

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

「クリーンルーム環境対応の水静圧軸制御オイルレス加工マシンと防  
錆・循環水系システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 3 月

担当局 中部経済産業局  
補助事業者 公益財団法人岐阜県産業経済振興センター

## 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	4
・ 1-2 研究体制	6
1) 研究組織（全体）	6
2) 管理体制	6
(1) 体制図	6
① 事業管理者	6
② 再委託先	7
(2) 管理員及び研究員	8
1) 事業管理者	8
2) 再委託先	8
(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	9
(4) その他	9
・ 1-3 成果概要	10
・ 1-4 当該研究開発の連絡窓口	12
第2章 本論	13
・ 【1】 防錆に適した調整水の精製と循環システムの構築	13
【1-1】 水溶液（水）を精製するシステムと水の寿命の検証に対する成果	13
電気防錆特性試験（電極間距離，電流，水温特性）	13
試作スピンドル系用水の検証	15
水の寿命に関する検証：二酸化炭素に関して	15
工場環境の分析	16
クリーンルーム環境下温度での水精製試験と水循環再生システム OEM 検討	17
【1-2】 水溶液（水）の脱気技術の検証に対する成果	19
水の脱気検証：真空デシケーターによる検証	19
水の脱気検証：二酸化炭素除去検証	21
水の脱気検証：窒素バブリングによる脱気検証	22
水の脱気検証：脱気装置による脱気検証	23
脱気と脱泡について	23

流体の可視化実験概要	24
【1-3】水溶液（水）を循環させるポンプの開発に対する成果	27
配管経路内の流体の可視化	27
開発したスピンドルとピストンポンプ	30
・【2】研削盤本体の耐腐食性を向上させる技術の開発に対する成果	31
高電圧領域での防錆電圧供給と電流への影響検証	31
電気防錆効果検証（2日間：再実験）	32
防錆可能領域の検証	33
密閉環境下での防錆性向上検討実験	33
アルカリ性調整水の検証	34
研削盤の開発と搭載について	36
・【3】高速回転軸受けの開発	38
50,000回転対応スピンドル開発	38
第3章 全体総括	48
・【1】研究開発成果総括	48
・【2】研究開発後の課題・事業化展開	49

## 第1章

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 研究開発の背景・研究目的及び目標

モノづくり技術の発展は目覚しく、製品に求められる精度や品質の水準も上がってきている。日本の製造業は海外メーカーとの競争に勝つため、より高精度・高品値を実現する加工機を模索している。

株式会社ナガセインテグレックスでは、自動車産業・航空宇宙産業・家電産業等の業界向けに研削盤の製造販売をしており、半導体業界向けには定圧定量研削盤を製作・販売を行ってきた。当該、定圧定量研削盤は①非接触多面拘束静圧軸受け機構<sup>1</sup>、②インプロセス・コンディショニング<sup>2</sup>、③定圧定量複合制御<sup>3</sup>という3つの特徴を有し、これにより高品位・高能率加工の結果を得ることが可能である。しかし、株式会社ナガセインテグレックス製の定圧定量研削盤は油静圧軸受け機構を採用しており、加工実績がありながら半導体製造ライン（クリーンルーム）の導入が実現できなかった。これは、半導体製造等では、不純物の混入を排除するためクリーンルームでの製造が必須であり、高能率加工が可能な油静圧構造の加工機の採用は不可能であったからである。

そこで、半導体業界のクリーンルームのような環境であっても、高能率・高精度な加工が可能な軸受け機構・システムを構築する必要があった。

軸受け機構としては、①すべり案内、②転がり案内、③空気静圧案内があるが、油静圧案内と同等の能率や剛性といった特性を有する者が現状ない状態である。

そこで、油に代わるクリーンな媒体（水）を使用して、油静圧案内と同等の高精度・高能率加工を実現するシステムの開発を行う。

初年度では、防錆に適した調整水の精製と循環システムの構築を行うため、水循環再生装置等の選定を行い、初期実験を行った。また、研削盤本体の防錆を向上させるための検討を重ね、個片による実験を行った。

なお、具体的な技術的目標値と実施内容は表1、表2のとおりである。

---

<sup>1</sup> 超精密な回転・上下切込み位置決めを実現する

<sup>2</sup> 常に刃物が切れる状態での加工が可能

<sup>3</sup> ワーク・砥石へのダメージが極少になるような圧力と加工量にて加工する

表 1

区分	従来	最終的な目標値
不純物の量	-	0.1 度以下
再生量	10L/min	10L/min 以上
溶存酸素濃度	-	0.5mg/L
ポンプ容量	10L/min	10L/min
耐浸漬実験	-	2 日
最高回転数 (3 年度目実施)	3600min <sup>-1</sup>	50000min <sup>-1</sup>
静剛性値 (3 年度目実施)	5kgf/ $\mu$ m	5kgf/ $\mu$ m

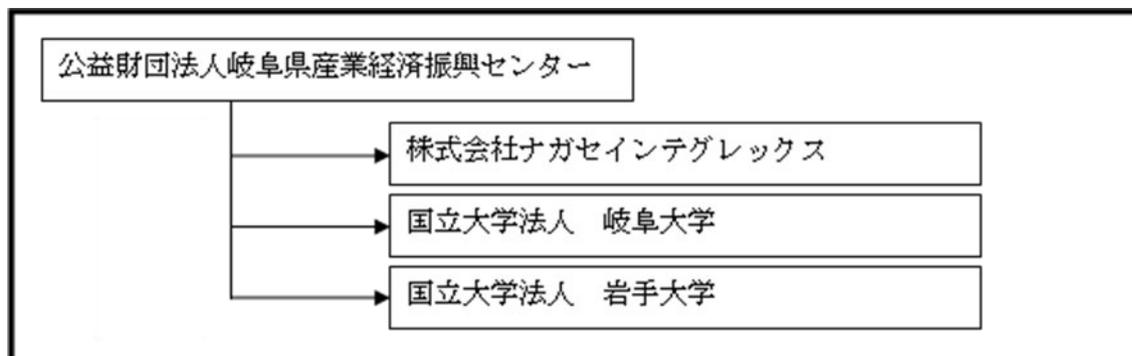
表 2

実施内容	
1-1	水溶液（水）を精製するシステムと水の寿命の検証
1-2	水溶液（水）の脱気技術の検証
1-3	水溶液（水）を循環させるポンプの開発
2	研削盤本体の耐腐食性を向上させる技術の開発
3	高速回転軸受の開発
4	プロジェクトの管理 ・研究開発委員会の開催

## 1-2 研究体制

(研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者)

### 1) 研究組織 (全体)



#### 総括研究代表者(PL)

所属：株式会社ナガセインテグレックス  
役職：製造部 テクニカルセンター長  
氏名：宇野 剛史

#### 副総括研究代表者(SL)

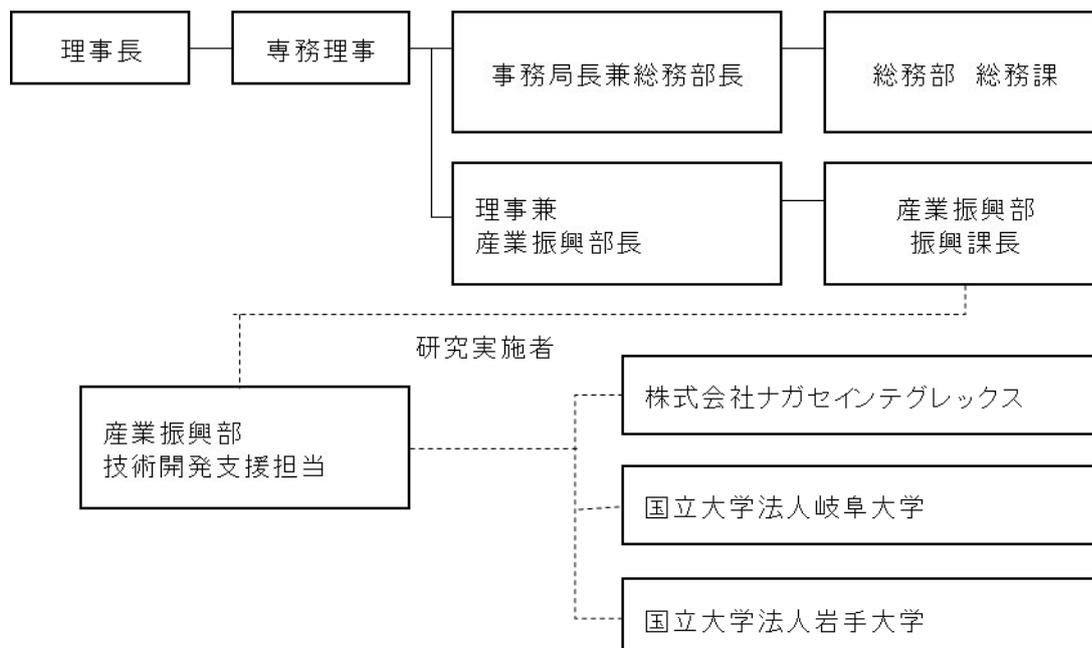
所属：国立大学法人 岐阜大学  
役職：工学部 機械システム工学科 准教授  
氏名：井上 吉弘

### 2) 管理体制

#### (1) 体制図

##### ①事業管理者

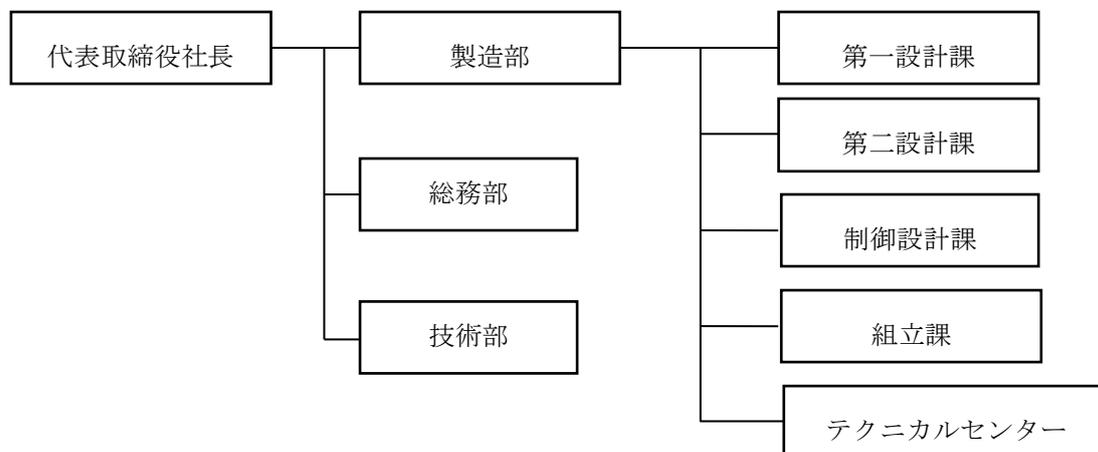
公益財団法人岐阜県産業経済振興センター



②研究実施者

体制図

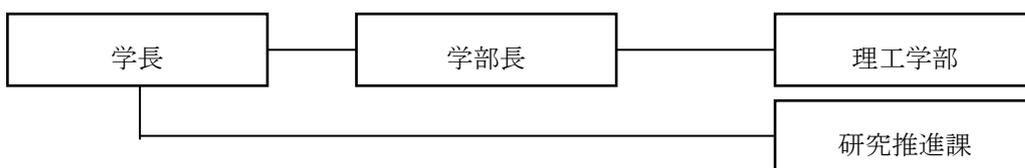
株式会社ナガセインテグレックス



国立大学法人 岐阜大学



国立大学法人 岩手大学



(2) 管理員及び研究員

1) 事業管理者

公益財団法人岐阜県産業経済振興センター

氏名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
柴田 英明	理事兼産業振興部長	4
山田 博義	産業振興部次長兼総合相談課長	4
野口 昌良	産業振興部振興課長	4
小川 誠	産業振興部振興課統括主査	4
戸松 薫	産業振興部振興課主事	4
北島 正幸	産業振興部振興課管理員	4
戸崎 康成	産業振興部振興課管理員	4
芳岡 康郎	産業振興部振興課管理員	4
國枝 信男	産業振興部振興課管理員	4

2) 研究実施者

株式会社ナガセインテグレックス

氏名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
宇野 剛史	製造部テクニカルセンター長	1-1,1-2,1-3,2,3
内田 聖一	製造部テクニカルセンター	1-1,1-2,1-3,2,3
佐村 高志	製造部テクニカルセンター	1-1,1-2,1-3,2,3
橋田 崇	製造部テクニカルセンター	1-1,1-2,1-3,2,3
新井 可綾	製造部テクニカルセンター	1-1,1-2,1-3,2,3
長瀬 敬	製造部テクニカルセンター	1-1,1-2,1-3,2,3
井村 諒介	製造部テクニカルセンター	1-1,1-2,1-3,2,3

国立大学法人 岐阜大学

氏名	所属・役職	実施内容
井上 吉弘	工学部 機械システム工学科 准教授	1-2, 1-3, 3
山本 瑞貴	大学院工学研究科博士前期課程	1-2, 1-3, 3

国立大学法人 岩手大学

氏名	所属・役職	実施内容
西川 尚宏	理工学部 システム創成工学 機械科学コース 助教	1-1, 2

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

公益財団法人岐阜県産業経済振興センター

(経理担当者) 総務部総務課 足立 良介

(業務管理者) 産業振興部開発課 小川 誠

(研究実施者)

株式会社ナガセインテグレックス

(経理担当者) 総務部 長野 義則

(業務管理者) 製造部 テクニカルセンター長 宇野 剛史

国立大学法人 岐阜大学

(経理担当者) 工学部 外部資金係 林 加奈

(業務管理者) 工学部 機械システム工学科 准教授 井上 吉弘

国立大学法人 岩手大学

(経理担当者) 研究推進課 課長 前田 良介

(業務管理者) 理工学部 システム創成工学 機械科学コース助教 西川 尚宏

(4) その他

なし

### 1-3 成果概要

本研究は、その製造技術を事業化するものである。

#### 【1】 防錆に適した調整水の精製と循環システムの構築

##### 【1-1】 水溶液（水）を精製するシステムと水の寿命の検証に対する成果

防錆に適した調整水を精製し、錆・バクテリア・粒子など不純物を除去し、錆の進行を抑制するとともに循環水を浄化再利用するシステム構築を目的として開発を進めた。目標値として調整水内の不純物の量（濁度）を 0.1 度以下（※高度浄水レベル、水道水基準値は 2 度以下）、循環システムの調整水再生量を 10L/min と定めた。

岩手大学西川助教のシーズの水循環再生システムを用いた電気防錆法の原理、或いはアルカリ調整水溶液の使用検討を継続して行いながら、目標値である濁度及び再生量をクリアすることを確認できた。この技術を用いて水処理装置大手メーカーに研削盤に適した仕様の循環システムを OEM 供給依頼し装置完成に至った。

##### 【1-2】 水溶液（水）の脱気技術の検証に対する成果

液体を使用するシステムで注意しなければならない点の一つとして、気泡の発生がある。気泡の混入はバルクとしての流体の物理的・熱的性質の変化をもたらし、様々な弊害を生じる。例えば、見かけ粘度や圧縮率（弾性率）の変化による軸受剛性や振動特性への影響などが挙げられる。液体中で気泡の発生する機構には大きく二つあり、一つは蒸発であり、もう一つは溶解ガスの脱離である。この事より以下に示す4つの手法より、目標値で有る溶存酸素濃度が 0.5mg/L をクリアする技術手法を検証した。

- ① 真空デシケーターによる検証
- ② 二酸化炭素除去検証
- ③ 窒素バブリングによる脱気検証
- ④ 脱気装置脱気

その結果安定した再生量(10L/min)の確保と装置全体の負荷を考慮して、【1-1】で OEM 製作したユニットに採用した。

##### 【1-3】 水溶液（水）を循環させるポンプの開発に対する成果

水を循環させるためのポンプ内として【1-2】の技術で精製した水溶液（水）に空気を含まないようにするために、ポンプを従来の歯車式からピストン式に変更する。この技術によりシステム全体の

見かけ粘度や圧縮率（弾性率）の変化による軸受剛性や振動特性への影響を抑える。目標値として開発するポンプの性能を 10L/min と定めた。

開発の結果、2 連に設置したピストンポンプの切り替わりにおいても圧損が無く、目標の処理量 10L/min を実現した。またこの技術は研削盤本体に使用する流量が増えても使用するピストンを増設或いは容量のアップをする事で対応ができるシステムであり、今後大いに期待できる技術である。

## 【2】研削盤本体の耐腐食性を向上させる技術の開発に対する成果

本研究開発では油の代わりに調整水（水）を使用するため、防錆の対応が必須となる。ここで岩手大学西川助教のシーズである電気防錆法とアルカリ性調整水溶液を用いた手法で検証を進めた。当初西川助教の電気防錆法で各種実験を試みた。

実験の結果、目標値である耐浸漬の 2 日間をクリアする結果を得た。新たな課題として複雑な構造の研削盤本体の技術開発・検討が必要である事が判明した。従って事業スケジュールとして引き続き電気防錆法による研削盤本体への耐腐食性向上の検討を進める一方、スピンドル系の対応をスピンドルの材料を変更（ステンレス化）する事で、スピンドルユニットでの早期事業化計画とアルカリ性調整水溶液の採用で研削盤本体への耐腐食性能の試験を引き続き行って行く。

## 【3】高速回転軸受けの開発

静圧に使用する流体が油から調整水（水）に変わり流体の粘性抵抗が下がる事から、現状油静圧で課題になっている高回転領域での発熱の問題解決に期待が持たれる。但しその反面、静圧隙間の適正化、及び配管経路内での乱流等様々な問題が想定される。ナガセイnteグレックスが保有する技術と岐阜大学井上教授のシーズを利用して、高回転領域の軸受け（スピンドル）の開発を行う。

目標値として最高回転数を 50,000 回転と設定した。

本事業の初年度に開発したスピンドルで得られた知見から、下記の項目に着目した。

- ・静圧隙間の量（従来油静圧で得ていた経験から隙間調整を行ったが、油と水の粘性抵抗の違いから所定の圧力が得られず、シミュレーションソフトでの解析を行って最適化を行った）
- ・静圧用キャピラリーの改良
- ・エアーシールの採用（通常流体の漏れを防ぐ為にメカニカルシールを用いる。これは回転軸の隙間に接触しているため軸の回転に伴い摩擦が働き様々な弊害をもたらす。（発熱、回転抵抗）今回目標値している高回転領域ではより顕著になるので改良を行った）

高速回転軸受けの開発のうち、スピンドル部の運動の特徴は、直動摺動面に比して高速現象となる

点にある。特に、作動流体として本研究開発事業で進める調整水を用いた場合、軸受け面間のみならず配管経路内においても流れは層流から乱流へと変化し、それが原因でスピンドル自体に振動を発生させたり、水中に気体が発泡したりと不具合の生じる可能性が高い。キャビテーションは2つの機構で生じ、水に溶存する空気が脱泡する場合と、流れ場の圧力と飽和蒸気圧との関係から蒸気泡が発生する場合である。発泡現象が生じる圧力水準は、前者の方が後者よりも高く、ある圧力水準以下になると、前者に引き続いて後者が発生する。前年度までに実施してきた実験的アプローチに加え、理論解析的検討と数値解析による調査を実施する。この理由は、軸受内流路や絞り部と比較してスピンドル部の速度は高速であり、また、流路形状も複雑となり、流れの可視化のみで現象の全てを捕捉することが困難と予想されるためである。概ね計画通りの進捗状況ではあるが、構想設計の段階でのスケジュールの遅れもあり、本年度スピンドルユニットの完成までとなった為引き続き基本性能の検証実験及び改良を行って行く予定である。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社ナガセインテグレックス 宇野 剛史

所在地：岐阜県関市武芸川町跡部1333-1

電話：0575-46-2323 FAX：0575-46-2325

E-mail：uno@nagase-i.co.jp

## 第2章 本論

### 【1】 防錆に適した調整水の精製と循環システムの構築

#### 【1-1】 水溶液（水）を精製するシステムと水の寿命の検証に対する成果

防錆に適した調整水を精製し、錆・バクテリア・粒子など不純物を除去し、錆の進行を抑制するとともに循環水を浄化再利用するシステム構築を目指す。また調整水の劣化時間検証と浄化再生量を検討する。本事業目標値として下記に示す。

不純物の量（濁度）：0.1度以下（※高度浄水レベル。水道水基準値は2度以下）

循環システム装置の水溶液再生量：10L/min以上

本事業にて選定した水循環再生装置について、温度や循環時間といったパラメータを加味して、濁度や再生量の検証を行い、装置の改良検討を進めた。温度等の条件による精製水の変化を検証し、より安定したシステムの構築検討を行った。重ねて、気体での影響に対し水質検証と改善を行った。さらに、岩手大学の西川助教の協力の元、防錆に適した水溶液（水）の開発のためイオン調整水の調査を行い、購入した機械装置において実験を行った。合わせて環境と加工や性能に関し調査・検討を行った。

#### ■電気防錆特性試験（電極間距離，電流，水温特性）

スピンドルや研削盤本体に使用することを念頭に、調整水の検証を行っている。水循環再生システムにおいて生成した精製水に精密電子天秤で計量した硫酸カルシウム（導電性向上での電気防錆での防錆効率向上のため）を混和し、調整水を生成している。このとき、昨年度の課題として、 $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ のクリーンルーム環境温度での温度調整があった。そこで、本年度は水温調節器ならびにその温度を測定する高精度の温度測定器を導入し、精密な温度制御と温度測定を実現し、その状況下での昨年度より正確な調整水での電気防錆特性検証を実施した。下図に温度制御での電気防錆特性検証試験システムを示す。



調整水の温度制御下での電気防錆特性検証試験システム

また、下右図に水の温度測定の様子を示す。ビーカー上部に高精度の温度測定器を入れており、温度を計測している。

また、この時の水道水や各種用水を原水として水循環再生システムで精製した調整水（硫酸カルシウム（218.44mg/3L）添加：電気伝導度を約  $100\mu\text{ S/cm}$  になるよう調整。）の水質（23℃での代表値）は確認を行った。今回、水温調節器で一定温度に保っている。

次に、防錆時の電流効率向上や防錆電極構造検討に関与して、電極間距離と防錆電流との関係を、温度制御下で検証した。上述温度制御システムで電気防錆を行った際の、電流—電極間距離の特性と温度変化は下図の通りである。

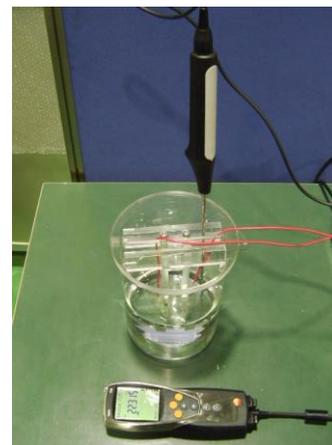
温度は  $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  のクリーンルーム環境温度に収まっていることが示された。

今回試作の水温調整システム構造は今後、工作機械実機・水循環再生システムの水温調整において、一つの方法として適用や応用利用が検討されると考えられる。

★目標達成について：

水温調節で  $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  のクリーンルーム環境温度の調節制御と測定できることが示された。また、その状況下での電極間距離と電流の関係測定が実施された。

今後、高精度温度制御下での測定への応用が可能となり、また、クリーンルーム環境下温度への調温の一つの手法が示され、他、水循環再生システム運転や静圧軸受けユニット及び静圧 XY ステージなどへの利用も考えられる。



高精度温度測定の様子

## ■試作スピンドル系用水の検証

次に、(株)ナガセインテグレックス本社(岐阜県関市)において、製作した現在の水スピンドル系において供給を検討している精製水(スピンドル系用水:純水装置併用)について、清浄性、環境・人体への安全性があることが必要である。なお、この精製水は昨年安全性検証済のナガセインテグレックス本社の地下水ベースの用水を精錬している。現在の試作スピンドルは検証用の物でありステンレス材によるため、調整水ではなく精製水を用水に用いている。これはまずスピンドルの水を使用した場合の水用間隙での稼働など機械的特性の検証のためである。

ここで、水中の各種有害化学物質等の含有量を検証する水道法試験による判定をおこなった。なお、水道法分析は法規制により、採水から分析まで12時間以内に開始しなければならず、また、採水地区の認定業者しか実施できないので、現地での分析を行なわざるを得なかった。

次ページの表に、スピンドル系用水に対する水道法51項目検査結果を示す。

これにより、すべて基準値以下であり水道法検査を合格している。さらに、化学物質については分析下限未満であり、不純物も少なく、浄化度が高いことが示された。これにより、水への雑菌や化学物質での汚染はなく、スピンドル系用水の安全性が示された。

## ★目標達成について:

スピンドル系用水の水質については安全性において水道法検査合格により安全性が示された。

本スピンドルシステムは試作検証用であるが、実販売用にはコスト削減のため、スピンドルは安価であるが通常水で錆びる材料に変更される。そこにおいて、現在の水スピンドル系用水は今後成分調整を行いより防錆に最適化される予定である。

また、水温が $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ に収まっていないが、これは試験システムであるため、あまり厳密に調温を行っていなかった。実装される水循環再生システムにおいては、上述手法など援用して調温するよう改良される予定である。

## ■水の寿命に関する検証:二酸化炭素に関して

昨年度、すでに酸素の水溶(汚染)での水寿命を検証していた。二酸化炭素汚染(pHが低下し、水道法基準(pH:5.8以上,8.6以下)を満たさなくなる)による水の寿命を検証しようとした。しか

しながら、たとえば各種手法で脱気した精製水・調整水での pH 測定において、大気中で計測した場合、1 分も満たない間に pH 低下が連続的に観測され始める。これは使用の pH 電極の内部液と大気二酸化炭素の相互作用などによる影響と思われる。そこで計測時には脱気後の採水直後にすぐに、pH 電極や測定対象の水溶液を袋に入れ、その内部に窒素配管系から窒素を供給し大気を追い出して、窒素雰囲気中で計測を行うことで pH 計測を安定させて行っている。このような状態から、水溶液の溶存成分との影響や、センサーに対しては鋭敏に大気影響をうけるため、脱気を行った水溶液はできるだけ二酸化炭素に触れさせないべきであるといえる。

配管など密閉系にすることが想定される。課題として、研削盤が組み上がった実際配管での実測によって水の実寿命を測定し、寿命の所定時間経過にあわせて随時脱気するなど考えられる。

## ■工場環境の分析

実際の生産現場における大気環境と加工への影響検討を念頭に、生産現場の大気分析を行った。なお、本実験は試験可能期間の関係上、上述スピンドル系用水の採水時から連続して準備し実験を実施した。

下表に各日における、屋内生産現場（ナガセインテグレックス）内部および屋外の二酸化炭素、および、酸素濃度を測定した。その数日中には各濃度は一定ではなく変動している。また、屋外より屋内生産現場の方が、二酸化炭素濃度が高く、酸素濃度が低いことが示された。これは、密閉室内での作業者の呼気や機械からの排出が要因であると考えられる。二酸化炭素濃度が高ければ、本研究のような超精密なクリーンルーム環境下での精密機器への影響として上述（脱気・二酸化炭素除去）のように加工用水への溶解による pH 低下促進が懸念される。さらに高まれば作業員への影響もあるかと思われる。このことから、工場内は適度な空気換気があるとよりよいことがわかる。

また、大気の水への影響として、水質検査の結果にフェノールの項目がある。水道法基準は満たしているが、若干検出されている理由として、次のことが考えられる。工場内部で有機溶剤・有機薬剤を使用しており、大気中に飛沫があり、これが落下したりあるいは水流がある水面で混和したためではなかと思われる。そのような場合、長時間、タンクを工場内大気に晒していると、次第にフェノール濃度が高まり、いずれ基準を超える値になると懸念される。別の可能性としては、水循環再生システムの一部のホースからの溶出も考えられる。しかしながら、水循環再生システムからの溶出に関しては、昨年度に大学内で行った水質検査結果においてはフェノールは見られないため若干可能性は低いと考えられる。これらへの対策として、有機薬剤・溶剤の使用を減らすあるいは空気清浄設備により除去する、または有機薬剤・溶剤を使用してる区画から隔離しコンタミを防ぐことがある。また、

水循環再生システムについては、溶出が懸念される部材を変更することが考えられる。

#### ■クリーンルーム環境下温度での水精製試験と水循環再生システム OEM 検討

基本的に防錆や研削盤静圧駆動に用いる水を精製する水循環再生システムにおいて、実機実搭載運用のための検討を行った。

##### \*水循環再生システムのクリーンルーム環境下温度での圧力・水量・水質について：

流量計・圧力計を使用してクリーンルーム環境下温度（23℃±1℃）の範囲内での水循環再生システムの運転検証を実施した。下表にクリーンルーム環境下温度での水循環再生システムの原水と精製水の水質を示す。なお、精製水に関しては調温を行っている。

このときの水循環再生システムにおいて、圧力計で計測した逆浸透膜への水の供給圧力は 1.0MPa で、流量計で計測した全透過水量は目標流量  $Q=10L/min$  以上がクリーンルーム環境下温度で確認できた。

##### \*水循環再生システムの OEM 供給に向けた検討：

水循環再生システムを静水圧スピンドルユニットや研削盤により実装しやすいよう、カスタマイズや、安定的にユーザーに供給し、メンテナンスなども容易化するため、水循環再生システムの製作において外部メーカーによる OEM 供給をすることなどを検討している。

これまで水循環再生システムの運転検証を行ってきた。その過程で、カスタマイズすべき点や改良などについて下記の点が明らかになってきた。

##### ・省スペース化：

現在は研究実験機であるため、増設や改良など余裕を持たし大きな寸法となっているが、実装される OEM 供給機では、余分な空間を詰めて設計する。これにより、各ユーザーの建屋に場所をとらずに設置しやすいようにできる。

##### ・必要スペックを満たす省コスト化：

また、実験機特有で、各種圧力計や流量計、弁など多数備えており、また、安全措置のためのフィルタなども備えている。これらについて必要スペックや最低限必要な運転状態や制御のための計測を満たすだけに削減し、省コスト化と一層の省スペース化を進める。これにより、ユーザーがより求めやすい価格での供給を実現する。

・自動化：

一層ユーザーに使用しやすいようにする。

・メンテナンス or 改良部品の短納期安定供給：

OEM 供給にすることで、補修や、スペックアップのためのパーツや機材を短納期で安定して供給することができるようにし、保守トラブルを減らし、ユーザーに将来に渡っての供給体制への安心感を与えることができると思われる。

このような点での検討を、OEM メーカーを交えてすでに協議しており、まず、水静圧スピンドルユニットまわりでの個別商用化を目指して準備をしている。

また、今年度までにこれら要素技術をおおよそ開発し、要素機（静圧軸受けユニット及び静圧 XY ステージとそれを制御する NC 装置など）もある程度製作しており、完全にすべて搭載した実機の開発は遅れているが、次年度においてプロト機としての製作を準備している。

昨年度までに、水循環再生システムなどの実験をもとに、気体除去に効果的であることが示され、また、紫外線ユニットなどにより細菌の問題も見られなかった。そこで、この成果をもとにして、水循環再生システムを下敷きにし、水スピンドル用に、システムを検討した。さらにコストも検討して元の水循環再生システムをカスタマイズした OEM プロトタイプを設計して試作を行った。

今後さらに安価・高性能・OEM 安定供給にむけた改良などを、OEM メーカーなどと協議を行いながらすすめる予定である。しかしながら、試作の遅れもあり、運転時の水の検証や、コンタミネーション防止のための不純物除去・純水純度向上といった課題が残っている。また、本システムのコスト低減やシステムの安定供給をする改良や体制に関しても引き続き協議・検討を行う予定である。

本年度購入した水製造システムの外観図を右図に示す。また機器の構成図を下に示す。今回純水機器製造メーカーに OEM 化を依頼して、開発中の研削盤本体の容量に合わせて独自カスタマイズを依頼した。主要スペックは、前年度までの基礎実験より得られた知見から、処理水の水質として電気伝導率  $1\mu\text{S}/\text{cm}$ 、溶存酸素濃度  $\text{D}05\text{ppb}$  を満たす処理システムで構成を要望。実際に試運転を行い要望性能が満足する物であった。また開発のもう一つのコンセプトである、省スペース化についても、メーカーと協議を進め、最終的に目標寸法を達成した。



## 【1-2】水溶液（水）の脱気技術の検証に対する成果

脱気実験は、■真空デシケータによる検証、■二酸化炭素除去検証、■窒素バブリングによる脱気検証、■脱気装置による脱気検証を行った。

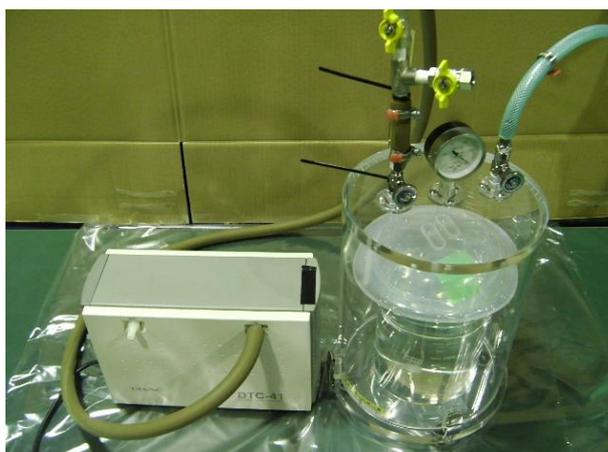
### ■水の脱気検証：真空デシケータによる検証

さらに、課題であった調整水の pH 改善について検討した。昨年度、調整水において、水道法による水質検査 5 1 項目の内わずか pH 1 点のみ基準値に満たさなかった。このときは pH が基準値よりも低く、大気中の二酸化炭素が水が吸収することで炭酸となって水の pH を低下させたと考えられた。

この水中の二酸化炭素の測定・解明ならびにその除去による pH 改善を実施した。このとき、複数種類の二酸化炭素除去手法を検討した。また、本実験は後述「水溶液（水）の脱気技術の検証」の一環でもあり、二酸化炭素濃度低減とより実装における現実的方法の検討に寄与する物である。ナガセインテグレックスと共同により、ナガセインテグレックス本社にて試験を行った。ナガセインテグレックスにおいてもデシケータを作成するなど別途検討を進めていたが、水への影響を検討するにおいて、岩手大学と同時共同で実施すること研究・開発進捗を早め分析や解明を高度化した。また、本年度実施期間での岩手大学の外注分析（水質検査・大気分析）の実施可能期間もあり、上述スピンドル系用水の採水から連続して準備し実験を実施した。

本項は脱気技術の検証の内、ビーカーなどに小分けした比較的少量の試料水をデシケータ（収納容器）において真空脱気を行うことにより取り除く手法を実施した。

下図に調整水の真空脱気システムを示す。



真空脱気システム

デシケーター内部にはナガセインテグレックス用水を原水として、水循環再生システムで生成した精製水に硫酸カルシウム（218.4mg/3L）を混和して生成した調整水をビーカーに入れて設置している。デシケーター（図中右）に真空チューブで接続された脱気用ポンプ（図中左）によりデシケーター内を真空にして、デシケーター内部に設置したビーカー内に溶存した気体の除去を行う。脱気後は空気からの二酸化炭素などの再溶解による汚染を防ぐため不活性気体の窒素を窒素ボンベ（純度：99.9998%以上、製造：大陽日酸株式会社、充填：共同高圧ガス工業株式会社）からデシケーター内部に送り込んでいる（図中右ホース）。

脱気前の精製水の pH は水道法基準（pH: 5.8 以上, 8.6 以下）を満たさない値となっている。精製水の時点から今回は pH が低いことが示された。つぎに、右図にセンサー（二酸化炭素）による、水中の二酸化炭素測定の様子を示す。脱気前は二酸化炭素量もある程度含まれていることがわかる。

生成したばかりの調整水に対し上記の真空脱気システムで脱気を行い、安全性分析のため、現地に於いて、採水試験をし、水質分析を行なった。



水中二酸化炭素測定の様子

次ページの表に、真空脱気調整水に対する水道法 51 項目検査結果を示す。

これにより、すべて基準値以下であり水道法検査を合格している。さらに、化学物質については分析下限未満であり、不純物も少なく、浄化度が高いことが示された。これにより、水への雑菌や化学物質での汚染はなく、真空脱気調整水の安全性が示された。

脱気後は二酸化炭素量も減少していることがわかる。これにより、脱気による二酸化炭素低減と pH 改善が検証された。

#### ★目標達成について：

真空脱気調整水の水質については安全性において水道法検査合格により安全性が示された。

真空脱気による水中の溶存気体除去は旧来よく知られた最も簡単にできる脱気手法の 1 つである。この脱気手法では二酸化炭素や pH 改善の効果検証を目的としており、これを達成できたことが示された。この方式は様々な真空脱気方式の原型であり、原理上、真空ポンプの真空度を高め時間をかけ

れば溶存気体をより漸減できると考えられる。しかしながら、この方式は、一定少量を個別（回分）に脱気する場合は良いが、多量の水を連続的に脱気するには、効率上問題があり、構造的にも複雑化し、設備規模が大きくなりがちである。

#### ■水の脱気検証：二酸化炭素除去検証

また、別種の脱気方式を検討した。

原水タンクにナガセインテグレックスの用水を汲み置き、水循環再生システムへ原水を送水している。

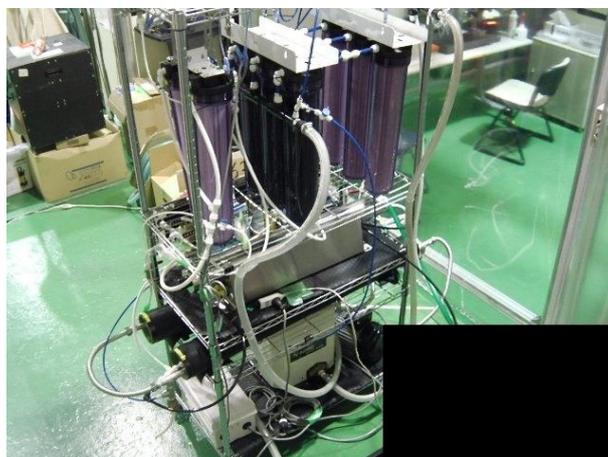
二酸化炭素除去前の精製水の pH は、水道法基準（pH: 5.8 以上, 8.6 以下）を満たさない値となっている。二酸化炭素除去を行い、安全性分析のため、現地に於いて、採水試験をし、水質分析を行った。二酸化炭素除去の調整水に対する水道法 5 1 項目検査結果を示す。

これにより、すべて基準値以下であり水道法検査を合格している。さらに、化学物質については分析下限未満であり、不純物も少なく、浄化度が高いことが示された。これにより、水への雑菌や化学物質での汚染はなく、二酸化炭素除去の調整水の安全性が示された。

これにより、二酸化炭素低減と pH 改善が検証された。

#### ★目標達成について：

二酸化炭素除去による調整水の水質については安全性において水道法検査合格により安全性が示された。

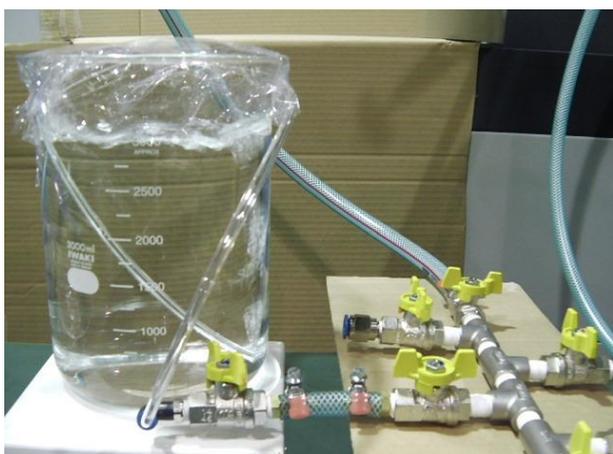


二酸化炭素除去システムを接続した水循環再生システム

## ■水の脱気検証：窒素バブリングによる脱気検証

さらに、別種の脱気方式として、脱気対象水溶液に窒素を吹き込み、他の溶存気体を追い出す窒素バブリングによる脱気を検討した。ナガセインテグレックス用水から水循環再生システムにより精製水を作成し、これに硫酸カルシウムを添加して調整水を作り、この調整水に対して窒素バブリングによる脱気を実施した。

下図に調整水への窒素バブリングによる脱気システムを示す。



窒素バブリングによる脱気システム（左図）と窒素ガスボンベ（右図）

調整水（硫酸カルシウム：254.86mg/3.5L※調整水 500ml を脱気前の測定で使用）をビーカーに入れ、窒素ボンベ（純度：99.9998%以上、製造：大陽日酸株式会社、充填：共同高圧ガス工業株式会社）に接続された配管からのチューブをビーカーに入れ、一定量の窒素を 30 分の間吹き込んだ。また、大気による再汚染防止だが、常に窒素が供給されるため、ビーカーの上にラップを張ってバブリングによる過剰窒素を逃がしつつ密閉する程度にし、容器内部に大気を入れず、常に窒素充満状態にしていた。

窒素バブリング前の原水（ナガセインテグレックス用水）・精製水・調整水の水質は下の表のとおりである。

窒素バブリング前の水の調整水 pH は二酸化炭素除去前は水道法基準（pH: 5.8 以上, 8.6 以下）を満たさない値となっている。また、精製水の時点から pH が低いことが示された。

また、窒素バブリング後の調整水の水質は下の表のとおりである。

窒素バブリング後は二酸化炭素量も減少していることがわかる。これにより、窒素バブリングによる二酸化炭素低減と pH 改善が検証された。

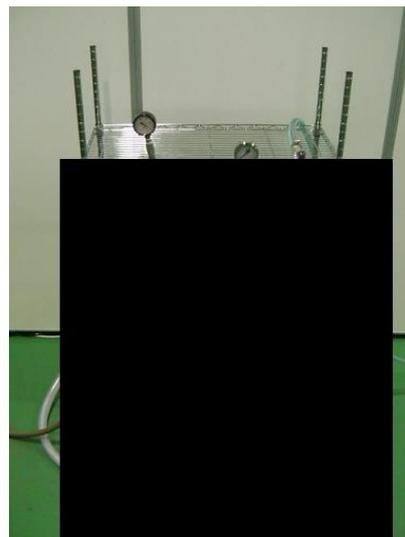
★目標達成について：

窒素バブリングによる調整水の水質については pH 改善・二酸化炭素減少が示された。

クリーンルーム環境下での脱気の高高度化検討するに当たり、手法としての効果検証としてはよいが、問題としては、少量を個別（回分）でしか脱気できず、そのわりに常に窒素を供給しなければならず、時間もかかることである。

■水の脱気検証：脱気装置による脱気検証

重ねて、さらに別種の脱気方式として、脱気対象水溶液から溶存気体を除去する脱気装置による脱気を検討した。この実験では水循環再生システムにより精製水を作成し、この精製水に対して脱気装置による脱気を実施した。右図に脱気装置システムを示す。



脱気装置システム

脱気装置による脱気前の精製水の pH は二酸化炭素除去前は水道法基準（pH: 5.8 以上, 8.6 以下）を満たさない値となり、pH が低いことが示された。

また、脱気装置による脱気後の精製水の水質は下の表のとおりである。

脱気装置による脱気後は二酸化炭素量も減少していることがわかる。これにより、脱気装置による脱気による二酸化炭素低減と pH 改善が検証された。

★目標達成について：

脱気装置による脱気による調整水の水質については pH 改善・二酸化炭素減少が示された。

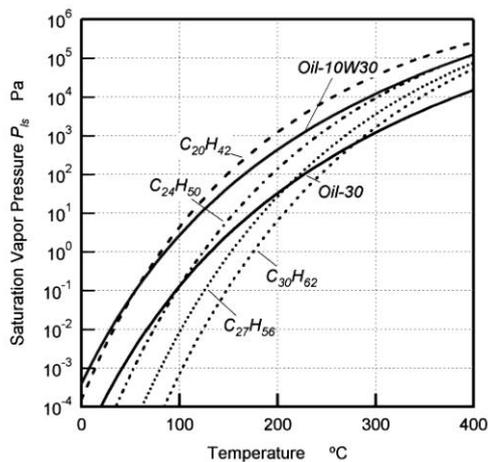
■脱気と脱泡について

上述までで各種脱気技術について検証してきた。本項では、脱気・脱法の高高度化のため、総論的に言及する。脱気を行えば、水中の二酸化炭素、酸素など溶存気体が低減し、脱泡の観点から水中に生

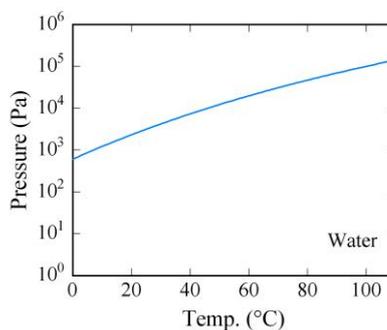
じる気泡も応じて低減するのは自明である。圧力・温度変動などで気泡という形態に移行して現れる懸念がある。しかしながら、各種脱気処理で除去でき、気泡として顕現しての隙間経路影響やキャビテーションなどの抑制ができると考えられる。

### ■ 流体の可視化実験概要

次に液体を使用するシステムで注意しなければならない点の一つとして、気泡の発生がある。気泡の混入はバルクとしての流体の物理的・熱的性質の変化をもたらし、様々な弊害を生じる。例えば、見かけ粘度や圧縮率（弾性率）の変化による軸受剛性や振動特性への影響などが挙げられる。液体中で気泡の発生する機構には大きく二つあり、一つは蒸発であり、もう一つは溶解ガスの脱離である。前者について、次の図で従来用いている潤滑油と水における飽和蒸気圧を比較する。



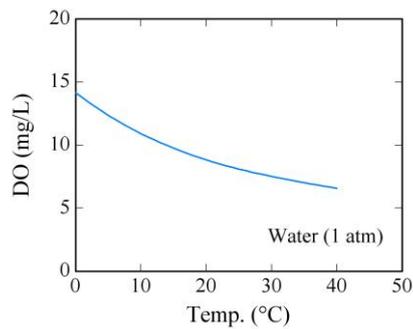
潤滑油の飽和蒸気圧と温度の関係



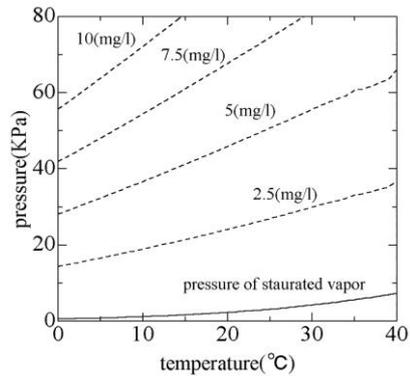
水の飽和蒸気圧

(針谷・鈴木、宇都宮大学教育学部紀要、2012)

図中の曲線より上の領域が液相で、下の領域が気相である。図から分かるように、潤滑油の飽和蒸気圧は水に比べてかなり低く、液体として安定している。また、蒸発気泡の問題では、よく知られているように気泡の発生および消滅の相変化が短時間で起こるため、液相中に弾性波動を誘起し、悪影響をもたらす。一方、次ページの 1 気圧の水に溶解される酸素量と空気飽和溶解曲線を温度と圧力に対して示す。



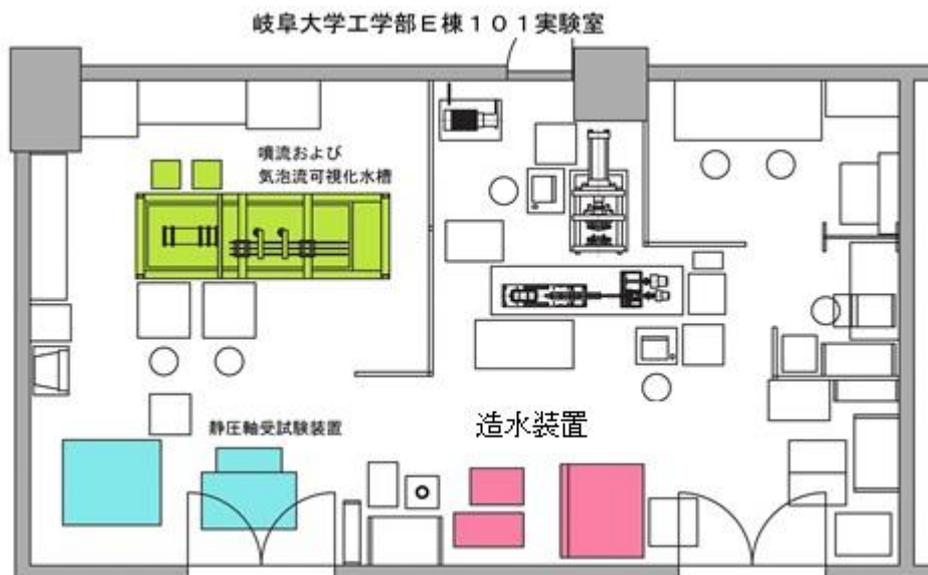
酸素の飽和溶解量



空気飽和溶解曲線

水中に溶存する酸素量は温度と圧力の影響を受けて変化し、温度の上昇とともに溶解量は減少し、圧力の減少とともに溶解量は減少する。このため、水の状態が高温あるいは低圧になった場合には、それまで溶解されていた量の酸素を保持することができなくなり、気体として脱離して行くこととなる。この現象は、蒸発・凝縮による相変化に比して緩やかに進行するといわれており、弾性波動等の影響は小さいと考えられるが、水の物理的・熱的性質に及ぼす影響は無視できない。

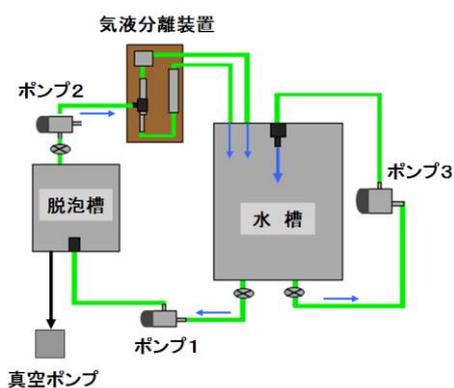
本研究開発にあたって、岐阜大学において実験を進める研究室の配置図を以下に示す。



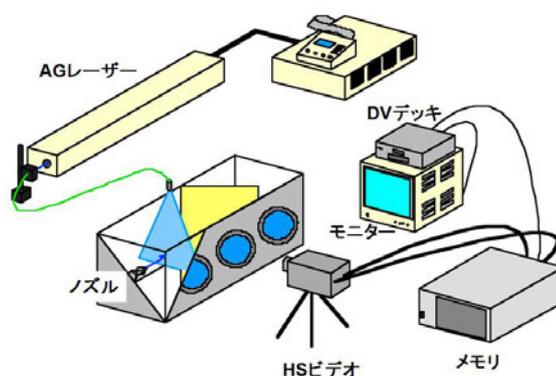
実験室の配置図

調整水を精製する装置として、造水装置を設備し、試験を行う。同実験室内には気泡流可視化水槽および静圧軸受試験装置も設置されており、実験環境の整備は完了している。

下図に示す簡易脱気装置を用いた予備実験で、高速水噴流の可視化装置を使用した。可視化観察用の水槽からポンプ1で加圧された水は、真空ポンプで減圧された脱泡槽の底面から噴射され、その圧力差で水中溶存空気が脱泡する。脱泡槽からポンプ2によって気液分離装置を経由し、観察用水槽に処理水を送る。この閉ループ処理を必要な時間だけ繰り返し、所望の溶存空気量を得たのち、ポンプ3を駆動して発泡状況の可視化観察を行った。可視化では、次ページに示すように、レーザーライトシートを照明光源として用い、ハイスピードビデオカメラシステムで撮影・記録した。



簡易脱気装置



高速水噴流可視化装置

ポンプ3の加圧量を2 MPaとして可視化した画像を図に示す。画像の左端中央にノズル出口があり、高速水噴流は左から右方向に噴射されている。左の画像は市水をそのまま用いた場合で、溶存酸素計による測定から溶存酸素濃度は7.7 mg/Lであった。右の画像は、簡易脱気装置で処理された水を用いた場合で、溶存酸素濃度は4.8 mg/Lであり、未処理水に対して約38%減の状態である。



未処理水(7.70 mg/L, 15.4°C)



処理水(4.80 mg/L, 22.0°C)

高速水噴流の可視化画像 ( $p_0 = 2 \text{ MPa}$ )

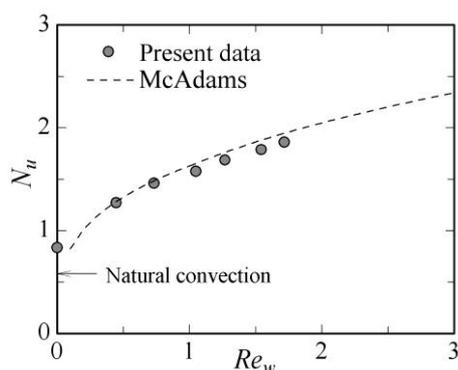
可視化画像より、ノズル出口近傍で最も照明光の散乱強度が高く、下流に行くほど散乱光強度は弱くなる。散乱光強度は、発生気泡の大きさや量に影響されるものと考えられる。未処理水と処理水を比較して、処理水の散乱光はかなり弱くなり、その領域も狭められている。以上より、本方法によって発生気泡をよく観察することができ、光の散乱強度から発生量を推定できることが分かる。

### 【1-3】水溶液（水）を循環させるポンプの開発に対する成果

#### ■配管経路内の流体の可視化

ここではまず、ピストン式ポンプによって吐出される流れの脈動を検知するために開発した熱線式センサの基本特性を調べた結果を説明する。金属細線に通電すればジュール発熱が起こり、周囲の流体が静止状態にあっても、細線から流体への熱伝達によって流体は暖められ、対流が生じる。この伝熱現象は自然対流熱伝達と呼ばれ、熱伝達量は細線温度と細線直径、および細線の姿勢などに依存する。流体が流れている場合の伝熱は強制対流熱伝達と呼ばれ、熱伝達量を決定する因子として流体速度が加わる。熱平衡状態が達成されているとき、ジュール発熱量と対流熱伝達量は等しく、ジュール発熱量は印加電圧と電流の積に比例するため測定可能である。したがって、間接的に測定された対流熱伝達量から、流体速度を求めることが可能となる。ここで熱線温度は、金属細線の電気抵抗が温度によって変化する性質を利用して求めている。

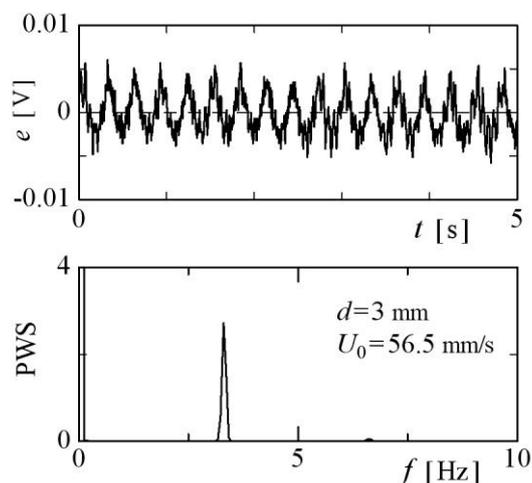
下図は、一様な水流中に熱線を直交して置いた場合の熱伝達率を、流体速度に対して示す。図の横軸は熱線レイノルズ数であり、流体速度に関する無次元数となる。図の縦軸はヌッセルト数で、熱伝達率と流体の熱伝導率の比を表す。 $Re_w = 0$  のときが自然対流熱伝達であり、 $Re_w > 0$  のときが強制対流熱伝達であり、従来得られている結果（破線）と概ね一致している。



熱線式センサの静的特性

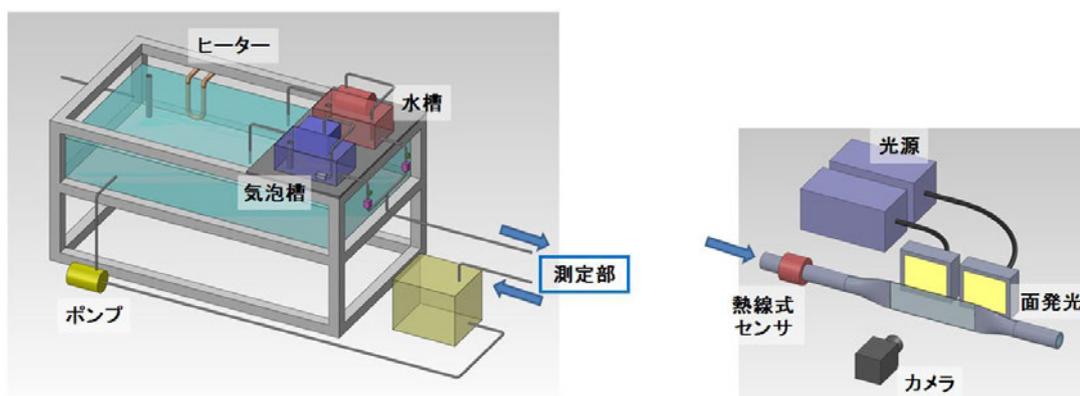
下の図は、一様流中に置かれた円柱の背後に形成される後流内にセンサを設置し、その動的特性を試験した結果を示す。円柱後流の流れの特徴はカルマン渦列の形成にあり、周期的な速度変

動が得られる。図の上段は出力変動波形を示し、センサは周期的変動をよく捉えている。図の下段は変動出力のパワースペクトルを示しており、約 3 Hz の卓越した周波数ピークを表す。無次元周期は約 0.16 となり、従来の結果とよく一致していることから、本研究開発で導入した熱線式センサは、ピストン式ポンプの動作範囲に対して十分な時間応答性を有していることが確認できた。



熱線式センサの動的特性（カルマン渦列）

つづいて、微細気泡の発生状況を可視化するために、下の図に示す装置レイアウトを計画した。



発生気泡観察装置の全体図

測定部

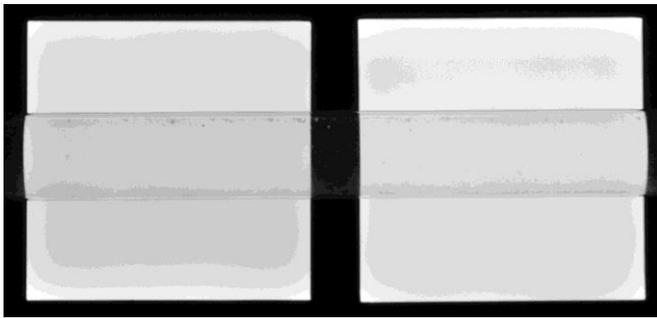
気泡を効率よく発生させるために、空気の過飽和水を精製する装置を使用し、気泡槽内で減圧・脱泡させる。そして、気泡槽と気泡の混入していない水槽からの水を適宜混合させ、所望のボイド率を有する気液混合水を作成し、測定部へと導く。測定部では、面発光光源を用いたバックライト照明とライン状 LED 光源による散乱光照明を試行し、気泡流をカメラ撮影するとともに、熱線式センサによる測定を同時に行うよう計画した。



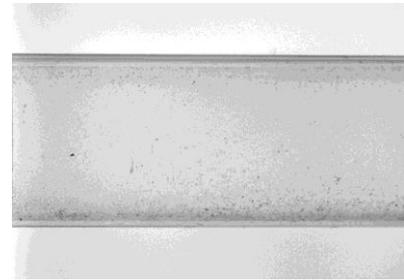
面発光光源を用いたバックライト照明



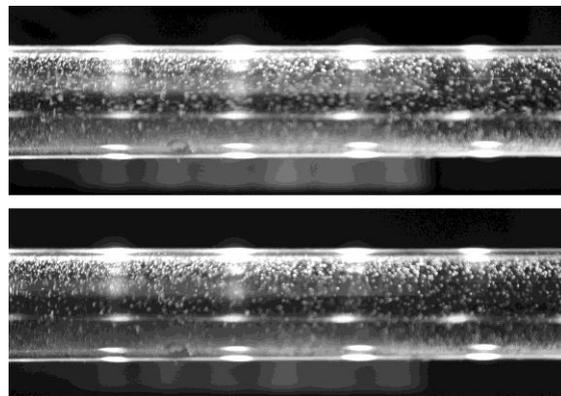
ライン状 LED 光源による散乱光照明



バックライト照明による撮影画像



バックライト照明の拡大画像



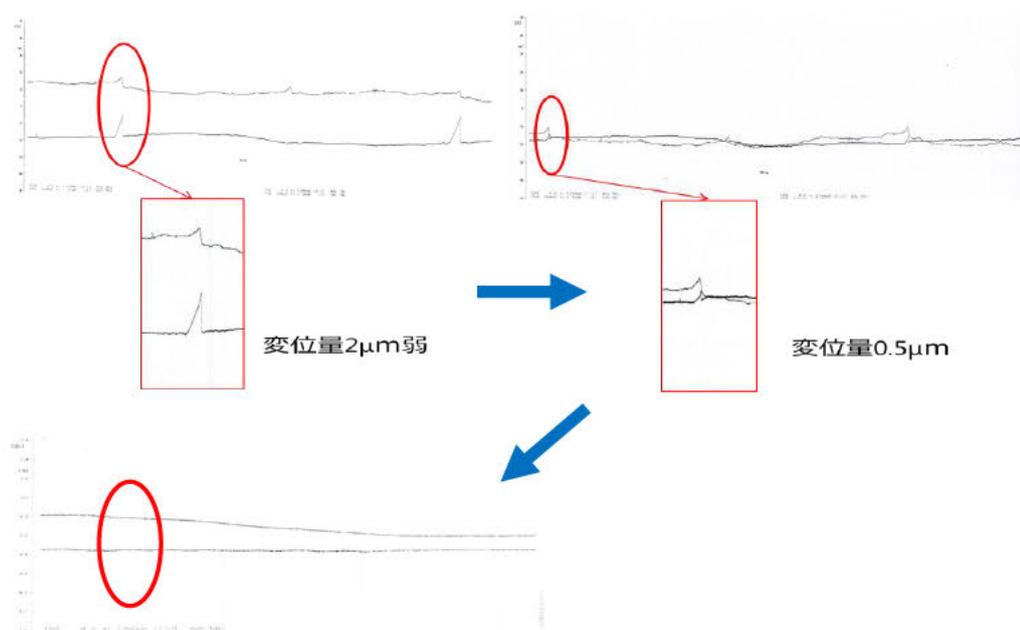
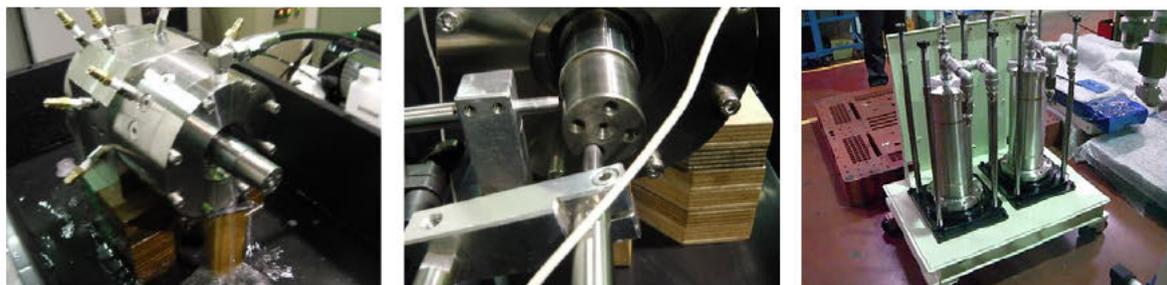
散乱光照明による撮影画像（上段 1/400、下段 1/800）

上図に気泡流の撮影画像を示す。バックライト照明を施した場合の図およびその拡大画像の図では、気泡像がほとんど観察されていない。一方、散乱光照明による図では明瞭に気泡を観察できており、両照明方法の間で違いが現れた。ただし、本年度は気泡径およびボイド率の制御が十分に行えてはおらず、今後、これらの制御方法を確立するとともに、目標流量（10 L/min、断面平均速度約 1.4 m/s）における気泡流観察の開発を進める。

### ■開発したスピンドルとピストンポンプ

初年度は、水溶液（水）を循環させるポンプについては構想設計・図面化を行い、部品加工・資材購入と組立を行ったが、性能検査と検証実験については未実施であった。そのため、性能検査を実施した。

水循環再生システムの精製水をピストンポンプに供給し、スピンドル先端部のスラスト・ラジアル方向に測定器をセッティングし変位を測定した。



測定の結果、ポンプの切り替えの時に変位が大きく変動することが分かった。ポンプの切り替えのタイミングを調整することで改善することができた

## 【2】研削盤本体の耐腐食性を向上させる技術の開発に対する成果

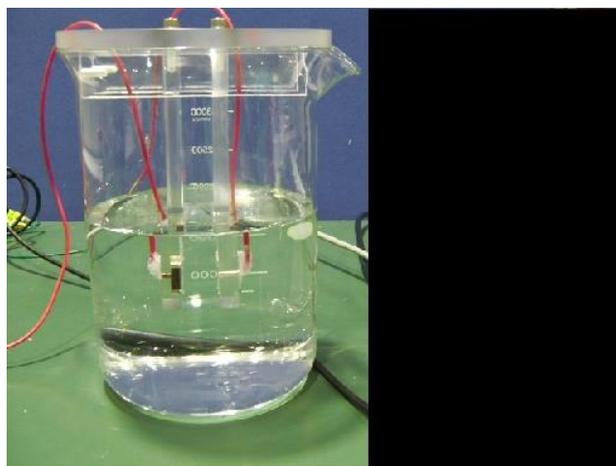
本研究開発では油の代わりに水を使用するため、防錆の対応が必須となる。そこで、平成 26 年度の耐侵性の検証結果を元に静圧軸受けユニット及び静圧 XY ステージとそれを制御する NC 装置の製作と改良検討を行った。また、錆の観察を継続して行い、防錆についての条件を追求する。検証実験では、流量計・圧力計等の計測器を使用して行った。また、必要に応じて岩手大学の西川助教が研究する電気化学的防錆処置などを行うことで、防錆の効果を高める。

さらに、展示会に、本研究開発の試作品や情報提供（パネル等）を展示計画していたが、要素としての検証は実施したものの、知財出願やプロト機製作が遅れており、展示などはまだ行っていない。今後、新技術の PR のすることで、ユーザーズの調査や事業化をするための基盤作り（新技術の認知・浸透）とユーザー評価の研究開発へのフィードバックを行う予定である。

### ■高電圧領域での防錆電圧供給と電流への影響検証

まず、防錆向上や防錆効果を検証するため、電気防錆時のより広範囲での電流・電圧特性を、高電圧測定器を用いて測定した。

下図に高電圧範囲電流測定システムを示す。



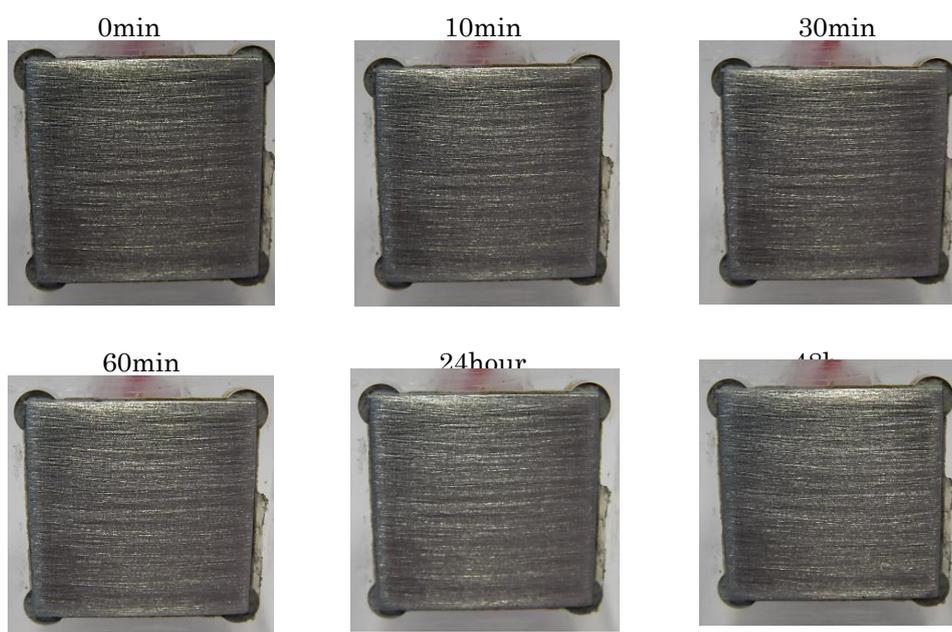
高電圧対応の防錆実験装置システム

高電圧においても電流に対して大きな影響は見られなかった。

## ■電気防錆効果検証（2日間：再実験）

防錆実験システムを用いて、2日間（48時間）の電気防錆耐久試験を本年度再試験した。昨年度は工作物端に、電流不足による錆または試験片が一度腐食した調整水の連続試験によるコンタミネーションによるものと思われる付着物が生じる問題があった。そこで、調整水の使い回しをせず、試験を実施した。

下図に2日間の防錆実験の結果を示す。



電気防錆効果（調整水）2日

実験中、各時間（0分、10分、30分、60分、24時間、48時間）での防錆試験片を撮影している。写真を見ると、実験開始から終了まで錆などを生じず変化なく金属光沢を保っている。これにより、長時間の防錆効果が示された。

2日間の防錆達成の意義であるが、（株）ナガセインテグレックスにおいて通常、日曜は休業になる。土曜日夜方の終業時間から月曜朝無人の間の1日強、防錆が保たれば、後は有人になり何か問題が生じてメンテナンスなど対応がスムーズでありより安全になる。また、日単位の長時間防錆が微弱電流・微弱電力でできれば、円滑な運用ができるものと期待される。

なお、2日間の防錆となっているが、あくまでベンチマークテストである。通常、電気防錆は防錆を充足させる防錆必要電流以上になると原理的には給電している間は永続的に錆が防がれる。このため、2日間の防錆が実現している場合、おそらくこの防錆必要電流以上になっており給電を続ける限り2日間以上も継続して防錆されることが予想される。しかしながら、これまでの知見から、今回の

供給電流は防錆必要電流よりも多いと考えられ、すなわち過剰な水の電解による気泡発生や水溶液の減少があると思われるので、より効率的防錆や省電力ならびに溶存気体減少と水量減少量削減のため、最適防錆電流を検証すると、一層の防錆電極での効率的防錆への知見が得られるであろう。

★目標達成について：

改めて2日間の防錆効果の検証がなされ、電気防錆の効果が示された。

研削盤は年単位で長期にわたって使用される物である。その間、防錆を維持し、あるいはメンテナンスを行う必要がある。数W程度（乾電池レベル）の微弱電流・微弱電力が防錆に必要である

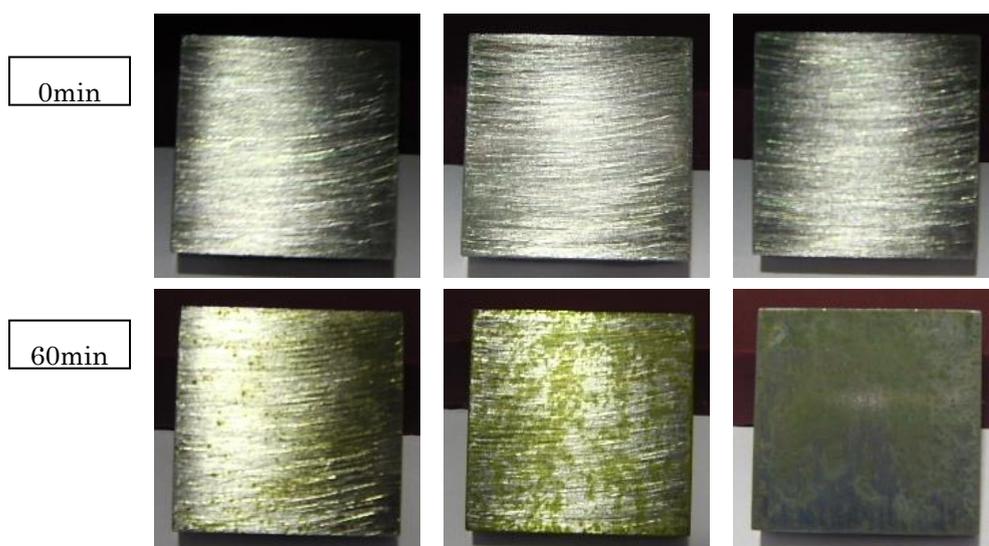
■防錆可能領域の検証

研削盤の防錆性を向上させるため、内部に組み込む電気防錆電極を検証している。

■密閉環境下での脱気水での防錆性向上検討実験

研削盤の防錆性を向上させるため、予定している実際の研削盤の水系配管内部を再現しての調整水の耐腐食性を検証した。

調整水（脱気，〇〇〇気中） 調整水（未脱気，大気中） 原水（未脱気，大気中）



実験前後の各水の防錆状態

写真を見ると、大まかであるが、調整水（未脱気）が一番錆びており、それと同等くらいに原水（未脱気）が錆びている。また、調整水（脱気）はそれらよりやや錆が少なくなっている。よって、脱気には一定の防錆性向上効果が見て取れる。また、実際的な実用評価の上ではより長時間の観察も必要と思われる。また、写真写りの光加減など錆判別に影響するので撮影の改善も検討課題である。

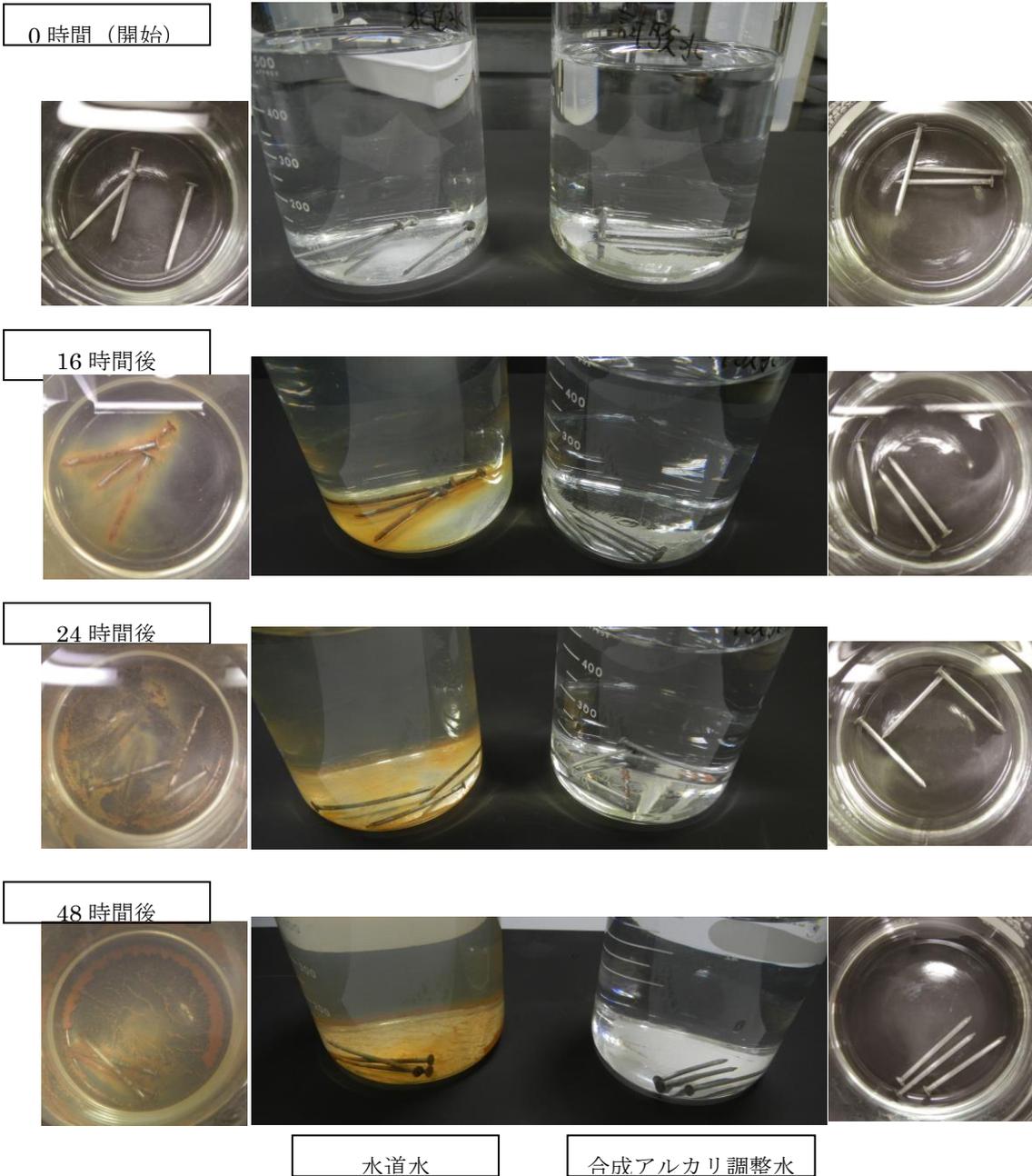
当初、研削盤本体への実装のため、各種の提案し、検討を行った。これまでの知見から、実装にむけた改善・改良と安定した防錆制御のため、各種の電気防錆や給電などを検討したが、プロト機への電気防錆の組み込みが遅れており、本年度のスケジュールでは実装が間に合わないため、安全性やコンタミネーションには問題があるが、一層の防錆性と早期の実用化を考え、古くから pH 調整剤による防錆効果が得られていることから、高 pH（pH12.8 程度の強アルカリ）のアルカリ性水溶液の併用での開発を進めている。

アルカリ性水溶液使用は、既存技術であり新規性や特許寡占も難しく、工作機部材にも利用される両性金属（酸でもアルカリでも溶ける：アルミなど）や樹脂材への腐食影響や、機械からの漏出による加工部材（半導体など）への汚染懸念といった問題がある。さらに、安全性では、アルカリ剤を使用することから、廃液処理を要し、また人体や環境にも影響するため、あまり望ましくない。また、市販アルカリ水（アルカリイオン水）はオイルほどではないが高価であり原料コストもかかる。しかしながら、アルカリ性水溶液は防錆性があり、安全性や機体への一部影響（両性金属や膜部材など樹脂など）に目をつぶれば、これまで開発した水系にある程度そのまま利用できるため、電気防錆の実装・移行までの一時的な措置であり、また、電気防錆と併用することで防錆性の向上も期待される。

今後、市販のアルカリ水特殊生成方式装置は薬剤・装置コストなどの問題もあるので、水循環再生システムでの純水と化学薬品成分（後述）混和によるアルカリ性調整水の利用や、そのアルカリ成分や濃度などを変化させ安全性向上や防錆性の検討をし、電気防錆との併用や、電気防錆への移行を進めようと検討している。

#### ■アルカリ性調整水の検証：アルカリ性水溶液の成分からの再現合成水での防錆性検討

次に、アルカリ性水溶液の再現合成は大まかにできたが、同様な防錆性があるか検証する必要がある。本項では、上述で合成したアルカリ性調整水にて簡易的な防錆試験を行い、防錆性を確認する。次ページに示すように、再現合成したアルカリ性調整水と、通常水道水に、鉄釘を沈めて腐食変化を検証した。



合成アルカリ調整水（右）と水道水（左）での釘での簡易的防錆性の検証

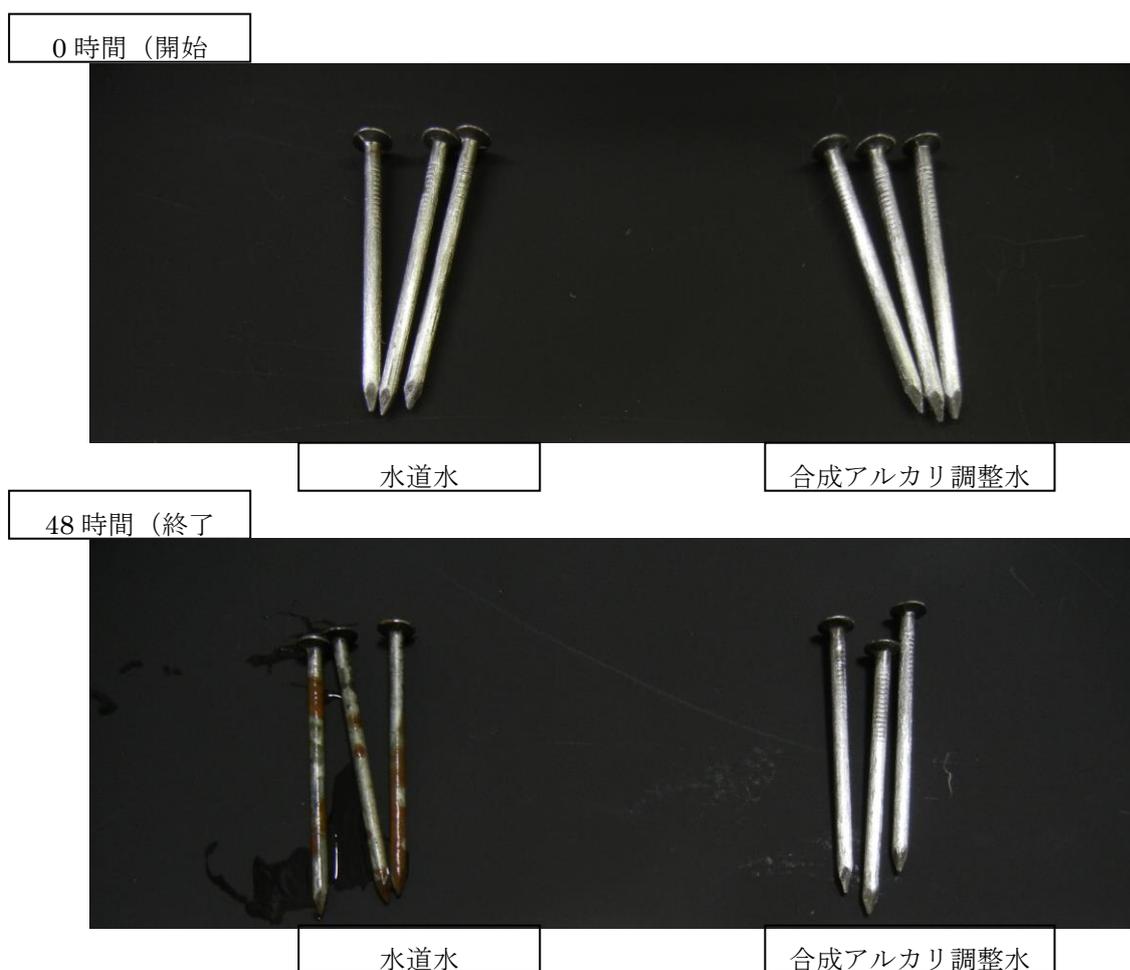
上図に示すように、合成したアルカリ性調整水では 48 時間経過してもビーカー水中で釘にまったく錆が発生していない。一方、水道水においては 16 時間のもの以降に錆が発生し、水が錆で濁っている。（水道水は実際にはもっと早い時間に錆が発生していると思われる。）

次ページに示すように、実験前後の釘を比較すると、合成したアルカリ性調整水では 48 時間経過しても釘にまったく錆が発生していない。一方、水道水においては錆が発生している。

これにより、合成したアルカリ性調整水に 48 時間の防錆効果が示された。

このことから、防錆性においては、化学薬品成分を調整すれば得ることができ、特殊生成方式装置のような特異な混和方法を用いなければ合成できないような液特性は特になく、あることが示された。これにより、防錆性を有するアルカリ性調整水の水合成を実現した。

しかしながら、防錆性を得るには、 $\text{pH}$  が高く、濃度が濃いと思われ、安全性などのため、電気防錆との併用ふくめ成分や濃度など検討が考えられる。



合成アルカリ調整水（右）と水道水（左）での防錆性の検証

#### ■研削盤の開発と搭載について

現在、プロト機の電気防錆の組み込み開発が遅れており、装置がとりいそぎ動くように、強アルカリのため安全性やコンタミネーションなどの問題があるがアルカリ性水溶液の併用での開発を進めている。

アルカリ性水溶液は鉄材に対しては防錆性があるため、利用することで防錆性の向上が安易に図れる。また、筐体の両性金属や樹脂部品への腐食・溶解といった影響が懸念されるが、早期の検証を行うこ

とができる。電気防錆と併用することで、防錆性の向上とともにアルカリ性水溶液の濃度や成分を改善し安全性を向上したり、電気防錆を搭載しより安全・無害な方式へ移行していくことを検討している。

なお、静圧軸受けユニット・静圧 XY ステージとそれを制御する NC 装置等、すべて搭載した実機の開発は遅れており、電機防錆搭載とともに引き続き製作を進めている。

### 【3】 高速回転軸受けの開発

#### ■50,000 回転対応スピンドル開発

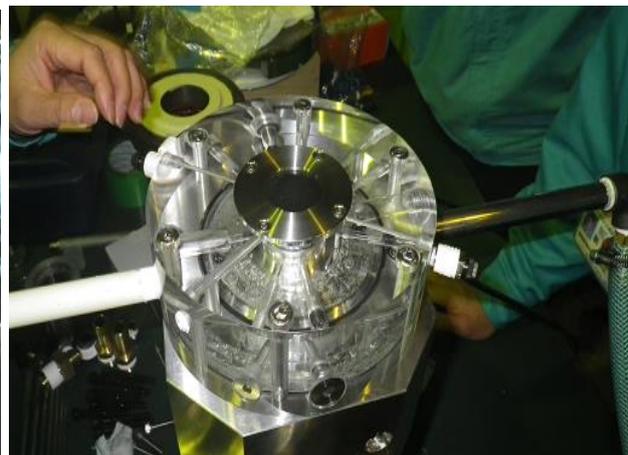
高速回転軸受けの開発に当たり、静圧ポケットの形状及び静圧隙間の最適化を検討し、設計を着手した。また、静圧隙間を狭くする事で部品単体の幾何学精度を高める必要性とそれらを適切に評価する測定方法も合わせて検討を行った。具体的には初年度製作したスピンドルの知見から下記の要素の改良を行った。

- ・ 静圧隙間の量（従来油静圧で得ていた経験から隙間調整を行ったが、油と水の粘性抵抗の違いから所定の圧力が得られず、シミュレーションソフトでの解析を行って最適化を行った）
- ・ 静圧用キャピラリーの改良
- ・ エアーシールの採用（通常流体の漏れを防ぐ為にメカニカルシールを用いる。これは回転軸の隙間に接触しているため軸の回転に伴い摩擦が働き様々な弊害をもたらす。（発熱、回転抵抗）今回目標値している高回転領域ではより顕著になるので改良を行った）

上記改良を重ね下図（左）に示すスピンドルを製作した。また同時に岐阜大学井上教授の下で静圧水の可視化が出来る様に試作スピンドルの一部を改良し静圧隙間・ポケット部の水の流れが確認できる様にした。下図（右）に示す。



高速スピンドル外観

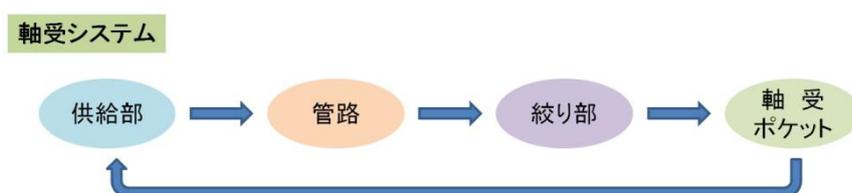


流体の流れを可視化した様子

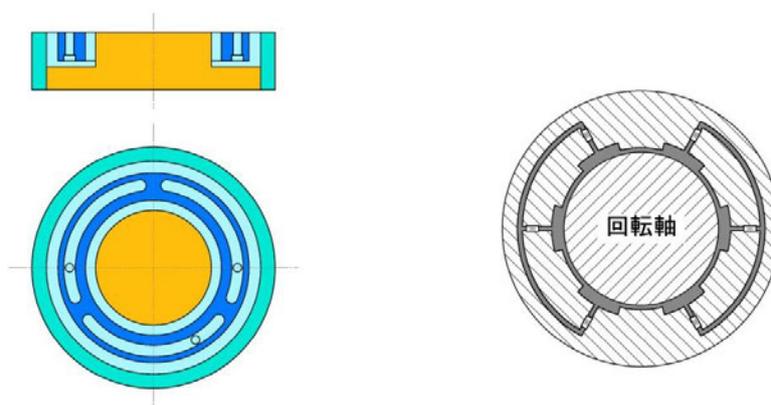
高速回転軸受けの開発について、軸受け面間のみならず配管経路内においても流れは層流から乱流へと変化するため、軸受け機能を劣化させる要因分析を主に実施した。（株）ナガセインテグレックス担当の試作軸受け（スラスト部分）を対象として、まず数値解析を実施し、軸受け内部の圧力分布を検討した。その上、透明アクリルで製作された軸受けモデルを使用し、染料注入法による流れの可視化を実施

した。概ね計画通りの進捗状況にある。以下に、実施内容を具体的に示す。

軸受の各所において調整水の流動様式は様々であり、軸受システム全体に対して設計指針を立てる必要がある。下図に、軸受システムを(1)供給部、(2)管路、(3)絞り部、(4)軸受部、という4つの要素に分けて考える。軸受の振動は外的と内的の要因によって励起され、前者として主なものに加工工具によって引き起こされる振動が挙げられる。一方、後者としては、軸受システム内部でポンプ等の機械的振動と管路内部で自励的に誘起される振動流や乱流が考えられる。ここに、流体の相変化を伴う場合には、複雑な問題が加わる。上記の軸受システム要素の中で、(3)絞り部の背後、および高速回転軸受では(4)軸受部の流れは相対的に高いレイノルズ数流れとなり、内的振動源の候補として最も重要な流れと考えられる。このため、本年度は、実機寸法での絞り部の流れの可視化、ならびに、回転軸受のスラスト軸受部の観察を実施した。



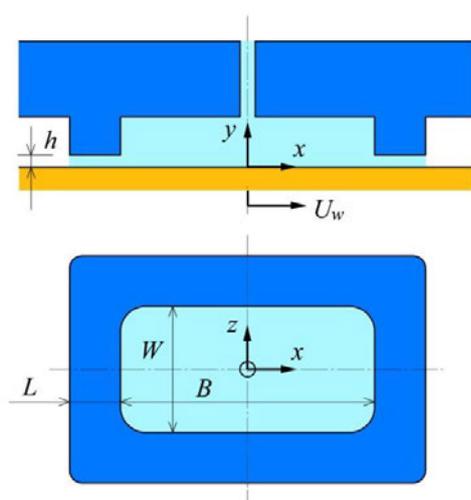
軸受システムの全体



スラスト軸受とラジアル軸受の例

さらに、機械内で溶存空気が脱泡する現象は局所的な低圧領域で生じ、この低圧領域は流体の加速現象ならびにはく離現象、また回転軸受においては遠心力効果によって出現する。流体の加速は流路の断面積減少部における増速作用や軸受面相對運動の速度差による粘性作用によって生じる。圧力の低い領域が出現した場合には、まず水に溶解している空気が脱泡し、さらに圧力が低い場合には、微

細な空気泡を核として水の蒸発気泡が発生する。調整水の温度を 25℃とした場合、飽和蒸気圧は約 3 kPa である。大気圧を約 100 kPa として、圧力が 97 kPa だけ降下するためには、水の流速がゼロからスタートしたとして約 14 m/s まで加速しなければならない。例えば、前ページに示す回転軸受の場合、軸直径 60 mm の軸周速度に換算すれば、回転数約 4500 rpm に相当する速度となる。すなわち、軸受ポケットに導かれた調整水は、水の粘性作用により回転軸表面では軸の周速度と同一速度で運動することとなり、軸受ランド部を通過する流体の流れはかなり複雑となることが予想される。



軸受部におけるフローモデル

上図に軸受け部のフローモデルを示す。軸受部に生じる流れを単純化した場合のフローモデルを示す。理想的な状態では、ポケット内の液体はほぼ一定圧力に保たれ、すき間高さ  $h$ 、長さ  $L$  のランドを通過して流出される。すなわち、ポケット内圧を  $P_p$ 、周囲大気圧を  $P_a$  とすれば、液体は  $\Delta p = P_p - P_a$  の差圧を駆動源として流動し、差圧は液体と固体壁面との間に働く摩擦によってバランスする。軸受が静止している場合 ( $U_w = 0$ )、ランド部の流れは概ね平面ポアズイユ流となり、また、軸受が相対運動している場合 ( $U_w > 0$ ) には、流出方向によって流れは異なる。そのため、便宜上、上図に示す軸受け部を尾寝るフローモデルに座標系を定めて考えることとする。

流れの形態によって、ランド部を次の 3 領域に分ける。

- (i)  $x$  軸正方向への流出 ( $dp/dx < 0, U_w > 0$ )
- (ii)  $x$  軸負方向への流出 ( $dp/dx > 0, U_w > 0$ )
- (iii)  $z$  軸正方向への流出 ( $dp/dz < 0, U_w > 0$ ) および  $z$  軸負方向への流出 ( $dp/dz > 0, U_w > 0$ )

ポケット・コーナ部の流れは複雑となるため、ここでは省略する。流動現象を支配する運動方程式は

次式となり、すき間が薄いことを考慮に入れれば、右側に示すように簡単化できる。ここで、 $\rho$ は液体の密度であり、 $\mu$ は粘度である。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{cases}$$

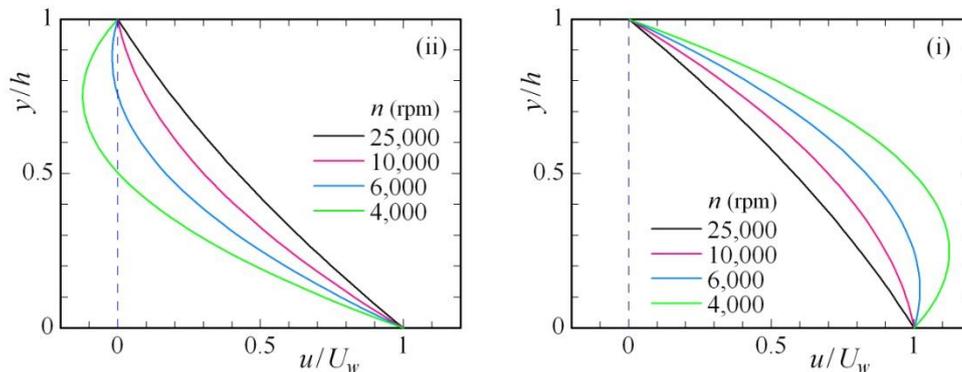
まず、(i)の場合、すなわち、前ページフローモデルで側方右向きの流れを扱う。このとき、上式は次のように積分することができ、壁面に垂直方向（ $y$ 方向）の速度分布を得る。

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{\mu}{\rho} \frac{d^2 u}{dy^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{du}{dy} &= \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} y + C_1 \\ u &= \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2 \end{aligned} \rightarrow \begin{cases} y=0 \rightarrow u=U_w \rightarrow C_2=U_w \\ y=h \rightarrow u=0 \rightarrow C_1 = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{h}{2} - \frac{U_w}{h} \end{cases}$$

$$\therefore u = -\frac{h^2}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left[ \frac{y}{h} - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right] + U_w \left( 1 - \frac{y}{h} \right) \quad \text{or} \quad \frac{u}{U_w} = C \left[ \frac{y}{h} - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right] + \left( 1 - \frac{y}{h} \right), \quad C = -\frac{h^2}{2\mu} \frac{dp}{dx} \frac{1}{U_w}$$

(ii)の場合は、速度  $u$  と壁面移動速度  $U_w$  の向きを逆にすればよい。液体を水として、すき間高さ  $h = 20 \mu\text{m}$ 、 $L = 4 \text{ mm}$ 、 $\Delta p = 0.5 \text{ MPa}$ 、そして、壁面移動速度を軸直径  $D_s = 60 \text{ mm}$  の軸周速度から求めることにして回転数  $n$  で表せば  $U_w = \pi D_s n / 60$  となり、回転数を変化させた際の速度分布を下図に示す。



速度分布（ $x$ 方向）

(ii)の場合は、圧力勾配を逆にかければよい。図から分かるように、(i)の場合には何れの回転数でも右向き速度となっており、ポケットからランドを通じて液体は流出するが、(ii)の場合には、ここ

で計算した条件では右向き速度が優勢であり、周囲からポケットへの流入流量が多い。

つぎに、(iii)の場合について考える。上式から分かるように、見かけ上、 $x$ 方向の流動と $z$ 方向の流動は独立しており、2つの方程式をそれぞれ積分すればよい。まず、 $x$ 方向の速度分布は、次式となる。

$$\frac{dp}{dx} = 0 \quad \rightarrow \quad \therefore u = U_w \left( 1 - \frac{y}{h} \right)$$

単純なクエット流の速度分布であり、さらに $z$ 方向にはポアズイユ流となる。

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dy} &= \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz} y + C_3 \\ w &= \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz} \frac{y^2}{2} + C_3 y + C_4 \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} y=0 \rightarrow w=0 \rightarrow C_4=0 \\ y=h \rightarrow w=0 \rightarrow C_3 = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz} \frac{h}{2} \end{cases}$$

$$\therefore w = -\frac{h^2}{2\mu} \frac{dp}{dz} \left[ \frac{y}{h} - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right]$$

したがって、両方向への速度分布をまとめて、次式となる。

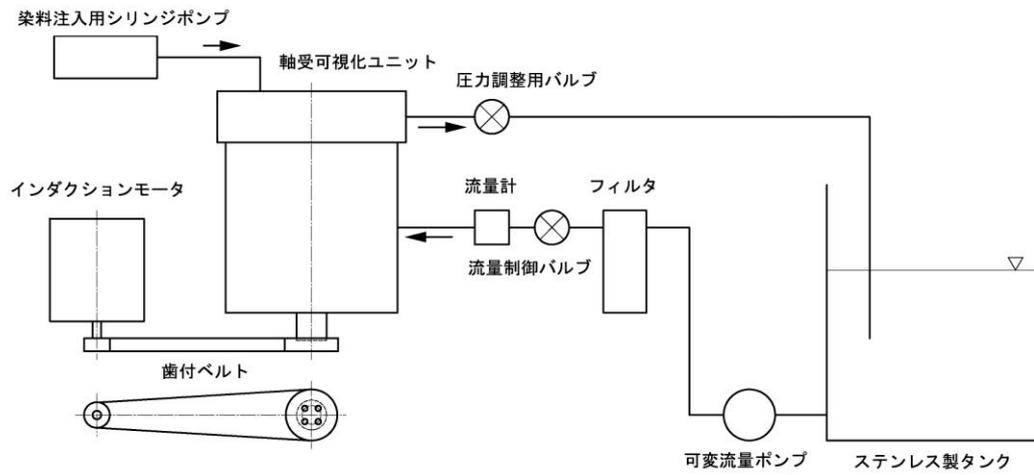
$$\begin{cases} \frac{u}{U_w} = 1 - \frac{y}{h} \\ \frac{w}{W_c} = 4 \left[ \frac{y}{h} - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right] \end{cases}, \quad W_c = -\frac{h^2}{8\mu} \frac{dp}{dz}$$

この結果は、後述の数値解析結果と比較するために、次々ページ直動軸受での計算例に示している。

つづいて、本事業で調査対象とするスラスト軸受の試験モデル図とその外観写真を次ページに示す。回転軸受本体はステンレス鋼で製作されており、ラジアル部2ユニット、スラスト部2ユニットのうち、スラスト部1ユニットを透明アクリル樹脂で置き換えている。試験装置は、ステンレス製タンクに貯めたアルカリ水をポンプで加圧し、軸受に供給するシステムとなっており、濾過フィルタ、流量計、圧力計を経路途中に装備する。可視化は染料注入法を採用し、この注入のためにシリンジポンプを用いる。軸の回転は、歯付きベルトを介して変速モータを用いる。

次ページに絞り部のフローモデルと可視化モデルの写真をそれぞれ示す。絞り直径  $d$  に対して円管直径を  $D$  とし、流れの円管による拘束状態を直径比  $D/d$  によって表現する。前年度までは、流れのレイノルズ数  $Re_j$ 、直径比  $D/d$ 、管長比  $L/d$  を変化させ、可視化観察を実施している。本年度は、実機スケールにおいて、透明アクリル樹脂製の絞り部を製作し、染料注入法での可視化観察を実施した。円管直径は  $D = 11.5 \text{ mm}$  である。絞りには、従来の単一孔の毛管（内径  $0.33 \text{ mm}$ 、長さ  $15 \text{ mm}$ ）と、内径  $1.7 \text{ mm}$ 、長さ  $20 \text{ mm}$  の管に14本の毛管（外径  $0.38 \text{ mm}$ 、内径  $0.22 \text{ mm}$ ）をセットした多孔管を用い

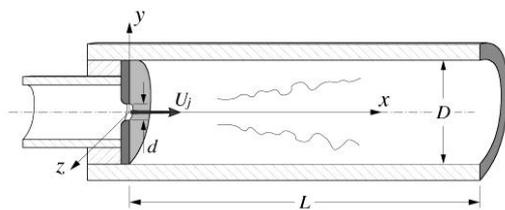
た。多孔管の等価直径は約 0.15 mm であるのに対して、流路断面積は等価直径の単孔管の 66 倍となり、レイノルズ数を低減させる効果は大きい。



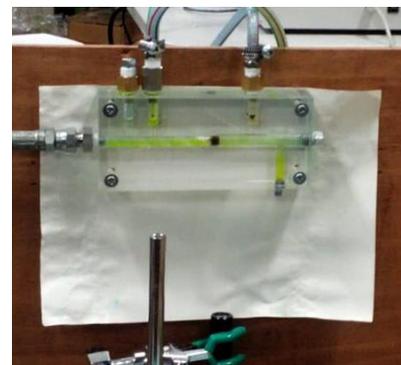
スラスト軸受に係る試験装置の概略



可視化用スラスト軸受モデルの写真



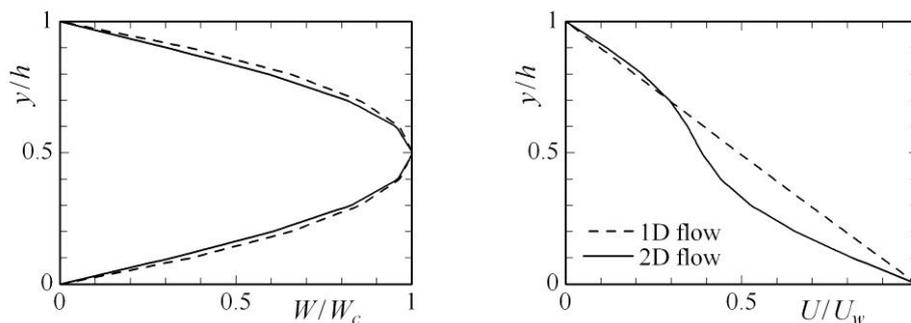
絞り部におけるフローモデル



可視化用絞りモデルの写真

### ★数値解析結果

本研究開発事業の数値解析には、研究室所有の汎用流体解析コード（ANSYS CFX）を使用した。まず、直動軸受をモデル化して、前述の(iii)の場合について解析した結果を下図（直動軸受での解析例）に示す。破線は理論解析結果であり、1次元的な流れ、すなわち、 $w$  成分はポアズイユ流に、 $u$  成分はクエット流となる。これに対して、実線は数値解析結果である。両速度分布ともに理論解析値と同傾向を示しており、概ね満足できるものとなった。しかし、 $u$  成分の移動壁側には差が現れ、この原因として、境界条件の不具合から、理論解析では考慮していない  $x$  方向への圧力勾配が生じた可能性が考えられる。



直動軸受での計算例（壁垂直方向への速度分布）

つづいて、密閉円筒容器内の流体の運動を考える。容器全体が回転し、流体も剛体回転しているとすれば、回転軸からの距離を  $r$  として、容器内の圧力勾配は次式で表すことができる。

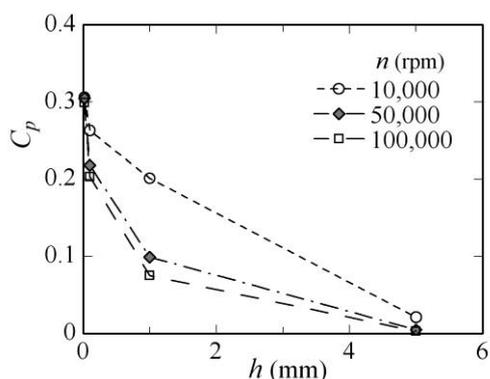
$$\frac{dp}{dr} = \rho r \omega^2$$

例えば、5 ページ前のスラスト軸受とラジアル軸受の例に示す図で、スラスト軸受のポケットの内半径を  $r_1$ 、外半径を  $r_2$  とすれば、流体の剛体回転（毎分回転数  $n$ ）によってポケット内には次式の圧力差が作用することになる。

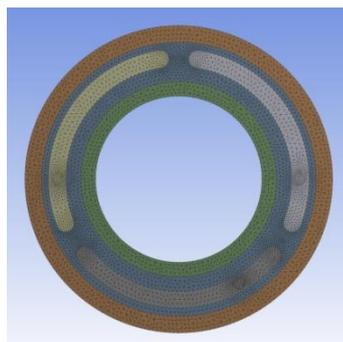
$$\begin{cases} r_1 = 27 \text{ mm} \\ r_2 = 31 \text{ mm} \end{cases} \rightarrow \Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\rho(r_2^2 - r_1^2)}{2} \omega^2 = \frac{\rho(r_2^2 - r_1^2)}{2} \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2 = 0.00127 n^2$$

$n = 10,000 \text{ rpm}$  において、 $\Delta p = 0.127 \text{ MPa}$  だけの圧力差が生じ、かなり大きい。実際には、円筒容器全体が回転するのではなく、一方の円板のみが回転しているため、流体の剛体回転は生じず、回転円板側で半径方向外向きの流れが、固定円板側で半径方向内向きの流れがそれぞれ形成され、容器内を循環する。したがって、圧力勾配は上記の見積りよりも小さくなり、また、容器の高さによる影響も

大きく現れる。下図グラフは、数値解析によって圧力差を求めた結果を示す。図の横軸は円筒容器の高さを、縦軸は圧力差を無次元係数で示す。上述のポケットの例について、深さ 2 mm 程度とすれば、圧力係数は 0.15 程度となり、圧力差は 0.02 MPa 程度と見積もれる。また、ランド部のすき間高さでは圧力係数は 0.3 程度まで大きくなっている。

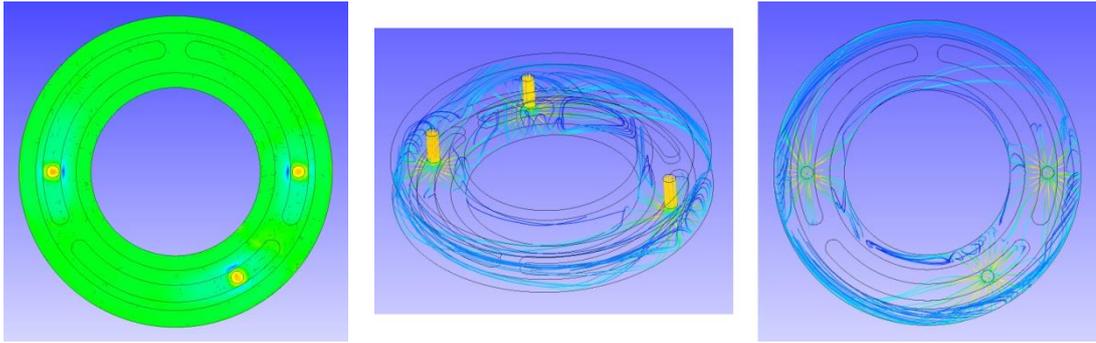


軸受すき間高さと半径方向圧力こう配の関係



数値解析モデルの計算メッシュ例

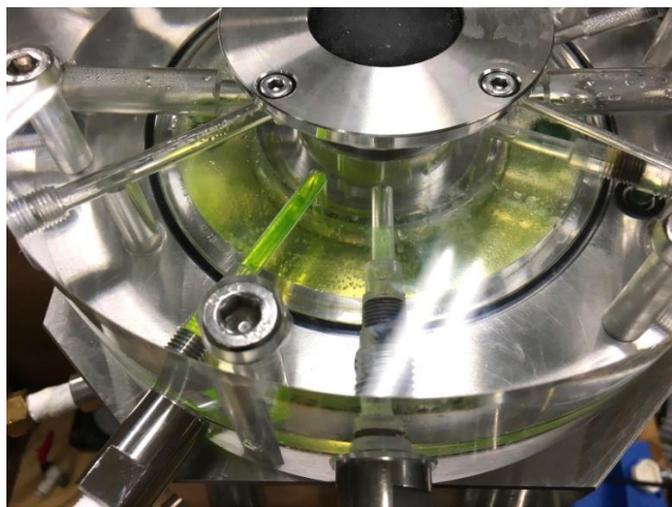
上図は、6 ページ前のスラスト軸受とラジアル軸受の例におけるスラスト軸受の解析モデルであり、計算メッシュを示している。前述のように、ポケットの深さが 2 mm であるのに対して、ランド部のすき間高さが 20  $\mu\text{m}$  であり、100 倍の寸法比となるため、計算メッシュの設定に注意を要する。例えば、自動メッシュ生成では大きな寸法比のある場合、狭い流路のメッシュ表現が不十分となることが多く、注意してメッシュの細分化を施す必要がある。すき間高さを 0.1 mm とした場合の数値解析結果を次ページに示す。左側の図は圧力コンタであり、右側の 2 つの図は同じ流跡線について観察方向を変えてそれぞれ示す。圧力コンタは、高圧部が暖色で、低圧部が寒色で示されている。3 つのポケットのそれぞれに円形の流入部を設けており、この部分の圧力が高くなっている。そして、流跡線でも分かるように、流入部から流れは放射状に拡がりながら加速し、低圧部を形成している。高粘度の潤滑油と異なり、水の粘度は低く、慣性効果が相対的に大きく現れている。実際には、すき間高さを 20  $\mu\text{m}$  とした数値解析を実施する必要があるが、計算メッシュの設定に問題があり、今後、引き続き検討を進める。



スラスト軸受における圧力分布（左）と流動パターン（右）

★スラスト軸受部可視化結果

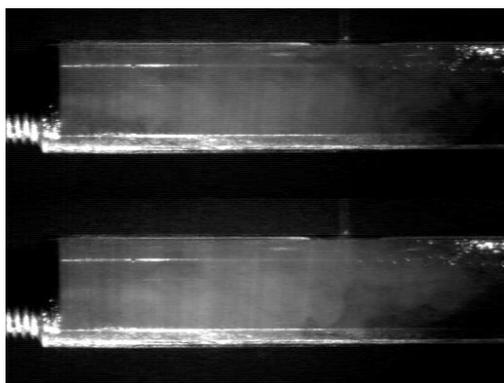
可視化用スラスト軸受モデルを用いて行った結果を、下図に示す。写真の真下から入る流路が静圧供給ラインで、その左斜め下からの流路が圧力モニタ用のラインである。本実験では、圧力モニタ用ラインを流用して染料注入を行っている。染料には、蛍光染料であるフルオレセインを用いた。通常だと、照明にはレーザー光源を利用するところであるが、形状が複雑である上、金属の光沢面とアクリル樹脂面で被写体が構成されているため、安全に配慮して、LED 光による照明にとどめた。このことより、画像撮影に十分な輝度を得ることができておらず、目視による観察を中心として実験を行ったところ、静圧供給ラインからの流れは概ね数値解析結果と同様であることが分かった。今後、照明方法を工夫し、可視化画像の撮影を行う計画である。さらに、本年度使用したポンプ能力の関係で、軸受圧力を十分に確保することができず、高速回転時の発泡状況を観察することができていない。これについても、今後改良し、実験を行う準備を進めている。



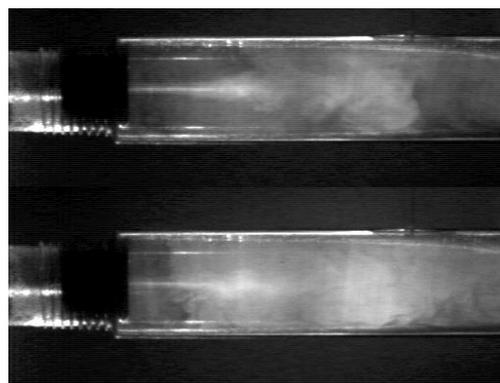
スラスト軸受モデル内の流れの可視化写真（無回転時）

### ★絞り部可視化結果

最後に、実機サイズでの絞り部の可視化結果を示す。可視化方法は、前述の実験と同様、蛍光染料フルオレセインの注入によっており、ここでは照明にレーザーライトシートを利用した。次ページに絞りモデル内の流れの可視化写真は、絞りとして単孔管と多孔管を用いた場合の撮影画像をそれぞれ示す。なお、上段、下段は注入開始からの経過時間の差である。まず単孔管について図(a)、所望の流量を得るためにはレイノルズ数が高くなり、臨界値を超えているため、流れは噴出直後から乱雑化し拡散してしまっている。多孔管では図(b)、流れが乱雑化せずに直進する領域（噴流コラム）が長く観察されるが、下流において噴流コラムは急激に拡散し、円管全体に拡がっている。絞り部の設計は、まずランド部の設計を行った後、ランド部における抵抗係数とほぼ同値となるように行われる。すなわち、軸受負荷容量と静剛性値からポケット内圧とランド部すき間高さが決まり、これより流量とランド部抵抗係数が求められる。この抵抗係数を確保しつつ、レイノルズ数を低く保つことのできる絞りが必要である。



(a) 単孔管



(b) 多孔管

絞りモデル内の流れの可視化写真

### 第3章 全体総括

#### 【1】研究開発成果総括

本事業は油に代わるクリーンな媒体（水）を使用して、油静圧案内と同等の高精度・高能率加工を実現するシステムの開発に取り組むものである。大きく3つに解決すべき課題

【1】防錆に適した調整水の精製と循環システムの構築、【2】研削盤本体の耐腐食性を向上させる技術の開発、【3】高速回転軸受けの開発を分類し課題解決に取り組んだ。

以下に本事業における成果を表記する。

1. 水溶液（水）を精製するシステムの開発に於いて、水の水質検査を行い水道法試験にクリアしている事を実証した。
2. 水溶液（水）を精製するシステムの開発に於いて、RO 膜式純水装置を併用し事業の目標値でもある濁度（0.1 度）を達成している事が判った。
3. クリーンルーム環境下(23℃±1℃)に於いて精製水を調整した調整水で電気防錆や濁度水質を満足する水溶液（水）の精製方法が確立した。
4. 研削盤本体の軸受け剛性や振動特性を左右する水溶液（水）中の脱気技術を各類型（真空脱気・窒素等バブリングによる脱気など）を検証し、本システムに最適な脱気方法を確立した
5. 水溶液（水）を研削盤本体に供給するシステムとしてピストン式ポンプを新規開発して、油より低粘度である水を採用しても脈動を抑える事に成功し、安定したシステム全体を構築する事が出来た。
6. 研削盤本体の耐腐食性を向上させる技術の開発として、それに先駆けスピンドル系にて水溶液（水）を媒体とする静圧軸受けを製作することが出来た。現在基本性能の評価中であり、継続して早期事業化に向けて取り組みを進める予定である。
7. 研削盤本体への防錆法として当初予定していた電気防錆法に加え、アルカリ性調整水溶液の採用を平行して行い、最適な防錆法の確率を目指し引き続き取り組みを進める予定である。
8. 高速回転軸受けの開発に於いてシールレス構造を採用することで、摩擦による抵抗・発熱を抑える事が可能な構造を確認出来た。引き続き検証を進めシステム構築を図る。

総括として研削盤本体に採用する防錆に適した水溶液（水）の検証を行い、安全性と機能性を確認する事が出来た。先行してスピンドルユニットとしてのシステム構築を確立、早期事業化の目処を付ける事が出来た。また、最終年度購入した特殊生成方式装置（アルカリイオン水）でのアルカリ性水

溶液を参考利用等して安全性の改善・コンタミネーション防止検討などを引き続き行い、アルカリ性調整水溶液の研削盤本体への採用も視野に入れた研究を引き続き行って行く。合わせて電気防錆法を設計的観点で検討を進め、実用化を目指す。

## 【2】研究開発後の課題・事業化展開

研削盤本体への電気防錆法に関して実験レベルに於いて防錆効果が有る事が証明できた。しかし、複雑な構造を持つ研削盤本体にどの様に実装するのかと言う課題に直面した。この課題に取り組むべく引き続き西川助教の助言を頂きながら、研究開発を進めていく予定である。

早期事業化として前項にも述べたように、スピンドルユニットとしてのシステム開発を早期に進め、既存の研削盤に水静圧スピンドル搭載として販売を予定する。

またナガセインテグレックスが年数回出展している展示会等にも参考出品を行い川下企業のニーズも調査しながら事業化を進めていく。