

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

「宇宙デブリ観測用望遠鏡及び地球観測衛星に用いられる
大型光学素子の超精密研磨・計測技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成30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	3
1-2	研究体制	8
1-3	成果概要	9
1-4	当該研究開発の連絡窓口	12

第 2 章 本論

2-1	研磨加工機の開発	13
2-1-1	研磨ヘッドの開発	13
2-1-2	研磨加工機の開発	16
2-2	机上計測システムの開発	18
2-2-1	計測ユニットの開発	18
2-2-2	データステッチング技術の開発	20
2-2-3	計測最適化技術の開発	23
2-3	計測システムの評価と大型光学素子の試作	25
2-3-1	計測システムの評価（凹面）	25
2-3-2	計測システムの評価（平面）及び大型光学素子の試作（平面）	28
2-3-3	非接触計測への挑戦	31
2-3-4	大型光学素子の試作（凸面）及び計測システムの評価（凸面）	33
2-4	大型自由曲面鏡の試作	35
2-4-1	結像光学系の設計	35
2-4-2	大型自由曲面鏡の試作	39
第 3 章	全体総括	40

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

研究開発の背景

人工衛星等から構成される宇宙システムは、国民生活にとって重要な役割を果たすだけでなく、人類が直面する地球規模の課題の解決に貢献するものである。 $\phi 0.3\text{ m}$ を超える反射鏡やレンズなどの大型光学素子は、宇宙デブリ観測用望遠鏡や地球観測衛星などの性能を左右する心臓部であり（図1-1-1）、宇宙システムにおいて最も重要なデバイスの1つである。

宇宙システムを持続的に運用するためには、衛星を脅威に晒す宇宙デブリの分布状況や軌道の把握が必須である。2015年1月に策定された新宇宙基本計画には、その監視体制の確立と能力の向上に対する具体的取り組みが示された。図1-1-2は次世代の宇宙デブリ観測用望遠鏡の模式図である。1 mサイズの軸外し非球面鏡を組み合わせて口径3 m以上の主鏡を構成する。日本上空をくまなく監視するためには、このような大型望遠鏡が複数台必要であり、これを実現するためには、高精度な軸外し非球面鏡の低コストかつ高速な量産技術が必須である。

地球観測衛星は地図作成・資源探査・環境調査・農水産業の生産管理などに用いられる。近年、自国に衛星開発能力がない新興国を中心に地球観測衛星の需要が急拡大している（図1-1-3）。新宇宙基本計画には、日本の宇宙産業の事業規模として10年間で官民合わせて累計5兆円を目指すことが記されている。これを実現するためには海外の需要を獲得することが重要であり、国際競争力の強化のため、衛星の高性能化・低コ

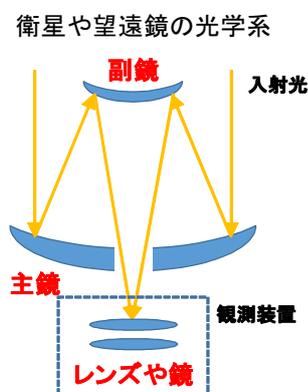


図1-1-1：大型光学素子の用途

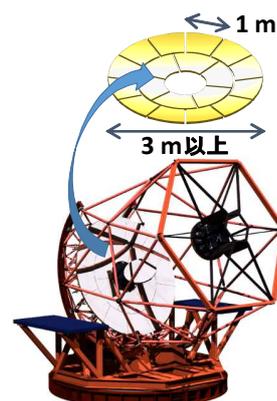


図1-1-2：次世代の宇宙デブリ観測用望遠鏡

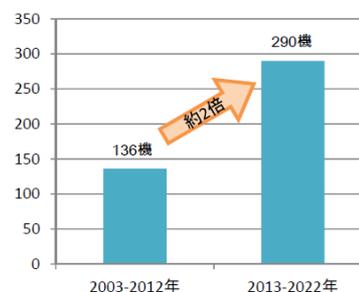


図1-1-3：地球観測衛星の需要予測

<http://www8.cao.go.jp/space/seminar/fy26-dai1/cao-3.pdf>より抜粋。

スト化が求められている。そのため、衛星の光学性能を飛躍的に向上させることが可能な軸外し非球面（図 1-1-4）や自由曲面（図 1-1-5）の形状を持つ大型光学素子の高精度かつ低コストな製造技術の確立が喫緊の課題となっている。

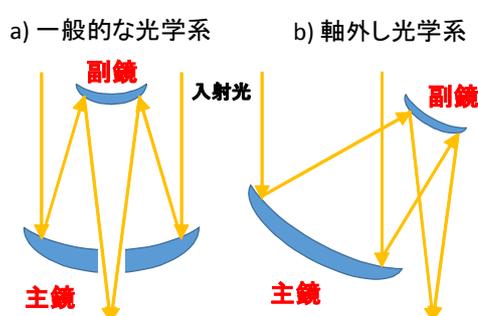


図 1-1-4：軸外し非球面を用いた光学系の例
軸外し光学系では副鏡による遮蔽がないため明るく、高解像度・広視野が実現できる。

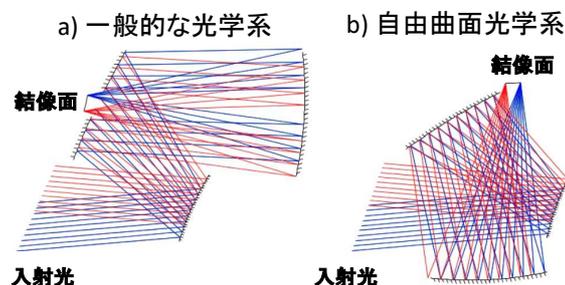


図 1-1-5：自由曲面を用いた光学系の例
a)には結像面の直前に折り曲げミラーが必要である。自由曲面を用いると、少ない光学素子で高性能かつコンパクトな光学系を実現できる。素子数を減らせるので、反射による光量のロスが少ないことも大きなメリットである。

現状の技術開発動向

光学素子の材質には、各種光学ガラス・低膨張ガラスセラミックスなどが用いられる。近年需要が増加している、軸対称非球面・軸外し非球面・自由曲面・外形が円形ではない光学素子の製造には、研削加工機で形状精度 $\sim 10 \mu\text{m p-v}$ に粗加工した後、NC制御の研磨が行われる。その研磨の際は、製作する光学面よりもはるかに小さな工具により形状修正研磨を行う方法が採られる。干渉計などの形状測定機で形状を測定し、研磨工具の滞在時間を制御することで修正研磨を行う。研磨量の時間変動などによって滞在時間から予想される研磨量と実際の研磨量は完全に一致しないため、形状測定・修正研磨のサイクルを所望の形状精度に達するまで繰り返す必要がある。このような従来の大型光学素子の製造技術には、以下の課題がある。

- 1) 加工能率が極めて低い小さな研磨工具によって $\sim 10 \mu\text{m p-v}$ もの形状修正を要するため、長期間の研磨工程が必要であり、製造期間が非常に長い（図 1-1-6の灰色線）。
- 2) 光学素子に求められる形状精度は 100 nm p-v 以下であるため、形状測定には干渉計が広く用いられているが、測定可能な形状に強い制限がある。軸外し非球面や自由曲面などの任意の曲面を高精度に計測することはできない。

- 3) NC 制御の研磨加工機は高価で、 $\phi 0.3$ m 程度の加工範囲を持つものは数千万円以上する。また干渉計も ~ 3 千万円と高価で、かつ長大で高コストな計測システムを構築する必要がある。これらが製造設備のコストを押し上げる。

そのため大型光学素子は、非常に高価・長い納期・製造可能な形状に制限があるのが産業界の常識であった。

本研究開発メンバーらのこれまでの取り組み

このような課題を解決するため、本研究開発メンバーらは以下の研究開発を行ってきた。

- 1) 超精密研削技術の開発：研削は研磨に比べ加工能率が格段に高いため、研削で得られる形状精度を改善することができれば、研磨工程を大幅に短縮することができ（図 1-1-6 の赤線）、大型光学素子の製造コストを引き下げることができる。これまでの研究開発によって、1 m サイズの軸外し非球面（凹面）に対して、1 週間の研削工程で従来の 1/10 以下の $1 \mu\text{m p-v}$ の形状精度を得ることに成功した。

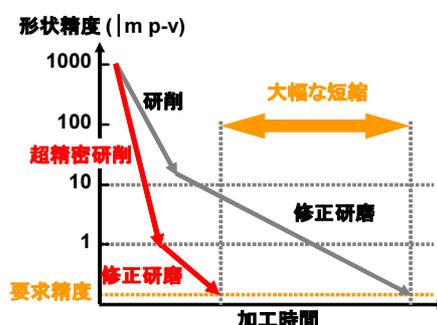


図 1-1-6：製造期間の模式図
灰色線：従来の技術。赤線：超精密研削を応用した新技術。新技術では、修正研磨工程が大幅に短縮できる。

- 2) 修正研磨技術の開発：小径工具を用いた修正研磨技術を確立し、1 m サイズの軸外し非球面（凹面）に対して、3 週間の研磨工程で形状精度 60 nm p-v の光学面を得ることに成功した。
- 3) 計測技術の開発：あらゆる形状を干渉計に比肩する精度で測定可能でかつ安価な計測システム及びデータ処理システムを開発し、 $\phi 0.8$ m の球面鏡を用いて原理実証を行った。

これまでの研究開発を統合し、あらゆる形状を製造可能で、かつ安価・短納期な大型光学素子の製造技術を確立し事業化するためには、さらなる実用化研究が必要である。

研究開発の目的及び目標

大型光学素子の製造技術を高機能化・高精度化・短納期化・低コスト化などあらゆる面で向上させる。修正研磨時に必須の形状測定に、3点法の原理を用いた新しい計測手法を採用することで、製造可能な曲面の制限をなくし、光学素子の高機能化・高精度化を実現する。また、ロボットアームを用いた安価な研磨・計測システムを構築し、低コストな製造設備を実現する。新技術の目標値を表 1-1-1 に示す。

表 1-1-1：新技術の目標値と従来技術の比較

	新技術	従来技術
曲面形状	制限なし	平面・軸対称凹面など単純な形状に限定
形状精度(φ1 mに対して)	60 nm p-v(形状に制限なし) (複雑な形状では従来の1/8)	60 nm p-v(単純な形状) 500 nm p-v(複雑な形状)
納期(φ1 mに対して)	1.5か月(従来の1/8)	~1年
価格(φ1 mに対して)	~1,000万円(従来の1/3)	~3,000万円

本研究開発では、4つの開発項目を設けた。これらの開発項目とその目標を以下にまとめるとめる。

【1. 研磨加工機の開発】

【1-1】研磨ヘッドの開発

- ・ロボットアームの可搬質量より十分軽く、ロボットの運動軌跡精度に起因する研磨荷重の変動を吸収する機構を付加した研磨ヘッドの開発
- ・重量：6 kgw 以下
- ・ロボットアームのツール取付面からヘッド先端までの距離：150 mm 以下

【1-2】研磨加工機の開発

- ・ロータリーテーブルとロボットアームを組み合わせた、大型の自由曲面を研磨可能でかつ廉価な研磨加工機の開発。ロボットアーム先端に取り付けられた研磨ヘッドを計測ユニットに交換することで形状測定機として使用可能
- ・研磨可能な光学素子のサイズ：φ2 m (重量 1 t 以上)
- ・研磨可能な形状：制限なし (ロボットアームの駆動範囲に準ずる)

【2. 機上計測システムの開発】

【2-1】計測ユニットの開発

- ・ロボットアームの先端に付加するだけで、あらゆる曲面の大型光学素子を高精度に形状測定可能な小型で高精度かつ廉価な計測ユニットの開発

【2-2】データステッチング技術の開発

- ・計測ユニットによって取得された複数の計測データを統合処理（ステッチング）することで計測誤差や温度変化などの環境変動による誤差要因を除去し、さらなる精度の向上を実現するデータ処理アルゴリズムの実用化

【2-3】計測最適化技術の開発

- ・大型光学素子の形状データやユーザの測定環境と要求精度などを考慮し、自動的に最適な計測パスを算出するソフトウェアの開発

以上の計測ユニットとデータ処理システムを統合した目標値を以下に示す。

- ・形状測定機の測定範囲：無制限（ロボットアームの駆動範囲に準ずる）（従来は軸対称凹面などの単純な形状に限定）
- ・計測時間：1 m²/30 分（データ処理時間を含む）
- ・測定精度：RMS = 20 nm/m²
- ・計測ユニットの大きさ：50×50×20 mm

【3. 計測システムの評価と大型光学素子の試作】

【3-1】計測システムの評価（凹面）

- ・凹面の軸外し非球面鏡を用い、干渉計で測定した結果と比較することで、凹面に対する有効性を実証する

【3-2】計測システムの評価（平面）

- ・φ1 mの平面鏡を用いる。平面鏡の支持方法による形状の差を測定し、理論値と比較することで、平面に対する有効性を実証する

【3-3】大型光学素子の試作（平面）

- ・開発した研磨加工機と計測システムを用いφ1 mの平面鏡を試作する
- ・形状精度：60 nm p-v 以下

【3-4】大型光学素子の試作（凸面）

- ・計測システムの凸面に対する有効性は実証されていないが、後述する方法で評

価するため、まずφ1 mの軸対称非球面の凸面を試作する

- ・形状精度：60 nm p-v 以下（計測システムを正として）

【3-5】計測システムの評価（凸面）

- ・試作した平面・凸面と【3-1】で使用した凹面を組み合わせ、それらの平行光の結像性を評価することで、凸面に対する計測精度を推定し、有効性を実証する

【4. 大型自由曲面鏡の試作】

【4-1】結像光学系の設計

- ・開発した研磨・計測システムで製造可能となる高精度な大型自由曲面鏡を用いた、光学素子数が少なく高感度な結像光学系の光学設計
- ・感度：従来の10倍
- ・光学素子の数：従来の素子数7個に対して、4個以下を目標
（日本スペースガード協会が保有する宇宙デブリ観測用望遠鏡と比較して）

【4-2】大型自由曲面鏡の試作

- ・【4-1】で設計した結像光学系を実現するための、大型自由曲面鏡の試作
- ・光学素子のサイズ：φ0.3 m程度
- ・形状精度：60 nm p-v 以下

1-2 研究体制

研究組織を図1-2-1に示す。

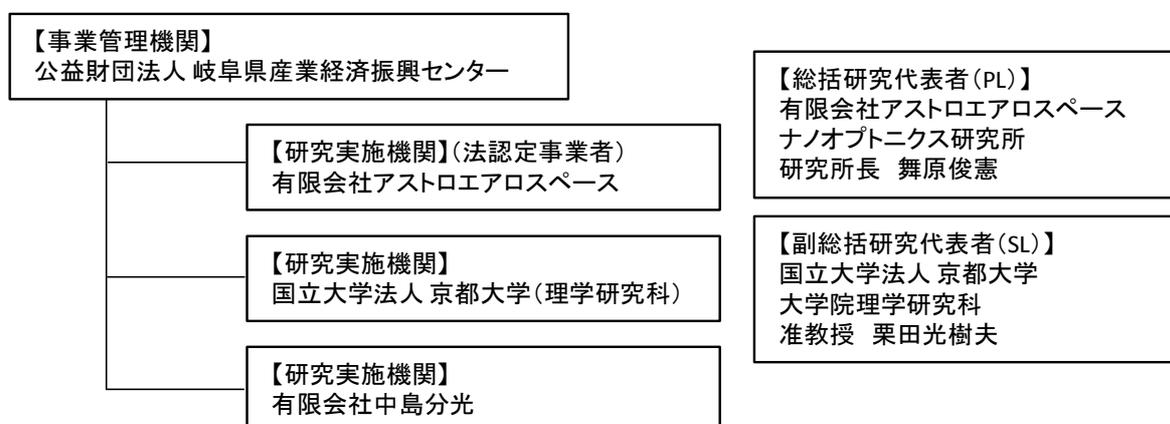


図 1-2-1：研究組織

研究者の氏名・所属・役職を以下にまとめる。

○有限会社アストロエアロスペース

- ・舞原俊憲：ナノオプトニクス研究所 研究所長
- ・所仁志：ナノオプトニクス研究所 主幹
- ・高橋啓介：ナノオプトニクス研究所 主査

○国立大学法人 京都大学

- ・栗田光樹夫：大学院理学研究科 准教授

○有限会社中島分光

- ・中島悠：代表取締役

1-3 成果概要

【1. 研磨加工機の開発】

【1-1】研磨ヘッドの開発

研磨ヘッドのプロトタイプ機（単純回転方式）をロボットアームに取り付けて研磨実験を行い、ロボットアームを用いて超精密研磨が可能であることを確認した。

文献調査及び研磨シミュレーションにより、単純回転方式よりも形状修正効率の高い自転公転方式の研磨ヘッドを開発した。

【1-2】研磨ヘッドの開発

研磨及び計測時のツール軌跡に自由度を持たせるためのロータリーテーブルの横にロボットアームを取りつけたシンプルな構成の研磨加工機（搭載可能な光学素子のサイズφ2.2 m）を開発した。

【2. 機上計測システムの開発】

【2-1】機上計測システムの開発

逐次三点法の原理を用いた新しい計測手法（特許第 6294111 号、表面形状計測装置）を用いた計測ユニットを開発した。このユニットを取り付けるロボットの振動を実際のユニットを取り付けて計測し、その結果当初の予定通り、鏡面上を引きずる方式で計測する必

要性を確認した。また、実機ロボットアームに計測ユニットを取り付け、 $\phi 300$ mmの平面鏡を計測し、十分な計測精度が達成できることを確認した。

上述の通りこれまで平面においては十分な精度を達成する測定治具の開発に成功したが、後述の曲面の計測試験においては不十分であることが判明した。その主な原因はロボットアームのヘッドの姿勢と鏡面の傾斜が十分な精度で整列せず（不整合）、接触点が不安定となり、治具が振動するためであった。その結果、高精度な計測モードにおいては計測不能に陥る状況となった。そこで、この不整合を緩和するために、新たにピッチングとヨーイングの2軸の自由度を持つ関節機構を開発し、安定化を図った。新しい関節機構をもつ計測ユニットの性能評価を $\phi 1$ m双曲面鏡を用いて行い、20 nm rmsの極めて良好な再現性が得られることを確認した。

【2-2】 データステッチング技術の開発

ステッチング専用ソフトの開発を行った。このプログラムは以下の機能を含む。

- 1) 入力データから交点（重複領域）の検出
- 2) 交点に仮想点を生成
- 3) データ点を結ぶ梁要素の剛性マトリックスの生成
- 4) ステッチングと力のつり合いの逆行列問題を解く。この際に SuperLU 分解を用いたことで、処理の高速化を実現
- 5) 交点以外のデータ点を弾性曲線方程式を用いて補正量を算出
- 6) ステッチング後のデータ形状と内力を出力
- 7) 内力の分布からデータの信頼性を評価し、信頼性の低いデータをクリッピングして再度ステッチングを行うイタレーション機能

またこれらのステッチング作業において、3つ以上のデータにも対応している。

以上に加えて、画像データのステッチングにも応用できるシェルの行列要素を開発した。

【2-3】 計測最適化技術の開発

形状測定前に適切な計測経路を判断するプリ処理ソフトを開発した。剛性マトリックスの固有値からステッチングの最適化指標を具体化するアルゴリズムを開発した。

【3. 計測システムの評価と大型光学素子の試作】

【3-1】計測システムの評価（凹面）

計測システムの凹面に対する有効性を実証するための測定試験を実施した。被検面には干渉計での測定が可能な焦点を有する、ミラーコーティングを施した1 mサイズの軸外し非球面鏡を用いた。この面をCGH (Computer Generated Hologram) 型干渉計によって鏡面全面を1回の露出で計測し、新しい計測システムによる測定結果と比較した。

CGH型干渉計の測定結果に基づいて研磨加工した凹面鏡を用いて無限遠の点光源（自然星）を観測し、鏡面の精度を確認した。その結果、ハルトマン定数0.2秒という十分な値を得た。この結果によりCGH型干渉計が独立検証用の基準となれることを立証した。

φ0.6 m軸対称放物面鏡及びφ1 m軸対称双曲面鏡を計測し、計測システムの再現性を検証した。その結果、日をまたぐ独立した計測においても20 nm rmsの極めて良好な結果を得た。

【3-2】計測システムの評価（平面）

大型平面鏡（1×0.7 m楕円平面鏡）に対し108本の計測を行い、繰り返し再現性RMS = 10 nmという当初の目標を上回る精度を達成した。また、平面原器による干渉縞が計測結果と定性的に一致することを確認した。

【3-3】計測システムの評価（平面）

ナガセインテグレックス製超精密大型研削加工機を使用して大型平面鏡（1×0.7 m楕円平面鏡）の超精密研削を行い、1 μm p-vの形状精度を得た。その後、開発した研磨・計測システムにより修正研磨を行い、20 nm rmsの形状精度を得た。

【3-4】大型光学素子の試作（凸面）及び【3-5】計測システムの評価（凸面）

φ0.25 m凸面鏡を用いて予備評価を終えた。φ1.08 m凸面鏡の試作が現在進行中である。平行光を用いた凸面鏡の光学性能評価試験は2018年6月頃を予定している。

【4. 大型自由曲面鏡の試作】

【4-1】結像光学系の設計

日本スペースガード協会が保有する宇宙デブリ観測用望遠鏡など、現行スペースデブリ望遠鏡の光学設計及び光学性能について調査を行い、結像光学系の仕様を検討した。その結果を踏まえ、未知のスペースデブリを発見する「捕捉型」について仕様を満たす設計解を得た。

これらの設計解のうち、ミラーのみで構成されるため適用性が広いコルシュタイプについて、実現性を高めるべく光学設計の改良を進めた。具体的には、製造性及びコストにおいて唯一問題になると考えられる M3 ミラーのサイズと実現可能な視野の関係の検討を行った。その結果、M3 直径を M1 直径と同じにした状態においても 3.4 deg^2 の視野が得られることが分かった。これは近年の 4~8 m 中大型望遠鏡において実現されているあらゆる広視野カメラよりも広いものである

【4-2】大型自由曲面鏡の試作

バイコニック面鏡（直交する 2 方向で曲率とコーニック係数が異なる面）の超精密研削加工までを終えた。修正研磨は 2018 年 7 月頃を予定している。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

有限会社アストロエアロスペース ナノオプトニクス研究所

高橋啓介

TEL: 0575-45-0033

FAX: 0575-45-0034

E-mail: takahashi@astro-aerospace.jp

第2章 本論

2-1 研磨加工機の開発

2-1-1 研磨ヘッドの開発

ロボットを用いた研磨実験

研磨ヘッドのプロトタイプ機（単純回転方式、重量 4.8 kgw、長さ 108 mm）をストーブリ社のロボットアームに取り付け研磨実験を行った（図 2-1-1）。サンプル（100×100×20 mm のクリアセラム）に対し、図 2-1-2 のように研磨ヘッドのスキャン速度を制御して研磨を行った。平面度測定機 Tropel FlatMaster FM200 により取得した研磨前後のサンプルの形状から研磨による除去量を算出した。これを研磨ヘッドの滞在時間から予想される除去量のシミュレーション結果と比較したところ、両者が誤差 8 % で一致した（図 2-1-3）。研磨の除去量がほぼ指令通りであり、ロボットアームを用いた超精密研磨が可能であることが実証できた。

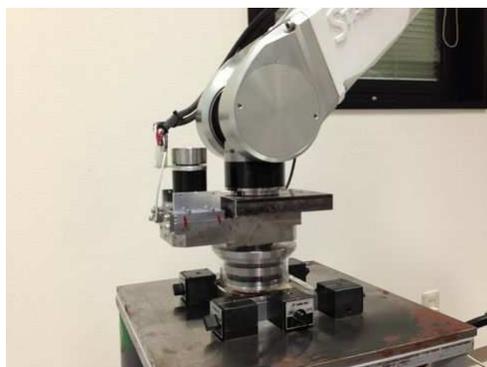


図 2-1-1 : 研磨実験

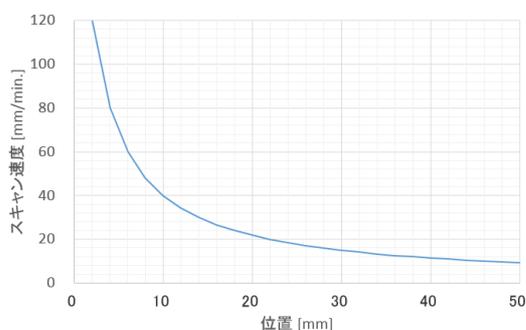


図 2-1-2 : スキャン速度

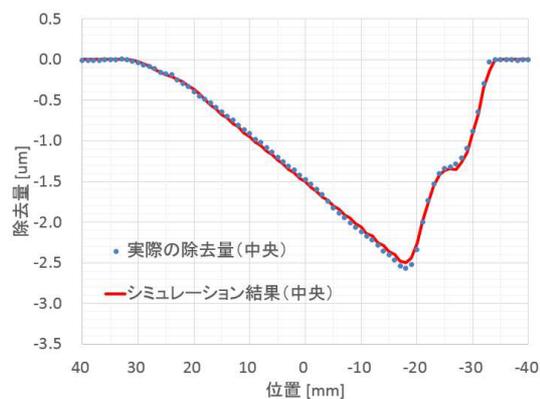


図 2-1-3 : 実除去量とシミュレーションの

研磨シミュレーション

プロトタイプ機で採用した単純回転方式の研磨ヘッドより形状修正能力の高い研磨方式を見出すため、単純回転方式と R. A. Jones 及び Mirror Lab の研磨ヘッド（図 2-1-4 及び図 2-1-5）について研磨シミュレーションを行った。

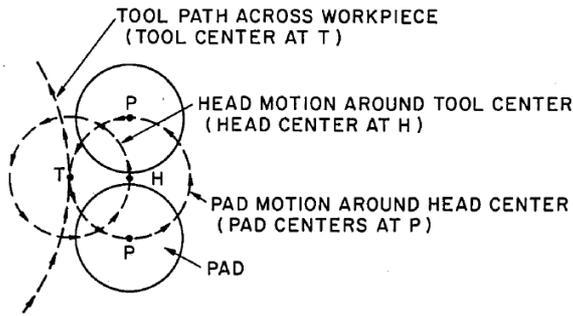


図 2-1-4 : R. A. Jones の研磨ヘッド

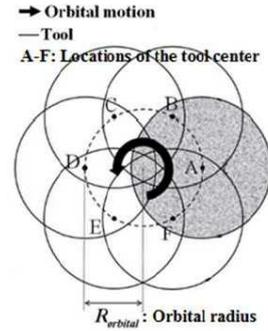


図 2-1-5 : Mirror Lab の研磨ヘッド

振幅 1,000 nm、ピッチ L mm の周期関数を形状誤差の初期値とし、各研磨ヘッドの単位除去形状の直径 D を 120 mm として研磨シミュレーションを行った (図 2-1-6)。図 2-1-7 は、直径 1 m の光学素子を想定した場合の研磨時間と到達した形状誤差をプロットしたものである。

- ・ 形状誤差の初期値は 1,000 nm p-v の周期誤差
- ・ 単位除去形状の直径 $D = 120$ mm
- ・ 2パス目以降の目標除去形状は前加工での残差

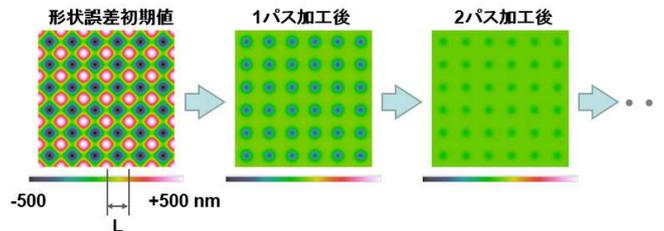
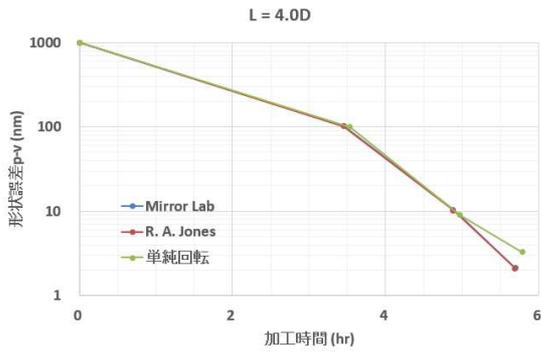


図 2-1-6 : 研磨シミュレーションの流れ

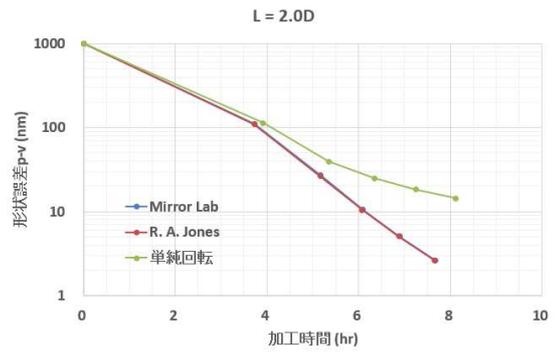
研磨シミュレーションにより以下が明らかになった。

- ・ 単純回転方式で効率的 (10 時間程度の修正研磨で形状誤差 10 nm p-v) に形状修正ができるのは $L = 2.0D$ まで
- ・ R. A. Jones と Mirror Lab では、 $L = 1.0D$ まで効率的に形状修正が可能
- ・ R. A. Jones と Mirror Lab に大きな差はない

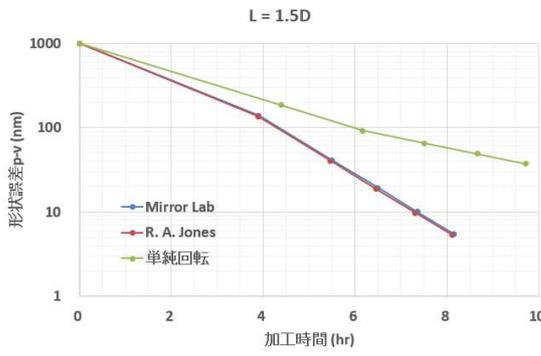
この結果を受け、単純回転方式よりも形状修正効率が高い R. A. Jones と Mirror Lab のどちらの研磨方式も再現可能な、自転公転方式の研磨ヘッドの開発を進めた (図 2-1-8)。



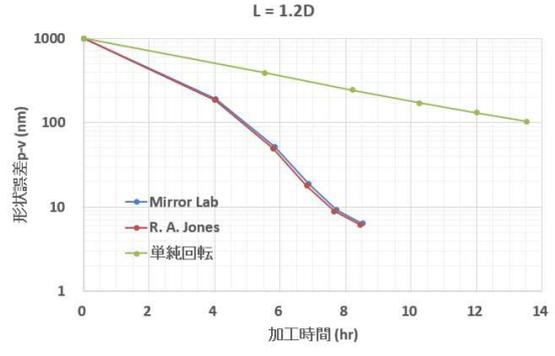
a) L = 4.0 D



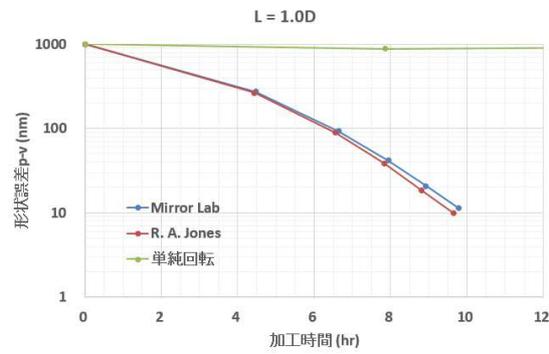
b) L = 2.0 D



c) L = 1.5 D



d) L = 1.2 D



e) L = 1.0 D

図 2-1-7 : シミュレーション結果

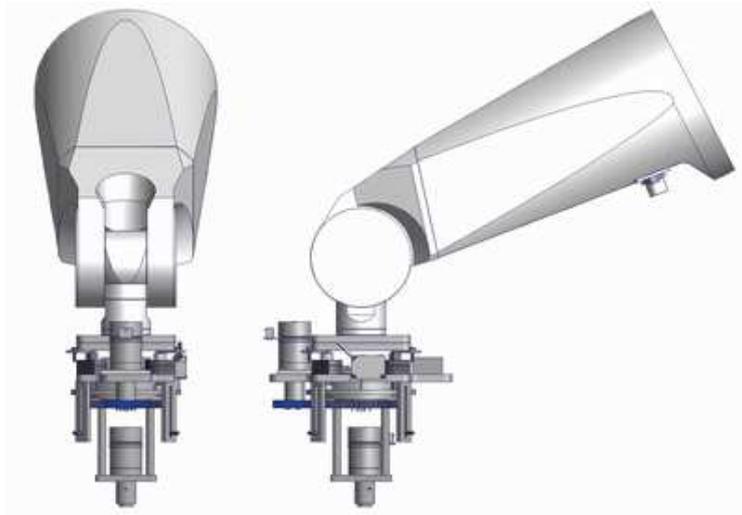


図 2-1-8 : 自転公転方式の研磨ヘッドの模式図

2-1-2 研磨加工機の開発

研磨及び計測時の加工・計測パスに自由度を持たせるためのロータリーテーブルの横にロボットアームを取り付けたシンプルな構成の研磨加工機を開発した（図 2-1-9）。ロボットアームはストーブリ社製中可搬質量 6 軸ロボット RX160（負荷：公称 20 kgw・最大 34 kgw、最大リーチ：1710 mm）を採用した。ロータリーテーブルは最大φ2.2 mの光学素子を搭載可能で、DD モータにより角度制御を行う。

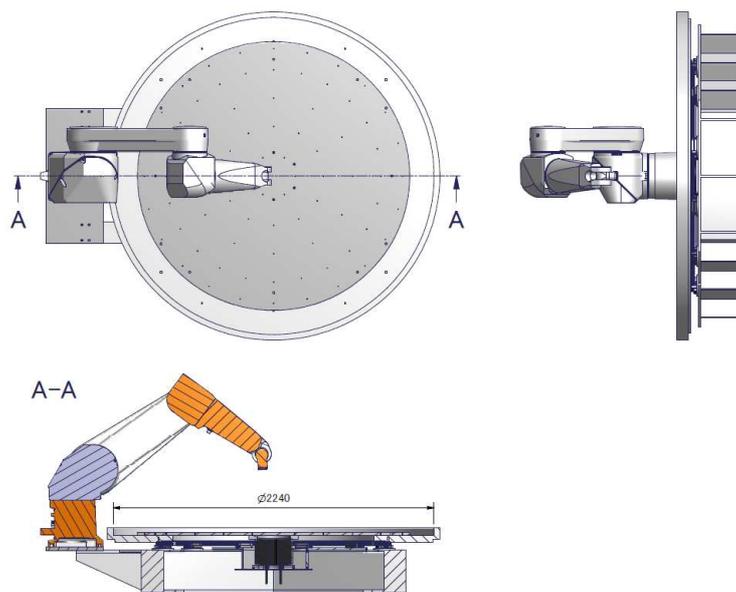


図 2-1-9 : 研磨加工機の模式図

この研磨加工機を用いて大型光学素子の超精密研磨を行うためには、研磨パスのレシピデータ通りにロボットとロータリーテーブルを制御することが重要である。ロボットのコントローラからロータリーテーブルを制御するソフトウェアの概要を図 2-1-10 に示す。

■基本機能

予め作成されたレシピデータ(CSVファイル)に伴い、ロータリーテーブルを回転させ、研磨機構を持ったロボットを制御する。ロボットの単動動作はロボット付属のペンダントを用いて操作を行う。

ロータリーテーブルの簡易的な回転動作については、ペンダントより行えるものとする。(暫定)

■オートシーケンス

オートシーケンスを含めた一連の動作は以下の通りである。

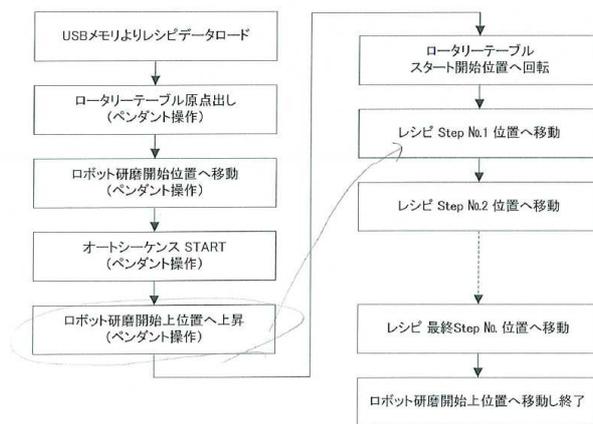


図 2-1-10 : 制御ソフトの概要

開発した自転公転方式の研磨ヘッドと研磨加工機を用いて、□100 mmのクリアセラム基板に対して試験研磨を行い（図 2-1-11）、シミュレーション通りの単位除去形状が得られることを確認した（図 2-1-12）。また、1×0.7 m楕円平面鏡（クリアセラム製、t60 mm）に対して試験研磨を行ったところ（図 2-1-13）、鏡面全面で均一な研磨除去量が得られ、大面積への応用が可能であることを確認した。



図 2-1-11 : 試験研磨

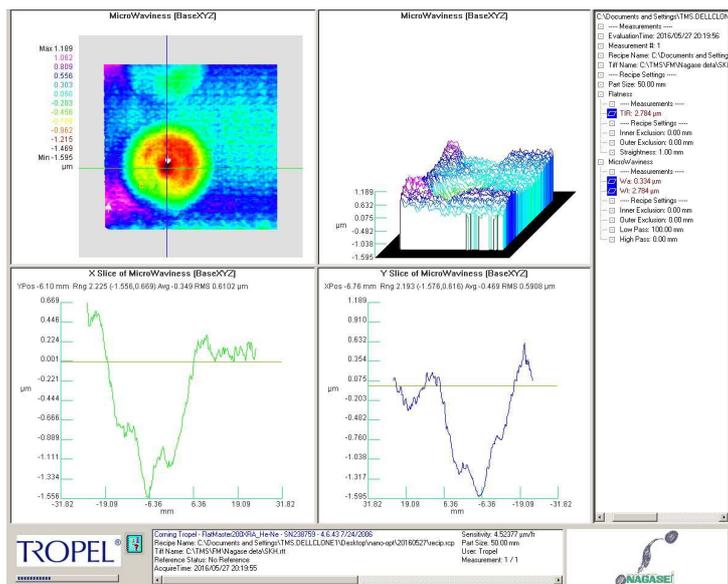


図 2-1-12 : 単位除去形状

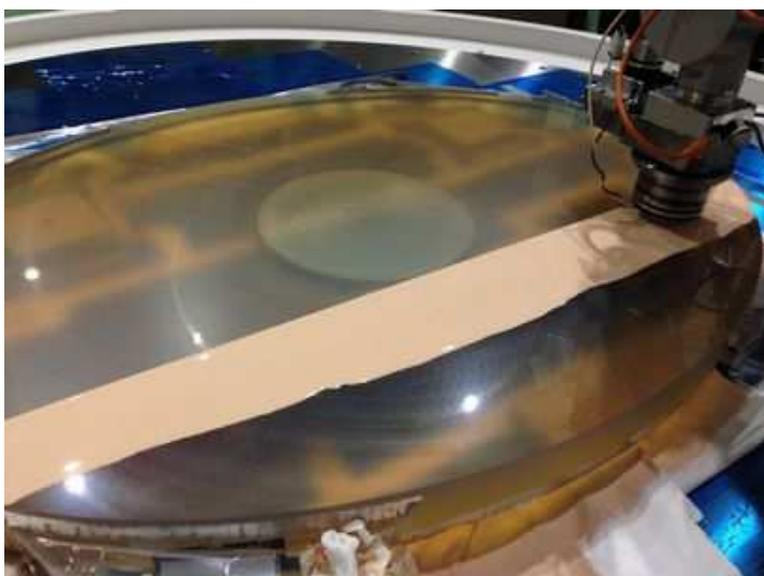


図 2-1-13 : 1 × 0.7 m 楕円平面鏡への試験研磨

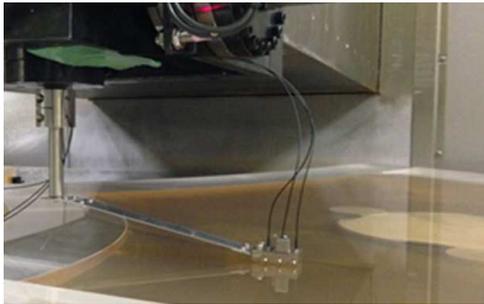
2-2 機上計測システムの開発

2-2-1 計測ユニットの開発

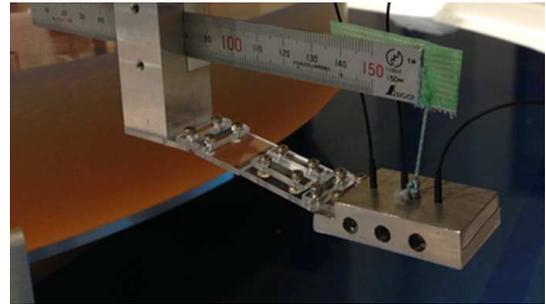
計測ユニット（図 2-2-1）は 3 つのセンサの相対位置を保持し、かつ鏡面に沿ってロボットアームによってけん引される部位である。このユニットに要求される性能は以下の通りである。

- 1) センサの相対位置を保持する

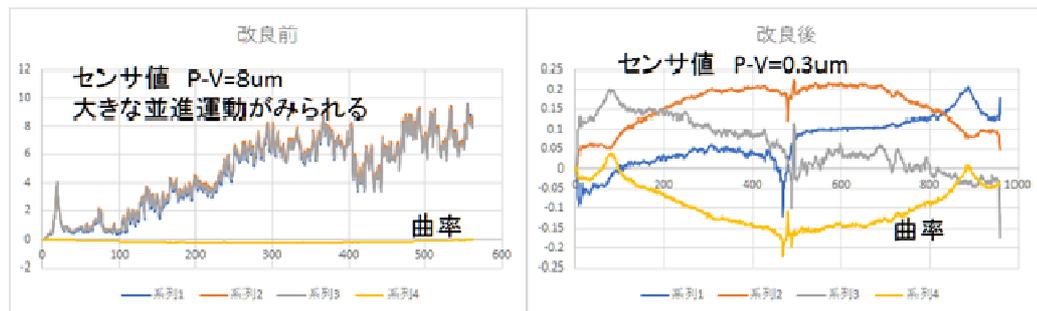
- 2) 3点逐次法の原理を実現するために、走査方向に対して正しくセンサ列を運動させる
- 3) 引きずり動作によって鏡面を傷つけない
- 4) 極力摩擦を減らし、センサノイズを抑える
- 5) ロボットアームでのけん引に対応する
- 6) 走査動作以外の動作において鏡面を傷つけない



旧タイプのリード。自由度が足りず計測が安定しなかった。



新規開発したリードと計測ユニット。旧タイプの問題をフィードバックし、安定した測定精度を実現した。



従来のリード

新しいリード

従来のリードは自由度がなく、接触が不安定でセンサ値に大きな変動がみられるが、改良後は安定なデータを容易に得られるようになった。

図 2-2-1 : 計測ユニット

この要求仕様に対し、それぞれ以下の開発を行った。

- 1) 低熱膨張のインバー材を用い、センサの取り付け穴と固定部の配置を最適化した。
- 2) 走査方向に z 軸、鏡面法線方向に y 軸を定義すると、y、 θ_z 、 θ_x に対してはフレキシブルでそれ以外の自由度に対してはセンサ列を拘束する部位（リード）を開発した。またリードを軽量化することで重心がセンサ列の中央のセンサの位置に一

致するように工夫した。

- 3) 樹脂製の接触点を採用し、理想的な位置に接触点が一致するように基盤に加工を施した。
- 4) 樹脂製の接触子をテフロン、アクリルなど計5種類検証し、テフロン以外はおむね良好な結果を示すことを確認し、ポリアセタールが最良であることを見出した。
- 5) 研磨ヘッドと計測ユニットはロボットアームの先端で頻繁に交換作業が行われるので、脱着が容易になるように磁石を用いたロボットアームとのインターフェースを製作した。
- 6) センサユニットが鏡面から離れる際は、インバーのブロックが鏡面に傷をつけないように、重心付近でつりさげられる構造とし、ブロックの角は樹脂シートで保護した。

開発した計測ユニットの性能評価を $\phi 1\text{ m}$ 双曲面鏡を用いて行い、 20 nm rms の極めて良好な再現性が得られることを確認した。

2-2-2 データステッチング技術の開発

データを梁やシート状の弾性体とみなしたデータステッチング方法である。なお梁の外力による変形は曲げエネルギーが採用の状態を実現し、これは補間法で良く用いられるスプライン曲線と等価である。本手法はステッチング後の最適解を最小エネルギー問題と同様に扱えるため広く使われる有限要素法での処理が可能となる。この手法の力学的なイメージは図2-2-2に示すような竹ひごで竹を編む状況と同じである。編まれる前の竹ひごは様々な形状をし、交点ではねじれの関係であるが、図2-2-2のように編めば交点では交わりの関係になる。このとき各々の竹ひごは弾性変形し、システム全体としては最小エネルギーの状態となる。この状態は最小エネルギー状態である算術平均と滑らかな補間を実現するスプライン曲線の特性を利用したものである。この問題において力学的要素である竹ひごの元形

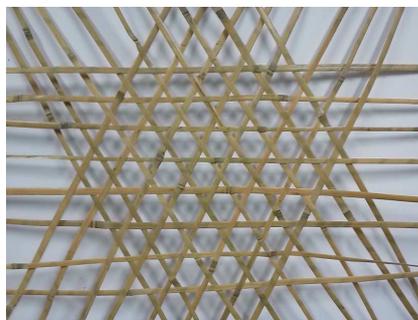


図 2-2-2 : 弾性体である竹ひごで編まれた竹

状と固さはそれぞれ数学的要素である系列データの値と重み（信頼度）と等価となる。

このアイデアを元に図 2-2-3 に示すようなシミュレーションを行った。a は全体的には平面で右端に凸形状を有する被検面の形状を示し、線は網目状の計測パスを表す。合計 60 本の走査計測から成る。b は計測誤差が 2 回積分される場合を想定した計測結果を従来手法のように剛体として最小二乗法によりステッチしたものである。各系列データはねじれの関係にある。c は中央図のデータを新開発のデータステッチングにより処理した結果である。交点で値が一致し、より真値の形状に近いことが分かる。いずれもスケールは同じである。

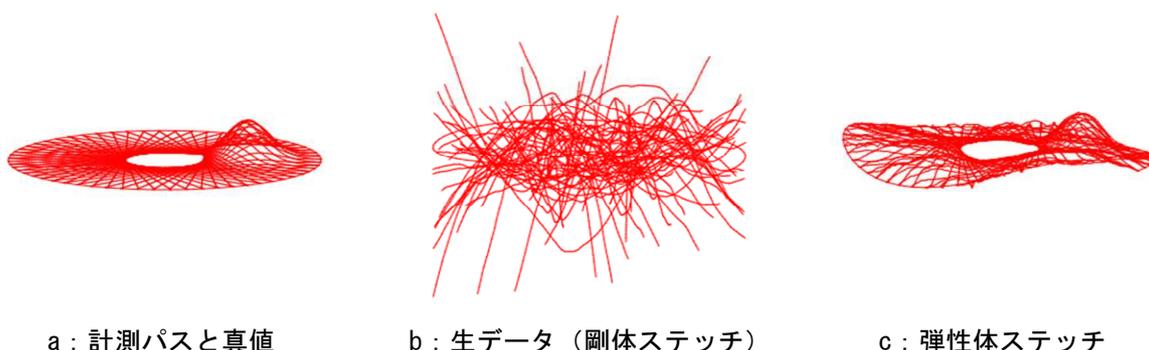


図 2-2-3：計測パスとステッチングの効果

以上の手法では、データが可変であるため重複領域においてすべてのデータの値を一致させることができる。またそれによるひずみは重複以外の領域に伝搬することで、全データ領域において最小エネルギー状態の結果を得ることができる。これは自由度の設定などの煩雑な作業をすることなく、データの全自由度を用いるため、従来手法よりも真値に近い結果を出力すると考えられる。また、この手法は画像データに限らず、様々な 3 次元データにも適用できる。

以上を実現するために上図にあるようにデータを梁要素と見立て、その固さを図 2-2-4 に示すように行列で表現した。

これを剛性行列という。この剛性行列を各データごとに作成し、線形結合する。このとき、左辺の f と M がそれぞれデータに対して垂直方向の外力と軸外のモーメントとなる。また v と θ がそれぞれたわみ量と傾斜角度となる。

$$\begin{pmatrix} f_i \\ M_i \\ f_j \\ M_j \end{pmatrix} = EI \begin{pmatrix} \frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} & -\frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} \\ \frac{6}{l^2} & \frac{4}{l} & -\frac{6}{l^2} & \frac{2}{l} \\ -\frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} & \frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} \\ \frac{6}{l^2} & \frac{2}{l} & -\frac{6}{l^2} & \frac{4}{l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_i \\ \theta_i \\ v_j \\ \theta_j \end{pmatrix}$$

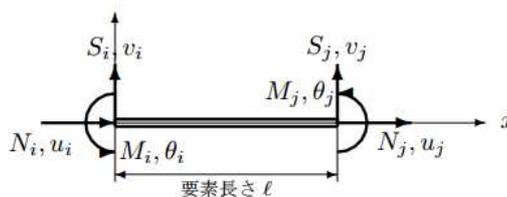


図 2-2-4：データ要素の行列表記

そのようにして作ったデータ群は図 2-2-5 のように相互に矛盾しているが、ここに外力を掛けてデータ点を v 方向に一致させる。

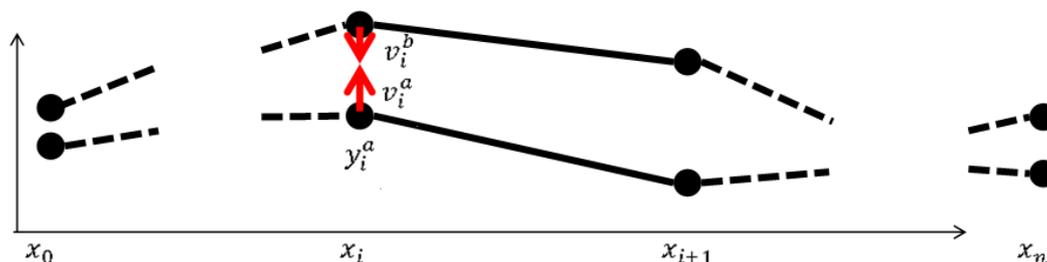


図 2-2-5 : ステッチングの概念

このようにしてデータはステッチされるが、全てのデータを行列要素で表現すると、逆行列計算が膨大なものとなる。そこで、交点のみを抽出するプログラムを開発し、交点間ごとを各要素として行列を簡素化した。しかし、この場合交点以外のデータを最終的に求める必要があるため、図 2-2-6 に示す内挿のアルゴリズムも同時に開発した。これは行列計算よって出てくる v と θ を用いて交点間のスプライン関数を逆行列計算なしに直接求めることができ、計算時間を大幅に短縮することができた。

Now we define the spline curve $S_i(x)$ between node i and j as following.
 $s_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i$

The curve must satisfy following conditions

$$\begin{aligned} s_i(x_i) &= v_i \\ s_i(x_j) &= v_j \\ s'_i(x_i) &= \theta_i \\ s'_i(x_j) &= \theta_j \end{aligned}$$

Hence the each parameters are decided ,

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{(\theta_j + \theta_i)(x_j - x_i) - 2(v_j - v_i)}{(x_j - x_i)^3} \\ b_i &= -\frac{(\theta_j + 2\theta_i)(x_j - x_i) - 3(v_j - v_i)}{(x_j - x_i)^2} \\ c_i &= \theta_i \\ d_i &= v_i \end{aligned}$$

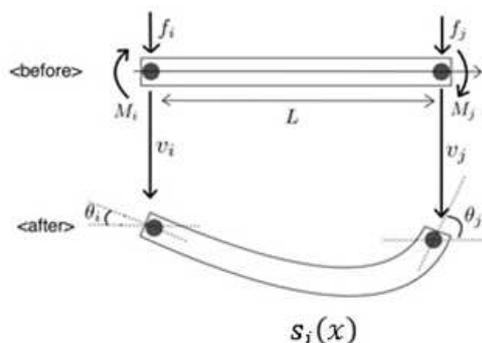


図 2-2-6 : 内挿のアルゴリズム

開発したプログラムは以下の機能を含み自動的に処理を行うことに成功した。また試験データを用いて市販の有限要素法ソフト等を用いた結果と 1 パーセント以下の偏差に抑えたことで、このソフトウェアの正しさを確認した (図 2-2-7)。

- 1) データ取り込み
- 2) 交点検出とステッチ量の算出
- 3) データの剛性行列作成
- 4) 上記逆行列問題の処理
- 5) 内挿点の補正量算出
- 6) ステッチ後の形状と外力等のマップを表示

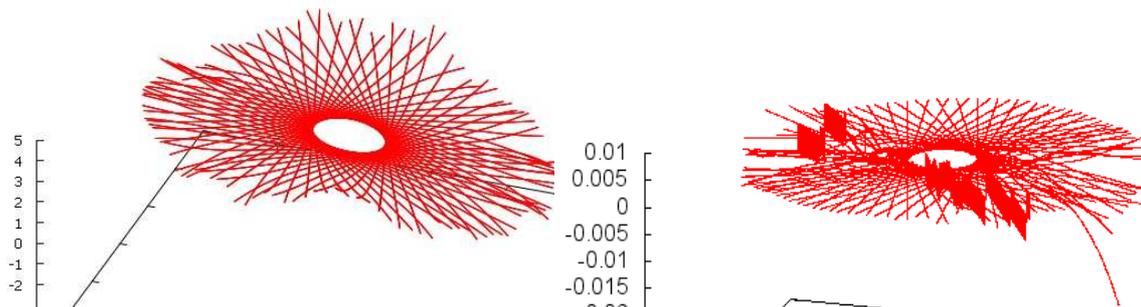


図 2-2-7 : 従来との比較

左が従来的手法と本手法で解析した結果のグラフ。このスケールでは完全に一致しているため、1つのデータ群にしか見えないことに注意。右図は両者の差分。縦軸のスケールが左図に比べて2から3ケタ程度小さいことに注意。このことから1%以下の差で一致していることが分かる。

2-2-3 計測最適化技術の開発

このステッチングの概念により以下の議論が可能となる。図 2-2-6 に示すようにデータは変形を起こしているが、変形が大きいデータはそれだけ他のデータより矛盾が大きかったことを意味する。これは有限要素解析した後に応力マップとして出力される。つまり信頼度の低いデータにはより大きな応力が出力されるため、この応力マップをクリッピング処理などに応用できる。

また、本手法では系列データが相互に効率よく重複領域を有すればそれだけお互いに補正能力を発揮しデータの精度が改善されることがわかる。したがって同じデータ量でも適切な重複領域を選択することで最適なデータ取得戦略を検討することができる。その評価は構造の固さの指標となる固有値で容易に評価可能である。図 2-2-8 に示すように左図は測定開始から終了までが一連のデータとなっており、始点と終点までの空間的及び時間的な間隔が長く、

双方の点の情報の関連性が弱くなる。一方、右図のような計測経路の場合は双方のデータが効率よく交叉（補正）しあうことができる。これはまさに連続体の固さそのものであるため、固有値解析によって評価が可能である。

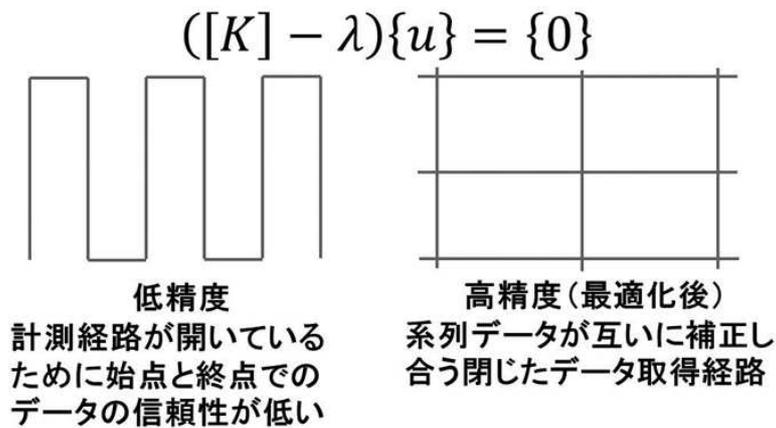


図 2-2-8 : 最適化のための評価関数と概念

そのために、開発したデータステッチ用の剛性行列の中間行列における固有値をデータ取得のコンフィグレーションにおける信頼度の評価とみなし、この固有値を算出するプログラムを開発した。

以上のステッチングと最適化の評価関数算出ソフトの開発に成功した。このソフトはこれまで半自動で処理の煩雑だった作業を全自動化し、さらに手作業分を除いた計算時間だけでも従来のものにくらべて 400 倍の高速化を実現した（図 2-2-9）。

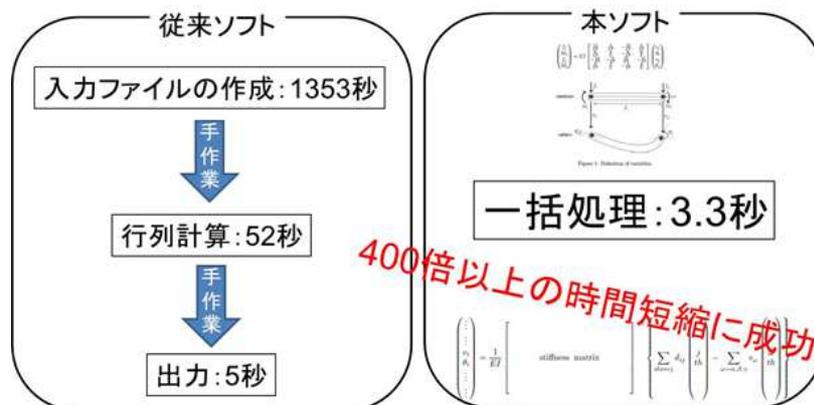


図 2-2-9 : 作業の一元化と計算時間

2-3 計測システムの評価と大型光学素子の試作

2-3-1 計測システムの評価（凹面）

軸外し非球面鏡の計測試験

開発した機上計測システムを用い、凹面に対する計測を検証した。主な開発項目を以下に挙げる。

1) 自主開発の CGH (Computer Generated Hologram) 干渉計とそれを用いて製作された凹面鏡の性能評価を行い、開発した計測システムの比較検証のためのスタンダードを確立する

2) 本計測システムの検証を凹面鏡を用いて行う

上記の課題のために、それぞれ以下のことを行った。

1) CGH 干渉計を用いて製作した軸外し非球面の凹面鏡を用いて無限遠の点光源（自然星）を観測し、鏡面の精度を確認した。その結果、ハルトマン定数 0.2 秒という十分な値を得た。この結果より、CGH 干渉計が独立検証用の基準となれることを立証した（図 2-3-1）。



図 2-3-1：凹面鏡の光学性能評価試験

左：光学性能評価試験の様子、右：北極星のイメージ

2) 上記の凹面鏡を用いて鏡面上 6 方向の計測を旧タイプの計測ユニットを用いて行った。2-2-1 章で詳述した性能を有しない計測ユニットであったため、センサの誤差が大きく（図 2-3-2）、誤差の範囲（1 マイクロメートル程度）の範囲で CGH 干渉計の結果と一致することを確認した（図 2-3-3）。この結果が新しい計測ユニットの開発にフィードバックされた。その後、 $\phi 0.6$ m 放物面鏡及び $\phi 1$ m 双曲面鏡を用いた計測試験により計測ユニットの改良を進めた。その結果、日をまたぐ独立し

た計測においても RMS = 10 nm の極めて良好な計測再現性を得た (図 2-3-4)。

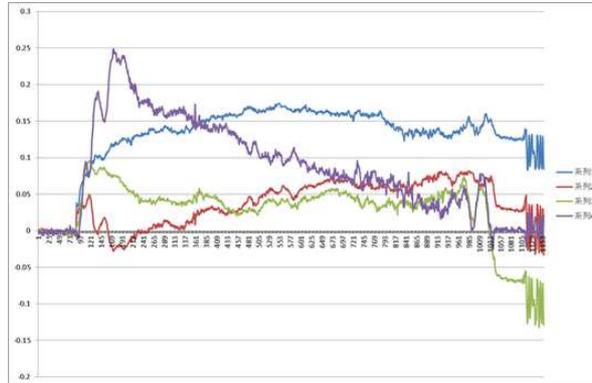


図 2-3-2 : センサの出力

青、緑、赤がセンサの出力、紫は曲率

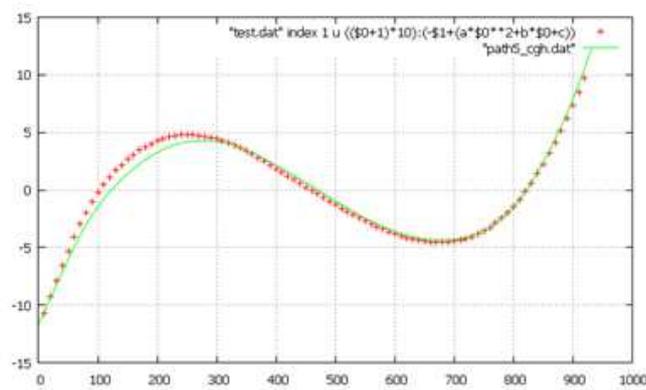


図 2-3-3 : 軸外し非球面鏡の断面形状

緑は計測結果、赤は理論値 (干渉計での計測結果と同様)

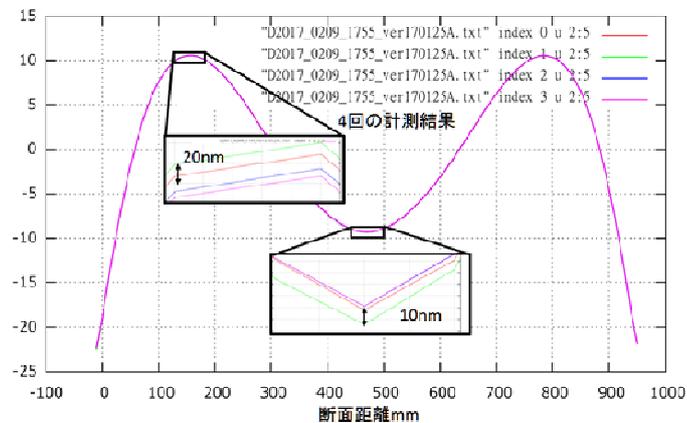


図 2-3-4 : $\phi 1$ m 双曲面鏡の計測再現性

φ0.6 m 放物面鏡の試作

開発した研磨・計測システムを用いφ0.6 m 軸対称放物面鏡 ($R = 3,000$ 、 $k = -1$) の修正研磨と計測試験を行った (図 2-3-5)。図 2-3-6 は形状誤差の履歴である。φ180 mm に外接する 60 度毎 6 本の計測データをもとに軸対称な形状修正研磨を行い、意図通りの形状修正が可能であることを確認した。

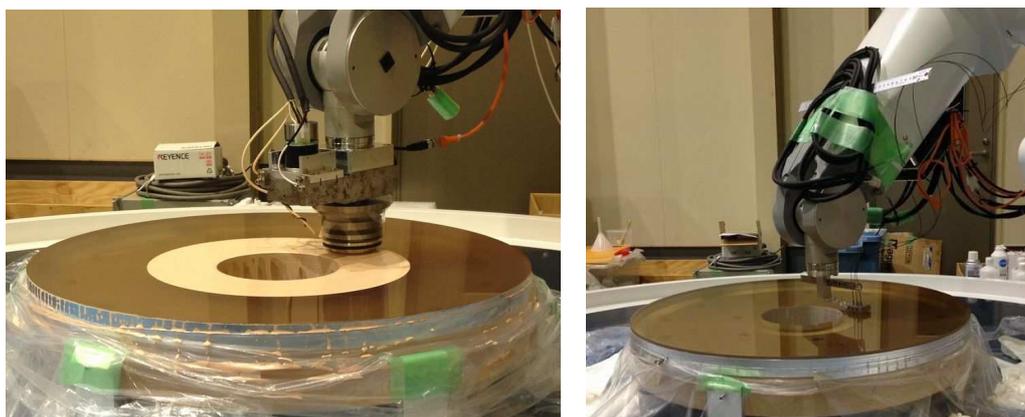


図 2-3-5 : φ0.6 m 軸対称放物面鏡の修正研磨と計測試験の様子

左 : 修正研磨、右 : 計測試験

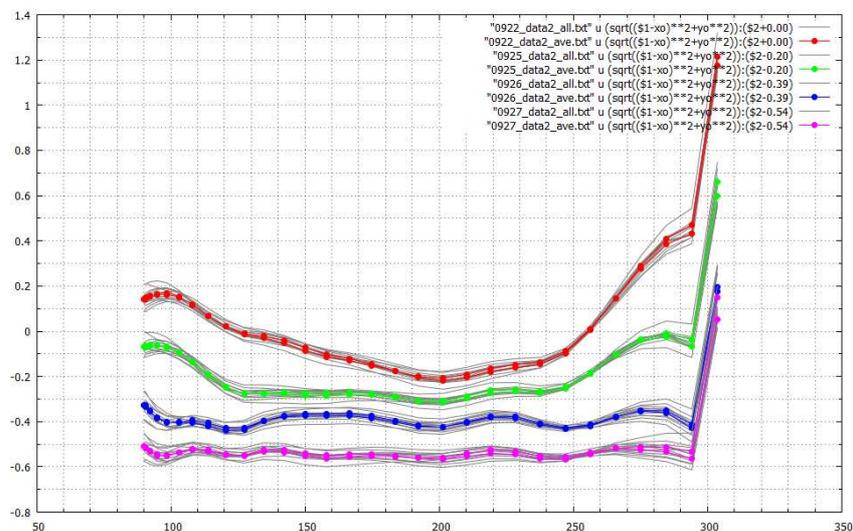


図 2-3-6 : 形状誤差の履歴

最終研磨後に鏡面の全面計測を実施した。計測パスはφ180 mm に外接する 6 度毎 60 本であり、図 2-3-7 は 60 本の計測データをステッチングした後の形状誤差である。形状精度は 90 % P-V = 100 nm 程度であるが、このデータをもとにした形状修正研磨により、さらなる形状精度の向上は容易である。

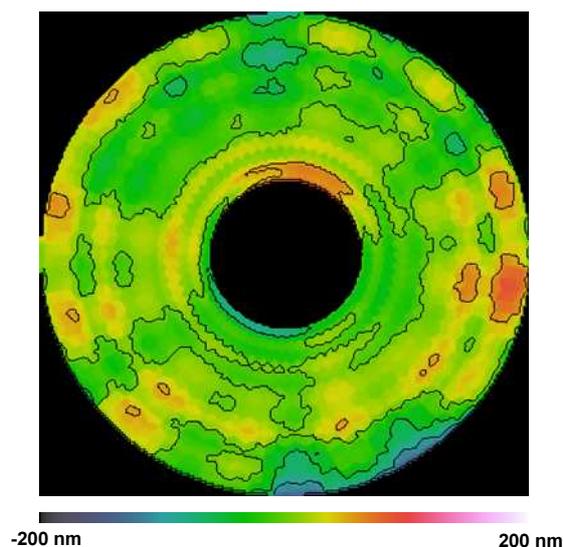


図 2-3-7：全面計測の結果

2-3-2 計測システムの評価（平面）及び大型光学素子の試作（平面）

1×0.7 m 楕円平面鏡（クリアセラム製、t60 mm）の計測と試作を行った（図 2-3-8）。計測パスを図 2-3-9 に示す。計測開始点・終了点での中央のセンサの位置は縁から 15 mm 内側で、 $\phi 100$ に外接する 60 本、 $\phi 15$ に外接する 40 本の合計 100 本を計測した。また弾性体データステッチングの効果を期待して外周部に赤線で示す 8 本の計測パスを追加した。



図 2-3-8：大型平面鏡の計測と試作

左：研磨、右：計測

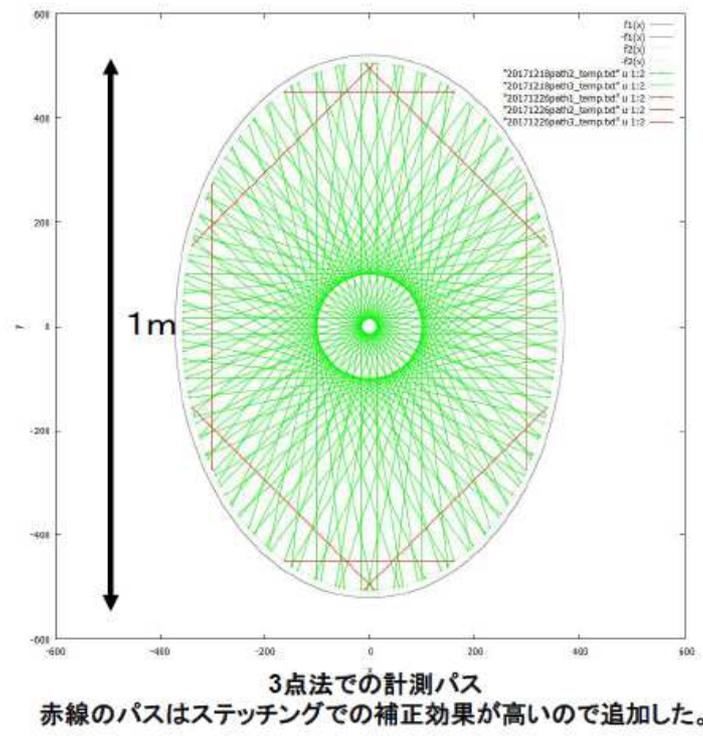


図 2-3-9 : 計測パス

比較的形状誤差が大きい研削直後の鏡面の計測を行ったところ、平面鏡の中央付近に特徴的な谷構造を確認した。そこで、 $\lambda/10$ の平面原器を置きニュートンリングで干渉縞を観察した。定性的ではあるが、両者は整合する結果となった（図 2-3-10）。

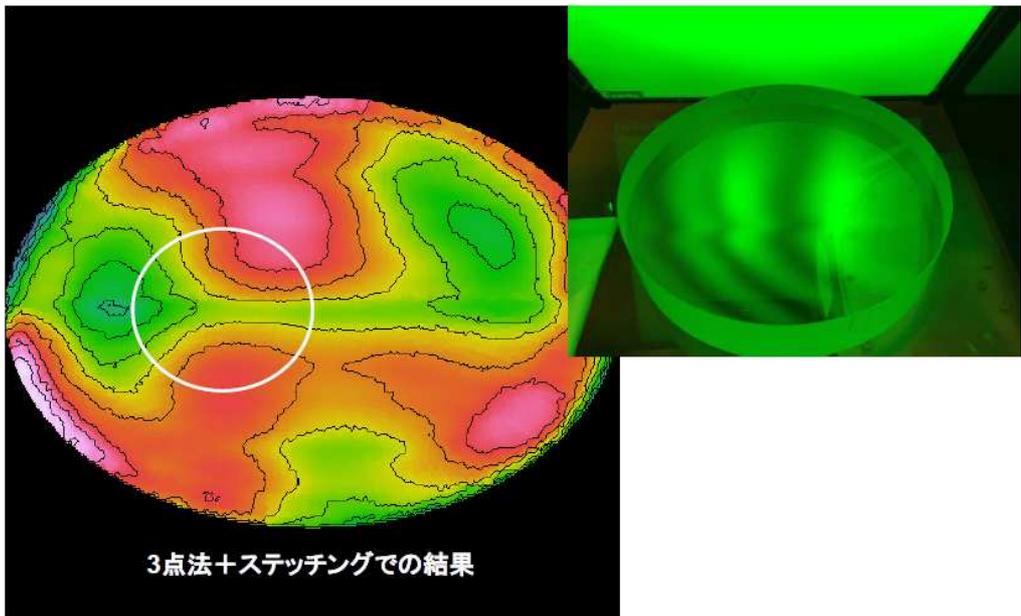


図 2-3-10 : ニュートン法との比較

図 2-3-11 は、延べ 5 回の修正を施した後の最終形状である。地上望遠鏡に求められる仕様を上回ったため、この時点で加工を終了した。左右対称の円弧状の形状誤差は研磨時のロボットアームの巡回軌道と一致しており、ロボットの癖による形状誤差と推定される。同様に中心対称で縁にある形状誤差は研磨が苦手な場所に相当する。このように、30 nm 程度の構造も感度良く計測できることを確認した。

計測の再現性を確認するために、同じ状態の鏡を 3 日間にわたり、計 6 回計測した。6 回の結果の平均値との個々の結果の差分を図 2-3-12 に示す。これにより計測再現性が RMS < 10 nm を達成したことを確認した。

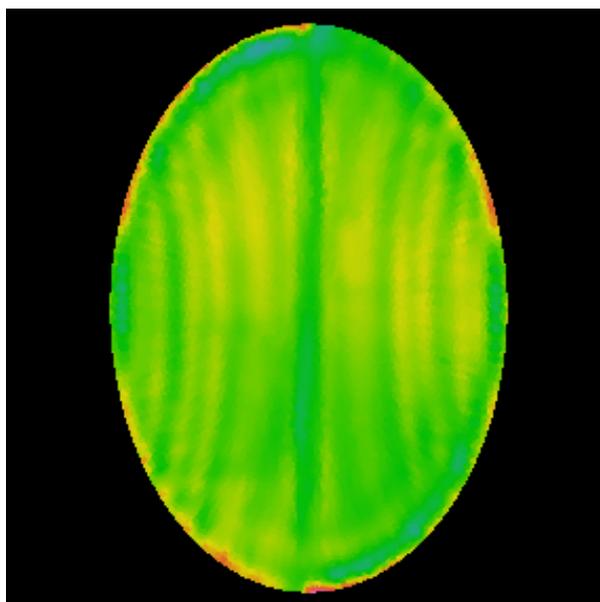


図 2-3-11 : 最終形状

RMS < 20 nm

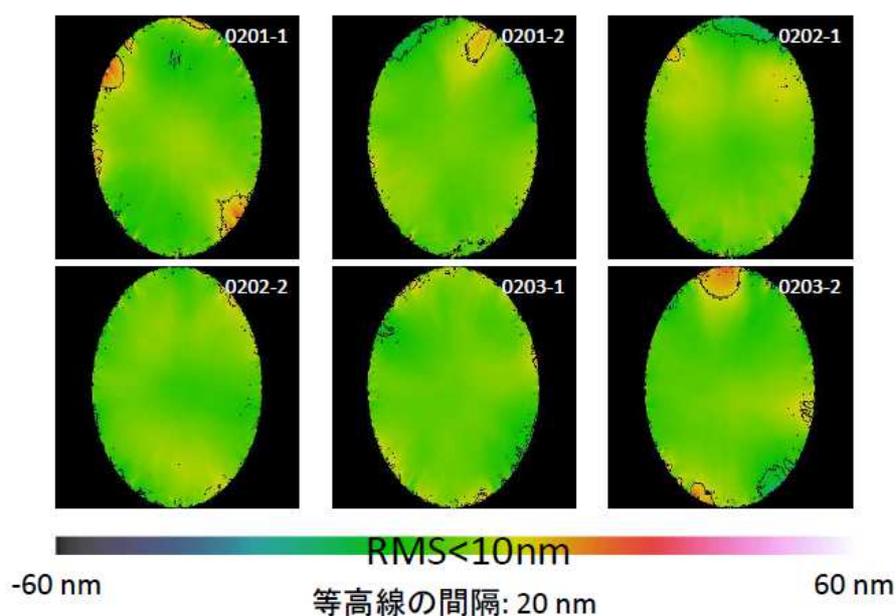


図 2-3-12 : 計測再現性 (平均との差)

2-3-3 非接触計測への挑戦

引きずり3点法を非接触3点法にすることは鏡面への負担の点において有効である。しかし、そのためには、高速サンプリング・安定サンプリング・10 mm程度のターゲットまでの距離の確保などを実現するセンサが必要である。そこで、ドイツAttocube社製のFPSに注目し、その特性を調査した。

FPSとこれまで使用してきたKeyence社製SI-Fのカタログスペックを表2-3-1に示す。あらゆる点でFPSの方が優れており、使用波長が長いため鏡面上の汚れにも強いことが期待できる。

表 2-3-1 : FPS と SI-F の比較

	FPS	SI-F
スポットサイズ [um]	70 at 8 mm	20
直径 [nm]	4	2
波長 [nm]	1440	800 付近
アライメント [度±]	0.35	1
分解能 [nm]	0.001	1
安定性 [nm]	0.286	
再現性 [nm]	2	
リニアリティ [nm/FS]		200
サンプリング [Hz]	10M	5k
計測レンジ [mm]	6-10	0.05-1.1

曲率によるFPSの検証実験を行った(図2-3-13)。曲率の変化しないゼロ膨張材の上に3点法のセンサ治具をスポンジを介して設置した。スポンジの変形に応じて、センサ列とターゲット間の距離は変化するが、正しい計測ができていれば、曲率は一定となる。

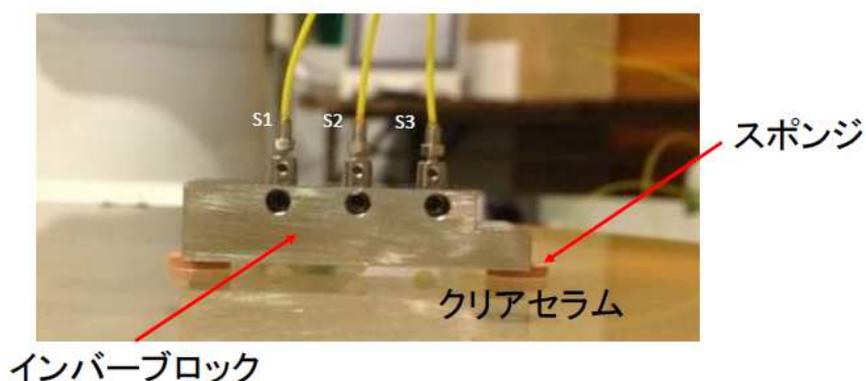


図 2-3-13 : 曲率による検証試験

スポンジの弾性変形により、被検面との距離を 10 ミクロン程度連続的に変化させた時の結果を図 2-3-14 に示す。センサ値が指数関数的に変化しながらわずかに波打っていることが確認できる。

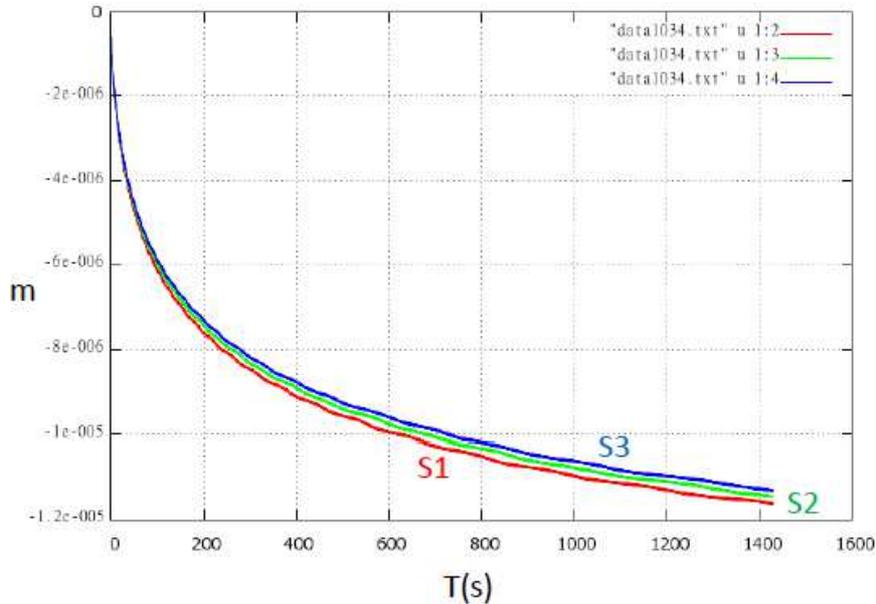
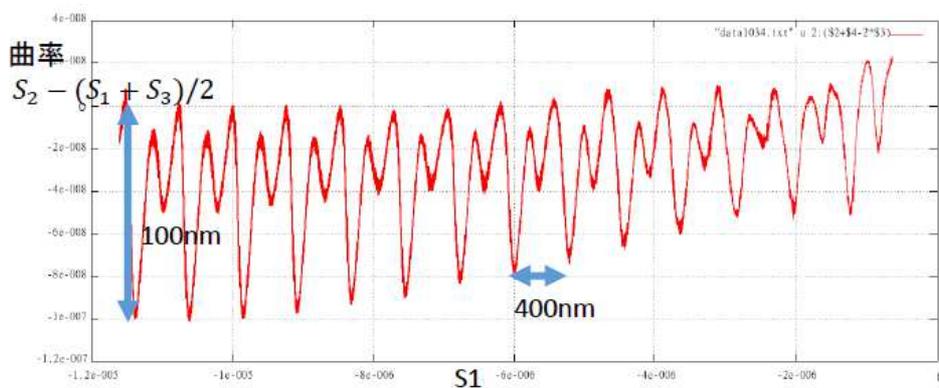


図 2-3-14 : 曲率検証の結果 (センサ出力)

曲率の変動 (図 2-3-15) をみると、明らかな非線形でかつ周期的な計測誤差を確認した。この周期がおおよそ 400 nm で、これは使用波長の 1/4 に相当する。非線形誤差の強度はおおよそ 100 nm であり、簡単な推定ではセンサ 1 つ当たり 60 nm 程度の非線形誤差を持つことが予想される。



横軸: センサ1の値(ターゲットまでの距離の代表値)、縦軸は曲率

図 2-3-15 : 曲率検証の結果 (曲率)

規則正しい非線形な周期誤差であれば、その強度より十分大きな振幅のランダムノイズを加え、出力値を平均化すれば改善を期待できる。実際にその実験を行ったところ改善が確認できたが、ターゲットまでの距離が変わると周期パターンが変化するため、加振による平均化については実用化を断念した。

非接触化はさらなる高速・非摩耗の計測に必須の要件のため、Attocube 社の技術者と周期誤差を補償する機能を議論する等、継続検討を続けている。

2-3-4 大型光学素子の試作（凸面）及び計測システムの評価（凸面）

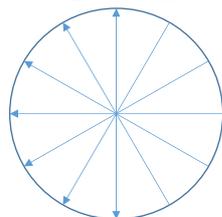
φ0.25 m 凸面鏡の試作と計測

φ1.08 m 凸面鏡の試作及び計測の前段階として、φ0.25 m 軸対称凸面鏡 ($R = -1,166.7$ 、 $k = -2.453804$) の修正研磨と計測試験を行った（図 2-3-16）。図 2-3-17 は形状誤差の履歴である。中心を通る 60 度毎 6 本の計測データをもとに形状修正研磨を行った。意図通りの形状修正が行われており、開発した計測システムを用いて凸面の計測が問題なく行えることが確認できた。



図 2-3-16 : 凸面鏡の試作

計測パス(中心通過、30度毎に6本)



形状誤差 [um]

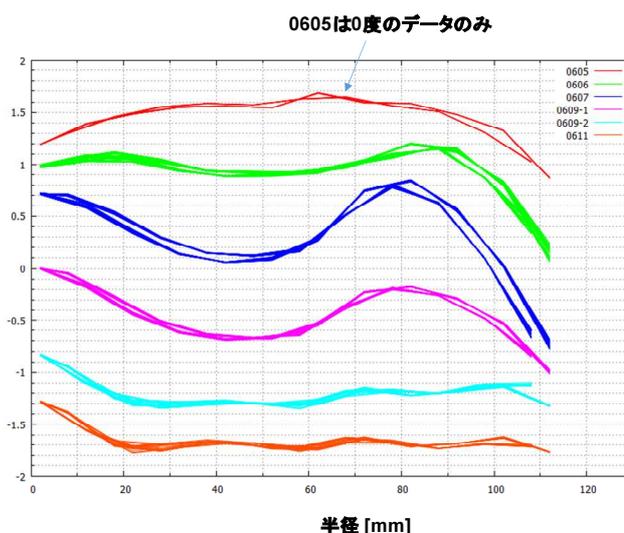


図 2-3-17 : 形状誤差の履歴

φ1.08 m 凸面鏡の試作

ナガセインテグレックス製超精密大型研削加工機 N2C-1300D を用いて、大型凸面鏡（φ1080 mm、中心厚 73.2 mm、クリアセラム、 $R = -3334, 7$ 、 $k = -2.73$ ）の超精密研削を行った（図 2-3-18）。#170 砥石による粗研削後に#1,200 砥石で仕上げ研削を行った。各工程の研削条件を表 2-3-2 にまとめる。

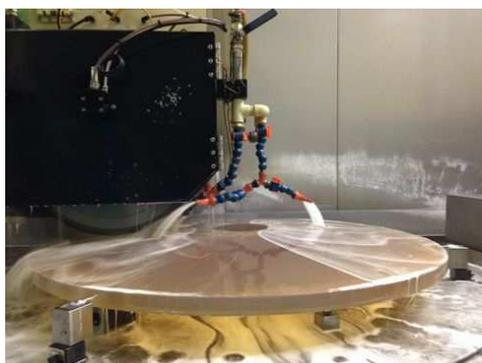


図 2-3-18 : 大型凸面鏡の超精密研削

表 2-3-2 : 研削条件

	#170	#1,200
砥石回転数 [rpm]	607	919
テーブル周速度 [mm/min.]	12,000	8,731
左右ピッチ [mm/rev.]	4.0, 1.5	1.5, 0.47
切込み [$\mu\text{m}/\text{pass}$]	30, 5	2, 1

図 2-3-19 は#1,200 砥石による仕上げ研削後の形状誤差である。Keyence 製レーザー変位計 LT9010-M を用いて取得した、複数の断面形状誤差が重ねてある。形状誤差 $1 \mu\text{m p-v}$ を達成している。加工時間は、粗研削及び仕上げ研削を合わせて 1 週間である。

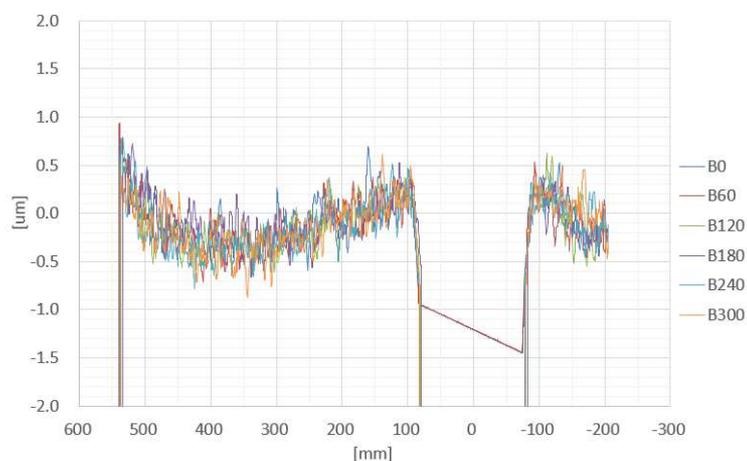


図 2-3-19 : 仕上げ研削後の形状誤差

開発した研磨・計測システムを用いた修正研磨が現在進行中である（図 2-3-20）。凸面鏡の完成は 2018 年 5 月頃、平行光を用いた光学性能評価試験は 2018 年 6 月頃を予定している。

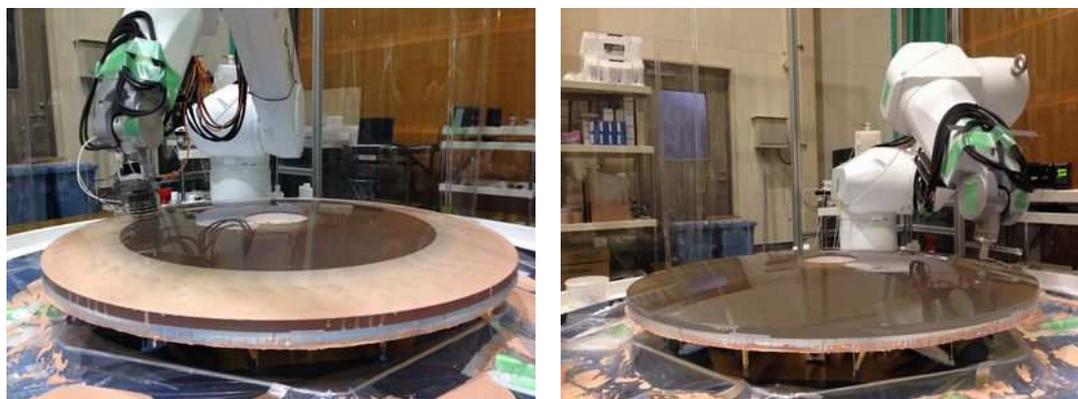


図 2-3-20：大型凸面鏡の計測と研磨

左：研磨、右：計測

2-4 大型自由面鏡の試作

2-4-1 結像光学系の設計

宇宙デブリが人類の持続的な宇宙利用の妨げになりつつあり、その監視体制の強化が国際的な課題となっている。宇宙デブリの監視には、既知の宇宙デブリを調査する「追尾型」及び未知のデブリを発見する「捕捉型」の 2 つの観測が必要である。日本の宇宙デブリ監視体制は汎用の小型望遠鏡を用いた「追尾型」観測のみに限定されており、宇宙デブリ観測専用の望遠鏡を備えた監視システムの整備が急務となっている。宇宙デブリ監視システムの整備を加速させることを目指し、大型自由曲面鏡を用いた宇宙デブリ観測専用の望遠鏡の仕様を表 2-4-1 のように決定した。

表 2-4-1：宇宙デブリ望遠鏡の仕様

	追尾型	捕捉型
口径	1 m	5 m
主鏡F	1.0	2.0
視野	5分以上	5度以上
結像性能	2秒以下	2秒以下
備考		宇宙デブリの発見において円形の視野は必要ないため、リング状の視野でもOK

上記2種類の望遠鏡のうち、より仕様が厳しい「捕捉型」についての検討を行い、仕様を満たす設計解を得た（表2-4-2）。図2-4-1～図2-4-3は各タイプの光路図である。

表2-4-2：捕捉型望遠鏡の光学設計のまとめ

	仕様	シュミット1	シュミット2	コルシュ
有効径	5 m	5 m	5 m	5 m
最大径	-	6.8 m	6.8 m	8.0 m
F値	F/2	F/2	F/2	F/2
視野	φ5度	φ5度	φ5度	φ4.2～5度
結像性能	2秒以下	2秒以下	2秒以下	2秒以下
波長	-	450～700 nm	450～700 nm	限定なし
構成	-	樹脂補正板×2 球面ミラー×1	樹脂補正板×2 球面ミラー×1 球面レンズ×1	非球面ミラー×3

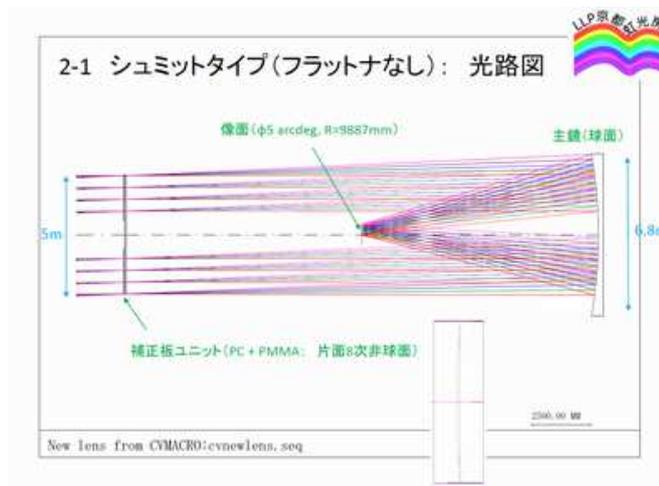


図2-4-1：シュミットタイプ1の光路図

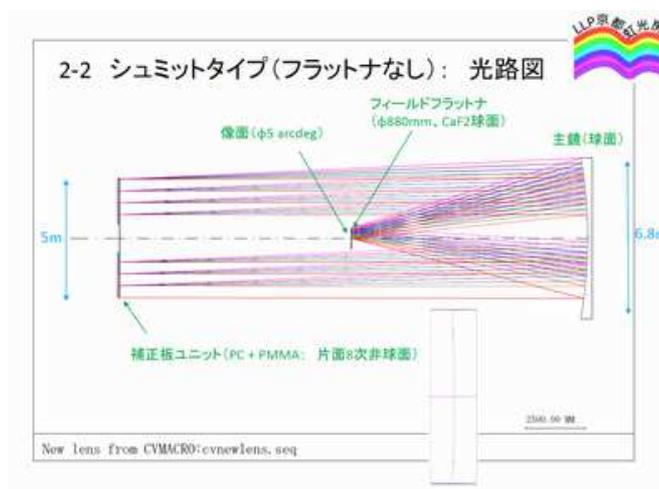


図2-4-2：シュミットタイプ2の光路図

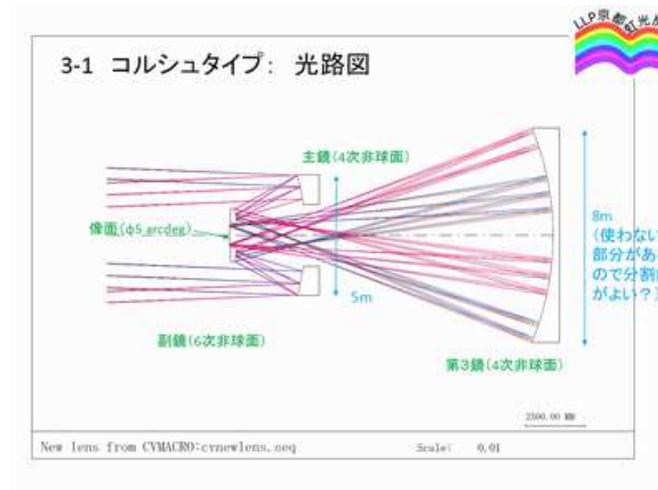


図 2-4-3 : コルシュタイプの光路図

3種類の解のうち、ミラーのみで構成されるため適用性が広い3枚の非球面を用いた光学系（コルシュタイプ）が、本事業において重要度が高い事が示唆された。そこで、このコルシュタイプの実現性を高めるべく、光学設計の改良を進めた。具体的には、製造性及びコストにおいて唯一問題になると考えられるM3ミラーのサイズと実現可能な視野の関係の検討を行った。その結果、M3直径をM1直径と同じにした状態においても 3.4 deg^2 の視野が得られることが分かった（図 2-4-4 及び図 2-4-5）。これは近年の4~8 m 中大型望遠鏡において実現されているあらゆる広視野カメラよりも広いものである。

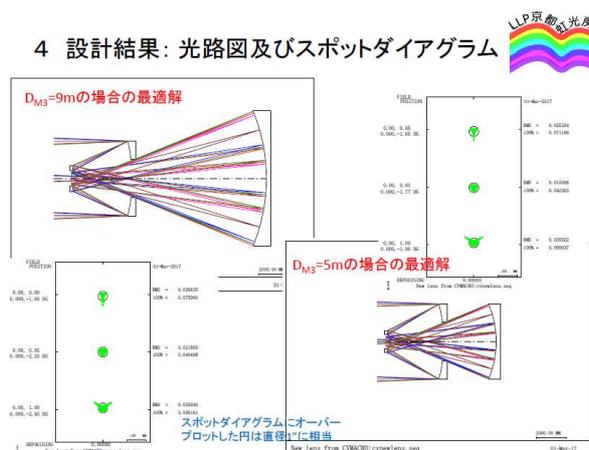


図 2-4-4 : 光路図及びスポットダイアグラム

4 設計結果： M3口径-FOV関係

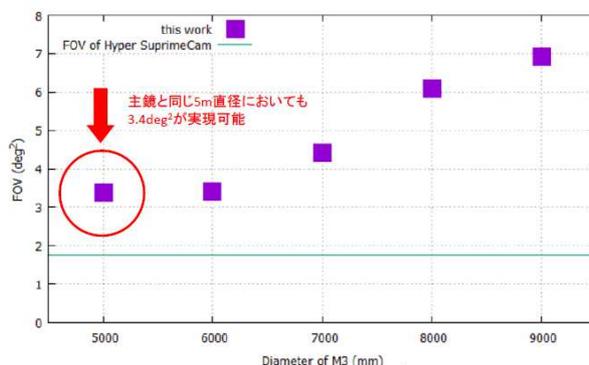


図 2-4-5 : M3 直径と視野の関係

この結像光学系についての検証をさらに進めるため、リング状視野と円形視野の比較・像面湾曲の許容による視野及び結像性能への影響・リング状視野の内側の結像性能のチェックなどを詳細検討の上、宇宙デブリの発見に最適な光学パラメータの探査を行った。その結果、幅 5 分角の輪帯状視野・1 秒角の結像性能を前提とした場合、視野 3.6~4.0 deg・遮蔽率 0.35~0.45 の領域にバランスの良い解があることが分かった（図 2-4-6）。また、円環状視野の内側についても、シーイングレベルほどではないが十分な結像性能を有していることを確認した。

		Inner FOV (deg)					
		3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
遮蔽率	0.55	-	-	-	-	0.93	1.08
	0.5	-	-	-	0.86	1.00	1.16
	0.45	0.54	0.57	0.76	0.90	1.05	1.22
	0.4	0.54	0.65	0.77	0.91	1.05	1.27
	0.35	0.56	0.67	0.78	0.91	1.04	-
	0.3	0.67	0.89	1.29	1.44	1.84	-
	0.28	1.47	1.50	1.99	-	-	-

図 2-4-6 : 光学パラメータ探査のまとめ

2-4-2 大型自由曲面鏡の試作

軸対称性を持たず非球面量が大きいいため計測及び研磨が難しいバイコニック面鏡（直交する2方向で曲率とコーニック係数が異なる面）の試作を行った。図2-4-7は試作したバイコニック面鏡の曲面形状の模式図である。0.6×0.3 mの硝材に2つのバイコニック面を形成する必要がある。

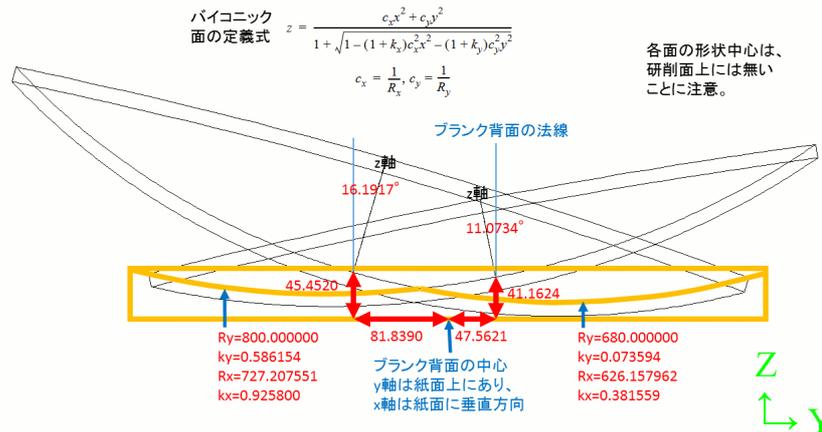


図 2-4-7：曲面形状の模式図

ナガセインテグレックス製超精密大型研削加工機での超精密研削後のバイコニック面鏡を図2-4-8に示す。超精密研削後の形状誤差は3~4 μm p-vであった。この形状誤差は砥石摩耗による砥石断面の形状誤差に起因していると考えられる。修正研磨工程を短縮するためには、最適な研削条件の調査が必要である。バイコニック面鏡の修正研磨は2018年7月を予定している。



図 2-4-8：超精密研削後のバイコニック面鏡

第3章 全体総括

研究開発成果総括

近年スペースデブリの増加に伴い、近宇宙における人類の活動が妨げられつつある。現在世界中でスペースデブリの増加を抑制し、既存のものを除去する手段の開発が活発である。デブリの軌道情報は衛星のデブリからの回避とデブリ除去の両方において重要である。現在デブリ探査用に複数の光学望遠鏡を全地球規模で展開するように世界は動き出している。そのためにはより廉価に望遠鏡に必要な大型の光学面の製作技術が重要となる。

本研究開発では、大型自由曲面の新しい製作技術を確立することを目標とした。特にロボットアームを用いた精密な研磨と計測技術を確立・実証し、これらを超精密研削と組み合わせ、より短時間で廉価な大型光学素子の製造工程を構築することを目指した。

大型光学素子の試作に関しては順調に進捗し、事業化を達成するために当初目標とした成果三項目（ $\phi 1$ m に対して、形状精度 60 nm p-v、納期 1.5 ヶ月、価格 1,000 万円/枚）を達成できる見通しとなった。また、センサ・ロボット・ロータリーテーブル・機上計測ユニット制御を統合して運用するシステムを構築し、データの引継ぎロスをなくすことに成功したため、さらに納期短縮や品質向上が期待できる。

さらなる計測精度の向上・計測時間の短縮を目指し、非接触計測の技術開発に注力した。しかし、新型レーザー変位計に非線形な周期誤差がみつき、中断を余儀なくされた。この不具合症状についてはメーカー側に伝え、延べ2回にわたるソフトの改修が施されたもののまだ解決していない。ただ、非接触化はさらなる高速・非摩耗の計測に必須の要件のため、継続検討を続けている。

このほかにすでに開発が完了しているデータステッチング技術についても進展があった。これまでのステッチ技術は直線パスのみに対応するものであり、大型平面鏡に対して得られた繰り返し再現性 10 nm rms も、その限定的な技術で達成されたものである。しかし、今年度の開発により曲がった計測パスにも対応できるアルゴリズムを開発した。引き続き自助努力で開発を継続する予定である。

事業化についても進展があった。本研究開発期間中に3つの大型光学素子（ $\phi 0.6$ m 放物面鏡・ $\phi 1$ m 双曲面鏡及び $\phi 0.25$ m 凸面鏡）をサンプルとして出荷し、ユーザでの光学性能評価により開発した研磨・計測システムの有効性が実証された。これがインドネシア国立航空宇宙研究所（LAPAN）の 3.8 m 望遠鏡の鏡（1メートルサイズ×20枚）の受注に繋がった。

また、本研究開発の基礎となる新しい計測技術が、「表面形状計測装置」として2018年2

月 3 日に特許登録された（特許第 6294111 号）。

研究開発後の課題

上述の通り本研究開発の最終年度に非接触計測の技術開発に注力したため、大型凸面鏡及び大型自由曲面鏡の試作が完了していない。しかしながら、開発した研磨・計測システムの大面積への応用は実証済みであり、大型凸面鏡の試作についてはφ0.25 m 凸面鏡を用いて予備評価を終えている。大型自由曲面鏡の試作については、データステッチング技術の進展（曲がった計測パスへの対応）もあり、高精度な計測が可能な状況となった。両者の試作については技術的な課題はなく、は 2018 年 7 月までに終える予定である。

事業化展開

衛星や望遠鏡などに用いられる特注の光学素子の価格は一般に高いが、大型の光学素子になると、φ1 m で 3000 万円を超えることは珍しくない。従来技術は加工及び計測の設備コストが高く、かつ製造期間が極めて長いことが要因である。本研究開発による新しい製造技術は、製造期間が短く、安価な加工・計測システムを用いるため設備コストが圧倒的に低い。また、従来技術では製造が困難な自由曲面などあらゆる曲面を高精度に製造できるため、川下製造業者はユニークな製品の設計ができ、性能及び価格の面で国際競争力のある製品を製造することが可能になる。本研究開発の成果を既存ユーザに発信することで、大型光学素子の受注につなげていく。また、新規顧客獲得のため、2018 年度に国際光工学会（SPIE）にて本研究開発の成果を発表する予定である。SPIE は世界各国の研究機関・衛星製造メーカー・望遠鏡製造メーカーが参加するため PR 効果が極めて高い。

本研究開発の成果を用いれば、従来技術では製作が極めて困難なバイコニック面などの新しい光学素子を高精度・安価に製造することが可能となる。バイコニック面の光学素子を用いれば、優れた光学性能をコンパクト・軽量・安価な光学系で実現することができる。化学実験・環境計測用の高性能な光学機器は従来据え置き型で高価であったが、新しい光学系をこれらに応用することで、高性能・ポータブル・安価な光学機器を製造できるようになる。引き続きバイコニック面に対する追加研究を実施し、宇宙・天文分野以外への積極的な情報発信を行う。