

平成28年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高機能薄膜製造における高粘度スラリー液用極低脈動移送ポンプの開発」

研究開発成果等報告書

平成29年3月

担当局 近畿経済産業局

補助事業者 公益財団法人滋賀県産業支援プラザ

目 次

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
- 1－2 研究体制
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
- 1－3 成果概要
- 1－4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 【1】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研削加工技術の開発
 - 【1－1】工法の立案と設備導入
 - 【1－2】専用砥石の開発と研削条件の検討
 - 【1－3】MQL (Minimum Quantity Lubrication) 研削工法の開発
- 【2】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研磨加工技術の開発
 - 【2－1】新工法の立案と試加工および評価
 - 【2－2】設備仕様検討と導入
- 【3】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度計測技術の開発
 - 【3－1】新測定方法のシステム構成の立案
 - 【3－2】設備の仕様検討と導入および評価
- 【4】試作ローター・ステーターによるポンプ脈動の解析と測定装置の開発（実機評価）
 - 【4－1】ローター・ステーターの挙動解析および部品精度と脈動率との関係のシミュレーション
 - 【4－2】脈動率と塗工性能との実機評価

第3章 全体総括

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) 研究開発の背景・研究目的

機能性高分子フィルムはベース材フィルムにコーティング・蒸着などの表面処理やラミネート等の二次加工、またはベースフィルム自体の高機能化やハイブリッド化等により、機能を付加したフィルムであり、エレクトロニクス、エネルギー、自動車、包装など多岐な分野で応用されている。

高機能フィルムや電子材料分野等の薄膜塗工工程で用いる移送ポンプは、薄膜の高機能化や高品質化に対応すべく、脈動率の大幅な低減が求められている。また、沈降性スラリーや高粘度液など難移送材料の定量移送の実現が求められている。

そこで、本研究開発では、耐摩耗性、化学安定性に優れたアルミナセラミックスの精密研削、研磨、計測技術を確認し、当該材料を主要部材に用い、脈動率が±1%以下である極低脈動移送ポンプを開発する。

(2) 研究目標

特種ハイポサイクロイド曲面を持つアルミナセラミックスの精密研削、研磨、計測技術を確認し、脈動率が±1%以下である極低脈動移送ポンプを開発することが本研究開発の最終目標である。この目標を達成するために、下記のサブテーマ1～4を定めて、研究開発を推進した。

【1】「特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研削加工技術の開発」では、特殊ハイポサイクロイド曲面を高精度に研削加工するための工法と工具を開発し、加工条件を最適化させて、加工精度として、径の誤差 ±0.005mm、偏心量の誤差 0.05mm 以下 を達成する。

【2】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研磨加工技術の開発」では、電子ビーム加工またはレーザー加工を用いて、特殊ハイポサイクロイド曲面の面性状を高精度化する方法を開発し、面粗度 Ra 0.6 かつ Rmr(10%) 30% を達成する。

【3】「特殊ハイポサイクロイド曲面高精度計測技術の開発」では、レーザープローブ方式を利用して、±0.001mm の測定精度で、多点かつ輪郭度の計測が可能な高精度ローター計測方法を開発する。

【4】「試作ローター・ステーターによるポンプ脈動の解析と測定装置の開発（実機評価）」では、流体-構造の連成解析による脈動率を予測するために、流体-構造の連成解析によりシミュレーションを行う。また、【1】～【3】の成果を応用して、ステーター用中子の高精度加工および計測技術を開発し、高精度ステーターの開発を行う。

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

補助事業者 公益財団法人滋賀県産業支援プラザ		
	間接補助	ヘイシンテクノベルク株式会社
	間接補助	兵神装備株式会社
	間接補助	中川加工技術研究所
	間接補助	滋賀県(工業技術総合センター、東北部工業技術センター)

事業管理機関：滋賀県産業支援プラザ

氏 名	所属部署・役職
田中 勝晴	連携推進部 部長
篠原 弘美	連携推進部 ものづくり支援課 課長
福井 浩成	連携推進部 ものづくり支援課 主幹

研究開発機関：ヘイシンテクノベルク株式会社

氏 名	所属部署・役職
槇山 正	製造部 上席副部長
長谷川 佳秀	製造部 部品製造グループ 生産技術チーム 課長
友田 賢志	製造部 部品製造グループ 生産技術チーム 技師長
吉田 光次郎	製造部 部品製造グループ 機械加工チーム
北村 祐喜	製造部 部品製造グループ 機械加工チーム

研究開発機関：兵神装備株式会社

氏 名	所属部署・役職
上辻 英史	技術部 基本設計・開発グループ 副部長
榊原 教晃	技術部第2グループ エンジニアリング第2チーム 課長 リームリーダー
森田 剛志	技術部 基本設計・開発グループ R&S 設計・開発チー ム 課長補佐
香水 憲司	技術部 基本設計・開発グループ 本体設計・開発 第 1 チーム 係長

研究開発機関：中川加工技術研究所

氏 名	所属部署・役職
中川 平三郎	所長

研究開発機関：滋賀県（工業技術総合センター・東北部工業技術センター）

氏 名	所属部署・役職
今田 琢巳	滋賀県工業技術総合センター 主査
今道 高志	滋賀県東北部工業技術センター 専門員
水谷 直弘	滋賀県東北部工業技術センター 主査

協力者：アドバイザー

氏 名	所属部署・役職
帯川 利之	国立大学法人東京大学 生産技術研究所 先進ものづくりシステム連携研究センター長 教授
山路 伊和夫	国立大学法人京都大学大学院 工学研究科 技術部 室長
藤田 和彦	東レエンジニアリング株式会社環境エネルギー事業部 技術部長
千本木 紀夫	J X エネルギー株式会社潤滑油カンパニー潤滑油販売部 工業用潤滑油グループ

1－3 成果概要

3年間の主な取り組みと結果の概要は以下の通りである。

【1】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研削加工技術の開発

特殊ハイポサイクロイド曲面は基準面を持たない自由曲面であるため、既存の研削方法では形状を創成できない。そこで特殊ハイポサイクロイド曲面の創成に特化した軌跡（ローターと工具との相対運動のパターン）を立案し、 $\pm 1\mu\text{m}$ 以内の運動精度を持つ工作機械をベースマシンとして、立案した相対運動軌跡の動きと研削加工が可能な機械設備を導入した。特殊ハイポサイクロイド曲面を高精度に研削加工するための工法、工具、研削装置を開発し、加工条件を最適化させた。

その結果、アルミナ製の実ワーク（型式3N10：断面径10mm）の研削加工を実施し、ワーク個々の加工精度「径の誤差 $\pm 0.005\text{mm}$ 、偏心量の誤差 0.05mm 以下」を達成した。

【2】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研磨加工技術の開発

磁気研磨、レーザー研磨（PLG：Pulse Laser Grinding）、電子ビーム加工の設備仕様の立案と導入を行い、特殊ハイポサイクロイド曲面の面性状を高精度化するための加工検証実験を実施した。

その結果、アルミナおよびジルコニアの材料に研磨加工を行い面粗度Ra0.6達成した。Rmrの評価については継続取組とする。

【3】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度計測技術の開発

レーザープローブ方式を利用した $\pm 0.001\text{mm}$ の測定精度で多点かつ輪郭度の計測が可能な装置を、特殊ハイポサイクロイド曲面研削装置に搭載し、特殊ハイポサイクロイド曲面の多点かつ輪郭度の計測と評価を実施した。

その結果、 $\pm 0.001\text{mm}$ の測定精度で、多点かつ輪郭度の計測が可能な機上計測システムを実現した。

【4】試作ローター・ステーターによるポンプ脈動の解析と測定装置の開発（実機評価）

ステーターとローターの挙動を正確に解析するために、流体－構造の練成解析が可能なソフトウェアの導入を行った。また、塗工性能の評価のため、「タッチパネルのOCR樹脂塗布」に実際に使用されている塗布機をベースにした、精密薄膜塗布可能な「脈動評価装置」を導入した。

解析ソフトによるシミュレーションを継続し、サブテーマ【1】【2】【3】の成果物である精密ローターおよびステーターを用いて、脈動評価装置で、脈動率の実機評価を行った。

その結果、高機能薄膜製造における高粘度スラリー液用極低脈動移送ポンプとして有用となる、脈動率0.6%を達成する見込みがあることを確認した。本研究の結果、あらたな課題として、4周期/回転の正弦波の脈動が含まれていることが判明したので、継続取組とする。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人 滋賀県産業支援プラザ

〒520-0806 滋賀県大津市打出浜2番1号 コラボしが21内

TEL：077-511-1414 FAX：077-511-1418

連携推進部 ものづくり支援課 主幹 福井 浩成

E-mail：fukui@shigaplaza.or.jp

【研究開発機関】

ヘイシンテクノベルク株式会社

〒529-0261 滋賀県長浜市高月町東物部1020

TEL：0749-85-5538 FAX：0749-85-5953

製造部 上席副部長 槇山 正

E-mail：Tadashi_Makiyama@mohno-pump.co.jp

第2章 本論

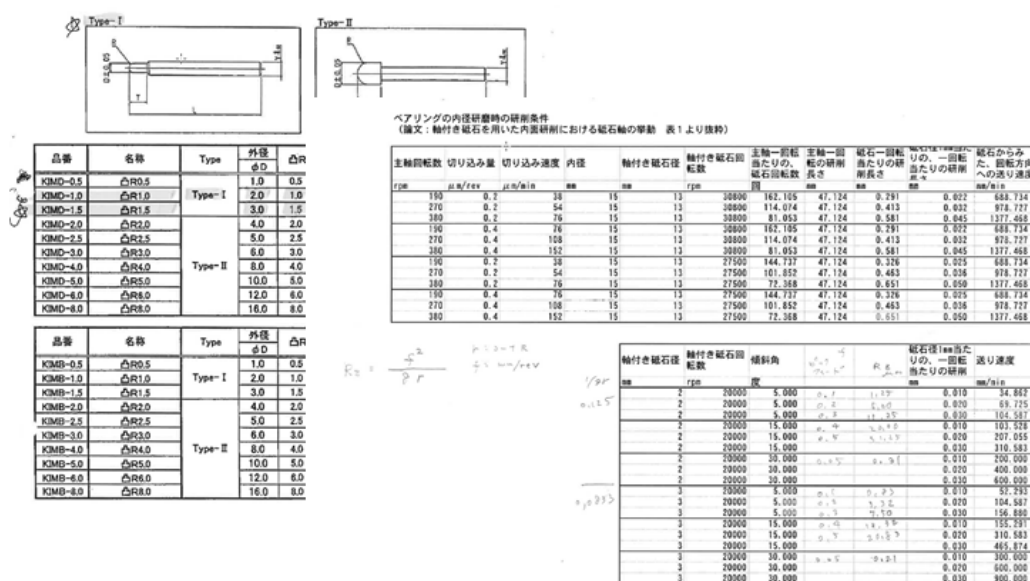
【1】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研削加工技術の開発】

下記について検討を進め、特殊ハイポサイクロイド曲面を高精度に研削加工するための工法と工具を開発し、加工条件を最適化させて、加工精度「経の誤差 ±0.005mm、偏心量の誤差 0.05mm 以下」を達成する。

【1-1】工法の立案と設備導入

i) 事前試験

設備の仕様検討に先立ち、事前試験を実施してツーリングの妥当性について検討を行った。その結果、ダイヤモンド軸付砥石を使った研削加工により、円筒形状のアルミナセラミックスのワークを精度良く加工することができる可能性を見出した。事前試験での実験条件と結果の概要を以下に示す。



TCISE3-100

2014/03/18

TCISE3-100

2014/03/18

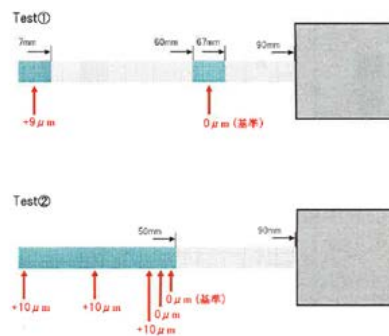
高速高精度加工 YASDA YBM 640V Ver.Ⅲ+RS20



機 械 : YASDA YBM 640V Ver.Ⅲ+RS20
加工物 : テストピース
被 削 材 : アルミナ(1200~1400HV)
加工物寸法 : φ6×120(mm)
使用工具 : 電着砥石
加工液 : オイルミスト(MQL)
高速加工 : YASDA HAS-3 システム

測定結果

加工機 : YASDA YBM640V Ver.Ⅲ+RS20



※測定値は線上にてテストインジゲータで測定した値

加工工程	使用工具	主軸回転数 (rpm)	送り速度 (mm/min)	加工加工時間 (min)
Test①	R1.0 電着砥石 #140	20000	60	33.8
Test②	R1.0 電着砥石 #140	20000	120	113.4

ii) 設備の仕様検討

事前試験の結果に加え、共同研究者である中川平三郎氏のアドバイスを経て、様々な実験、研究が可能となるような仕様を考案し、設備の仕様を練り上げた。下図はアドバイスの一例を示す。

iii) 設備の導入

H26年3月2日にヘイシンテクノベルク株式会社 滋賀事業所への設備の据付と立ち上げを実施した。

【1－2】専用砥石の開発と研削条件の検討

i) 補助事業の具体的内容

研削砥石の仕様（材質、形状、精度、加工条件）を検討し試作を完了した。実機導入までの間、実ワークに近い径と長さをもつ基礎実験専用の円筒状のワークに対し、今田氏と基礎実験を行った。研削条件（砥石の種類、周速、送り量、切り込み量、軌跡、切削液）を変化させて、研削条件と砥石仕様の方針を決めた。実機による検証実験を継続し、砥石の仕様と研削条件、加工精度との関係を明らかにするためのデーターを積み重ねる。本研究はアドバイザーである京都大学・山路氏に助言を頂きながら進める。

ii) 重点的に実施した事項

特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研削加工装置」を開発し、「専用砥石」「最適研削条件」を導入して、アルミナ製ローター（実ワーク）の実機での検証実験と評価を行った。

対象ワーク型式3N10、断面直径10mm、ワーク長さは3段とした。

サブテーマ4、ポンプの脈動の実機評価で使用するために、良品を5本製作することを目標に、実加工に取り組んだ。

今回は、基礎実験で得られた条件である、半径方向0.03mmの切り込みで、荒加工も仕上げ加工も実施することとしたが、将来的には、荒加工用の工具、条件を整えることで、全体の加工時間の短縮を図ることができる。

研削加工装置にて、実ワークを加工している様子を下図に示す。



実ワークを研削加工している様子

従来品と研削加工品との寸法精度の違いについて、既存の実績のある測定機を用いて測定した結果の一部を示す。測定値は、本研究で重要となる偏心量を取り上げ、下表に示す。従来品と比較して、精度が1桁向上しており、研究開発の目標値を大幅にクリアしていることがわかる。

ｼﾘｱﾙ	偏心1	偏心2	偏心3	偏心4	偏心5	偏心6	
1	1.9824	1.9850	1.9855	1.9873	1.9846	1.9830	
2	1.9566	1.9597	1.9613	1.9647	1.9586	1.9656	
3	1.9575	1.9599	1.9613	1.9622	1.9637	1.9641	
4	1.9607	1.9594	1.9601	1.9634	1.9614	1.9631	
5	1.9539	1.9590	1.9633	1.9608	1.9619	1.9633	
	1.982	1.985	1.986	1.987	1.985	1.983	
	1.954	1.959	1.960	1.961	1.959	1.963	
	0.028	0.026	0.025	0.026	0.026	0.020	←従来品
3-2	1.9995	1.9994	1.9995	1.9976	1.9988	1.9989	
3-4	1.9985	1.9999	1.9993	1.9963	1.9991	2.0026	
4-1	1.9978	1.9994	1.9999	2.0009	1.9990	1.9993	
4-2	1.9993	1.9998	1.9990	2.0001	1.9987	1.9988	
4-3	1.9987	1.9991	1.9997	2.0003	1.9973	1.9993	
	1.999	2.000	2.000	2.001	1.999	2.003	
	1.998	1.999	1.999	1.996	1.997	1.999	
	0.002	0.001	0.001	0.005	0.002	0.004	←開発品

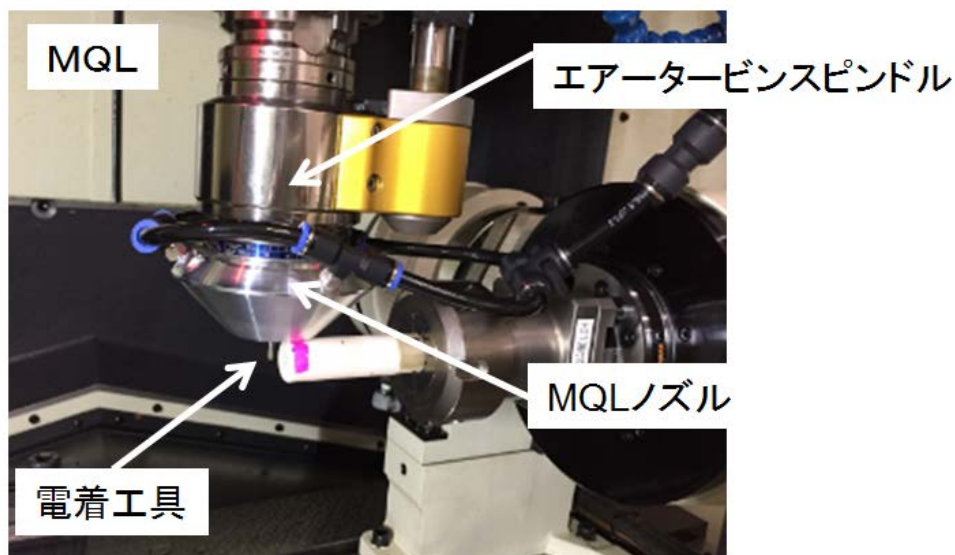
【1－3】MQL（Minimum Quantity Lubrication）研削工法の開発

i）補助事業の具体的内容

高精度加工では研削液の噴射圧力による工具の振動や、研削液の熱による熱変位が加工精度を悪化させる原因となる。また環境面からも研削液の大量使用は好ましくない。MQLは近年実用化が進む油剤削減を可能とする加工技術であり、微量量の潤滑液をエア等で刃先に吹き付ける加工液供給方法である。ノズルの設計と製作を実施し、研削加工実験を行った。

ii）重点的に実施した事項

MQL加工がアルミナの研削加工において有用であること確認し、実ワークにおいて工具先端に微量量の切削油剤を確実に導くためのノズル装置を開発し、実用化した。さらに研削加工テストを実施し、水溶性クーラントによる加工との比較評価を実施した。

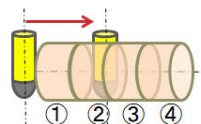


エアタービンスピンドルにMQL専用ノズルを装着し、研削加工を実施している様子

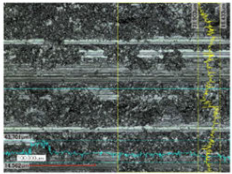
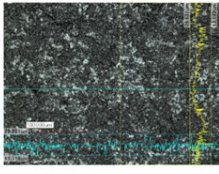
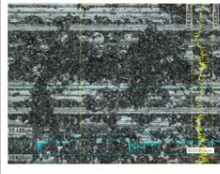
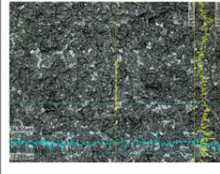
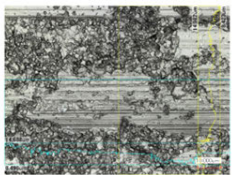
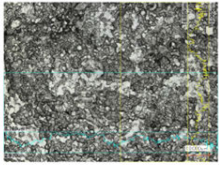
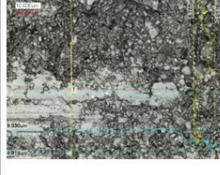
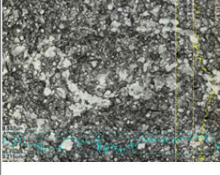
加工面の観察結果を以下に示す。

1. 加工面

上段1000倍 中段1500倍



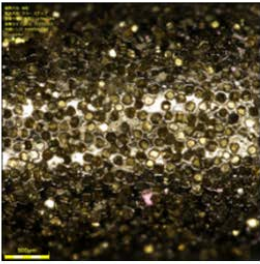
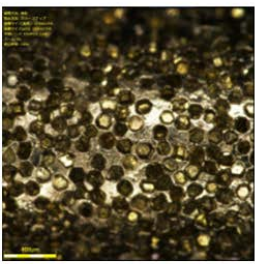
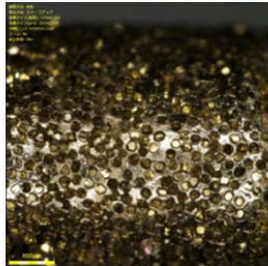
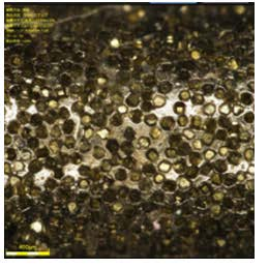
評価機器:キーエンス レーザ顕微鏡
東京精密 表面粗さ計

MQL①	クーラント②	MQL③	クーラント④
			
			
結晶粒が見える脆性モードと延性モードが窺える。延性部は平滑。	結晶粒が見える脆性モードのみ。細かな振幅の波形。	結晶粒が見える脆性モードと延性モードがうかがえる。	結晶粒が見える脆性モードのみ。細かな振幅の波形。

加工後の、工具表面の観察結果を以下に示す。

2. 加工工具

評価機器:オリンパス マイクロスコープ

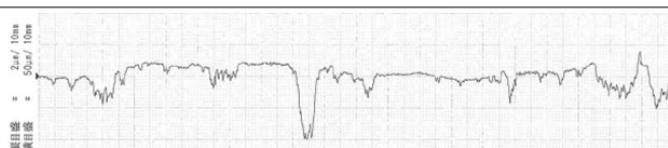
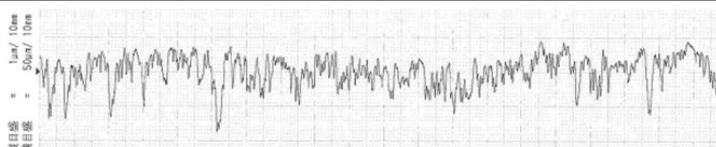
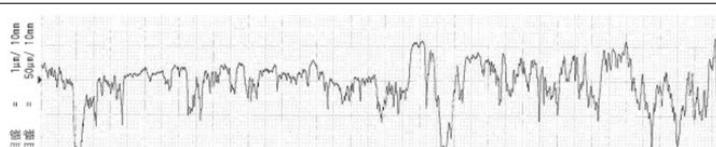
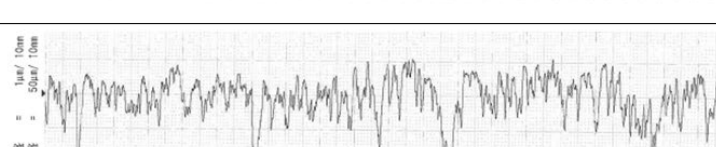
MQL①	クーラント②
	
MQL③	クーラント④
	

→MQL、クーラント共に異常な摩耗などは見受けなかった。

ワークの表面粗さの工具軸送り方向および円周方向の測定結果を以下に示す。

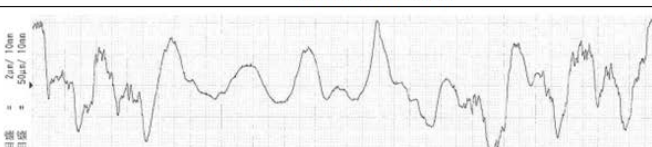
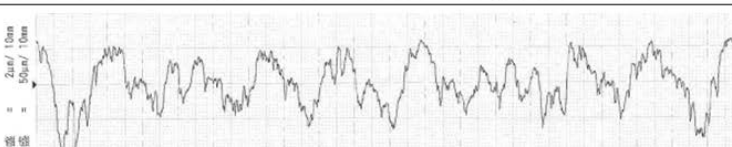
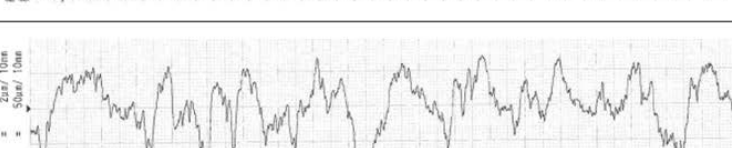
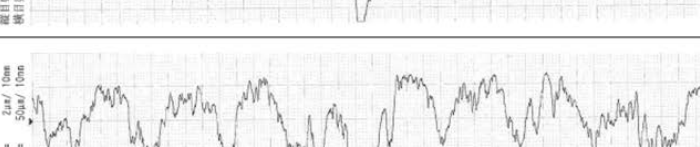
表面粗さ測定結果(工具軸送り方向)

評価機器:東京精密 表面粗さ計

水準	表面粗さ	表面粗さ曲線
MQL①	Ra 0.43 μ m <u>Rz</u> 3.13 μ m	
クーラント②	Ra 0.31 μ m <u>Rz</u> 2.18 μ m	
MQL③	Ra 0.41 μ m <u>Rz</u> 2.78 μ m	
クーラント④	Ra 0.41 μ m <u>Rz</u> 2.84 μ m	

表面粗さ測定結果(円周方向)

評価機器:東京精密 表面粗さ計

水準	表面粗さ	表面粗さ曲線
MQL①	Ra 1.22 μ m <u>Rz</u> 6.40 μ m	
クーラント②	Ra 1.02 μ m <u>Rz</u> 5.55 μ m	
MQL③	Ra 1.11 μ m <u>Rz</u> 6.38 μ m	
クーラント③	Ra 1.14 μ m <u>Rz</u> 5.51 μ m	

本実験結果のまとめと気づきは以下のとおりである。引き続き、加工実験を継続するとともに、実ワークへの適用を推進する。

まとめ・気づき

1. MQL、クーラント共に電着砥石に異常な摩耗や目詰まりなどは見受けなかった。
2. MQLでの加工面は結晶粒が見える脆性モードと延性モードが窺えた。延性部は平滑な面を得やすい。どちらのモードも正常な加工である。
3. 表面粗さにおいて数値としてはMQL、クーラントで大差はないが曲線に差がある。
工具軸方向でのMQL加工面は結晶粒が表に現れている個所が少ない為山方向への波形が少ないが欠けによる凹が時折みられる。
4. 円周方向の断面曲線は加工ピッチが現れていることを確認した。
MQLは加工モードが交錯する為かRzが大きくなる様に考える。

➡ MQLが研削加工にも有効である出来ることを確認した。

MQL加工は、刃先の潤滑と冷却の課題に対する解決方法の一つである。本研究開発では、刃先への切削液の供給方法の一つとして、近年注目されているファインバブルを含有したクーラントによる、アルミナ研削における効果の検証実験を行った。実験は主に、滋賀県工業技術総合センター内にて実施した。以下に、実験の概要、方法、結果を示す。

実験の概要

アルミナセラミックスの高精度・高能率な研削加工技術の確立を目的に、ファインバブル含クーラントを用いて、砥石の目詰まりを抑制し、仕上げ面品質の向上効果について検証する。

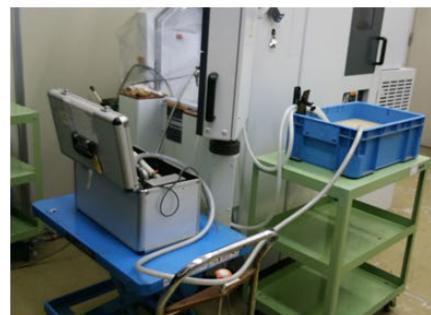


DMG森精機製NVD1500



ダイヤモンド
電着工具

ワーク：アルミナセラミックスブロック材
工作機械：金型加工用マシニングセンタNVD1500
主軸：・マシニングセンタ主軸（24,000min⁻¹仕様）
・エアタービンスピンドルRBX12(HSK-E32)
（120,000min⁻¹仕様）
工具：R1.5ボール型ダイヤモンド電着工具
（SR1.5#120集中度75突出し量50μm）



ファインバブルを用いた研削実験

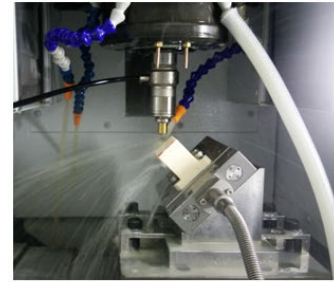
実験方法

<実験①：目詰まり抑制効果の比較検証>

新品工具を用い、アルミナブロックを45° 傾斜し、
①通常クーラントあるいは②ファインバブル含クーラントを噴射しながら、3面加工（約50m）した。
尚、1面加工毎に表面粗さ測定を行い、加工後の工具表面の目詰まりを比較観察をした。

<研削加工条件>

$N_s=10,000\text{min}^{-1}$, $F=1500\text{mm/min}$, 研削方法：45° 傾斜研削,
工作物高さ方向の切込み量：0.035mm, ピック方向切込み量0.071mm,
駆け上がりDowncut, ①通常クーラント②ファインバブル含クーラント



①通常クーラント

<実験②：表面粗さ改善（追加実験）>

工具バラツキの影響をなくすため、1本の電着工具を用い、ピック方向の送り量が7.5mm毎に、①通常クーラント②ファインバブル含クーラントを切替え加工した。加工時の研削抵抗の測定および加工面の表面粗さ測定を実施した。

<研削加工条件>

$N_s=100,000\text{min}^{-1}$, $F=1500\text{mm/min}$, 研削方法：45° 傾斜研削,
工作物高さ方向の切込み量：0.018mm, ピック方向切込み量0.035mm,
駆け上がりDowncut ①通常クーラント ②ファインバブル含クーラント



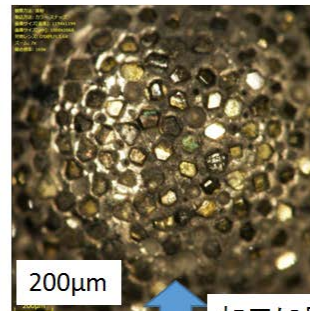
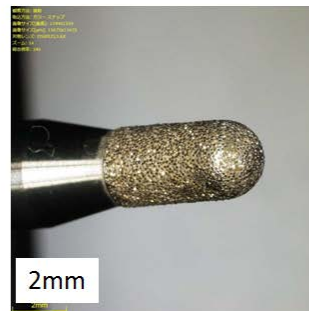
②ファインバブル含クーラント

実験結果

実験①：工具観察

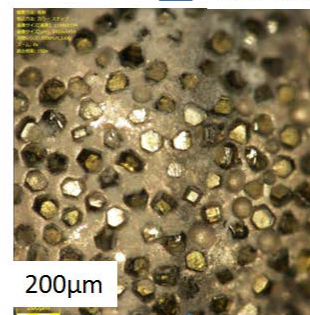
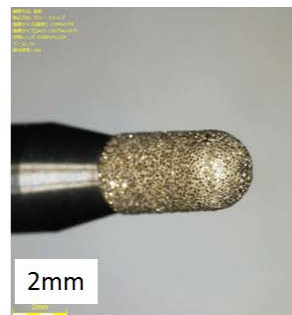
砥石仕様：SR1.5#120集中度75突出し量50μm

①通常クーラント 3面加工後



加工に用いた砥石付近

②ファインバブル含 クーラント 3面加工後



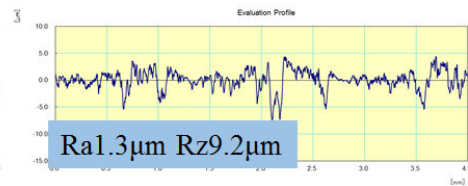
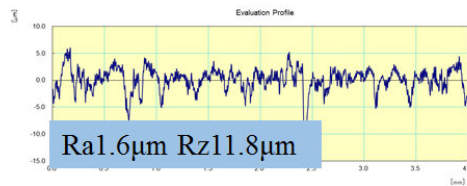
加工に用いた砥石付近

■ 実験①：表面粗さ測定結果_工具送り方向

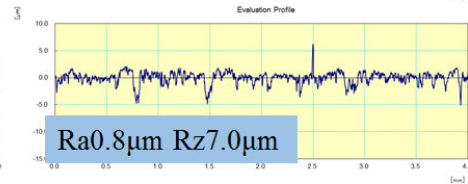
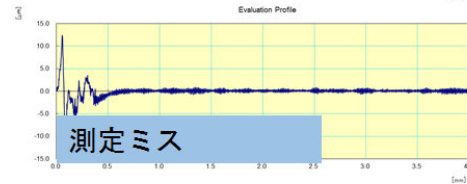
①通常クーラント

②ファインバブル含クーラント

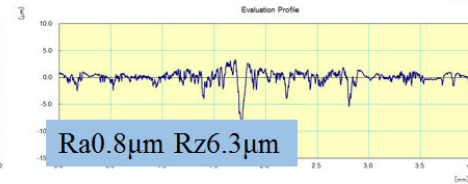
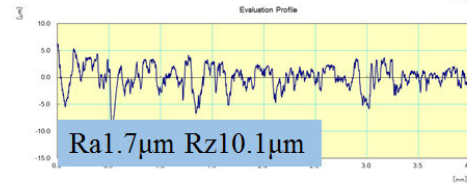
1面加工後
($L=16\text{m}$)



2面加工後
($L=32\text{m}$)



3面加工後
($L=48\text{m}$)



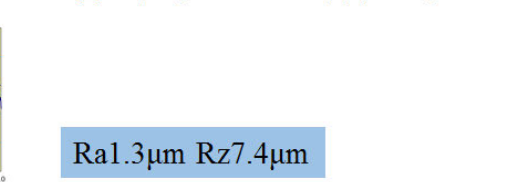
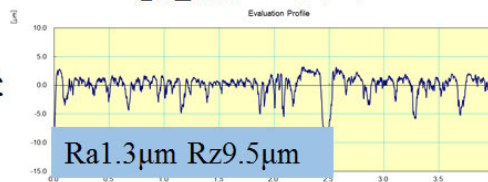
通常クーラントに比べ、ファインバブル含クーラントの方が、表面粗さがやや良好。通常クーラントは脆性的な加工が支配的。

■ 実験①：表面粗さ測定結果_ピック方向

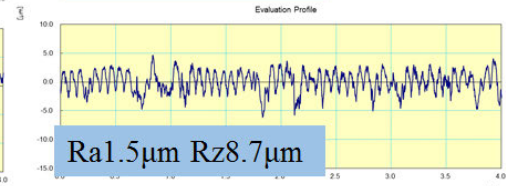
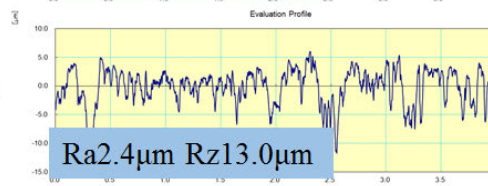
①通常クーラント

②ファインバブル含クーラント

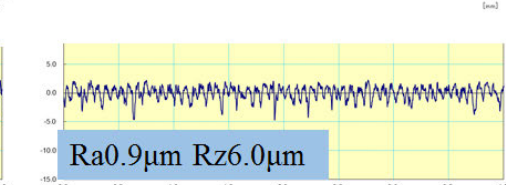
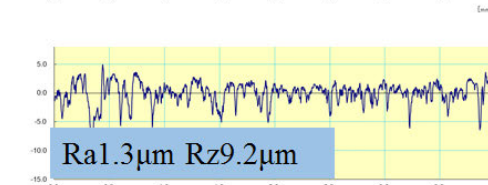
1面加工後
($L=16\text{m}$)



2面加工後
($L=32\text{m}$)



3面加工後
($L=48\text{m}$)



工具送り方向と同様にピック方向も、ファインバブル含クーラントの方が表面粗さがやや良好。

※ただし、従来の実験結果に比べ表面粗さが各段に悪い。
電着工具のバラツキの影響？ → 追加実験を実施

実験②：表面粗さ測定結果_工具送り方向（同一工具で比較）

通常クーラント
0-7.5mm



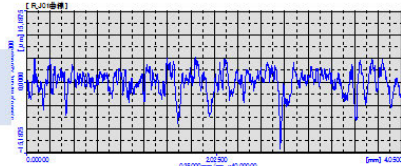
ファインバブル
含クーラント
7.5-15mm



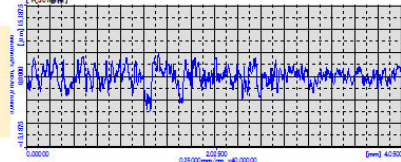
通常クーラント
15-22.5mm



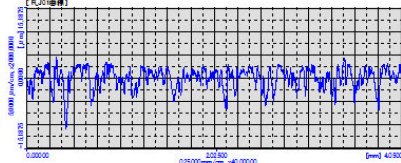
ファインバブル
含クーラント
22.5-30mm



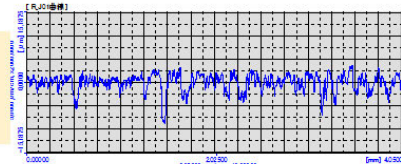
Ra2.0 μ m
Rz13.8 μ m



Ra1.5 μ m
Rz8.8 μ m



Ra1.7 μ m
Rz10.7 μ m



Ra1.4 μ m
Rz9.2 μ m



同一工具を用いて、ファインバブルによる効果を検証した結果、通常クーラントに比べ、ファインバブルによる加工面が良好。

※ただし、従来加工面に比べ、表面粗さは悪い。

実験②：表面粗さ測定結果_工具送り方向（同一工具で比較）

通常クーラント
0-7.5mm



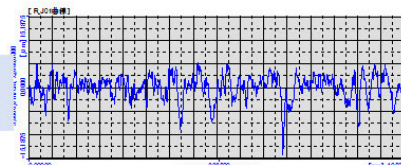
ファインバブル
含クーラント
7.5-15mm



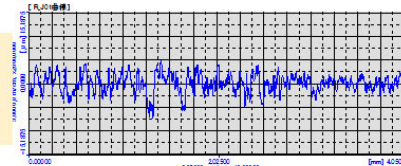
通常クーラント
15-22.5mm



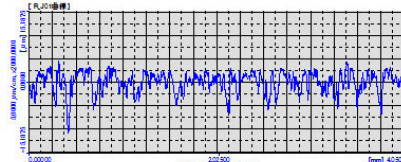
ファインバブル
含クーラント
22.5-30mm



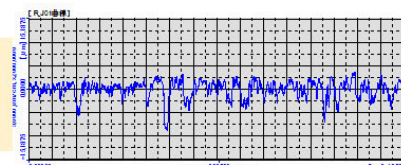
Ra2.0 μ m
Rz13.8 μ m



Ra1.5 μ m
Rz8.8 μ m



Ra1.7 μ m
Rz10.7 μ m



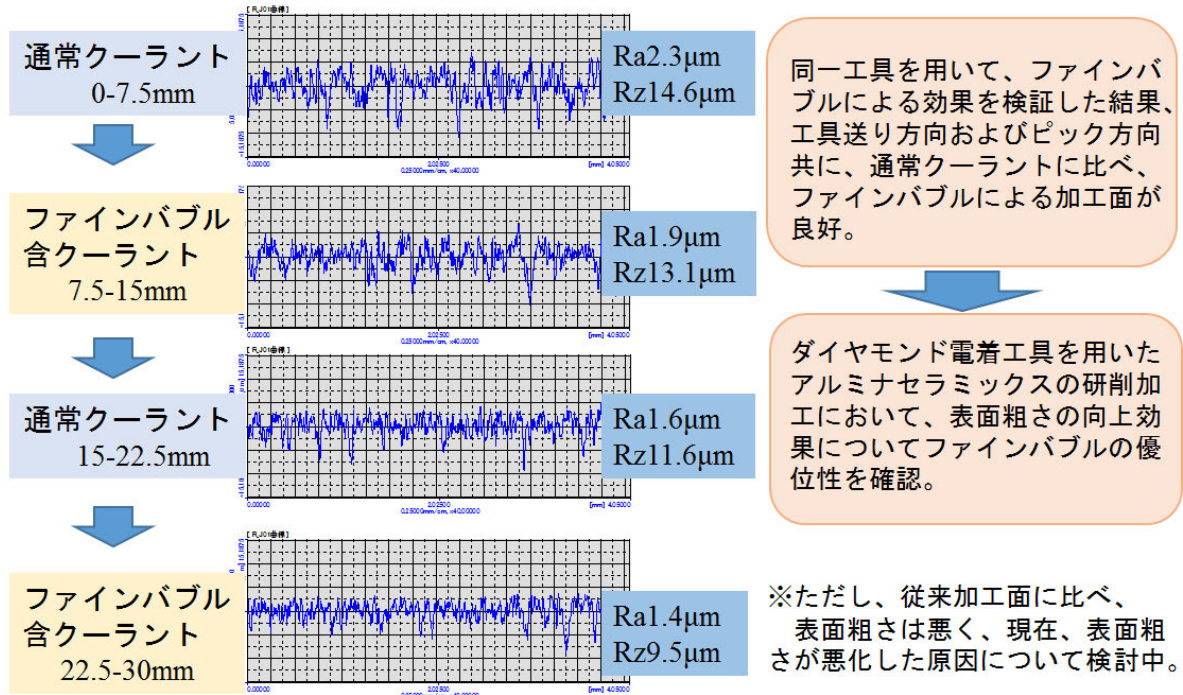
Ra1.4 μ m
Rz9.2 μ m



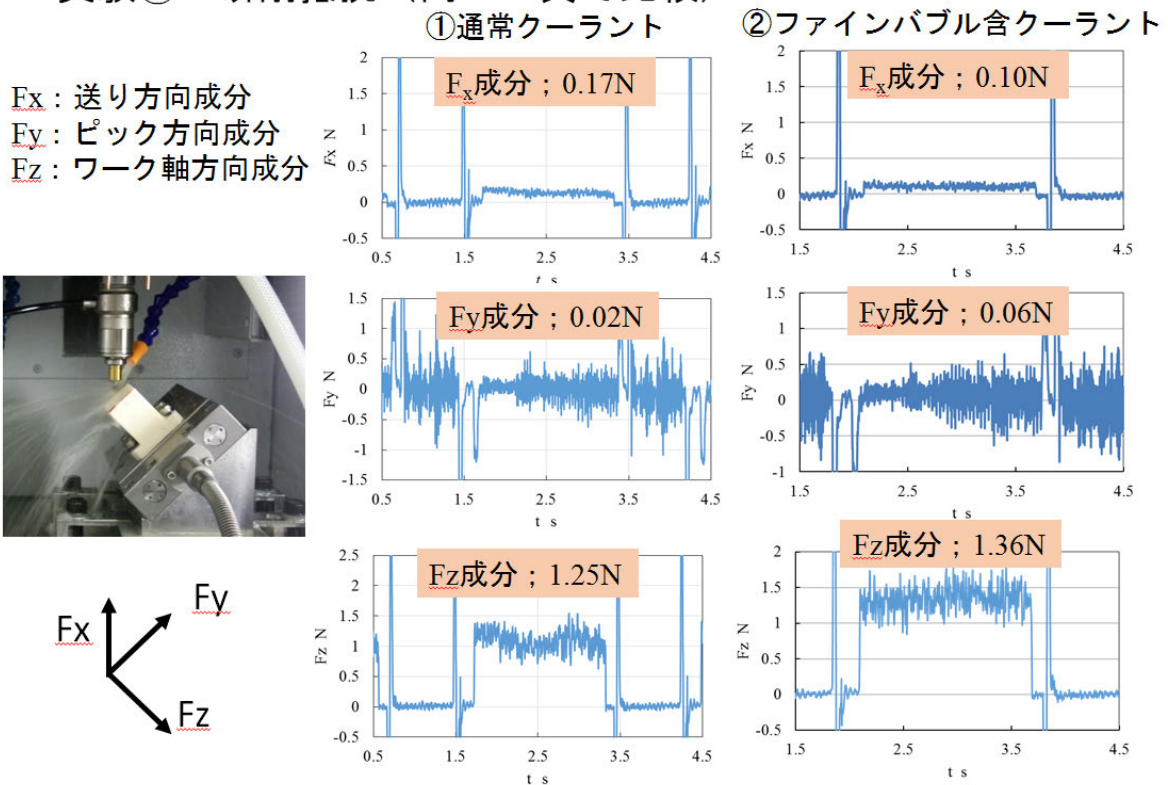
同一工具を用いて、ファインバブルによる効果を検証した結果、通常クーラントに比べ、ファインバブルによる加工面が良好。

※ただし、従来加工面に比べ、表面粗さは悪い。

実験②：表面粗さ測定結果_ピック方向（同一工具で比較）



実験②：研削抵抗（同一工具で比較）



■ ファインバブルによる切りくず浮上分離効果



ファインバブルを用いて研削加工後の
クーラントタンク写真

マイクロバブルが切りくずを吸着しながら浮上。
クーラント液面にアルミナ研削屑が浮遊し切りくず分離回収が
容易となる可能性がある。

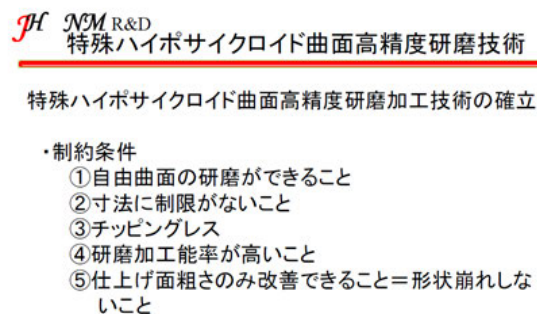
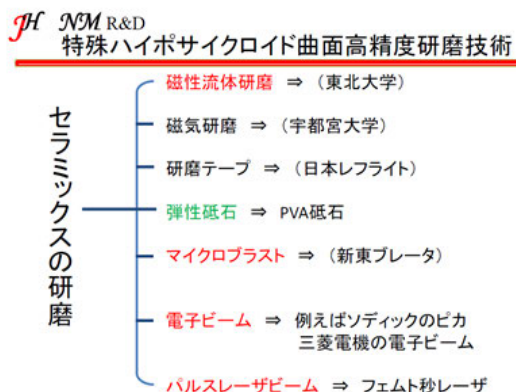
※今後、タンク浮遊物のSEM観察・EDX分析を実施予定

【2】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研磨加工技術の開発】

磁気研磨、レーザー研磨（PLG：Pulse Laser Grinding）、電子ビーム加工の実験と設備導入を行い、特殊ハイポサイクロイド曲面の面性状を高精度化する方法を開発し、「面粗度 Ra 0.6 かつ Rmr(10%) 30%」を達成する。

【2-1】新工法の立案と試加工および評価

中川平三郎先生より実現可能な工法の候補と、特殊ハイポサイクロイド曲面を加工するための制約条件について、検討、立案していただいた。



中川先生による、工法検討および助言

その結果、実現可能性の高い工法として、①磁気研磨、磁性流体研磨 ②パルスレーザービーム（PLG：Pulse Laser Grinding）に着目し、それぞれの技術を積極的に推進している国内の研究者（①名古屋大学 梅原教授、②名古屋工業大学 糸魚川教授）を訪問し、技術的なアドバイスをいただいた。

【2-2】設備仕様検討と導入

i) 補助事業の具体的内容

磁気研磨、レーザー研磨（PLG：Pulse Laser Grinding）、電子ビーム加工の検証実験をおこ

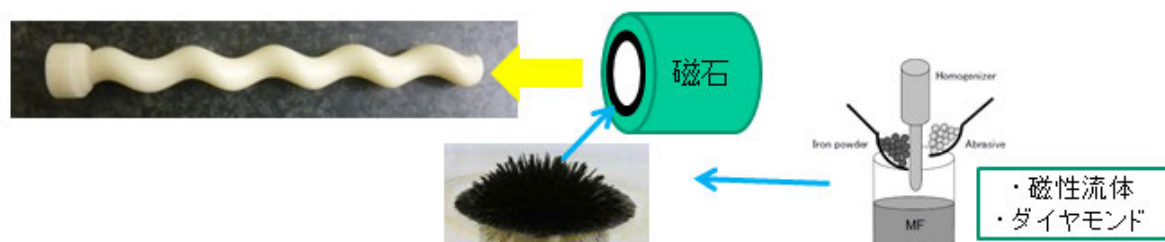
ない、それぞれの工法について設備導入を行い、最適な研磨条件を見出して技術目標を達成する。

ii) 重点的に実施した事項

磁気研磨、レーザー研磨（PLG：Pulse Laser Grinding）、電子ビーム加工の検証実験と設備導入と評価を行った。

① 磁器研磨

磁気研磨がローターの研磨に適用できる可能性があり、実用化に向けた検討を実施した。その結果、時期研磨用工具の設計、製作方法の情報が乏しく、また研磨材の成分や製作方法についても情報が無いことが分かった。SL中川平三郎先生のご紹介に基づき、宇都宮大学の鄒艶華 准教授から材料調達や工具の設計について情報をいただいた。



鄒先生からの情報に基づき、ローター加工に適した治具の構想を立案した。

実験 実施日：2015年9月2日

目的：磁気研磨の研磨可否検証

テストワーク：2N08アルミナ製ローター

設備：フライス盤

結果：焼成素材Ra0.6 μm 程度。加工機の軸移動はなく研磨材へ押し当てた。

強く研磨される山頂点部はRa0.25 μm 、山付近はRa0.35 μm 研磨が出来ることは確認できた。引き続き、均一に研磨する方法について検討を進めた。



実験の様子

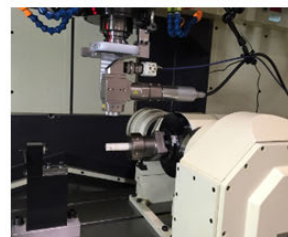
② レーザー研磨 (PLG : Pulse Laser Grinding) の概要、実験方法、結果

アルミナセラミックスへのPLG加工テスト1－1

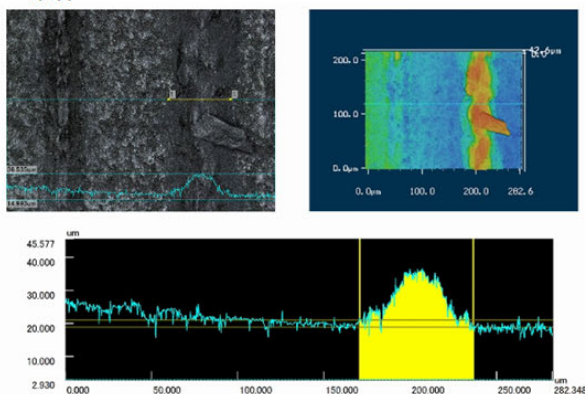
テスト内容



2017年1月26日

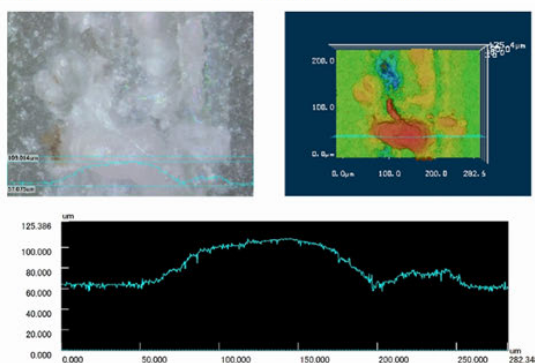


条件1. $t=100\text{ ns}$ $P=30\text{ W}$ $f=20\text{ kHz}$

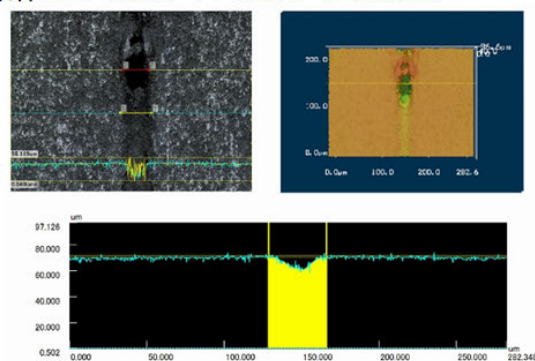


アルミナセラミックスへのPLG加工テスト1－2

条件2. $t=200\text{ ns}$ $P=30\text{ W}$ $f=20\text{ kHz}$



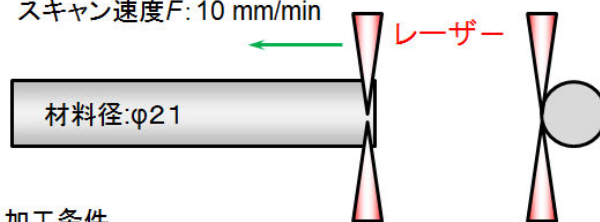
条件3. $t=50\text{ ns}$ $P=30\text{ W}$ $f=30\text{ kHz}$



アルミナセラミックスへのPLG加工テスト2-1

テスト内容

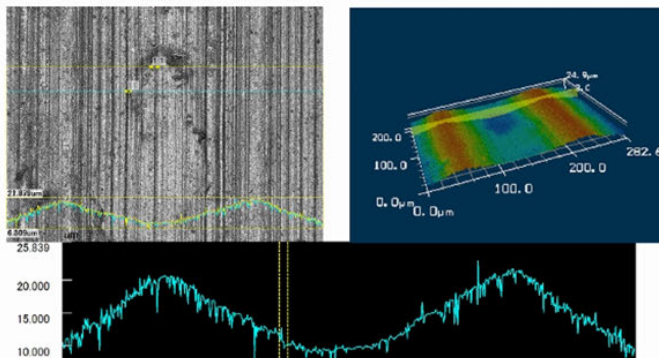
スキャン速度 F : 10 mm/min



加工条件

1. $t=100$ ns $P=30$ W $f=20$ kHz
2. $t=200$ ns $P=30$ W $f=20$ kHz
3. $t=50$ ns $P=30$ W $f=30$ kHz

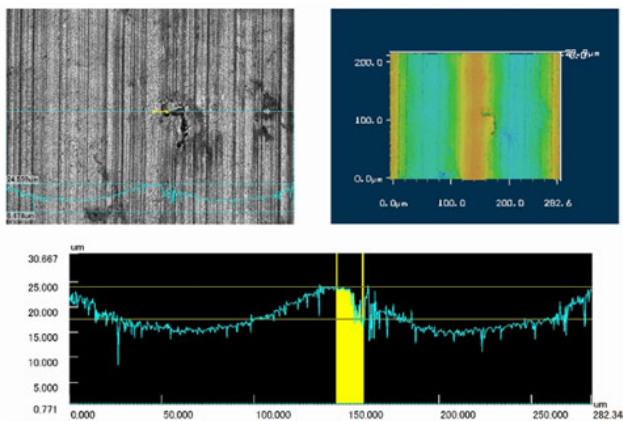
条件1. $t=100$ ns $P=30$ W $f=20$ kHz



ランダムに深さ1~2μm加工痕が発生。

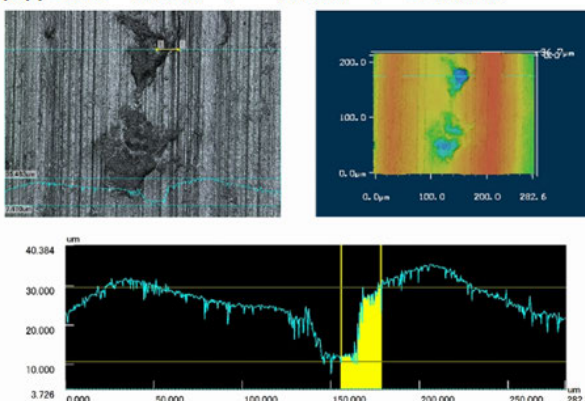
アルミナセラミックスへのPLG加工テスト2-2

条件2. $t=200$ ns $P=30$ W $f=20$ kHz



ランダムに深さ2μm加工痕が発生。

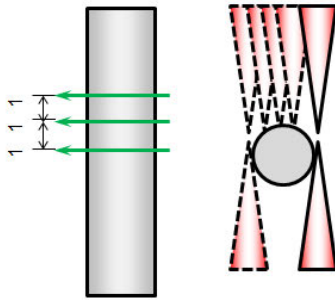
条件3. $t=50$ ns $P=30$ W $f=30$ kHz



ランダムに深さ5μm加工痕が発生。

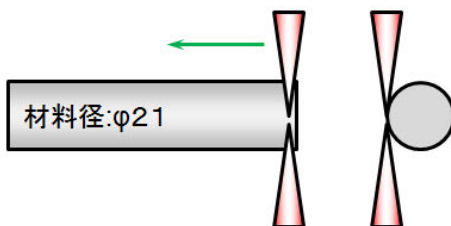
アルミナセラミックスへのPLG加工テストまとめ

テスト1



条件2. $t=200\text{ns}$ $P=30\text{W}$ $f=20\text{kHz}$ の条件は熱量が大きくレーザー照射部に起伏が発生したがアルミナ粒子を飛ばすほどのエネルギーは無い様子。
条件3. $t=50\text{ns}$ $P=30\text{W}$ $f=30\text{kHz}$ の条件ではわずかではあるが凹にすることが出来た。
熱加工を避ける条件として適していると考ええる。

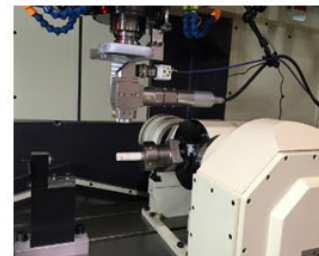
テスト2



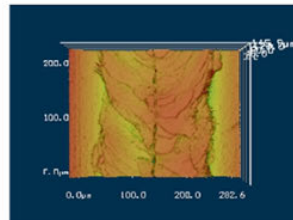
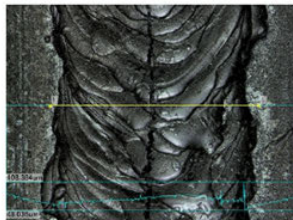
どの条件においてもランダムに加工痕が付くのみであった。ビーム径を絞るなど何らかの方法でエネルギー密度を上げられない限り安定した加工は出来ないと考える。

ジルコニアセラミックスへのPLG加工テスト1-1

テスト内容

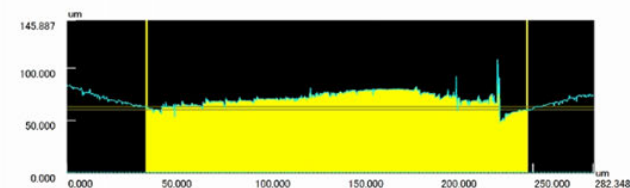


条件1. $t=100\text{ns}$ $P=30\text{W}$ $f=20\text{kHz}$



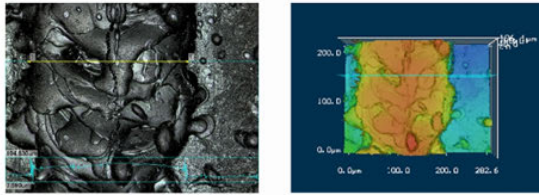
評価機器: キーエンス レーザ顕微鏡

幅約 $200\mu\text{m}$ 約 $15\mu\text{m}$ の起伏が発生した。溶融凝固している。



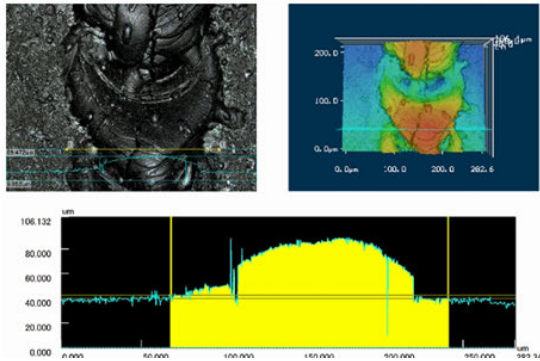
ジルコニアセラミックスへのPLG加工テスト1-2

条件2. $t=200\text{ns}$ $P=30\text{W}$ $f=20\text{kHz}$



幅約200 μm 高さ約40 μm の起伏が発生した。
溶融物が周囲へ飛び散っている。

条件3. $t=50\text{ns}$ $P=30\text{W}$ $f=30\text{kHz}$

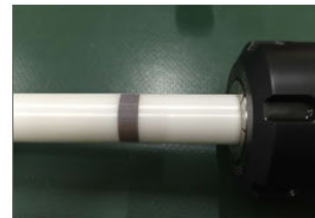
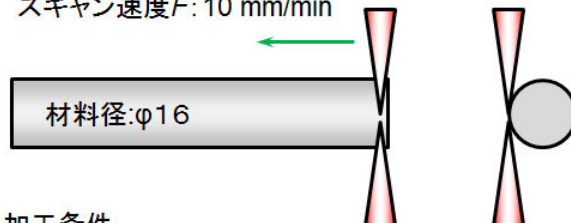


幅約200 μm 高さ約40 μm の起伏が断続的に
発生した。パルス幅と加工速度の関係。

ジルコニアセラミックスへのPLG加工テスト2-1

テスト内容

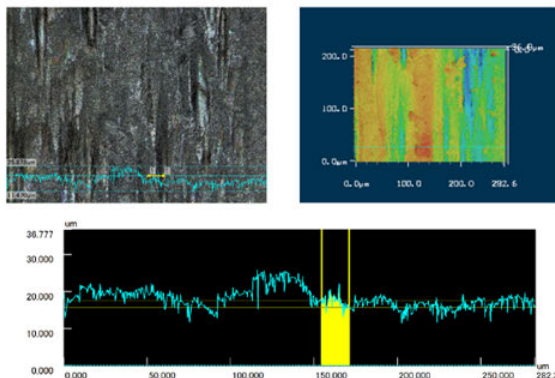
スキャン速度 $F: 10\text{ mm/min}$



加工条件

1. $t=100\text{ ns}$ $P=30\text{ W}$ $f=20\text{ kHz}$
2. $t=200\text{ ns}$ $P=30\text{ W}$ $f=20\text{ kHz}$
3. $t=50\text{ ns}$ $P=30\text{ W}$ $f=30\text{ kHz}$

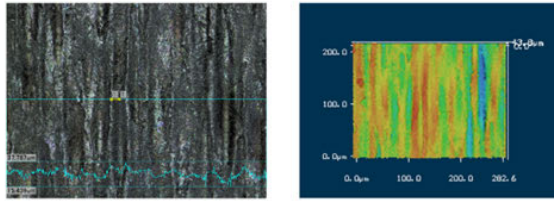
条件1. $t=100\text{ns}$ $P=30\text{W}$ $f=20\text{kHz}$



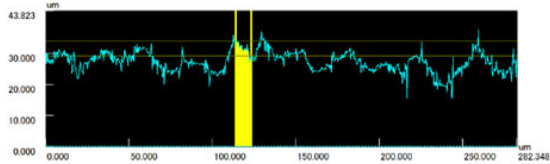
レーザー側面で加工出来ることを確認した。
まばらにレーザーでのひっかき傷の様な溝
がみられる。

ジルコニアセラミックスへのPLG加工テスト2-2

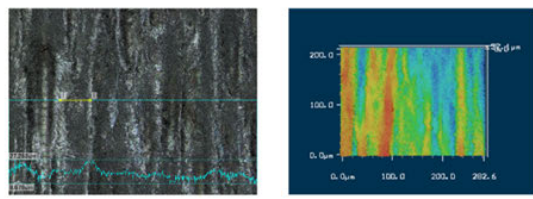
条件2. $t=200\text{ns}$ $P=30\text{W}$ $f=20\text{kHz}$



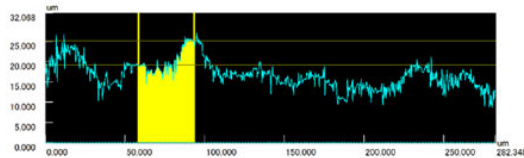
レーザー側面で加工出来ることを確認した。
波長が長い為か切削目の様である。



条件3. $t=50\text{ns}$ $P=30\text{W}$ $f=30\text{kHz}$

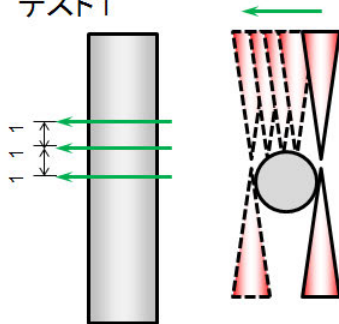


レーザー側面で加工出来ることを確認した。
波長が短く周波数も高い為まだ模様に見える。



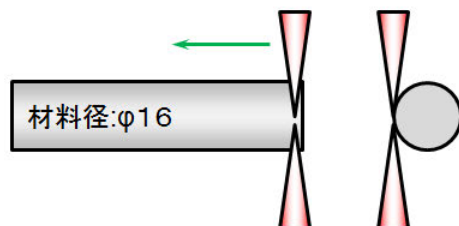
ジルコニアセラミックスへのPLG加工テストまとめ

テスト1



どの条件も溶融が見られた。また割れも発生していた為
熱量が多くなり過ぎないように注意が必要。

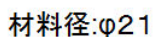
テスト2



どの条件においてもレーザーによる加工面を作ることが出来た。波長よっての優位差は今後見極める必要がある。

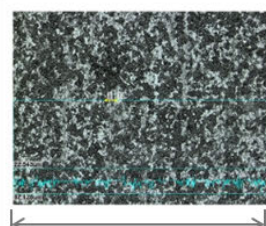
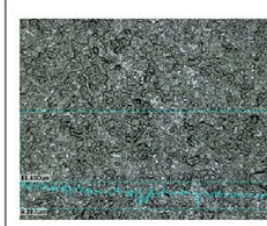
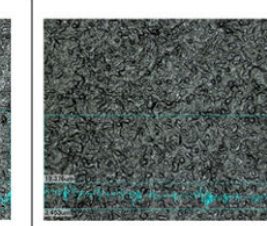
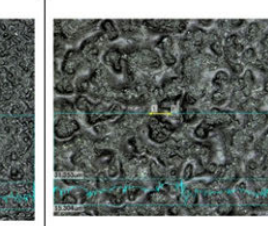
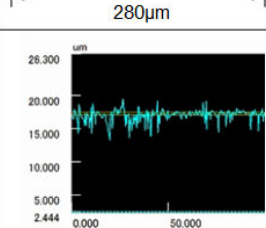
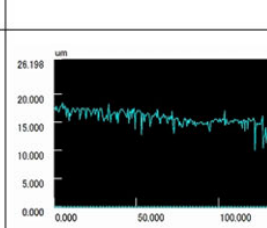
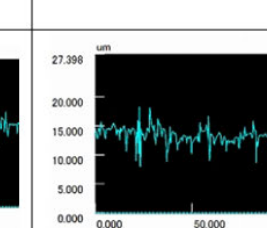
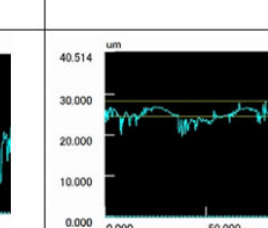
アルミナセラミックスへの電子ビーム加工テスト1-1

2017年1月24日



条件3(強). C25. 0kV S1. 5kV Ar0. 055 繰り返し10回

アルミナセラミックスへの電子ビーム加工テスト1-2

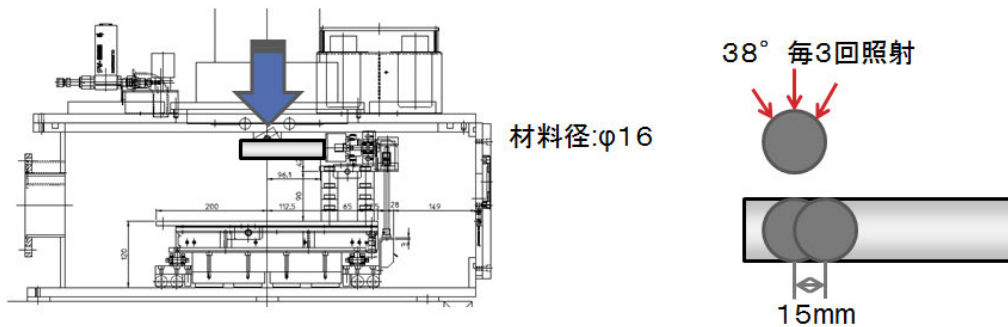
照射前	条件1 (弱)	条件2 (中)	条件3 (強)
			
			
Ra0. 226 Rz1. 958	Ra0. 230 Rz2. 087	Ra0. 380 Rz3. 879	Ra0. 927 Rz6. 195

22

ジルコニアセラミックスへの電子ビーム加工テスト1-1

テスト内容

2017年1月24日

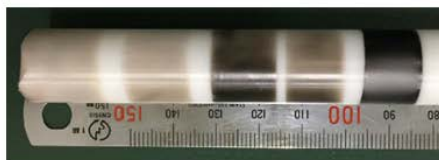


加工条件

- 条件1(弱). C12. 0kV S0. 7kV Ar0. 055 繰り返し10回
- 条件2(弱~中). C15. 0kV S1. 0kV Ar0. 055 繰り返し10回
- 条件3(中~強). C20. 0kV S1. 1kV Ar0. 055 繰り返し10回
- 条件4(中). C17. 0kV S1. 0kV Ar0. 055 繰り返し10回
- 条件5(強). C25. 0kV S1. 2kV Ar0. 055 繰り返し10回

評価機器: キーエンス レーザ顕微鏡
東京精密 表面粗さ計

ジルコニアセラミックスへの電子ビーム加工テスト1-2

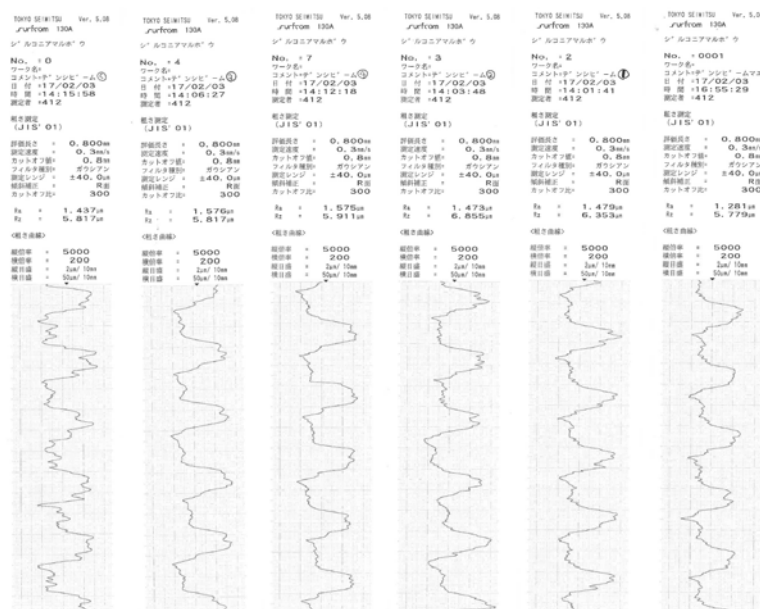


照射前	条件1(弱)	条件2(弱~中)	条件3(中)
条件4(中~強)	条件5(強)	→アルミナの様な粒子の粗大化や面荒れは少ない。	

ジルコニアセラミックスへの電子ビーム加工テスト1-3

- ・右から左にビームパワーが大きくなるにつれて、山と谷のギザギザが平均化される。わずかではあるがRz値が減少している。
- ・左端はパワーが強い為面荒れを起こしている。

→研削加工の段階にて平滑な面を得られれば更に滑らかな面性状を得られる可能性が高い。

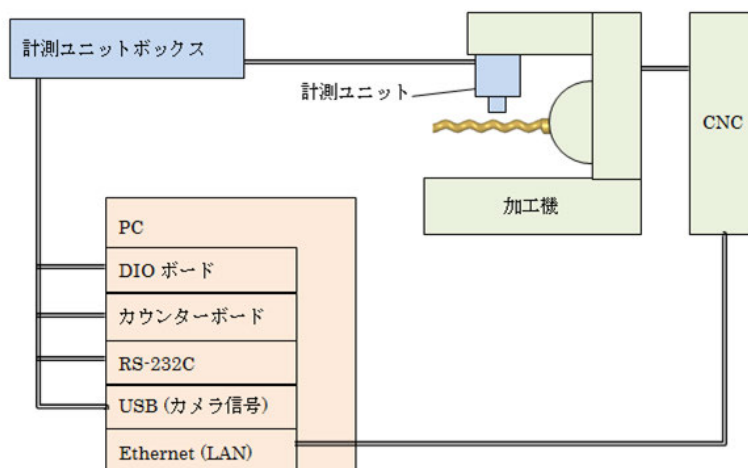


【3】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度計測技術の開発】

特殊ハイポサイクロイド曲面の輪郭精度を高精度に測定する技術は世に無かった。そこで0.001mmのスポット径を持つレーザープローブ方式を応用し、下記について検討を進め、±0.001mmの測定精度で、多点かつ輪郭度の計測を可能とする高精度ローター計測方法を開発した。

【3-1】新測定方法のシステム構成の立案

測定装置としてレーザー式の非接触精密測定技術にもとづく、機上測定装置を製作した。検討の結果立案したシステム構成を以下に示す。



システム構成図

【3－2】設備の仕様検討と導入および評価

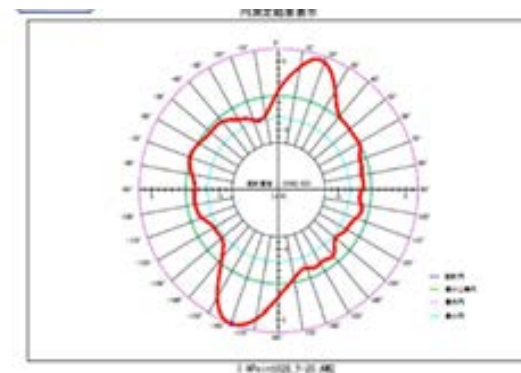
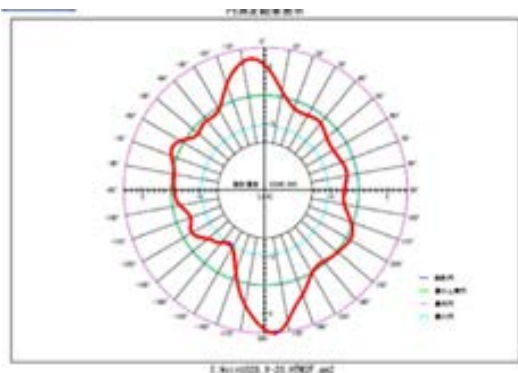
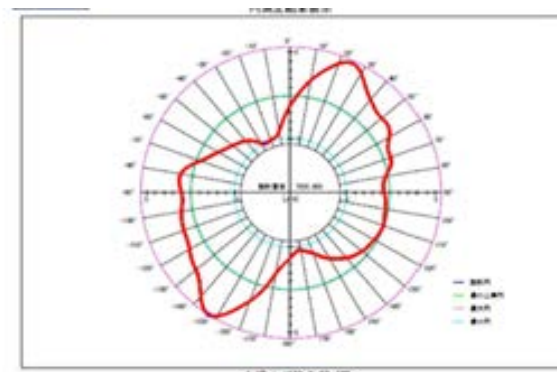
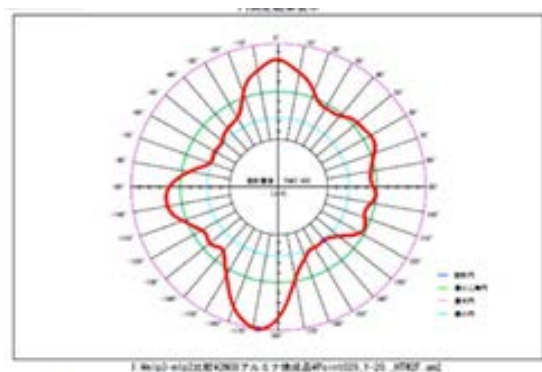
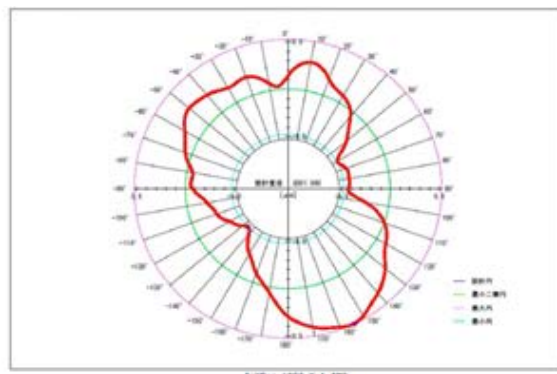
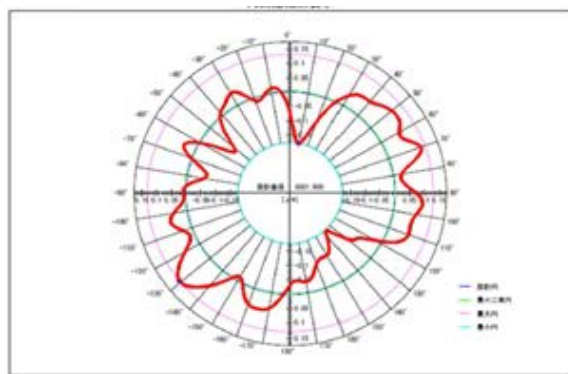
i) 補助事業の具体的内容

立案したシステム構成を設備仕様に反映させて、実機での計測実験を行い、妥当性の評価とまとめを実施する。

ii) 重点的に実施した事項

機上測定装置とソフトウェアを開発し、測定を実施した。ピンゲージの真円度を測定した結果を下図に示す。

左が機外での測定結果、右が今回開発した機上測定での結果である。



【4】試作ローター・ステーターによるポンプ脈動の解析と測定装置の開発（実機評価）】

【4-1】ローター・ステーターの挙動解析および、部品精度と脈動率との関係のシミュレーション

i) 補助事業の具体的内容

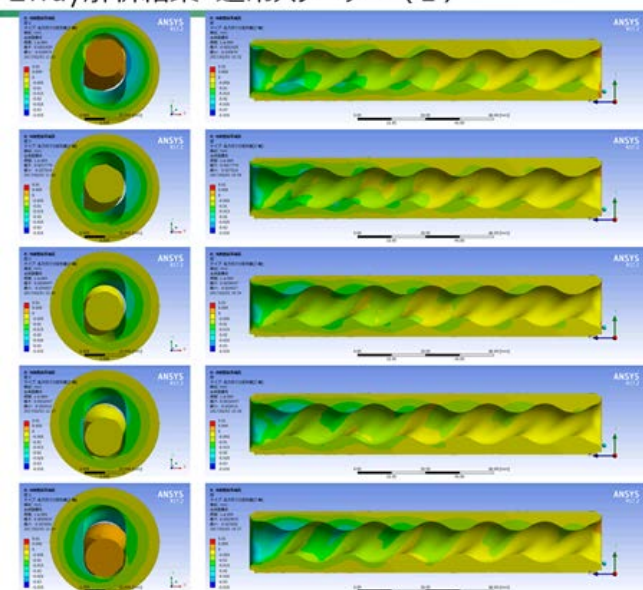
弾性体（ゴム）からなるステーターの中を金属のローターが運動するため、その挙動を正確に解析するには流体－構造の練成解析方法を開発する必要があった。本研究では、ローター/ステーターの挙動について基礎力学を用いて検討するとともに、導入した連成解析ができる解析ソフトを用いての挙動解析を継続して行う。また、ローター/ステーターの精度と脈動率との関係のシミュレーションを継続実施した。

ii) 重点的に実施した事項

	予定	成果
2014年度	解析ソフトの選定	解析ソフト「FLUENT」を選定した。
2015年度	1way解析手法の確立	流体→構造の1way解析が可能となった。
2016年度	2way解析手法の確立	流体→構造→流体の2way解析は可能となった。 但し、ローター/ステーターを非接触モデルでしか解析できないが、ステーターゴムの変形が大きくローターに接触してしまい、解析が不可能となる。 →ローター/ステーターの接触を許容できるよう、ソフト側のアップデートが必要。
2017年度 予定	2way解析手法の確立 ローター/ステーターの非接触モデル解析 「Overset Mesh機能」を利用	

解析結果の事例を以下に示す。

2way解析結果 通常ステーター（1）



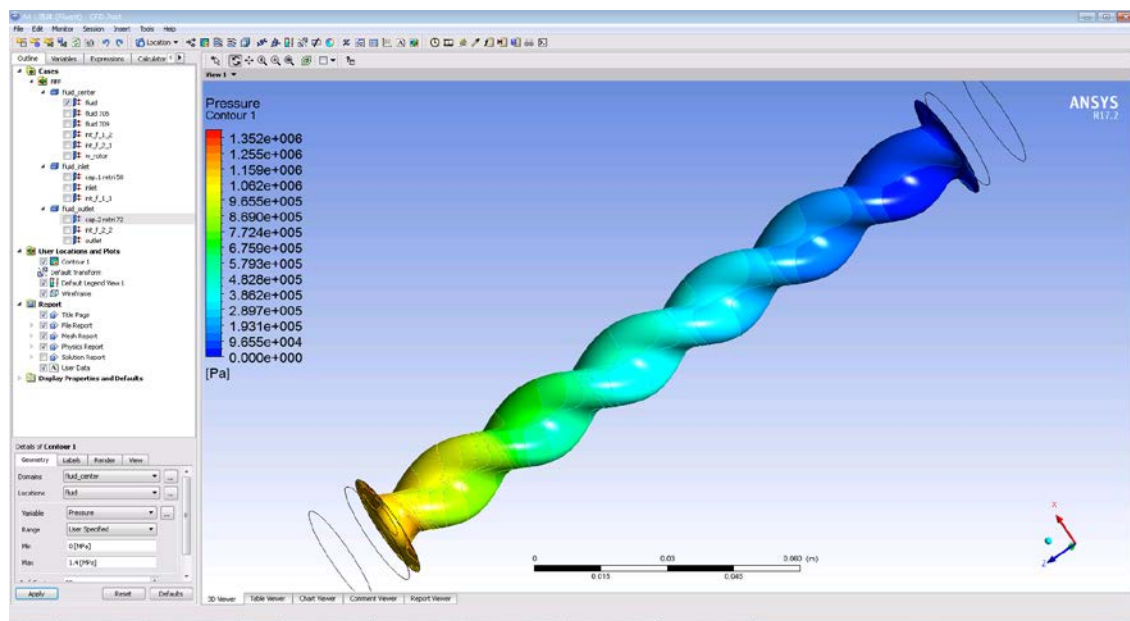


図 ある時刻における構造－流体の 2way 連成解析の収束状況。（緑線が流体の収束状況）

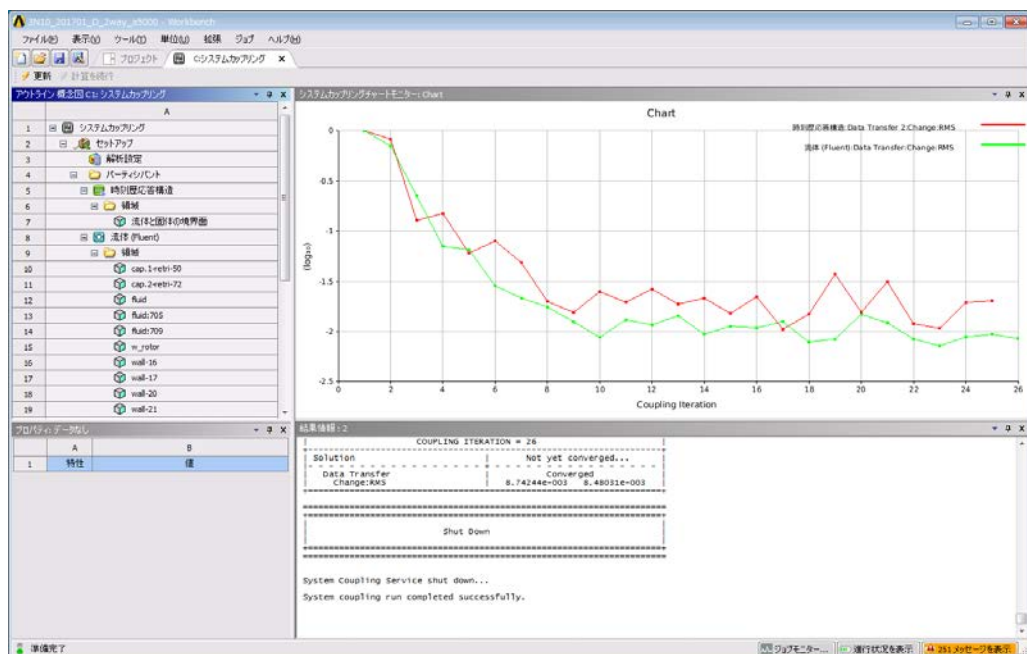


図 2way 連成解析による流体解析の圧力場の解析結果

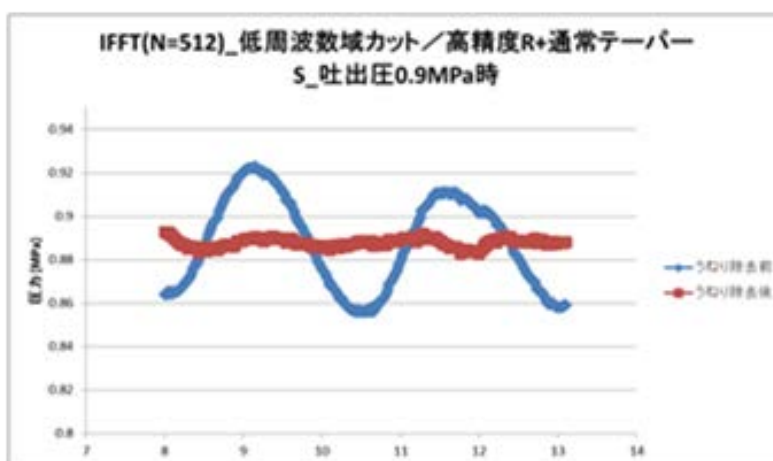
【４－２】脈動率と塗工性能との実機評価

i) 補助事業の具体的内容

サブテーマ【1】【2】【3】の成果を応用して、ステーター用金型の高精度加工および計測技術の開発を行った。開発した高精度ローター/ステーターを用いて脈動低減ポンプを製作し、脈動率の実機評価を行うとともに、挙動解析・シミュレーションとの検証を行い、機能薄膜製造における高粘度スラリー液用極低脈動移送ポンプの開発を達成する。

ii) 重点的に実施した事項

脈動テストの結果、4周期／回転の脈動の影響を除くことで、目標の1％以下である0.6％の安定的な低脈動が実現できることがわかった。



	Orinigal	High Pass
Max. MPa	0.923	0.893
Min. MPa	0.856	0.882
Ave MPa	0.888	0.888
Rate %	3.774	0.593

第3章 全体総括

(1) 研究開発成果

【1】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研削加工技術の開発】

H26年度に開発し導入した特殊ハイポサイクロイド研削加工装置を用い、H27年度に開発した研削工具と条件を利用して、型式3N10のアルミナ製ローターの実ワーク加工を実施した。

【1-2】専用砥石の開発と研削条件の検討においては、主に実ワークの研削加工と評価を行うとともに、工具の円筒外周面を加工で使えるようにする専用CAMの開発にも挑戦した。

【1-3】MQ L (Minimum Quantity Lubrication) 研削工法の開発においては、専用ノズルの開発を行い、クーラント加工との比較と評価を行った。またマイクロバブルを用いた研削基礎実験を行った。

以上の取組の結果、達成目標である加工精度「径の誤差 $\pm 0.005\text{mm}$ 、偏心量の誤差 0.05mm 以下」に対して、ワーク個々の、径の誤差 $\pm 0.005\text{mm}$ 、偏心量の誤差 0.004mm を達成するとともに、ワーク間のばらつきとしても、径の誤差 $\pm 0.005\text{mm}$ および偏心量の誤差 0.005mm を達成する準備と実力を整えた。

目標達成率：形の誤差：100% 偏心量の誤差：1250%

【2】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度研磨加工技術の開発】

磁器研磨、レーザー研磨 (PLG : Pulse Laser Grinding)、電子ビーム加工の設備仕様の立案と導入を行い、特殊ハイポサイクロイド曲面の面性状を高精度化するための加工検証実験を、アルミナセラミックスおよびジルコニアセラミックスに対して実施した。

その結果、達成目標である「面粗度 $Ra 0.6$ 、 $Rmr (10\%) 30\%$ 」に対して、面粗度 $Ra 0.3$ 以下を達成し、製品として十分な面性状を得た。 Rmr に関しては、ジルコニアセラミックスに対して、 $1\mu\text{m}$ 以下の微小な凹凸を平滑化する効果を確認した。 Rmr の評価については継続取組とする。

目標達成率：面粗度 Ra ：200% Rmr の評価：継続取組とする。

【3】特殊ハイポサイクロイド曲面高精度計測技術の開発】

レーザー方式による機上高精度計測装置を開発した。

その結果、達成目標である「測定精度 $\pm 0.001\text{mm}$ の測定精度で、特殊ハイポサイクロイド曲面の多点かつ輪郭度の計測の実現」に対して、「測定精度 $\pm 0.001\text{mm}$ の測定精度で、特殊ハイポサイクロイド曲面の多点かつ輪郭度の計測の実現」を達成した。

目標達成率：100%

【4】試作ローター・ステーターによるポンプ脈動の解析と測定装置の開発（実機評価）

【4-1】ローター・ステーターの挙動解析および、部品精度と脈動率との関係のシミュレーションにおいて、達成目標の「流体→構造→流体の2way解析の実現」を達成した。

【4-2】脈動率と塗工性能との実機評価において、高精度アルミナ製ローター（型式：3N10）を完成させた。

脈動テストの結果、4周期／回転の脈動の影響を除くことで、目標の1%以下である0.6%の安定的な低脈動が実現できることがわかった。

本研究開発の結果判明したあらたな課題として、4周期／回転の脈動の対策に継続して取り組んでいる。

目標達成率：100%。ただし、あらたに発生した課題について継続取組とする。

(2) 補助事業の成果に係る事業化展開について

(ア) 想定している具体的なユーザー、マーケット及び市場希望等に対する効果

タッチパネル業界および、二次電池業界を想定している。ポンプの脈動低減に関する要求や問い合わせが日々増してきている。

(イ) 事業化見込み（目標となる時期・売り上げ規模）

高精度なローター、ステーターが完成した時点で、サンプル出荷を開始する計画である。売上規模は、2019年にて4,500万円（90台）を想定している。