

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「複数工程で製作される情報家電向け多機能光学シート成形金型の
革新的工程集約化を実現させる超精密微細切削システムの構築」

研究開発成果等報告書

平成 22 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社 南雲製作所

目 次

1. 研究開発の概要
 - 1-1. 研究開発の背景・研究目的および目標
 - 1-1-1. 研究開発の背景
 - 1-1-2. 研究の目的および目標
 - 1-2 研究体制
 - 1-2-1. 研究組織
 - 1-2-2. 管理体制
 - 1-2-3. 研究者氏名
 - 1-2-4. 協力者
 - 1-3 成果概要
 - 1-4 当該研究開発の連絡窓口
2. 研究内容および成果
 - 2-1. 超精密化・微細化に対応した金型技術開発
 - 2-1-1. 技術開発環境の整備
 - 2-1-2. 超精密・微細超高速切削用微細工具の研究
 - 2-1-3. 超精密ツールメジャーメントシステムの技術開発
 - 2-1-4. 微細工具を用いた超精密・微細超高速切削技術の基盤技術開発
 - 2-1-5. 周辺技術の開発
 - 2-2. 複雑 3 次元形状等を創成する金型加工技術開発
 - 2-2-1. インテリジェント加工システム構築のための超精密・微細加工用データベースの構築
 - 2-2-2. 複雑 3 次元形状を創成する金型加工技術の開発
 - 2-3. 工程短縮を可能とする金型技術開発・・・項目一2. に含めることで省略した。
 - 2-4. 技術の自立発展対応新システムの構築
 - 2-4-1. 長時間安定加工技術の開発
 - 2-4-2. インテリジェント加工システムの構築
 - 2-5. プロジェクトの管理・運営
3. 全体総括
 - 3-1. 研究開発の成果および課題
 - 3-1-1. 研究開発の成果
 - 3-1-2. 研究開発後の課題
 - 3-2. 事業化展開
4. 専門用語等の解説

1. 研究開発の概要

1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1. 研究背景

ポータブル型のフラットパネルディスプレイ(以下、FPD(**F**lat **P**anel **D**isplay)の略語を使用する)に採用されている多機能光学シートを生産するための超精密金型は、現在、研削、研磨、放電、超精密研磨、手仕上げ加工の5工法を経て製造しているが、川下企業からの一層の短納期、低コスト化と更なる超精密・微細化要求に応えられない状況にある。このような背景を受け、川下企業のニーズに応えるための超精密金型の生産手段の高度化が喫緊の課題である。

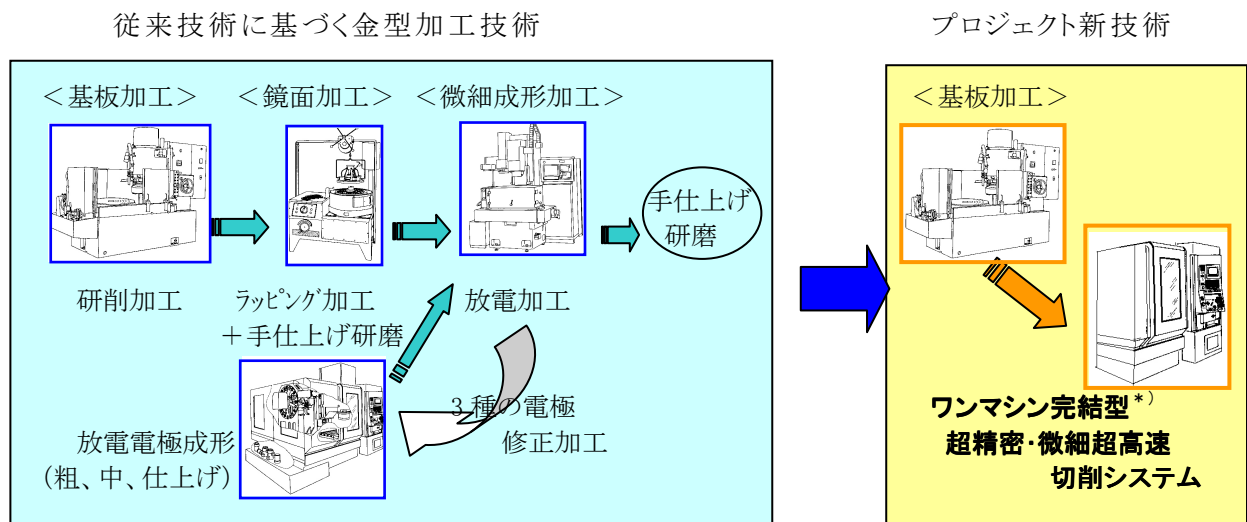


図1 従来技術とプロジェクトが目指す新技術の比較

1-1-2. 研究開発の目的及び目標

このため、課題解決のためには、微細工具を前提とした超精密・微細超高速切削技術による工程集約が有効手段と考え、平成19年度から研究開発を開始し、究極の工程集約となるワンマシン完結型の超精密・微細金型加工システムを構築することを目標とする(図1参照)。平成19年度～平成21年度の3ケ年における研究開発の目的と目標を下記内容とした。

ー1. 3ケ年における研究開発の目的

国際競争力の強化と次代を担う新産業創出を担う人材育成のため以下の研究開発を行う。

- 多機能光学シート用金型を課題とする超精密・微細超高速切削システムの確立
- 加工技術の自立的継続的発展を支援するシステムの構築

ー2. 3ケ年における研究開発の目標

現状の加工技術を用いた多機能光学シート用金型の製作に関しH19年4月の実績比で、工程集約率=1/4、納期短縮率=1/4、コスト低減率=1/2、生産技術者効率=150%を目標とした。

1-2. 研究体制

1-2-1. 研究組織

本研究の研究体制を図2に示した。南雲製作所は新潟県内屈指の精密金型メーカー、有沢製作所はFPDビジネスで長年の実績を持つ企業で、最近では3Dディスプレイ業界のリーディングカンパニーである。新潟県工業技術総合研究所、新潟大学ともに、超精密・微細加工と高速切削加工に関し多くの研究実績を有している。2年次より超精密微細切削加工のプロセス設計の支援研究として精密テクスチャー技術の研究を日本大学と開始した。アドバイザー企業からは、例えば永田精機株から薄膜事業部の支援を頂き、金型材料と工具材料

の研究のために複数種のコーティング工を提供頂いた。これらの地場のコア技術を有すポテンシャルの高い産学官を長年の研究開発経験を持つ技術コンサルタント;稲田技術士事務所が垣根を越えたマネジメントを行う体制で研究を実施した。また研究開発協力企業として、地場にある(株)ユニオンツール(工具メーカー)、隣県にある研究用ベースマシンの製造メーカー(株)コマツ NTC(旧(株)日平トヤマ)、更に3年次には、特に研究用ベースマシンの熱変形抑制の研究開発に注力するため上智大学機能創造理工学科の清水精密工学研究室の協力を得ている。

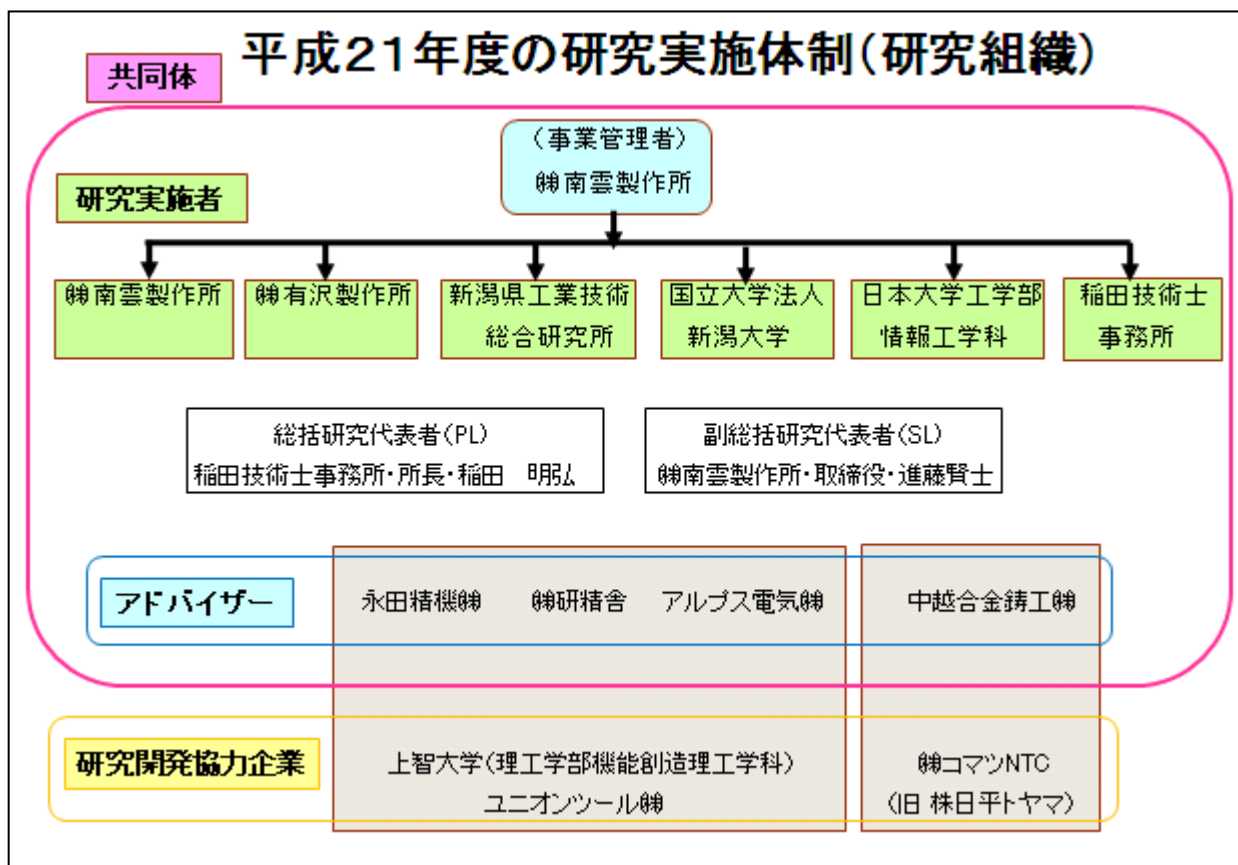
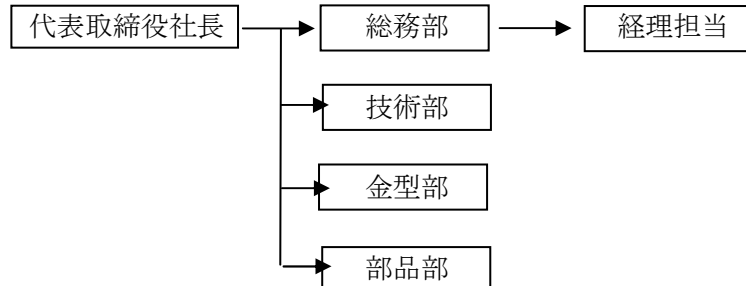


図2 プロジェクトの研究組織(実施体制図)

1-2-2. 管理体制

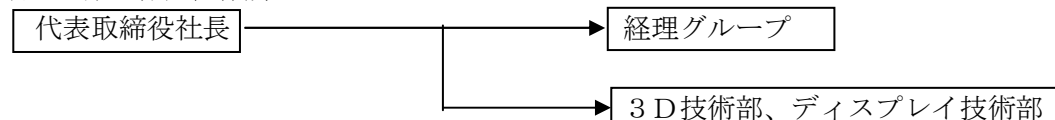
① 事業管理者

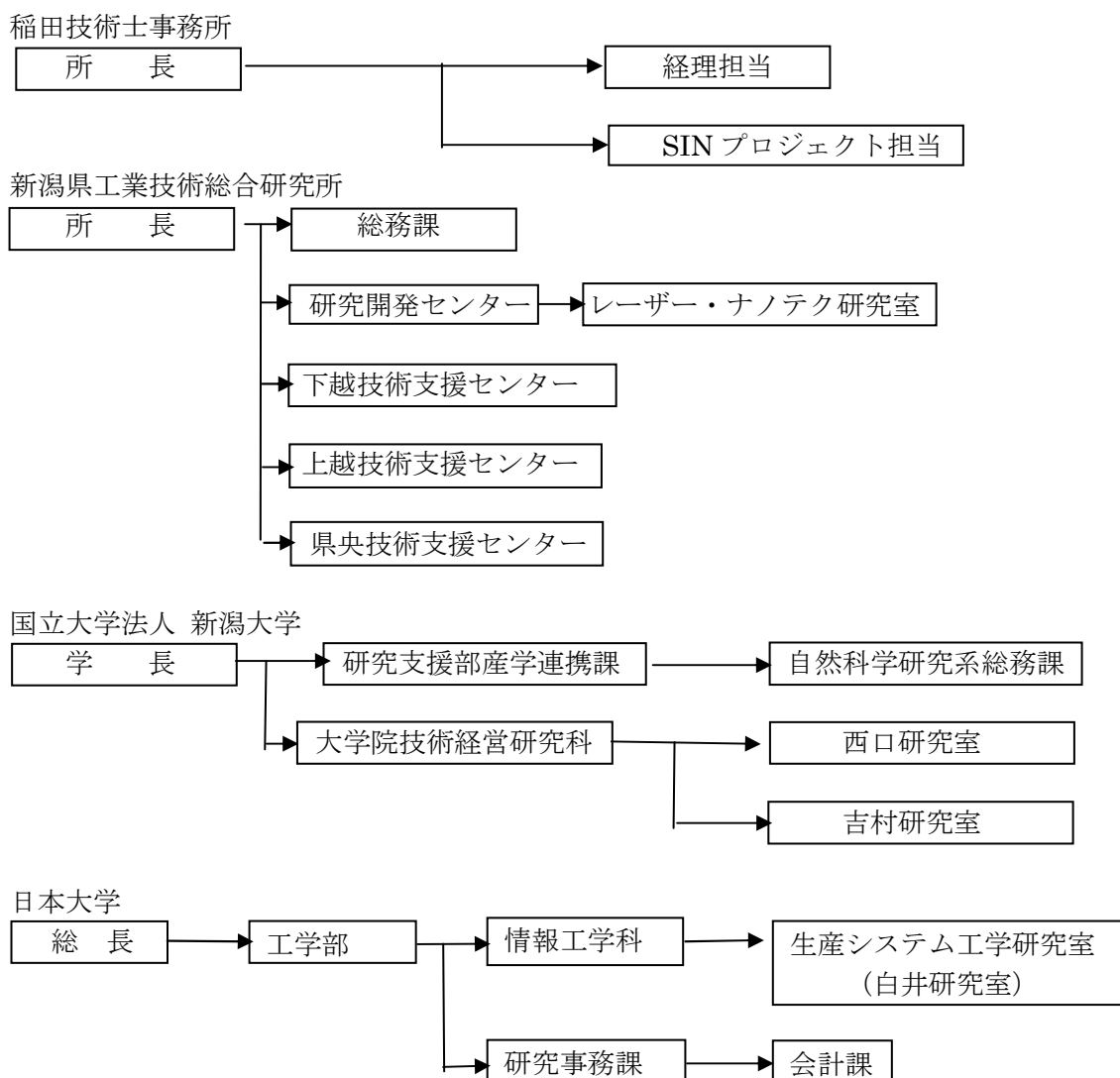
[株式会社 南雲製作所]



② (再委託先)

株式会社 有沢製作所





1-2-3. 研究者氏名

氏 名	所属・役職	
進藤賢士 渡部賢一 佐藤和彦 田中政道 和久井敏夫 舟見豊 丸山隆洋	㈱南雲製作所、技術部長取締役 同上、金型部執行役員 同上、金型部 同上、技術部 同上、技術部 同上、技術部 同上、金型部	サブリーダー
葭原義弘 布施正人 広沢勇氣	㈱有沢製作所、3D技術部・部長 同上、3D製造技術部・SGL 同上、ディスプレイ技術部	チームリーダー
稲田明弘	稲田技術士事務所、SIN プロジェクト担当・所長	プロジェクトリーダー
斎藤博 宮口孝司 平石誠 石川淳 宮口弘明	新潟県工業技術総合研究所、レーザー・ナノテク研究室・研究主幹 同上、県央技術支援センター・専門研究員 同上、レーザー・ナノテク研究室・主任研究員 同上、下越技術支援センター・主任研究員 同上、上越技術支援センター・主任研究員	チームリーダー

西口隆 吉村博仁	新潟大学、大学院技術経営研究科研究科長 教授 同上、大学院技術経営研究科 教授	チームリーダー
白井健二 小林義和	日本大学、工学部情報工学科・教授 同上、工学部情報工学科・専任講師	チームリーダー

1-2-4. 協力者

氏名	所属・役職	備考
奥寺正晴	アルプス電気(株)・事業開発本部、プロセス技術部部長	アドバイザー
植村賢介	永田精機(株)・研究所長	アドバイザー
高野泰夫	(株)研精舎・取締役	アドバイザー
松栄幹雄	中越合金鋳工(株)・取締役第一製造部長	アドバイザー

1-3. 成果概要

平成 19 年から 21 年までの 3 年間の研究開発により次の成果を得ることができた。尚、詳細の成果内容は第 2 章の本論に記載した。

- 1) 高度研究の基盤技術化を実現するために設定した技術的定量目標値の全てに対して目標を達成できたことより、計画通りの成果を得たと言える(表1参照)。

表 1 プロジェクトの技術的定量目標値に対する到達結果表

技術的定量目標値	最終目標値	プロジェクト到達値	到達結果
1-3:機上工具刃先計測技術	計測精度: $\pm 0.3 \mu\text{m}$	$\pm 0.3 \mu\text{m}$	目標達成
2-2:3 次元形状加工技術	形状精度: $\pm 0.5 \mu\text{m}$	$-0.2/+0.5 \mu\text{m}$	目標達成
3-1:平面鏡面加工技術	粗さ精度: $0.04 \mu\text{m}(\text{Rzjis})^*$	$0.024 \mu\text{m}$	目標達成
3-2:3 次元鏡面加工技術	粗さ精度: $0.06 \mu\text{m}(\text{Rzjis})^*$	$0.046 \mu\text{m}$	目標達成

注記—*: Rzjis の定義は対象企業南雲 SS の表面粗さ計の Rz 表示によるもので、1991 年の JIS 規格「十点平均粗さ」である。

- 2) 多機能光学シート成形金型の生産性向上目標の4項目に対し、ワンマシン完結型加工プロセスを完成させ3項目で目標達成、1 項目のみ達成率 50%であったことからほぼ満足できる成果と言える(表 2 参照)。

表 2 具体金型に対する定量目標値

生産性向上目標項目	目標値	プロジェクト到達値	項目初期値
工程集約率	1/4 (2 工程)	1/4 (2 工程)	8 工程
納期短縮率	1/4 (20 時間)	1/1.9 (43 時間)	80 時間
コスト低減率	1/2 (45 万円)	1/2.25 (40 万円)	90 万円
生産技術者効率	150% (40 時間)	130% (46 時間)	60 時間



図3 ワンマシン完結型プロセス
で製作した金型入れ子

3 年間のプロジェクト活動による上記の結果より、多機能光学シート用成形金型を対象として超精密微細金型加工システムの基盤技術高度化を実現することができ、副次的成果として技術人材の高度育成と国際競争力の強化を遂行できた。更に、インテリジェント加工システムを実用システムとして定着できたことからプロジェクト成果の自立発展環境が整備できた。

1-4. 当該研究開発の連絡窓口

事業管理者: (株)南雲製作所 担当: SIN プロジェクト担当 取締役技術部長 進藤賢士(SL)

連絡先 TEL: 025-532-4040(代表) FAX: 025-532-4074 E-mail: k-shindo@nagumo-ss.com

2. 研究内容および成果

2-1. 超精度化・微細化に対応した金型加工技術開発

2-1-1. 技術開発環境の整備

研究内容

研究開発用ベースマシンは高剛性・高精度・高安定性の性能を有す超精密 MC である。平成 21 年度にはこの特徴を活用したワンマシン完結型加工プロセス用超精密 MC (マシニングセンタ) の研究成果を集大成させる。主な課題は、Z 軸が保持する回転スピンドルの駆動性能 (微振動、熱変形) の更なる高精度化と安定性である。

研究開発成果

超精密微細加工を阻害する諸因子は、工作機械では、運動精度、主軸の振れ、熱変位、位置決め精度が、工具では、刃先摩耗、面粗さ、ダイナミックバランスが、また、CAD/CAM システムでは、モデリング精度、CAM 精度、その他として被削材特性、ソーリング性能、また、加工条件が挙げられる。1 台の MC でワンマシン完結型加工プロセスを実現させるため、プロジェクト 3 年間の期間にわたり前述の阻害因子の殆どについて研究開発を実行し、阻害因子の影響の最小化を遂行してきた。図4は、研究用ベースマシンと市販の超精密マシニングセンタ 2 種との主な加工装置の性能比較を実施した結果である。

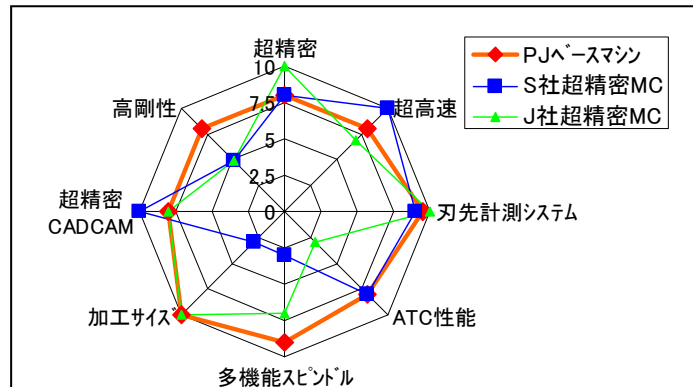


図4 研究用ベースマシンの高性能化と比較性能

本プロジェクト3年間にわたるベースマシンのワンマシン完結型加工プロセス対応のための研究開発の概要を下表3に示した。

表3 ワンマシン完結型加工対応ベースマシンの研究開発概要表

研究開発項目		プロジェクトにおける研究開発の概要
工作機械	運動精度	・主軸の微振動要因の研究 ・油静圧油の供給回収システムの改良開発 ・主軸の微振動対策のための主軸構造の設計変更開発
	主軸の振れ	・ダイナビジョンを用いたソーリング精度ベリファイシステムの研究
	熱変位	・加工機の熱変位に対する時定数と解析モデルの研究 ・熱変位の各時定数に対する熱安定化対策の実施
	位置決め精度	・3D 形状切削における工具刃先位置検出技術と補正加工技術の確立
工具	刃先摩耗	・工具材種と各種被削材における工具摩耗特性の研究
	面粗さ	・刃先面粗さと加工面性状および加工精度に関する研究
	ダイナミックバランス	・前述 (主軸の振れ) に同じ
CAD/CAM	モデリング精度	・CAD システム性能とモデリング精度および加工精度に関する研究
	CAM 精度	・各種ツールパスと加工面性状に関する研究
その	被削材特性	・各種被削材と微細切削加工、鏡面仕上げ加工に関する研究
	ソーリング性能	・前述 (主軸の振れ) に同じ

他	加工条件	・超高速切削加工の基礎研究 ・各種鏡面仕上げ加工の研究 ・微細研削加工の研究 ・バリ/スクラッチフリー加工に関する基礎研究
---	------	--

2-1-2. 超精密・微細超高速切削用微細工具の研究

県工技総研は、前年までに平面の鏡面切削用微細工具の研究開発を進めた。この研究アプローチを3次元微細形状に拡張させ、3次元微細形状の超精密切削に適した刃先の開発設計を行う。新潟大学は、コーティング工具の切削特性と性能限界について研究を行う。両者の研究成果を南雲製作所に技術移転することで、南雲製作所の微細工具に関する基盤技術の向上に資するものとする。

研究開発成果

本研究では、図5のように工具形状について研究を進めてきた。先の研究ではcBN工具のうち、無電解Ni-Pメッキの加工においては逃がし量を大きくした工具MD20が切削面粗さにおいて優れていた。

工具MD20を表4の切削油使用条件下でプリハードン鋼の切削実験に供した。工具姿勢を変えて切削した時の切削面の粗さ測定結果を、他工具と比較して図6に示す。切れ刃にスカイフ盤研磨を施したMD系の工具を用いることにより、いずれの工具姿勢においても切削面粗さは低減した。

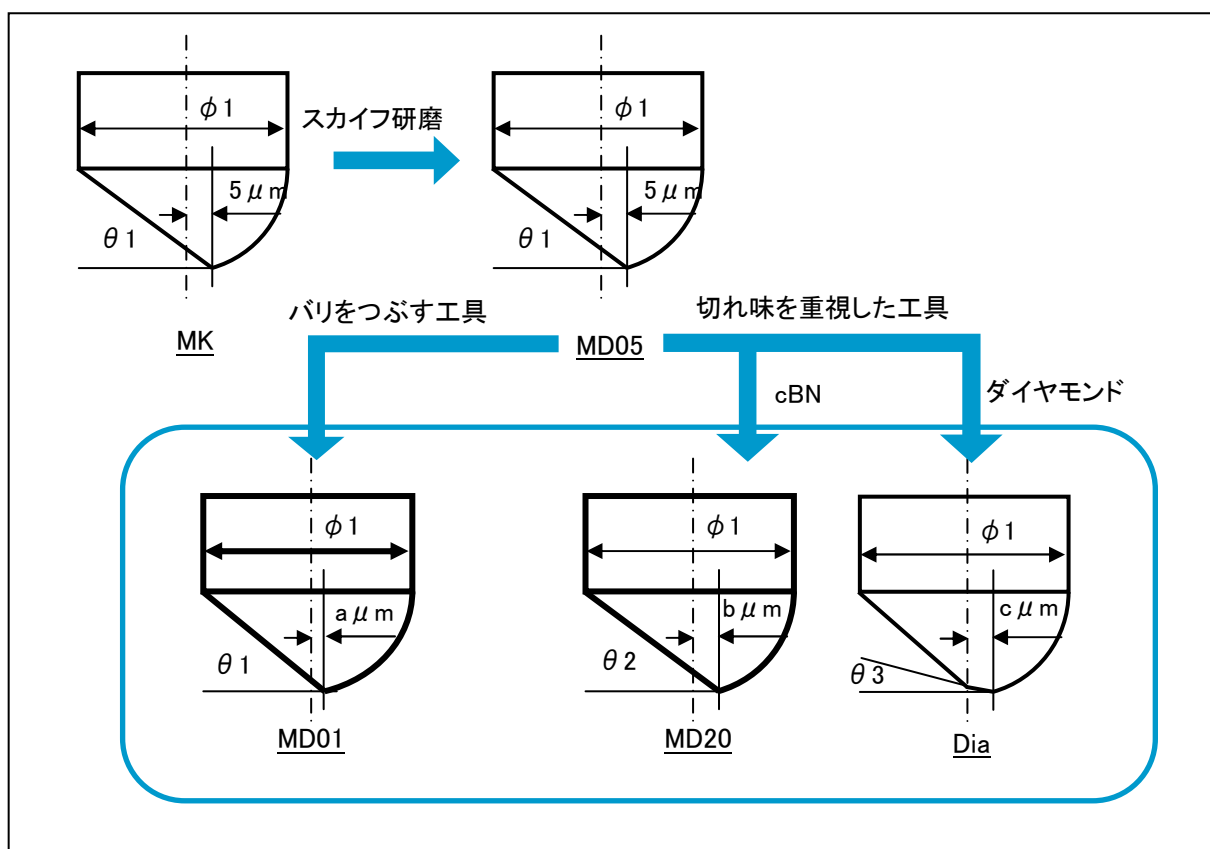


図5 これまでの工具形状の検討推移

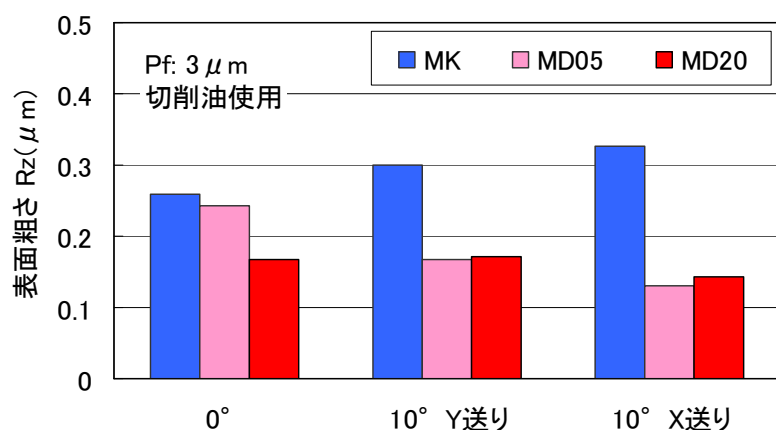


表4 切削条件

主軸回転数	50,000 min^{-1}
送り速度	150 mm/min
軸方向切込み	3 μm
ピックフィード(Pf)	3 μm (ダウンカット)
主軸角度(θ)	加工面法線方向に対し 0° , 10° および 20°
送り方向	Y 方向
潤滑条件	白灯油(スプレー供給) ドライ

図6 プリハードン鋼を加工したときの切削面の粗さ

切削面の粗さに対する工具刃先へのスカイフ盤研磨の影響は、図7に示すように、研磨による工具逃げ面の平滑化に起因しており、併せて切れ刃が比較的鋭利になったことでバリなどの塑性流動の発生が抑えられたことも影響していると考えられる。

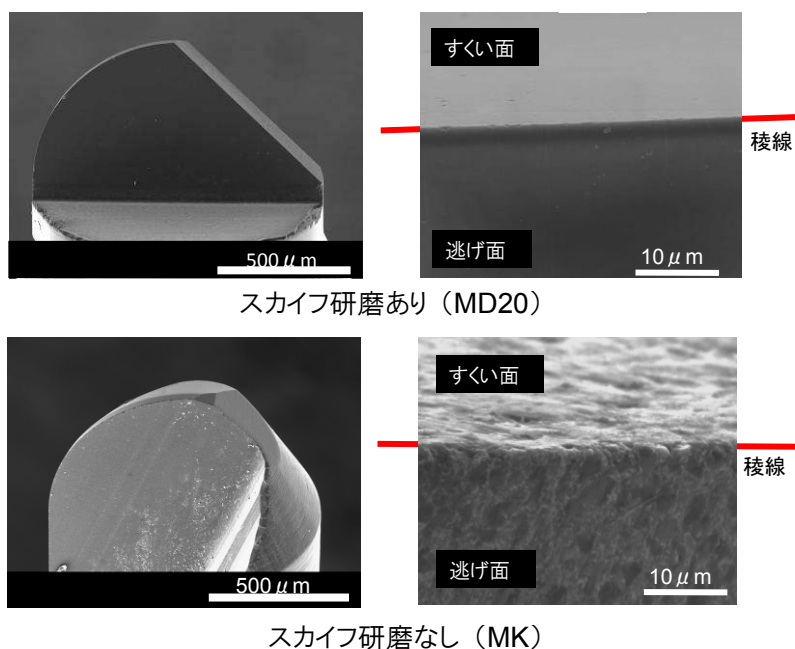


図7 スカイフ盤研磨による切れ刃の様子

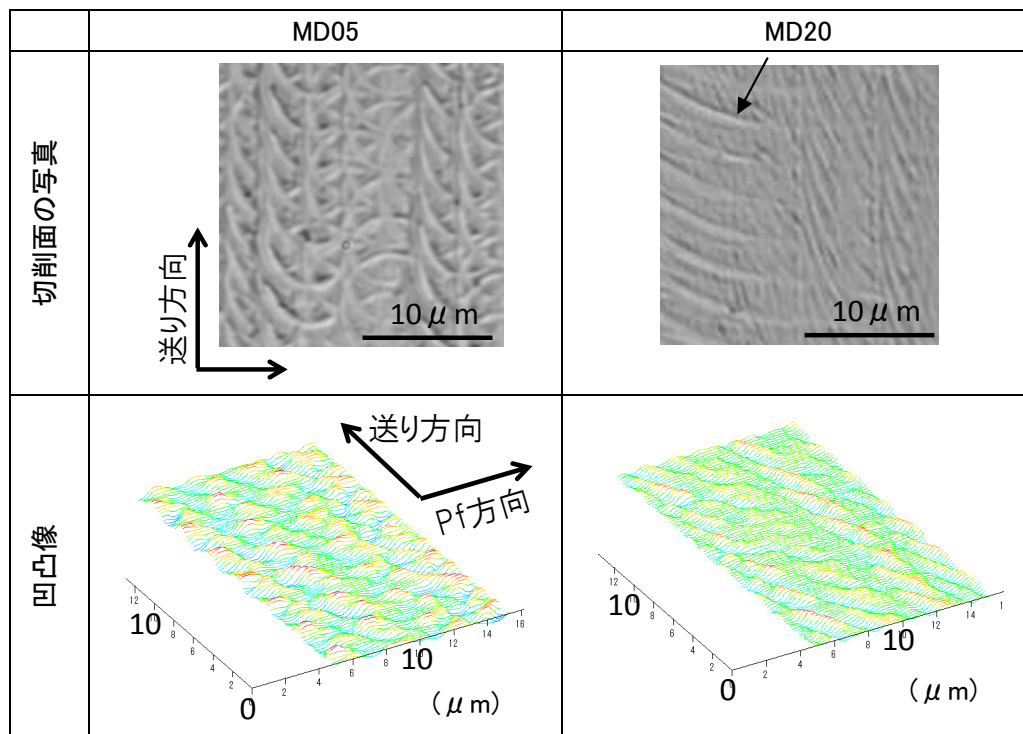
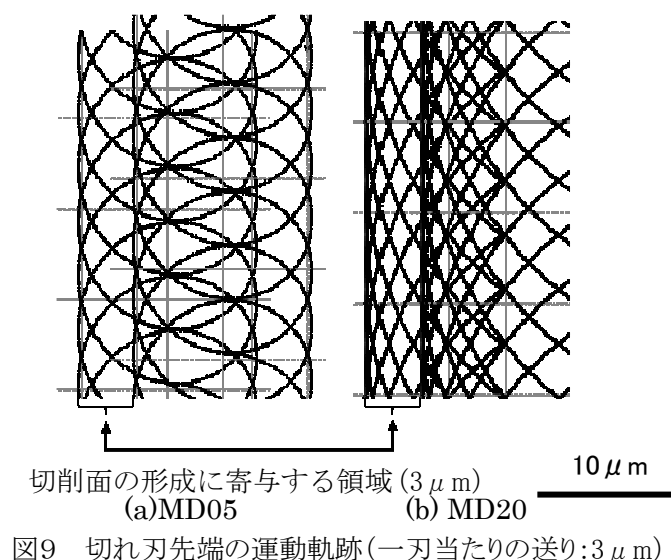


図8 MD系工具による切削

また図6から主軸角度 0° 、すなわち主軸を加工面に対して垂直に立てた状態での切削条件では、他の工具に比べて MD20 工具の効果が大きいことがわかる。図8は MD05 と MD20 を用いたときの切削面の写真と、その一部を非接触3次元測定機により測定した凹凸像である。MD05 工具の場合、切削面は周期的に配置された多数の突起からなっている。一方、MD20 による切削面には、矢印のように幅の広い切削痕が突発的に発生しており、切削が安定していない様子が観察されるものの、細かいピッチで切削痕が形成されている。また、3次元凹凸像を見ると、切削痕に沿ってピークが存在するが、その高さは MD05 に比べて小さいことがわかる。

切削面に見られる円形のパターンは、工具の切れ刃先端によって刻まれた切削痕である。MD05 と MD20 の切れ刃先端の運動軌跡は図9に示すようなトロコイド曲線になる。ピックフィード量を $3\mu\text{m}$ としたとき、MD05 の場合、切削面の形成にはトロコイド曲線の半径の 60%程度が寄与する。一方、MD20 の場合は、半径の 15%程度のみが切削面の形成に寄与し、この領域では隣接あるいは交差する曲線の間隔が MD05 工具に比べて小さくなるため、切り残し高さが低減されたものと考ええる。



MD20 を用いてドライ条件においてプリハードン鋼の3次元加工を行った。モデル形状は図10のような平底面を持つ小径ディンプルである。別工具により粗加工を行った後、MD20 工具により仕上げ加工を行った。主軸角度はディンプルの中心軸に対して 0° で一定とした。ツールパスはディンプルの中心から外周に向けて半径が大きくなるスパイラル状とした。また、比較のため市販 cBN ボールエンドミル工具による仕上げも行った。なお、市販工具の切れ刃輪郭の形状偏差は $\pm 1.0\mu\text{m}$ である。

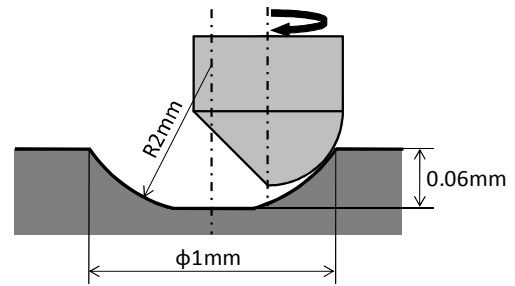


図10 3次元加工モデル

球面部の経線の形状測定結果を図11に示す。縦軸は最適化された真円に対する形状偏差である。市販工具による加工結果が P-V 値で $2.51\mu\text{m}$ であるのに対し、MD20 工具を用いた場合には P-V 値が $0.33\mu\text{m}$ となり、市販工具の結果の約 1/7.5 と偏差の少ない球面が形成された。曲線は下に凸の円弧状のうねり成分と粗さ成分からなっている。うねりは切れ刃稜線上の凹凸が工具の円弧移動にともなって形成したものと思われる。形状測定部の表面粗さは(このときカットオフは $250\mu\text{m}$ とした) $Rz0.15\mu\text{m}$ であり、主軸を傾斜させたときと同等の鏡面が得られた。以上より、本研究で開発した3次元微細形状用の微細工具の性能の優位性が確認できた。

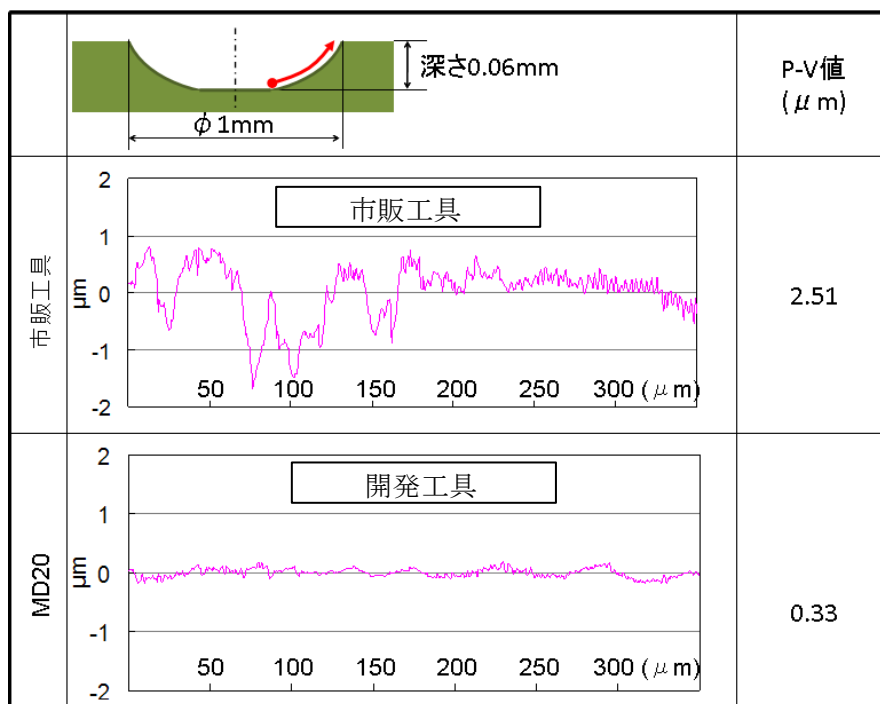


図11 加工テスト用小径ディンプルによる3次元形状加工性能比較

1-3. 超精密ツールメジャーメントシステムの技術開発

超精密ツールメジャーメントシステムが南雲製作所の量産技術として定着できるまでに開発技術を確認し、併せて、開発目標 $\pm 0.3\mu\text{m}$ を実現させる。残る課題は、加工チャンバー内部の熱変動の最小化・安定化によるツールメジャーメントシステムへの熱変形の抑制と、操作性改良のための工具の自動芯出し対応ハードウェアの改造研究である。

研究開発成果

超精密ツールメジャーメントシステムは超精密切削加工並びに微細切削加工に無くてはならない加工支援システムである。平成 20 年度の技術開発成果として $\pm 0.5 \mu\text{m}$ まで到達できている。残る課題は熱変動の影響最小化・安定化であった。ベースマシンの熱変動の解析研究により、熱変動の時定数がおよそ9分と120分の 2 種類を有していることがわかり、前者の主要因は油静圧軸受の主軸回転時に生じる油膜のせん断熱によるもの、後者はベースマシン本体の熱変動の時定数であることを解明した。この対策については4-1⑭項に詳細を記述することとし、結果として開発目標 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ を達成することができた(図12、13)。

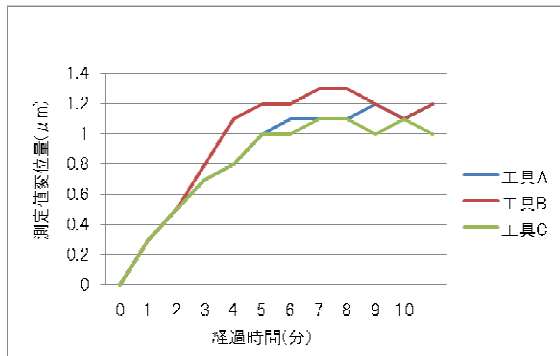


図12 工具交換直後に起こる短時間熱変位量
(熱対策前)

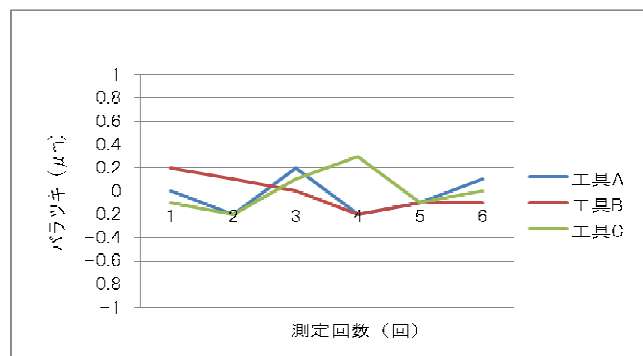


図13 工具繰返し交換時の工具長バラツキ
(熱対策後)

図14は主軸の回転数を変更した時の主軸の Z 方向変位量をグラフ化したものである。初期状態(青点線)では主軸の熱変動が安定するまでには 2 時間近くを要したウォーミングアップ時間が、対策をこうじたことで 15 分と初期に比べて 1/8 まで短縮できた。

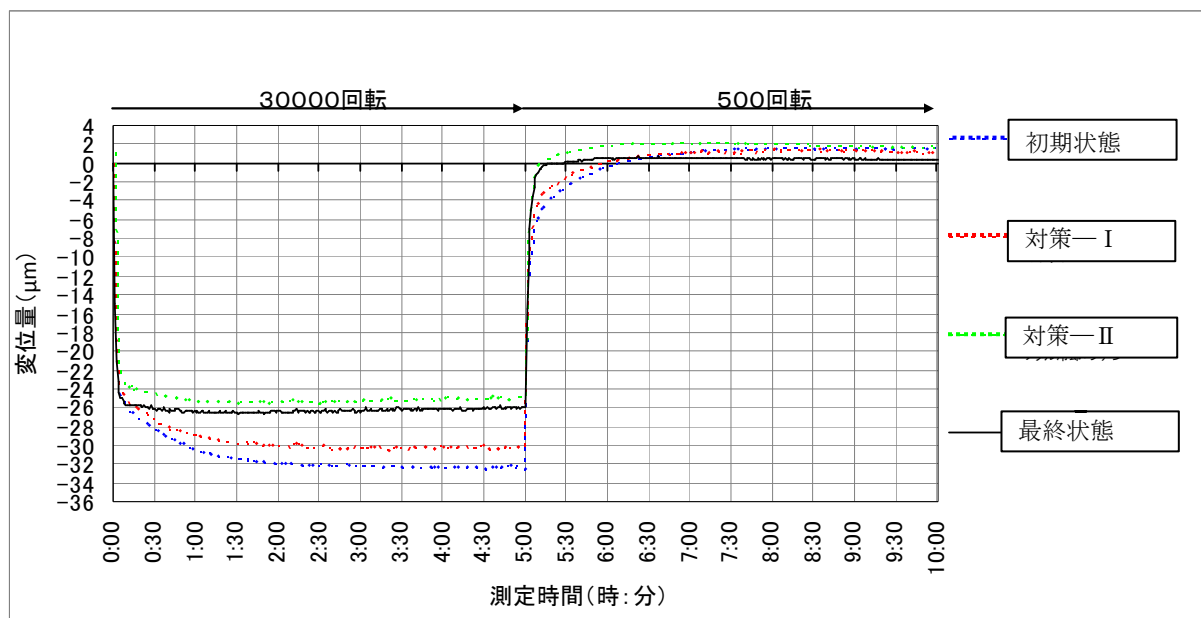


図14 主軸の回転数を変更した時の主軸の Z 軸方向変位量と時間の関係

2-1-4. 微細工具を用いた超精密・微細超高速切削技術の基盤技術開発

3種類の標準加工モデル(球面、非球面;直線3次元溝、梨地面)を基盤技術開発用テストパターンとして、微細工具を用いた超精密・微細切削技術の基盤技術開発に目処をつける。3次元微細形状を、微細工具を用

いて超精密加工するための基盤技術(微細工具の3次元切削特性の習得とCAD/CAMソフトウェア技術の対応力)の研究と切削技術習得が課題である。被削材として、市販の標準的金型材料数種類を選定し加工のデータベース蓄積を行うこと。なお、日本大学は梨地面加工のためのランダム曲線形成アルゴリズムとその加工技術に関する研究成果を南雲製作所に技術移転すること。

研究開発成果

課題とした3種類の標準加工モデル(球面、非球面;直線 3 次元溝、梨地面)を配置した基盤技術開発用テストパターンの加工事例を図15に示した。この結果から、ワンマシン完結型加工プロセスで構成された超精密微細切削システムの基盤技術が開発できたことが分かる。得られた習得成果は下記の項目である。なお、このテストパターンワークで平面鏡面粗さの目標精度:0.04 μ m (Rzjis)を 0.024 μ m (Rzjis)で達成している。

超精密微細切削技術に関する習得項目

- a) 標準加工モデルに対する3DCAD 設計技術
- b) 標準加工モデルに対する3D CAM ソフトウェア技術(加工工程設計、パラメータ選定、ツールパス、他)
- c) 上記の加工段取りを前提とした実切削技術(ソーリング技能による振れ低減、刃先位置出し、工具交換とワンマシン完結型加工プロセスの連続操作)
- d) 被削材種 (HPM38、STAVAX、DC53) に対する標準加工モデルの加工結果のデータベース化

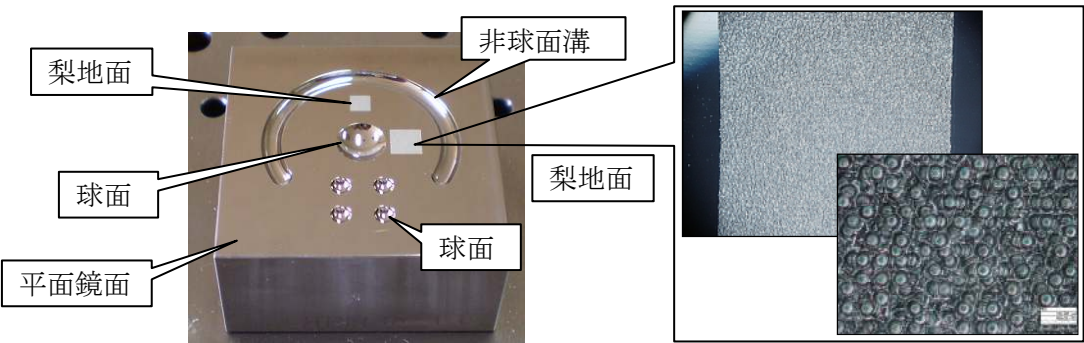


図15 基盤技術開発用テストパターンの加工事例

プロジェクトの開発課題とした多機能光学シート用金型に対し、ワンマシン完結型加工プロセスによる切削技術・鏡面仕上げ技術の実用化の課題抽出のために、試作金型から多機能光学シート(図16)を転写成形し製品同等の評価法を適用した。また、金型の評価として、平面鏡面部の鏡面品質の評価には有沢製作所により光学式のHaze評価と表面粗さの定量評価と定性的な視認評価を行い、球面形状部と梨地面は拡大観察法ろそれぞれ採用し、量産金型として採用が可能であることが確認できた(表5参照)。



図16 転写成形品

表5 金型ビジネス実用化の評価事例

評価項目	平面鏡面部(検査対象形状)		
	表面粗さ(μ m)		Haze 値(%)
	Ra	Rz	—
評価対象			
試作金型 NO.1	0.02	0.06	0.26
試作金型 NO.2	0.16	0.29	0.26
試作金型 NO.3	0.17	0.29	0.28

2-1-5. 周辺技術の開発

スクラッチフリー加工原理の研究と応用技術開発

単結晶黄銅材を被削材とすることで結晶方位と微細切削特性の関係を研究し、多結晶金属に対するスクラッチフリー加工原理の汎用的成果を探索する。併せて、バリの低減に資する切削技術の研究を行う。延性金属材料(銅合金系)の加工原理の見極めを経て、プロジェクトの主課題である鉄系金型材料への研究の横展開を進める。

研究開発成果

ー1. スクラッチを誘発する材料組成の研究

スクラッチが生じる原因として、介在物の破壊により生じた小片、もしくは切削により掘り起こされた介在物を工具が引きずることが挙げられる。ここでは、Cu-Zn 合金単結晶を EPMA 解析することで材料表面の元素分布を解析し、介在物の組成を明らかにすることを目的として観察・測定を行った。図17に JSM-6330F(FE-SEM)/JED-2200(EDS)の外観を表6にその仕様を示した。



図17 EPMA 分析装置

表 6 EPMA 分析用 JSM-6330F(FE-SEM)/JED-2200(EDS)の仕様

位置決め分解能	1.5 nm(15kV)
加速電圧	0.5-30kV
倍率	10-500、000
最大資料サイズ	φ32mm

図18に電解研磨後の各結晶方位の表面のノマルスキー像を示す。研磨面には凹凸が生じており、特に(111)面では黒点、つまり深度の大きい凹が生じていることが分かる。この黒点は(111)面に限らず、(100)面、(110)面でも生じている。EPMA 解析はこの黒点を中心に行った(図19参照)。

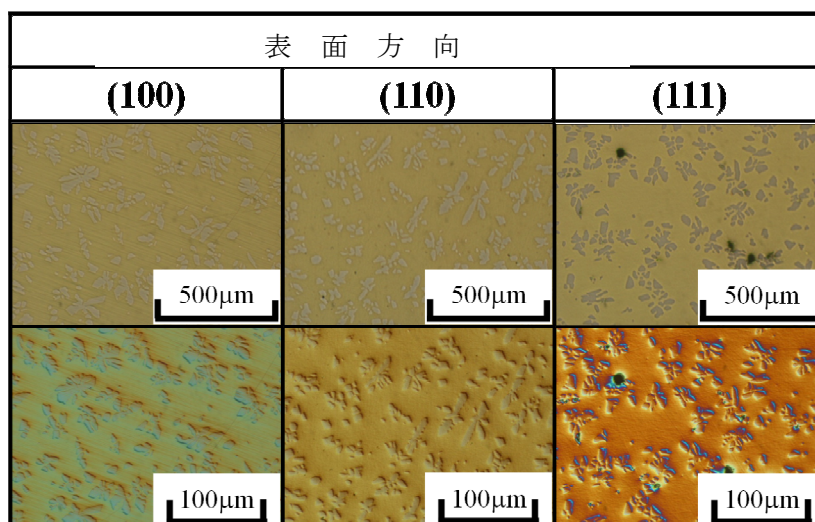


図18 Cu-Zn 合金単結晶表面の各結晶面のノマルスキー観察

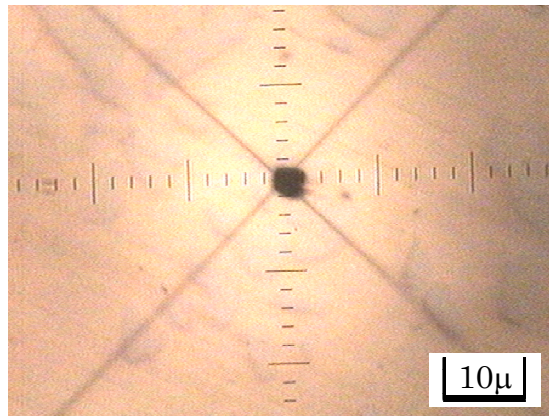


図19 Cu-Zn 合金単結晶表面の顕微鏡イメージ

図20に反射電子像およびマッピングデータのみ示したが、解析結果から介在物はβ相で生じており、反射電子像からβ相の介在物は、Znと比較して原子量の小さい元素を含んでいることが分かる。加えて、特性X線のスペクトルに酸素が検出されたことから、介在物はZn酸化物である。Cuは微量の酸素を含有しており、ZnはCuよりもイオン化傾向が大きいのでCu-Zn合金製造時に ZnO_x が生じると考えられる。合金精製時に酸素をできるだけ取り除くことで介在物を少なくできる可能性がある、その結果として、介在物を原因としたスクラッチ不良を抑制できると考えられる。

鉄系金型材料への研究の横展開として、金型鋼の鏡面部に生じるスクラッチの核部を同様の組成分析をおこなった結果、素材中の不純物が影響を及ぼしていることが分かった。

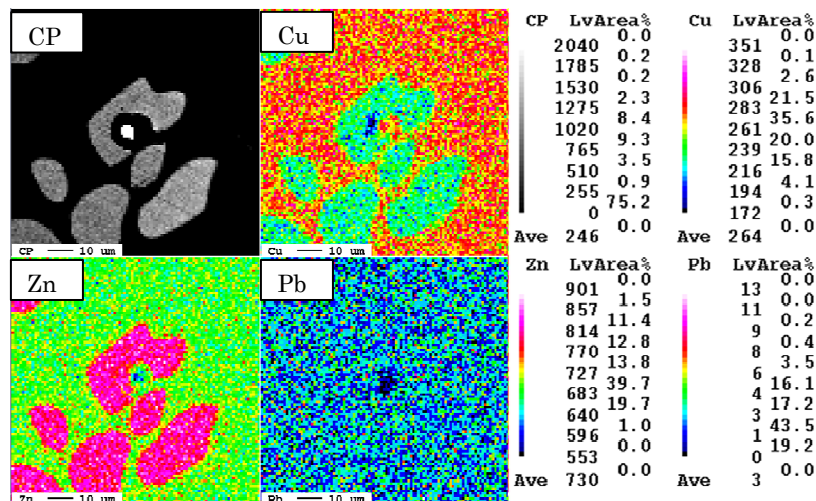


図20 Cu-Zn 合金単結晶の組成マッピングデータ

ー2. 切削加工技術以外の加工工法の調査と開発

研究開発用ベースマシンは高剛性・高精度・高安定性の性能を有す超精密MCである。この高剛性特性を活用して微粒砥石を用いた超精密研削仕上げ加工の実用化研究を進める。併せて、研究を継続中の弾性研磨工具を用いた機械研磨工法の量産技術化の研究を進める。切削加工技術以外の工法を研究開発用ベースマシンで研究開発するため、平成21年度の予算で高速スピンドルを調達し実用化研究を進める。この研究により平面及び3次元形状に対する鏡面品質の目標<下記>を目指す。

- ・ 平面: $Rz_{jis}=0.04\mu\text{m}$
- ・ 3次元形状: $Rz_{jis}=0.06\mu\text{m}$

研究開発成果

研究開発用ベースマシンの高剛性特性を活用して下記に示した切削工具以外の加工工法<a)、b)、c)>の研究を行った。研究課題は、ワンマシン完結型加工プロセスを実現するための超精密微細切削技術の補完技術であり、中仕上げ後の最終仕上げ(鏡面)を実現する研究である。

切削加工技術以外の加工工法

- 微粒電鍍砥石(図21)
- 遊離砥粒と弾性研磨工具
- 超仕上げ用研磨工具



図21 微粒電鍍砥石

研究の結果、上記の工法は全て研究用ベースマシンに採用可能であることを確認した。それぞれに加工面の特徴と各々の工具寿命があるため、加工対象の形状と加工面の面積等の情報から適切な工法を選択することとした。本研究の結果として、平面の目標仕上げ粗さ: $Rz_{jis}=0.04\mu\text{m}$ 、並びに3次元形状の目標仕上げ粗さ: $Rz_{jis}=0.06\mu\text{m}$ をそれぞれ達成可能な工法を開発することができた。

ー3. 超高速スピンドルを用いた超高速切削技術の研究

研究用ベースマシンに超高速スピンドルを取り付けるベースマシンの改良を実施し、現状のスピンドル回転数を増大させることで、更に微細な工具の使用範囲の拡大と微細切削技術の高度化の研究を行う。

研究開発成果

研究用ベースマシンの主軸回転数の使用限界が $30,000\text{min}^{-1}$ であるため、新潟県工業技術総合研究所が本プロジェクトで開発した鏡面切削加工を研究用ベースマシンでは検証できなかった。市販の高速スピンドルを研究用ベースマシンに搭載することで工技総研の開発技術を導入することと、更なる微細切削技術の高度化を研究した。加工環境は下記による。

- ① 加工機 $Z_{\mu} 3500$ (コマツ NTC)
- ② 高速スピンドル RBX-7 HSK-E32タイプ (大昭和精機)
- ③ 室温 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ (恒温室)
- ④ クーラント オイルミスト(植物油)
- ⑤ CAD/CAM CaelumKken(トヨタケーラム)

工技総研では、本プロジェクトで設計したオリジナル工具と高精度加工機のロボ・ナノ(FANUC)を使用し、切削加工のみで $Rz203\text{nm}$ の面を得る事ができている。この技術を南雲製作所で再現検証しようとしたが、ロボ・ナノの最高回転数が 70000 回転であるのに対し、 $Z_{\mu} 3500$ は最高回転数が 30000 回転までのため同じ加工条件を採用出来なかった。今回使用した高速スピンドルは最高回転数を 75000 回転まで上げる事が出来るため再現検証を行った。使用した加工条件を表6に示す。図22はオリジナル工具の観察写真である。この工具は刃先を磨くことで切削面に刃物の凹凸が転写されないよう工夫されている。この磨かれた刃先粗さを3次元測定器にて測定した結果も図22に示している。

表6 高速スピンドルを用いた微細切削加工条件

工具	回転数 (min^{-1})	送り速度 (mm/min)	1 刃当たりの 切込み量(μm)	送りピッチ (μm)	深さ方向 切り込み量(μm)
オリジナル工具	75000	225	3	3	3

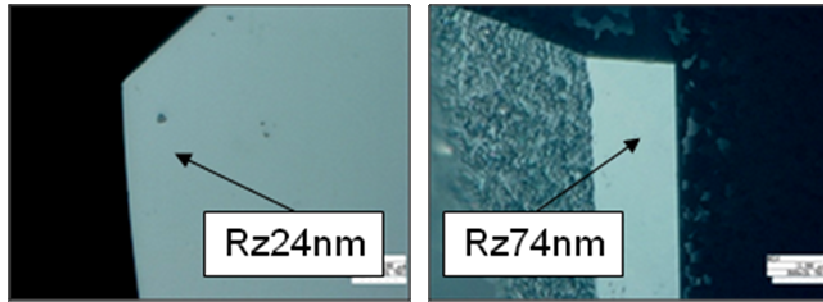


図22 オリジナル工具の刃先

図23はその再現検証の加工品と拡大写真である。被削材は HPM-38 (HRC52) で、加工面粗度は工技総研とほぼ同等であったが、拡大観察では規則的でない切削痕が目立ち、肉眼で見たときの曇ったような面に見える原因と思われる。図24は高速スピンドル装着状態の写真である。

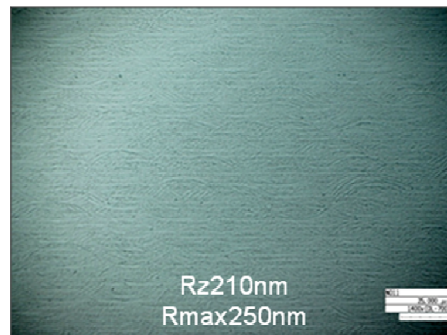


図23 オリジナル工具による3D 鏡面切削品(左)と拡大観察面(右)

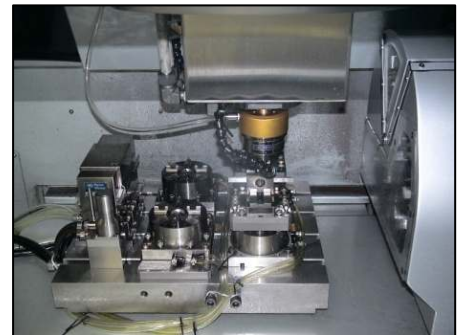


図24 高速スピンドル装着状態

今回搭載した高速スピンドルにより、工技総研が開発した加工条件・加工技術とほぼ同一の条件で研究することが可能となった。また、高速回転条件が採用できることから、より極小径工具を使用した研究が可能となった。ただし、装置重量が重い、軸移動を高速に動かすと主軸に大きな負担を与えるため回転数に見合った送り速度で使うことができない課題が残っている。

2-2. 複雑3次元形状等を創成する金型加工技術開発

2-2-1. インテリジェント加工システム構築のための超精密・微細加工用データベースの構築

平成 21 年度は、前年までに形づくって来たインテリジェント加工システムを南雲製作所の社内技術者が活用し易くなるよう改良することを狙いとする。例えば、加工形状ごとのソーティングがし易くなるようにシステムの「見える化」を進めるなどである。

研究開発成果

蓄積された膨大な加工技術データから、生産技術者や機械操作者が目的に合った過去の情報を簡単に引き出すことのできるデータベースの検索システムを構築させるため Excel ソフトを活用した。下図25はデータベース画面の事例である。生産技術者や機械操作者自身で加工情報を入力してゆく。このようなデータベースは一般的に存在するがなかなか普及しない主な理由は、加工パターンが様々で検索項目が絞りきれないためである。本研究では検索項目を3項目に絞ることで簡単に検索できるシステム設計を採用した。各検索項目に生産技術者が数値等を入力することで、その項目に一致、あるいはその範囲に当てはまるデータが選択できる。

連番	検査 フラグ	状態 検別	コード ネーム	数量	部番	補注 校査	加工日	加工者	加工機	最小 工長 径	材質	硬度 HRC	備考	フォルダ
9	1	0	SIN	20	1		2008/08/20	舟見	Z μ 3500	2	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_1
10	2	0	SIN	20	2		2008/08/21	舟見	Z μ 3500	2	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_2
11	3	0	SIN	20	3		2008/08/22	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_3
12	4	0	SIN	20	4		2008/08/22	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_4
13	5	0	SIN	20	5		2008/08/22	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_5
14	6	0	SIN	20	6		2008/08/23	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_6
15	7	0	SIN	20	7		2008/08/23	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_7
16	8	0	SIN	20	8		2008/08/23	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_8
17	9	0	SIN	20	9		2008/08/23	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_9
18	10	0	SIN	20	10		2008/08/23	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_10
19	11	0	SIN	20	11		2008/08/25	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	Z μ 適正加工条件	¥SIN20_11
20	12	0	SIN	20	12		2008/08/30	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	ディンプル加工	¥SIN20_12
21	13	0	SIN	20	13		2008/10/10	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	ディンプル加工面精度向上	¥SIN20_13
22	14	0	SIN	20	14		2008/10/13	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	ディンプル加工面精度向上	¥SIN20_14
23	15	0	SIN	20	15		2008/10/14	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	ディンプル加工面精度向上	¥SIN20_15
24	16	0	SIN	20	16		2008/10/14	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	ディンプル加工面精度向上	¥SIN20_16
25	17	0	SIN	20	17		2008/10/14	舟見	Z μ 3500	0.5	SLO	60	ディンプル加工面精度向上	¥SIN20_17
26	18	0	SIN	20	18		2009/02/02	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	小径精密平面加工	¥SIN20_18
27	19	0	SIN	21	1		2009/04/16	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	小径精密平面加工 (高速度)	¥SIN21_1
28	20	0	SIN	21	2		2009/04/16	舟見	Z μ 3500	0.5	HPM08	52	小径精密平面加工 (高速度)	¥SIN21_2
29	21	0	SIN	21	3		2009/05/07	相久井	Z μ 3500	6	HPM08	52	セラミックブラッシュ加工	¥SIN21_3
30	22	0	SIN	21	4		2009/05/08	相久井	Z μ 3500	5	HPM08	52	電着焼石加工	¥SIN21_4
31	23	0	SIN	21	5		2009/05/11	相久井	Z μ 3500	5	HPM08	52	電着焼石加工	¥SIN21_5

図25 超精密微細切削技術のデータベース検索システムの代表画面

2-2-2. 複雑3次元形状を創成する金型加工技術の開発

加工技術の定量目標値に対し平成20年度までのプロジェクト成果をさらに進展させ、平成21年度中に複雑3次元形状の加工精度($\pm 0.5 \mu m$)に関するプロジェクト目標を達成するための開発計画を実行する。なお新潟県工業技術総合研究所は複雑3次元形状加工品の精密形状評価の支援を行う。

研究開発成果

複雑3次元形状の超精密微細切削技術の研究は、ディンプル形状(平成19~20年)、波型形状(平成20年)、楕円球形状(平成21~22年)と研究形状をシフトさせてきた。即ち、目標加工精度 $\pm 0.5 \mu m$ を達成させるには仕上げ形状加工の前に精密に3次元形状を計測し、その時点での目標形状に対する形状誤差を補正する手法に対し、目標加工精度 $\pm 0.5 \mu m$ を実現させるために十分な計測精度が得られるよう研究形状を変えてきた(図26)。新潟県工業技術総合研究所からの複雑3次元形状加工品の精密形状評価の支援(図27)を受け、補正加工技術を研究することで楕円球形状に対し、 $+0.5 \mu m / -0.2 \mu m$ を実現した(図28)。なお、加工ワークの3次元加工形状の計測に使用した非接触レーザー干渉顕微鏡は、計測原理的に加工形状の外周部の傾斜が大きい部分では計測誤差が大きくなることから、両端の外周縁から0.5mmを除外した領域を評価領域とした。

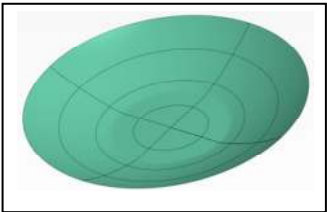
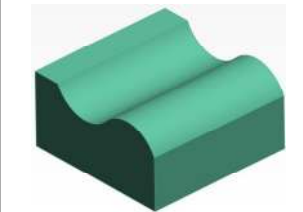
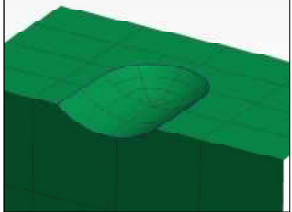
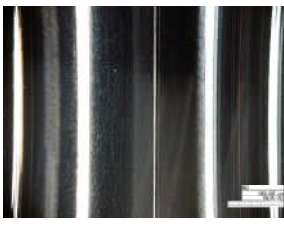
ディンプル形状 (平成19~20年)	波型形状 (平成20年)	楕円球形状 (平成21~22年)
		
		

図28 複雑3次元形状を創成する金型加工技術の開発のための研究形状



図27 新潟県工業技術総合研究所の
3D 形状計測支援設備

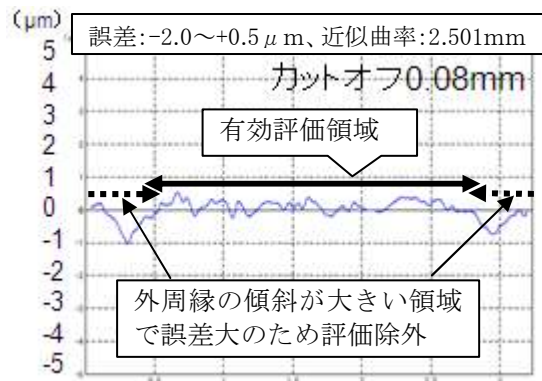


図28 楕円球形状の 3D 加工精度

2-3. 工程短縮を可能とする金型技術開発

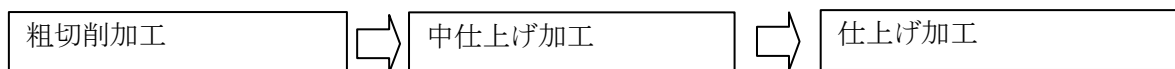
前項1-4④、1-5⑧で研究した手仕上げレス仕上げ加工技術の中から最適な手仕上げレス鏡面加工技術を適用して工程短縮を可能とする金型加工技術の加工プロセスを実現させる。

研究開発成果

研究項目 1-2、1-4④、1-5⑧の研究成果を統合し、ワンマシン完結型加工プロセスで平面(2次元形状)と3次元形状から成る金型の手仕上げレス仕上げ加工技術の開発を展開した。各種の手仕上げレス鏡面加工技術の研究を試行した中で、次の特徴を有する工法を最適な手仕上げレス鏡面加工技術として選択し、技術高度化を実施した。最適な手仕上げレス鏡面加工技術の必要条件は次の a)~e)である。

- a) ワンマシン完結型加工プロセスに適合可能なこと
- b) 習熟を必要としないこと
- c) 安定した鏡面品質が得られること
- d) ある程度広い面積の加工が可能であること
- e) コスト対応性を有すること

平面の鏡面仕上げ加工技術は図29の工程設計と結果である。この工程設計により目標達成が来ている。



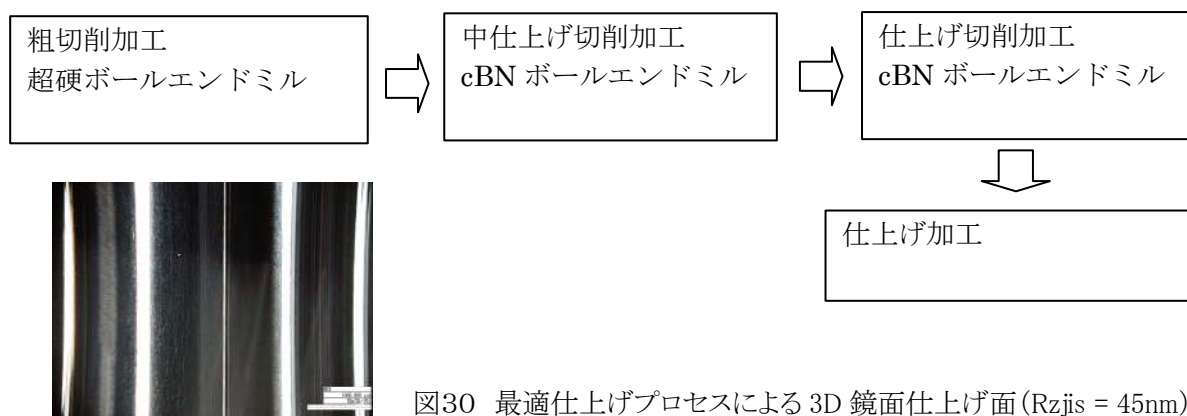
a) 仕上げ面に点状欠陥が残る未完成工法



b) 最適仕上げプロセスによる仕上げ面
($Rz_{jis} = 28nm$, $R_{max} = 49nm$)

図29 最適仕上げプロセスによる平面鏡面仕上げ面(右)

3次元形状の鏡面仕上げ加工技術は図30の工程設計と加工面結果である。



研究用ベースマシンは、駆動制御が高精度で主軸の軸受方式に油静圧方式を採用していることから、高剛性を特徴としている。この特徴を活かして、2-1-5-2. に記述した各種の仕上げ工法を最適な仕上げ加工技術の候補として研究した。

2-4. 技術の自立発展対応新システムの構築

2-4-1. 長時間安定加工技術の開発

超精密・微細金型の加工技術に関する研究成果が実践的に適応可能となるように長時間にわたり超精密安定加工が維持できるための課題解決を行い、プロジェクト終了後の自立発展環境を整備する。

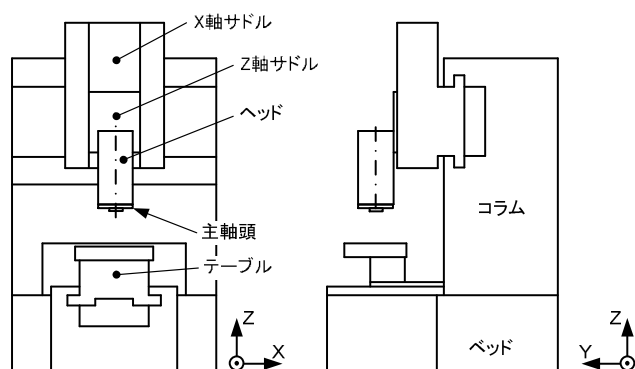


図31 研究用ベースマシン基本構造

研究開発成果

研究用ベースマシン(図31)を用いてワンマシン完結型加工プロセスを適用し超精密・微細金型の製作のために、長時間にわたり安定加工を実現するための研究課題は、a)各種工具の交換時に生じる主軸周辺の熱安定性の確保、b)長時間の加工における加工機本体の熱変形の抑制と安定化である。この課題に対し、コマツNTC(株)(加工機製作企業)、上智大学(外部調査委託研究)を交えた研究チームを形成し研究開発を進めた。

図32は10時間にわたり主軸を $30,000\text{min}^{-1}$ で回転させた際のテーブル-工具間の熱変位の測定結果である。

X方向熱変位は、主軸回転開始とともに、一方向へ約 $1\mu\text{m}$ 変位した後、緩やかに+方向へ変位している。そして、 $4\mu\text{m}$ 程度の熱変位ではほぼ安定するのは、主軸回転開始から約120分を経た後であることがわかる。

また、Y方向熱変位は、主軸回転開始とともに比較的急速に+方向に変位し、約30分後には $7\mu\text{m}$ 程度の変位量を示す。その後の主軸回転開始から約120分には、約 $5\mu\text{m}$ 程度まで減少するものの、再度緩やかに+方向へ変位する。

このため、6時間の主軸回転中には熱変位が安定しないこともわかる。Z方向では、主軸回転開始とともに極めて急速に一方向へ変位量が増加し、その後は比較的緩やかに約 $-33\mu\text{m}$ に収束する。その変位が安定するのは、X方向変位と同様に約120分を経た後である。この熱変形の主たる熱源は主軸回転に因るものと判明したことから主軸周辺の熱安定性に課題を絞り研究を進めた。有限要素法解析を用いて熱伝導・熱応力解析を行うことより、以下の結論を得た。

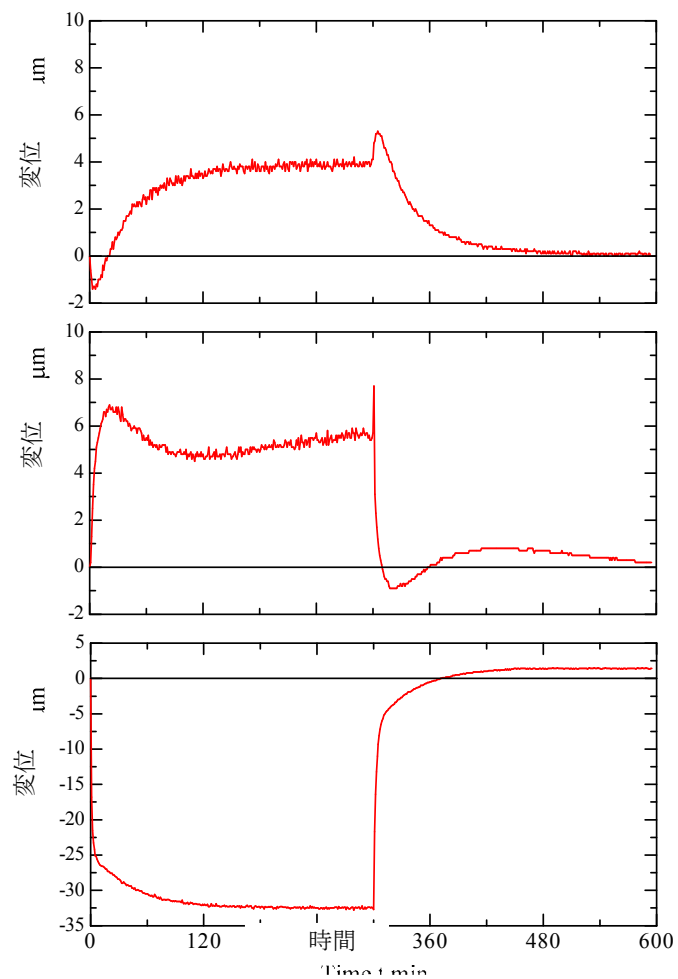


図32 初期のベースマシンの3軸方向の熱変位

- 1) 環境温度が安定している環境下では、ヘッド周囲の換気を積極的に行うなど、より広い構造表面での放熱を促進することにより効果的な冷却が行え、熱変位量のみならずその時定数を小さくすることができる。
- 2) 発熱量の抑制や冷却による直接的な対策と合わせて、加工機本体の熱対称性を損なう要因を改善することが重要である。

具体的対策の結果は、図14に示したごとく生産性向上効果と高精度安定化効果が得られた。

2-4-2. インテリジェント加工システムの構築

プロジェクト終了後において、南雲製作所単独で、生産技術者の効率向上が継続的に実行できるように社内技術の活用システムの構築に目処をつける。

研究開発成果

加工データベースの検索効率を向上させるために、データにはすべてハイパーリンクをかけて自動的に個々のコードネームでフォルダが作成される仕組みとした。このフォルダ内に加工条件・CAD/CAM データ・写真や加工データ・コメントなどの技術情報を格納しておくことで簡単に関連を有す検索情報を得る事が出来る。この研究改良を重ねたインテリジェント加工システムを活用することで、膨大な情報を書き連ねたシートからの検索が不要となり、特に、加工情報に関しては蓄積された CAD/CAM データを閲覧することでより正確な技術情報(インテリジェント加工情報)を得る事が可能となった。

3. 全体総括

3-1. 研究開発の成果および課題

3-1-1. 研究開発の成果

3カ年のプロジェクト期間において、新潟大学および日本大学の2つの研究機関との共同研究で超精密微細切削技術に関するハードウェア/ソフトウェアの両分野の加工原理の成果を吸収し、その上で新潟県工業技術総合研究所による超精密微細切削技術の周辺技術として重要な微細工具に関する体系的な技術開発の成果の技術移転を受け、更に榊有沢製作所と稲田技術士事務所からのそれぞれの得意分野での研究支援を得ることができ、結果的に下記の表に示すように1項目(生産技術者効率)を除いた全てのプロジェクト目標を達成することができた(表7、8、図33)。

表7 プロジェクトの定量目標値

技術的定量目標値	最終目標値	プロジェクト到達値	到達結果
1-3:機上工具刃先計測技術	計測精度: $\pm 0.3 \mu\text{m}$	$\pm 0.3 \mu\text{m}$	目標達成
2-2:3次元形状切削加工技術	形状精度: $\pm 0.5 \mu\text{m}$	$-0.2/+0.5 \mu\text{m}$	目標達成
3-1:平面鏡面切削加工技術	粗さ精度: $0.04 \mu\text{m}(\text{Rzjis})^*$	$0.024 \mu\text{m}$	目標達成
3-2:3次元鏡面切削加工技術	粗さ精度: $0.06 \mu\text{m}(\text{Rzjis})^*$	$0.046 \mu\text{m}$	目標達成

表8 具体金型に対する定量目標値

生産性向上目標項目	目標値	プロジェクト到達値	項目初期値
工程集約率	1/4 (2工程)	1/4 (2工程)	8工程
納期短縮率	1/4 (20時間)	1/1.9 (43時間)	80時間
コスト低減率	1/2 (45万円)	1/2.25 (40万円)	90万円
生産技術者効率	150% (40時間)	130% (46時間)	60時間



図33 金型入れ子

3-1-2. 研究開発後の課題

3カ年にわたる研究プロジェクト活動の結果、超精密で微細形状を有する金型の加工技術の基盤技術形成ができたと言える。また、共同研究を実施した県内の新潟大学、新潟県工業技術総合研究所、また日本大学との太いパイプも形成できた。更には、共同研究者以外の研究協力企業(コマツNTC(株)、ユニオンツール(株)、永田精機(株))や私立大学(上智大学)との研究協力の展開により、南雲製作所が独自で関連機関や民間企業との産学官連携活動を運営する能力もレベルアップができたといえる。

今後の課題は、グローバルな競争におけるスピードが最重要項目として挙げられる。このためには、情報の収集能力、即ち、アンテナ感度とその内容の感知・判断力とその内容に対してスピーディーに行動し結果を出す行動の集中力のレベルアップが課題と言える。

3-2. 事業化展開

ワンマシン完結型加工研究開発による事業化に関しては初期の「情報家電向け多機能光学シート用金型」の需要が望めなくなった現在、本プロジェクトの成果を他の分野に展開をしてゆかなければならない。

研究用ベースマシン及び関連設備、関連技術の秀でた特徴として下記の5項目が挙げられる。

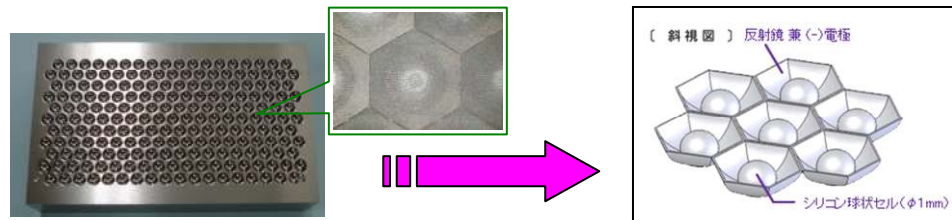
1. 粗加工から研磨加工まで一貫加工が出来る
2. 高速・高負荷加工が出来る
3. 加工精度がサブミクロンを期待できる

4. 超硬金属の加工が出来る
5. 長時間安定加工が出来る

このように卓越した超精密微細切削加工システムの基盤技術が開発でき、研究活動期間における広報活動の効果により平成 22 年の初期時点で下記 5 項目に関する研究試作の打診を受けている。したがって、本研究の活動終了後は下記の事業化ターゲットを狙って研究開発を進め、商品化へと進めてゆきたい。(本研究設備は量産加工、営業用を使用することは今すぐには出来ないため)

<事業化ターゲット候補案>

1. 太陽光発電用球状セル金型の開発 (図 3 4)
2. 超硬ディンプル型パンチ加工 (S R0.2500 凹型形状) 図面有り
3. 超硬リフター・パンチ、ダイ加工 (凹及び凸型形状) 図面有り
4. 超硬超精密型パンチ加工 (角 R0.1、0.2 凹形状) 図面有り
5. LED 指向性セル用金型の開発



高効率反射ミラー研究用模擬金型

高効率反射ミラー解説図 (出典元:CV21 の HP)

図34 マイクロディンプルパターンを応用した切削技術高度化の想定事業案

専門用語の解説

ワンマシン完結型加工プロセス：

複数の加工機と工程で製作される従来の金型製作加工プロセスを、1 台のマシニングセンタで加工を完結させることを研究目標とした加工プロセスの呼称。

テクスチャー：語源は布地のテキスタイルから出たとされる技術用語で、見栄え（視覚）や肌ざわり（触覚）の状態を表面の形状で表現した面をテクスチャー面と呼ぶ。

ツールパス：

工具経路。NC 工作機械では工具と工作物の相對運動を工作物が固定されていると考え、工具の動きで加工を指示する。この工具の移動軌跡をツールパス（工具経路）という。

バリ：

切削加工などの機械加工において、工具が工作物から離脱する際に工作物の切り残しが刃先の応力によって塑性変形することにより、加工部のエッジ近傍に発生する小さな突起物のこと。

c BN 工具：

Cubic Boron Nitride の頭文字で構成された工具材料。ホウ素と窒素からなる六方晶系窒素ほう素粉末にコバルトなどの金属や炭、酸化物（TiC、TiN、Al₂O₃）などを添加、超高压、高温で焼結した人工合成材料。ダイヤモンドに次ぐ硬さ（Hk4、700）、熱伝導率（1.3kW/m・k）を有する工具で、鉄鋼、ニッケルやコバルト系スーパーアロイなどの切削材料として用いられる。

プリハードン鋼：

中程度に焼入れ処理が成された鋼材で、射出成形用金型材などに採用される。一般鋼材の場合などでは、金型や精密部品などの耐久性能を向上させるために切削加工後に焼入れ処理を行い、その後に研磨仕上げを行うが、射出成形用金型鋼材などの場合には、プリハードン鋼材を採用することで、熱処理を省略し切削加工のみで金型製作が完了できるのでコスト低減と熱変形の回避が可能となる。

スカ이프研磨：

スカ이프とは鋳鉄円板（定盤）のことを指し、スカ이프研磨はダイヤモンド工具の刃先に切れ刃を形成するときに多く使用される鋳鉄研磨盤とダイヤモンド砥粒を用いる研磨工法。

時定数：

工学や物理学で用いられる学術用語で、対象システムの時間に対する特性や性質を示す指標。本研究では、加工機の熱変形の時間的応答性について解説している。

Haze 評価

透明フィルム物性の一つで、不透明になる曇りの現象のこと。曇り度として%で数値表示します。数値が低い方が投影時の明度が高いことを示します。