

平成 29 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

「内視鏡 3D 光プローブ式精密測定機の開発」

研究開発成果等報告書

平成 30 年 5 月

担当局 東北経済産業局
補助事業者 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 業界動向と研究開発の背景
- 1-2 研究目標（ものづくり高度化指針準拠）
- 1-3 研究体制
- 1-4 成果概要
- 1-5 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 小径3D光プローブ
- 2-2 透光性パイプ基準測定方式
- 2-3 回転振動を減少する小径動圧軸受
- 2-4 傾斜自動補正アルゴリズム
- 2-5 Z軸直線性補正機構
- 2-6 OCT光学系
- 2-7 ソフトウェア開発
- 2-8 測定実験機の開発
- 2-9 繰返し測定精度の検証

第3章 全体総括

- 3-1 成果のまとめ
- 3-2 論文掲載実績
- 3-3 事業展開計画

本開発テーマ参考文献

第1章 研究開発の概要

1-1 業界動向と研究開発の背景

1-1-1) 業界動向

自動車産業、電子産業の発展は、精密ベアリングなどに代表される精密加工技術の高度化に支えられたものである。世界が脱石油を目指し、アメリカ自動車産業が低迷する中で、日本が上位に出ることができたのも、高エネルギー効率をもたらす精密な動力手段に拠るものである。また、産業のコメと言われるベアリングにおいても、日本の精密ベアリングは高いシェアを維持し続けている。このように、直接的に高エネルギー効率に寄与する精密加工における精密計測は、加工精度より少なくとも1桁高く要求されるが、現在の回転機構を伴う形状計測法はこの要求に対し限界に来ており次世代高精度測定機の開発が急務となっている。

1-1-2) 加工精度のトレンドと開発ターゲット

世の中の情報機器、自動車等、機械加工部品の精度は図1¹⁾²⁾に示すように2016年時点で既に0.5 μmを超えている。例えば、コンピュータに内蔵されるハードディスク用スピンドルモータに用いられる動圧軸受部品の穴精度は0.5 μmの加工精度で大量生産されている。そこで、製造各社において、これらの直径および幾何学精度を検査する測定機への要求は、第1には、各社の内周面測定

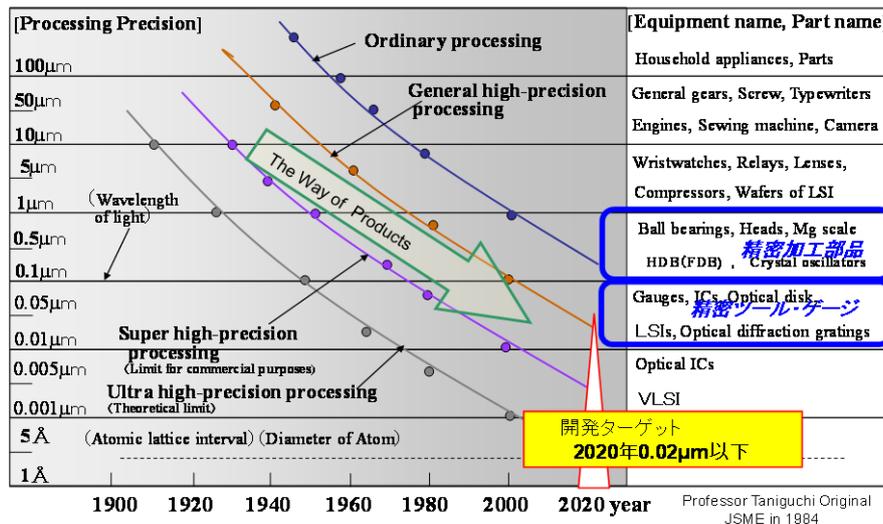


図1 機械加工精度のトレンド

標準機として、一歩進んだ繰返し精度（ばらつき：σ）が0.01~0.05 μmレベルの高精度な形状測定機が求められており、第2には、各社の製造現場毎に用いることができる0.2 μmレベルのハンディー型の準精密測定機の実用化が求められている。

1-1-3) 工業用OCTの動向

レーザー光や白色光等を照射して干渉縞を捉え、その波長（周波数）や位相差から高精度な測長を行う干渉計³⁾の1種に、深部到達性に優れた近赤外光又は可視光を照射し、その干渉性を利用して測長と同時に、後に述べる透光性製パイプを含む断層画像の取得が可能なOCT(optical coherence

tomography)があり、試料内部の構造を高分解能・高速で、観察・撮影する技術である。OCT の方式の中では、光源から放射し、被検対象物からの戻り光を、回折格子や分光器などで光スペクトルとし、これをカメラで捉えて変換した電気信号をフーリエ変換することで、深さ情報を取得するスペクトル領域型 (Spectral domain OCT) と、高速波長走査光源を用いて光スペクトルを得てフーリエ変換する周波数走査型 (Sept source OCT) が主に使われている^{4),5),6)}。

これらは医療用途では、主に近赤外光の深部到達が 2 mm 程度得られるメリットを利用し、断層画像により眼底や血管等の検査⁷⁾に広く用いられている。

工業用 OCT についても、医療用と同様に近赤外光または可視光の深部到達性を利用し、フィルム膜厚さの検査、自動車車体などに施された多層の塗装膜厚さの検査⁸⁾等に用いられている。

1-1-4) 光学式測定機の「光のゆらぎ」の課題

光学的精密測定において、0.001 μm 以下の高精度な測長方式が研究されている。⁹⁾ 例えば、国内メーカーの分光干渉レーザー式の測長機 (変位センサー) は、測定分解能が 1 nm の精度を有している。また、欧州メーカーの光干渉式測長機は、測定分解能が 0.01 nm (カタログ値) の高い分解能を有している。このように測長機としては、業界の加工精度より十分に進んだ製品が既に市販されている。

しかしながら、これら光学式距離センサーの基本課題として、いわゆる「光のゆらぎ」と呼ばれる、時間経過と環境変化により光学測定原点にずれが生じる問題があり、これが高い繰返し再現性の実現を阻害している。

1-1-5) 精密形状測定機の「機械の母性原理」の課題

形状測定機において、さまざまな機械部品の測定を行うためには、被検対象物を精密スライドや精密回転機構にセットして機械的に移動させ、被検体の内周面および外周面を走査し、形状データを三次元的に得る必要がある。この時に用いる精密スライドや精密回転機構の繰返し位置精度誤差 (例えば 0.01 μm 以上) が測定精度の限界になる。これは、「機械の母性原理」¹⁰⁾ と呼ばれ、測定機の基本課題になっている。そこで、高精度化のためには、機械の精度誤差を極小にすると共に、さらにその誤差をキャンセルするために何かの工夫が必要である。

現在、細穴内周面での三次元形状測定を行う測定機において、多種多様な高精度化に向けた工夫が試みられしのぎ削っている。業界各社の内周面測定機の中で、リングゲージのような滑らかな内周面に適した測定機としては某国内メーカーが小穴内傾斜照明 CCD 方式¹¹⁾を採用して 0.2 μm の精度を (カタログ値) 示し、また、内周面粗さの影響を受け難い測定機の中では、小径穴の測定は得意ではないが、某社がレーザフォーカス式測長機¹²⁾で 0.1 μm の精度 (カタログ値) を達成している。したがって、業界の次期測定機の目標精度は 0.02~0.05 μm であると見られる。

1-1-6) 川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

大手軸受メーカー、および、自動車のエンジン噴射ノズルメーカーから、以下のニーズが寄せられた。

(1) 細径計測 : ベアリング内周面 (図 2) の転動溝形状と打痕傷の測定のため、内径 $\phi 2\text{mm}$ 以下の高精度な測定機が必要。

(2) 3D測定と可視化 : 従来、機械式の真円度測定器の精度は十分ではなく、特に HDD, レー

ザプリンタ用モータの内径φ1.6mmの動圧軸受(図3)とエンジン部品(図4)の計測では、内周面加工精度の工程管理に支障を来しており3D可視化とデジタル処理可能な測定方法が必要。

(3) 簡便な計測：現在の測定は熟練技術であり、測定ワークの機種変更毎の測定装置軸合わせ設定に20分近い作業が必要。誰でも簡便に行えるセッティングフリーの装置が必要である。

本開発テーマでは、アダマンド並木精密宝石株式会社(以降、AD並木精密(株)と略す)のマイクロモータを上記ニーズ(1)を満たすφ1.5mm以下の光プローブの先端に組み込み、このプローブを被測定物の内周面に挿入することで細穴計測が可能になる。また、近赤外光を用いたOCT(光干渉断層画像化法)による3次元計測画像を得ることにより、ニーズ(2)を満たすことができる。また、透光性石英製基準パイプを用いることと、3Dプローブにより取得データの傾斜補正をコンピュータで行うことによりニーズ(3)を解決し、深穴内径内面の幾何精度が繰返し再現性0.02μm(σ)の高レベルで測定が可能になる。

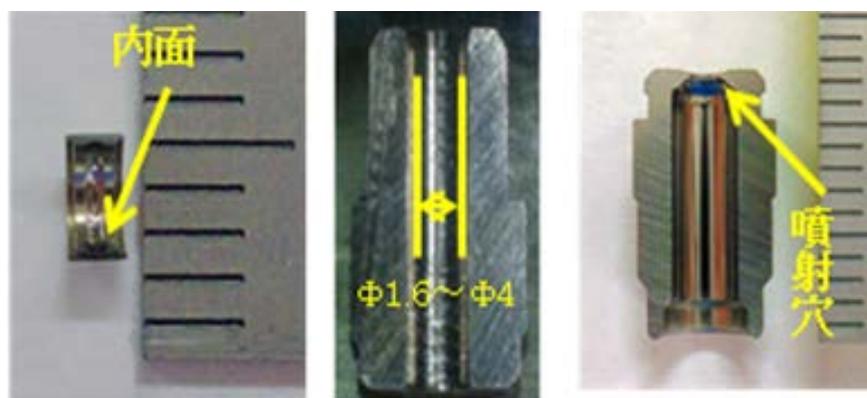


図2 ボールベアリング 図3 動圧軸受 図4 エンジン部品

1-2 研究開発目標

1-2-1) ものづくり高度化指針と高度化目標

高度化目標

(3) 川下分野横断的な共通の事項

② 高度化目標

ア. 計測機器の感度上昇、 イ. 測定結果の信頼性向上、 カ. 小型化

1-2-2) 直径1.5mm以下の先端モータ内蔵型3D光プローブの開発

【1】 小径3D光プローブの開発

3D走査範囲	測方走査プローブ	回転角360度、側方振れ角14度
サイズ	プローブ外径	φ1.5mm(被測定物内径φ1.6mm)~φ25mm(同φ30mm)

1-2-3) 高精度化補正技術

【1】 パイプ基準式機械振動補正測定機構開発

透光性パイプ基準の内周面測定機構およびアルゴリズムの開発により光学系の回転振れの

影響を排除する測定機構を製作し測定機に導入する。

【2】回転振動を減少する動圧軸受の開発

動圧軸受径 $\phi 0.2\text{mm}$ 及び $\phi 0.4\text{mm}$
 動圧溝加工精度 溝深さ $2 \pm 1 \mu\text{m}$ 、溝幅 $10 \sim 20 \mu\text{m}$
 試験による耐久性評価 目標 ; 1000 時間以上。

【3】定点 3D 走査式傾斜補正機構開発

定点 3D 走査によりワークとプローブの傾斜量を検知する。この傾斜量を自動補正し、プローブが傾斜していても正しく計測可能なアルゴリズムを開発し、セッティングフリー計測が可能な内周面測定機とする。

上記測定精度補正機構とアルゴリズム開発を順次行うことにより、測定機の繰返し精度 (σ 値) が $0.02 \mu\text{m}$ を達成するよう取り組んだ。

1-2-4) **OCT 光学ユニット開発**

【1】高精度 OCT 光学ユニットの開発

測定値表示桁		$0.001 \mu\text{m}$
測定繰返し再現性 (σ 値)	内径寸法	達成目標 $0.02 \mu\text{m}$
	真円度 (JIS 半径法)	$0.05 \mu\text{m}$ (Z 軸ステージスライド無しで傾斜自動補正可能)
	円筒度、真直度	$0.05 \mu\text{m}$ (L = 1 mm)、 $0.1 \mu\text{m}$ (L = 20 mm)

(各測定条件 : 32 回以上繰返し同一箇所の静的測定、ばらつき の σ 値を表示)

【2】画像解析・計測ソフトウェア開発

カメラ出力波形に高精度化補正処理を行い、3D 画像データを取得および表示する解析ソフトウェアを開発する。

3D 画像データから必要な幾何精度を算出するソフトウェアは、蓄積した測定ノウハウを組み込むことにより目標とする測定精度を向上させる。

1-2-5 **内周面精密測定装置の開発試作**

【1】高精度型内周面測定機

今後必要な $0.02 \mu\text{m}$ (σ) の繰返し再現性保証を目指す次世代高精度測定機。

細穴内径がセッティングフリーで測れる精密測定機であること。

被測定物内径	$\Phi 1.6\text{mm} \sim \Phi 30\text{mm}$
被測定物長さ	200mm 以下
測定項目	内径、真円度、円筒度、真直度

ワーク内径と光センサーの傾斜を自動補正する 3D 光プローブ式測定機

【2】ハンディー型内周面測定機

工場の製造現場環境においても $0.2 \mu\text{m}$ (σ) の精度で測れる測定機であること。

被測定物内径	$\Phi 1.1\text{mm} \sim \Phi 5\text{mm}$
被測定物長さ	20mm 以下
測定項目	内径、真円度

1-3 研究体制

研究体制は以下のとおりである。

	団体名	所属（着任時）	氏名	主な役割
事業管理機構	(株)インテリジェント・コスモス研究機構	産官学連携インキュベーション事業部	田村光男	PJ管理
			大内由加	PJ管理補助
研究実施機関	アダマンド並木精密宝石(株)	青森工場	浅田隆文	PL、方式設計
			山崎大志	光学設計
			福島絵理	モータ設計
			館山拓也	ソフトウェア
			森本正人	測定機機構
			成田憲士	協力者：精密加工
	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	電子光技術研究部門 ・光センシンググループ	古川祐光	サブPL:OCT光学系
			渡部愛理	光学系開発
アドバイザー	ミネベアミツミ(株)	顧問（元副社長）	古屋美幸	商品化アドバイス
	ミネベアミツミ(株)	執行役員（生産技術部門長）	成田透	事業化アドバイス
	株ケーヒン	上席技師長 生産技術研究部	長岡隆弘	評価技術アドバイス

1-4 成果概要

本研究テーマは、微細径モータ、微細光学ユニット、OCT高精度光学系、精密計測アルゴリズム、および機構と制御を含むシステム技術を組み合わせることで達成されたものであるが、達成した精密測定原型機は、高精度測定のために必要な、多くの要素技術を含むものであり、新規性と優位性を有する製品である。

本開発の内周面精密測定機は、高精度測定機については開発完成品の結果を2017年9月の日本機械学会の講演発表を完了した。またハンディー機については2017年6月の機械要素技術展（東京ビッグサイト）に参考出展した。

成果の詳細は第2章に記載のとおりである。

1-5 当該研究開発の連絡窓口

当開発テーマに関する窓口は下記のとおりである。

所属	氏名	電話	E-mail
(株)インテリジェントコスモス研究機構	田村光男	022-343-0467	m-tamura@icr-eq.co.jp
アダマンド並木精密宝石(株)青森工場	浅田隆文	017-53-0101	t-asada@namiki.net

第2章 本論

2-1 直径1.5mm以下の先端モータ内蔵3D光プローブの開発

本開発の測定機の第1の技術ポイントは、外径Φ1.5mm以下の3D走査型光プローブ（図5）にあり^{13),14)}、これは①2個のマイクロモータと、②マイクロプリズムとレンズからなる光学系と、それら③精密加工技術開発により達成した。

光プローブに内蔵する2個のマイクロモータには、微少なながら0.012ワットの発熱（コイルのジュール熱）があるため、長時間連続回転させた場合には、3D内視鏡光プローブの外周温度は上昇

してしまうことが懸念されていた。そこで測定中の温度上昇を防止し、測定温度を一定化するための冷却機構として、光プローブパイプ内に空冷経路を設け、外部の冷却ファンを吸引チューブで光プローブパイプに接続し、図6に示す光プローブパイプ先端近傍の吸気ポート(Cooling Port)から空気を取り入れて3D内視鏡光プローブ全体を冷却する機構を採用した。



図5 光プローブ外観

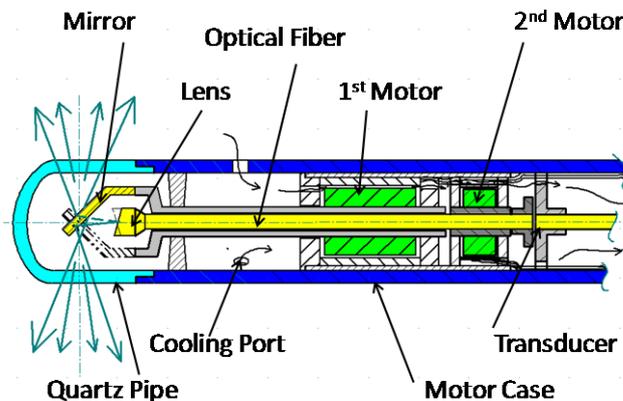


図6 先端2モータ式3D光プローブ構成

図7に示すように、空冷を行わない場合は、モータケースが室温 24.5°C に対して 4.5°C 上昇（熱電対による表面温度計測法）し、被測定物（この場合はリングゲージ）も約 1°C 上昇していた。しかし60分後に冷却ファンを起動したところ、数分以内にモータ外周で室温比 $+0.5^{\circ}\text{C}$ まで冷却され、被測定物の表面温度は $+0.1^{\circ}\text{C}$ 未満に抑えられた。図8は熱解析結果であり周囲温度 25°C に対する温度上昇は、モータケース外周面に 4 m/sec の空気の流れを作るという条件を与えることで、実測値と同様に、モータケース外周で $+0.5^{\circ}\text{C}$ 、石英パイプの温度上昇は $+0.1^{\circ}\text{C}$ 、被測定物は、 $+0.1^{\circ}\text{C}$ 未満に抑えられることが示された。

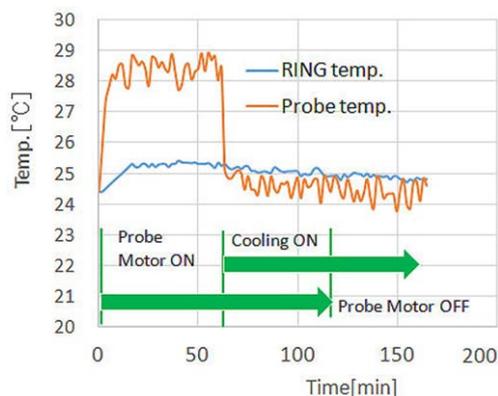


図7 プローブと被測定物の表面温度

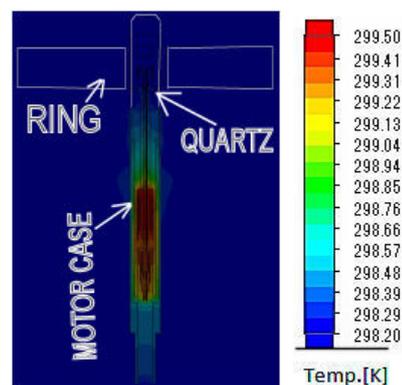


図8 熱解析図

2-2 透光性パイプ基準測定方式

本開発の「第2の特徴」は、透光性の石英製パイプを基準に被測定物の内周面を計測することにある。図9に示すように、回転走査機構部を内蔵した石英製パイプを被測定物と共に非回転とし、内部の走査機構部を2個のモータで回転させる構造としている。この固定された石英製パイプの内周面の直径(C1, C2)の3Dデータは、予めキャリブレーションを行い、コンピュータにデータを保存しておき、被測定物の内径値と、石英製パイプの径差($\Delta r1$, $\Delta r2$)を計測し、コンピュータ上で真の直径D ($D = \Delta r1 + C1 + C2 + \Delta r2$)を求めている。尚、石英製パイプの内周面の直径(C1, C2)の3Dデータを収集するキャリブレーションは、内径寸法が既知なリングゲージ

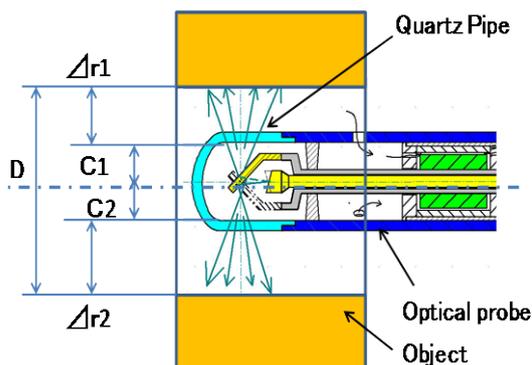


図9 透光性パイプ基準測定原理

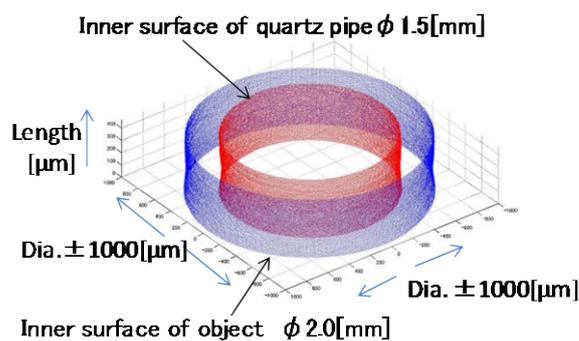


図10 二重画像イメージ図

を複数個準備し、これらを基準に行った。尚、内周面全体の3Dデータは、1枚当たりの情報量は500~5000ドット/面からなり、そのデータを75枚収集して1組の3Dデータをコンピュータ上で構成している。図10に示すように、OCT取得画像は、石英製の基準パイプ内周面と被測定物の内周面の3Dデータを同時に収集し、コンピュータ処理を行うことで、内側の基準パイプと、外側の被測定物の形状を二重画像として表示する。これらの画像データから、パイプを基準にした被測定物の3Dデータを求めた。このように透光性パイプ基準の測定方法により、機械的変動と、光学的変動の両方を同時に排除することができ、繰返し再現性が良好になった。

図11は内周面の1点の半径測定値を約4分毎に1データずつ(1データ当りの測定データ取り込み時間は0.33msec、内蔵モータは非回転)60分間測定した時間経過データを示している。この結果により、従来のパイプ基準無しの計測方法から、本報によるパイプ基準有りの計測方法に変えることで、OCT光学ユニットの測定原点の光学的変動等、測定原点の時間変動が排除されることの有効性が確認できた。

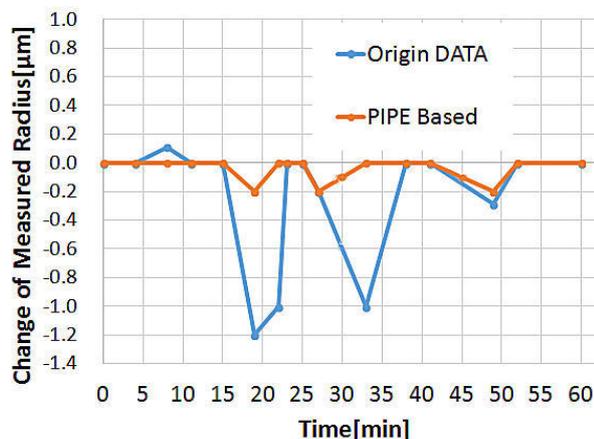


図11 透光性パイプ基準有無の比較

2-3 回転振動を減少する動圧軸受の開発

【1】微小径動圧軸受の開発

回転走査系の高精度化に不可欠な動圧軸受は、図 12 に示すようにスリーブの軸受穴内周面に圧力生溝を加工しておき、回転が始まると周囲のオイルに動圧を与えて素早く浮上し、高精度に回転するよう設計している。軸振れはRRO（再現性振れ）とNRRO（非再現性振れまたは、1/2 回転ホワール）に分けられるが、NRROは予測不能でランダムな振れ方をするため、測定精度を悪化させる要因になっている。そこで、動圧軸受を採用することで、発生圧力によりNRROを極小にし、測定機の精度を高める効果が得られる。^{15), 16)}

本開発の光プローブに内蔵する軸受は、高精度であるだけでなく、1000 時間を超える回転使用時間も必要とされる。そこで、回転中に周囲のオイルをかき集めてオイル流出防止する長寿命効果が期待できるヘリングボーン溝パターンを設計を行なった。これら動圧溝の設計は図 13 に示すようにダイバージェンス・フォーミュレーション法による内製解析ソフトにより流体解析を用い、 $\phi 0.2\text{mm} \sim 0.4\text{mm}$ の内径に対し溝深さ、溝角度、溝幅、溝数などのパラメータの最適設計を行なった。また、オイルシール性を良好にするため、動圧溝は動圧軸受表面での流体速度がゼロになるよう、スリーブの内周面に設ける設計とした。

【2】微小径動圧軸受加工法

動圧発生溝の加工方法に関し従来は、電解加工（電解エッチング）および塑性加工（転造加工、等）により溝幅が $100\ \mu\text{m}$ 程度の広い溝を比較的高速で加工する方法が主流である。しかし、本テーマの動圧軸受内径は $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ と微小径であり、溝幅は $10 \sim 20\ \mu\text{m}$ の細い溝の形成が必要であるため、マイクロ光ファイバーを軸受穴に挿入し、短パルスレーザー光を内周面に照射して数 μm 深さの微細溝を形成する工法を採用した。

また、この動圧軸受加工機は C 軸制御の回転部と XY テーブルを同期させる構造の、卓上型加工型の内面溝工実験機を開発試作した。



図 12 動圧軸受加工品

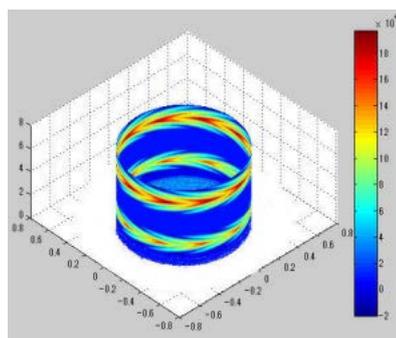


図 13 流体圧力解析図

【3】回転精度の評価

軸受の回転精度の評価は回転シャフトに X-Y 方向に変位センサー（測定機；KEYENCE 製 LS-9006D）を当て、求めたリサージュ図形から RRO [μm] と NRRO [μm] を読み取ることで行う。図 14 は溝無し真円軸受の、また図 15 はヘリングボーン溝付動圧軸受の、それぞれ $3600\ \text{rpm}$ と $6000\ \text{rpm}$ におけるリサージュ図形である。RRO はその輪状図形の平均直径 [μm] で示される。また NRRO の高周波成分とは、輪状図形の振幅幅 [μm] がこれに該当する。

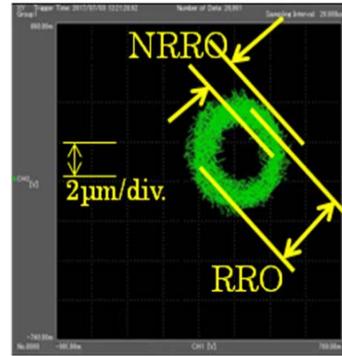
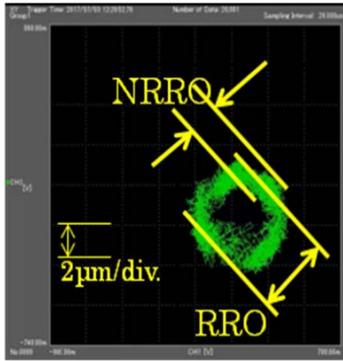


図 14(a)真円軸受のリサージュ図 3600rpm 図 14(b) 6000rpm

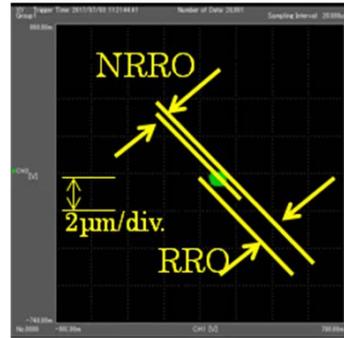
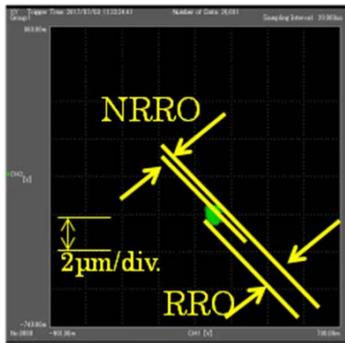


図 15(a) 動圧軸受のリサージュ図 3600rpm 図 15(b) 6000rpm

図 14 に示すように、真円軸受の NRRO は 3600~6000 rpm において $1.5[\mu\text{m}]$ に対し、図 15 に示す動圧軸受の NRRO は $0.4[\mu\text{m}]$ であり、明らかに良好であった。

RRO と NRRO の測定結果を表 2 に示す。RRO についても真円軸受が $4\sim 5[\mu\text{m}]$ に比べ、動圧軸受は $0.4[\mu\text{m}]$ であり大幅に小さかった。ただ、前述のように本測定機の高精度化に必要なのは NRRO を減少させることである。

表 (2) NRRO of both bearing

Kind of bearing	item	3600rpm	6000rpm
cylindrical bearing	RRO	$5.0\mu\text{m}$	$4.0\mu\text{m}$
	NRRO	$1.5\mu\text{m}$	$1.5\mu\text{m}$
Hydro dynamic bearing	RRO	$0.3\mu\text{m}$	$0.25\mu\text{m}$
	NRRO	$0.4\mu\text{m}$	$0.4\mu\text{m}$

【4】 動圧軸受搭載の効果

動圧軸受搭載/非搭載における、測定精度を比較した結果、測定機の精度は、SD-OCT等の光源、カメラ、分光器等の性能、および、光プローブに内蔵するプリズムやミラーの精度や透過率等、多くの要因により決まるものであるが、この評価時点において、動圧軸受の搭載により、本開発の光プローブ式内周面精密測定機の繰返し再現性(σ)は、搭載前の $0.06\mu\text{m}$ から $0.04\mu\text{m}$ に改善された。

2-4 傾斜自動補正アルゴリズム

開発した3D光プローブによる精密測定、プローブ自身または、被測定物を軸方向にスライドさせなくとも、一定位置から光線の放射角度を ± 14 度にスイープさせるため、被測定物の内

径がφ4mmの場合で軸線方向に約1mm、内径がφ8mmの場合は軸線方向に約2mmの範囲内で3D走査と3D計測が行える。そのため、被測定物の内径に光プローブが傾いて挿入されてしまった場合にも、図16に示すように、取得した3Dデータから、傾斜角度（3D計測した上端近傍と下端近傍の2つの円中心を結んで傾斜角： θ を求めるもの）と、偏心率（計測した円のデータから図心を求めるもの）を計算して自動補正した3Dデータを得ることができる。これにより操作性に優れたセッティングフリー測定と、繰返し再現性に優れた測定を可能にしている。このように2個のマイクロモータを光プローブ先端に内蔵した3D光プローブと、OCT光学ユニットを組み合わせることで、細径内周面の3D測定と、傾斜角度の自動補正が行えるようになり、繰返し再現性が改良された。

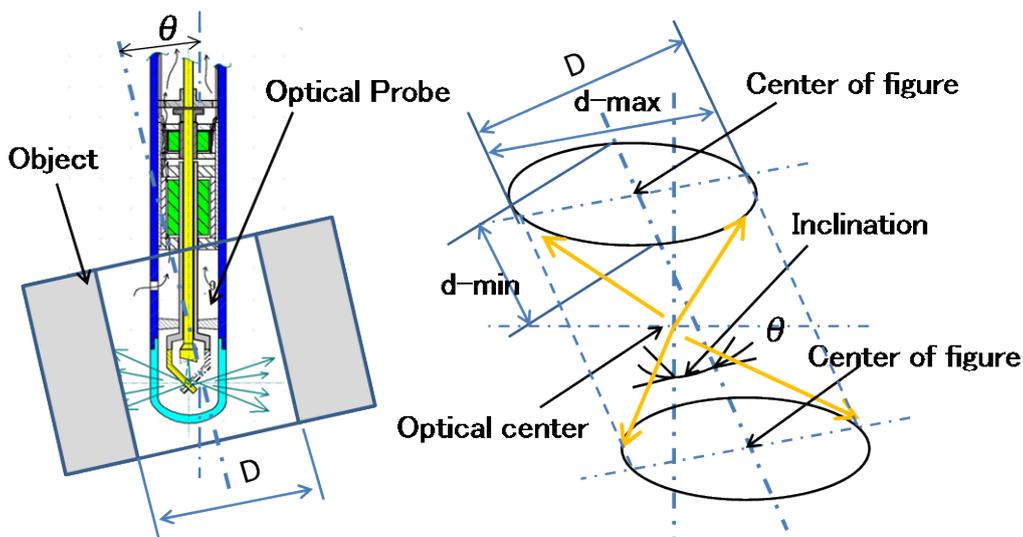


図16 傾斜補正原理

2-5 Z軸直線補正機構：Z軸基準位置出力ユニットの導入

測定機において、一般に長尺ワークの内径を測定する場合はZ軸スライダを、当開発の精密測定機においては、最大200mm上下に間欠送りしながら三次元測定を行う。しかしながら、Z軸スライダの直線性と繰返し位置精度は一般に保証されておらず、我々の測定データによれば、直線性は数

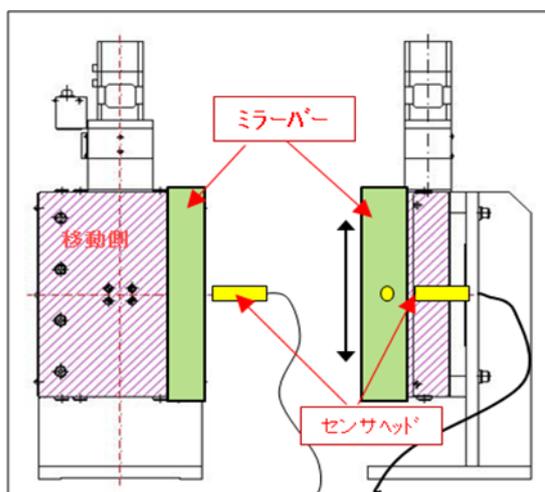


図17 Z軸基準機構原理図



図18 Z軸基準ユニット

μm 、繰返し位置精度は $1\mu\text{m}$ 未満の誤差を持つことが分かっている。そこで、長尺ワークの測定を高精度に行う為には何らかの「直線性基準ユニット」を測定機に内蔵する必要がある。

当測定機においては、図 17 原理図に示すように、Z軸の基準を高精度に加工されたミラーバーとし、その表面をX-Y方向からの距離を常にセンサーで測定し、その数値を測定機のコンピュータに出力し続ける方式を採用した。図 18 は実際に製作した「Z軸基準位置出力ユニット」であり、この中に「ミラーバー」と2セットの距離センサーを内蔵している。

2-6 高精度OCTユニットの開発

産総研において図 19 に示すSS-OCTの高安定化について研究をおこなった光学系は、主として光ファイバー干渉計からなっており、SS-OCTと呼ばれるタイプのものである。光源は、波長1240-1400nmの波長走査光源（Santec HSL-2100）である。光源は、光ファイバーカプラー1において95:5の割合で分割され、それぞれ距離計測のためのマイケルソン干渉計と補正のための自己干渉計に導かれる。

マイケルソン干渉計では、光ファイバーカプラー2で95:5に分割され、それぞれ被測定試料の反射面と参照反射面へ向かう。それぞれの反射面からの反射光は、光ファイバーカプラー3で結合され、干渉信号が検出器で測定される。この干渉計においては、光ファイバー2で分割された位置から、被測定試料の反射面までの距離と参照反射面までの距離との差が、光源波長の整数倍となるときに干渉信号が強くなるため、光源波長を走査することでそれぞれの距離の差（距離差）が計測できる。

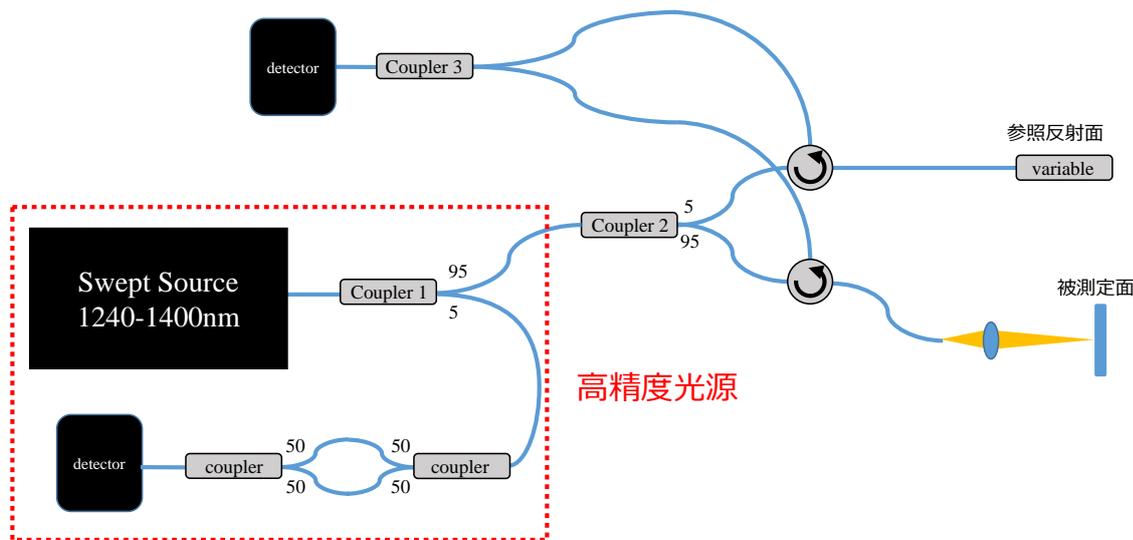


図 19 高精度OCTの光学系

つまり、試料反射面がある基準位置（参照反射面までと同一距離）に置かれたとき、波長に依存することなく干渉信号が強くなるが、その基準位置から離れると光源スペクトルに強弱の縞（スペクトル干渉縞）が発生する。スペクトル干渉縞の周期は、距離差が大きくなるにしたがって、より細かくなっていくため、基準位置に対する試料反射面までの距離差が判る。ここで、距離差を決めるのはスペクトル干渉縞の周期であるため、精度の高い距離測定を行うためには、スペクトル干渉縞の周期が安定していることが必要である。ところが、波長走査光源では、時間に対して一定の波数変化を保つのが難しい。走査機構にもよるが、一般には走査の始めと終わりは波数変化が遅くなることが多く、時間に対する光源波数は非線形になっている。この様子を図 20 左（改良前）に示す。実験では試料

反射面としてミラーを用いたので、走査速度が一定の時には等間隔のスペクトル干渉が見られるはずであるが、波長走査開始・終了の 1240nm 付近と 1400nm 付近ではスペクトル干渉縞が広く、中間の 1320nm 付近では狭いことが判る。一般に、光源メーカーは検出ソフトと連携してこれを一定の走査速度と同等になるよう補正している。大まかな補正はこれで可能であるが、走査ごとのブレは残るため、我々は光源の一部を自己干渉計に導き、リアルタイムに走査速度をモニタリングすることによって補正する改良を行った。自己干渉計では 2 つに分割された光の光路長が 2 本のファイバーの長さの差だけ異なっているため、もし一定の速度で波長走査すると、等間隔でのスペクトル干渉が生じるはずである。波長走査速度にムラがあれば、それがスペクトル干渉の縞間隔に反映されるため、この情報

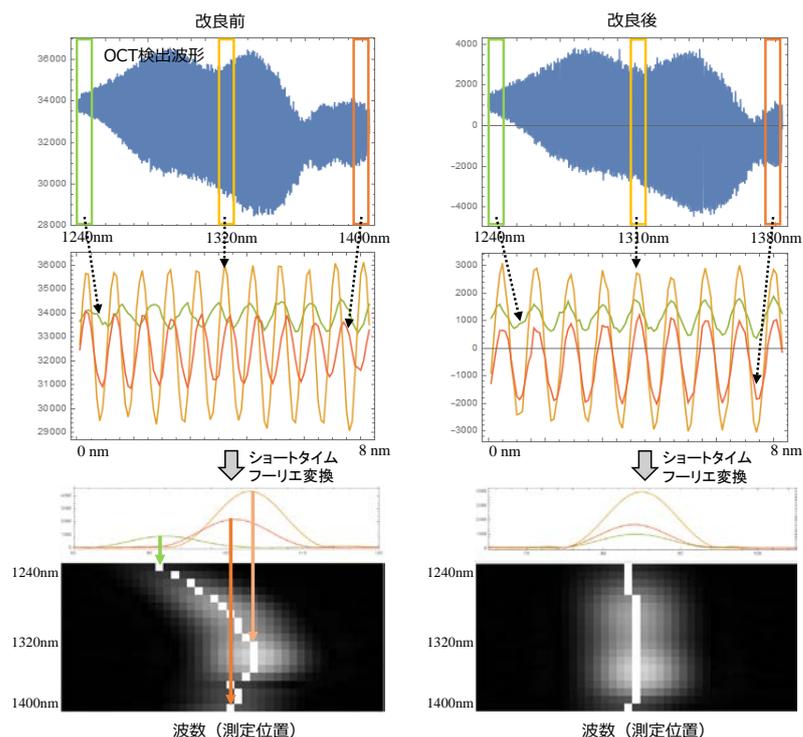


図 20 SS-OCT 波形比較

を元に、試料検出信号の間隔も補正することができる。この原理によって、波長走査速度にムラがあっても、一定速度での波長走査を再現できる。この結果、図 20 右（改良後）のように、波長走査の開始から終了まで一定の測定が可能となり、測定位置の安定性が高まる。図 21 に改良前後での OCT

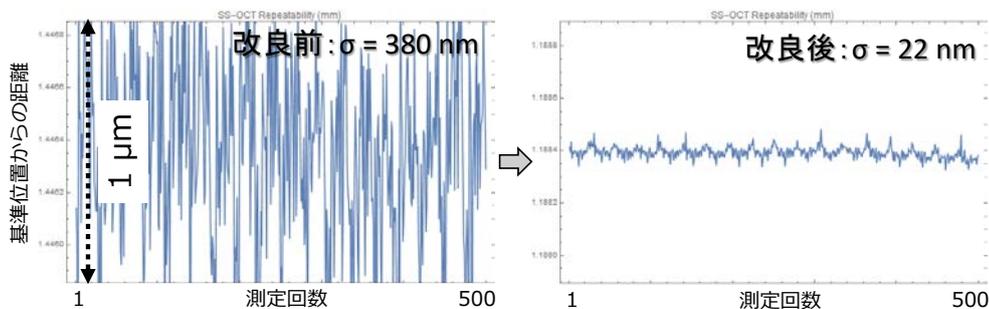


図 21 測定精度

位置測定結果を示す。このように改良前は、500 回繰り返し計測時の標準偏差が 380 nm であったのに対して、改良後は 22 nm へと約 17 倍の向上が得られた。^{17), 18)}

2-7 画像解析および計測ソフトウェア開発

内径寸法および幾何精度は、幾何学的構造を画像解析することで数値化する。光学的な 2 点分解能は OCT の光学特性によって決定されるものであるが（通常数 $2\sim 4\mu\text{m}$ 程度）、内径計測などにおいては、基準パイプ面とワーク表面とは光学的 2 点分解能に比べて十分に離れているため、そのピーク間の距離計測は光学的 2 点分解能を超える精度を出すことが可能であり、平面計測においては 1nm に達することも可能である。このためには離散化されたデジタルピーク情報から正しいピーク位置抽出を行なう課題がある。OCT データから表面データを検出するアルゴリズムとして従来採用してきたゼロパディング法に比べ、コンピュータによる演算時間が 1/20 以下に高速化できる図 22 に示す「2 次関数近似法」の検証結果が産総研から新たに提示され、平成 29 年度はこの結果を精密測定実験機に導入し目標とする測定精度の達成を確認した。

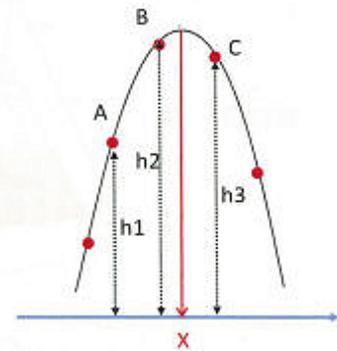


図 22 二次関数近似法

2-8 精密測定機の開発試作

【1】高精度型測定機の開発試作結果

高精度型測定機は、例えば企業毎にその社内標準測定機に配置され、内周面精密測定においては社内の標準機となることを前提に開発試作したものである。

図 23 (a) は測定装置の全景、図 23 (b) は測定チャンバー部を示している。測定ステージ及び光プローブは測定チャンバー内のアクティブ除振台の上に配置され、被測定物の内周面が測定される。

測定機のサイズ	W900mm × H1500mm × D900mm
測定繰返し精度	0.02 μm (σ)
測定機能	内径、真円度、円筒度、真直度

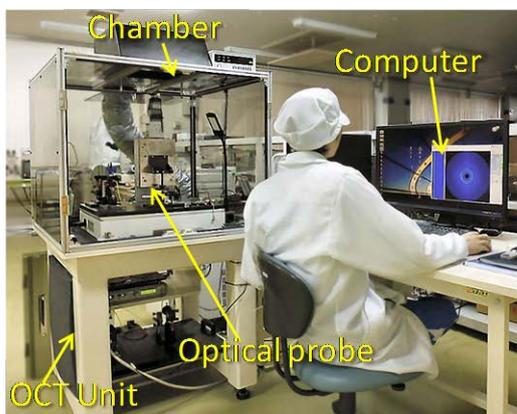


図 23 (a) 高精度測定機

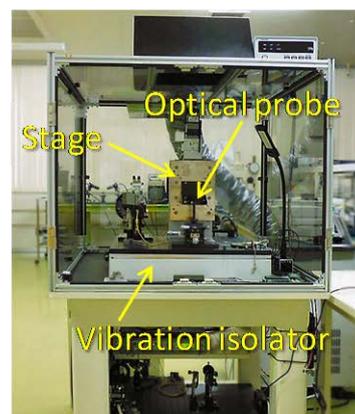


図 23 (b) チャンバーユニット

【2】ハンディー型測定機の開発試作結果

ハンディー機は機械部品等の製造工場において各生産ライン毎に1台設置され、又は、生産機械に測定機がインライン接続され、加工精度の測定結果電子データを加工機に転送することで、フィードバック制御加工による加工精度と加工歩留まりの向上を目的とするものである。

図24は開発試作品であり2017年6月に国内展示会に参考出展をおこなったものである。

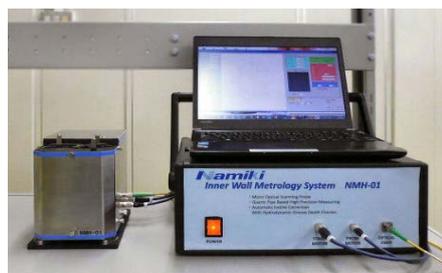


図24 ハンディー型測定機

2-9 測定精度の検証

【1】開発機の繰返し再現精度

開発機の繰返し測定再現性は、下記に示すように目標とする $0.02\mu\text{m}$ (σ) をクリアした。

〈測定条件〉

ワーク仕様 : 鋼リングゲージ

プローブ : $\phi 0.9$ プローブ

年月日 : 2018年1月18日

場所 : 測定室

サンプル数 : 50回

〈測定結果〉 (図25)

繰返し測定精度 : $0.0097[\mu\text{m}]$ (σ)

尚、測定室以外の一般環境下においても $0.02\sim 0.03[\mu\text{m}]$ (σ) と、良好な精度が確認できた。

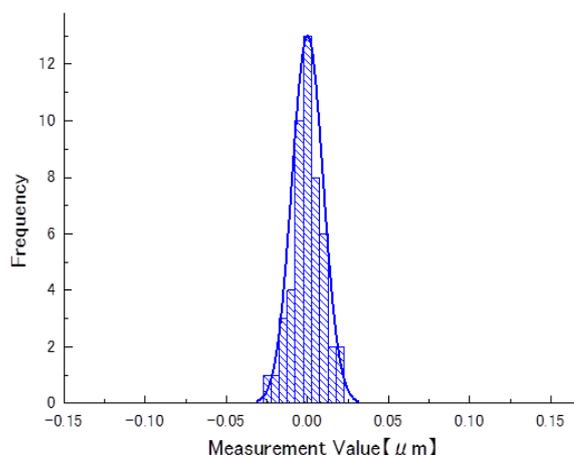


図25 測定繰返し再現性データ

【2】測定事例

市場から幾つかの測定サンプルを入手し、開発した測定機により測定実験をおこなった。測定事例を以下に示す。

1) 市販リングゲージ測定事例 (図26)

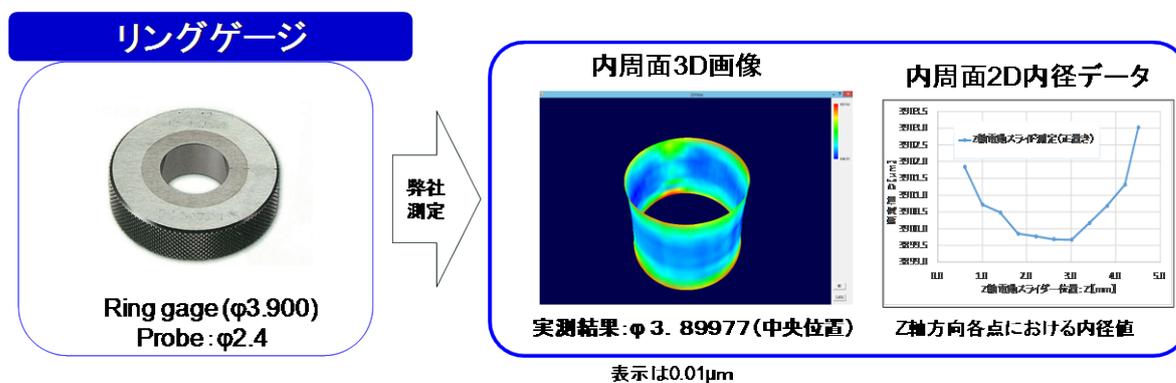


図26 リングゲージ測定事例

2) 弊社モータ部品内径計測 図 (27)

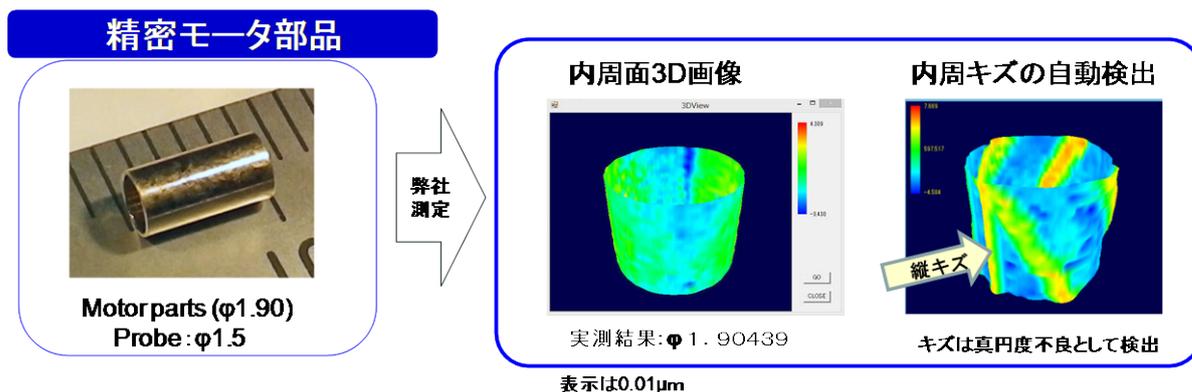


図 27 モータ部品測定事例

3) 動圧軸受内周面計測 図 (28)

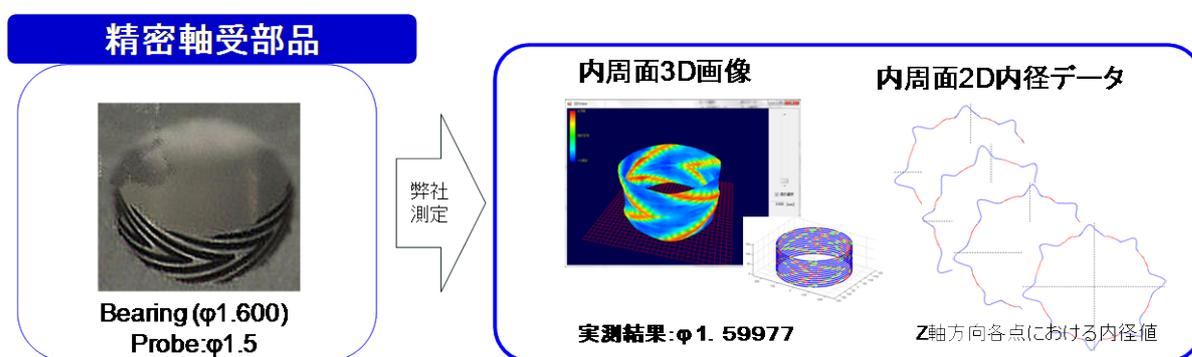


図 28 動圧軸受測定事例

第3章 全体総括

3-1 成果のまとめ

業界初、ツインモータ式3D走査光プローブを開発試作し、外径φ1.5mmの薄肉石英パイプ内に3D光学系を内蔵し、外径φ1.5mmと0.9mmの2個のマイクロモータに直結し光走査することに成功した。また、外径φ0.9mmの薄肉石英パイプ内に回転光学系を内蔵し、φ0.9mmのマイクロモータを直結しハンディー型内周面測定機において、φ1.1~φ2.0mmの細径部品の精度測定することに成功した。

内周面の精密測定を行うには、機械の母性の原理と光のゆらぎの課題を解決する必要があるため、本研究においては透光性の石英製薄肉パイプ内に回転光学系を内蔵し、パイプの内周面を基準に被測定物の内周面までの距離を光学測定する方法を採用し、目標とする $0.02\mu\text{m}$ (σ)以下の測定精度を達成した。

3-2 論文掲載実績

■日本機械学会

浅田、山崎、3D内視鏡光プローブ式精密測定機の開発（石英パイプ基準式内周面測定精度の評価）、日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 857 (2018), 全12ページ。

浅田、山崎、内視鏡3D光プローブと精密測定機への応用（第2報：動圧軸受搭載の測定精度への影響）日本機械学会2017年度年次大会講演論文集, No. 17-1, 講演番号S1330104

■光産業技術振興協会

浅田、工業用OCT，光技術動向調査報告書（一般財団法人光産業技術振興協会発行），
FY2016-002-1 第4.4.1章(2017年3月)，PP237-242.

■産総研発行誌

古川他、直径1.5mmで実現する内視鏡型デジタル顕微鏡（微細OCTプローブでナノメートル精度のデジタル化技術），Synthesiology，第11巻第1号（2018），pp.23-32.

3-3 事業展開

3-3-1 開発試作機の参考出展と結果

2017年6月の下記展示会に、図29に示すハンディー型測定機を参考出品した。

その結果、複数の企業からより具体的なニーズ情報を受けとることができ、当開発テーマの狙いに間違いがないことが確認できた。

■ 展示会名 第21回機械要素技術展
青森県ブース

■ 実施年月日 2017年6月21日(水)～23日(金)

■ 会場 東京ビッグサイト

■ 総来場者数(規模) 88,000人(主催者発表)

■ 当ブース来場者 120人(資料お持ち帰り)

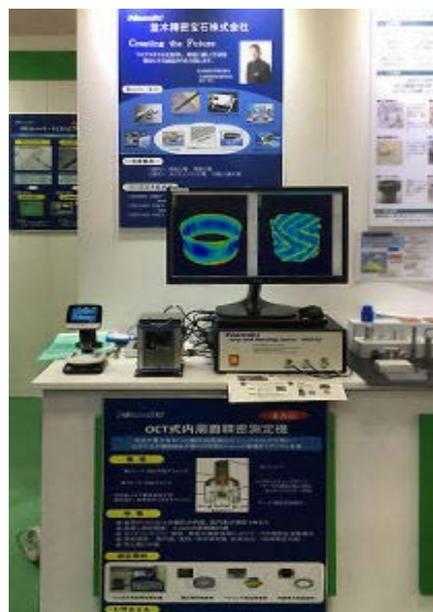


図29 参考出品の様子

3-3-2 品揃えと事業展開計画

本開発テーマにより、基礎技術の検証と測定実験機の製作までを、計画どおり完了したが、今後の販売と事業化に向けて、まず、具体的な顧客ニーズにミートする商品に仕上げる事が最も優先課題である。そこでAD並木精密(株)は、上記展示会への来訪者から得た具体的なニーズに合わせた測定機(商品)の追加開発を急務としている。

具体的な顧客ニーズとしては、今後、小径動圧軸受測定機能、インライン計測対応、表面ポーラス軸受計測対応、エンジン等の大径品の高速3D計測対応、があり、順次追加開発を行う予定である。ハンディー型測定機を中心にニーズが多い。

3-3-3 事業化スケジュール

本開発テーマで達成した精密測定機は、微細径モータ、微細光学ユニット、OCT高精度光学系、測定アルゴリズムおよびシステム技術を組み合わせで達成された、新規性と優位性を有する商品である。2017年6月の参考出品後、数社から具体的な測定機のニーズを受けており、本研究を終了する2018年4月以降、具体的な商品開発と試験販売を行うよう計画している。

AD並木精密(株)は、2018年4月からまず動圧軸受精密測定機用途に試験販売を開始し、同時に、交換オプションとしての各サイズの光プローブについても同時に販売を開始する。

備考 本開発テーマ関連文献

- 1) 谷口, 超精密加工技術の発展と今後の課題-ナノテクノロジーとの関連日本機械学会誌, Vol. 87(791), pp. 1101-1108 (1984)
- 2) T. Asada, Design of Hydrodynamic Bearings for miniature HDDs, IEEE-Transaction of Mag, Vol. 143, No. p, pp. 3721-3726 (2007).
- 3) 佐藤壽芳, 超精密非接触表面形状測定法について, 生産研究, Vol. 39, No. 6 (1987), pp. 201-208.
- 4) A. F. Fercher, C. K. Hitzenberger, G. Kamp, S.Y. Ei-Zaiat, Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry, Optics Communication, Vol. 117 (1995), pp. 43-48.
- 5) David, H., Eric, A. S., Charles, P. L., Joel, S. S., William, G. S., Warren, C., Michael, R. H., Thomas, F., Kenton, G., Carmen, A. P., Fujimoto, G. J, Optical coherence tomography, Science, Vol. 254 (1991), pp. 1178-1181.
- 6) 椎名達雄, 宮崎智, 本田捷夫: “工業用ライン組込み型簡易 OCT システム”, 電学論 C, Vol. 129, No. 7 (2009) pp. 1276-1281.
- 7) 古川祐光: “眼底分光装置の開発と酸素飽和度の臨床測定”, 光技術コンタクト, Vol. 46, No. 12 (2008) pp. 640-645.
- 8) インテリジェント・コスモス研究機構: “光干渉断層画像化による塗装膜検査システムの開発”, 東北経済産業局平成 27 年度革新的なものづくり産業創出連携促進事業研究開発成果報告書, (2016).
- 9) 秋本壮一, 3 次元計測技術, 光応用技術シンポジウム資料集, 精密工学会メカノフォトニクス専門委員会版 (2016), pp. 15-20.
- 10) 清水裕樹, 高偉: “知的なはかり方とは?”, 日本機械学会誌, Vol. 118, No. 1164 (2015) pp. 668-671.
- 11) 秋山伸幸, 北野哲彦, 吉田昌弘, 藤本穎助, 幸平博喜, 福島忠男: “微小径深穴用光学式内径測定装置の開発”, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 4 (1996) pp. 584-588.
- 12) 三鷹光器株式会社: “全周三次元測定技術”, 光応用技術シンポジウム SenSpec2016 講演集: 精密工学会; メカノフォトニクス専門委員会, 平成 28 年 6 月 9 日, pp. 21-24.
- 13) 特許第5961891号: 並木精密: 先端ツインモータ式 3D 光プローブ構成
- 14) 特許第6074580号: 並木精密: 先端ツインモータ式前方走査 3D 光プローブ構成
- 15) T. Asada, Journal: Micro system Technologies, Springer-Verlag, Volume 8, Issue 2-3, P220~P226 (2002)
- 16) T. Asada, Journal of Japan Society For Design Engineering, Vol. 44, No. 3, pp. 13-24 (2009)
- 17) H. Furukawa, H. Arimoto, T. Shirai, S. Ooto, M. Hangai and N. Yoshimura, Appl. Spectrosc. 66(8), 962-969 (2012).
- 18) H. Furukawa and T. Fukuda, Biomed. Opt. Express, Vol. 3, Issue 10, pp. 2587-2599 (2012).