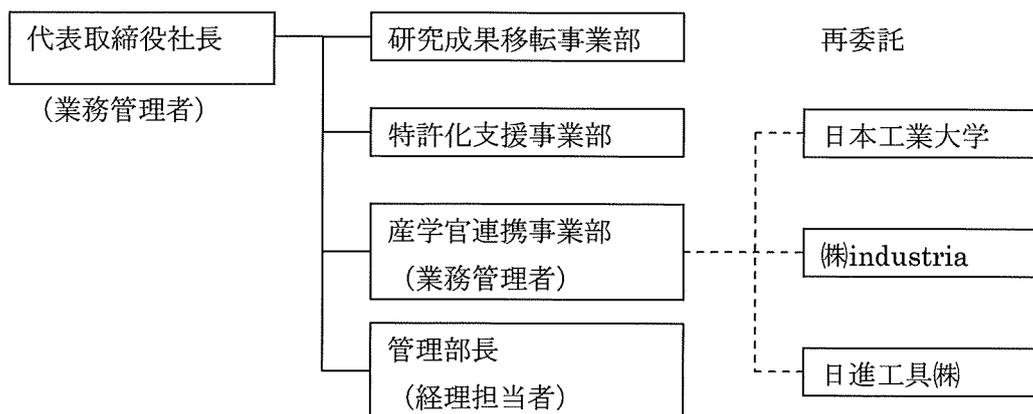
具体的な研究組織および管理体制を以下に示す。



総括研究代表者 (PL)  
学校法人 日本工業大学  
工学部機械工学科・准教授・神 雅彦

副総括研究代表者 (SL)  
株式会社 industria  
技術開発グループ・金井秀生

タマティールエルオー(株)内管理組織



管理員・研究者氏名

(1) 事業管理者 タマティーエルオー株式会社

| 氏名   | 所属・役職         | 実施内容     |
|------|---------------|----------|
| 井深 丹 | 代表取締役社長       | ⑤ 労務費対象外 |
| 山県道昭 | 産学官連携事業部長     | ⑤ 労務費対象外 |
| 晝馬俊治 | 産学官連携事業部調査専門員 | ⑤        |
| 平尾志乃 | 産学官連携事業部      | ⑤        |

(2) 再委託先 学校法人日本工業大学

| 氏名   | 所属・役職      | 実施内容        |
|------|------------|-------------|
| 神 雅彦 | 機械工学科准教授   | PL①④ 労務費対象外 |
| 小玉 満 | 機械工学科特別研究員 | ① 労務費対象外    |

(3) 株式会社 industria

| 氏名   | 所属・役職   | 実施内容       |
|------|---------|------------|
| 高橋一彰 | 代表取締役社長 | ①③④ 労務費対象外 |
| 永井孝明 | 技術部長    | ③④         |
| 植松 猛 | 技術顧問    | ③④         |
| 高橋良次 | 技術センター長 | ①③④        |
| 金井秀生 | 開発グループ  | SL①③④      |
| 中村順一 | 取締役工場長  | ①④         |
| 須藤 稔 | 製造部部长   | ③④         |
| 柳楽幸規 | 品質管理部長  | ③④         |

(4) 日進工具株式会社

| 氏名    | 所属・役職     | 実施内容 |
|-------|-----------|------|
| 後藤隆司  | 常務取締役     | ②    |
| 渡辺健志  | 研究開発チーム主任 | ②    |
| 小日向 工 | 研究開発チーム   | ②④   |

\* 実施内容欄の番号は次の開発項目を示す。

- ①：超精密・超音波マイクロスピンドルの開発
- ②：高性能マイクロ切削工具の開発
- ③：オリジナル超精密卓上工作機械の開発
- ④：超精密・超音波微細加工技術の評価
- ⑤：プロジェクトの運営・管理

### 1. 3 成果概要

#### ①超精密・超音波マイクロスピンドルの開発（コアテーマ1）

玉軸受型超音波マイクロスピンドルに関しては、本プロジェクト開始前に独自に進めて開発したプロトタイプモデルから、実用化のための問題点を抽出し、スピンドルの試作および評価のサイクルを繰り返し開発モデル UBS8 から UBS12 の 5 世代の開発により、平成 21 年度から販売することが可能な、当初の目標を超える実用型の超音波スピンドルを開発することができた。一方、空気静圧軸受型・超精密超音波マイクロスピンドルに関しては、超音波振動する主軸を圧縮空気で浮上させ、さらに振動駆動電力を非接触で送電するというチャレンジングな開発テーマであるが、空気静圧軸受、軸受駆動用タービンおよび非接触給電機構などの要素の開発からスタートし、この評価結果に基づき改良を加え、最初に開発した評価用モデル（開発 No. UAS1）をベースに、当初目標値を達成するプロトタイプモデル（開発 No. UAS2）の開発にほぼ成功し、最終技術開発目標を達成した。

#### ②高性能マイクロ切削工具の開発（サブテーマ1）

超硬マイクロエンドミルに関しては、工具研削機械、研削砥石および研削プログラムの検討と試作および評価のサイクルを数回繰り返しながら検討を行った結果、cBN マイクロボールエンドミルに関しては、 $\phi 0.03\text{mm}$  (R0.015mm)、L/D=5 の高アスペクト比工具を製作することができた。また cBN マイクロスクエアエンドミルに関しては、 $\phi 0.03\text{mm}$ 、L/D=5 の高アスペクト比工具を製作することができた。

#### ③オリジナル超精密卓上工作機械の開発（サブテーマ2）

第1段階の卓上型ステージ（高島産業製マルチプロをベースに高精度化）は、鋳物フレームや精密スケールの組込みおよび調整などの高精度化対策がなされ、ステップ位置決め精度測定において、位置決め精度 100~200nm 以内を達成した。

最終段階のリニアモータ駆動の卓上型ステージに関しては、X~Z 各軸の要素の開発と組立て、総合精度調整、および工作機械の振動抑制のための対策を行ない、工作機械サイズは、突起部を除いてほぼ目標値の  $1\text{m}^3$  以内に収めることができ、動作精度は、ステップ位置決め精度測定において、位置決め精度 50nm 以内を達成した。工作機械コストに関しては、今後さらに検討する余地を残した。

#### ④開発技術を総合した、わが国独自の超精密・微細切削技術の実現（コアテーマ2）

加工技術の開発のための切削評価は、本プロジェクトで開発した玉軸受型超音波スピンドル UBS10~UBS12 を用いて実施した。工作機械には、日本工業大学所有の小型マシニングセンタ（東芝機械製オリジナル機）、日進工具（株）所有の精密マシニングセンタ（東芝機械製 F-MACHA 改良機）などの各種の市販工作機械、および本プロジェクトで開発した第一段階卓上ステージおよび最終段階卓上ステージを用いた。被削材には、金型などの金属材料として、プリハードン鋼、焼入鋼、あるいはステンレス鋼を用いた。高硬度脆性材料としては、パイレックスガラス、各種セラミックスおよび

超硬合金を用いた。また工具には、各種の市販高アスペクト比ボールエンドミルおよび軸付砥石、および本プロジェクトで開発した微細高アスペクト比超硬およびcBNエンドミルを用いた。評価は以下の加工について行い、いずれも超音波振動切削の効果を確認できた。

- (a) 金型などの高アスペクト比形状および溝加工
- (b) 高アスペクト比マイクロエンドミルによる金型の微細溝加工
- (c) インジェクタノズルなどの高アスペクト比内面研削加工
- (d) 金型などへの高アスペクト比穴あけ加工

#### 1. 4 研究開発の連絡窓口

本プロジェクトに関連した問合せに対応する窓口は次の通り。

##### 1) プロジェクト全体の運営に関する事項

タマティーエールオー(株)羽村オフィス (TEL:042-570-7240 FAX:042-570-7240)  
産学官連携事業部 山県通明 (yamagata@tama-tlo.com)

##### 2) 超精密・超音波マイクロスピンドルに関する事項

(株) i n d u s t r i a (TEL:04-2934-6921 FAX:04-2934-6962)  
マーケティングセンター 金井秀生 (sales@industria.co.jp)

##### 3) 高性能マイクロ切削工具

日進工具(株) (TEL:022-347-0567 FAX:022-344-3344)  
開発グループ研究開発チーム 渡辺健志 (ns249@ns-tool.com)

##### 4) 超精密卓上工作機械に関する事項

(株) i n d u s t r i a (TEL:04-2934-6921 FAX:04-2934-6962)  
マーケティングセンター 金井秀生 (sales@industria.co.jp)

##### 5) 超精密・微細切削技術に関する事項

日本工業大学機械工学科 (TEL:0480-33-7614 FAX:0480-33-7645)  
准教授 博士 神 雅彦 (jin@nit.ac.jp)

## 第2章 本論

### 2. 1 超精密・超音波マイクロスピンドルの開発

#### 2. 1. 1 開発方針

申請者（PL）の特許技術およびこれまで研究してきた技術に立脚して、微細・高精度エンドミルおよび研削加工に適用可能な新しい超精密・超音波マイクロスピンドルを開発することを目標に、具体的には以下の2項目に分けて実施。

##### (a) 玉軸受型超音波マイクロスピンドルの開発

特許やこれまでの研究による技術を具体化して、有効性を証明するために開発する。これは実用的には低価格で高剛性の超音波スピンドルとして利用する予定である。

構造の特徴は、ビルトインタイプ振動子を備えた1重構造の主軸とすることで小型化を達成し、支持は玉軸受、チャックは焼きばめチャック、給電はブラシ方式とする。目標とする基本仕様は、スピンドルサイズを現行の1/2へ小型化、主軸回転数 $10,000\text{min}^{-1}$ の達成、主軸振れ $3\mu\text{m}$ 以内の達成である。

開発はプロジェクト開始前に製作したプロトタイプ機を基本にして、これまでに見つかった課題に検討を加える形で進めた。具体的な技術開発項目は、(1)主軸構造の見直しによる振動効率の向上と安定化、(2)ベアリング支持構造の最適化による振動効率と回転能力の向上、(3)チャック把持強度および振幅の向上、および(4)実用的モデルの完成とした。

##### (b) 空気軸受型超精密超音波マイクロスピンドルの開発

空気軸受型超精密超音波マイクロスピンドルはスピンドル技術開発の最終版であり、項目(a)で開発した主軸構造を基盤とした空気静圧軸受主軸を開発し、空気静圧軸受と非接触給電方式による超高速、高精度な超音波マイクロスピンドルを開発することであり、具体的技術目標値は、主軸回転数 $50,000\text{min}^{-1}$ の達成、主軸振れ $1\mu\text{m}$ 以内の達成とした。技術開発項目としては、(1)空気静圧軸受の剛性と精度向上、(2)スピンドル駆動用タービンの性能向上、(3)圧電セラミックスへの非接触給電の効率化、および(4)目標性能を満足するプロトタイプの完成とした。

#### 2. 1. 2 開発成果

それぞれの技術開発における具体的成果を以下に示す。

##### (a) 玉軸受型超音波マイクロスピンドルの開発

最終開発スピンドルの外観を図2-1に示す。このスピンドルは、外径：52mm、長さ：280mm および重量：1.5kg であり、従来型の市販超音波スピンドルと比較して1/2以下という大幅な小型化および軽量化を達成した。最大主軸回転数は、 $30,000\text{min}^{-1}$ 、超音波振動数は41kHz であり、振幅は $3\mu\text{m}$  (0-p)、焼きばめチャック部の振れ精度は $3\mu\text{m}$  以内となり、従来の市販スピンドルに比べ、3倍以上の高速および高精度化を達成した。

主な実施内容は、次のとおり

(1) 主軸の製作工程の精査と見直し

(2) ベアリング支持構造の最適化

これにより、圧電素子の特性の劣化を最低限に抑えるとともに、振動効率も実用化に十分耐えられるレベルまで向上させることが出来た。

(3) チャック把持強度の向上

焼きばめチャックと工具との焼きばめ代の最適化を図り、当初時々発生していた振動不具合の現象を皆無にすることができた。さらに把持精度を向上させて、スピンドル振れ精度  $3\mu$  以内を達成した。

(4) 振幅の向上

焼きばめチャックを数タイプ設計製作して振幅の拡大を図ったが、最終的に 1.5 倍程度の振幅向上にとどまった。高振幅タイプのチャック開発に関しては今後も継続して検討していく必要がある。

(b) 空気静圧軸受型・超精密超音波マイクロスピンドルの開発

試作した空気静圧軸受型・超精密超音波マイクロスピンドルの外観を図 2-2 に示す。空気静圧軸受型の超音波主軸は、回転駆動力を得るタービン部、ビルトイン型振動素子、受電側トランスおよび焼きばめチャックを有する。

主軸性能および振動性能を阻害することなく、それらの機能を搭載したスピンドルプロトタイプを設計試作し、振動性能、受電性能、回転駆動性能および軸受性能を評価し、主軸の振動振幅  $2\mu\text{m}$  以上、主軸回転数  $40,000\text{min}^{-1}$  以上、および主軸振れ  $1\mu\text{m}$  以内を達成するプロトタイプを開発することができた。



図 2-1 実用型の玉軸受型超音波マイクロスピンドル UBS11 の外観

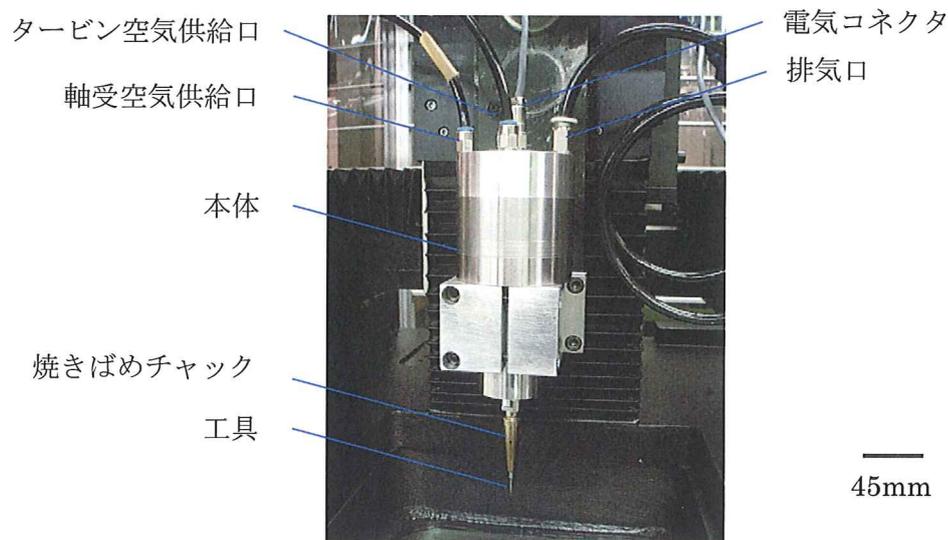


図 2-2 空気静圧軸受型・超精密超音波マイクロスピンドルプロトタイプの外観

## 2. 2 高性能マイクロ切削工具の開発

### 2. 2. 1 開発方針

工具研削機械、研削砥石および研削プログラムの最適化により、現行レベルの微細超硬および cBN マイクロエンドミルに比べて、直径がおおよそ 1/2 以下で、高アスペクト比を有し、かつ良好な刃先の工具を開発する。さらに、超音波振動エンドミル加工に適した刃形形状をも開発する。具体的目標を(a)~(c)に個別に述べる。

#### (a) 超硬マイクロエンドミル

現状レベルの直径（スクエアエンドミル：0.01mm、ボールエンドミル：0.04mm）から、さらに小径で、高アスペクト比を有し、かつ良好な刃形形状を有する工具を開発する。

#### (b) cBN マイクロエンドミルの開発

現状レベルの直径（スクエアエンドミル：0.03mm、ボールエンドミル：0.1mm）から、さらに小径で、高アスペクト比を有し、かつ良好な刃形形状を有する工具を開発する。

#### (c) 超音波エンドミル加工に適した刃形形状の開発

超音波エンドミル加工の特徴である、微細高周波断続切削において、加工精度や工具寿命を保証する、超音波エンドミル加工に適した刃形形状を開発する。

### 2. 2. 2 開発成果

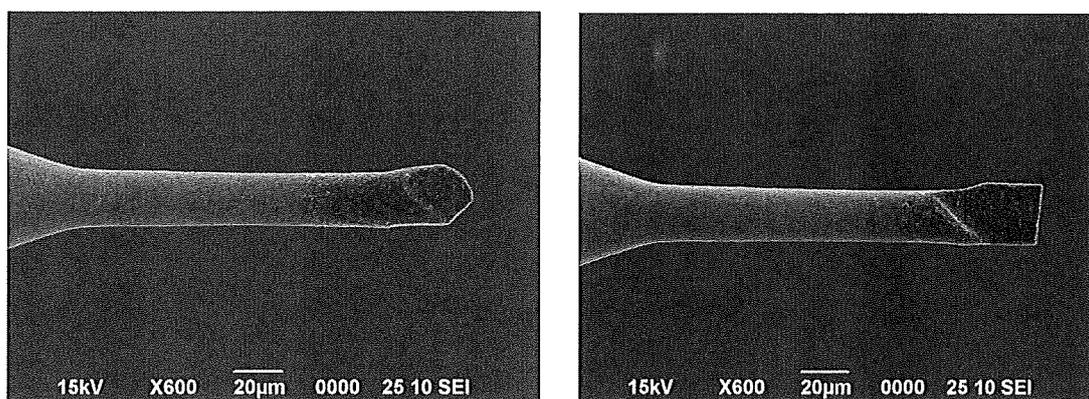
超硬マイクロエンドミルに関しては、工具研削機械、研削砥石および研削プログラムの検討と試作および評価のサイクルを数回繰り返しながら検討を行った。その結果、

- (1) cBN マイクロボールエンドミルに関しては、図 2-3(a)に示すように、 $\phi 0.03\text{mm}$  (R0.015mm)、L/D=5 の高アスペクト比工具を製作することができた。
- (2) cBN マイクロスクエアエンドミルに関しては、図 2-3(b)に示すように、 $\phi 0.03\text{mm}$ 、

L/D=5 の高アスペクト比工具を製作することができた。

次に、それぞれのマイクロエンドミルにおいて、超音波エンドミル加工を行った場合の基本的切削特性に関して評価した結果、

- (1) 高アスペクト比 cBN マイクロエンドミルを用いた切削実験で、超音波切削の有効性を明らかにした。
- (2) 高アスペクト比 cBN マイクロボールエンドミル R0.015mm を用いた超音波ミリング実験で、斜刃形状が有効であることを明らかにした。
- (3) 高アスペクト比 cBN マイクロスクエアエンドミル  $\phi 0.03\text{mm}$  を用いた超音波ミリング実験で、直刃形状が有効であることを明らかにした。
- (4) 高性能チャックを用いて、動バランス修正を行うことにより、マイクロ工具利用時の切削性が向上することを明らかにした。



(a) cBN 1 枚刃ボールエンドミル  
(工具直径 0.03mm、アスペクト比 5)

(b) cBN 1 枚刃スクエアエンドミル  
(工具直径 0.03mm、アスペクト比 5)

図 2-3 高アスペクト比 cBN マイクロエンドミル最終開発品

## 2. 3 オリジナル超精密卓上工作機械の開発

### 2. 3. 1 開発方針

現状の超精密工作機械に対して、卓上型、超精密、省エネルギーおよび低コストの普及型の高精密工作機械を開発する。具体的目標は(a)、(b)の2項目である。

#### (a) サーボモータ駆動および精密スケールによる高精度卓上ステージの開発

第1段階として市販のサーボモータ駆動型小型3軸ステージに、精密スケール取付けやフレームの強化をすることにより高精度卓上ステージを開発し、超音波マイクロスピンドルと組合せて加工性能の検証を行なう。

#### (b) 摩擦なしサーボ・リニアモータ駆動による卓上ステージの開発

位置決め精度 10nm~1nm を達成できる最終段階の小型3軸ステージを開発する。

開発は X~Z 各軸の要素開発からスタートし、この組立てと総合精度調整を行なって目標値を達成するリニアステージのプロトタイプを完成させる。具体的には、(1) スライダと案内部の構造の開発と改良、(2) 総合組立、(3) リニアモータおよび CNC 制御の詳細なチューニングによる精度向上、(4) 全体設計とプロトタイプの完成である。

### 2. 3. 2 開発成果

#### (a) サーボモータ駆動および精密スケールによる高精度卓上ステージの開発

第1段階の卓上型ステージの最終開発品の主な仕様は次のとおりである。

工作機械サイズ：W480×D570×H730mm

加工範囲：X200×Y100×Z100mm

フルストローク繰り返し位置決め精度：X軸±190nm、Y軸±220nm、Z軸 ±210nm、  
ステップ位置決め精度：ほぼ 200nm 以内

技術開発項目①で開発した機械重量が 1.5kg の玉軸受型超音波スピンドルを Z 軸に搭載した状態で、この動作精度が保障されることが確認出来、小型超音波スピンドルが卓上型ステージでも利用出来、その有効性を示すことができた。

#### (b) 摩擦なしサーボ・リニアモータ駆動による卓上ステージの開発設計

最終段階の卓上型ステージの開発品を図 2-4 に示す。この工作機械の仕様は次のとおりである。

工作機械サイズ：W1000×D1000×H1000mm (リニアモータなどの突起部を除く)

加工範囲：X200×Y200×Z100mm

CNC 制御ユニット最小制御単位：1nm

位置検出スケール分解能：1nm

工作機械のコストは目標値に比べてやや高い試算であり、今後の検討課題となった。

ステージの動作精度に関しては、各軸の構造の検討、CNC 制御装置のゲイン調整、および除振と制振の対策を施したことにより、最終的に、動作精度は、図 2-5 に示すように、ステップ位置決め精度の測定において、各軸ともに 10~100nm 以内を達成することができた。

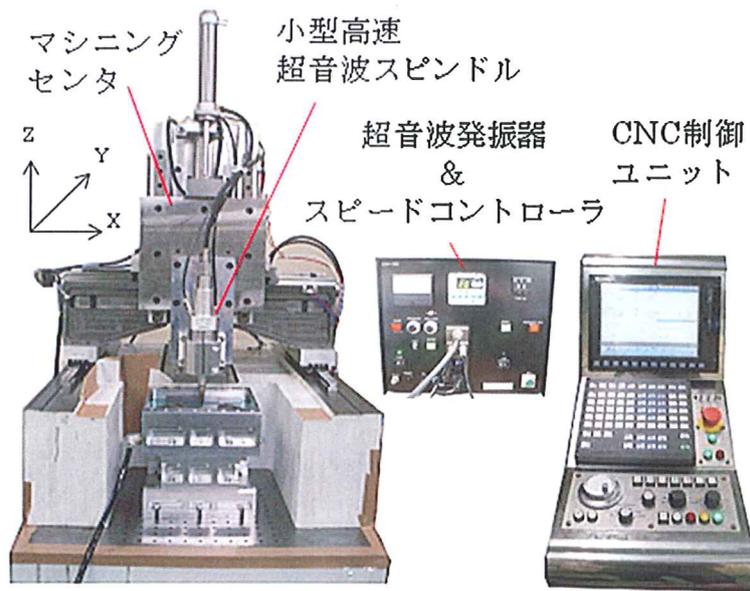


図 2-4 最終段階のリニアモータ駆動型卓上ステージのプロトタイプ外観

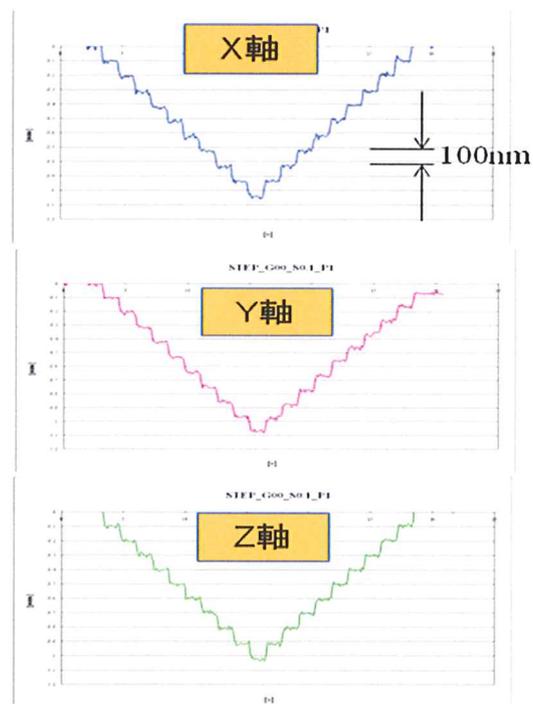


図 2-5 ステップ位置決め精度の測定結果

## 2. 4 超精密・微細切削技術の開発

### 2. 4. 1 開発方針

コアおよびサブテーマの工作機械および工具技術を用いて、従来技術では実現できない高アスペクト比工具による超音波振動切削技術を確立し、わが国独自の超精密・微細加工技術を実現するために次の加工技術を開発する。

(a)剛性の低い高アスペクト比微細工具による高精度・微細・高能率切削および研削加工技術

(b)半導体用としてセラミックスなどの高脆材に対する微細・高精度および高能率研削加工技術

(c)微細形状金型などの超硬部材に対する微細・高精度および高能率研削加工技術

### 2. 4. 2 開発成果

各種の加工実験結果の概要を以下に述べる。

(a) 金型などの高アスペクト比形状および溝加工

工具直径 0.1mm、有効長 3mm（アスペクト比 15）の超硬ボールエンドミルを用いて文字の加工を実施した結果を図 2-6 に示す。慣用エンドミル加工の場合では、工具がたわみ、文字形状が大きくゆがんでいる。それに対して、超音波エンドミル加工の場合では、工具軌道に変化がなく、正確な文字形状溝が加工できた。最終的に、最大有効長 3mm までの幅狭深溝加工を実現した。

| 加工深さ $d$          | 慣用エンドミル加工   | 超音波エンドミル加工   |
|-------------------|---|--|
| $d:0.02\text{mm}$ |  |  |
| $d:0.10\text{mm}$ |  |  |
| $d:3.0\text{mm}$  | 工具折損により到達不能   |  |



図 2-6 文字形状溝加工結果

(NAK55,  $n=20,000\text{min}^{-1}$ ,  $R=0.1\text{mm}$ ,  $l=3\text{mm}$ ,  $L/D=15$ ,  $v=12.6\text{m/min}$ ,  $F=200\text{mm/min}$ ,  $d_z=0.005\text{mm}$ )

(b) 高アスペクト比マイクロエンドミルによる金型の微細溝加工

本プロジェクトで開発した刃径 $\phi 0.03\text{mm}$ の高アスペクト比 cBN 微細径工具を用い、微細溝加工実験を実施した。溝の加工結果を図 2-7 に示す。慣用エンドミル加工においては、切削初期の加工深さ  $0.001\text{mm}$  で工具が折損した。すなわち、高アスペクト比加工には対応できていない。それに対して、超音波振動エンドミル加工の場合では、最終加工深さの  $0.021\text{mm}$  まで加工を終えることができた。加工後の状態においても、切削バリは極小であり、直線部および円弧部の輪郭も良好であった。すなわち、通常の加工法では加工が困難な微細高アスペクト比溝加工に対して、超音波振動エンドミル加工が極めて有効であることを証明することができた。

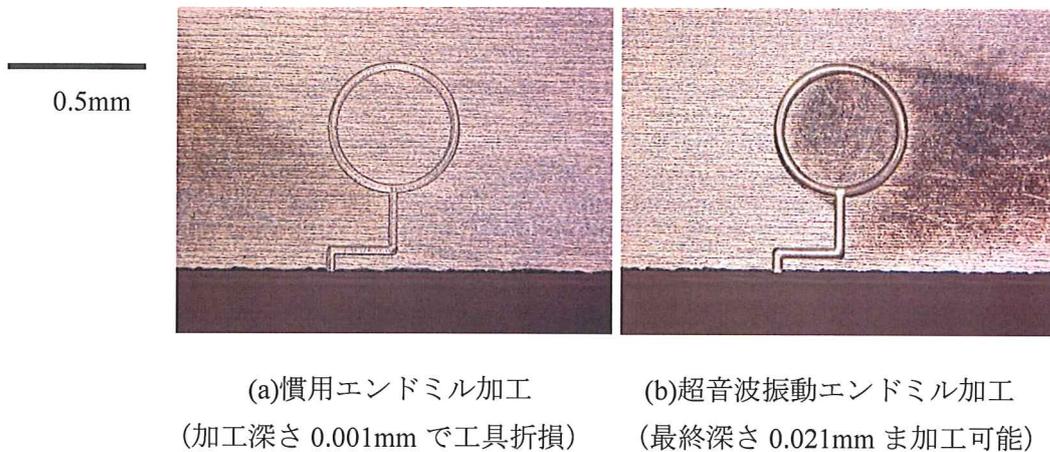


図 2-7 幅  $0.03\text{mm}$  の溝加工実験結果

(被削材：STAVAX (52HRC)、加工深さ： $0.021\text{mm}$ 、 $n$ ： $20,000\text{min}^{-1}$ 、 $f$ ： $5\text{mm/min}$ 、 $A_d$ ： $0.3\mu\text{m}$ 、 $fa$ ： $40\text{kHz}$ 、 $a$ ： $0.002\text{mm}$ )

(c)インジェクタノズルなどの高アスペクト比内面研削加工

特殊鋼 SCM435 の焼入材に対して、アスペクト比 7.4 の cBN 小径軸付砥石 (#325) を用いて、直径  $\phi 4\text{mm}$  の内面研削加工を実施した。加工状況と加工精度とを測定した結果を図 2-8 に示す。特に、真直度において超音波振動研削の効果が顕著に表れていることがわかる。すなわち、超音波振動による工具のたわみが抑制されたためであると考えられる。

(d) 金型などへの高アスペクト比穴あけ加工

ステンレス鋼 SUS440C に対して、直径  $\phi 0.05\text{mm}$  および有効長  $0.5\text{mm}$  (アスペクト比 10) の超硬ドリルを用いて、高アスペクト比穴あけ加工を実施した。加工穴の SEM 写真を図 2-9 に示す。慣用穴あけでは、10 穴加工時点でドリルが折損し加工不能となった。それに対して、超音波振動ドリル加工の場合では、総実験数の 300 穴の加工が完了した。すなわち、超音波振動により、工具の変動や切りくず詰まりによる工具折損が抑制されたためであると考えられる。

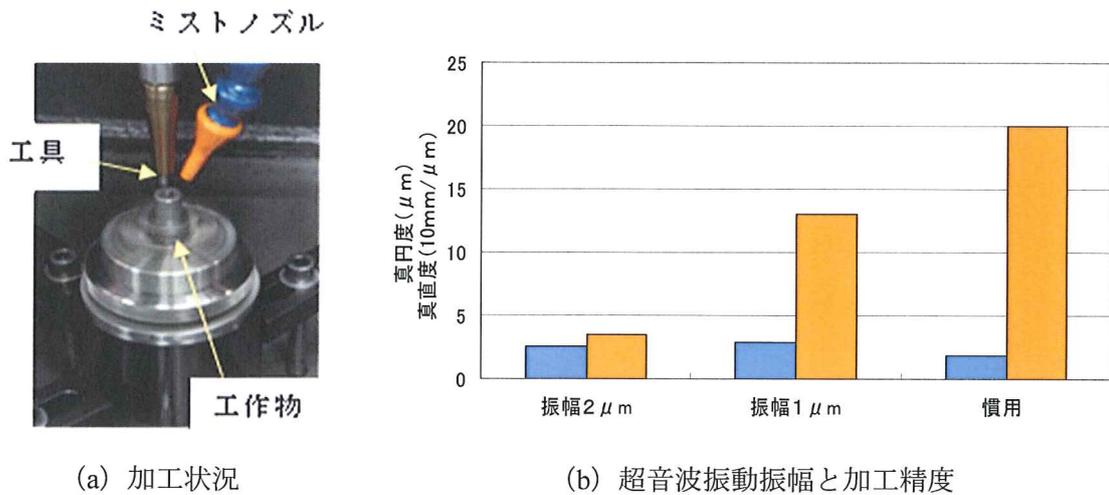


図 2-8 焼入れ鋼の内面研削に関する実験結果

(SCM 4 3 5  $n=20,000\text{min}^{-1}$ ,  $D=1.82\text{mm}$ ,  $l=13.5\text{mm}$ ,  $L/D=7.42$ ,  $F=1000\text{mm}/\text{min}$ ,  $dz=0.01\text{mm}$ ,  $Z=0.03\text{mm}$ , オイルミスト)

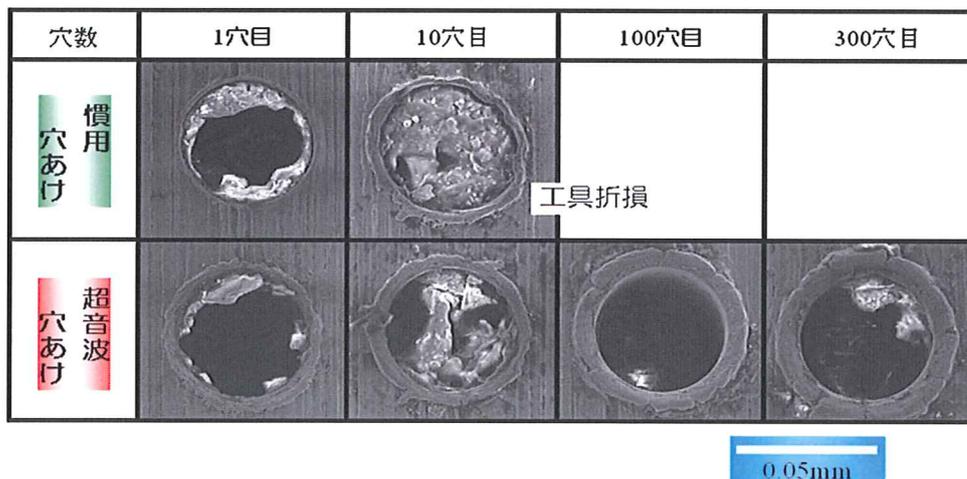


図 2-9 ステンレス鋼への高アスペクト比微細径穴あけ加工結果

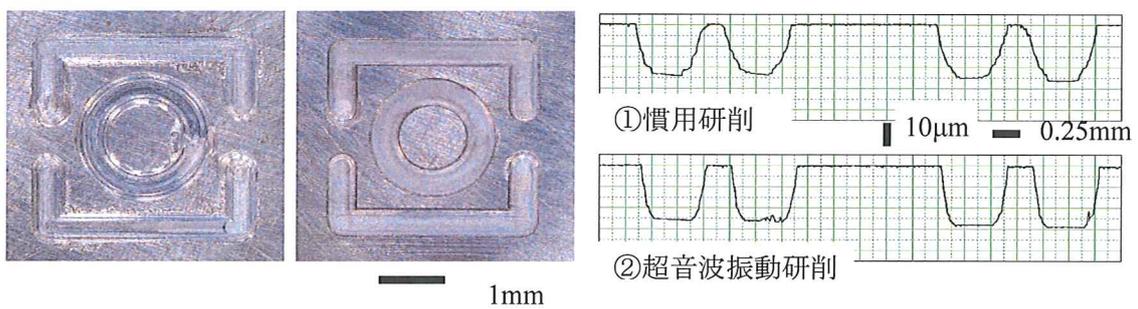
(超硬ドリル,  $D=0.05\text{mm}$ ,  $l=0.5\text{mm}$ , SUS440C,  $n=10,000\text{min}^{-1}$ ,  $v=1.57\text{m}/\text{min}$ ,  $\ell=2.5$ ,  $s=5\text{mm}/\text{min}$ ,  $Z=0.5\text{mm}$ )

(e) ガラス、セラミックスなどの電子部品用硬脆材料への各種加工

パイレックスガラス、およびジルコニアやアルミナなどの各種セラミックスに対して形状加工実験を実施することで、小径高アスペクト比工具による高脆材料の加工精度向上効果の検証を行った結果、超音波振動研削加工により工具のたわみが大きく低減し、加工精度が向上する傾向、あるいは研削面粗さが向上する傾向にあることを明らかにした。

(f) 超合金に対する高アスペクト比形状

超合金 K10 相当材に対して、直径 0.5mm およびアスペクト比 12 のダイヤモンド電着砥石を用いて溝加工実験を実施した。加工した溝の外観を図 2-10 (a) に、断面形状の測定結果を同図 (b) に示す。慣用研削の場合では、工具のたわみの影響により形状が大きく乱れている。それに対して、超音波振動研削の場合では、形状の乱れの無い加工が実現できることがわかった。断面形状を測定した結果では、超音波振動研削では、慣用研削と比較して深く垂直になっている



①慣用研削

②超音波振動研削

(a) 加工溝形状の外観

(b) 溝断面形状

図 2-10 超合金 K10 に対する溝加工結果

(工具径/アスペクト比/粒度=0.5mm/12/#325、K10 相当、 $n=20,000\text{min}^{-1}$ 、 $d_f=5\mu\text{m}$ 、 $d=50\mu\text{m}$ 、 $F=10\text{mm/min}$ 、 $f=41.0\text{kHz}$ 、 $a=2.0\mu\text{m}$ )

### 第3章 全体総括

#### 3.1 技術開発成果

##### (1) 超精密・超音波マイクロスピンドルの開発（コアテーマ1）

超精密・超音波マイクロスピンドルの開発は、第一段階として、玉軸受型スピンドルを、第二段階として、空気静圧軸受型スピンドルを開発した。

玉軸受型超音波スピンドルに関しては、5段階の試作と評価および改良を経て、平成21年度から販売することが可能な、実用型の超音波スピンドルを開発することができた。空気静圧軸受型超音波スピンドルに関しては、超音波振動する主軸を圧縮空気で浮上させ、さらに振動駆動電力を非接触で送電するというチャレンジングな開発テーマであったが、空気静圧軸受、軸受駆動用タービンおよび非接触給電機構などの主要な要素の開発を行い、最終目標値をほぼ達成するプロトタイプモデルの開発に成功した。

##### (2) 高性能マイクロ切削工具の開発（サブテーマ1）

高アスペクト比マイクロエンドミルに関しては、工具研削機械、研削砥石および研削プログラムの検討と試作および評価のサイクルにより、以下のように最終目標値をほぼ達成する成果を得た。

- (a) 超硬マイクロボールエンドミルに関しては、 $\phi 0.02\text{mm}$  (R0.01mm)、 $L/D=5$  の高アスペクト比工具を製作することができ、目標値の  $\phi 0.04\text{mm}$  (R0.02mm)、 $L/D=5$  を超えた。
- (b) 超硬マイクロスクエアエンドミルに関しては、 $\phi 0.02\text{mm}$ 、 $L/D=5$  の高アスペクト比工具を製作することができ、アスペクト比に関して最終目標値を達成した。
- (c) cBN マイクロボールエンドミルに関しては、 $\phi 0.03\text{mm}$  (R0.15mm)、 $L/D=5$  の高アスペクト比工具を製作することができ、目標値の  $\phi 0.1\text{mm}$  (R0.05mm)、 $L/D=5$  をはるかに超えた。
- (d) cBN マイクロスクエアエンドミルに関しては、 $\phi 0.03\text{mm}$ 、 $L/D=5$  の高アスペクト比工具を製作することができ、最終目標値を達成した。

次に、それぞれのマイクロエンドミルにおいて、超音波エンドミル加工を行った場合の基本的切削特性に関して評価した結果、

- (e) 製作した高アスペクト比 cBN マイクロエンドミルを使用した加工実験により、超音波の有効性を確認できた。
- (f) 製作した高アスペクト比 cBN マイクロボールエンドミル  $R15\mu\text{m}$  を使用した加工実験により、斜刃形状が有効であることが確認できた。
- (g) 製作した高アスペクト比 cBN マイクロスクエアエンドミル  $\phi 30\mu\text{m}$  を使用した加工実験により、直刃形状が有効であることが確認できた。
- (h) 高性能チャックを用いて、動バランス修正を行うことにより、マイクロ工具利用時の切削性が向上することを明らかにした。

### (3) オリジナル超精密卓上工作機械の開発 (サブテーマ2)

高精度ながら小型で低コストの工作機械を開発することを目標にした。開発は、第一段階として、市販の卓上型ステージをベース機械にした機械を、第二段階として、すべて自作による超高精度卓上型ステージを製作するステップで実施した。具体的な研究開発成果を以下に記す。

#### (a) 第一段階の卓上型ステージ

市販の卓上工作機械でも一定の精度向上の改造を施すことにより、ステップ位置決め精度100nm程度のもは製作可能であることが確認できた。

また、本プロジェクトで開発した機械重量が1.5kgの玉軸受型超音波スピンドルをZ軸に搭載した試験で、卓上型ステージの前記動作精度が保障され、市販の卓上工作機械でも超音波加工が利用可能であることを実証できた。

#### (b) 第二段階の卓上型ステージ

最終の第二段階の卓上型ステージは、ステージのサイズ、加工範囲、CNC制御ユニットの最小制御単位、位置検出スケールの分解能等の基本性能はほぼ当初の目標をクリアできたが、工作機械のコストに関しては目標値に比べてやや高い試算であり、今後の検討課題となった。

### (4) 開発技術を総合した、わが国独自の超精密・微細切削技術の実現 (コアテーマ2)

本コアテーマでは、開発途中の玉軸受超音波スピンドル、高アスペクト比工具および卓上型ステージを駆使しながら以下の加工実験を行い、理論的検討および技術開発による装置および工具の改良を行って以下の成果を得た。

(a) 金属部品切削分野では、従来技術では加工不可能な高アスペクト比微細溝加工や金型ポケット加工、高アスペクト比微細孔加工などが実現できることを検証した。

(b) インジェクターなどの内面研削加工分野では、高アスペクト比小径内面研削加工が、高精度に実現できることを検証した。

(c) 高硬度脆性材料の加工分野では、ガラス、セラミックスおよび超硬合金に対して、高能率および高精度に微細加工できることを検証した。

すなわち、本プロジェクトによる超音波振動を援用した加工システムを適用することにより、高アスペクト比マイクロ工具による加工精度が飛躍的に向上すること、および硬脆材料に対する加工能率と加工精度が向上することを証明することができた。

本プロジェクトでは、提案し研究した超音波援用加工システムが、従来の加工限界を打破する加工法であり、我が国独自の加工法であり、その結果、今後、高度な加工が要求される生産加工分野に大きく貢献するであろうことの礎を築くことができた。

### 3. 2 事業化展開

#### 3. 2. 1 実用化のための進捗状況

- (a) 玉軸受型超音波スピンドルは、平成 21 年度からの事業化に向けて、大学、公設試あるいは民間において加工評価を開始している。極微細金型加工、ガラスやセラミックスなどの高硬度脆性材料加工に効果を発揮する加工データが得られている。
- (b) 高アスペクト比マイクロ工具は、平成 21 年度から、受注生産の段階に入る。
- (c) 空気軸受型超音波スピンドルおよび卓上型ステージは、今後、顧客や機械メーカーの動向を鑑みながら、本プロジェクトチームやアドバイザーとの協働により、実用化し、工作機械システムとしての普及を目指す。平成 21 年度からは、開発ステージに超音波スピンドルを設置しての受託加工を受け入れる形で事業化に入る。

#### 3. 2. 2 今後の事業化計画

ものづくりの基盤産業である、金型、半導体部品、自動車部品、電気機器部品などの精密加工業者への開発機械・工具及び新しい加工技術の普及により、加工業者への波及のみならずその部品を使う製品の高度化を通じて広く経済界全体へ効果を及ぼすと考えられる。例えば、今後自動車産業から一般家庭まで急速に普及が見込まれる燃料電池のセルに使用されるセパレータでは、試作品製作時にはマイクロ流路を脆性材に直接切削する必要があり、量産時にはプレス用の金型硬材を加工する必要があり、試作、量産それぞれに要求される加工において本研究結果では、有用な結果が得られており、単品及び加工ソリューションによる効果は初年度だけでも 1 億円以上が見込まれる。今後、燃料電池をはじめとして、各種の微細金型、半導体部品、自動車部品、電気機器部品の普及に本研究結果が深く寄与するものと想定される。

### 3. 3 おわりに

平成 19、20 年度の 2 年間にわたり、管理法人のタマティーエルオー（株）およびプロジェクトリーダーの神雅彦日本工業大学准教授の下に技術開発を進めてきた。本プロジェクトを委託された関東経済産業局、アドバイザーとして貴重なアドバイスをいただいた松原厚京都大学教授および立花亨ミクロン精密株式会社技術部参与はじめ、関係各位に厚くお礼申し上げる。

以上