

令和 4 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

高速移動物体への遠距離・高強度光伝送 のための予測的波面制御の研究

令和 5 年 5 月

国立研究開発法人理化学研究所

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立研究開発法人理化学研究所が実施した令和4年度「高速移動物体への遠距離・高強度光伝送のための予測的波面制御の研究」の成果を取りまとめたものです。

0. 研究背景

近年、小型ドローンの産業応用が進み、設備の点検や警備、農業等に応用が進んでいる。ドローンは積載量が少ないため、搭載できるバッテリー重量が限られており、充電のために頻繁な着陸を余儀なくされ利便性が低下している。

充電を遠距離で行う技術としてはマイクロ波送電やレーザー送電が提案されている。小型ドローンに効率よく送電するためには指向性の高い技術が望ましく、波長の短いレーザー送電が優れている。しかし、レーザーは波長が短いゆえに大気屈折率分布の影響を受けるため、地表付近では大気揺らぎの影響を受けて広がる性質があり、指向性の低下を招くことから効率よく給電可能な距離が制限されている。本研究はレーザーが受ける大気揺らぎの影響を補正することで、遠距離のエネルギー伝送を実現するための基礎技術を開発する。

また、送電に使用するレーザー自体も改良の必要がある。遠距離伝搬の際にレーザーが広がる要因としては大気揺らぎの影響のほか、レーザー自体のビーム品質も重要であり、ビーム品質の高いレーザーの開発が必要となってくる。さらに飛行ルートの柔軟性のため、充電に要する時間の短縮も実用上重要で、それは送電に使用するレーザーの強度が強いほど短縮可能である。高強度なレーザーを使用することで、大型で消費電力の大きいドローンの給電にも対応できるようになる。本研究では高強度でありながら長距離伝搬しても形状が崩れにくい高品質なレーザー光源の開発も行う。

1. 委託業務の目的

本研究では、高速移動物体への遠距離・高強度光伝送のための予測的波面制御による補償光学技術の原理実証を目指す。レーザー波面が受ける大気擾乱による影響を予測して補正を行う機能に加え、広角望遠鏡により移動物体の位置を検出・追尾する機能を持つ補償光学システムを製作し、屋外試験において、数km先の目標に対し、レーザー出力10kW、送出ビーム直径70mm、大気構造定数 $C_n^2=1.7 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ (Satellite Laser Communication study model, Miller and Zieske, 1979) の条件において、補正を行わない場合の2倍のピーク強度が得られることの実証を最終目標とする。伝搬距離については、実験場所の周辺環境や安全性等を考慮しつつ段階的に基線を延ばし、最長5kmでピーク強度を獲得することを目標とする。

1.2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

要素課題は(1) 予測的波面制御技術の開発、及び(2) 高速・高耐光性可変形鏡の開発に切り分けられる。

(1) 予測的波面制御技術の開発

高強度光ビームを遠距離へ伝送するためには、大気乱流及びビーム自身の加熱(サーマルブルーミング効果)の双方による波面の乱れを補償する必要がある。まず、大気乱流による波面の乱れについて、天体観測(つまり微弱光)では補償光学システムによって回折限界像を得ることが可能になっている(ただし、高速移動物体への光伝送には、そのまま適用できない)。また、サーマルブルーミング効果に対しても、実験室での乱流なしの条件下では補償光学システムが有効で、回折限界に近いスポットが実現されている(Perason 1978)。しかし、乱流がある場合は、サーマルブルーミング効果が持つ非線形性のために、ランダムな擾乱を拾って不安定性が成長する(Kar 1989; Johnson and Schonfeld 1991)。この課題はPhase Compensation Instability (PCI) と呼ばれており、解決もしくは緩和するために、伝送ビームが受ける波面の擾乱を予測して最適補正波面を生成する、予測的波面制御技術の開発に挑む必要がある。

(2) 高速・高耐光性可変形鏡の開発

出力10kWのレーザー光を長距離伝搬するためには、口径100mm以上で、1kW/cm²以上の耐光性を有するとともに、kHzオーダーの大気擾乱による光学波面の歪を補償する多素子(61素子以上)の可変形鏡が必要である。物体の移動に伴い大気の状態が高速(0.1ms)で変化するため、ミラー面は10kHz以上の頻度で数 μm 変形させる必要がある。100mm口径クラスでは、これまで

制御振動数 4kHz のものしか存在しなかったが、これを 2.5 倍に向上させて 10kHz の制御振動数を実現することが必要となる。

1.3 要素課題に対する実施項目及び体制

これらの要素課題に取り組むために、国立研究開発法人理化学研究所（以下「理化学研究所」という。）では以下の実施項目 1.1、1.2、2.3.2、2.5、2.6、2.7 及び 3. を実施する。また、三菱重工業株式会社（以下「三菱重工業」という。）では実施項目 1.2、2.2、2.3.1、2.4、2.6 及び 2.7 を、公益財団法人レーザー技術総合研究所（以下「レーザー総研」という。）では実施項目 2.1、2.6 及び 2.7 を実施する。

1. 予測的波面制御技術の開発

予測的波面制御技術を確立し、その有効性及び限界を様々な天候・気象条件下（晴天時、降雨時や強風時等）において、高強度光ビームの遠距離伝送性能について定量的に評価する。

中間目標（2020 年中間評価まで）

大気計測及び伝搬モデルの構築がなされ、それらを基にした物理・数値シミュレータ及び予測的制御アルゴリズムが確立している。

最終目標

様々な天候・気象条件下（晴天時、降雨時や強風時等）において、気圧、温度、湿度、風向や風速等と、レーザー光に対する散乱及び大気吸収係数を測定し、有効性及び限界を定量的に評価することによって、予測的波面制御技術を確立する。

1.1. 可変形鏡変位量の予測手法の確立（担当：理化学研究所）

既存研究（Smith 1971; Chen 1975; Vorob'ev 1991）において、ビーム伝搬は、乱流強度、風向・風速、そしてサーマルブルーミング効果の強さを表すディストーションパラメータ N で記述される。 N は、ビーム強度、ビーム径、目標距離、気圧、気温、散乱及び大気吸収係数で与えられる。まず、フレネル方程式を伝播方向に高速で積分する計算コードを開発する。これを用いて、大気中の乱流による大気擾乱及びサーマルブルーミング効果による波面擾乱を求める。その結果及び実施項目 1.2 の実測データを比較検証し、上記理論の妥当性を確認する。また、求めた波面擾乱のデータは、可変形鏡変位量の予測手法の構築に活用する。

1.2 で測定されたサーマルブルーミング効果なしの場合の波面擾乱から、標的の運動及び風速を考慮し、その共役波を作るように可変形鏡の変位量を予測的に制御する（予測的波面制御 1）。探索ビームの帰還光子から得た直前・前方（風上）の波面擾乱（サーマルブルーミング効果なし）データから、今の標的における波面擾乱を予測する。また、標的の運動、風速及び乱流の強さに応じて探索ビームの照射パターン及び頻度を最適化する。

次に、この予測値に加えて、非線形なサーマルブルーミング効果が加味された波面擾乱を求め、それを最も効率的に補償するように可変形鏡を制御する（予測的波面制御 2）。最適な可変形鏡の変位量は、シミュレーションによってあらかじめ決めておく。この最適化には、焼きなまし法や最急降下法等の非線形最適化アルゴリズムを改良して用いる。その上で、気象パラメータ及びサーマルブルーミング効果なしの場合の波面擾乱を与えると、最適な可変形鏡の変位量が予測的に求まるよう、AI（人工小脳）に学習させる。

また、複数の液晶板を利用して光伝搬の物理シミュレータを製作する。具体的には、液晶板に制御装置から模擬動的擾乱の位相分布を与えたのち低出力レーザーを液晶板に通し、発生した位相分布を波面センサで検出する。次に、検出値を基に可変形鏡を制御し、波面センサ上での位相が揃うことを確認する。これにより動的擾乱に対する予測的波面制御の有効性を確認する。

1.2. 気象パラメータの取得（担当：理化学研究所、三菱重工業）

予測的波面制御に必要な気象パラメータを得るため、気圧、温度、湿度、風向、風速及び乱流強度を測定する。また、パルスレーザー（探索ビーム）を用い、屋外で 100~300m の距離を

伝搬させ、往路波面擾乱及び到達光子数を測定する。次に、発射元に光センサを設置して、後方散乱による帰還光子数を測定し、到達光子数と合わせて、散乱係数及び異方性パラメータを測定する。さらに、後方散乱による輝点をガイドスターとみなして復路波面擾乱を計測する。また、大気を導入したチューブ（大気モデルチェンバー）に細いレーザービームを入射し、真空中に引いたときのビームの拡散強度との比較から、サーマルブルーミング効果を計測して、大気の吸収係数を得る。これらを様々な気象条件（陸上、海上、春夏秋冬、晴天、曇天、降雨や強風時等）において実施し、大気伝搬モデルの構築・検証のための基礎データを集積する。

なお、本項目は理化学研究所がとりまとめ、理化学研究所及び三菱重工業が共同で実施する。

2. 高出力補償ビーム送信技術の研究

本項目は、高速・高耐光可変形鏡の開発（要素課題）、波面センサ、レーザー光源、照射光学系及び広角望遠鏡の製作並びにそれらを使った組合せ試験及び遠距離伝搬試験からなる。

2.1. 高速・高耐光可変形鏡の開発（担当：レーザー総研）

口径 100mm で、 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ のレーザービームに対し、十分な耐光性・耐熱性を持つ可変形鏡システムを構築する。

まず、入射角を小さくすることにより、ミラー面上の伝送ビーム射影面積の増加を抑える。また、大気擾乱による波面の歪みを補償するには、10kHz の高速駆動が必要となるため、①Tip-tilt 鏡、②Focus 鏡及び③高次成分鏡の3つの鏡を開発し、組み合わせて用いることで、各々の歪み成分の補償に最適なアクチュエータ及び鏡構造とする。

①Tip-tilt 鏡の開発

高トルクピエゾ素子を用い、高速（10kHz）かつ十分な変位量（ $7\mu\text{m}$ ）を持つ可変形鏡を開発する。Tip-tilt 鏡は、全体を大きく動かすアクチュエータは必要であるが、ミラー面を変形する必要がないため、厚さを薄くする必要はない。

②Focus 鏡の開発

Focus 鏡として、高トルクピエゾ素子を用い、十分な変位量（ $2\mu\text{m}$ ）を持つ可変形鏡を製作する。

③高次成分鏡の開発

伝送距離 5 km 及び大気構造定数 $C_n^2 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ (SLC day model) の条件において、フリード長は 13mm であり、可変形鏡の口径が 100mm であることから、素子数 61 の高次成分鏡を製作する。素子ごとの電気駆動特性及び熱特性を把握し、最適な弾性特性を有するミラー材料を選定する。アクチュエータの間隔でミラー面を変形できることが要求されるが、その変位量は波長程度（ $1\mu\text{m}$ ）で十分となるため、高速（10kHz）の制御が可能である。微小ピエゾ素子又はバイモルフ素子を低収縮かつ高耐性を持つ接着剤で固定し、制御信号に対して正確に変位可能な可変形鏡の製作を行う。アクチュエータの配置デザイン（間隔等）やミラー材料（石英ガラス、耐熱ガラスやシリコン等）の機械剛性や厚さにより、応答周波数が異なるため、構造解析シミュレーションで最適化する。

耐光性に関しては、鏡面の透過や散乱により、アクチュエータ等に入射するレーザー光を抑制するため、低散乱・高反射鏡の製作（反射率 99.99%）や、遮光基板材料の試験を行い、耐光性・耐熱性可変形鏡（耐光強度 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ ）を開発する。また、高速稼働時のアクチュエータ自身の発熱を評価するとともに、可変形鏡の冷却方法及び冷却構造について検討を行う。さらに、数種類のアクチュエータ及び接着剤を準備し、レーザー照射試験を行って、性能及び特性の変化を評価する。

中間目標（2020 年中間評価まで）

制御頻度：10kHz、耐光強度： $1\text{kW}/\text{cm}^2$

最終目標

口径：100mm、補正頻度：10kHz、耐光強度： $1\text{kW}/\text{cm}^2$

2.2. 波面センサの開発（担当：三菱重工業）

目標距離 5km の想定で波面センサを開発する。波面測定頻度は 10kHz、波面測定点は 5×5

点以上とする。2020 年度中に 5×5 点の試作品を製作し、研究室環境において、制御頻度 10kHz での測定を実証する。2021 年度には波面測定頻度 10kHz、波面測定点 88 点の供試体を製作する。

中間目標（2020 年中間評価まで）

研究室環境において、波面測定頻度：10kHz、波面測定点：5 点×5 点

最終目標

実環境において、波面測定頻度：10kHz、波面測定点：88 点

2.3. レーザー光源の開発

エネルギー伝送を行う伝送ビーム及び予測的波面制御に用いる探索ビーム用のレーザー光源を開発・準備する。

2.3.1 伝送ビーム（担当：三菱重工業）

伝送ビームは、連続波として最大 10kW 出力、直径 70mm 程度のビームでサーマルブルーミング効果を有意に観測できること及び遠距離伝搬のためにビーム品質 $M^2=2$ 程度であることが要件となる。波長 1 μ m 帯の高出力レーザーの発振には、Yb などの希土類をドープした媒質を用い、既存技術（Hamamoto, et al. 2015）のスケールアップにより、2019 年度～2020 年度にかけて、連続波として最大 10kW 出力を達成できる固体レーザー発振器を開発する。

最終目標

出力 10kW、ビーム品質 $M^2=2$ 程度

2.3.2 探索ビーム（担当：理化学研究所）

予測的波面制御を行うため、伝送ビームとは別に探索ビームを用いる。要件を満足する既製品のパルスレーザーを調査し調達する。

最終目標（要求仕様）

パルスエネルギー 10mJ、繰り返し頻度 10kHz、パルス幅 12ns

（2019 年度までは、パルス幅 100ns を目標としていたが、パルス幅 100ns の要求仕様を満たすレーザーを入札により入手したところ、パルス幅 12ns まで対応可能な製品であった。また、パルス幅 12ns の方が大気の一瞬の情報を得やすくなる利点があり、開発中の他の装置はこの条件変更の影響を受けないため、パルス幅 12ns に目標値を変更した。）

2.4. 照射光学系の開発（担当：三菱重工業）

伝送ビーム（10kW 連続波）及び探索ビーム（10mJ、12ns）を送出するため、レーザーに耐え得る耐光強度を有する照射光学系を、2020 年度に開発する。

最終目標

耐光強度：10kW 連続波、及び 10mJ、12ns パルスに耐え得ること

（2019 年度までは、パルス幅 100ns を目標としていたが、パルス幅 100ns の要求仕様を満たすレーザーを入札により入手したところ、パルス幅 12ns まで対応可能な製品であった。また、パルス幅 12ns の方が大気の一瞬の情報を得やすくなる利点があり、開発中の他の装置はこの条件変更の影響を受けないため、パルス幅 12ns に目標値を変更した。）

2.5. 広角望遠鏡の開発（担当：理化学研究所）

予測的波面制御技術が機能するには、あらかじめ目標物体の予測位置を高精度で特定する必要がある。そこで広角望遠鏡（口径 1.0m^{*}）を開発し、目標物体の発見・追尾からビーム送出に至る一連のシーケンスを模擬する。広角望遠鏡は、2 枚のフレネルレンズで構成し、 ± 20 度

の視野角を有する。焦点面検出器として位置検出型光電子増倍管のアレイを用い、一光子計数で取得した高速移動物体の画像群をその移動方向に積分して高感度に検出し、予測位置を刻々±0.2度の精度で推定する。1m角開口の望遠鏡での試験観測の結果から推定すると、夜間でも星明りの反射を利用して移動物体を検出できる可能性がある。

※ 2019年度までは、広角望遠鏡の口径1.5mを目標としていたが、照射光学系の口径は0.6mであることから、照射光学系との光量の整合性を確保するため、この目標値を1.5mから1.0mに変更した。また、広角望遠鏡及び照射光学系の光学スループットをそれぞれ40%と90%としたとき、それぞれの有効面積は 0.31m^2 と 0.25m^2 となる。なお、広角望遠鏡の役割は、移動物体を発見し、その情報を照射光学系に伝えることであるから、その感度は、1.5倍程度(有効面積比)が適当である。従って、口径1.5mに比べ、広角望遠鏡から発せられるフェイクイベント(照射光学系が検知できないイベント)が抑制され、効率よく追尾・照射実験を行うことができる。また、レンズの製造に用いる加工装置は、最大で直径3.4mまで対応可能であり、口径1.0mの広角望遠鏡を実現できれば、1.5m以上の口径も同じ加工技術で実現可能である。

最終目標

視野角：±20度、予測位置精度：±0.2度

2.6. 組合せ動作試験(担当：理化学研究所、三菱重工業、レーザー総研)

2020年度に、それまでに製作した試作品(波面センサ及び可変形鏡)を統合し、組合せ試験1(サーマルブルーミング効果の補正なし)を行ってシステムとしての動作を検証する。その結果は、2021年度以降の供試体設計に反映する。2021年度には供試体(波面センサ、可変形鏡、広角望遠鏡、レーザー光源及び照射光学系)を完成させ、組合せ試験2(屋内及び屋外における動作確認試験；サーマルブルーミング効果の補正あり)を行う。本項目は理化学研究所がとりまとめ、理化学研究所、三菱重工業及びレーザー総研が共同で実施する。

2.7. 遠距離伝搬試験(担当：理化学研究所、三菱重工業、レーザー総研)

2022年度に屋外で高出力レーザー(10kW)を遠距離伝搬(1km以上)させ、波面制御のON/OFFに対してビームスポットの変化を観測して装置が備える波面制御能力を検証する。実験場所の周辺環境や安全性等を考慮しながら段階的に基線を延ばし、最長5kmを目標として実施する。近距離から段階的に距離を伸ばし、距離と補正効果の関係性も調査する。併せて、気圧、気温や降水量等を測定し、様々な天候・気象条件下(晴天、降雨や強風時等)における予測的波面制御の有効性を評価する。この結果により、1.の最終目標における「予測的波面制御技術を確立する」を検証する。本項目は理化学研究所がとりまとめ、理化学研究所、三菱重工業及びレーザー総研が共同で実施する。

最終目標

屋外試験において、最長5km先の目標に対し、レーザー出力10kW、送出ビーム直径70mm及び大気構造定数 $C_n^2=1.7\times 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ の条件において、補正を行わない場合の2倍のピーク強度が得られることを実証する。

3. プロジェクトの総合的推進(担当：理化学研究所)

研究開発の進捗状況や課題等の確認、その対応策の議論及び相互の情報共有を目的に、隔月程度の頻度で定期的に合同検討会を行う。また、毎週、各研究機関の代表者によるテレビ会議を行う。

本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努める。なお、研究成果の発表に当たっては、委託契約書の定めに従い、事前に発表内容等を通知する。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

本研究の技術課題	目標	達成状況
可変形鏡変位量の予測手法の確立	様々な天候・気象条件下（晴天時、降雨時や強風時等）において、気圧、温度、湿度、風向、風速等と、レーザー光に対する散乱および吸収係数を測定し、有効性と限界を定量的に評価することによって予測的波面制御技術を確立する。	サーマルブルーミングチェンバーを用いて、大気吸収係数の直接測定が可能であることが分かった。波面制御1（主に大気乱流擾乱）は10kHz、波面制御2（主にサーマルブルーミング効果）は10Hz程度の頻度で制御する。高速応答性が求められる前者に対しても、波面センサからの出力に装置特性を加味した係数をかけて可変形鏡制御することでビーム制御が可能であることを確認した。
高速・高耐光可変形鏡の開発	口径：100mm、補正頻度：10 kHz、耐光強度：1 kW/cm ²	高反射コートにより耐光強度を高めた鏡面基板を用いて3種の口径100 mm可変形鏡を製作した。出力100Wの高出力CWレーザーを最も耐光強度の低い接着部周辺に1 kW/cm ² で照射する動作試験により、目標とする高耐光性および10 kHzの高速制御が可能であることを確認した。
波面センサの開発	実環境において、波面測定頻度：10 kHz、波面測定点：88 点	10kHz動作を達成済み。波面測定点は最大100点であり、必要に応じて使用する測定点を選択することが可能。フィールドにおける耐久性を強化していく必要がある。
レーザー光源の開発	伝送レーザー光源：出力 10 kW、ビーム品質 M2=2程度 探索レーザー光源：パルスエネルギー 10 mJ、繰り返し頻度 10 kHz、パルス幅 12ns	伝送レーザー光源：出力3.39kW、ビーム品質は未計測。 高出力高品質な種光源を製造し、固体増幅により358W増幅した。増幅に関するデータを取得し、10kWの構成を検討した。 探索レーザー光源は目標を満足するドイツ製市販品を購入して達成済み
広角望遠鏡の開発	視野角：±20度 予測位置精度：±0.2度	左記仕様通りの光学性能を得た。
照射光学系の開発	耐光強度：10kW連続波、および10 mJ, 12nsパルスに耐えられること	口径600mmの大型照射光学系の製造が完了し、10kW連続波に10分間耐えられることを確認。10 mJ, 12nsのパルスを使用して遠距離伝搬試験を実施した。
システム全体	5 km先の目標に対してレーザー出力 10 kW、送出ビーム直径70 mm、大気構造定数Cn ² =1.7×10 ⁻¹⁴ m ^{-2/3} の条件においてピーク強度を補正なしの場合の2倍にすることを目標とする。	200mの距離において補正をすることでピーク強度を2倍にすることに成功した。 距離、レーザー出力、送出ビーム直径、大気構造定数を変化させたデー

		<p>タを取得することで、当初の目標よりも厳しい条件で補正できることをスケーリングにより示した。</p> <p>なお、波面をゼルニケ多項式に直交分解して再構築する実験は屋内のみで野外では検証できていない。</p>
--	--	--

3. 委託業務における研究の方法及び成果

1 予測的波面制御技術の開発

1. 1 可変形鏡変位量の予測手法の確立

大気の流れによる擾乱（サーマルブルーミング効果なし）に関しては、波面センサの出力をもとに約 10kHz で補償する。一方、サーマルブルーミング効果による波面擾乱に関しては、ビームをオンした直後以外は、空気の熱拡散のため 1 秒より長い時間尺度でしか変動しないことが実験と数値シミュレーションで確認された。屋外の大気伝搬においては、ビーム周辺の風向や温度の変化に応じ、あらかじめ決めたフォーカス点に向かって、10Hz 程度の頻度でゆっくり制御することとした。このことにより compensastion instability の発生を抑制する。

新規開発したコードを用いて、大気の擾乱がない理想的な場合において、大気の熱拡散効果の有無によるサーマルブルーミング効果の違いを計算した結果を図1. 1-1に示す。左列が熱拡散無しの場合で、右列が熱拡散有りの場合である。熱拡散がない場合、ビーム中心が過熱され、ビームと垂直な動径方向に急激な温度勾配が生じた結果、サーマルブルーミング効果が強く作用して、リング状のビームプロファイルになる。熱拡散がある場合、温度勾配がならされるため、サーマルブルーミング効果が比較的抑えられた結果、ビーム半径は実験結果と同程度の3mm程度になる。

得られた結果はサーマルブルーミングチェンバーによる実験結果と比較し、定量的に一致しており、上記制御方法の有効性が確認された。

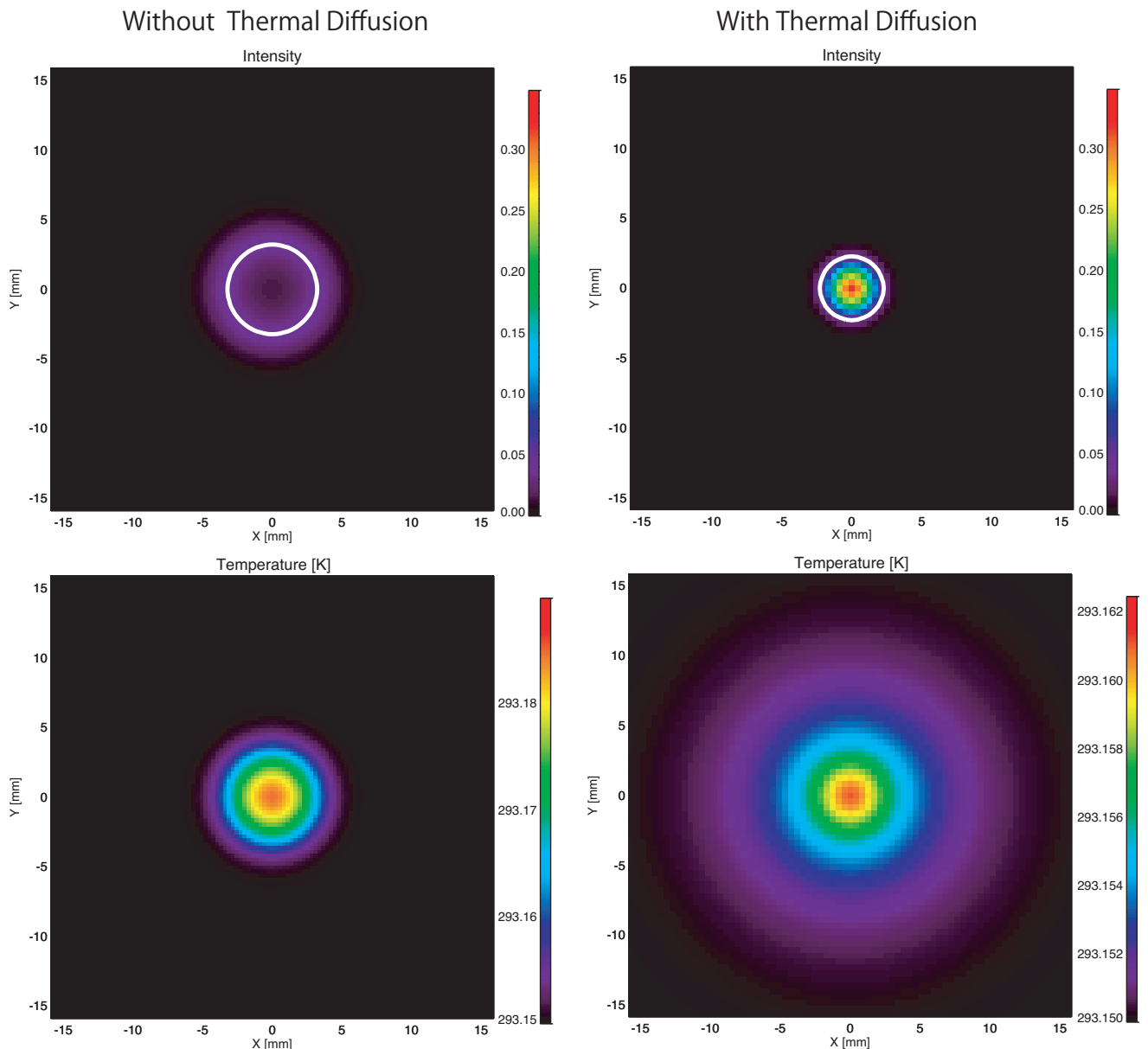


図1.1-1 実験と同じビーム強度375W、ビーム半径1.3mm、伝搬距離7mの場合における熱拡散の有無によるビームプロファイルの違い

1. 2 気象パラメータの取得

1. 2. 1 大気計測試験

気象パラメータの取得の屋外試験として大気計測試験を旧種子島空港にて実施した。300mにわたりパルスレーザーを伝搬させ、伝搬後の波面位相の取得や大気の後方散乱光の受光量、波面位相等を計測した。

1. 2. 1. 1 試験目的

予測的波面制御に必要な気象パラメータを得るため、気圧、温度、湿度、風向、風速及び乱流強度を計測する。また、パルスレーザーを用い、屋外で100~300mの距離を伝搬させ、往路波面擾乱及び到達光子数を測定する。次に、発射元に光センサを設置して、後方散乱による帰還光子数を測定する。さらに、後方散乱による輝点をガイドスターとみなして復路波面擾乱を計測する。

1. 2. 1. 2 大気計測試験 試験レイアウト

図1.2.1.2-1に試験場レイアウトを示す。

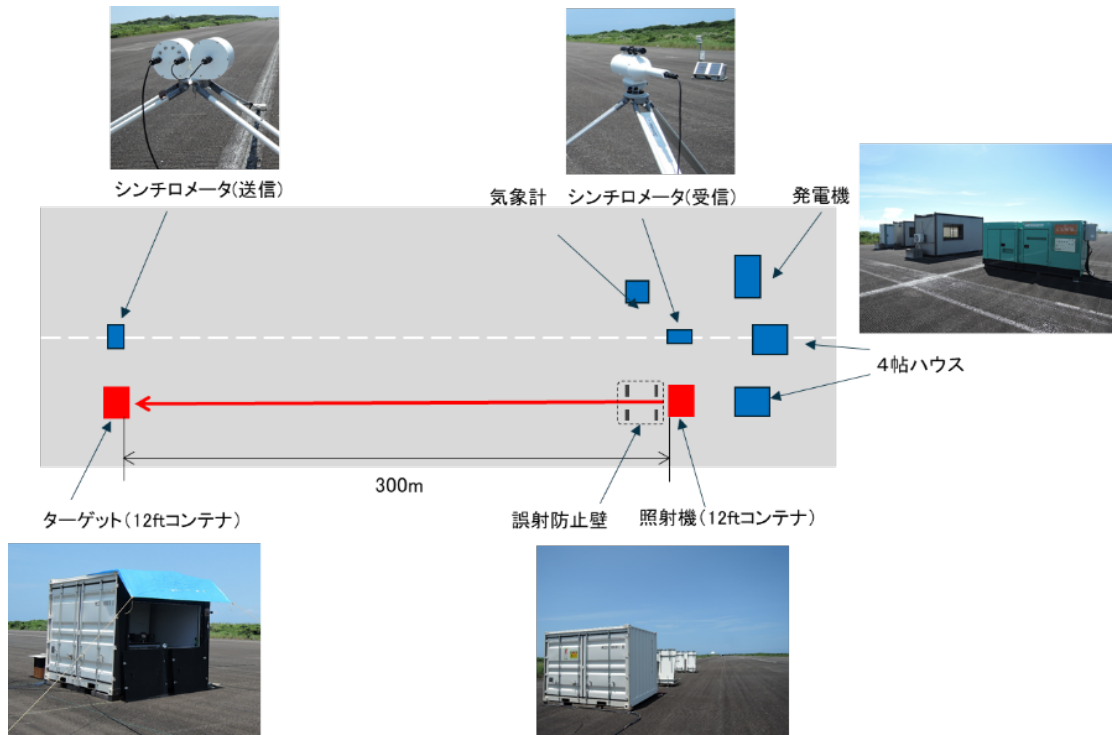


図 1.2.1.2-1 試験場レイアウト

旧種子島空港の滑走路上にレーザー照射用の12ftコンテナ(送光コンテナ)とターゲットとなる12ftコンテナ(受光コンテナ)を設置した。送光コンテナ側にはレーザー発振器用の発電機や防護壁などを配置した。また、気象データを取得するため気象計及びシンチロメータを滑走路に設置した。

1.2.1.3 大気計測試験 試験器材

大気計測試験で使用した試験機材を表1.2.1.3-1に示す。

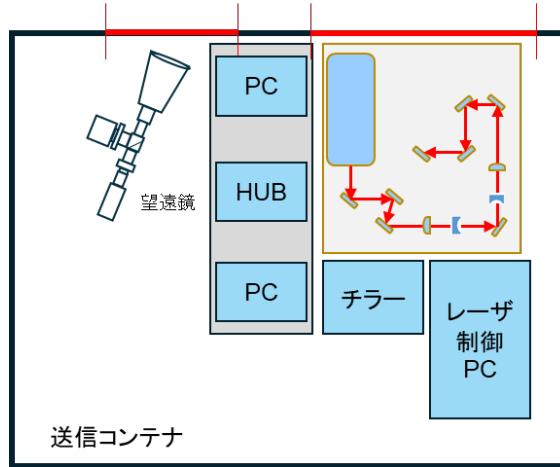
表1.2.1.3-1 試験器材

品名	型番	仕様、性能、用途、
パルスレーザー 発振器	EdgeWave FX パルスレ ーザー	波長：1030nm パルスエネルギー：10mJ 照射周期：10kHz 用途：大気中を300mにわたりパルスレーザーを 伝搬させる
波面センサ	SID4 SWIR	波長感度：0.9 ~ 1.7 μm 改良型ハルトマンマスク方式 用途：レーザーの波面位相情報を取得する。
近赤外カメラ	Widy Sens 640V-ST	波長感度：0.9 ~ 1.7 μm 光センサ：InGaAs フレームレート：最大230Hz 用途：近赤外線画像／動画データを取得する。
シャックハルトマン 型波面センサ	Widy Sens 640V-ST +マイクロレ ンズアレイ	波長感度：0.9 ~ 1.7 μm 光センサ：InGaAs フレームレート：最大230Hz 用途：レーザーの後方散乱の波面位相情報を取得す る。
気象計	POTEKA	計測項目：気温・気圧・湿度・日射量・風向・風 速・感雨・雨量 用途：各種気象データを記録する。

シンチロメータ	BLS900	使用波長：880nm 用途：乱流強度 C_n^2 を測定する
望遠鏡	Nexstar8SE	口径：203.2 mm 焦点：2032 mm 用途：後方散乱を計測する。

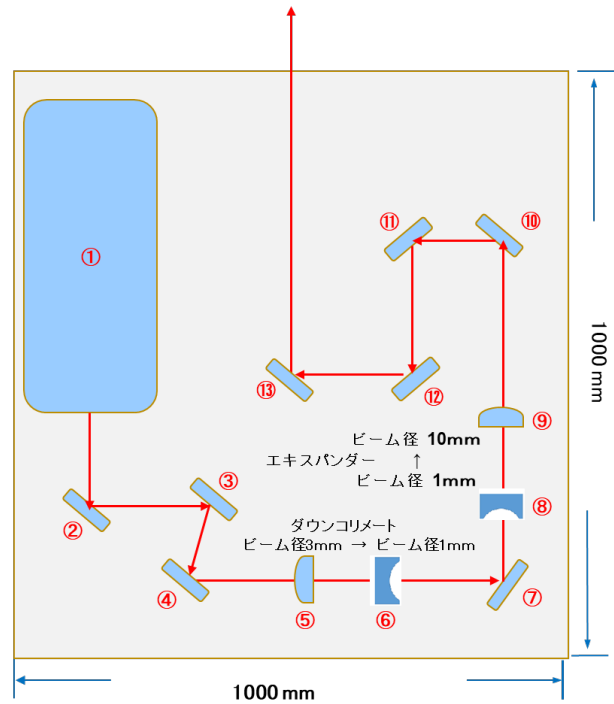
1. 2. 1. 4 光学セットアップ

大気計測試験の送光コンテナのセットアップを図1.2.1.4-1 受光コンテナセットアップを図1.2.1.4-2に示す。望遠鏡光学系のセットアップを図1.2.1.4-3に示す。



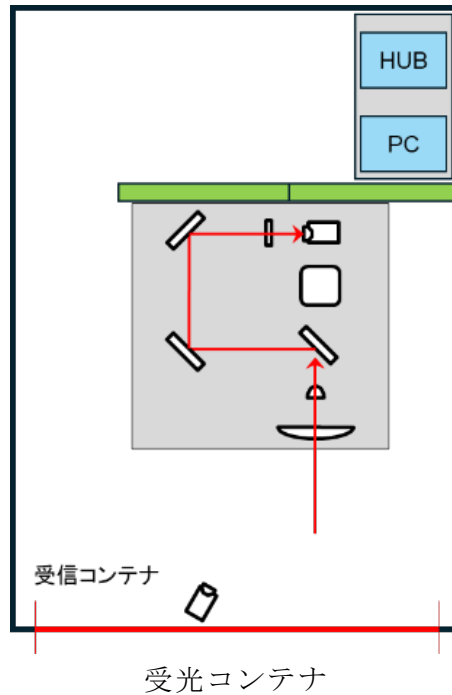
送光コンテナセットアップ

番号	機器名及び部品名	個数
①	パルスレーザー(10mJ、10kHz)	1
②	1030nm,誘電多層膜ミラー φ25.4	1
③	1030nm,誘電多層膜ミラー φ25.4	1
④	1030nm,誘電多層膜ミラー φ25.4	1
⑤	平凸レンズ f=150mm、φ25(ステージ機能 有)	1
⑥	平凹レンズ f=-50mm、φ25	1
⑦	1030nm,誘電多層膜ミラー φ25.4	1
⑧	平凹レンズ f=-50mm、φ25(ステージ機能 有)	1
⑨	平凸レンズ f=500mm、φ25	1
⑩	1030nm,誘電多層膜ミラー φ50	1
⑪	1030nm,誘電多層膜ミラー φ50	1
⑫	1030nm,誘電多層膜ミラー φ50	1
⑬	1030nm,誘電多層膜ミラー φ50	1



送光コンテナの定盤上セットアップ

図1.2.1.4-1 送光コンテナの光学セットアップ



番号	機器名及び部品名
①	平凸レンズ f=200mm、Φ150mm
②	平凹レンズ f=25.4mm、φ25mm
③	レーザーサンブラ 0.5%反射 ウェッジ 1°
④	レーザーサンブラ 0.5%反射 ウェッジ 1°
⑤	レーザーサンブラ 0.04%反射 ウェッジ 3°
⑥	NDフィルタ OD4
⑦	波面センサ(波面取得領域は直径7.68mm)
⑧	パワーメータ

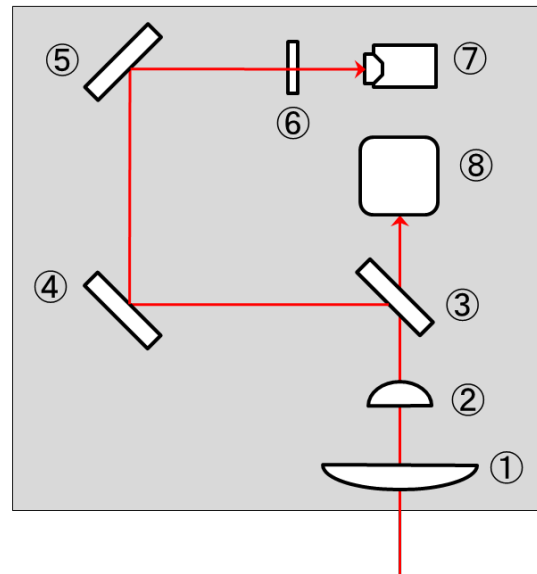


図1.2.1.4-2 受光コンテナの光学セットアップ

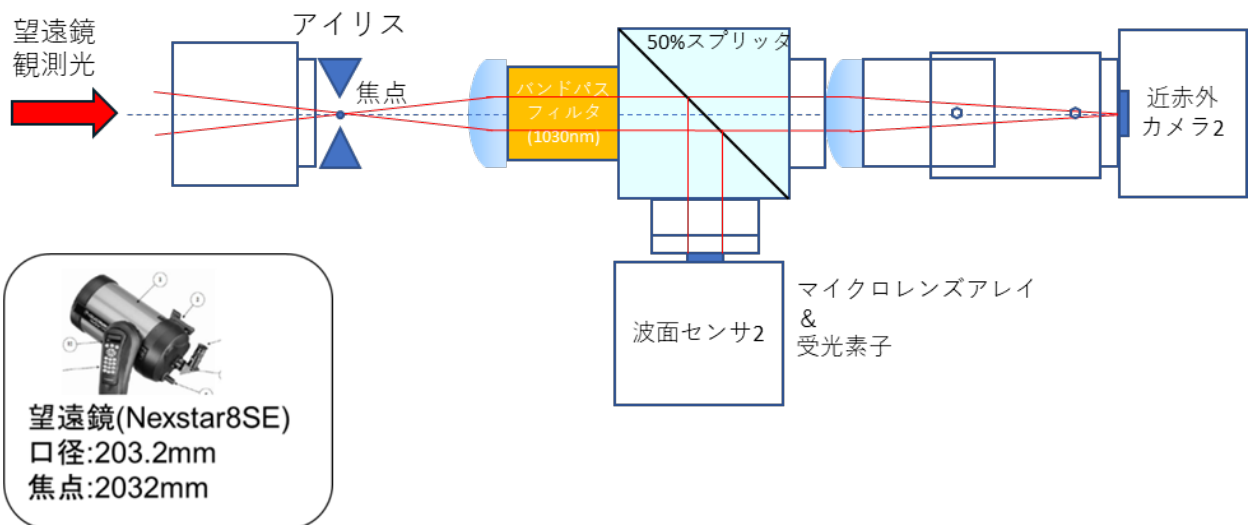


図1.2.1.4-3 望遠鏡光学セットアップ

1. 2. 1. 5 試験項目
 試験項目を表 1. 2. 1. 5-1 に示す。

表 1. 2. 1. 5-1 大気計測試験 試験実施項目

No.	試験項目	内容	取得データ
1	気象パラメータ取得試験	気象データと乱流強度の相関関係を確認するため、気象計で気象データを計測し、シンチロメータで乱流強度を計測する。	気象データ (気圧、温度、湿度、風向、風速、日射) 乱流強度
2	往路波面位相計測試験	波面センサを用いて 300m 先の伝搬後の波面位相を計測する。	往路波面情報
3	伝搬損失計測試験	パワーメータを用いて出射口および 300m の距離でのレーザーの強度を計測する。	照射直後と 300m 伝搬後のレーザー強度
4	復路波面位相計測試験	望遠鏡光学系を用いて 150m 先にフォーカスして照射したレーザーを周囲大気にて散乱させ、送光側から望遠鏡を用いて後方散乱光の画像を取得し波面情報を計測する。	大気後方散乱の波面情報

1. 2. 1. 6 試験結果及び考察

1. 2. 1. 6. 1 気象パラメータ計測試験結果

シンチロメータを1.3mの高さに設置し乱流強度 Cn^2 を計測し、気圧、温度、湿度、風向、風速、日射量は周囲に設置した気象計で計測した。各気象パラメータ間の相関係数を下記の式により計算した。

$$\text{相関係数}(X,Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

相関係数は-1~+1 までの値をとり、1 に近いほど正の相関、-1 に近いほど負の相関があり、0 に近いほど無相関であることを示す。

表 1. 2. 1. 6. 1-1 に夏の(2020年7-8月)、表 1. 2. 1. 6. 1-2 に冬の(2020年2-3月)、表 1. 2. 1. 6. 1-3 に夏・冬合計の各気象パラメータの相関係数を示す。去年度の冬の相関と似た傾向を示したが、温度のみ冬と比べ強い相関を示した。これは夏の温度と日射量の相関が冬と比べ高いためである。夏と冬の気象パラメータを合計した相関係数では温度との相関は弱くなるが、日射量との相関は変わらず強いままであることから、乱流強度 Cn^2 に最も影響するのは日射量であると考えられる。

表 1. 2. 1. 6. 1-1 夏の気象パラメータの相関係数

	温度 [°C]	湿度 [%RH]	気圧 [hPa]	風速 [m/s]	日射量 [W/m ²]	乱流強度 Cn^2 [m ^{2/3}]
温度[°C]	1.000					
湿度[%RH]	-0.795	1.000				
気圧[hPa]	-0.028	0.071	1.000			
風速[m/s]	0.641	-0.594	-0.016	1.000		
日射量 [W/m ²]	0.734	-0.667	0.210	0.633	1.000	
乱流強度 Cn^2 [m ^{2/3}]	0.636	-0.734	0.331	0.572	0.706	1.000

表 1. 2. 1. 6. 1-2 冬の気象パラメータの相関係数

	温度 [°C]	湿度 [%RH]	気圧 [hPa]	風速 [m/s]	日射量 [W/m ²]	乱流強度 Cn^2 [m ^{2/3}]
温度[°C]	1.000					
湿度[%RH]	0.232	1.000				
気圧[hPa]	-0.397	-0.649	1.000			
風速[m/s]	0.186	0.324	-0.639	1.000		
日射量 [W/m ²]	0.160	-0.361	-0.036	0.360	1.000	
乱流強度 Cn^2 [m ^{2/3}]	0.076	-0.424	-0.159	0.358	0.639	1.000

表 1.2.1.6.1-3 夏・冬合計の気象パラメータの相関係数

	温度 [°C]	湿度 [%RH]	気圧 [hPa]	風速 [m/s]	日射量 [W/m ²]	乱流強度 Cn ² [m ² /3]
温度[°C]	1.000					
湿度[%RH]	0.388	1.000				
気圧[hPa]	-0.736	-0.625	1.000			
風速[m/s]	-0.524	-0.291	0.175	1.000		
日射量 [W/m ²]	0.369	-0.313	-0.148	0.203	1.000	
乱流強度 Cn ² [m ² /3]	0.425	-0.291	-0.195	0.099	0.704	1.000

また、夏と冬の乱流強度 Cn² の強さを比較するため、測定結果の比較を図 1.2.1.6.1-1 に示す。天候の違いにより Cn² の傾向も異なっているが、基本的に日射量の強い夏の方が大きい。

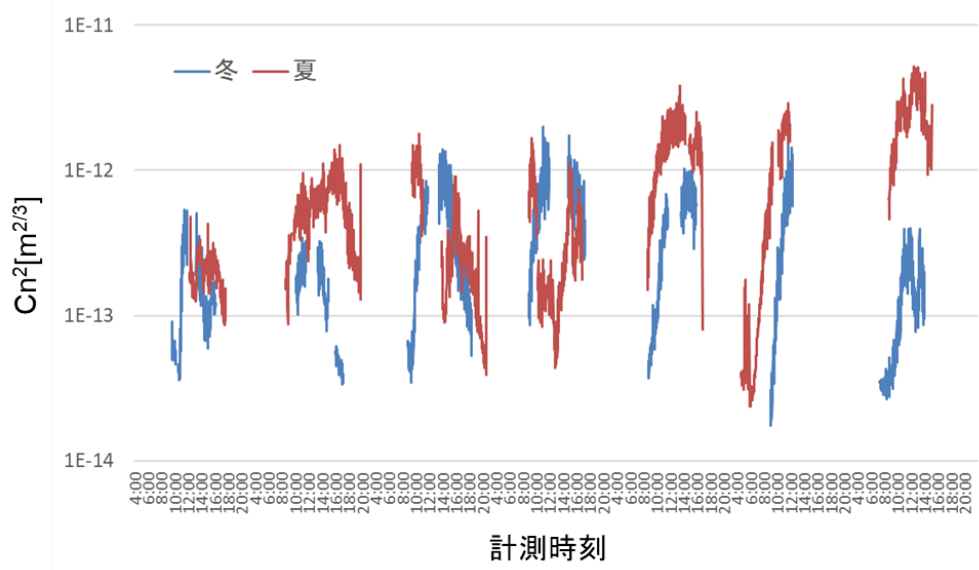


図 1.2.1.6.1-1 夏・冬の乱流強度の比較

1.2.1.6.2 往路波面位相計測試験

往路波面位相計測試験の試験結果を図 1.2.1.6.2-1 に示す。波面センサ計算値とシンクロメータ計測値の比較を表 1.2.1.6.2-1 に示す。

パルスレーザーを 300m 伝搬し、波面センサを用いて波面位相情報を取得した。取得した波面情報から大気構造係数を算出し、シンクロメータで検出した乱流強度 Cn² と比較を行った。

データ取得時の条件を以下に示す。

- ・ 距離 300m
- ・ レーザー出射直径：10mm(1/e²)
- ・ レーザー出力設定：10mJ, 10kHz
- ・ 試験前に太陽光強度分のオフセットは除去済み
- ・ Cn² の算出には瞬間的なノイズを除去するため 50 フレームの平均値を使用
(波面センサの取得頻度が 50fps であり、シンクロメータの計測周期と同じ 1 秒間平均の Cn² の値を取得している。)

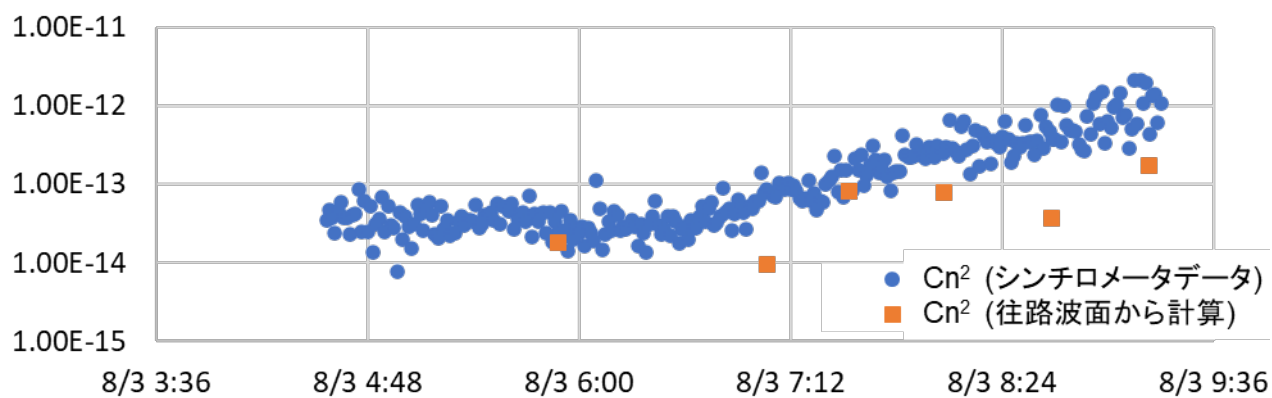


図 1. 2. 1. 6. 2-1 往路波面位相計測試験結果

表 1. 2. 1. 6. 2-1 波面センサ計算値及びシンチロメータ計測値比較

時刻	Cn^2 (波面センサ算出)	Cn^2 (シンチロメータ計測値)
5:53	1.81×10^{-14}	2.55×10^{-14}
7:04	9.62×10^{-15}	8.71×10^{-14}
7:32	8.28×10^{-14}	8.37×10^{-14}
8:04	7.76×10^{-14}	2.51×10^{-13}
8:41	3.69×10^{-14}	3.70×10^{-13}
9:14	1.74×10^{-13}	4.30×10^{-13}

シンチロメータで取得した Cn^2 の値と、計測された Cn^2 がほぼ一致することを確認した。

1. 2. 1. 6. 3 伝搬損失計測試験

本試験は送光コンテナの照射口で計測した光出力を100%とし、300m伝搬後の出力から減衰率を計測した。伝搬損失計測試験のビーム伝搬損失に関する試験結果を表1.2.1.6.3-1に示す。

表 1. 2. 1. 6. 3-1 伝搬損失計測試験結果

	出力[W]		比率[%]
	出射口	300m 地点	
1 回目	89.3	68.6	76.8
2 回目	92.1	69.7	75.7
3 回目	91.9	70.3	76.5
4 回目	92.1	54.1	58.7
5 回目	92.3	67.3	72.9
平均	91.54	66	72.1

上記の結果より、300mで2~3割程度ビーム出力が減衰していることが確認された。大気を伝搬するレーザーの減衰は散乱と消散により発生するが、散乱による減衰は消散による減衰よりはるかに大きいため計測された減衰量はほぼ散乱係数と等しい。300mで平均27.9%減衰したので散乱係数は0.093%/mとなった。

また、計測された出力から到達光子数の算出を行った。計測された出力は66Wであり、光子エネルギーは

$$E = nh\nu$$

であらわされるため、1秒当たりの到達光子数 n は 3.32×10^{20} となる。ここで、 h はプランク定数、 ν は光の振動数である。散乱係数から以下の式を用いて、波面センサに届く帰還光子数を算出した。なお、理論値計算の考え方を図1.2.1.6.3-1、理論値計算の条件を表1.2.1.6.3-2に示す。

$$P_R = \frac{P_L \tau \sigma L D^2 (1 - A_1)(1 - A_2)(1 - A_3)^2 A_4}{16d^2}$$

アイリスで絞らない場合の受光量は $2.03E-9$ [J]となり、帰還光子数 n は 1.06×10^{10} と算出した。



距離140m地点から等方散乱しているとして計算

図 1. 2. 1. 6. 3-1 理論計算の考え方

表 1. 2. 1. 6. 3-2 理論計算の条件

パラメータ	数値	備考
散乱係数 (σ)	9.3E-4 [1/m]	実測値
領域 (d)	60m (110m~170m)	実測値
距離 (L)	140m	実測値
望遠鏡直径 (D)	200mm	仕様
レーザー出力 (P_L)	91.5W	実測値
露光時間 (τ)	10ms	仕様
伝搬ロス (A_1)	2% (片道)	文献値
ハーフミラーロス (A_2)	50%	仕様
副鏡遮蔽ロス (A_3)	7%	仕様
カメラ量子効率 (A_4)	70%	仕様

1. 2. 1. 6. 4 後方散乱光計測試験結果
後方散乱光計測試験の実験系を図 1. 2. 1. 6. 4-1 に示す。

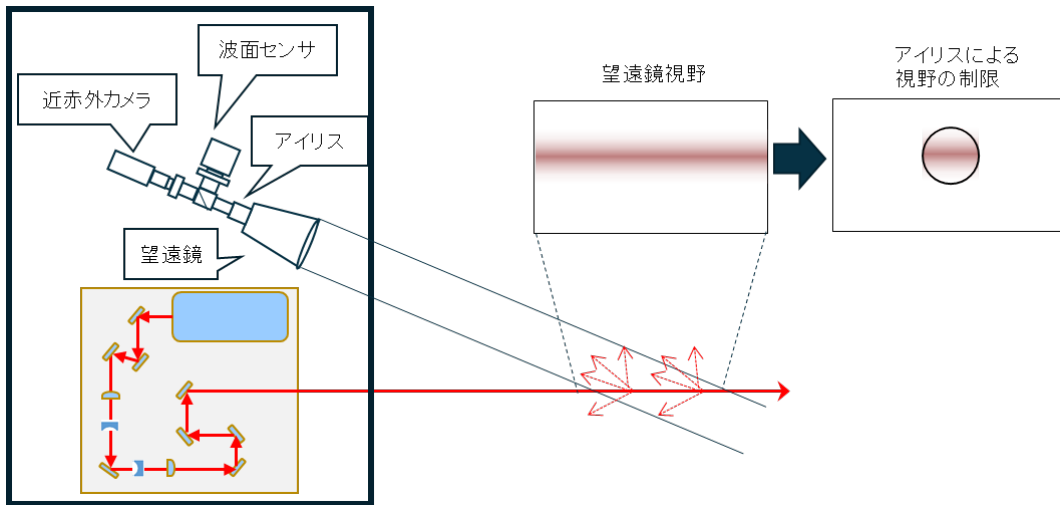


図 1. 2. 1. 6. 4-1 後方散乱光計測試験の実験系

望遠鏡光学系は近赤外カメラの映像から光路上 150m に焦点を合わせ、アイリスで視野を制限することで点光源に近いガイドスターとし、その後方散乱光を Shack-Hartmann 型波面センサにて取得した。図 1. 2. 1. 6. 4-1 に示すようにアイリスで制限された画像中央の部分のみを波面センサで検出する。

近赤外カメラにて取得した画像を図 1. 2. 1. 6. 4-2、Shack-Hartmann 型波面センサにて取得した画像を図 1. 2. 1. 6. 4-3 に示す。大気の後方散乱光が波面センサで取得できることを確認した。この結果を受けて遠距離伝搬試験においても後方散乱光を波面センサで取得する試験を実施した。

なお、波面センサ画像の中心が円形で抜けているのはカセグレンタイプの望遠鏡を使用したためであり、後に遠距離伝搬試験で使用したガリレオタイプの望遠鏡を使用した際には中心の抜けは解消されている。また、使用した波面センサも市販品で構成していたため低速であるが、遠距離伝搬試験では本研究で開発した 10kHz 動作可能な波面センサを使用している。



図 1. 2. 1. 6. 4-2 後方散乱光の取得画像(近赤外カメラ)

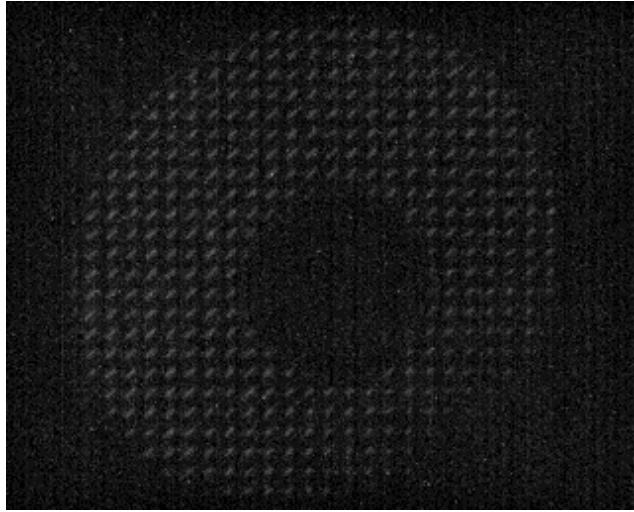


図 1.2.1.6.4-3 後方散乱光の取得画像(波面センサ)

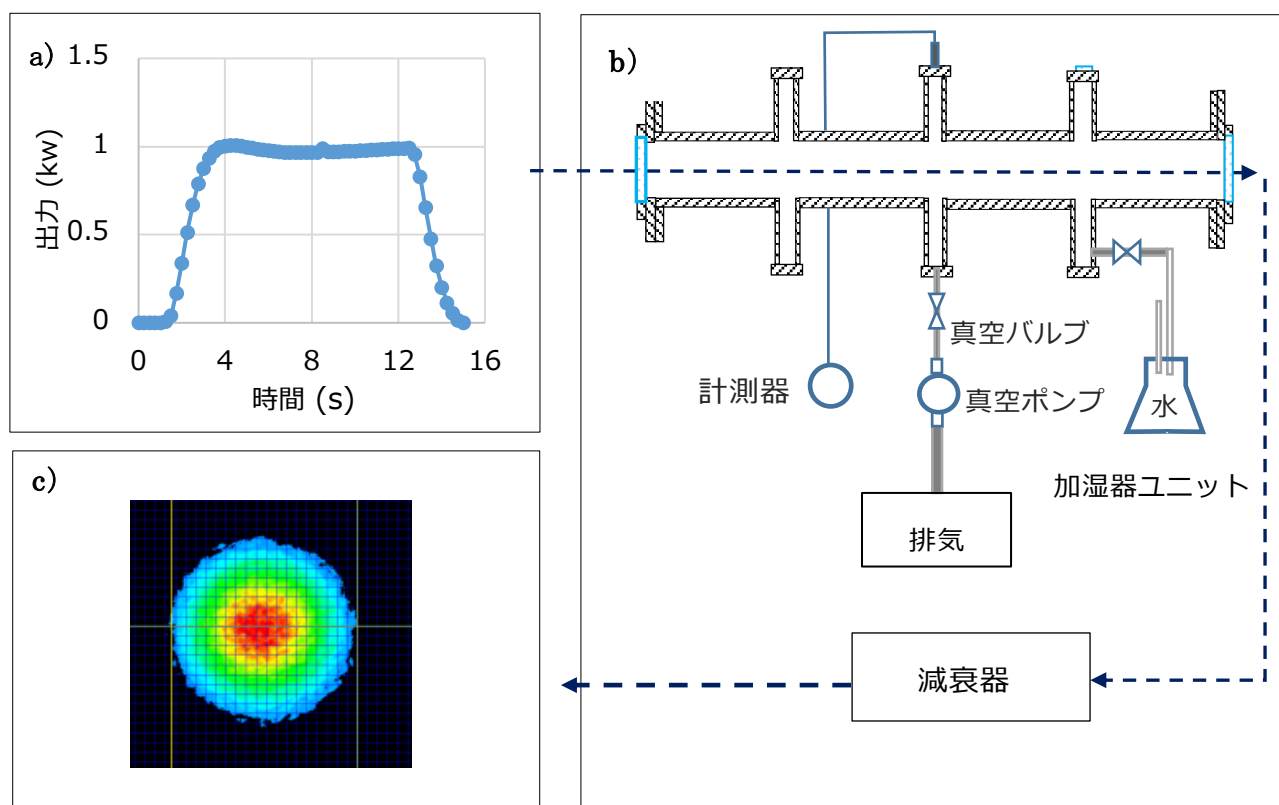
1. 2. 2 サーマルブルーミング効果計測試験

1. 2. 2. 1 大気加熱特性取得試験

チャンバー内に高強度のレーザー光を伝搬させ、チャンバー内が真空の時と大気で満たしたときのビーム径を比較してサーマルブルーミング効果を測定した。

1. 2. 2. 2 大気モデルチャンバーの構成

本実験では、サーマルブルーミングの効果の実験を実施するための、フラスコ容器に水を入れて、加熱させた後に水蒸気と標準大気を混合させて大気モデルチャンバーに挿入する構成になっている。また、真空ポンプ排気をすることで真空状態になる。サーマルブルーミング効果はハイスピードカメラでビーム径を測定することにより求めた。



a) : ファイバーレーザーの出力特性図

b) : 4m チャンバーの構成図

c) : ハイスピードカメラで取得されたビームプロファイル

図 1. 2. 2. 2-1 サーマルブルーミング効果の実験系の構成図

1. 2. 2. 3 大気特性測定 (サーマルブルーミング効果)

出力 1 kW, 波長1070nmのファイバーレーザー光を4m長のチャンバー内を伝搬させ、光学減衰器により、出力を1.5mW程度に減衰させてから7mの位置に設置したハイスピードカメラでビーム径の測定を行った。実験系の構成図を図1.2.2.2-1に示す。計測条件はチャンバー内の温度21.7℃、相対湿度98%、測定時間5秒間で行った。レーザー立ち上がり時間は約4秒後に1 kWに達する。図1.2.2.3-1に示す通り、サーマルブルーミング効果は約200ms程度で、その後のビーム径はほぼ安定するため1.5秒で表示した。また、ビーム径はビーム強度のピーク値の $1/e^2$ のビーム幅を直径で表示した。相対湿度98%の主要データとビーム径を表1.2.2.3-1に示す。

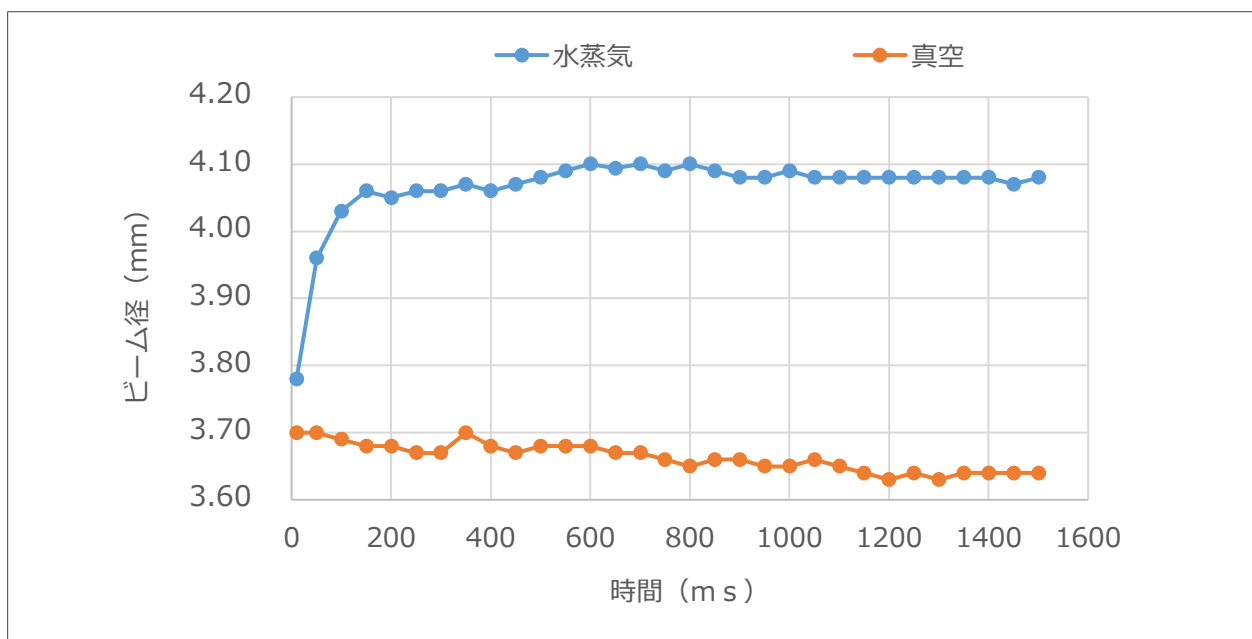


図1.2.2.3-1 相対湿度98%のビーム計測

表1.2.2.3-1 相対湿度98%の主要データとビーム径

チャンバーの温度	21.7°C	
相対湿度	0%(真空)	98%
絶対湿度	0 g/cm ³	18.9 g/cm ³
平均ビーム径	3.66 mm	4.06 mm

1.2.2.4 ビーム伝搬シミュレーション

ビーム伝搬解析には、真空のビーム伝搬及び水蒸気が含まれた時に発生したサーマルブルーミング定数を含めたビーム伝搬解析を行った。ガウシアンビームを表す式は、3次元波動方程式の1つの解として導き出される。その式を下記に記載する。

ガウシアンビームの点 (z, ρ) における振幅 $U(z, \rho)$ は式(1.2.2.4-1)で表される。

$$U(z, \rho) = A \frac{\omega_0}{\omega_z} \exp\{-j(kz - \varphi)\} \exp\left[-\left(\frac{\rho}{\omega_z}\right)^2\right] \exp\left(\frac{-jk\rho^2}{2R}\right) \quad \text{式(1.2.2.4-1)}$$

ビーム径 ω_z 、波面の曲率 R 、距離 Z に対して式(1.2.2.4-2)、式(1.2.2.4-3)で表される。

$$\omega_z^2 = \omega_0^2 \left\{ 1 + \left(\frac{M^2 \lambda z}{\pi n \omega_0^2} \right)^2 \right\} \quad \text{: ビーム径} \quad \text{式(1.2.2.4-2)}$$

$$R = \left\{ 1 + \left(\frac{\pi n \omega_0^2}{M^2 \lambda z} \right)^2 \right\} \quad \text{: 波面の曲率} \quad \text{式(1.2.2.4-3)}$$

サーマルブローミング効果を含んだビーム伝搬解析には、式(1.2.2.4-2)、式(1.2.2.4-3)に実験から得られたサーマルブローミング定数Sを含めた。

$$\omega_z^2 = S\omega_0^2 \left\{ 1 + \left(\frac{M^2 \lambda z}{\pi n \omega_0^2} \right)^2 \right\} \quad : \text{ビーム径} \quad \text{式(1.2.2.4-4)}$$

$$R = S \left\{ 1 + \left(\frac{\pi n \omega_0^2}{M^2 \lambda z} \right)^2 \right\} \quad : \text{波面の曲率} \quad \text{式(1.2.2.4-5)}$$

ここで λ : 波長 ω_0 : ビームウエストの半径 (中心強度のピーク値の $1/e^2$) k : 波数

ω_z : ビーム半径 z : 距離 A : 係数 ρ : 半径 (光軸からの距離)

j : 虚数単位 n : 空気の屈折 M^2 : レーザービームの品質を表す係数

1. 2. 2. 5 真空ビーム伝搬シミュレーション

ビーム伝搬解析に用いた式(1.2.2.4-2)に、真空のパラメータを代入し、シミュレーション値と実測値の検討を行った。表1.2.2.5-1に用いたパラメータの数値を示す。

表 1.2.2.5-1 真空ビーム伝搬に用いたパラメータ

M^2	λ	z	ω_0	n
1.1	1070nm	10m	1.3mm	1.00

図1.2.2.5-1に、真空シミュレーションと真空の実測値におけるビーム伝搬を示す。ビーム径は直径で表示した。チャンバー内を真空にした時のビーム伝搬の検証を行った結果、実測値では平行光に可能な限り近づけたことで、ビーム径の違いが生じた。これは、ビームの拡がり角の影響である。

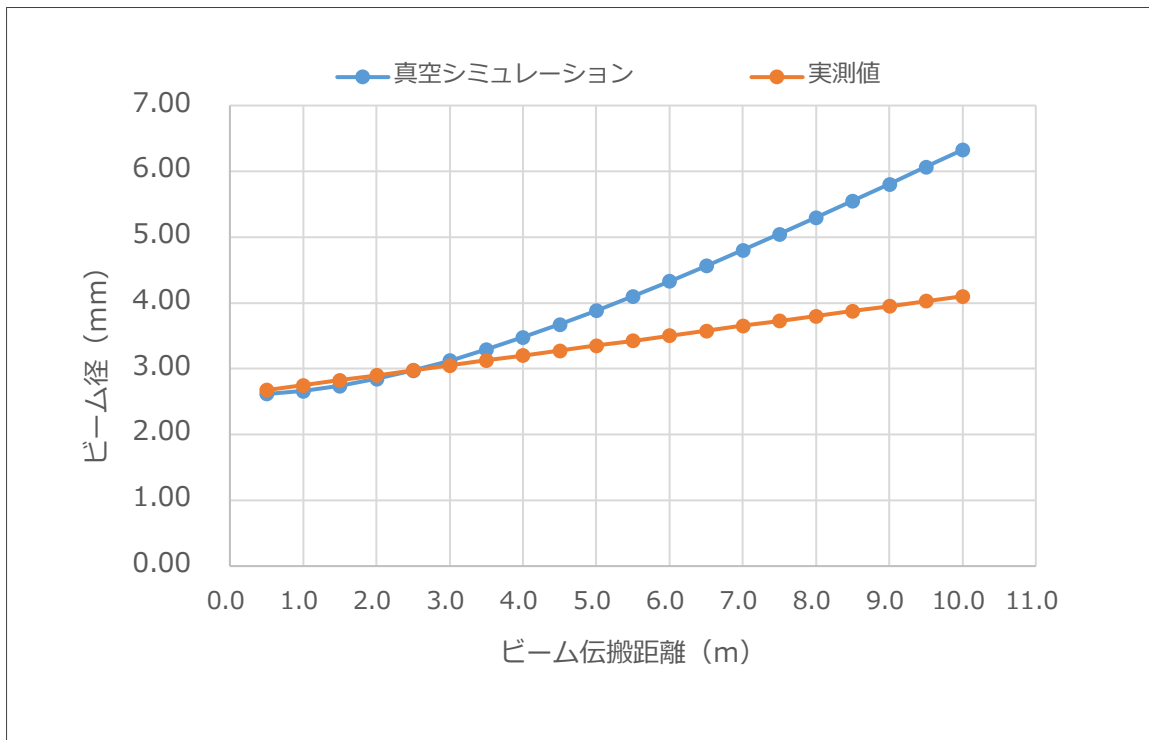


図 1.2.2.5-1 真空シミュレーションと実測値によるビーム伝搬の比較

1. 2. 2. 6 サーマルブルーミング定数の算出について

サーマルブルーミング定数は表1.2.2.3-1から真空のビーム径に対して、相対湿度の影響によりサーマルブルーミング効果によって拡大したビーム径から算出した。算出結果は表1.2.2.6-1に示す通り1.11となった。

$$S \text{ (サーマルブルーミング定数)} = \text{真空平均ビーム径} / \text{98\%RHの平均ビーム径}$$

表 1.2.2.6-1 サーマルブルーミング定数

湿度	サーマルブルーミング定数
98%	1.11

1. 2. 2. 7 サーマルブルーミング定数を含んだビーム伝搬シミュレーションの検討

ビーム伝搬解析に用いた式(1.2.2.4-4)に、98%RHのサーマルブルーミング定数を含めたパラメータを代入し、サーマルブルーミング伝搬と真空ビーム伝搬の比較を行った。表1.2.2.7-1に用いたパラメータの数値を示す。

表 1.2.2.7-1 サーマルブルーミング伝搬に用いたパラメータ

S	M^2	λ	z	ω_0	n
1.11	1.1	1070nm	10m	1.3mm	1.00

図1.2.2.7-1に、真空解とサーマルブルーミング伝搬を示す。ビーム径は直径で表示した。サーマルブルーミング伝搬のシミュレーションからRH98%のビーム径は7 mの位置で5.3mm程度になった。

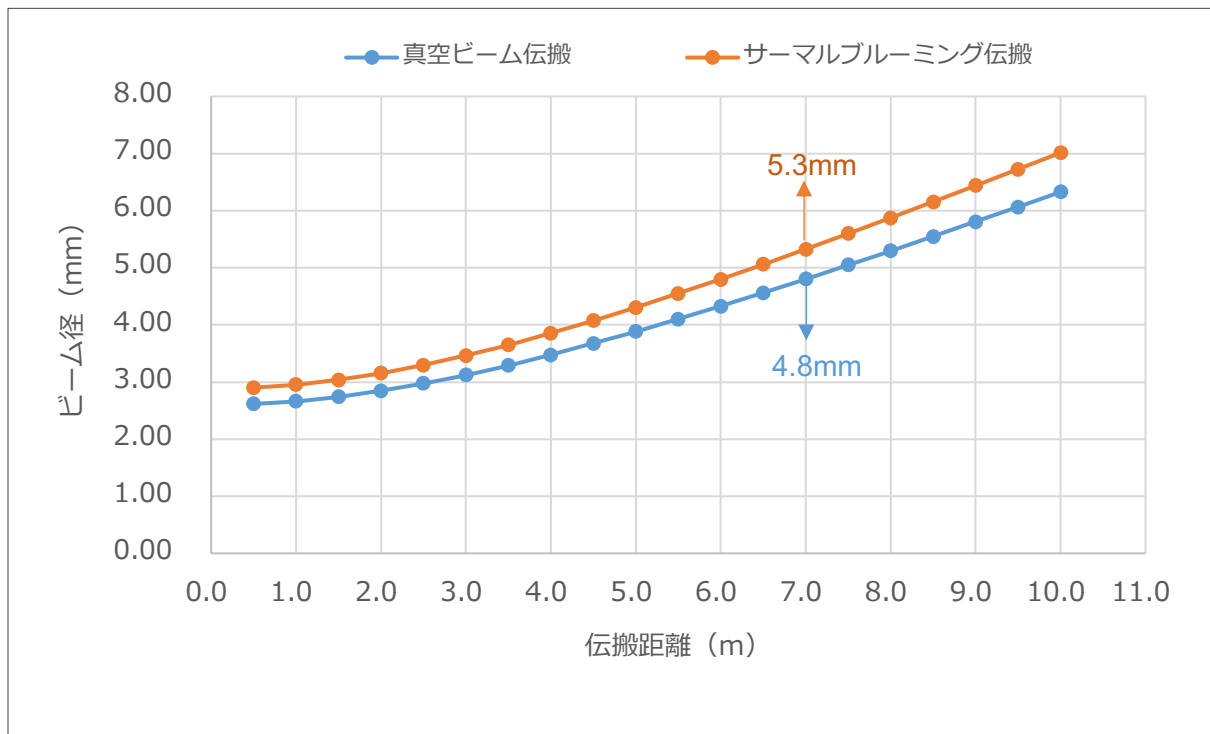


図 1.2.2.7-1 真空ビーム伝搬とサーマルブルーミング伝搬の比較

1. 2. 2. 8 ビーム伝搬シミュレーションと変形鏡変位量の予測手法の比較

図1.2.2.8-1の中に、赤丸印●、黒丸印●、緑丸印●を示した。

赤丸印●は、チャンバー内を真空状態に設定した時の実測値のビーム径、黒丸印●は、C言語版の補償光学コードで開発された可変形鏡変位量の予測手法から導かれたビーム径である。真空ビーム伝搬シミュレーションから伝搬距離7 m位置で比較すると、実測値の赤丸印●は、1.32倍ビーム径が小さい状態であった。よって、ファイバーレーザー用のコリメーターレンズのレンズ間の距離を再調整し、真空ビーム伝搬シミュレーションに合わす必要がある。98%RHのサーマルブルーミング伝搬から、7m位置でビーム径5.3mmに対して、変形鏡変位量の予測手法により導かれたビーム径は6.0mm (●) 程度になった。このビーム径の違いの検討を行った。98%RHではハイスピードカメラ (CMOS) から計測されたビーム径からサーマルブルーミング定数1.11を算出された。一方、緑丸印●は、レーザー専用のビームプロファイラー (CCD) から100%RHで計測されたビーム径からサーマルブルーミング定数1.3が算出された。これにより、レーザー専用のビームプロファイラーから算出されたサーマルブルーミング定数の方が、ビーム径が6.2mm程度になり、変形鏡変位量の予測手法から導かれたビーム径と整合した。

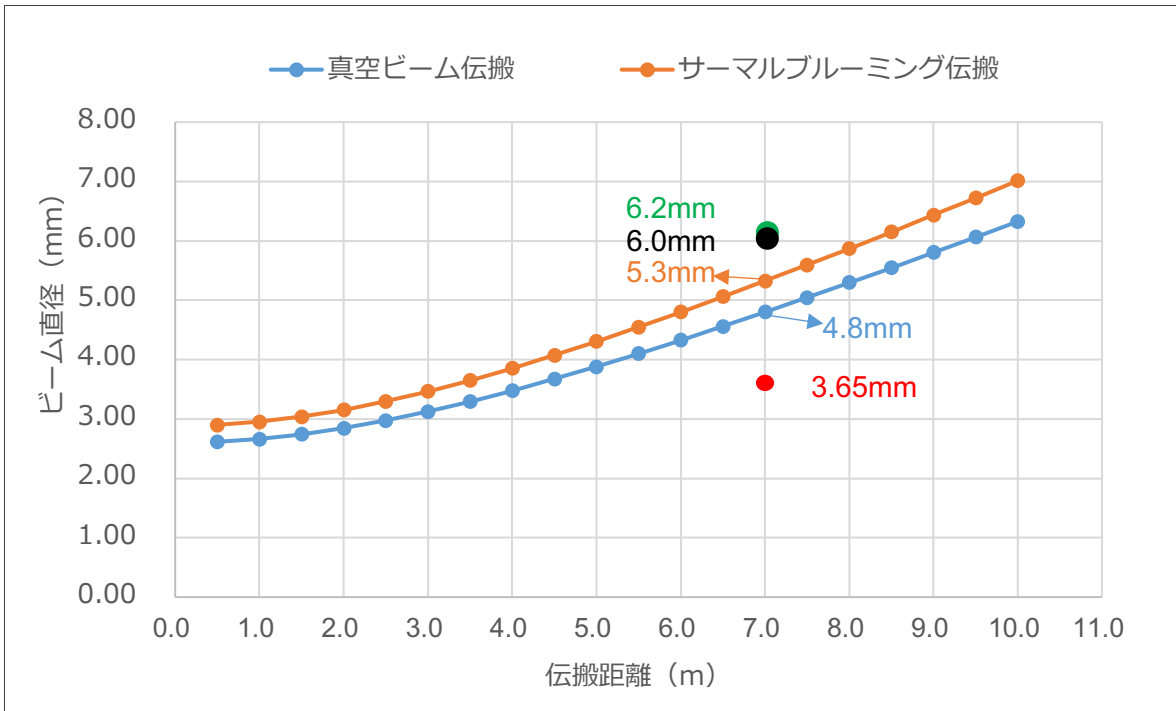


図1.2.2.8-1 ビーム伝搬シミュレーションと変形鏡変位量の予測手法の比較

2 高出力補償ビーム送信技術の研究

2. 1 高速・高耐光可変形鏡の開発

高出力レーザー送信時の大気擾乱などに起因する波面乱れを補正するため、tip、tilt成分（ゼルニケ多項式の2、3項）、defocusおよびastigmatism成分（ゼルニケ多項式の4～6項）、その他の高次項成分（ゼルニケ多項式の7～15項）の波面乱れをそれぞれ補正可能な3種の高速（最大動作速度10 kHz）・高耐光性（光耐性1 kW/cm²）の大型（口径100 mm）可変形鏡を開発することを目標に研究を行った。

2. 1. 1 可変形鏡部材の特性評価

可変形鏡（デフォーマブルミラー）とは、薄く柔軟性のあるミラー基板の背面に縦方向に伸縮する駆動素子を複数配置して接着し、電圧などの制御信号により鏡の表面形状の変形を可能とした反射鏡のことを指す。本研究では、kHz 領域の高速駆動と数 μm ～10 μm の変位量の両立が可能な駆動素子として圧電素子（ピエゾアクチュエータ）を選定し、これを用いたpush-pull型可変形鏡（図 2.1.1-1）の開発を行った。ミラー基板には、1 kW/cm² の光耐性を得るため高反射（HR）コートを実施した石英ガラスまたはサファイアガラスを選定した。

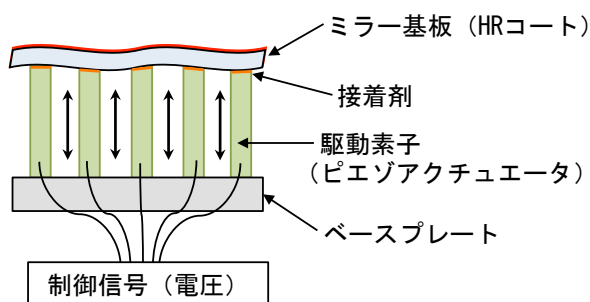


図 2.1.1-1 push-pull 型可変形鏡の基本構造と構成部材（断面図）

ミラー基板の特性について検討した。材質、直径、厚さおよびHRコーティング、研磨手法など条件を変化させた計15種の基板を準備し、レーザー干渉計（Zygo Verifire Dynaphase、アマテック社製）による計測を行い、それらの表面形状を基板表面の高さの最大値と最小値の差（Peak to Valley, PV値）、および面精度（最小二乗平均、RMS）で比較した。計測レーザーの波長は633 nmである。図2.1.1-2に、例として直径100 mm、厚さ1 mm、光学研磨および片面にHRコートを実施した石英製ミラー基板の写真を示しておく。表2.1.1-1に、15種のミラー基板の仕様と同様の計測により得られたPV値およびRMSを示す。材質は光学ミラーの素材として用いられるホウケイ酸クラウンガラス（BK-7）、合成石英およびサファイアガラスである。基板の直径は50 mm、100 mm、105 mm、厚さはピエゾアクチュエータ制御を行うことを考慮して、1 mm、2 mm、3 mmとした。材質が同じ場合で比較すると、基板の直径が小さく、厚さが大きくなるとPV、RMSとも値は小さくなり、表面形状は平面に近づく傾向にある。また材質間で比較すると、基板の直径、厚さが同一の場合、例えば直径50 mm、厚さ1 mmのPV、RMSはBK-7、合成石英に比べサファイアガラスが最も低く、最も平面に近い表面形状となっている。サファイアガラスは他の素材に比べてヤング率や剛性率、ヌープ硬度などが大きな「硬い」素材であり、研磨やHRコーティングによる変形が小さくなるためであると考えられる。HRコーティングの表面形状への影響については、片面、両面HRコーティングをそれぞれ行った合成石英基板（直径50 mm）で比較した。その結果両面コート時の方が片面コート時の変形を抑制でき、PV値、RMSはより小さくなった。研磨手法については、通常の研磨により製作した100 mm、厚さ1 mmの合成石英ミラー基板と比較して、基板を部分的に研磨する部分研磨手法を用いたミラー基板（表2.1.1-1中^{*1}で示したもの）は直径が105 mmと大きいにも関わらずPV値、RMSとも大幅に改善されており、部分研磨法がミラー基板の製作に有効であることがわかった。

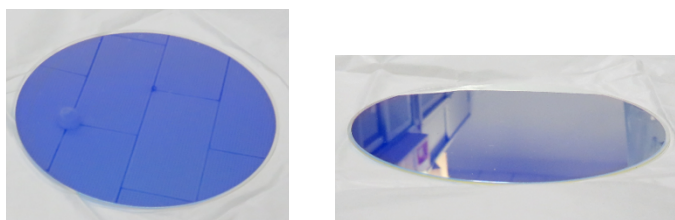


図2.1.1-2 直径100 mm、厚さ1 mmの石英製ミラー基板（片面HRコート）の写真

表 2.1.1-1 レーザー干渉計により計測したミラー基板の表面形状（PV 値、RMS）

材質	直径 (mm)	厚さ (mm)	HRコート	PV値 (μm)	RMS (μm)
ホウケイ酸クラウン ガラス(BK-7)	50	1	片面	6.55	1.93
BK-7	50	2	片面	1.80	0.51
BK-7	100	1	片面	31.9	8.79
BK-7	100	2	片面	11.83	3.25
合成石英	50	1	片面	16.31	4.47
合成石英	100	1	片面	23.71	12.36
合成石英	50	1	両面	4.04	0.98
合成石英	50	2	両面	1.56	0.38
合成石英 ^{*1}	105	1	片面	3.27	0.54
合成石英 ^{*1}	105	2	片面	0.72	0.13
サファイアガラス	50	1	片面	1.82	0.47
サファイアガラス	50	2	片面	0.48	0.11
サファイアガラス ^{*1}	105	1	片面	3.68	0.727
サファイアガラス ^{*1}	105	2	片面	0.68	0.12
サファイアガラス ^{*1}	105	3	片面	0.16	0.03

^{*1} 部分研磨手法を用いて製作したもの

選定部材の高速動作および光耐性について評価するため、アクチュエータとミラー基板の接着部に模擬高出力光源（LD）を照射した条件での高速動作試験を行った。高出力レーザーの反射時に最も懸念されるのは、接着剤またはアクチュエータの先端部が透過光を吸収し発熱することにより起こる接着性の低下であり、高速動作時には接着が剥がれることも考えられる。試験配置図を図 2.1.1-3 に示す。ミラー基板には直径 100 mm、厚さ 1 mm の合成石英基板（片面 HR コート）を用いた。HR コーティングの反射率は波長 969 nm で約 99.1 % である。アクチュエータには P.840.10（PI 社）を用いた。模擬光源には波長 969nm の LD（D4F4Q22-969. [0,6]-500C-IS45-VBG, DILAS 社）を用い、出力 100 W で反射面側から接着部に照射した。この時、高出力 CW レーザー（波長 1064 nm）のビーム径およびビームプロファイルなどを考慮して、照射部の強度を 1 kW/cm^2 に設定し、レンズを用いて LD の照射面積を直径 3 mm に調整した。アクチュエータを駆動して反射光の方向を変化させ、遠方にフォトダイオード（PD）を配置して電圧値の時間変化を計測した。周波数 10 kHz の正弦波動作時の計測結果を図 2.1.1-4 に示す。PD 電圧に周期振動が観測され（図 2.1.1-4(左)）、フーリエ解析後の周波数スペクトルには 10kHz に明確なピークが観測された（図 2.1.1-4(右)）。またこの照射条件でアクチュエータの動作を 3 分以上行ったが、計測データに大きな変化はなく、LD 照射後の接着部に剥離などの変化も見られなかった。これらの結果から、 1 kW/cm^2 の高強度レーザー照射下においても可変形鏡の高速動作は可能であることがわかった。

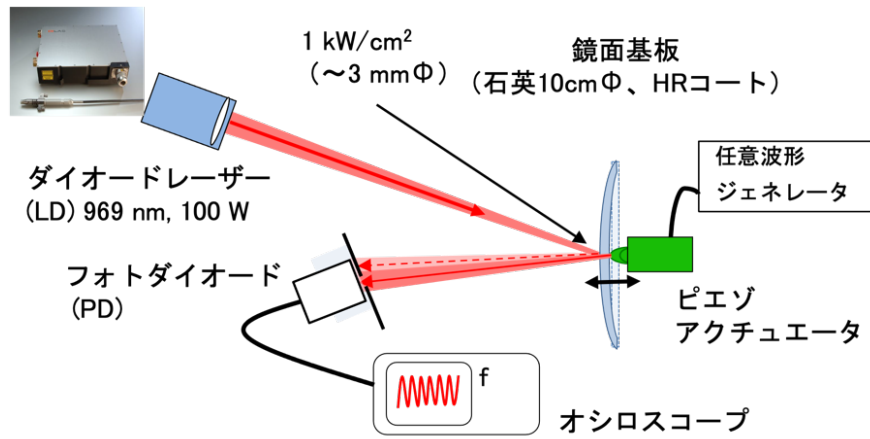


図2. 1. 1-3 可変形鏡部材の高速動作・光耐性試験配置

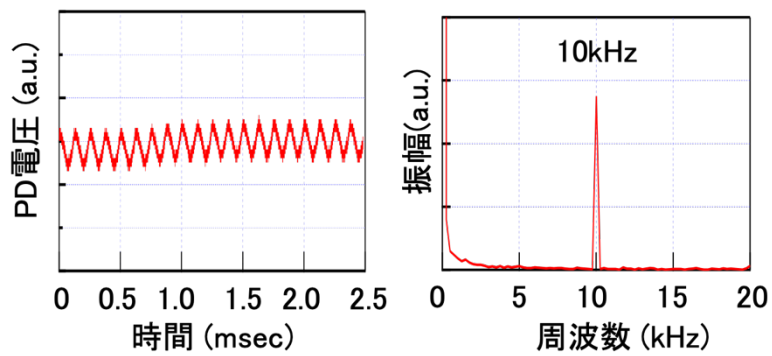


図 2. 1. 1-4 アクチュエータ高速動作時（正弦波 10 kHz）の（左）PD 電圧の時間変化、（右）フーリエ解析により得られた周波数スペクトル

2. 1. 2 可変形鏡の制御手法の検討

可変形鏡の精密制御を目的に、影響関数および隣接したアクチュエータ間のクロストークを考慮した手法についてシミュレーションにより検討した。図 2. 1. 2-1 にシミュレーションに用いた可変形鏡のモデルを示す。アクチュエータ 61 本を X-Y 平面上に六角形配置しており、口径 100 mm の可変形鏡（高次項補償鏡）の配置を模擬したものである。アクチュエータには中央かららせん状に番号(PA_i, i=0~60)を付した。PA_iの座標(x, y)はアクチュエータの間隔(d)を用いて決定される。可変形鏡を精密に制御するためには、それぞれのアクチュエータを単一で駆動させた際の鏡全体の表面形状に及ぼす影響を取得しておくことが重要となる。単一のアクチュエータを駆動させた際の鏡全体の形状を表す関数（影響関数）を実験により取得するには、他のアクチュエータに制御信号（電圧）が印加されていない状態で、対象となるアクチュエータに電圧を印可して Z 軸方向（法線方向）に最大変位させ、この時の鏡面の全体形状を干渉計などにより観測する。アクチュエータが 61 本である場合、61 の影響関数を取得する必要がある。可変形鏡のある X-Y 座標上の Z 方向の変位を Z_i(x, y)、影響関数を IF_i(x, y) で表すと、変位と印可電圧の関係は下式で表される。

$$Z_i(x, y) = V_i C_i IF_i(x, y)$$

ここで、C_i [μm/V] は PA_i の応答定数、V_i [V] は PA_i への印加電圧である。IF_i(x, y) は PA_i の規格化影響関数で、(x_i, y_i) 座標での各アクチュエータについて IF_i(x_i, y_i) = 1 となる。このことから、アクチュエータへの制御信号（印加電圧）V_i に対する変位量 Z_i(x, y) を実測することにより、C_i および IF_i(x, y) をともに決定できる。

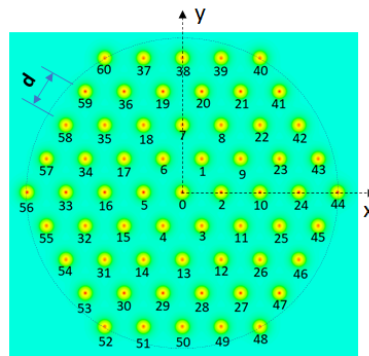


図 2. 1. 2-1 可変形鏡モデルのアクチュエータ配置図（正面図）

しかしながら実際の可変形鏡では、1 枚の鏡面に複数のアクチュエータを接着しているため、あるアクチュエータを単一で駆動させた際、周囲のアクチュエータが“駆動電圧を印加しなくても”Z 方向に変位を示す場合が多い。この効果をクロストークと呼び、可変形鏡の制御にはこの寄与を考慮する必要がある。図 2. 1. 2-2 に、クロストークが発生する場合の鏡面形状を模式化した図を示す。図 2. 1. 2-2 (a) はアクチュエータに電圧が印可されていない状態、図 2. 1. 2-2 (b) はアクチュエータを一つおきに同電圧で駆動した状態である。クロストークが発生する場合、電圧が印加されている i 番目の PA (x_i) の隣接する（左右の）PA (x_{i-1})、PA (x_{i+1}) が電圧を印可していないにもかかわらず周囲のアクチュエータに引っ張られる形で変位を持つようになる。この場合、隣接するアクチュエータからの寄与が 0 ではない (IF_{i-1}(x_i, y_i)、IF_{i+1}(x_i, y_i) が 0 ではない) ため、クロストークがない場合の電圧-変位の関係式を使用することはできない。クロストークの効果を取り入れるため、電圧-変位の関係を一連の線形方程式として解く必要がある。例として、可変形鏡モデルの中央のアクチュエータ (PA₀、図 2. 1. 2-1 参照) の動作について考える。クロストークが発生するのは隣接する周囲 6 個のアクチュエータ (PA₁、PA₂、PA₃、PA₄、PA₅、PA₆) とし、その外周のアクチュエータとはクロストークが発生しない、または無視できるほど小さいとする。この場合、PA₀ での鏡面の Z 軸方向の変位 z₀(x₀, y₀) は以下の線形方程

式で表される。

$$z_0(x_0, y_0) = C_0 V_0 + C_1 V_1 IF_1(x_0, y_0) + C_2 V_2 IF_2(x_0, y_0) + C_3 V_3 IF_3(x_0, y_0) + C_4 V_4 IF_4(x_0, y_0) + C_5 V_5 IF_5(x_0, y_0) + C_6 V_6 IF_6(x_0, y_0)$$

同様に、可変形鏡端部のアクチュエータ、例えば PA₅₄ では、z₅₄ (x₅₄, y₅₄) は周囲 4 つのアクチュエータとのクロストークを考慮すると下式で表される。

$$z_{54}(x_{54}, y_{54}) = C_{54} V_{54} + C_{31} V_{31} IF_{31}(x_{54}, y_{54}) + C_{32} V_{32} IF_{32}(x_{54}, y_{54}) + C_{53} V_{53} IF_{53}(x_{54}, y_{54}) + C_{55} V_{55} IF_{55}(x_{54}, y_{54})$$

この手法により 61 個全てのアクチュエータでの定式化が可能である。全てのアクチュエータの線形方程式系をまとめ行列形式で記述すると下式になる。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{M} \times \mathbf{V}$$

ここで Z は変位ベクトル、V は電圧ベクトルであり、アクチュエータが N 個ある場合は (N×1) 型行列となる。M は (N×N) 型の係数行列であり、各要素は PA の配置や応答定数 (C_i)、および影響関数 (IF_i) を用いて決定される。波面補償に必要な各アクチュエータへの印加電圧は、M の逆行列 M⁻¹ を用いて下式で表され、容易に算出できる。

$$\mathbf{V} = \mathbf{M}^{-1} \times \mathbf{Z}$$

クロストークを考慮した上記の制御モデルを用い、61 本支持可変形鏡の動作シミュレーションを行った。まず制御信号の計算に必要な係数行列 (M) を決定するため、影響関数を円対称ガウス分布で近似した (下式)。

$$IF_i(x, y) = \exp \left[\ln(\varepsilon) * \left(\frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{d} \right)^\sigma \right]$$

ここで (x_i, y_i) は i 番目のアクチュエータの位置座標、ε は隣接するアクチュエータ間の影響 (カップリング) 比で、0 < ε < 1 内で設定する。d は PA 間の距離、σ (> 0) はガウス指数で、鏡面の形状、厚み、硬度や PA 間の距離などにより変化する。図 2.1.2-3 に、例として x=0 の位置に配置されているアクチュエータのみを駆動した際の影響関数の計算例 (X-Z プロファイル (y=0)) を示す。使用したパラメータは図中に示した。クロストークに影響する因子は主に ε で、ε が大きくなる (ε = 0.1 (10 %)) と鏡面は隣接したアクチュエータ (x=±1 cm) 位置に Z 方向の変位を持ち、クロストークが発生する (図中青線)。一方 ε が小さい (ε = 0.001) 場合には隣接したアクチュエータの位置では変位を示さず、クロストークはほぼ発生しない (図中赤線)。アクチュエータの応答定数 (C) は、ピエゾ素子の変位-印可電圧の関係を線形近似することで決定した。

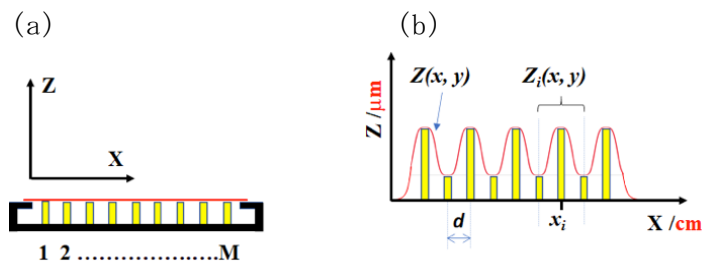


図 2.1.2-2 (a) アクチュエータ駆動前、(b) クロストークが発生する場合にアクチュエータを一つおきに同電圧で駆動した状態での可変形鏡の表面形状 (断面図) の模式図

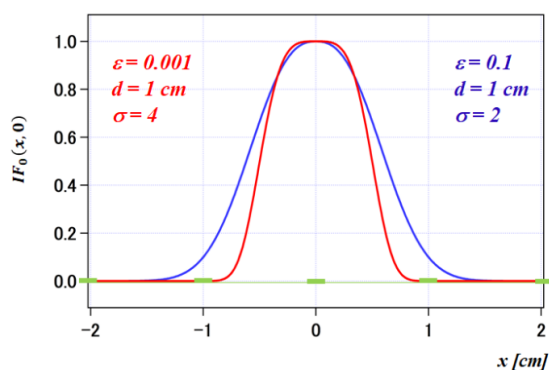


図 2.1.2-3 影響関数の計算例(赤線：クロストークが発生しない場合、青線：クロストークが発生する場合)

上記の可変形鏡制御手法と定義した影響関数を用い、以下の方法で波面補償シミュレーションを行った。まず波面センサーの観測結果の逆位相から得られる補償すべき波面を模擬的に計算し、各アクチュエータ位置での変位を求めた。波面はゼルニケ多項式の 1～15 項を用いて算出した。次に、各アクチュエータの Z 変位が計算した波面と同値となるように印可電圧を設定して鏡の表面形状を計算し、両計算結果を比較した。シミュレーションにはクロストークが発生しない場合 ($\epsilon = 0.001$) とクロストークが発生する場合 ($\epsilon = 0.1$) の影響関数 (図 2.1.2-3 参照) を用い、それぞれの場合について検討した。アクチュエータの間隔(d)は 1 cm、波面の口径は 80 mm に設定した。

クロストークが発生しない場合の計算結果を比較した図を図 2.1.2-4 に示す。波面計算に用いたゼルニケ多項式を下式に示す。Z₁～Z₁₅ は多項式の最初の 1～15 項を示し、それぞれの係数はランダムに設定した。

$$Z(x, y) = 0 \times Z_1 + 0.09 \times Z_2 - 0.08 \times Z_3 - 0.021 \times Z_4 - 0.536 \times Z_5 + 1.149 \times Z_6 - 0.075 \times Z_7 + 0.745 \times Z_8 - 0.275 \times Z_9 + 0.19 \times Z_{10} - 0.035 \times Z_{11} + 0.16 \times Z_{12} + 0.21 \times Z_{13} - 0.065 \times Z_{14} - 0.1 \times Z_{15}$$

図 2.1.2-4 (a) は波面の計算結果、(b) は鏡の表面形状の計算結果、(c) は比較のためそれぞれの X-Z プロファイル ($Z(x, 0)$) を重ねて示したものである。波面と比較して鏡の表面形状に凹凸があり Z 変位は最大 200 nm 程度の差が見られるものの両結果は良く一致しており、クロストークのない場合の制御法が有効であると考えられる。

クロストークが発生する場合について同様に検討した。波面計算に用いたゼルニケ多項式を下式に示す。

$$Z(x, y) = 0 \times Z_1 + 0.35 \times Z_2 - 0.35 \times Z_3 - 0.3 \times Z_4 - 0.5 \times Z_5 + 0.2 \times Z_6 - 0.5 \times Z_7 + 0.2 \times Z_8 - 0.24 \times Z_9 + 0.22 \times Z_{10} - 0.3 \times Z_{11} + 0.4 \times Z_{12} + 0.5 \times Z_{13} - 0.34 \times Z_{14} - 0.15 \times Z_{15}$$

計算結果を比較した結果を図 2.1.2-5 に示す。図 2.1.2-5 (a) は波面の計算結果、(b) は鏡の表面形状の計算結果および波面と表面形状の X-Z プロファイル ($Z(x, 0)$) を重ねて示した図である。鏡の表面形状は周辺部において波面との差が見られるものの、中央部においては非常に良い一致を示しており、高い再現性が見られた。図 2.1.2-5 (c) は、比較のために行った、クロストークが発生する場合の影響関数を用い、クロストークが発生しない場合の制御法により表面形状を計算した結果および波面と X-Z プロファイル ($Z(x, 0)$) を重ねて示した図である。表面形状の Z 変位は波面のそれよりも最大で約 2 μm 大きく、波面が再現されていない。これは、アクチュエータのそれぞれの位置で周囲のアクチュエータとのクロストークにより起こる付加的な変位を考慮していないために起こる現象である。これらの結果から、クロストークが発生する場合にも、これらを考慮した上記の制御手法を用いることで可変形鏡による正確な波面の補正が可能になった。

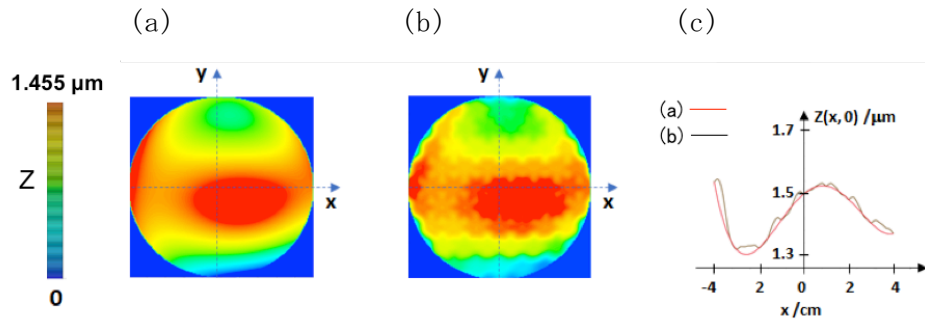


図 2.1.2-4 (a)補正波面の計算値、(b)アクチュエータ間のクロストークが発生しない場合の鏡の表面形状の計算値 (c) それぞれの X-Z プロファイル ($Z(x, 0)$)

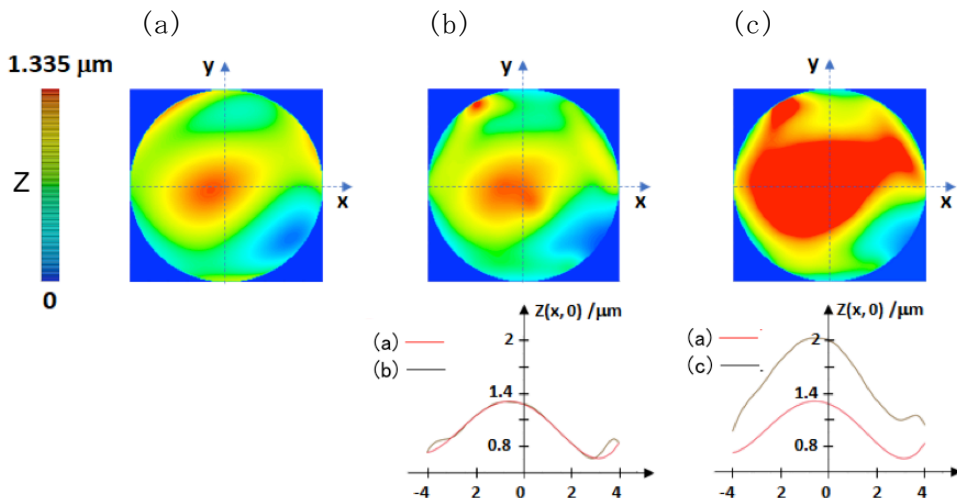


図 2.1.2-5 (a)補正波面の計算値、(b)アクチュエータ間のクロストークが 10 %発生する場合の制御法により計算した鏡の表面形状と X-Z プロファイル ($Z(x, 0)$)、(c)アクチュエータ間のクロストークが 10 %発生する場合の影響関数と、クロストークが発生しない場合の制御法により計算した鏡の表面形状と X-Z プロファイル ($Z(x, 0)$)

2. 1. 3 小型 (口径 50 mm) 可変形鏡の開発

可変形鏡の動作特性の評価、および高速波面センサーとの組み合わせ試験に供することを目的に、口径 50 mm の 3 種 (Tip-Tilt 補正鏡、Defocus 補正鏡、高次項補正鏡) の可変形鏡を試作し、単体動作試験を行った。

[1] Tip-Tilt 補正鏡

レーザーの出射方向 (tip-tilt 成分) を補正する tip-tilt 補正鏡を試作した。図 2.1.3-1(a) に piezo アクチュエータの配置図を示す。直径 50 mm の SUS304 製ベースプレートから 15 mm の位置に 3 本の piezo アクチュエータ (P840.10-B1、PI 社) を均等に配置した (3 本支持、図中黒点)。2.1.3-1(b) に試作品のミラー部、(c) に外観の写真を示す。ミラー基板には、直径 2 inch、厚さ 2 mm のサファイアガラス基板 (片面 HR コート) を使用し、接着剤により piezo アクチュエータと接着した。

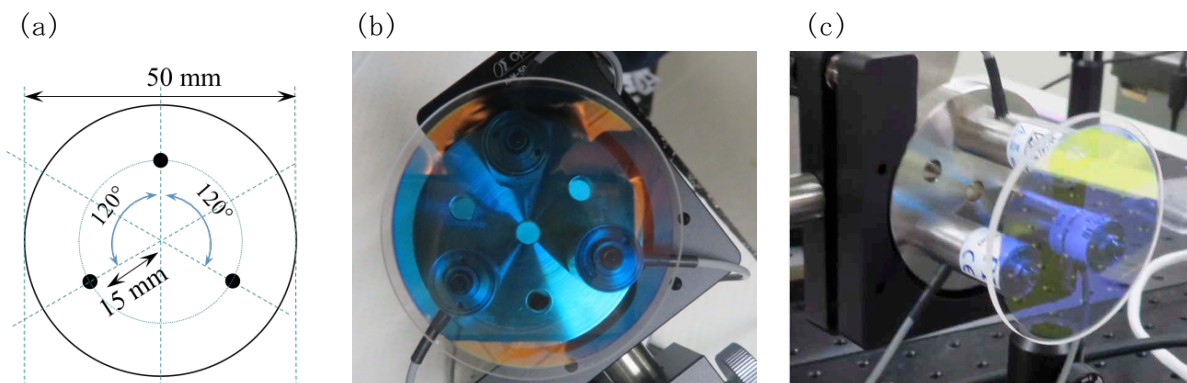


図 2.1.3-1 Tip-Tilt 補正鏡試作品の(a)アクチュエータ配置図（黒点、3点支持）、
(b)ミラー部の写真、(c)外観

Tip-Tilt 補正鏡の単体動作試験を以下の手法により行った。波面センサーからの情報を模擬するため、まず計算によりある波面を作成し、それぞれのアクチュエータ位置における Z 軸変位を読み取る。上記の手法により取得した応答定数および影響関数から変位を電圧値に変換する。いくつかの波面についてこの作業を行い、それぞれの電圧値を設定したのち、電圧波形を作成して連続的に動作させた。これにより可変形鏡の表面形状を連続的に変化させた上でそれぞれの表面形状を干渉計により観測し、動作精度や波面情報に対する形状の再現性などについて評価した。

図 2.1.3-2 に試験の配置図を示す。各アクチュエータの電圧波形の作成および出力には任意波形/ファンクションジェネレータ (WW5064、 Tarbor Electronics 社) を使用し、動作後の可変形鏡の表面形状をフィゾー型干渉計 (Zygo Verifire 4 inch、AMETEK 社) により観測した。アクチュエータにはあらかじめオフセット電圧 (40 V) を印可しており、初期状態からマイナス方向への移動も可能である。図 2.1.3-3 に、可変形鏡の初期状態、および印可電圧を最大で $\pm 20\text{V}$ 変化させ、角度を上下、右左、右上 45° 、右下 45° 、左上 45° 、左下 45° の 8 方向に変化させた際の表面形状を示す。可変形鏡の角度がそれぞれの方向に動いていることがわかる。可変形鏡はそれぞれの方向に同じ角度で動作するように設定した。各方向への動作精度について検討するため、それぞれの状態での表面形状の移動角度を算出して比較した。図 2.1.3-4 に結果を示す。8 方向に対してそれぞれ 1~8 の番号を付した (図 2.1.3-3 を参照)。角度の平均値は 0.14 mrad 、誤差は約 15% 以内に抑えられており、可変形鏡の制御が可能であることがわかった。次に、印可電圧に対する移動角度の変化について検討した。この試験ではまずアクチュエータの電圧を 0 V に設定し、印可電圧を変化させて Tip 角度 (方向は図 2.1.3-3 中の 2, 3 番) を検出した。図 2.1.3-5 に結果を示す。印可電圧が 20 V 以上の領域で Tip 角度が線形応答を示している。この結果から、可変形鏡のオフセット電圧を 40 V に設定した場合、可変形鏡は印可電圧約 $\pm 20\text{ V}$ 、角度では $0\sim 0.14\text{ mrad}$ の範囲で正確な動作が可能と評価できる。

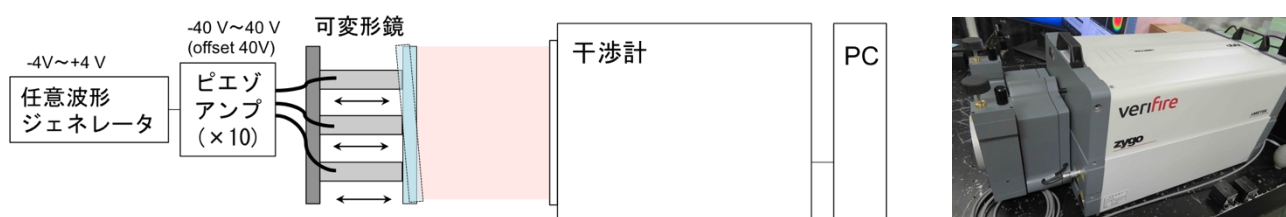


図 2.1.3-2 可変形鏡単体動作試験配置図 (右図は干渉計の写真)

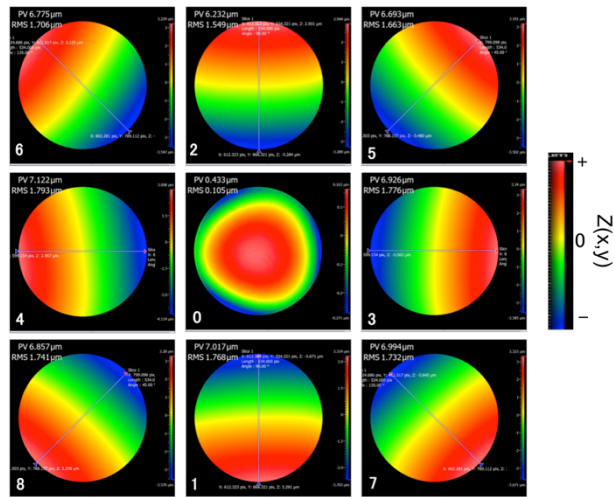


図 2.1.3-3 Tip-Tilt 補正鏡を初期状態(中央図)から 8 方向 (上下、右左、右上 45°、右下 45°、左上 45°、左下 45°) に移動させた際の表面形状 (移動方向にそれぞれ番号 1~8 を付した)

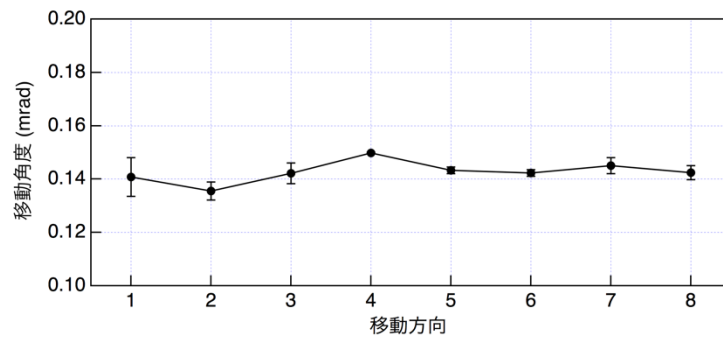


図 2.1.3-4 Tip-Tilt 補正鏡を初期状態(中央図)から 8 方向 (上下、右左、右上 45°、右下 45°、左上 45°、左下 45°) に移動させた際の角度 (横軸の 1~8 は移動方向に番号を付したもの (図 2.1.3-3 参照))

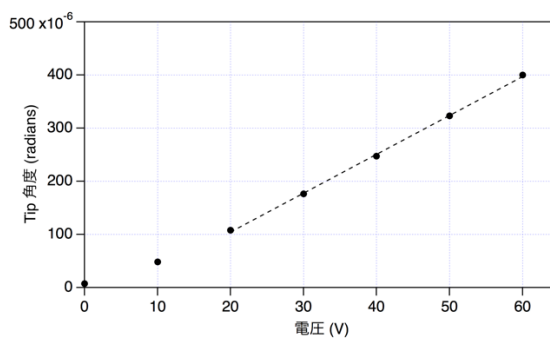


図 2.1.3-5 印可電圧に対する小型可変形鏡の Tip 角度の変化 (点線は線形近似直線を示す)

[2] Defocus 補正鏡

レーザーの焦点距離 (defocus 成分) を補正する Defocus 補正鏡を試作した。図 2.1.3-6 (a) に Defocus 補正鏡の設計図を示す。ミラー基板の中心部をアクチュエータ 1 本で支持した。アクチュエータをボックス内に固定し、ミラーの表面形状を考慮して高さを調整した後、ミラー基板を接着し金属のカバーで基板の周囲約 2.5 mm を圧迫して固定する構造である。図 2.1.3-6 (b)、(c) にそれぞれミラー部、外観の写真を示す。ミラー基板には鏡面が変形しやすい直径 2 inch、厚さ 1 mm のサファイアガラス基板 (片面 HR コート) を使用した。

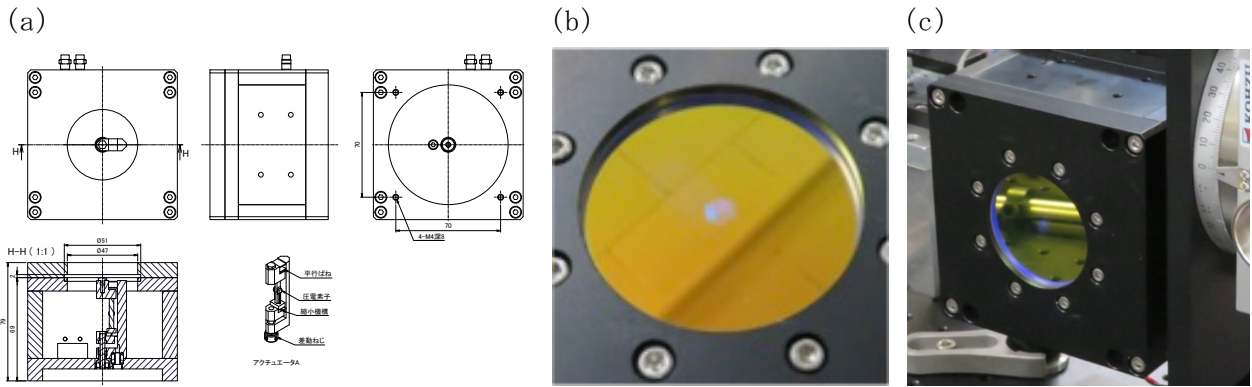


図 2.1.3-6 Defocus 補正鏡（アクチュエータ 1 本支持）の (a) 設計図、(b) ミラー部の写真、(c) 外観

Defocus 補正鏡の単体動作試験を行った。0~150V(最大印加電圧)の範囲でアクチュエータへの印加電圧を変化させ、干渉計によりそれぞれの表面形状を観測した。図 2.1.3-7 に、0 V、150 V 印加時の表面形状をそれぞれ示す。印加電圧のない状態においても表面形状は凸上になっているが、これは基板自体の表面形状が凸状であり、アクチュエータの高さ調整によっても基板の平面化が困難であるためである。この時 PV 値は $3.5 \mu\text{m}$ であった。150 V 印可時の表面形状は凸型形状がより強くなっており (図 2.1.3-7(b))、大きな形状の崩れは見られなかった。PV 値は $5.6 \mu\text{m}$ まで増加し、アクチュエータの駆動により $2.0 \mu\text{m}$ 以上の PV 値の差が見られた (図 2.1.3-7(c))。表面形状を解析して得られた defocus 成分から、鏡面をレンズとして考えた場合の焦点距離を算出すると -28 m から -45 m まで変化したことから、この範囲内の defocus 補正鏡の制御は可能であることを示している。しかしながらこの可変形鏡では逆位相 (focus 成分) の補正は困難であり、この課題を解決するにはミラー基板の中央部だけでなく端部にもアクチュエータを配置し基板の動作性を向上させることが必要であることがわかった。

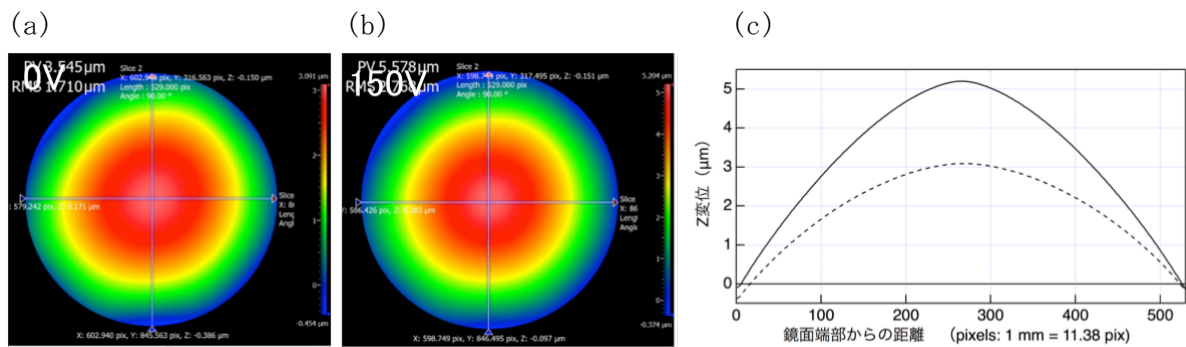


図 2.1.3-7 1 本支持可変形鏡の (a) 0V、(b) 150V 印可時の表面形状と (c) 0 V 印可時 (点線)、150 V 印可時 (実線) の X-Z プロファイルの比較

[3] 高次項補正鏡

高次項成分 (ゼルニケ多項式の 7~15 項) の波面乱れを補正する高次項補正鏡を製作した。図 2.1.3-8 (a) に設計図を示す。ミラー基板の中心と、中心から 12 mm の距離に 6 本のアクチュエータを六角形に配置した。ミラー基板の周囲は固定せず、基板の端部 (中心から 24 mm) に 30° 間隔で 12 本のアクチュエータを配置し、計 19 本でミラー基板を支持した。これにより鏡の周辺部の表面形状を変形させることのできるため、高次成分を補正しやすくなる。図 2.1.3-8 (b)、(c) にそれぞれミラー部、外観の写真を示す。ミラー基板には口径 2 inch、厚さ 1 mm の合成石英基板 (両面 HR コート) を使用した。合成石英はサファイアガラスよりもヤング率が低く、アクチュエータの駆動による変形を受けやすいため、複雑な表面形状を形成する必要がある

高次項補正鏡では、合成石英基板の方が適していると考えられる。また両面を HR コートすることにより HR コート時に起こる基板の歪みを抑制できた。両面 HR コート基板の PV 値および RMS 値は片面コート約の約 1/4.5 まで低下した（表 2.1.1-1 を参照）。

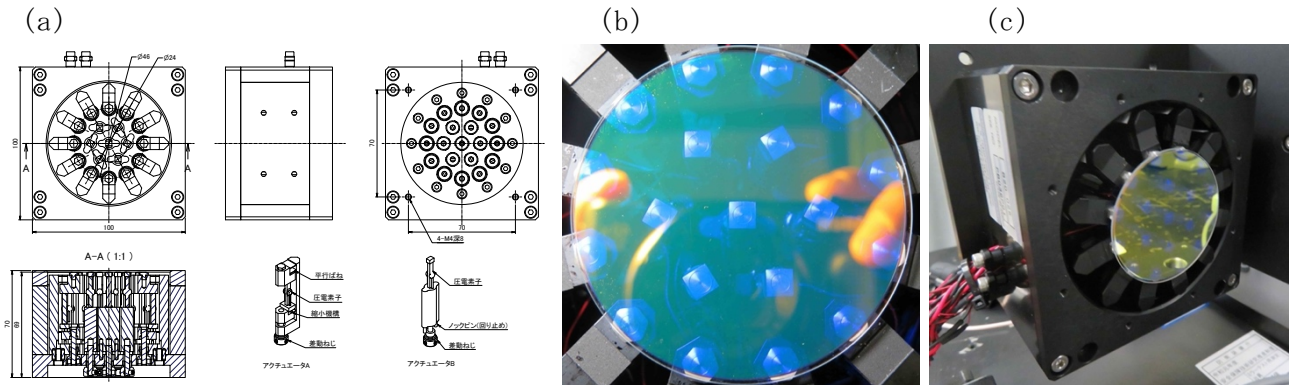


図 2.1.3-8 高次項補正鏡（アクチュエータ 19 本支持）の (a) 設計図、(b) ミラー部の写真、(c) 外観

同様の手法で高次項補正鏡の単体動作試験を行った。動作試験の準備段階として、干渉計により各アクチュエータの応答定数 (C) および影響関数 (クロストークの大きさ) を実験的に求めた。全てのピエゾアクチュエータに 75 V の電圧を印可した状態を初期状態とし、それぞれのアクチュエータを $\pm 75V$ (アクチュエータの最大印可電圧は 150V) の範囲で変化させ、それぞれ鏡面形状を観測した。観測データから駆動したアクチュエータ位置の Z 変位を検出して印可電圧に対してプロットし、線形近似して応答定数を決定した。クロストークの大きさについても同様に、各観測データから駆動したアクチュエータの周囲 6 個 (端部のアクチュエータは周囲 3 個) のアクチュエータ位置の Z 変位をそれぞれ検出して印可電圧に対してプロットし、線形近似して定数化した。例として図 2.1.3-9 に高次項補正鏡のアクチュエータ配置および計測結果の一部を示しておく。観測結果の分析から、隣接するアクチュエータ間ではクロストークが発生するが、そのさらに外側のアクチュエータとの間 (例えば図中 PA1 と PA12 の間) ではクロストークは発生しないことがわかった。

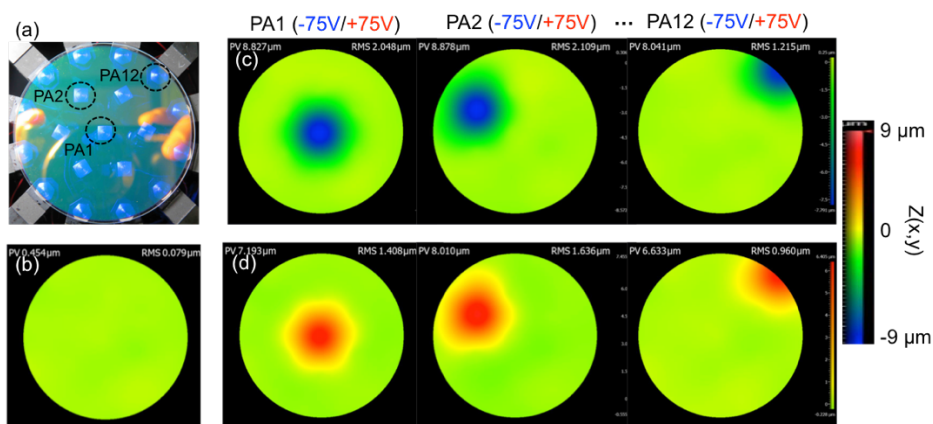


図 2.1.3-9 高次項補正鏡の干渉計による応答定数、クロストーク計測時の表面形状 (a) アクチュエータの配置 (観測結果を示したアクチュエータに番号を付した)、(b) 初期状態の表面形状 (75V 印可状態)、各アクチュエータの印可電圧を初期状態から (c) -75V、(d) 75V 変化させた時の表面形状

19 本のアクチュエータへの印加電圧の制御を行うため、cRIO システム (cRIO-9036、NI) に、16ch 制御の A/D 変換電圧出力モジュール (NI 9264 (クロック周波数最大 25kS/s/ch)、National Instruments) を 2 台搭載して電圧の制御を行った。電圧波形の作成には、Labview (National Instruments) により作成したソフトウェアを使用した。実験で取得したクロストークの大きさを表す係数行列を読み込ませた上で波面の各アクチュエータ位置の変位の時間変化を入力して電圧波形 (デジタルデータ) に変換し、cRio システムに波形を入力して、アナログ電圧に変換して出力する。

高次項補正鏡では、ゼルニケ多項式の 15 項までの補償を行うことを目的としていることから、可変形鏡がそれぞれの項の波面の再現が可能かどうかを検証した。波面センサーから得られる波面はこれらゼルニケ項の線型結合で表されるため、それぞれの項の波面を再現できればその組み合わせである波面も再現可能である。可変形の制御を行う前に、アクチュエータの高さ調整および印加電圧の微調整により鏡面の平面度を調整した。図 2.1.3-10 (左) に、接着前のミラー基板 (石英、厚さ 1 mm) の表面形状と、接着後に平面度を調整した鏡の表面形状を示す。基板の PV 値が約 $2 \mu\text{m}$ であるのに対し、調整後には PV 値 $0.4 \mu\text{m}$ 、RMS $0.075 \mu\text{m}$ まで平面度が高くなった。この状態を初期状態とし、可変形鏡を制御してゼルニケ多項式の各項を作成した。

それぞれの項の表面形状の Z 変位の最大値は $4 \mu\text{m}$ に設定した。図 2.1.3-11 に、試験結果を示す。各項の計算波面を上段に、鏡の表面形状の観測結果を下段に示す。なおゼルニケ多項式の各項の番号および名称 (略称) は ANSI Z80.28/ISO 24157 規格に従う。結果を比較すると、Tip 成分 (Tip (C_2)) からテトラフォイル成分 (TetY (C_{11})) までの表面形状は計算した波面を再現できることがわかった。一方、2 次のアスティグマティズム成分 (SAstY (C_{12})) 以降は形状の違いが大きくなった。ゼルニケ多項式は高次になるにつれて波面の周辺部に細かな変位の変化が必要なため、12 項以降の高次項の波面補償には鏡の周辺部のアクチュエータの間隔をさらに小さくする必要がある。ミラー基板に関しては、defocus 鏡および高次項補正鏡の動作試験結果から、表面形状の複雑な制御にはヤング率の低い (柔らかい) 石英基板が適しているものと考えられる。

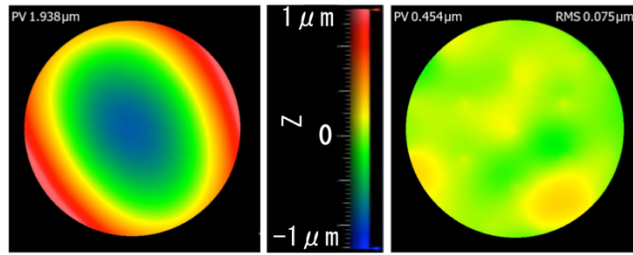


図 2.1.3-10 (左) 接着前のミラー基板、(右) 接着後高さを調整した基板の表面形状

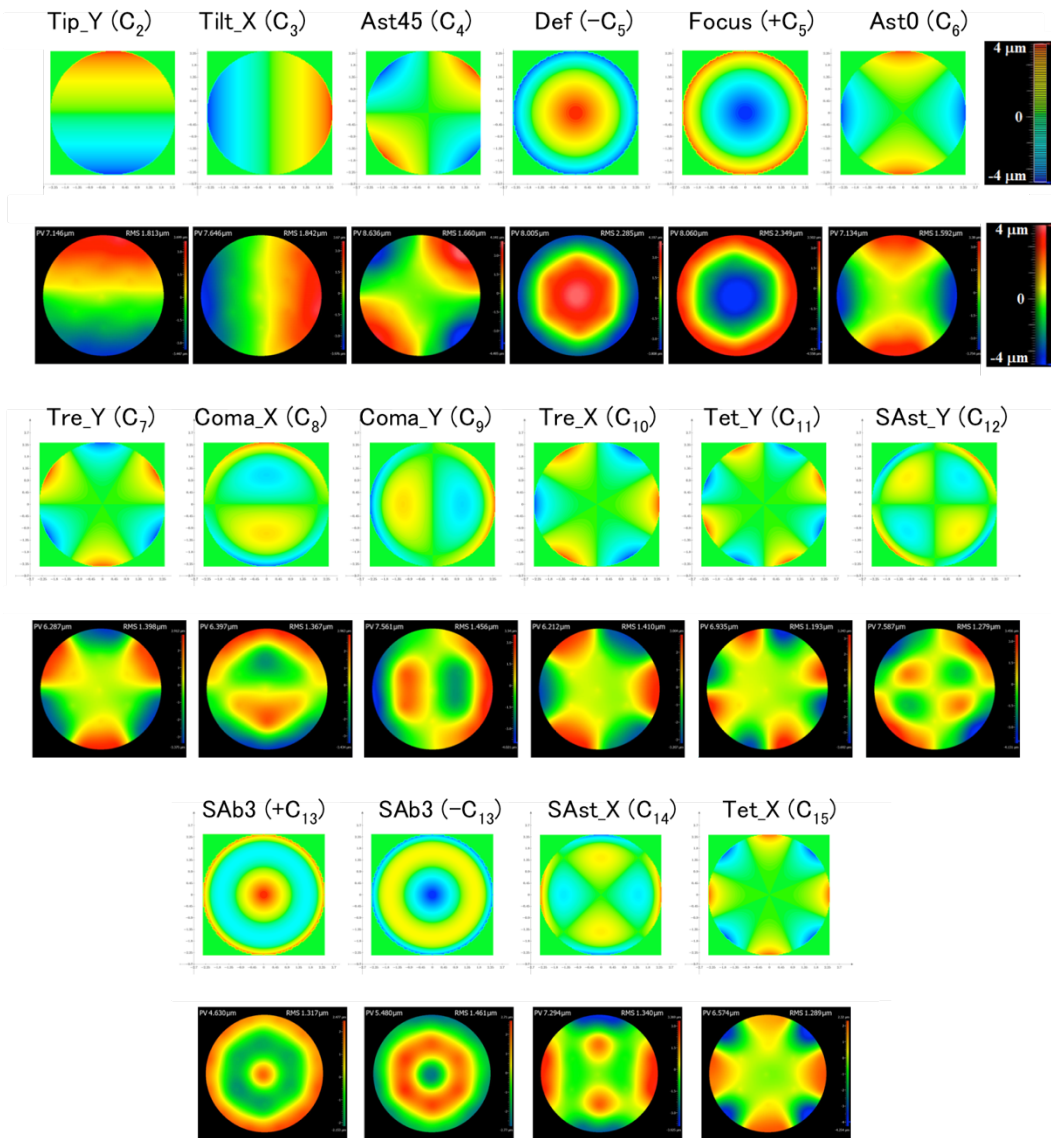


図 2.1.3-11 ゼルニケ多項式の 1~15 項の計算波面 (上段) と、高次項補正鏡により作成した鏡の表面形状 (下段) の比較

2. 1. 4 大型（口径 100 mm）可変形鏡の開発

野外での組み合わせ試験に供することを目的に、小型可変形鏡の試作および動作試験から得られた知見をもとに、3種の大型（口径 100 mm）可変形鏡（Tip-Tilt 補正鏡、Defocus 補正鏡、高次項補正鏡）を開発し、動作試験を行った。

[1] Tip-Tilt 補正鏡

図 2.1.4-1(a)にピエゾアクチュエータの配置図を示す。構造シミュレーションの結果、動作時の過渡振動や基板の歪みの影響が最も小さいと予測された、鏡面の中心から 30 mm の位置に 3本のアクチュエータを均等に配置した（3本支持、図中赤点）。2.1.4-2(b)にミラー部、(c)に外観を示す。ベースプレートには、鏡面を透過するレーザー光の吸収による温度上昇を考慮し、熱膨張率が SUS ($17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) に比べて約 10% ($\leq 2.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) の低熱膨張合金インバー（36Ni-Fe）を使用した。ミラー基板には機械剛性が高く動作時の基板振動変位が小さい 105 mm ϕ 、厚さ 2 mm のサファイアガラス基板（片面 HR コート（反射率 99.8 % @1064 nm）、日本真空光学社、表 2.1.1-2 を参照）を使用し、接着剤によりアクチュエータと接着した。

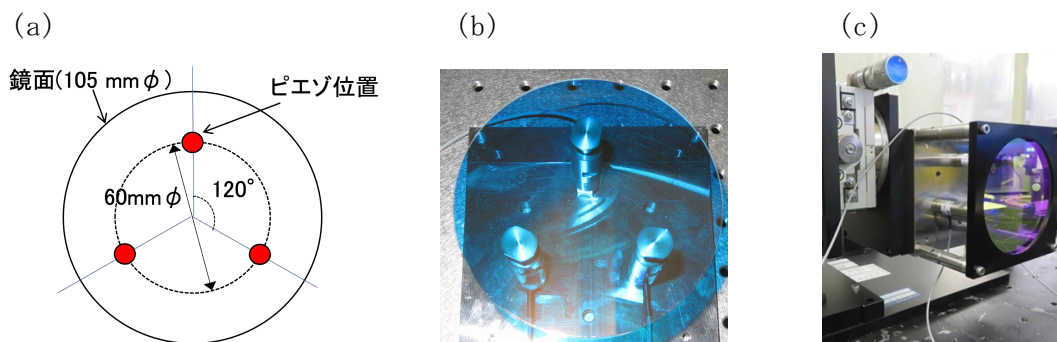


図 2.1.4-1 Tip-Tilt 補正鏡の(a)アクチュエータ配置図（赤点、3本支持）、(b)ミラー部の写真、(c)外観

フィゾー型干渉計による Tip-Tilt 補正鏡の動作試験を行った（実験配置は図 2.1.3-2 を参照）図 2.1.4-2 に、(a)可変形鏡の初期状態、角度を(b)上、(c)下、(d)左、(e)右、(f)左上 45°、(g)左下 45°、(h)右上 45°、(j)右下 45° の 8 方向に 0.2 mrad ずつ傾かせた際の表面形状を示す。8 方向に鏡面が傾いていることが確認できた。観測の PV 値からそれぞれの角度を求めると、平均値は 0.17 mrad（設定値の 85 %）、誤差は $\pm 5\%$ であった。動作角度の誤差 $\pm 5\%$ を考慮すると、Tip-Tilt 補正鏡は $\pm 8.5 \mu\text{rad}$ の精度での角度制御が可能であると考えられる。

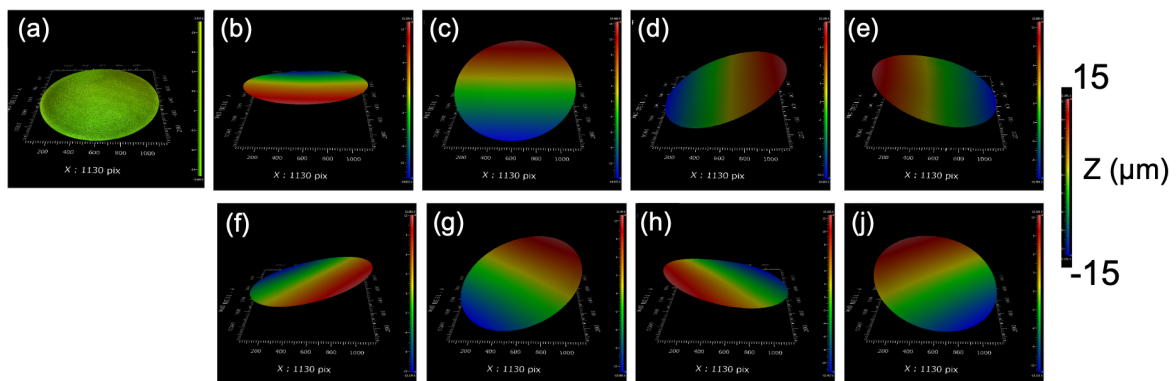


図 2.1.4-2 Tip-Tilt 補正鏡を(a)初期状態から 8 方向 ((b)上、(c)下、(d)左、(e)右、(f)左上 45°、(g)左下 45°、(h)右上 45°、(j)右下 45°) に 0.2 mrad 傾かせた際の鏡面形状

[2] Defocus 補正鏡

図 2.1.4-3 (a) に Piezoアクチュエータの配置図を示す (図中赤点)。小型の可変形鏡試作品は金属カバーで基板の周囲約 2.5 mm を圧迫して基板を固定する形であったが、この手法では圧迫により基板に歪みが生じ、鏡面の平面精度が低下することがわかった。この対策として基板の最外周には 16 本の PA を配置し、オフセット電圧によりアクチュエータの変位を変え基板の平面精度を調整できるようにした。また、デフォーカス成分形成の精度を向上させるため、内周部には 8 本のアクチュエータを配置し、中心部と合わせ計 25 本で鏡面を支持した。図 2.1.4-3

(b)、(c) にそれぞれミラー部、外観の写真を示す。ミラー基板には、105 mm φ、厚さ 1 mm のサファイアガラス基板 (片面 HR コート (反射率 99.8 % @1064 nm)、日本真空光学社、表 2.1.1-2 を参照) を使用した。また、可変形鏡の鏡面とアクチュエータの間には、金メッキをした凸面状の保護板を挿入した (図 2.1.4-3(d))。鏡面を透過したレーザー光が変形鏡内部、特にアクチュエータの配線部に照射されることによる発熱や燃焼を防ぐことが目的である。表面に金メッキをすることにより、透過したレーザー光は金メッキと鏡面の間で多重反射し可変形鏡の周辺部から外部へと放射されるため、透過光吸収による発熱の影響を抑制できる。

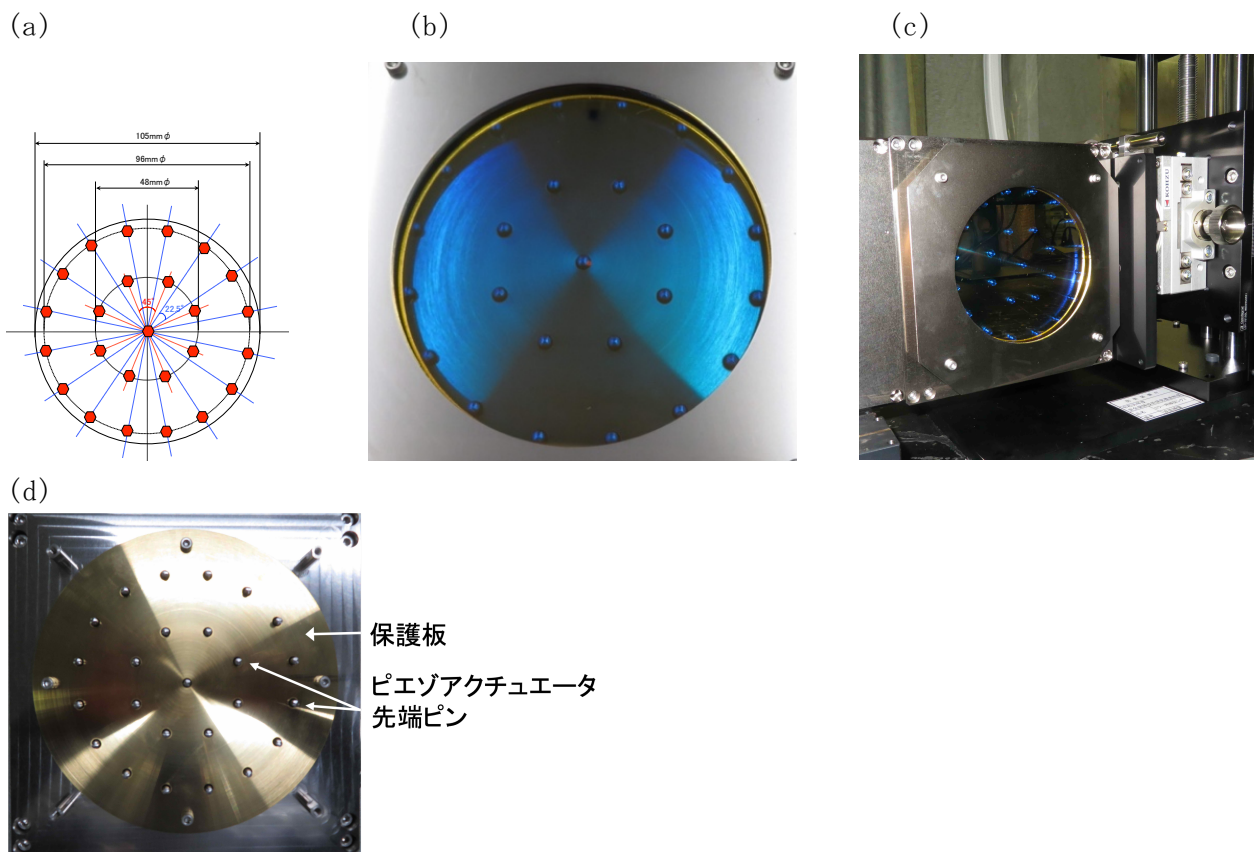


図 2.1.4-3 Defocus 補正鏡の (a) Piezoアクチュエータ配置図 (図中赤点、25 本支持)、(b) ミラー部、(c) 外観、(d) 保護板 (ミラー基板接着前)

フィゾー型干渉計による Defocus 補正鏡の動作試験を行った。各アクチュエータ (25 本) の応答定数 (C) および影響関数 (クロストークの大きさ) は事前の実験的に取得した。図 2.1.4-4 に、(a) (b) Defocus 成分 (Def(-C₅))、(c) 初期状態、(d) (e) Focus 成分 (Focus(+C₅)) を作成した際の鏡面形状の観測結果を示す。Defocus 補正鏡により、Defocus および Focus 成分の形状が共に再現可能であることがわかった。図 2.1.4-5 は、それぞれの形状を鏡面の中心位置で x 軸方向にスライスし 2 次元表示したものである。図中 (a) は鏡面中央のアクチュエータの変位の最大値 (印加電圧 150 V)、(b) は 100 V 印加時、(c) は 25 V 印加時、(d) は変位の最小値 (=0、印加電圧 0 V) 時の観測結果である。Defocus 成分の最大 PV 値は 6 μm、Focus 成分の最小値は -6

μm (計 $12 \mu\text{m}$) で、目標としていた動作幅 $7 \mu\text{m}$ ($\pm 3.5 \mu\text{m}$) を満たすことがわかった。また、PV 値は中央部のアクチュエータの印加電圧に線形応答することがわかった。同様に、Defocus 補正鏡を動作させて Astigmatism 成分(ゼルニケ多項式の 4、6 項)を作成した際の鏡面形状(2次元表示)を図 2.1.4-6 に示す。2種の Astigmatism 成分をよく再現できており、開発した Defocus 補正鏡によりゼルニケ多項式の 4、5、6 項の波面補正が可能であることがわかった。

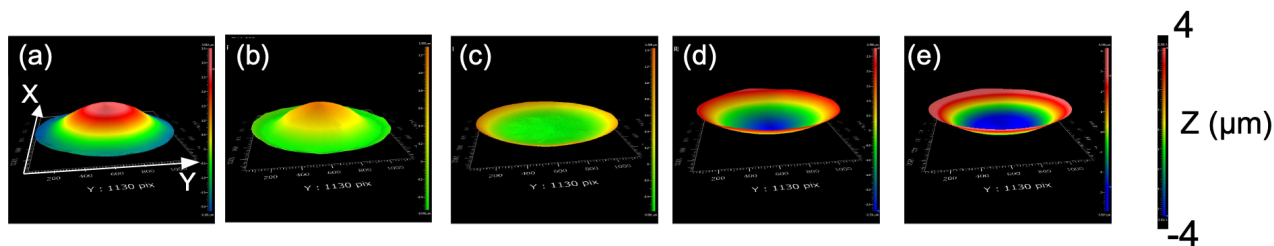


図 2.1.4-4 Defocus 補正鏡を動作させ (a) (b) Defocus 成分 (Def(- C_5))、(d) (e) Focus 成分 (Focus(+ C_5)) を作成した際の鏡面形状(3次元表示)

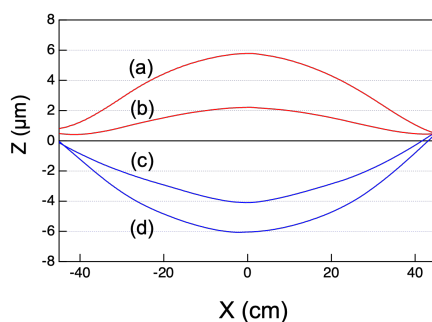


図 2.1.4-5 Defocus 補正鏡を動作させ (a) (b) Defocus 成分 (Def(- C_5))、(d) (e) Focus 成分 (Focus(+ C_5)) を作成した際の鏡面形状(X-Z 表示)。鏡面中央のアクチュエータへの印加電圧が(a)最大時 (150 V)、(b) 印加電圧 100 V 時、(c) 印加電圧 75 V (初期状態) 時、(d) 印加電圧 25 V 時、(e) 最小 (印加電圧 0 V) 時

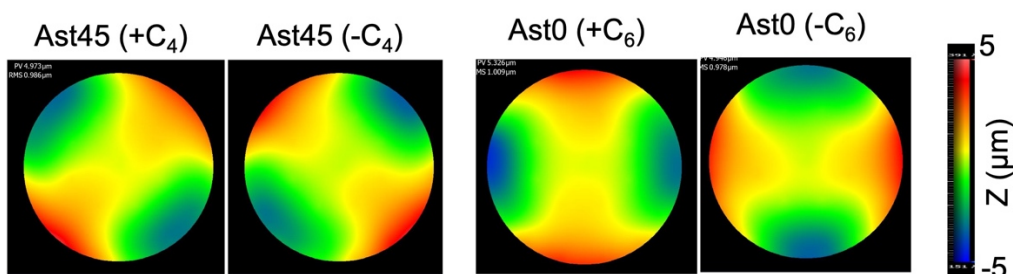


図 2.1.4-6 Defocus 補正鏡を動作させ Astigmatism 成分(ゼルニケ多項式の 4、6 項) を作成した際の鏡面形状(2次元表示)

[3] 高次項補正鏡

図 2.1.4-7 (a) に piezoアクチュエータの配置図を示す。複雑な高次項波面の補正を行うため、計 61 本のアクチュエータを隣接するアクチュエータ間の距離が全て等しい正三角形格子状の配置を選択した。図 2.1.4-7 (b)、(c) にそれぞれミラー部、外観の写真を示す。ミラー基板には、近接した PA の動作に対応できるように、機械剛性が低い（柔らかい）素材である 105 mm ϕ 、厚さ 1 mm の石英基板（片面 HR コート（反射率 99.8 % @1064 nm）、日本真空光学社、表 2.1.1-2 を参照）を用いた。Defocus 補正鏡と同様に、アクチュエータとミラー基板の間には金メッキを施した凸面状の保護板を挿入した（図 2.1.4-7 (d)）。

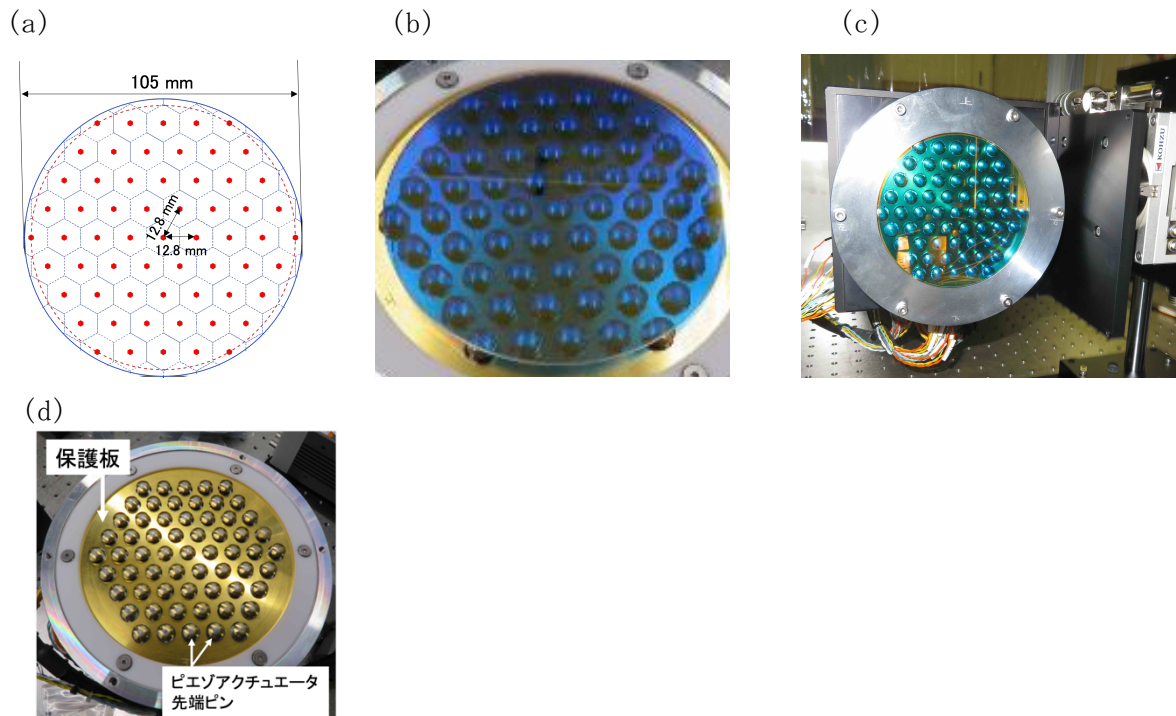


図 2.1.4-7 高次項補正鏡の (a) piezoアクチュエータ配置図（図中赤線、61 本支持）、(b)ミラー部、(c) 外観、(d) 保護板（ミラー基板接着前）

フィゾー型干渉計による高次項補正鏡の動作試験を行った。各アクチュエータ(61本)の応答定数(C)および影響関数(クロストークの大きさ)は事前に実験的に取得した。図2.1.4-8に、ゼルニケ多項式の7~15項の波面を作成した際の表面形状を示す。波面のZ変位(ゼルニケ係数)はそれぞれ $\pm 2.5 \mu\text{m}$ になるよう印加電圧を設定した。それぞれの波面がよく再現されている。図2.1.4-9に、波面解析により作成したそれぞれの波面のゼルニケ係数を求めた結果を示す。spherical aberration(13項)、2次のastigmatism(12、14項)など内部形状が複雑な波面については設定値($\pm 2.5 \mu\text{m}$)よりもゼルニケ係数はやや小さいものの、いずれも波面も設定値に対して82%以上の値を示すことがわかった。

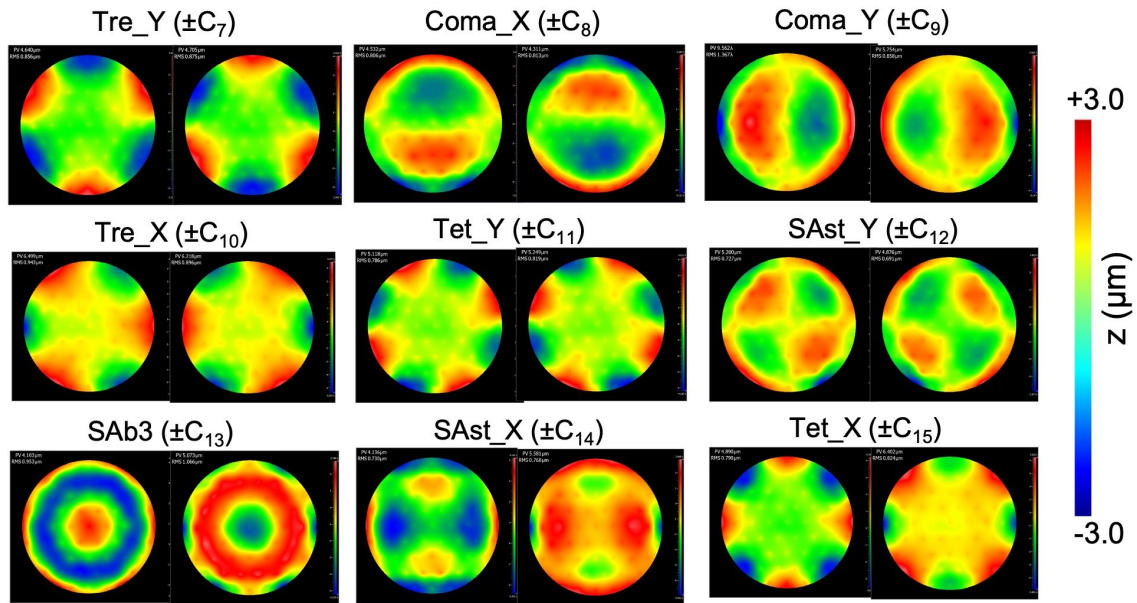


図 2. 1. 4-8 高次項補正鏡によりゼルニケ多項式の7~15項の波面を作成した際の表面形状(2次元表示)

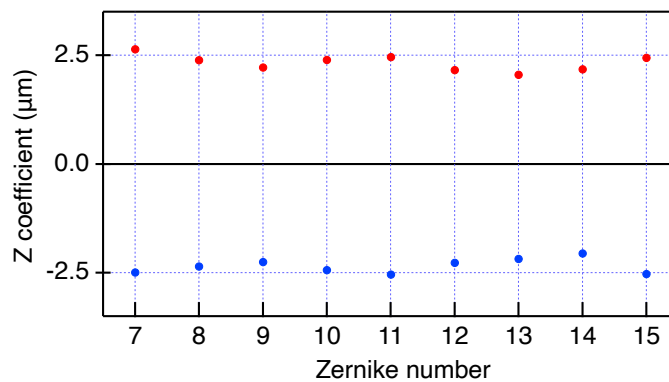


図 2. 1. 4-9 高次項補正鏡により作成した各波面(ゼルニケ多項式7~15項)の波面解析により求めたゼルニケ係数(設定値 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 、Zernike numberはゼルニケ多項式の項番号にそれぞれ対応)

高次補正鏡の高速動作について検討するため、レーザードップラー振動計（PNV-RD-ADV1、Holobright社）を用いた高速動作試験を行った。実験配置を図2.1.4-10に示す。レーザードップラー振動計は1点計測であるため、アクチュエータと鏡面の接着部を選定して高次補正鏡の高速動作時のZ変位量の時間変化を計測した。高次補正鏡は、ゼルニケ多項式の7～15項の波面を $Tre_Y(-C_4) \rightarrow Tre_Y(+C_4) \rightarrow Coma_X(-C_5) \rightarrow Coma_X(+C_5) \rightarrow \dots \rightarrow Tet_X(-C_{15}) \rightarrow Tet_X(+C_{15})$ （波面の表記については図2.1.4-8を参照）の順に動作速度10 kHzで高速動作させた。図2.1.4-11(a)に、中央部のアクチュエータ（図2.1.4-10中P1）、図2.1.4-11(b)にその隣のアクチュエータの位置（図2.1.4-10中P2）で計測したZ変位の時間変化（図中赤線）を示す。比較のため、図には動作時にそれぞれのアクチュエータに印加した電圧の時間変化を併せて示した（図中青線）。計測の配置上、印加電圧と変位量は逆位相になることに留意されたい。どちらの点も変位の時間変化は印加電圧に遅延なく応答しており、変位量も印加電圧の大きさにほぼ対応して変化した。また、高速動作時に懸念されたミラー基板の過渡振動の影響は見られなかった。これらの結果から、開発した高次項補正鏡は当初の目標であった動作範囲 $2\mu\text{m}$ 、動作速度10 kHzに対応可能な性能を有することがわかった。

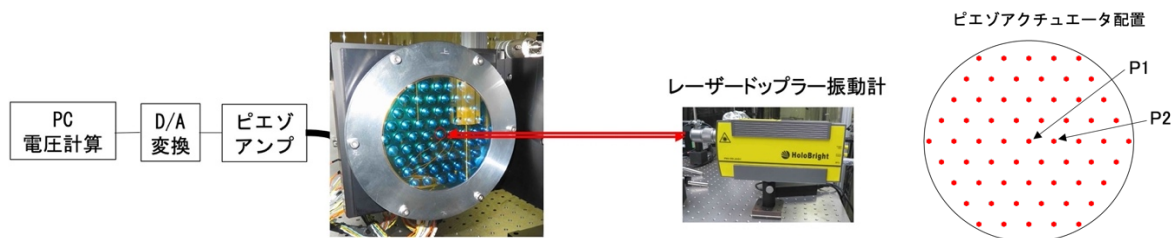


図 2.1.4-10 高次項補正鏡高速動作試験配置と計測点（P1、P2）を示した図

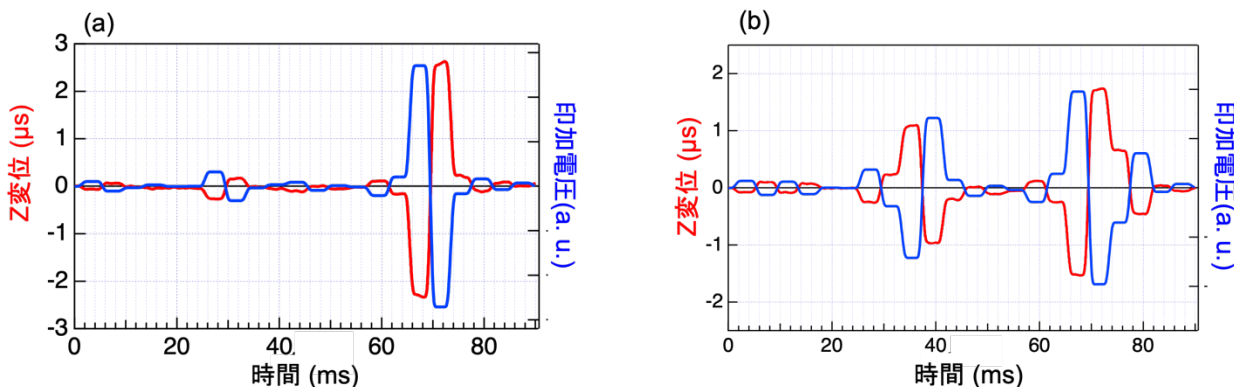


図 2.1.4-11 高次項補正鏡高速動作試験配置と計測点（P1、P2）を示した図

2. 1. 5 可変形鏡の設計のための構造シミュレーション

高速・高光耐性可変形鏡の開発に際し、鏡面基板の素材や厚さ、駆動素子である piezo アクチュエータ（以下 piezo、または piezo 素子と記す）の配置などに関する具体的な設計指針となる知見を得ることを目的とし、構造シミュレーションを行った。開発した可変形鏡は電圧印加により piezo を縦方向に伸縮させることで鏡面の形状を変化させる構造であり、その動作を有限要素法によりシミュレーションした。用いたソフトウェアは、過渡応答電場解析ソフトウェア（PHOTO-VOLT、フォトン社）と弾性応力解析ソフトウェア（PHOTO-ELAS、フォトン社）である。それらを連成解析することで、piezo への電圧印加時の piezo で起こる圧電効果と系全体の弾性体動作とを再現する解析を行うことが可能である。

2. 1. 5. 1 可変形鏡シミュレーションモデル

本研究の開発目標である口径 100 mm の大型可変形鏡 3 種 (Tip-Tilt 補正鏡、Defocus 補正鏡および高次項補正鏡) に対応するシミュレーションモデルの概要を図 2. 1. 5. 1-1 に示す。この図に記す piezo 本数や鏡面基板ガラスの材質、厚みは、これらのモデルを使ったシミュレーションの結果を考慮して実設計において順次決定していったものである。

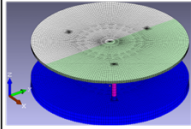
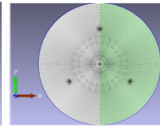
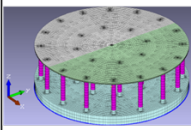
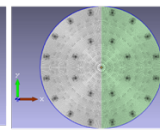
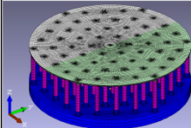
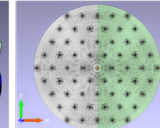
	シミュレーションモデルの形状 (ガラス板外径: $\Phi 105\text{mm}$ 、うち鏡面部分 $\Phi 100\text{mm}$)		piezo の本数	鏡面基板の材質	鏡面基板の厚さ
	斜視図	上面図 (piezo 素子の配置が分かり易い図)			
Tip-tilt 補償鏡			3本	サファイヤガラス	2mm
Defocus 補償鏡			25本	サファイヤガラス	1mm
高次補償鏡			61本	石英ガラス	1mm

図 2. 1. 5. 1-1 可変形鏡 3 種のシミュレーションモデルの概要

2. 1. 5. 2 鏡面形成のシミュレーションー Defocus 補正鏡および高次項補正鏡

形成鏡面のシミュレーションの例として、図 2. 1. 5. 2-1 に Defocus 鏡で形成される鏡面を基板の厚を変えて計算した結果を示す。同図左側はサファイアガラスの 1 mm 厚の場合、右側は 2 mm 厚の場合の、直径に沿った鏡面変位 dz のプロファイルである。厚みが 1 mm 厚で目標からのずれが小さく、この 1 mm が適していると判断できる。

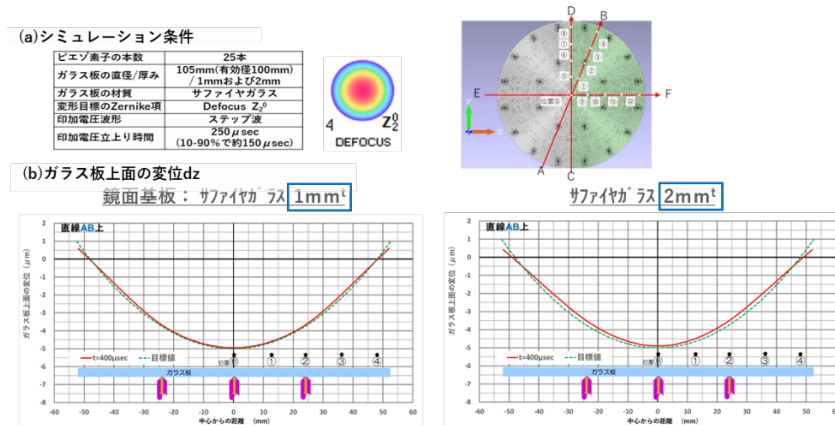


図 2. 1. 5. 2-1 Defocus 補正鏡の形成鏡面 z 変位プロファイルの計算結果 - 基板厚さの比較

高次項補正鏡のシミュレーションの例として、球面収差 spherical aberration の鏡面形成をさせた際の目標からのずれのプロファイルを図 2.1.5.2-2 に示す。球面収差は開発仕様の再現ゼルニケ項の中で最も凹凸が激しい 4 次項の 1 つであるが、鏡面がよく再現されている。今回の開発の仕様である他の全ゼルニケ項についても同様の結果が得られており、必要な 4 次 15 項までのゼルニケ鏡面の形成が可能であることがわかった。

高次補償鏡の形成鏡面 PRIMARY SPHERICALの例

シミュレーション条件

ピエゾ素子の本数	61本(配置は六角形と正方の2種)
ガラス板の直径/厚み	Φ105mm/1mm
ガラス板の材質	石英ガラス
変形目標のZernike項	Primary Spherical Z_4^0
印加電圧波形	ステップ波、 $dz \text{ max} = 3 \mu\text{m}$
印加電圧立上り時間	250 μsec (10-90%で約150 μsec)

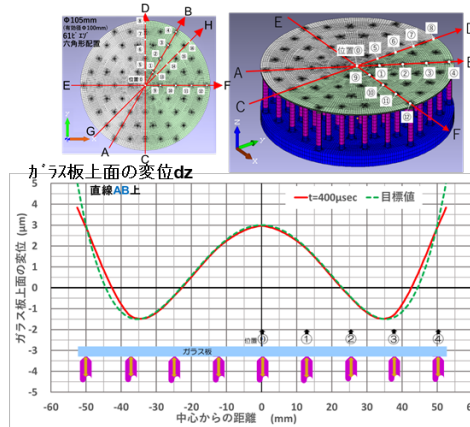
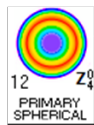


図2.1.5.2-2 高次項補正鏡での形成鏡面z変位のシミュレーション結果- 球面収差

2. 1. 5. 3 高次項補正鏡の鏡面形状精度向上のための67本/73本モデル

実際に製作した高次補償鏡は61本のピエゾを配置したものであるが、鏡面の外周部においてピエゾの配置密度が小さいため目標鏡面からのずれが大きくなる傾向がある。今回の研究で用いるような入射光の径が可変形鏡口径の2/3以下であるような場合には、この外周部分でのずれが全体の性能にそれほど大きな影響を与えるものではないが、可変形鏡の鏡面全体に光が入射する場合には外周部分のずれも最小に抑えるのが望ましい。全面に亘る補償性能を上げることを目標に、今回、アクチュエータの配置が少ない外周部分にアクチュエータを追加する配置を考え、その効果の確認のためのシミュレーションを行った。

図2.1.5.3-1に、ピエゾを6本追加配置した67本ピエゾのモデルと、12本を追加した73本のモデルとの配置図を示す。同図の上側(a)(b)にはベースとなる実際に制作した61本のモデルの図を掲載している。

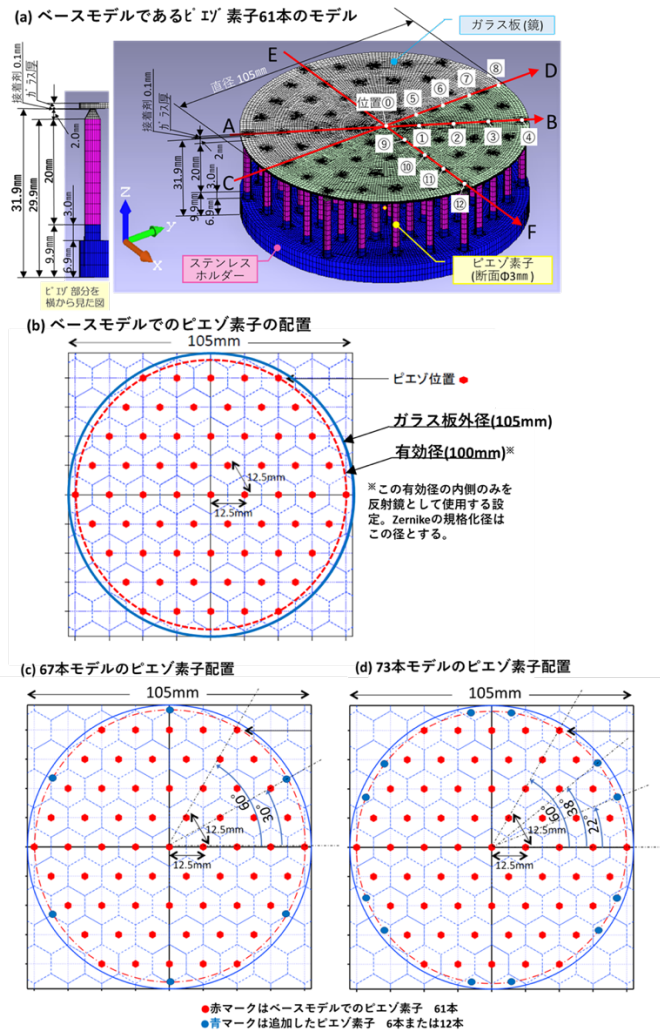
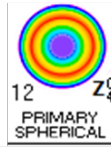


図2.1.5.3-1 ピエゾを追加配置した高次項補正鏡モデル。(a)(b)ベースとなる61本モデルの概要、(c)67本モデルのピエゾ配置、(d)73本モデルのピエゾ配置

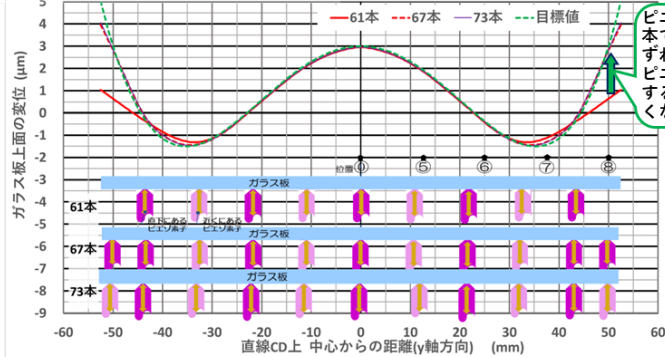
図2.1.5.3-2に、67本と73本のモデルのシミュレーション結果の例として、ゼルニケ多項式の球面収差(Spherical, Z_4^0)の補正鏡面を形成したときのz変位プロファイルを示している。図の(b)は直線上のdzプロファイル、(c)は外周部である半径50 mm位置の円周上のdzプロファイルで、各グラフの下側にピエゾの位置関係を図示している。ピエゾの追加により形成鏡面の精度向上を図れることが確認できた。

(a) シミュレーション条件

ピエゾ素子の本数	61本/67本/73本
ガラス板の直径/厚み	105mm(有効径100mm)/1mm
ガラス板の材質	石英ガラス
変形目標のZernike項	Primary Spherical Z_4^0
印加電圧波形	ステップ波
印加電圧立上り時間	250 μ sec



(b) ガラス板上面の変位dz 直線CD上



ピエゾ素子が61本では目標からのずれが大きいが、ピエゾ素子を追加するとずれが小さくなる。

(c) ガラス板上面の変位dz r=50mmの円周上

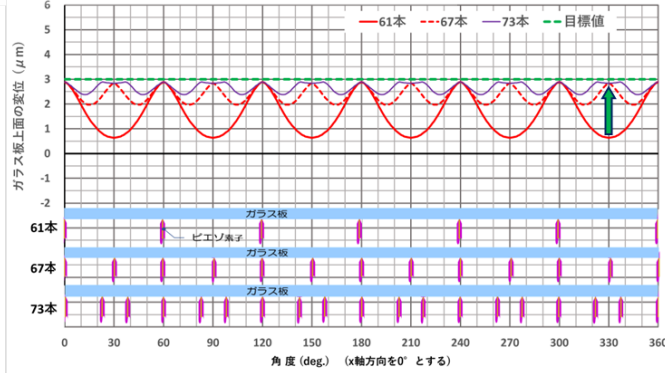


図2.1.5.3-2 高次項補正鏡における形成鏡面の理論値からのずれdzのピエゾ本数追加による変化

(球面収差(Spherical、 Z_4^0)の場合)。(a)シミュレーション条件、(b)直線上のdzプロファイル、(c)半径50mmの円周上のdzプロファイル

2. 1. 5. 4 Tip-Tilt 補正鏡の過渡振動抑制

Tip-Tilt補正鏡の3本のピエゾの配置に関し、高速動作時に発生することが懸念される不要な過渡振動を抑制するためには、ピエゾ配置位置をガラス基板中心からの距離30mm程度の中間的なところにするのが適当であるとの結果を得ており、製作時にもその結果に沿った設計とした。Tip-Tilt補正鏡の動作は鏡面を平板を維持したまま傾きを変えるものであり、3本のピエゾを配置すればこの動きを実現できる。ただし、ガラス基板全体を3本のみで支えると鏡面に湾曲が発生しやすく、また、湾曲が発生しない場合でもピエゾの延伸収縮の振動が加わった系全体としての大きな振動が起りやすい。図2. 1. 5. 4-1はピエゾへの印加電圧の立上げ時間が $250\mu\text{sec}$ の場合と、 $1,000\mu\text{sec}$ の場合での鏡面動作のシミュレーション結果である。立上げ時間が $250\mu\text{sec}$ では、25本ピエゾの Defocus補償鏡や、61本の高次補償鏡の場合には過渡振動は起こらないが、3本のTip-Tilt鏡ではかなりの振幅で振動が発生している。立上げ時間が $1,000\mu\text{sec}$ になると振動は発生しない。

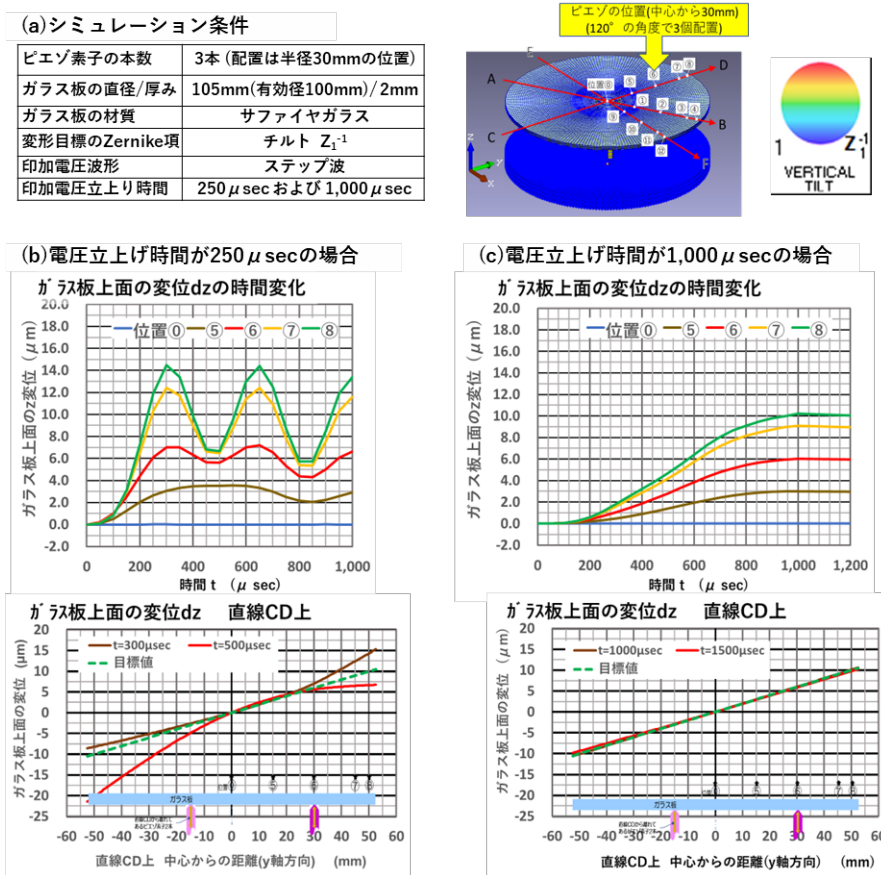


図2. 1. 5. 4-1 ピエゾ3本支持のTip-Tilt鏡での過渡振動の様子。(a)シミュレーション条件、(b)立上げ時間 $250\mu\text{sec}$ で駆動した場合、(c)立上げ時間 $1,000\mu\text{sec}$ の場合

Tip-Tilt鏡の高速動作時に発生することが懸念される過渡振動の対策案として、ピエゾを動作させる際に印加駆動電圧にその振動を打ち消すようなパルス電圧を重畳して印加することを考え、シミュレーションを行った。湾曲が起こらない6 mm厚平板のガラス基板において、発生する振動と位相が反転した振動を生むような単パルスの電圧を、元々の目的の動作をさせるためのステップ状の電圧に重畳して印加するようにした。図2. 1. 5. 4-2に示すとおり、発生していた大きな振動を抑制できるという結果を得た。この時に重畳したパルス電圧波形とそのパルス電圧だけを印加した場合のガラス板の動きを図2. 1. 5. 4-3に示す。パルスを単独印加した場合にもス

テップ状電圧を印加した元の場合と同じ周期の振動が起こっている。このパルス電圧が生む振動が元の振動を打ち消すようにそのパルスの正負、振幅、時間ずれを調整して(逆方向電圧のパルスとなる)を元々の駆動電圧に重ねて印加することで振動が抑制されることがわかった。

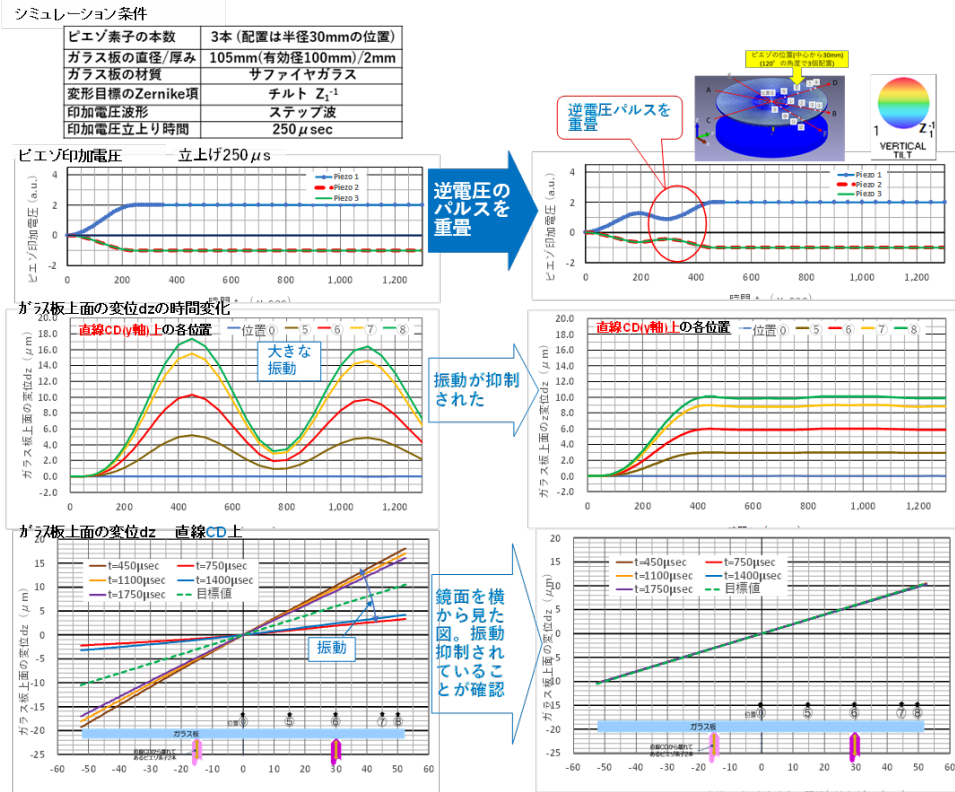


図2.1.5.4-2 ピエゾ3本のTip-Tilt鏡の高速動作時に発生する不要過渡振動を逆方向のパルス電圧を重畳印加することにより抑制する方法

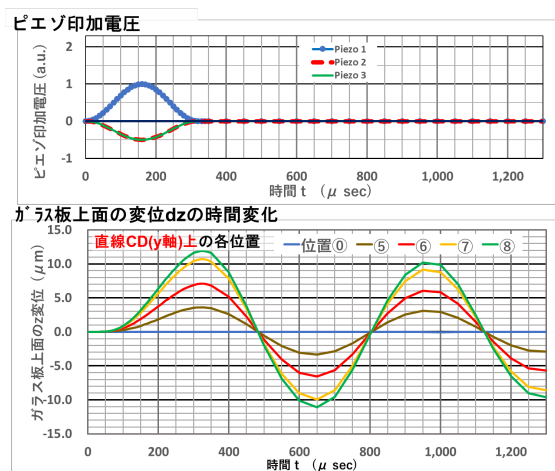


図2.1.5.4-3 振動抑制のために重畳して印加するパルスの例

2. 2 波面センサの開発

波面センサは Shack-Hartmann 型波面センサを採用した。その原理は図2.2-1に示すように、マイクロレンズアレイに波面の乱れた光が入射すると受光素子上の結像スポットがずれ、そのズレから波面の傾きを測定できることを利用する装置である。本研究で開発した波面センサは波面測定点が10点×10点であり、波面測定頻度は10kHzである。

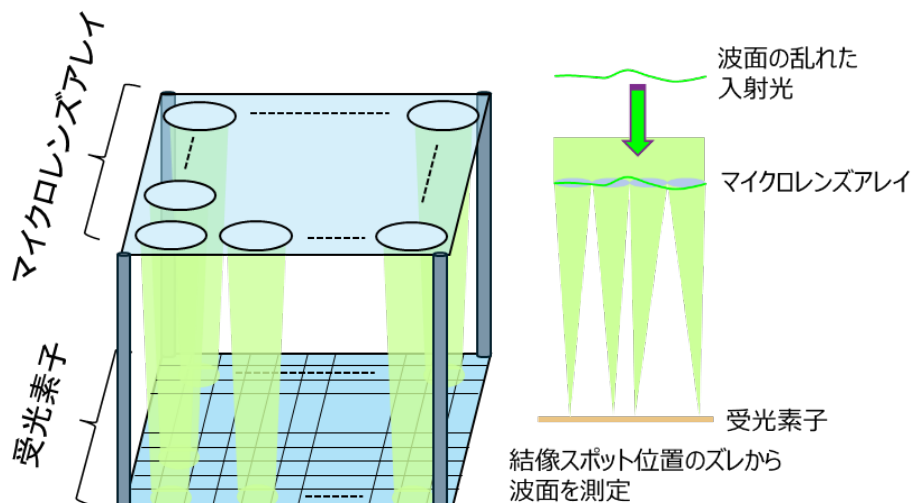


図2.2-1 Shack-Hartmann型波面センサの原理

2. 2. 1 波面センサの波面検出アルゴリズム

波面センサは測定した重心位置の移動量から各項のゼルニケ係数を計算し、波面位相を再構成している。本研究で使用するゼルニケ多項式の定義を図2.2.1-1及び表2.2.1-1に示す。

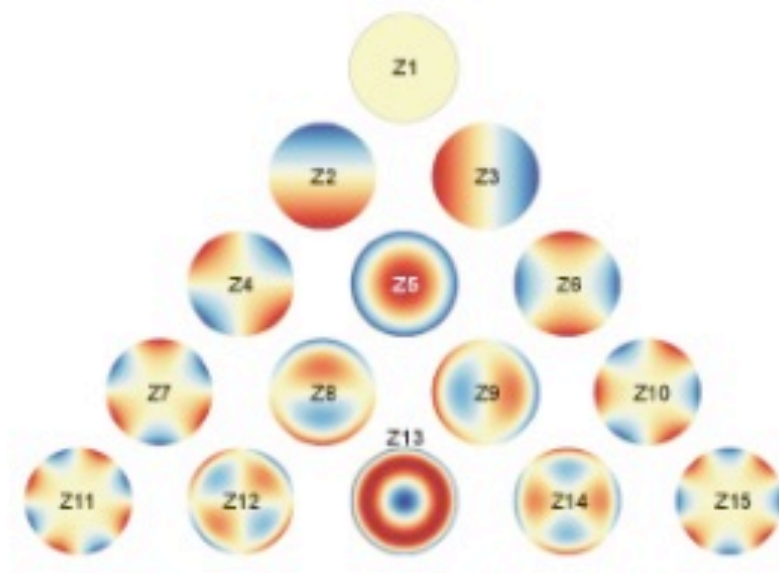


図 2. 2. 1-1 ゼルニケ多項式 (Thorlabs Optical Wavefront Sensors Operation Manual 2020 p. 115 より)

表 2.2.1-1 ゼルニケ多項式の定義 (Thorlabs Optical Wavefront Sensors Operation Manual 2020 p.114 より)

項番号	ゼルニケ多項式
1	1
2	y
3	x
4	$2xy$
5	$2x^2 + 2y^2 - 1$
6	$x^2 - y^2$
7	$3x^2y - y^3$
8	$3x^2y + 3y^3 - 2y$
9	$3x^3 + 3xy^2 - 2x$
10	$x^3 - 3xy^2$
11	$4x^3y - 4xy^3$
12	$8x^3y + 8xy^3 - 6xy$
13	$6x^4 + 12x^2y^2 + 6y^4 - 6x^2 - 6y^2 + 1$
14	$4x^4 - 4y^4 - 3x^2 + 3y^2$
15	$x^4 - 6x^2y^2 + y^4$

2. 2. 2 波面センサ (供試体)

製作した波面センサ (供試体) を図 2.2.2-1 に示す。カメラの熱によるノイズ低減のため、受光素子はペルチェ効果により冷却を行う。それに伴う結露を発生させないため、カメラ、マイクロレンズアレイ、レデューサを真空容器に収めた。図 2.2.2-2 に示す通り、光学窓を通過した光は 2 枚の凸レンズペアによりレデューサされた後、マイクロレンズアレイに入射してカメラの受光素子に到達する。カメラからの画像データは FPGA に送られ、スポット列の重心演算を行い、重心データを制御装置に送信する。制御装置からの波面データは可変形鏡に送信される。カメラ及び FPGA の動作を最適化することにより、1つのサブアパーチャに使用するカメラのピクセル数を当初計画していた 4 倍にすることに成功し、10kHz 動作を実現しつつ高精度な波面検出が可能になった。

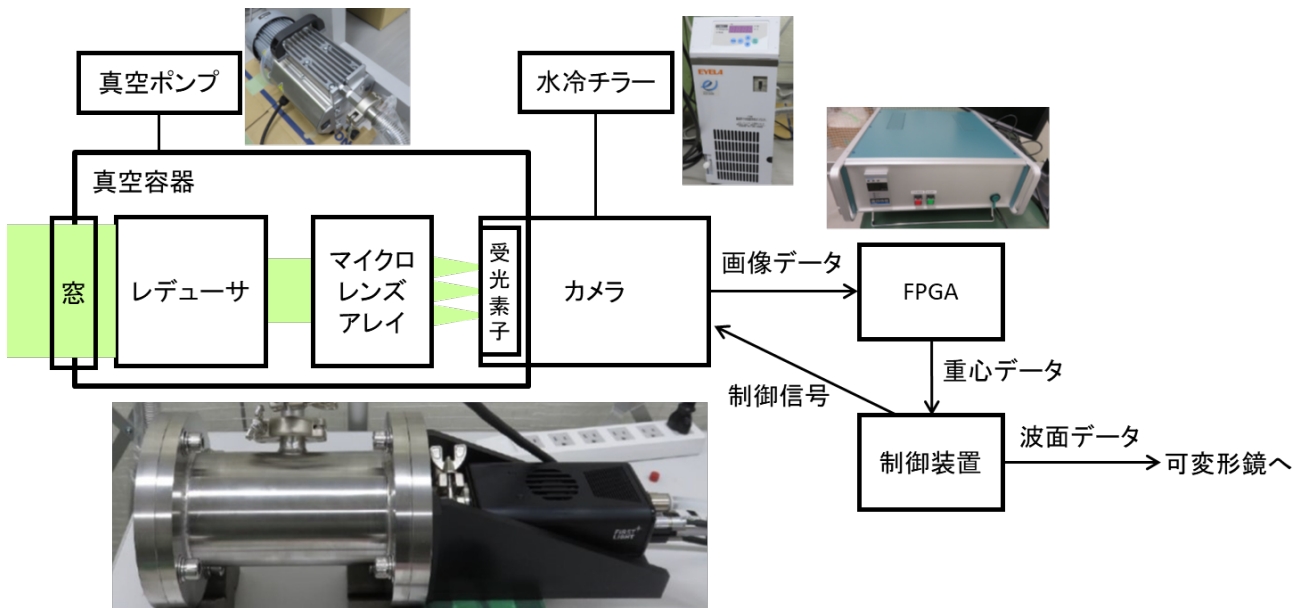


図 2. 2. 2-1 波面センサ (供試体) の構成

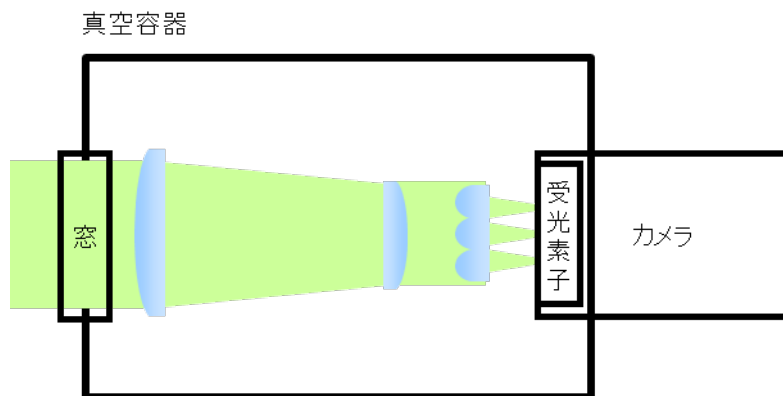


図 2. 2. 2-2 波面センサ (供試体) 光学系配置の概略

2. 2. 3 波面センサ (供試体) 単体試験

波面センサの波面位相検出能力を確認するため、図 2. 2. 3-1 と図 2. 2. 3-2 に示す構成にて単体試験を実施した。波面の傾き (チップチルト上下・左右) 及び波面の広がり具合 (デフォーカス) の検出確認を行うため、レーザーを支持するホルダのネジを回転させることでチップチルトを与えた。また、マイクロメータに乗せた凸レンズと凹レンズを組み合わせでデフォーカス模擬擾乱を与えた。

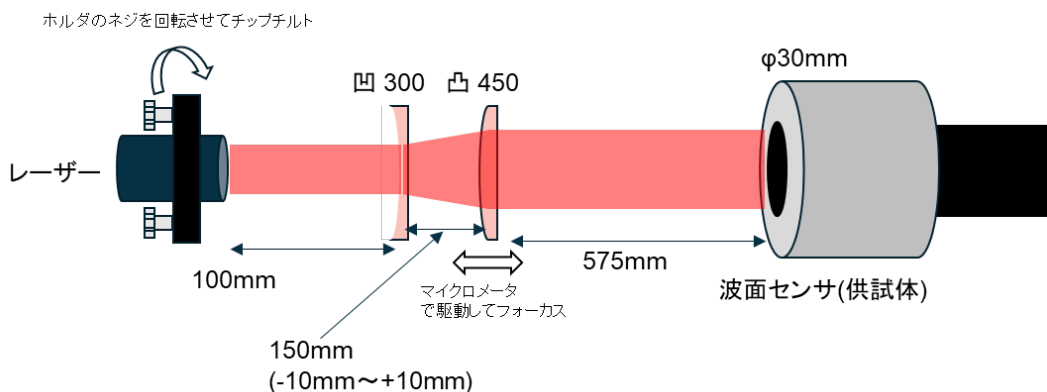


図 2.2.3-1 波面センサ(供試体)単体試験 セットアップ



図 2.2.3-2 波面センサ(供試体)単体試験 試験写真

まず、レーザーを支持するホルダのネジを回転させることでチップチルト上下と左右を与えた。ネジの回転数から計算されるチップチルト量と波面センサで検出されたチップチルト量を比較したものを図 2.2.3-3 及び図 2.2.3-4 に示す。計算値と検出値が一致することを確認した。

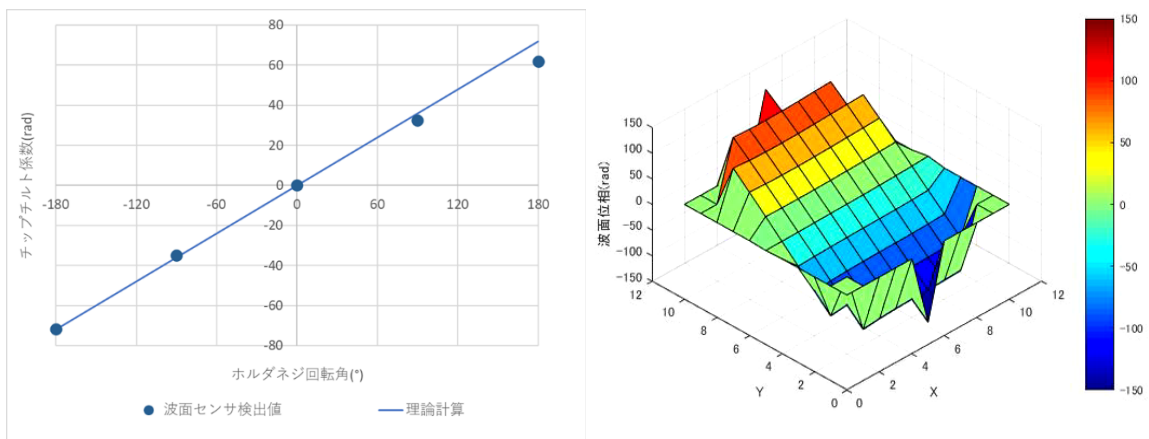


図 2.2.3-3 検出されたチップチルト上下成分ゼルニケ係数(左図)と波面位相(右図)

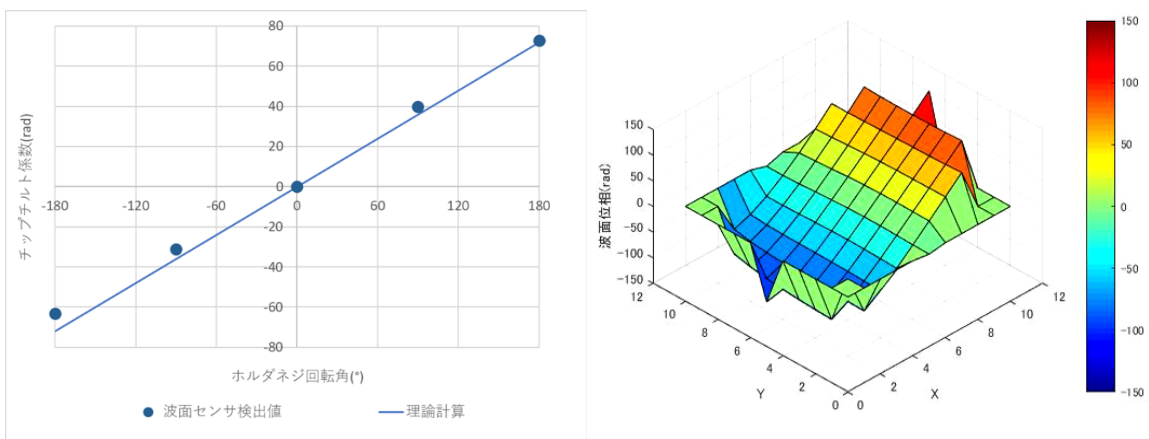


図 2.2.3-4 検出されたチップチルト左右成分ゼルニケ係数(左図)と波面位相(右図)

また、凹凸の2枚のレンズ間の距離を変えることでフォーカス・デフォーカスの模擬擾乱を与えた。距離を変えるため、凸レンズをマイクロメータに乗せ、手で駆動させた。検出されたデフォーカス成分のゼルニケ係数とレンズ間距離から理論的に計算されるデフォーカスの値を比較

した結果を図 2.2.3-5 に示す。計算値と検出値が一致することを確認したので、波面センサ(供試体)は正しく波面検出ができると判断し、組合せ試験にて使用した。

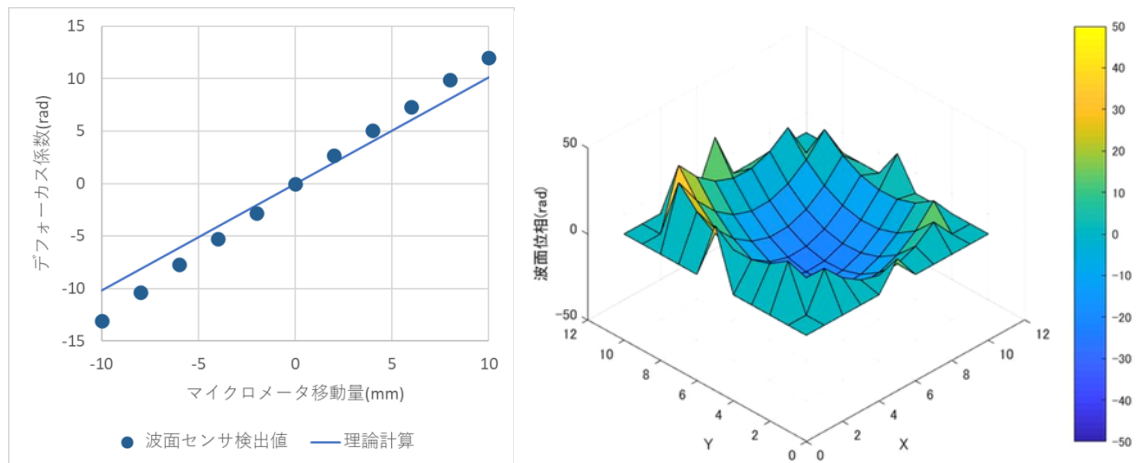


図 2.2.3-5 検出されたデフォーカス成分ゼルニケ係数(左図)と波面位相(右図)

2. 3 レーザー光源の開発

2. 3. 1 伝送ビーム

伝送ビームは宇宙デブリ除去やエネルギー伝送への活用を考えており、本研究では 100 kW 以上のレーザーを製造するために必要な技術について獲得し、高品質で高出力なレーザーシステム構成に必要な技術を取得する。

高出力レーザーの現状として、単体のレーザーでは 100kW 以上に高出力化するのは困難である。例えばファイバーレーザーは増幅効率が良いが非線形効果による出力制限があり、シングルモードのビームには限界がある。一方で固体レーザーは増幅面積を広くとれるため出力の限界が高い。

レーザー単体での出力には制限があるため、100kW 以上のレーザーシステムを構築するにはビームを結合する必要があるが、レーザー単体の出力が低い場合結合本数が多くなりシステム規模が大きくなるため、1本あたりの出力が高い高品質レーザーをビーム結合することで 100kW の高出力レーザーシステムを構築することを開発方針として、本研究では 1本あたり 10kW 以上のレーザー実現性検討を行う。

高出力レーザー(100kW)の開発方針を「高品質のレーザー 1本あたりの出力を高めて、複数本のビーム結合すること」として、必要な技術を洗い出すと以下に分類される。

- ・高出力高品質なファイバーレーザー

種光源として高品質かつ効率の良いファイバーレーザーで非線形効果の閾値を上昇させることで最大限出力を高めたレーザーを製造する技術が必要である。

- ・固体増幅技術

種光源に対して固体増幅を行うことで 1本あたりの出力向上を行い、1本あたりの出力を向上させる。特に Nd:YAG で増幅する場合は増幅される波長帯域が狭帯域であるため、狭帯域の種光源を用いる必要がある。

- ・偏光ビーム結合

直線偏光のビームをビームスプリッター等にて結合してビーム出力を倍増させる。合成するビームは偏光が揃っており、保持されている必要がある。

- ・波長結合

異なる波長のビームを回折格子やダイクロイックミラー等を用いて結合してビーム出力を倍増させる。種光源の帯域が広いと一定帯域内で結合できる本数が制限させるため、狭帯域である必要がある。

本研究では MOPA 方式で増幅した高出力高品質の種光源を固体増幅することで出力を増加させる構成とした。伝送ビームの全体構成を図 2. 3. 1-1 に示す。

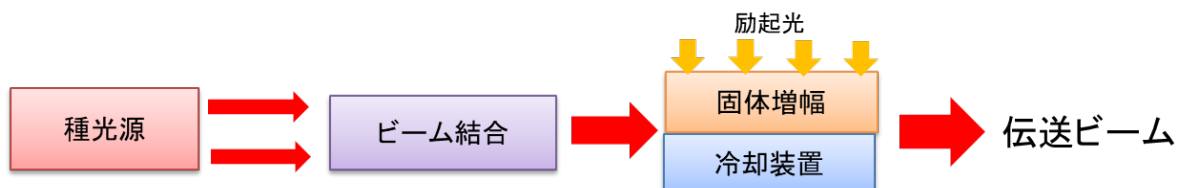


図2. 3. 1-1 伝送ビームの構成

2.3.1.1 種光源

高品質、狭帯域かつ偏光保持したシード光 (Master Oscillator) を主増幅器(Power Amplifier) で高出力化することで高出力な種光源を製造した。種光源は2本製造し、偏光結合することで4kW以上の高出力種光源を製造することとした。

オシレータから出力する光と励起用 LD の光をビーム結合器(Beam Combiner)により結合し、ファイバー励起をすることで出力 2kW (※1) 以上の高出力種光源を製造した。

種光源の単体試験結果を表2.3.1.1-1にまとめる。

表2.3.1.1-1に示す通り、高出力ファイバーレーザー製造技術を確立した。

表2.3.1.1-1 種光源の目標仕様と単体試験結果

項目	目標仕様	種光源A	種光源B	単体試験結果
出力	2000W以上	1910W (※1)	1590W	図2.3.1.1-2
ビーム品質M ²	1.5 以下	1.3以下	1.3以下	図2.3.1.1-3
波長幅	0.45nm以下	0.38nm	0.36nm	図2.3.1.1-4
偏光消光比 (PER)	10dB以上	15dB以上	12dB以上	図2.3.1.1-5

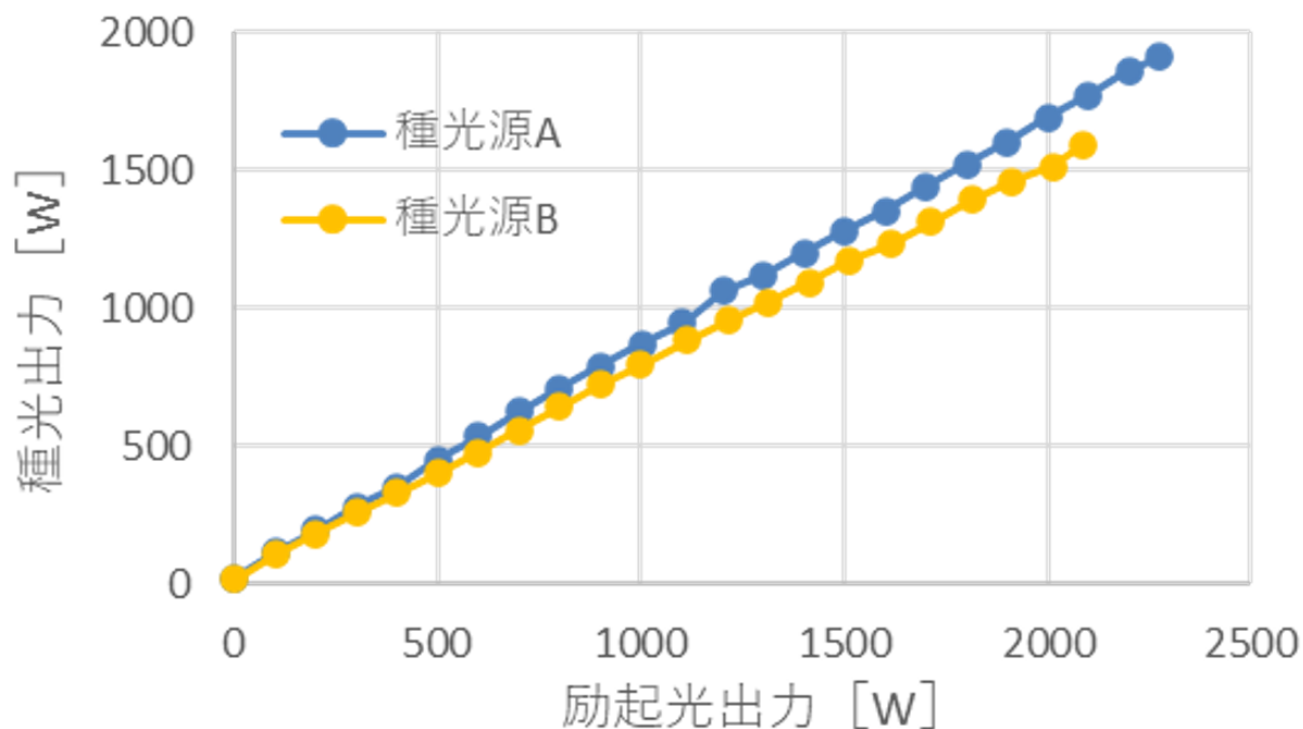


図2.3.1.1-1 種光源単体試験 (出力)

(※1) 2kW以上の出力を計測した。ただし、非線形効果により不安定な動作状態になるので、固体増幅試験では出力2kW以下に制限をして試験を行った。

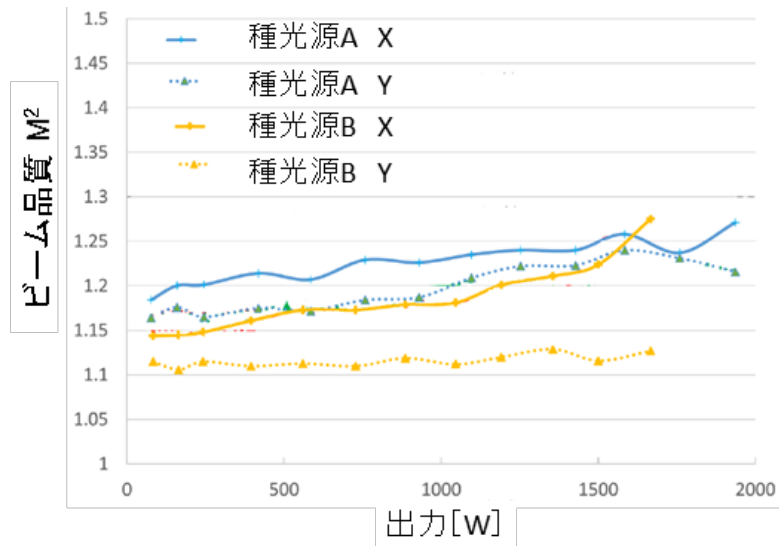


図2. 3. 1. 1-2 種光源単体試験（ビーム品質M²）

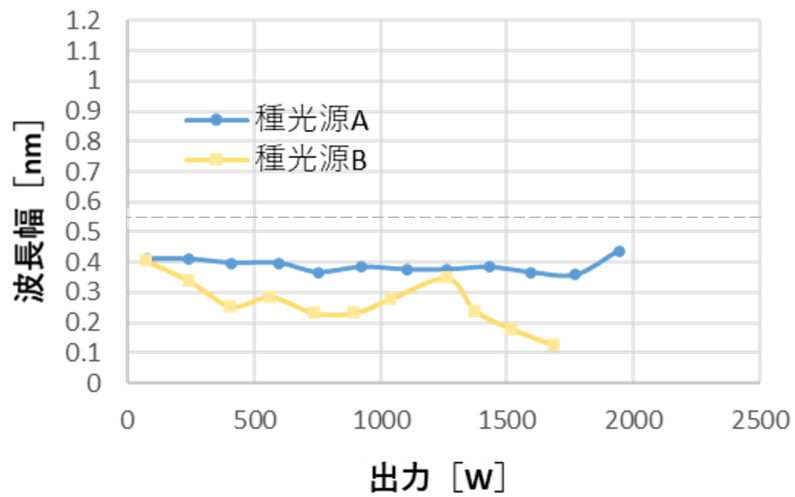


図2. 3. 1. 1-3 種光源単体試験（波長幅）

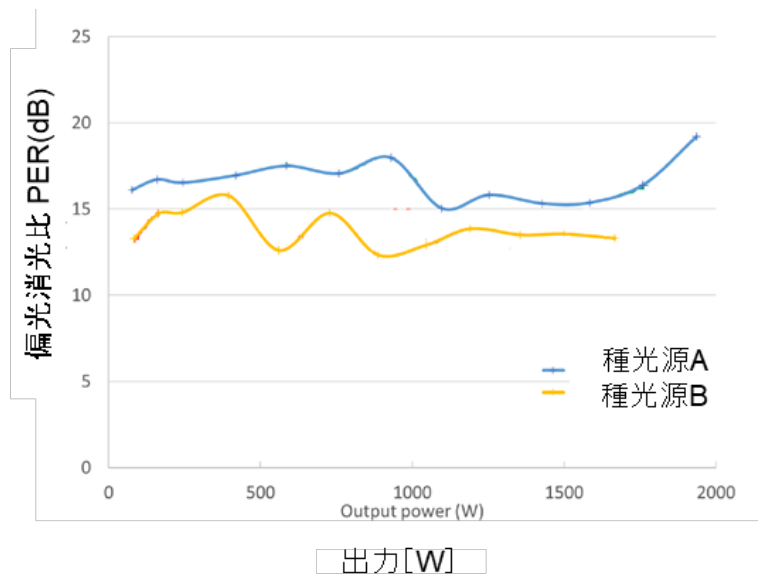


図2. 3. 1. 1-4 種光源単体試験（偏光消光比 PER）

●種光源の非線形効果対策

シングルモードファイバーを伝搬するレーザー光の出力密度を高めると非線形効果であるSBS（誘導ブルリアン散乱）やTMI（横モード非安定性）等により出力の増加が阻害される。さらに、励起光出力を増加させると非線形効果で発生する戻り光により最悪の場合、装置の破壊に至る。

種光源の製造に関して、熱負荷の分散や仕様範囲内の波長幅の拡大を行うことで非線形効果の対策を行った。図2.3.1.1-5に励起光の入射方法による熱負荷の分散の概念図、図2.3.1.1-6に励起方法によるファイバー端温度の計測結果を示す。

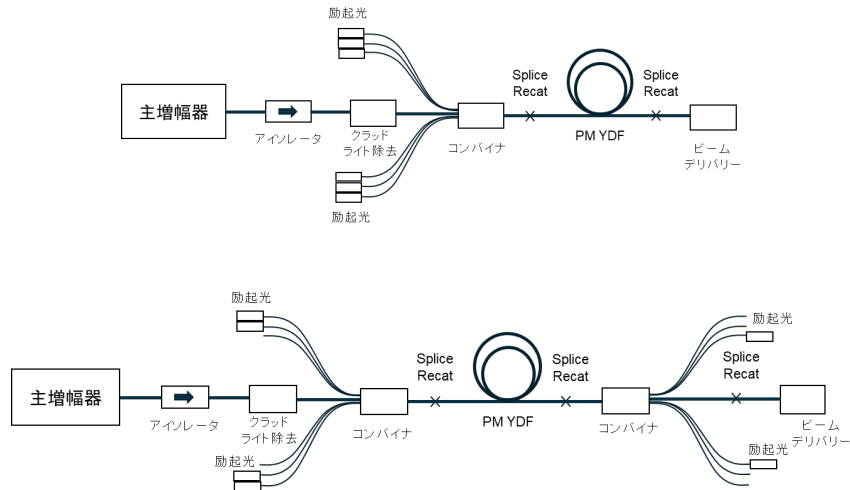


図2.3.1.1-5 種光源の励起方法（上：前方励起 下：両方向励起）

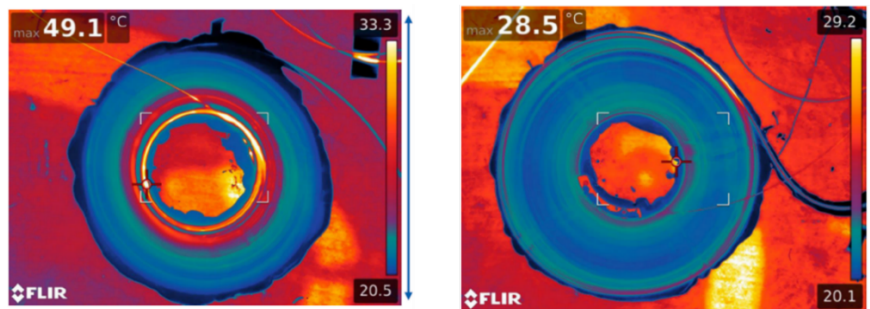


図2.3.1.1-6 種光源の励起方法によるファイバー端温度（左：前方励起 右：両方向励起）

TMI発生の際の閾値向上の対策として、前面励起を両方向励起にすることでファイバーの中心の温度が下がっていることを確認した。

●ビーム結合

種光源2本に対してTFPを用いて偏光結合を行った。偏光合成の構成図を図2.3.1.1-7に示す。種光源Aの単体出力は1910W、種光源Bの単体出力は1590Wであり、結合後ビーム出力が3240Wとなり結合効率約92%を確認した。

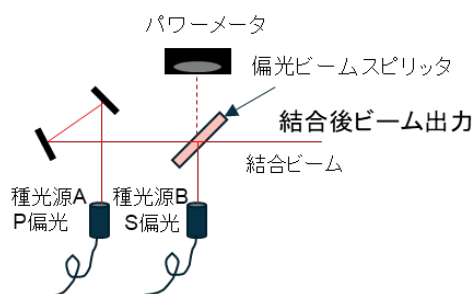


図2.3.1.1-7 偏光ビーム結合構成図

2. 3. 1. 2 固体増幅

Nd:YAG のレーザー媒質を用いて種光源の固体増幅の試験を実施した。

Nd:YAG (0.8%, $t=0.5\text{ mm}$, $\phi=50\text{ mm}$) とノンドープ YAG ($t=4.7\text{ mm}$, $\phi=50\text{ mm}$) セラミックスを接合したディスク型のレーザー媒質を使用した。

ディスク型は一般に層厚が薄いため、吸収率が低いという課題がある。この対策として、励起光 (808nm) で吸収されなかった光を励起光として再度媒質に入力することで励起光に対する吸収パワーの比率を増加させる。励起光を吸収した媒質は底面から水を吹き付ける水噴流方式で冷却を行った [1]。エネルギーが蓄えられた状態のレーザー媒質に種光源 (1064nm) を入射することで種光源の出力を増加させる。固体増幅試験の構成イメージを図 2. 3. 1. 2-1、実際の試験時の写真を図 2. 3. 1. 2-2 に示す。

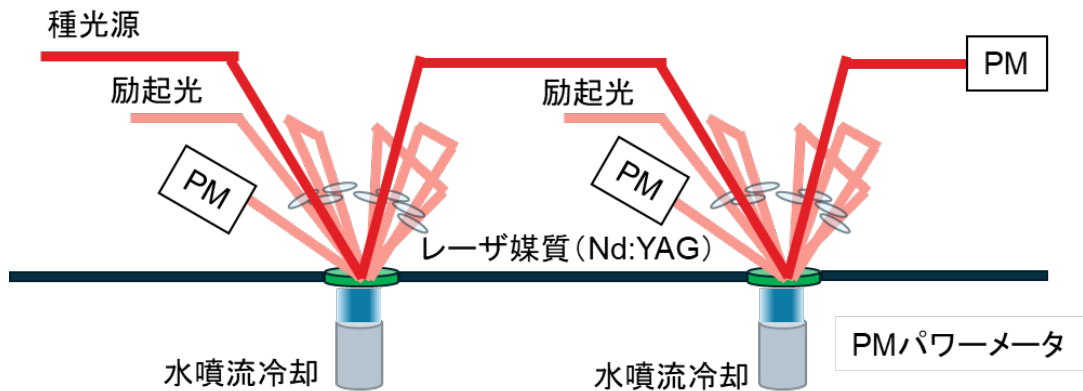


図 2. 3. 1. 2-1 固体増幅試験の構成イメージ

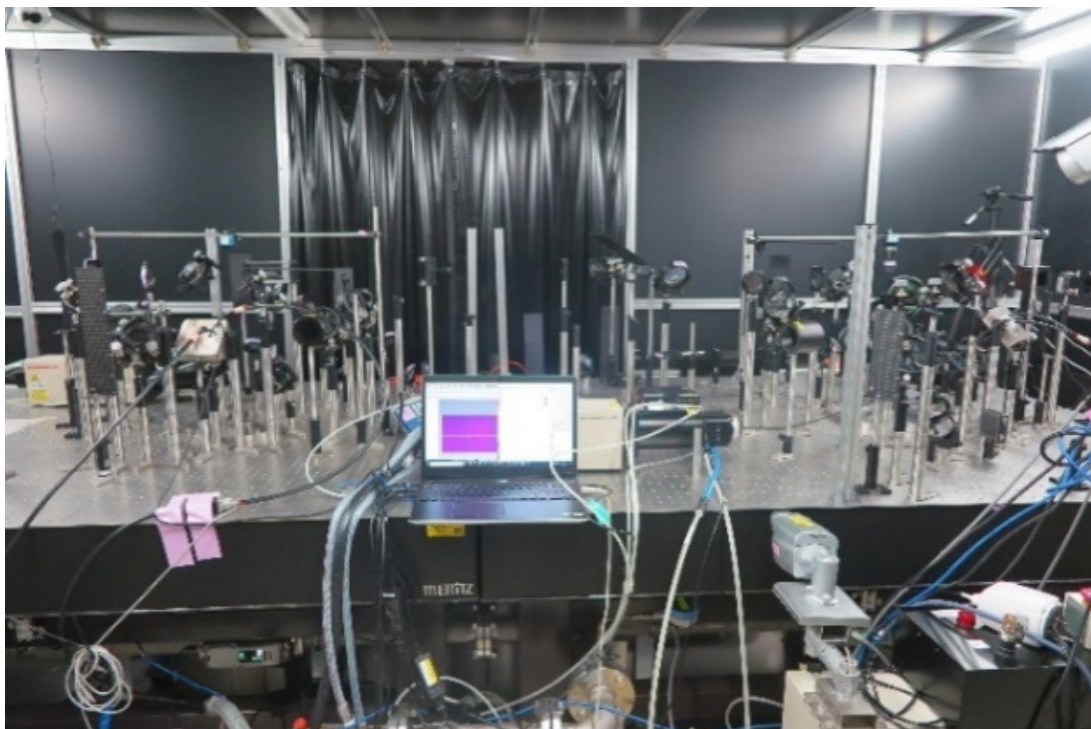


図 2. 3. 1. 2-2 固体増幅試験時の写真

●励起光複数回入射による吸収率計測

励起光の吸収率を高めるために励起光をレーザー媒質に複数回入射させることで励起光の吸収率を向上させている。複数回入射した際の媒質上でのプロファイルを図 2.3.1.2-3 に、入射回数と吸収エネルギーの計測結果を図 2.3.1.2-4 に示す。6 パス入射において約 75%の吸収率を計測した。

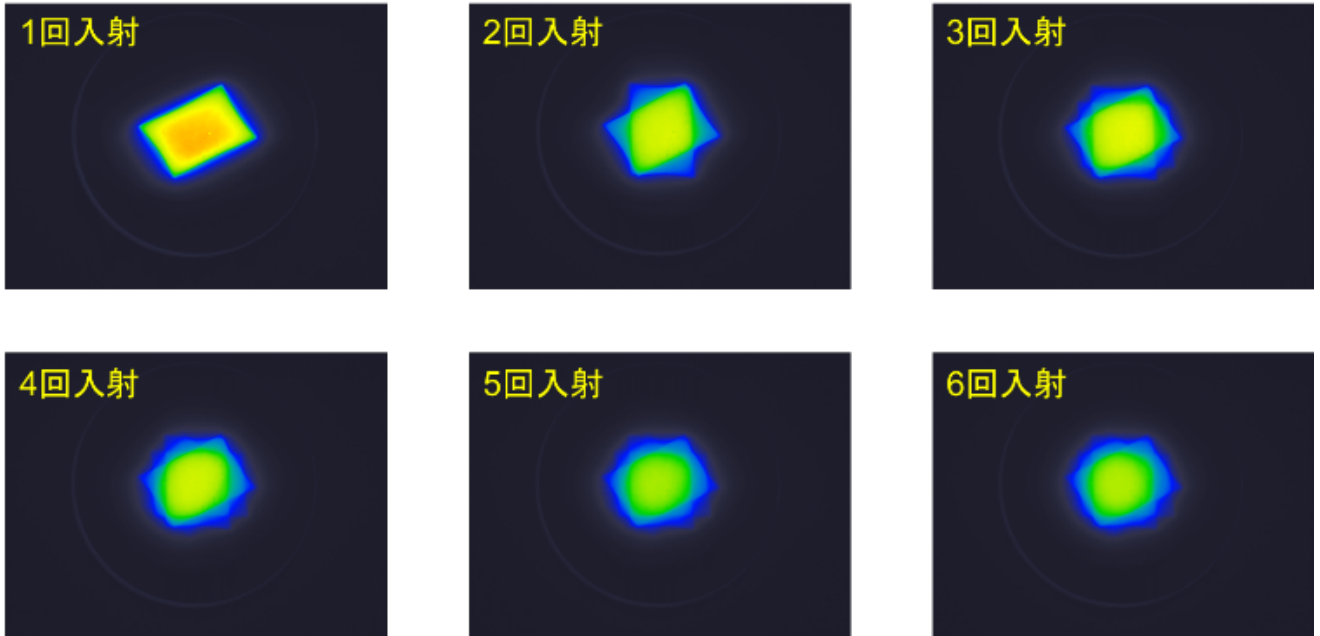


図 2.3.1.2-3 励起光複数回入射のプロファイル

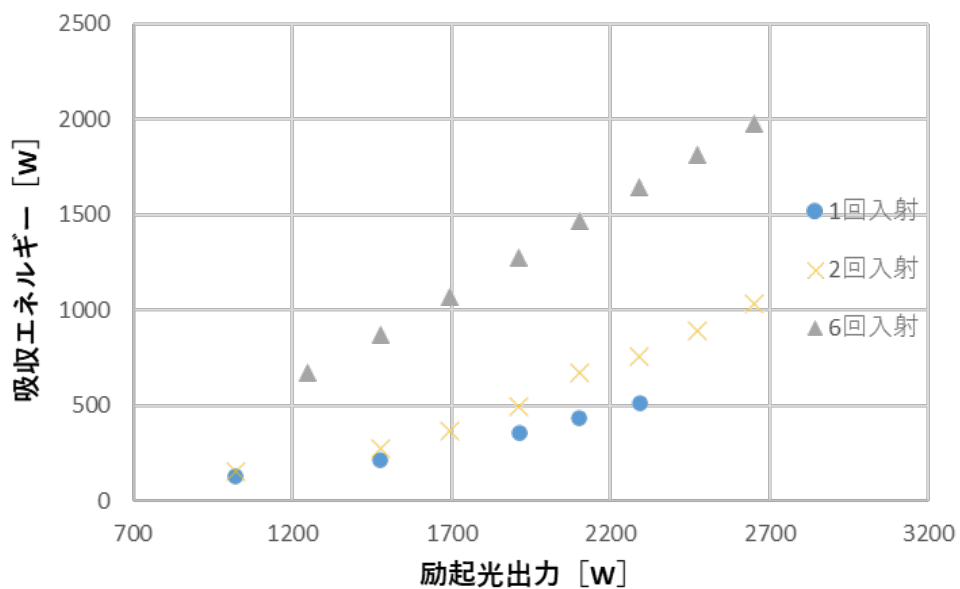


図 2.3.1.2-4 固体増幅試験 (2 段増幅) の結果

●2 媒質増幅試験結果

2 段の固体増幅器に対して、最大出力の種光源（≒3.2kW）を入射した。非励起時の出力は、種光源出力が 3036 W と減少している。これは増幅器の増幅器の光学系ロス（2 段のレーザー媒質及び各光学素子）での光学損失が主な要因である。

励起光は 4 回/段の入射を行い、種光源は 1 回/段の入射で伝送ビームの出力を増幅する。励起光の出力を徐々に増加させ増幅後の伝送ビーム出力を計測した結果を図 2. 3. 1. 2-5 に示す。伝搬ビームの吸収励起光 1240W 入射時に最大出力の 3394W（358W 増幅）を計測した。900W 入力時の吸収励起光に対する増幅量は約 40%であった。

なお、増幅後のビーム品質については、計測前に種光源が破損してしまったため計測ができなかった。

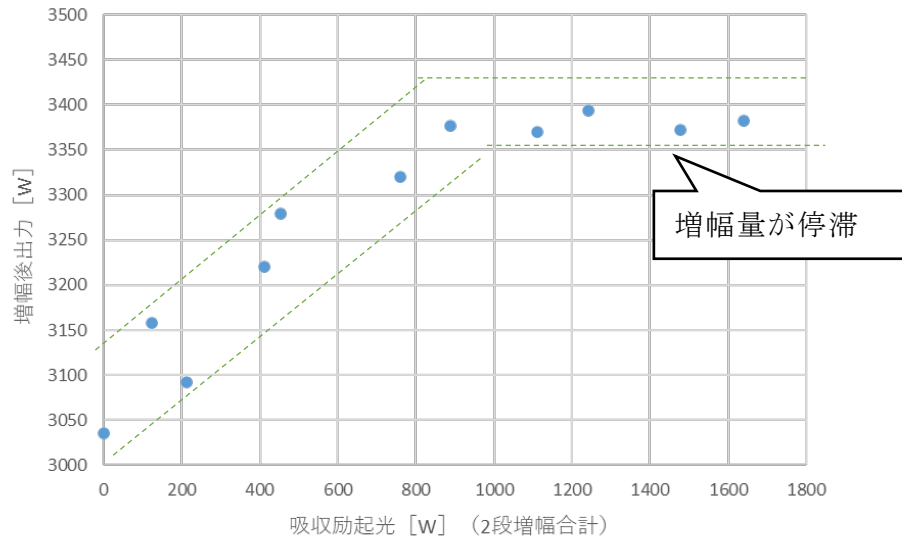


図 2. 3. 1. 2-5 固体増幅試験（2 段増幅）の結果

励起光吸収が 900W 程度までは励起光を入力するにつれて種光源の出力が増幅されるが、吸収励起光が 1000W を超えたあたりで増幅量が停滞する。1 段増幅で実施した場合や励起光径を変更した場合でも、試験条件により増幅量の増減はあるが高励起状態では増幅量が停滞する事象は変化しなかった。

増幅量が停滞する理由について、増幅試験時にサーモカメラを用いて計測した表面温度や蛍光波長の測定を行い原因について推定する。

●増幅量停滞の原因調査

増幅量が停滞する原因は励起光吸収による温度上昇であると推定した。

Nd : YAG レーザー媒質は温度が上昇すると図 2.3.1.2-6 に示すように誘導放出断面積が低下する[2]。グラフから誘導放出断面積の温度依存性 $\sigma_{em}(T)$ は

$$\sigma_{em}(T) = 2.33 \times 10^{-19} - 0.0038 \times 10^{-19}T \text{ [cm}^2\text{]}$$

と書ける。

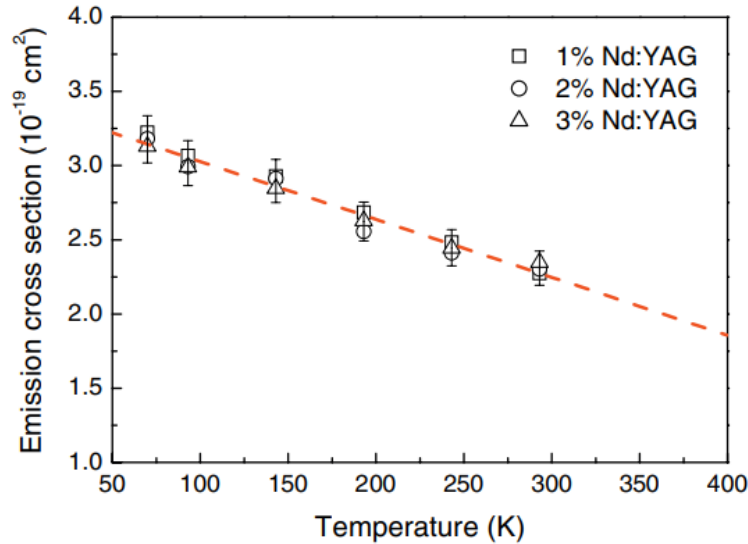


図 2.3.1.2-6 誘導放出断面積の低下 [2] から引用

誘導放出断面積は温度の上昇に伴い低下する。増幅時の温度を盛り込んでシミュレーションを実施して、問題を単純化するために1媒質試験の試験結果と比較を行った。

図 2.3.1.2-7 に温度による誘導放出断面積の低下を加味した場合のシミュレーション結果と1媒質試験の試験結果を示す。シミュレーション結果では誘導放出断面積の低下により高い励起密度では増幅量の減少が発生するが、増幅が停滞することはない。一方で実施の試験結果では吸収励起光密度が 1200W/cm²を超えたあたりから増加量の停滞が確認された。

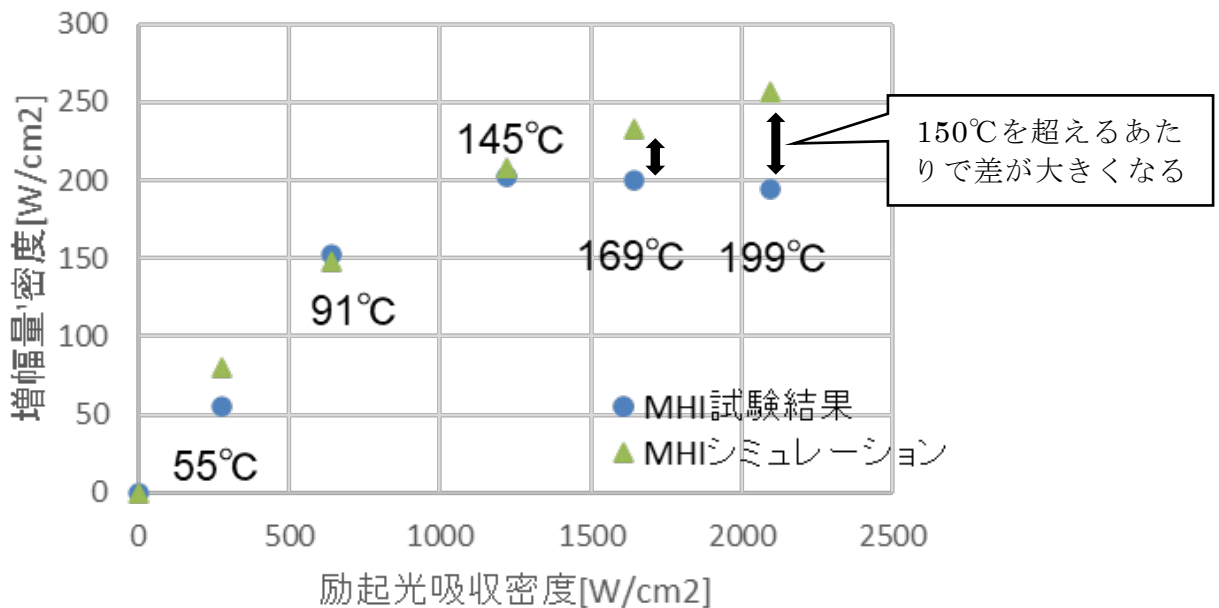


図 2.3.1.2-7 増幅量密度の試験結果とシミュレーションの比較

これらの違いは誘導放出断面積による違いのみでなく、温度上昇による蛍光波長と種光源波長のズレにより蓄えられたエネルギーが増幅に寄与しなくなったことが原因と考えられる。Nd:YAG 媒質の表面温度ごとに取得された蛍光波長と種光源波長を正規化してまとめたグラフを図 2.3.1.2-8 に示す。媒質温度が 84℃程度ではピークが揃っており、レーザー媒質に蓄積されたエネルギーは誘導放出されてレーザーの増幅に寄与するが、媒質温度が 151℃の時は蛍光波長のピークが長波長側にシフトしており、固体増幅に寄与しないエネルギーは自然放出して散乱されることが考えられる。

84℃の時の種光と蛍光波長のマッチング率を 100%とした時に 151℃のマッチング効率は約 87%となっているため 13%のロスとなっている。これは図 2.3.1.2-7 における 150℃を超えるあたりでの試験結果とシミュレーション結果の差分の量とも整合的である。

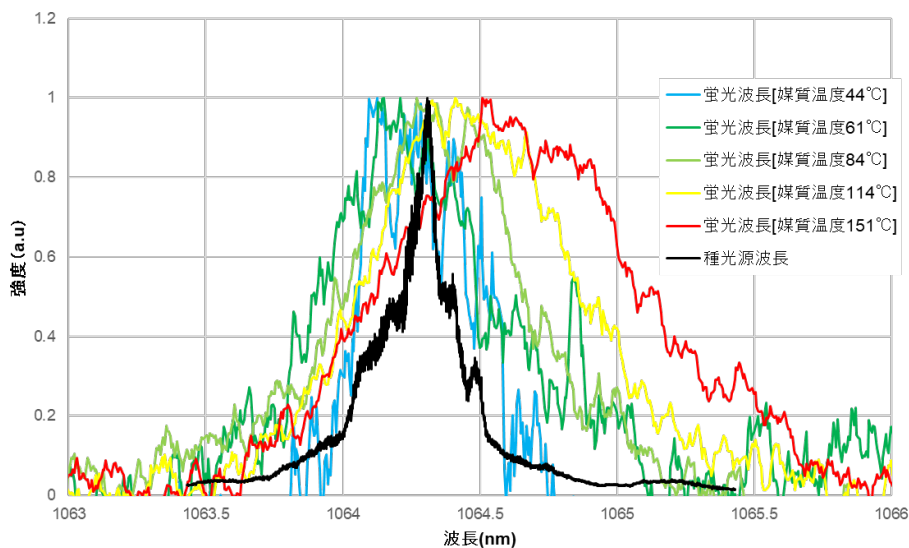


図 2.3.1.2-8 蛍光波長と種光源波長

●増幅停滞の対策

高励起（高温）状態で増幅量が停滞する原因は種光波長と蛍光波長のズレによるものと推定したため、種光源のシード光を発生させるレーザーダイオードの温度を調整し、高励起状態において種光波長を蛍光波長と一致させる方法を試みた。しかし、図 2.3.1.2-9 に示す通り、種光源波長をシフトすることにより波長幅が広がり全体的な強度が下がってしまったため、増幅効果の向上は確認できなかった。ファイバー内に FBG (Fiber Bragg Grating) を設けていることや位相変調をしていることで、狭帯域のままシフトしなかったと考えられる。

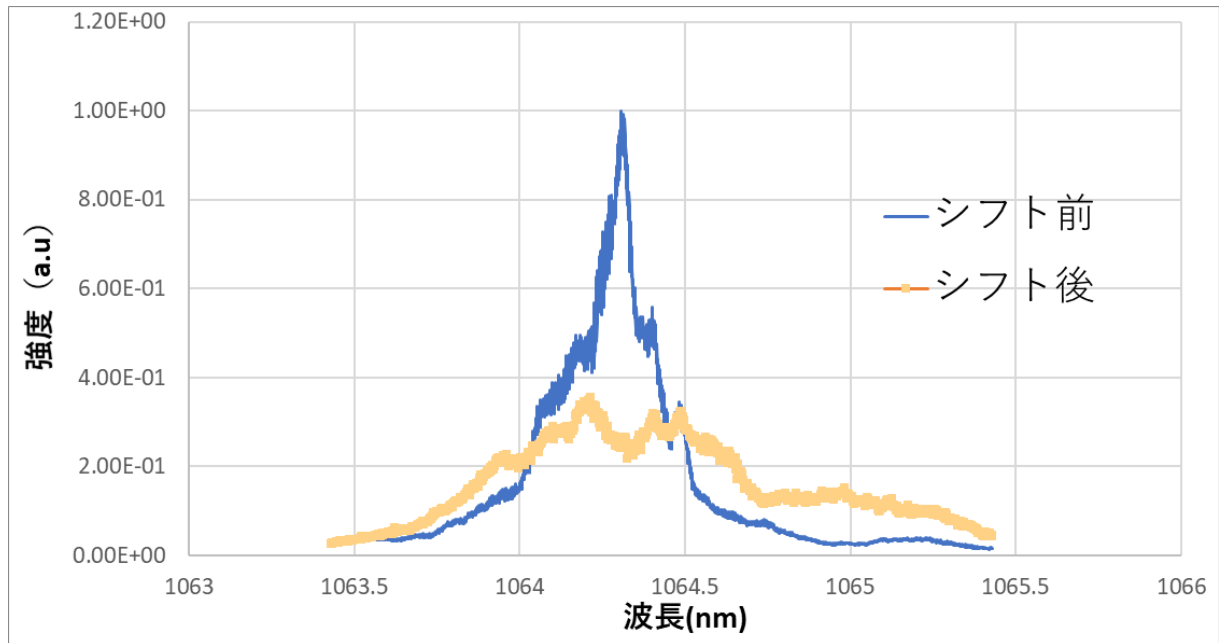


図 2.3.1.2-9 種光源波長シフト試験の結果

温度上昇に対する対策としてドープメントを現在の Nd から Yb に変更することで、吸収波長と蛍光波長の波長差が小さくなりストークス効率が向上する。

現在の Nd:YAG レーザーでは励起波長が 808nm、発振波長が 1064nm であり、ストークス効率は約 76% となって 24% は熱に変換される。Yb:YAG の励起波長は 940nm または 969nm で発振波長が 1030nm であるため、ストークス効率はそれぞれ 91% または 94% になり、Nd:YAG に対して発熱量が 3/8 または 1/4 になることで温度上昇を防ぐことができる。

一方で、室温における誘導放出断面積は Nd:YAG の方が高く Yb:YAG は高強度励起が必要となる。Yb:YAG の蛍光波長は Nd:YAG と比較して広域であるため、温度が原因の波長シフトによるマッチング効率の低下は発生しにくいと考えられる。

図 2.3.1.2-10 に Nd:YAG の蛍光寿命の温度依存性を示す。なお、Nd:YAG の蛍光寿命は温度によりほとんど変化がなく、Nd のドープ濃度により蛍光寿命が短くなることが論文により発表されている [2]。温度による蛍光寿命の変化がないため、蛍光寿命が増幅効率の低下の原因である可能性は低い。

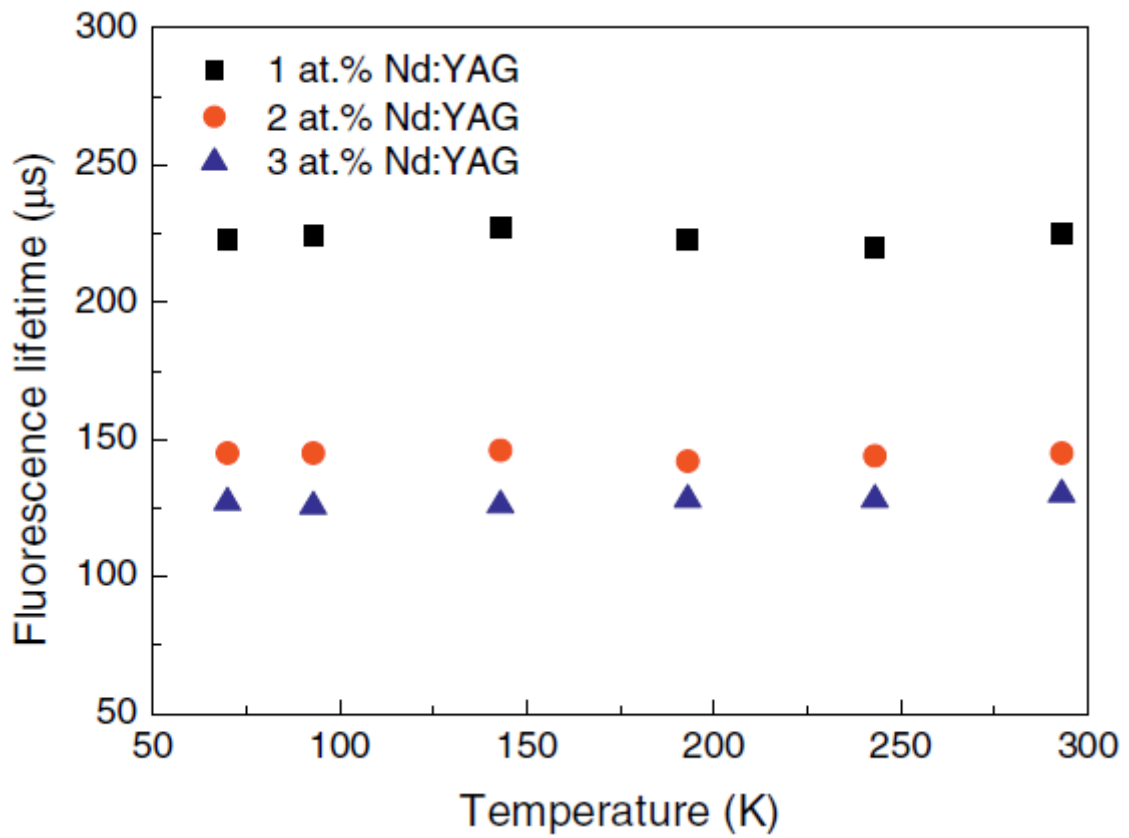


図 2. 3. 1. 2-10 Nd:YAG の蛍光寿命の温度依存性 [2] から引用

●増幅量シミュレーション結果

種光源の目標仕様 4kW に対して、2 段階増幅した場合のシミュレーション結果を図 2.3.1.2-11 に示す。温度上昇は実際の試験データで取得した吸収励起密度から温度の上昇率を算出した。

発振試験でレーザー媒質の表面温度が 300℃まで増幅した実績があるため、2 段階増幅を実施することで蛍光波長と種光波長にずれがなければ 1kW 以上の増幅が見込める。

上記より、波長シフト機能を種光源に付与することで 1kW 以上の固体増幅をすることが可能である。

更なる出力上昇の方法として、固体増幅段数の増加、励起面積の拡張と励起光出力の増加、固体増幅光学系のロス低減などがある。

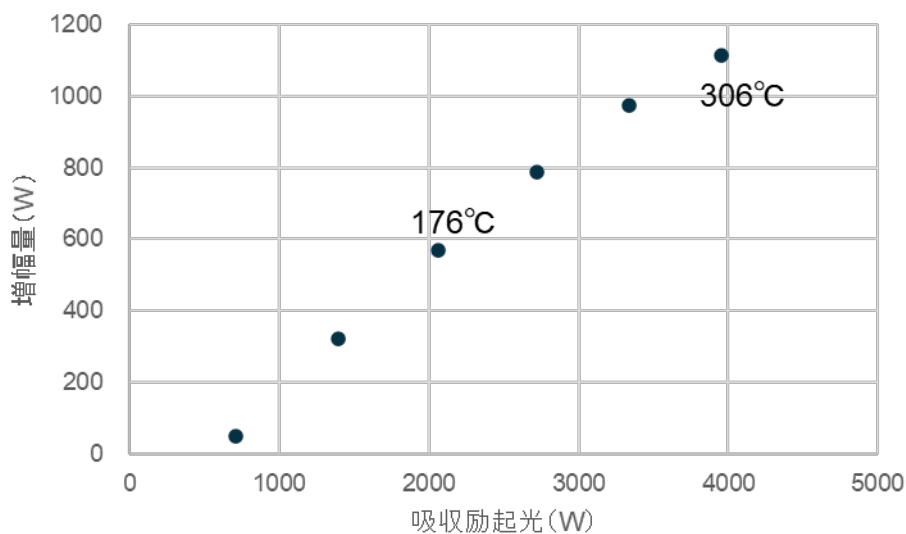


図 2.3.1.2-11 2 段階増幅シミュレーション結果

2. 3. 1. 3 10kW 伝搬レーザーに向けた拡張性検討

10kW 出力の伝搬レーザーの製造に向けて、拡張性検討を実施した。

現状 2kW/本×2 本（目標仕様）の種光源を 3kW/本以上×3 本の種光源に性能を向上させ、ビーム結合をした種光源を固体増幅することで 10kW の伝送ビームを製造することを検討する。

種光源の高出力化の制約となっているのは非線形効果であり、コア径の拡大をするとともに屈折率プロファイルのコントロールしたファイバーを用いることで非線形効果の閾値を上昇させ 3kW まで出力が向上する見込みである。

表 2. 3. 1. 3-1 に本研究で製造した狭帯域・高品質のファイバーレーザーと近年発表されている高品質・狭帯域ファイバーレーザーの文献の比較を示す。製造したファイバーレーザー高出力・高品質・狭帯域・偏光保持により非線形効果に対する対策を実証し、製造技術を確立した。

上記に示す新しいファイバーを用いた 3kW のファイバーレーザーにすることで最新の文献と同レベルのトップクラスファイバーレーザーとなることを確認した。

表 2. 3. 1. 3-1 本研究のファイバーレーザーと近年の文献の比較

項目	本研究の ファイバーレーザー	Ma et al. (2016). [3]	Chales et al. (2016). [4]	Wang et al. (2021). [5]
出力	2.04kW ※	1.89 kW	3.1 kW	3.25 kW
ビーム品質 M ²	1.3 下	x 1.19, y 1.27	< 1.15	M2 < 1.22
中心波長	1064.3nm	1064 nm	1066 nm	1064 nm
波長幅	0.35nm	0.17 nm	0.045 nm	0.076 nm
偏光保持	15dB 以上	PER 15.5 dB	PER 12 dB アクティブコントロール無し	PER 約 15 dB

※コア径拡張により 3kW 以上の出力可能な見込み

本研究において、2 本の種光源に対して偏光結合を行ったが 3 本以上のレーザーを偏光結合するには別の結合方式を実施する方法がある。狭帯域で 3 本以上のビームを結合する方法としてコヒーレント偏光結合 (Coherent Polarization Beam Combining) がある。位相が揃った状態で偏光結合を行うことで結合後のビームが直線偏光になり、さらに偏光結合をすることが可能となる。本研究では 3 本以上のコヒーレント偏光結合について種光源の構成案についても検討を行った。コヒーレント結合には同一シード光からのビームに対して増幅段階も含めて光路長差をコヒーレント長以下にする必要がある。図 2. 3. 1. 3-1 に 2 本のコヒーレントビーム結合の構成を示す。コヒーレント偏光結合はビーム品質を維持しながら、総出力パワーを増幅できる可能性があり、500W レーザー 4 本の結合などが実証されている。[6]

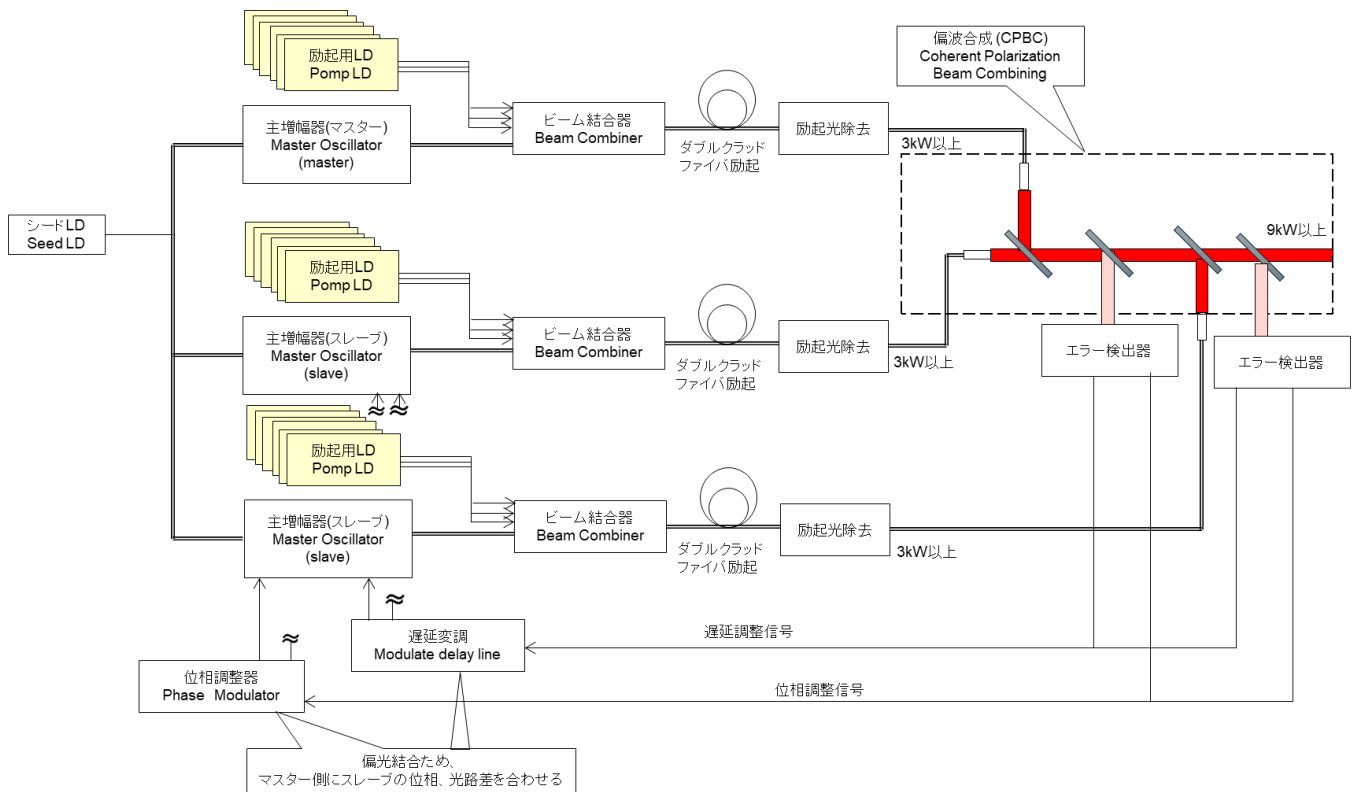


図 2.3.1.3-1 コヒーレントビーム結合の構成

結合した 9kW の種光源に対して、本研究で使用した固体増幅器を用いて 1kW の増幅が可能な見込みであり、10kW レーザーシステムへの拡張が可能である。

本研究により 100kW 級レーザーの開発に向けて取得すべき「高出力」で「高品質」な種光源の製造技術を確立し、「偏光保持」かつ「狭帯域」なビームを得ることで偏光結合や波長結合にも繋がる成果を得ることができ、さらに「固体増幅」技術により出力の更なる増幅ができることも確認した。

[1]平成 30 年度防衛装備庁 安全保障技術研究推進制度「ゼロフォノンライン励起新型高出力 Yb : YAG セラミックレーザー」

[2] Dong, J. A. Rapaport, M. Bass, F. Szipocs, and K. I. Ueda, “Temperature-dependent stimulated emission cross section and concentration quenching in highly doped Nd³⁺: YAG crystals, Phys. stat. sol. (a) 202(13), 2565-2573 (2005).

[3] Ma, P. et al. 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality , Opt. Exp. 24(4) (2016).

[4] Chales, X.Y. et al. “Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier, Opt. Lett. 41(22) (2016).

[5] Wang, Y. et al. 3.25 kW all-fiberized and polarization-maintained Yb-doped amplifier with a 20 GHz linewidth and near-diffraction-limited beam quality. Applied Optics 60(21) (2021).

[6] Zenjin, L. et al. High-power coherent beam polarizationcombination of fiber lasers: progress andprospect. Journal of The Optical Society of America B-optical Physics (2017).

2.3.2 探索ビーム

探索ビーム用レーザー（以下「探索ビーム」という。）として、2019年度はドイツのエッジウェーブ社製のスラブ型 MOPA 方式ナノ秒レーザーを日本総代理店 ビーム株式会社から購入した。仕様は表 2.3.2-1 に示す。

表 2.3.2-1 スラブ型 MOPA 方式ナノレーザーの仕様

波長	1030nm
周波数	1 ショット～20kHz
パルス幅	12ns 以上 可変
平均出力	100W@10kHz
ビーム品質 M^2	< 1.3
ビームサイズ	3mm

2.4 照射光学系の開発

照射光学系は伝送ビーム、探索ビームの射出、及び受信光を波面センサに導く機能を有する望遠鏡である。

2.4.1 照射光学系本体 構成

照射光学系の諸元を表 2.4.1-1 に示す。

望遠鏡の方式としてはガリレオ式であり、収差低減のために複数枚のレンズを組み合わせて製作している。そのうち1枚のレンズが電動で移動できるようになっており、これによって100m～5kmにフォーカスを合わせることができる。製作可能性から600mmの有効開口を設定した。出射ビーム直径及び波面計測範囲は同じ範囲とする必要があることから両方とも300mmとした。ビーム指向範囲は $\pm 0.5^\circ$ と設定した。図 2.4.1-1 に示すように受信光は直径600mmで受信し、1/10倍されて直径60mmとなる。そのうち直径30mmが波面センサ(供試体)に取り込まれ、その外側の光は破棄される。照射光学系及び回転機構の内部構造を図 2.4.1-2 に示す。

表 2.4.1-1 照射光学系の諸元

項目	要求値
有効開口	600mm
出力	10kW
使用波長域	高出力レーザー1 μ m帯
倍率	10倍
入射ビーム直径	30mm (1/e ²)
出射ビーム直径	300mm (1/e ²)
ビーム入射角	$\pm 5^\circ$
ビーム出射角	$\pm 0.5^\circ$
照射距離	100m～5km
波面歪み	$\lambda/10$ 以下
波面計測範囲	$\phi 300$ mmで受信 レデューサ後、直径30mmの範囲で評価

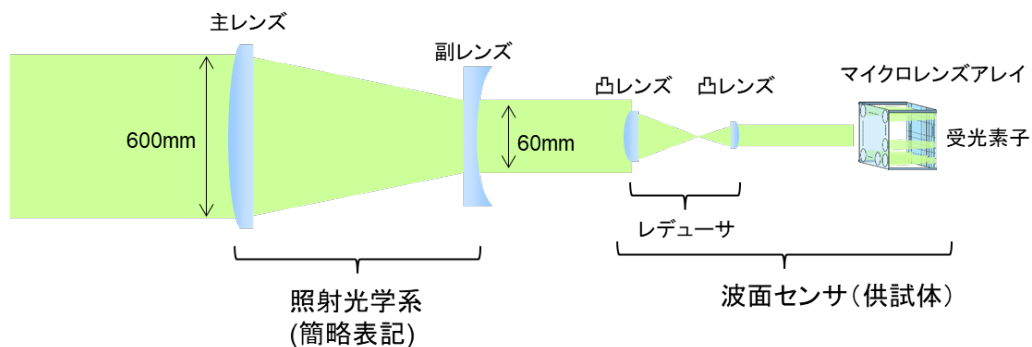


図 2.4.1-1 照射光学系と波面センサ(供試体)の光学的インターフェース

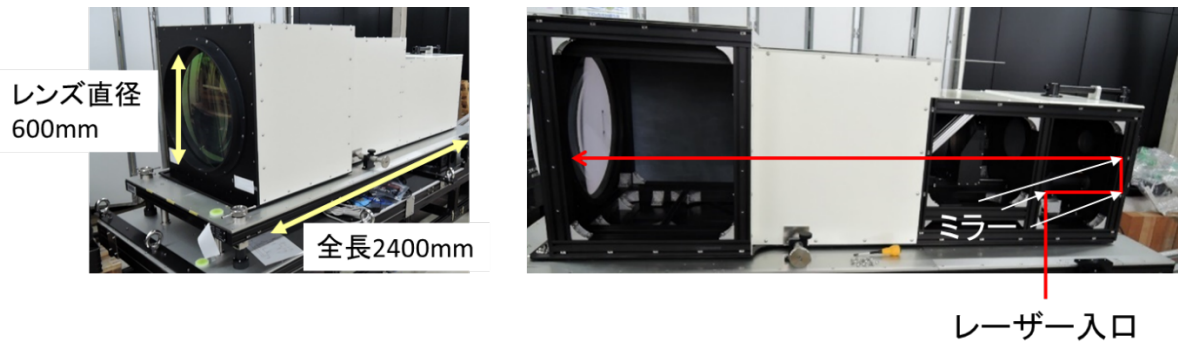


図 2.4.1-2 照射光学系及び回転機構の内部構造

2.4.2 照射光学系本体 耐力試験

照射光学系で使用される光学系が 10kW のレーザーに耐えられることを確認する。照射光学系の内部光学系のうち、もっともパワー密度が高いのはビーム径を拡大する前のミラー(図 2.4.1-2 のレーザー入口付近)であるため、テストピースを準備して耐力試験を実施することとした。図 2.4.2-1 に示す試験構成にて 10kW のレーザーを照射して照射光学系に使用するミラーの温度上昇を確認した。遠距離伝搬試験での連続使用時間は 1 分程度を想定しているため、それよりも十分長い 10 分間試験を実施した。熱電対温度計測データを図 2.4.2-2 に示す。10 分間の照射後でもミラーの中で最も温度が高い場所の温度は 80℃には到達せず、使用されている接着剤の使用温度上限である 80℃には到達しないことを確認した。

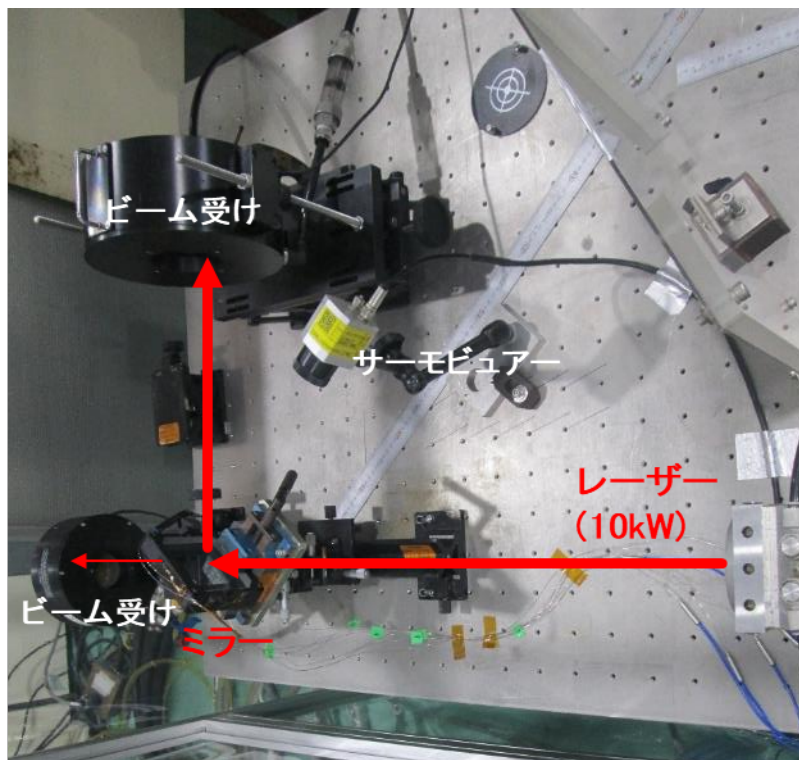


図 2.4.2-1 照射光学系耐力試験 試験構成

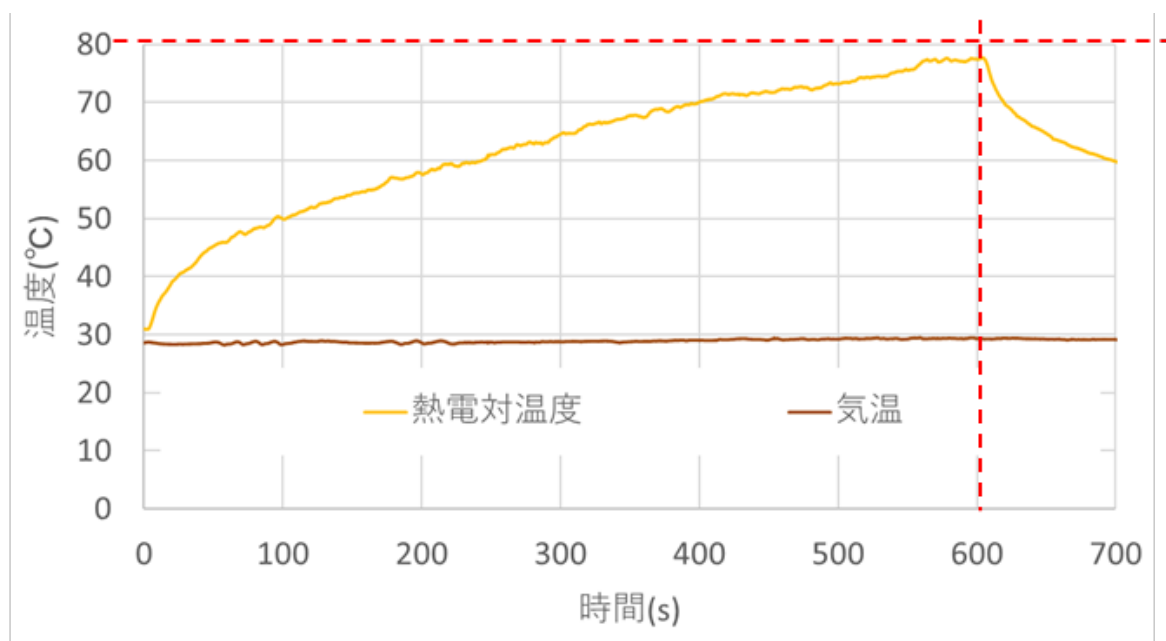


図 2.4.2-2 照射光学系耐力試験 試験結果

パルスレーザーに対する耐力は、遠距離伝搬試験で 10mJ、12ns のパルスレーザーを使用しても破損しなかったことにより確認した。

2.5 広角望遠鏡の開発

望遠鏡の構成要素であるレンズ、光検出器を組み上げ、望遠鏡鏡筒に組み付ける。また、望遠鏡単体での試験を行い、視野角、測定位置精度が要求精度を満たすことを確認した。焦点面検出器の統合試験を進めており、令和5年8月末までに総合評価を完了する。

この望遠鏡は2枚のフレネルレンズと焦点面光検出器からなる超広視野かつ高感度な望遠鏡である(図2.5-1)。



図 2.5-1 広角望遠鏡光学系外観

昨年度までに製作したレンズ2枚を当初の性能を引き出すために研磨を行った。その後試験用フレームに組み付け(図2.5-2)性能評価を行った。405nm レーザーを光学系に照射し、焦点面位置の計測を行った。その結果を図2.5-3に示す。

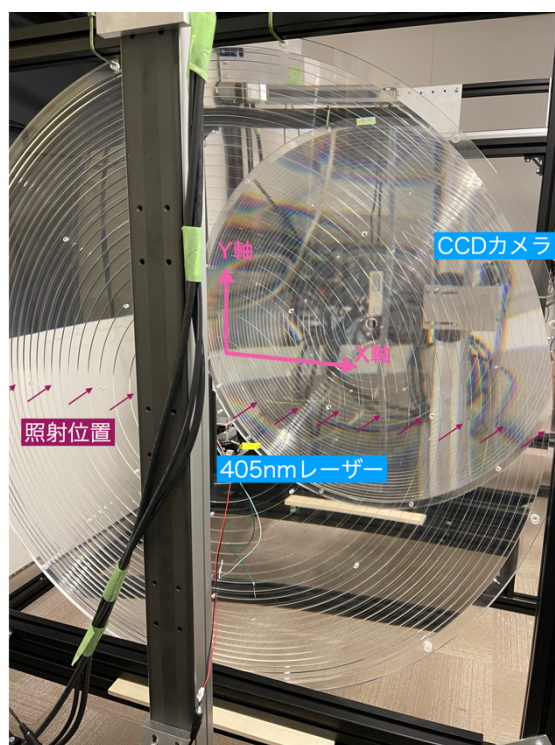


図 2.5-2 光学系評価セットアップ。望遠鏡開口部から焦点面方向を見ている。

その結果、実線で示される計算結果と点で示される測定値が1900mmの位置で一致していることがわかり、設計仕様である20度までの入射角度の光線が所定の位置に集光していることが確認された。

さらに、スポットサイズの評価を行った。光源405nmレーザーと検出器のCCDはそれぞれ2軸のスライダー(1.3m長)に設置され、光軸に垂直な面(X、Y軸)上での位置を指定できる。この装

置は、前面レンズにレーザー光の照射とスキャンを行い、焦点面位置の CCD で積分したイメージを取得して集光特性を計測できる。今回の計測では、光学系の光軸を基準として、レーザー光を入射角 0 度で水平方向に (X 軸に平行に) -400mm から 400mm を 50mm 間隔で前面レンズをスキャンし (図 2.5-4)、CCD で積分像を得た (図 2.5-5 左)。図 2.5-5 右は、開発した光線追跡コードで得た集光像である。さらに、その像を Y 方向に積分したプロファイルを図 2.5-6 に示す。赤線は測定値、緑線は光線追跡コードの計算値である。このとき、CCD と後面レンズの距離は 870mm であった。それに合わせ、光線追跡コードの設定も 870 mm とした。この結果からも、レンズは設計通りに製作されていることがわかる。レンズ表面には加工時の切削痕の残存が見られ、測定結果にもその影響がわずかながら出ていると思われる。今後さらに研磨を進め改善する。

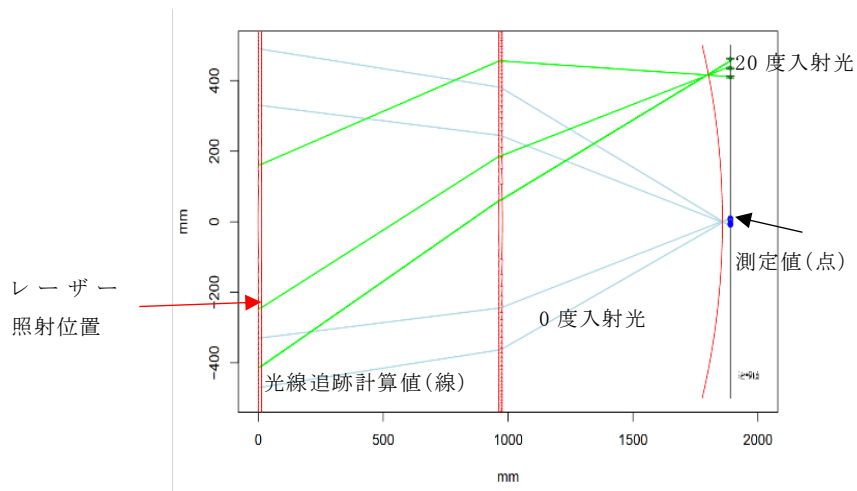


図 2.5-3 レーザーを前面レンズの様々な点に照射したときの集光位置測定値(横軸 1900mm のところにプロットされた点)。測定時の照射位置にレーザーを照射したときに予想される光路を線で示している。試験時には距離 1900mm の平面上で測定を行ったが 20 度入射の場合には焦点位置は少し前にずれる。

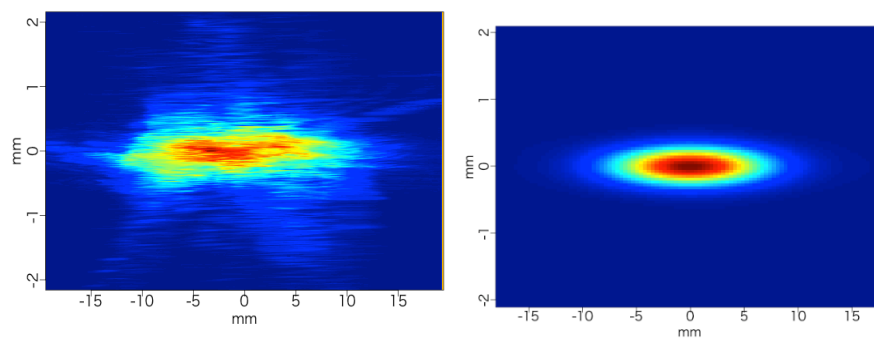


図 2.5-4 集光像 左:測定結果。右:光線追跡コードによる計算値。

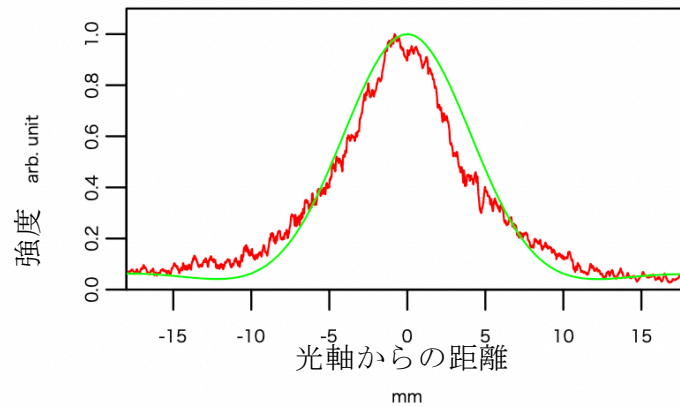


図 2.5-5 集光像の強度分布(図 2.5-4 左を Y 方向に積分している)。
赤線は測定値、緑線は光線追跡コードの計算値である。
それぞれのピークの高さを 1.0 に揃えている。

上記光学系で集められた光は光電子増倍管で電気信号に変換され、以降の電子回路でデジタル化(アナログデジタル変換ボード)し、高速移動物体の判別などの処理が行われる(Zynq ボード)。



図 2.5-6 アナログデジタル変換ボード(1枚、128ch分)(左)とその動作試験セットアップ(右)

図 2.5-8 左に製作したアナログデジタル変換ボードの 1 枚を示す。現在までに 50 枚のボードを製作しておりこれらの単体動作試験を行った。図 2.5-7 は動作試験用ソフトウェアの画面を示しており、接続した測定器を制御して各種電圧のチェック、閾値電圧の設定チェック、光子信号に相当する様々な大きさの電荷に対する検出性能の測定などを自動的に行うことができる。このソフトウェアを用いて今までに製作した 50 枚のボードの動作試験を行った。9 割以上のボードが正常動作することを確認した。アナログデジタル変換ボード、光電子増倍管を含めた光検出器モジュール(図 2.5-8 左)の組み立てを進めている。一方、デジタル信号処理を行う Zynq ボード(図 2.5-8 右)の試験を行ったところ不具合が発見されたので改修を行なった。これらの回路ボードと光電子増倍管を接続して焦点面検出器を構築した(図 2.5-9)。をして、望遠鏡に焦点面検出器を設置した様子を図 2.5-10 に示す。

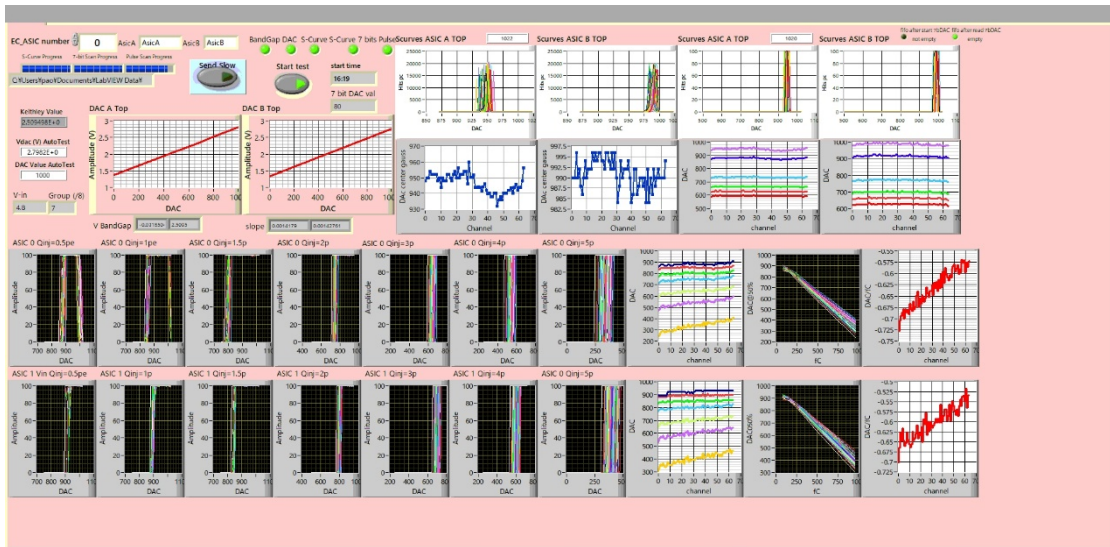


図 2.5-7 アナログデジタル変換ボード試験用ソフトウェア

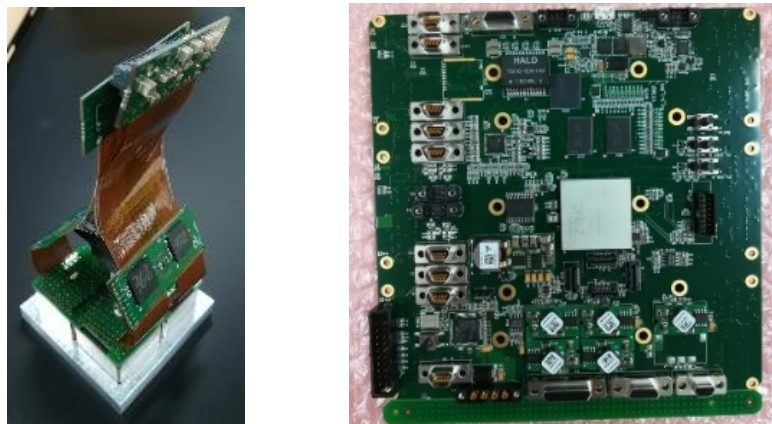


図 2.5-8 光検出器モジュール組み立ての様子(左)と Zynq ボード(右)

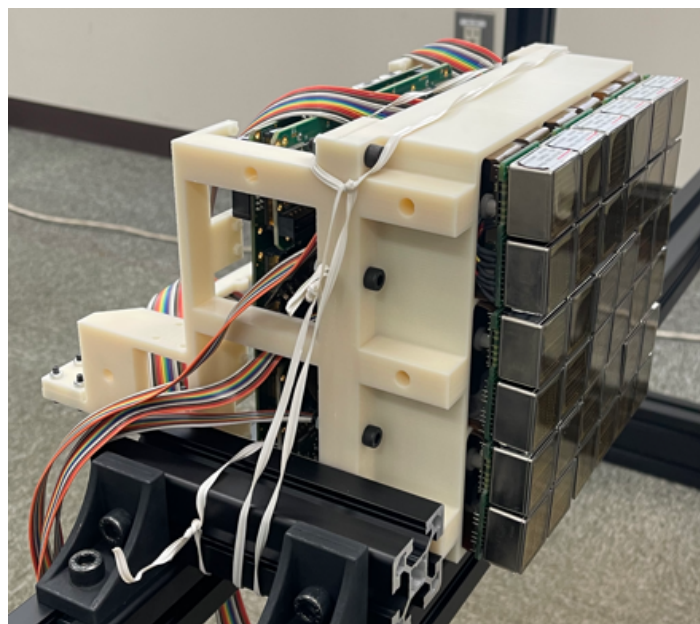


図 2.5-9 焦点面検出器

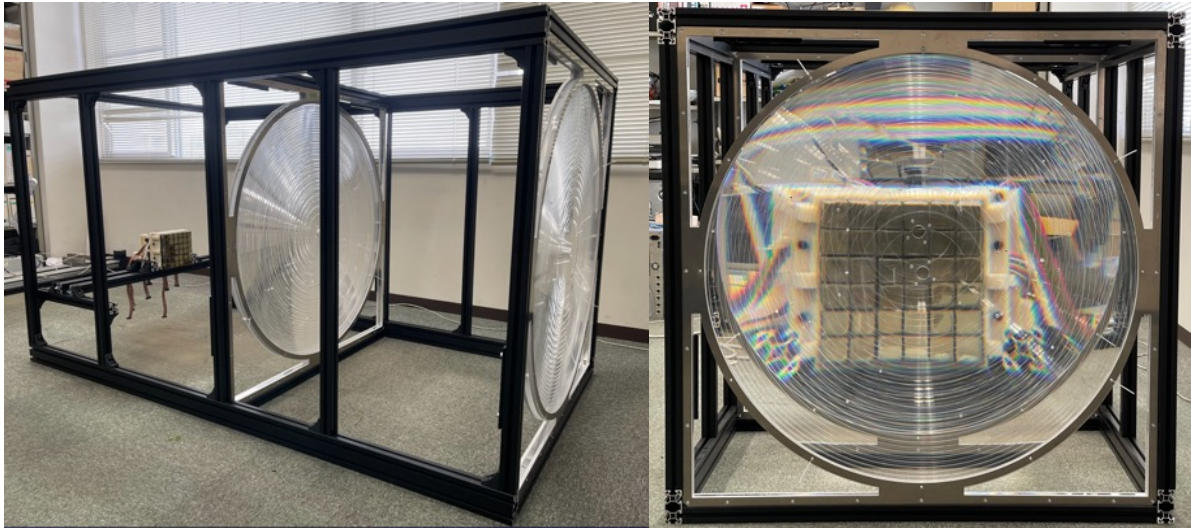


図 2.5-10 焦点面検出器と望遠鏡構造体 左:広角望遠鏡、右:フロントレンズ側からみた焦点面検出器の実像

2.6 組合せ動作試験

波面センサ(供試体)、可変形鏡(供試体)及び制御装置を接続し、システムとしての動作確認を行い、既知の擾乱に対して自動補正をする試験を行った。

2.6.1 組合せ試験 2 @ 理化学研究所

2.6.1.1 可変形鏡及び波面センサ動作確認試験

製作した供試体が正常に動作していることを確認するため、可変形鏡にてレーザーに位相を与え、その位相を波面センサで計測を行い、可変形鏡で与えたゼルニケ係数と波面センサで計測したゼルニケ係数を比較した。

図 2.6.1.1-1 に試験レイアウトを、図 2.6.1.1-2 に試験結果を示す。

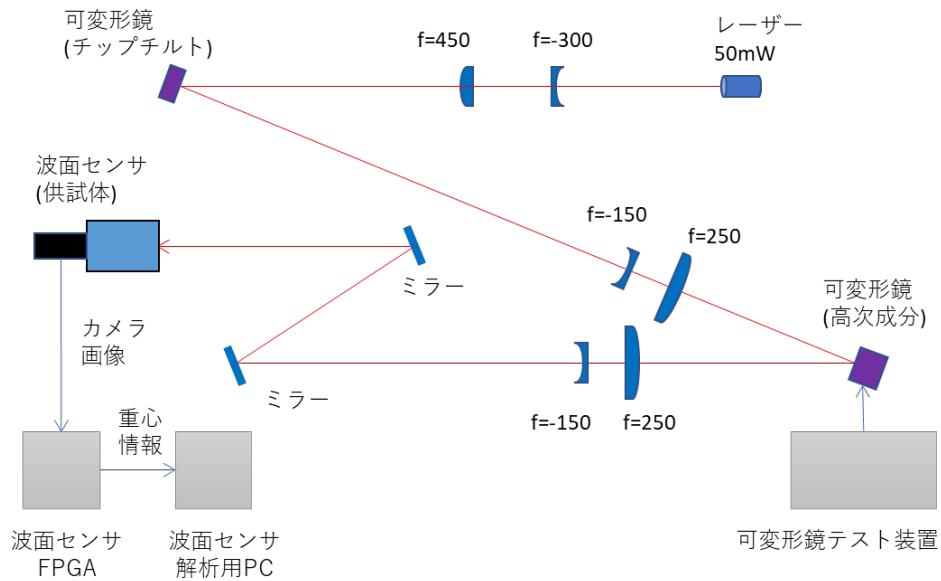


図 2.6.1.1-1 試験レイアウト

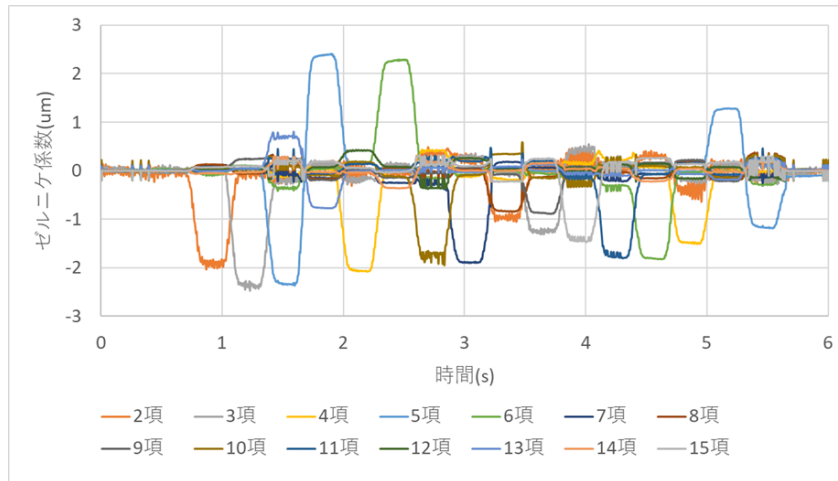


図 2.6.1.1-2 動作確認試験結果

2 項、3 項、5 項、5 項(負)、4 項、6 項、10 項、7 項、8 項、9 項、15 項、14 項、12 項、13 項、13 項(負)、の順に $2\mu\text{m}$ のゼルニケ係数を与えており、6 項目までは設定どおりの数値が検出された。7 項目以降に関しては、低次の項が反応する現象が見られた。これは高次成分に類似した形状をしている低次の項が反応しているためである。

2.6.1.2 波面補正試験

レーザーに模擬擾乱を与え補正する試験を行った。擾乱を与える機材として可変形鏡によるチップチルト、およびホットプレートによる熱の揺らぎを与えた。ホットプレートによる試験レイアウトを図 2.6.1.2-1 に、チップチルトによる試験レイアウトを図 2.6.1.2-2 に示す。

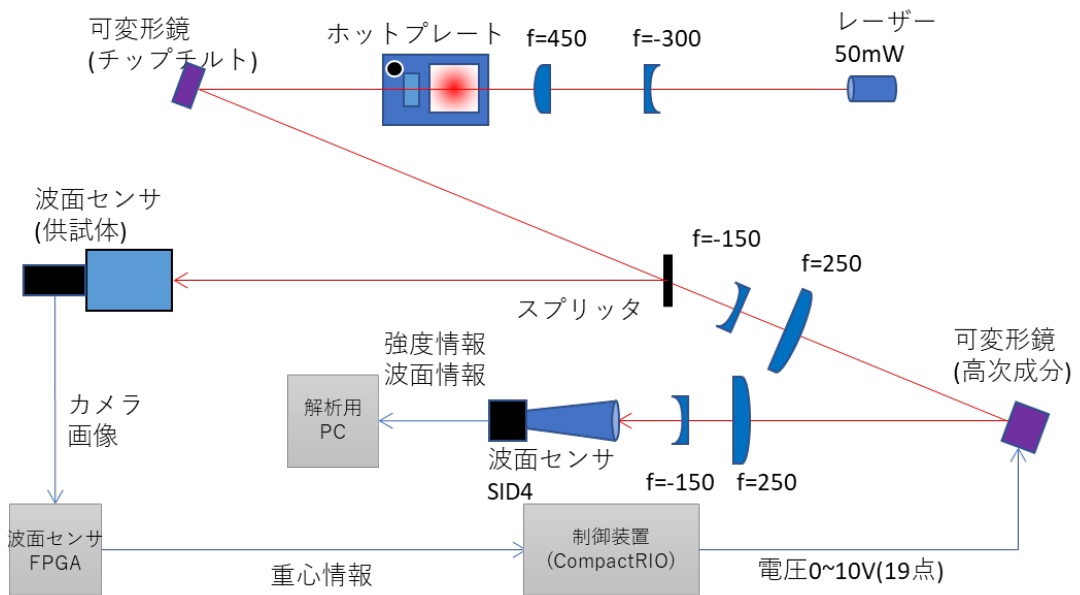


図 2.6.1.2-1 波面補正試験レイアウト

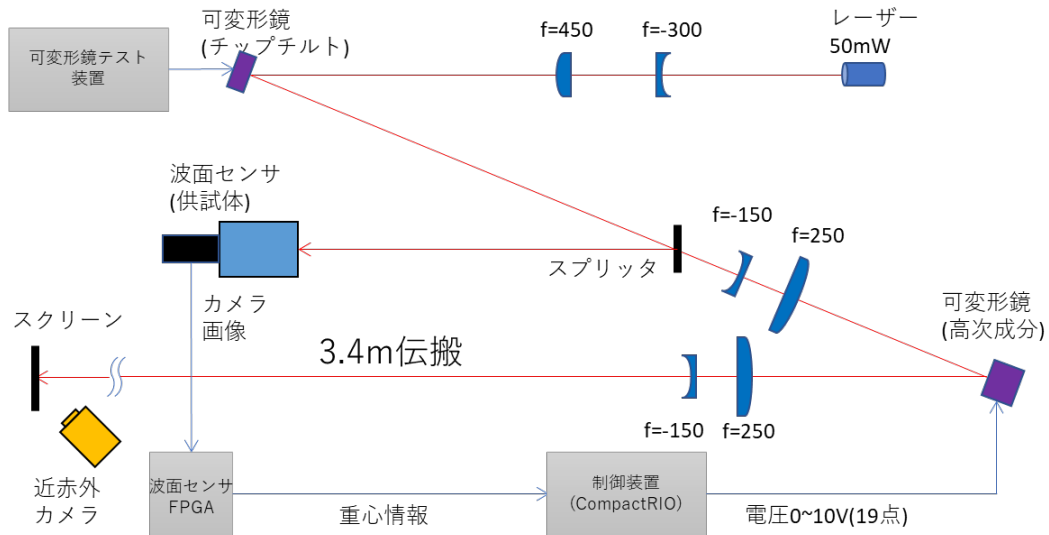


図 2.6.1.2-2 チップチルト補正試験レイアウト

波面補正試験について、レーザー出射口にホットプレートを設置し、大気を加熱することで擾乱を与えた。擾乱を与えたレーザーをサンプラーによって分離し、波面センサ(供試体)にてレーザーの波面位相を取得する。波面センサ(供試体)から得られた位相情報を波面センサ制御装置から PC へと送信し、共役となる位相を算出した後のち可変形鏡(高次成分)へ出力する。与えられた擾乱は可変形鏡によって補正され、補正されたレーザー光が波面センサ(SID4)にて検出される。補正の前後で擾乱の影響を抑えられているかを評価する。試験結果を図 2.6.1.2-3 に示す。

11 秒時点から補正を開始しており、波面位相 RMS の平均値は $0.44\mu\text{m}$ から $0.24\mu\text{m}$ へと抑えることに成功した。

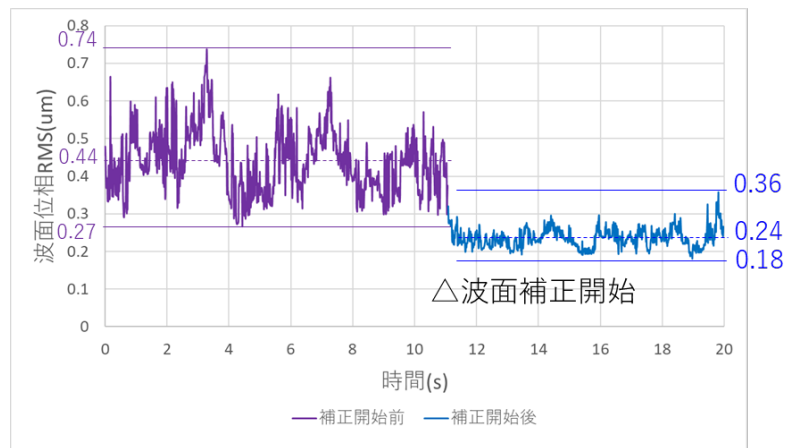
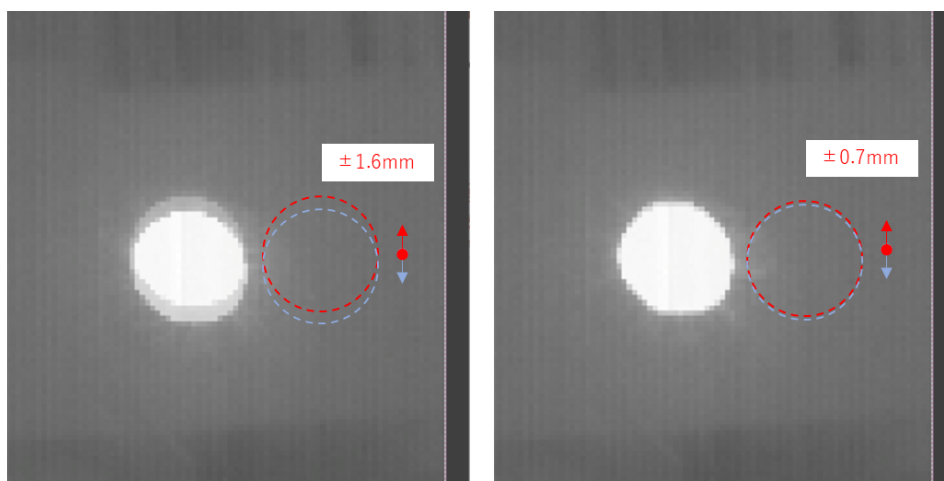


図 2.6.1.2-3 カタログ品波面センサによる波面位相 RMS

チップチルト補正試験について、可変形鏡(チップチルト)を用いてレーザーに揺れを断続的に与えた。その波面情報を波面センサ(供試体)で取得し、共役となる波面を可変形鏡(高次成分)にて与えレーザーの揺れを補正した。3.4m 先に設置しているスクリーン上にレーザーを当て、その動きを近赤外カメラにて観測した。観測結果を図 2.6.1.2-4 に示す。

図について、揺れを与えた際の上端と下端の写真を重ねている。補正を行う前は上下に $\pm 1.6\text{mm}$ の揺れがあったが、補正を行うことで揺れを $\pm 0.7\text{mm}$ まで抑えた。



補正前

補正後

図2.6.1.2-4 チップチルト補正試験結果

2. 7 遠距離伝搬試験

製作した構成品をシステムとして組み上げ、旧種子島空港にて遠距離伝搬試験を実施した。試験風景を図2.7-1に示す。近距離での試験から基線を伸ばし、最長1kmで試験を行った。チップチルト成分のみ補正する構成を図2.7-2左に、高次成分を補正するための高次成分鏡を加えた構成を図2.7-2右に示す。

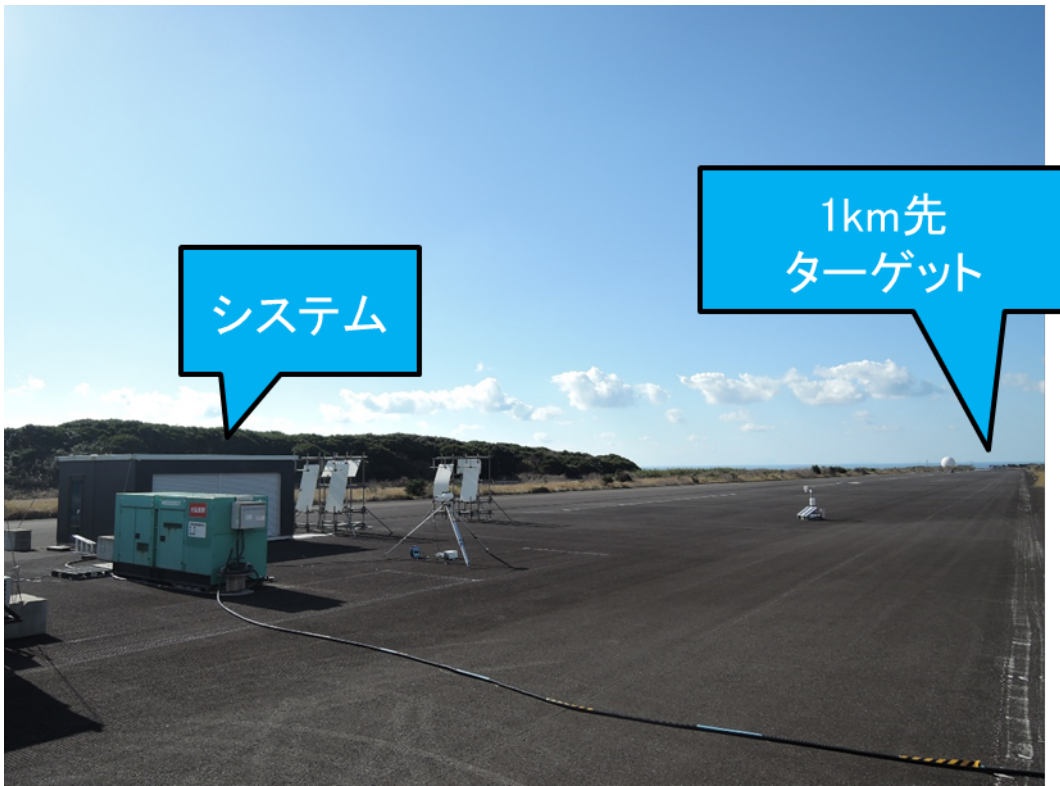


図 2.7-1 遠距離伝搬試験風景

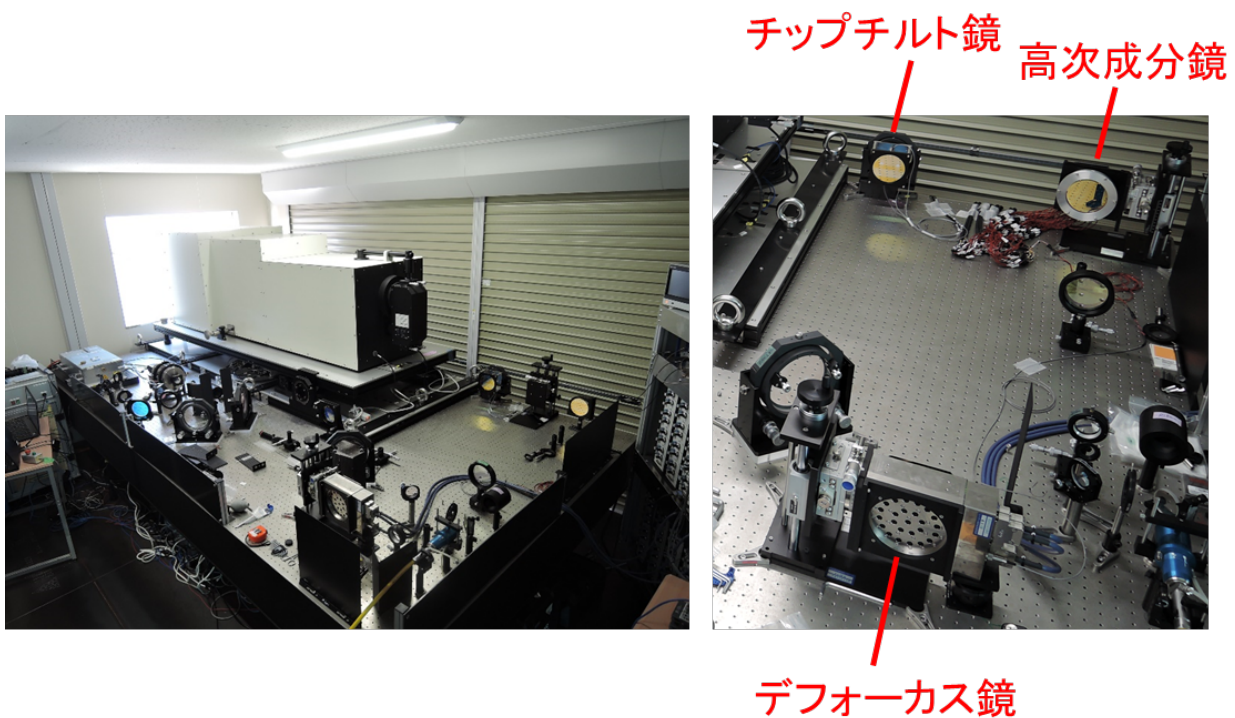


図 2.7-2 遠距離伝搬試験 システム写真

2. 7. 1 スケーリング試験

レーザーの伝搬特性を調べるため、伝搬距離 L 、レーザー出力 P 、出射ビーム半径 W_0 、大気構造定数 C_n^2 の4つのパラメータを変化させてターゲット上のビーム径 W_e を測定した。スケーリング試験の構成を図2.7.1-1に、この章において使用する文字の定義を表2.7.1-1に示す。

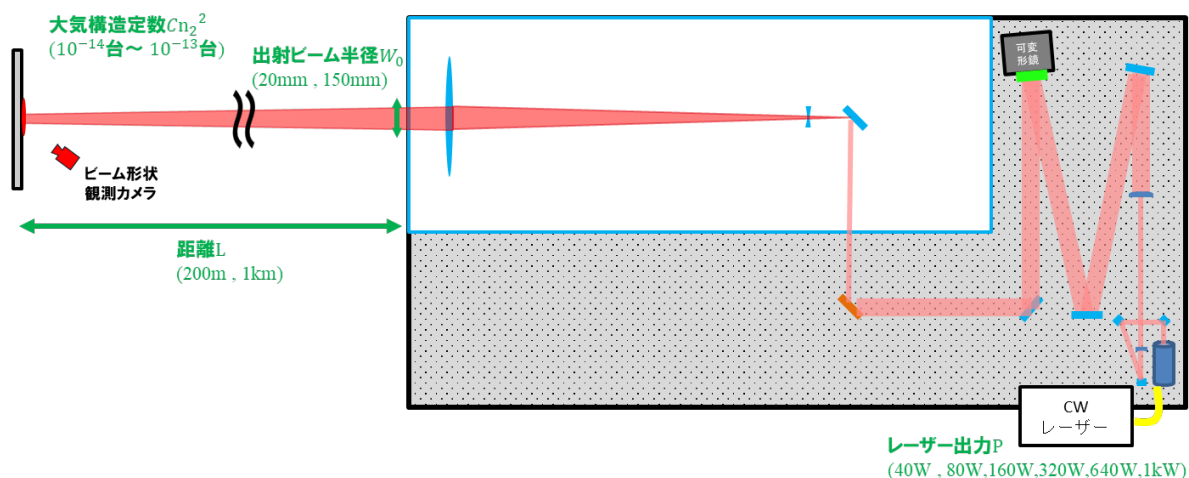


図 2.7.1-1 スケーリング試験の構成

表 2.7.1-1 文字の定義

記号	意味	記号	意味
L	伝搬距離	k	波数
C_n^2	大気構造定数	n_0	空気の屈折率 (加熱無し)
P	レーザー出力	n	空気の屈折率
W_0	ビームの $1/e$ 半径@出射口	T	温度
W	ビームの $1/e$ 半径@ターゲット上 大気擾乱無し、ブルーミング無し	ρ	空気の密度
W_e	ビームの $1/e$ 半径@ターゲット上 大気擾乱有り、ブルーミング無し	c_p	定圧比熱
W_t	ビームの $1/e$ 半径@ターゲット上 大気擾乱有り、ブルーミング有り	v	風速 (伝搬方向に垂直)
N	ディストーションパラメータ	γ	吸収係数
I_{REL}	サーマルブルーミングの有無によるピーク強度の比	q	校正係数

2.7.1.1項と2.7.1.2項では文献値から定式化を行い、2.7.1.3～2.7.1.6項では実測値から定式化を行った。その結果をまとめたものが表2.7.1-2であるが、実測値の傾向は文献値とおおむね一致したことから、文献値でスケーリングを行うことも妥当である。

表 2.7.1-2 スケーリング試験まとめ

	文献値から定式化	実測値から定式化
L	ビーム径に対し 1.6 乗で効く	ビーム径に対し 0.929 乗で効く
C_n^2	ビーム径に対し 0.6 乗で効く	ビーム径に対し 0.455 乗で効く
W_0	ビーム径に影響なし	ほぼ影響なし (0.036 乗で効く)
P	ビーム径に影響なし ($N \ll 1$ において)	ほぼ影響なし (0.0029 乗で効く)

2.7.1.1 ビーム径と大気擾乱の関係式

W_e に対する C_n^2 と L の影響を整理する。文献式より (オプトロニクス社 フィールドガイド大気光学 Larry C. Andrew 著 第1版, p.26)

$$W_e = W \sqrt{1 + 1.63 \sigma_1^{12/5} \Lambda}$$

$$\sigma_1^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$$

$$\Lambda = \frac{2L}{kW^2}$$

これらを代入して計算することで

$$W_e = W \sqrt{1 + 4.18 * C_n^{2\frac{6}{5}} * k^{\frac{2}{5}} * L^{\frac{16}{5}} * \frac{1}{W^2}}$$

$$\frac{W_e}{W} = \sqrt{1 + 4.18 * C_n^{2\frac{6}{5}} * k^{\frac{2}{5}} * L^{\frac{16}{5}} * \frac{1}{W^2}}$$

真空中のビーム半径は

$$W = 2L/(kW_0)$$

であるから

$$\frac{W_e}{W} = \sqrt{1 + 4.18 * C_n^{2\frac{6}{5}} * k^{\frac{2}{5}} * L^{\frac{16}{5}} * \frac{(kW_0)^2}{(2L)^2}}$$

$$\frac{W_e}{W} = \sqrt{1 + 1.04 * (C_n^2 * k^2 * L)^{\frac{6}{5}} * W_0^2}$$

遠距離伝搬時はルート内の1項目は2項目に比べて小さいため0とすることで

$$\frac{W_e}{W} = 1.02 * (C_n^2 * k^2 * L)^{\frac{3}{5}} * W_0$$

が得られる。

また、これに $W = 2L/(kW_0)$ を代入することで、

$$W_e = 1.02 * (C_n^2 * k^2 * L)^{\frac{3}{5}} * W_0 * \frac{2L}{kW_0}$$

$$W_e = 2.04 * C_n^{2\frac{3}{5}} * k^{\frac{1}{5}} * L^{\frac{8}{5}} \quad \text{式 (2.7.1.1-1)}$$

となり、遠距離伝搬時の大気擾乱がある場合 (サーマルブルーミング無し) のビームの 1/e 径が求められる。

2.7.1.2 ビーム径とサーマルブルーミングの関係式

サーマルブルーミングによるビーム径の広がりやディストーションパラメータ N により決定される。図 2.7.1.2-1 に示す通り、文献 (C.C.Chen, 1975, Method for Estimating the Thermal Blooming Effect, p.14) より、サーマルブルーミングによるピークの低下は $N < 1$ で小さく、 $N=1$ を超えてくると大きくなる傾向にある。ここでの γ は吸収係数、 z は伝搬距離である

が、 γz に関わらずピーク強度の低下はディストーションパラメータ N により決定される。

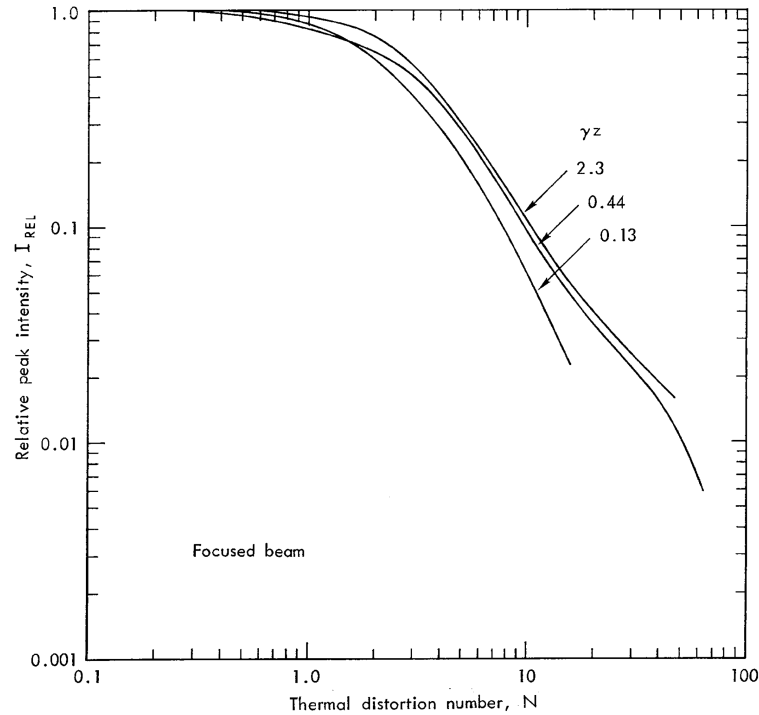


図 2.7.1.2-1 ブルーミング係数 N によるピーク強度の低下

一方、ディストーションパラメータ N は文献(C. C. Chen, 1975, Method for Estimating the Thermal Blooming Effect, p. 11)より

$$N = \frac{\left(-\frac{dn}{dT}\right) 2PL}{\pi n_0 \rho c_p \nu W_0^3} \left[1 - \frac{(1 - e^{-\gamma L})}{\gamma L} \right] \left(\frac{W_0}{W_e} \right) q$$

テイラー展開により $e^{-\gamma L} \cong 1 - \gamma L + \frac{(\gamma L)^2}{2}$ であることから、

$$\left[1 - \frac{(1 - e^{-\gamma L})}{\gamma L} \right] = \left[1 - \frac{\left(1 - \left(1 - \gamma L + \frac{(\gamma L)^2}{2} \right) \right)}{\gamma L} \right] = \left[1 - \frac{\left(\gamma L - \frac{(\gamma L)^2}{2} \right)}{\gamma L} \right] = \left[\frac{\gamma L}{2} \right]$$

と展開でき、式(2.7.1.1-1)も代入することで

$$N = \frac{\left(-\frac{dn}{dT}\right) 2PL}{\pi n_0 \rho c_p \nu W_0^3} \left[\frac{\gamma L}{2} \right] \left(\frac{W_0}{2.04 * C_n^{\frac{3}{5}} * k^{\frac{1}{5}} * L^{\frac{8}{5}}} \right) q$$

$$N = \frac{\left(-\frac{dn}{dT}\right) q \gamma P L^{\frac{2}{5}}}{2.04 \pi n_0 \rho c_p \nu W_0^2 C_n^{\frac{3}{5}} * k^{\frac{1}{5}}}$$

と記述できる。

2.7.1.3 スケーリング試験(距離)

試験距離を300mと1kmの2パターンで試験を実施し、その際のターゲット上でのビーム径を計測した。その際のビーム径を図2.7.1.3-1に示す。

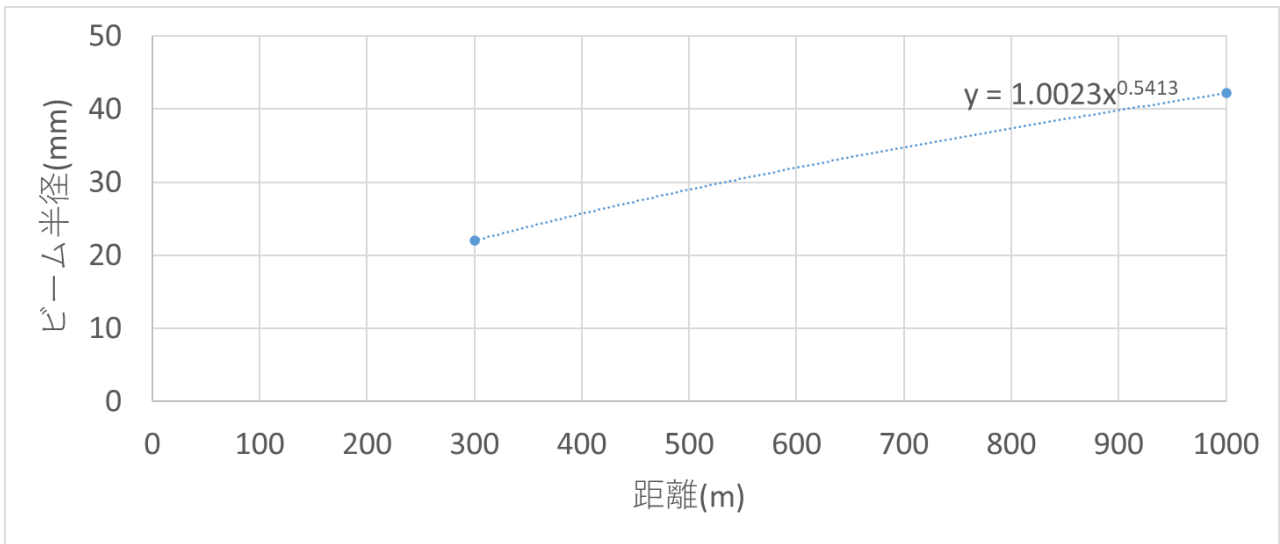


図 2.7.1.3-1 スケーリング試験(距離)の結果

試験距離を300mから1kmに変更する際、時間経過により C_n^2 も変化した。 $(4.55 \times 10^{-14} \Rightarrow 2.09 \times 10^{-14})$ 。 C_n^2 がビーム径に対し0.6乗で影響を与えることを考慮に入れると、グラフは図2.7.1.3-2のように換算できる。換算ビーム径は距離の0.929乗に比例している結果となった。文献値から算出した1.6乗に対して乖離があるが、距離を変更することで同一のセットアップとすることが難しいこと及び、測定点数が少ないことに起因すると思われる。

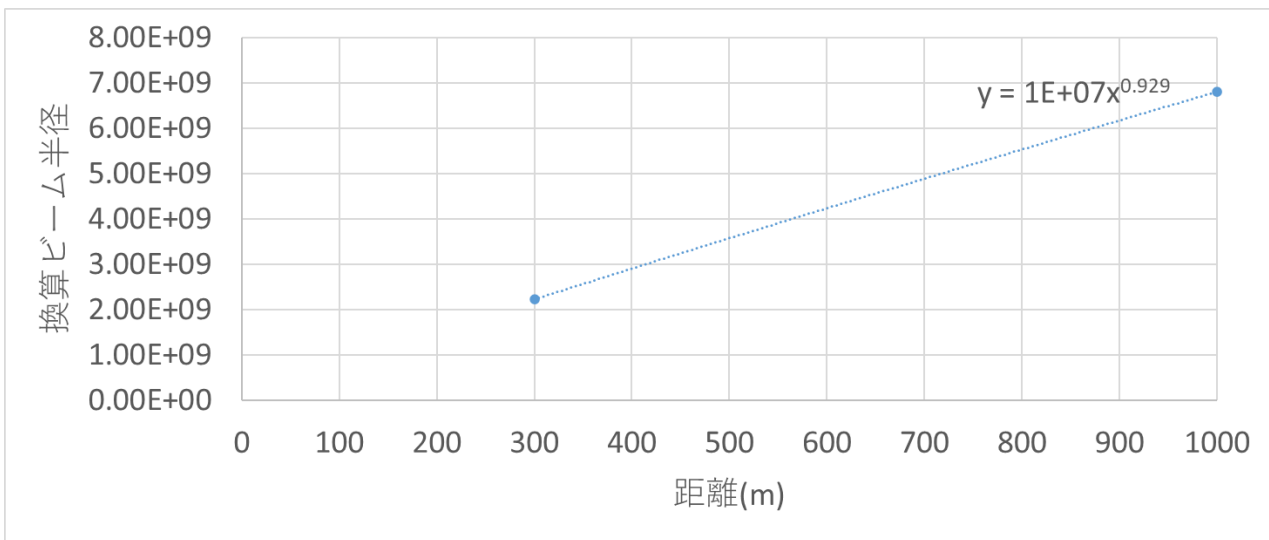


図2.7.1.3-2 スケーリング試験(距離)の結果 C_n^2 変化を考慮

2.7.1.4 スケーリング試験(C_n^2)

試験距離1kmにおいて、同日中に複数回のビーム径計測を行い、変化していく C_n^2 に対してビーム径の計測を行った。図2.7.1.4-1に示す通り、ビーム径は C_n^2 に対して0.317乗に比例する結果となった。左端の一点と右端の一点が飛び値となっているので除外すると、0.455乗に比例する結果となり、文献値から算出した0.6乗に対して近い値となった。

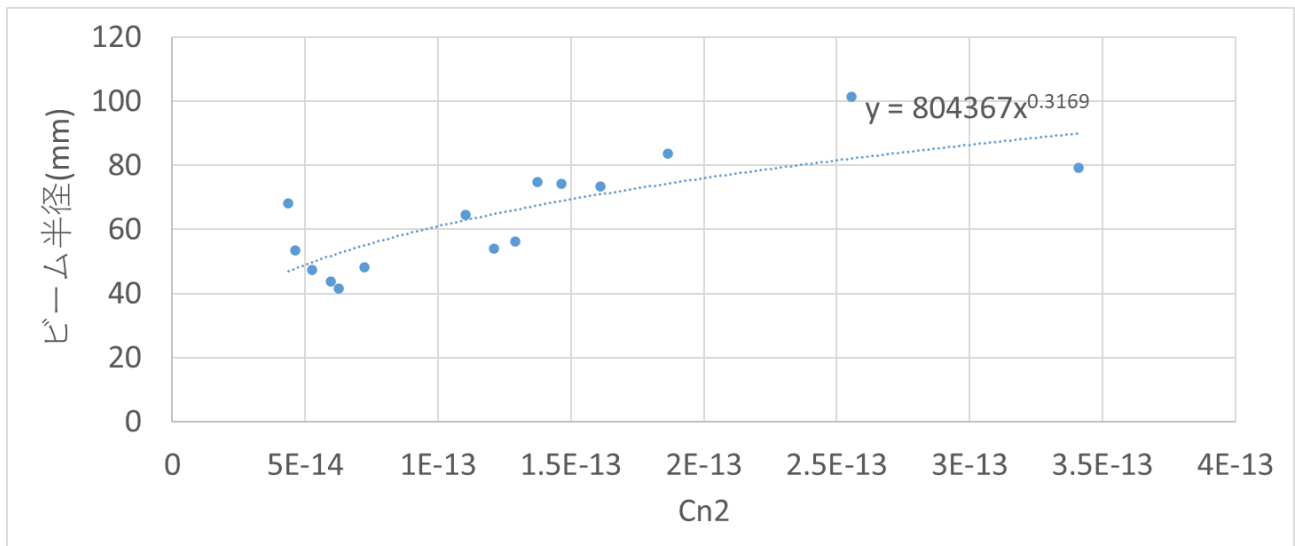


図2.7.1.4-1 スケーリング試験 (C_n^2) の結果

2.7.1.5 スケーリング試験(出射ビーム半径)

試験距離200mにおいて、レーザーシステムのエキスパンダの有無により出射ビーム半径を20mm⇒直径150mmと変化させ、ターゲット上でのビーム径を評価した。結果を図2.7.1.5-1に示す。

式(2.7.1.1-1)において W_0 は影響を与えないパラメータとなっており、測定結果も0.036乗とほぼ影響がない結果となった。

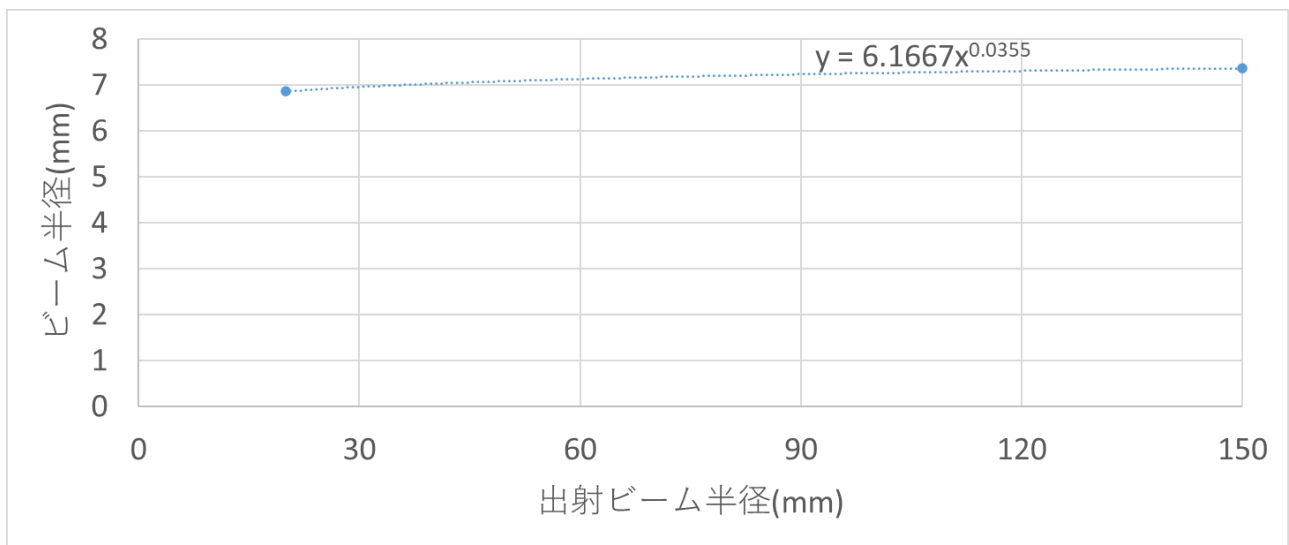


図2.7.1.5-1 スケーリング試験(出射ビーム径)の結果

2.7.1.6 スケーリング試験(パワー)

試験距離1kmにおいて、レーザーのパワーを40W～1kWまで変化させてサーマルブルーミングによるビーム径の変化を計測した。図2.7.1.6-1に示す通り、パワーの変化に対してビーム径の変化はほぼなく、0.023乗に比例する結果となった。

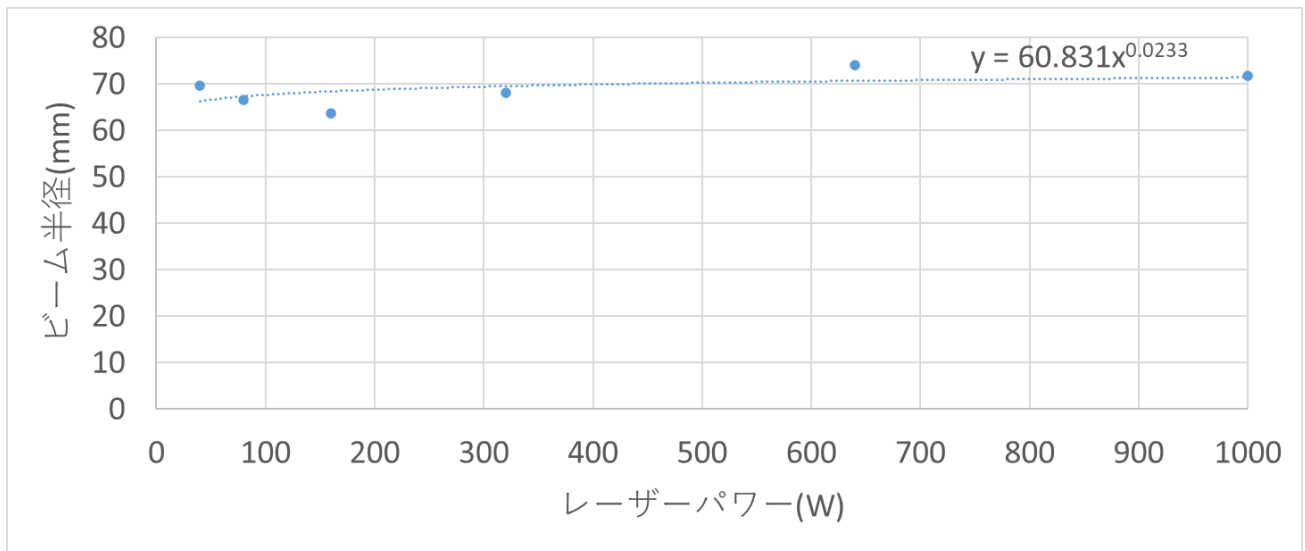


図2.7.1.6-1 スケーリング試験(パワー)の結果

1kWレーザーを使用した試験ケースでのディストーションパラメータNを表2.7.1.6-1のとおり計算すると0.0029であるため、1よりも十分小さくサーマルブルーミング効果が現れない条件となっており整合している。

表 2.7.1.6-1 サーマルブルーミング計算の諸元

記号	意味	数値
L	伝搬距離(m)	1000
C_n^2	大気構造定数	4.38×10^{-14}
P	レーザー出力(W)	1000
W_0	ビームの 1/e 半径@出射口(m)	0.15
k	波数	5905249.35
n_0	空気の屈折率(加熱無し)	1.000274
$\frac{dn}{dT}$	空気の屈折率の温度微分	-9.51×10^{-7}
ρ	空気の密度	1.23
c_p	定圧比熱	1000
v	風速(伝搬方向に垂直)(m/s)	0.58
γ	吸収係数	0.000023
q	校正係数	1

2.7.2 波面取得試験

図2.7.2-1に示すように、ガイドスター用レーザー(50mW)を使用して距離300mの位置にガイドスターを生成し、ガイドスターを波面センサで取得することで大気擾乱を取得した。 $C_n^2=1.78 \times 10^{-13}$ の条件において10kHzで波面計測した結果を図2.7.2-2に示す。

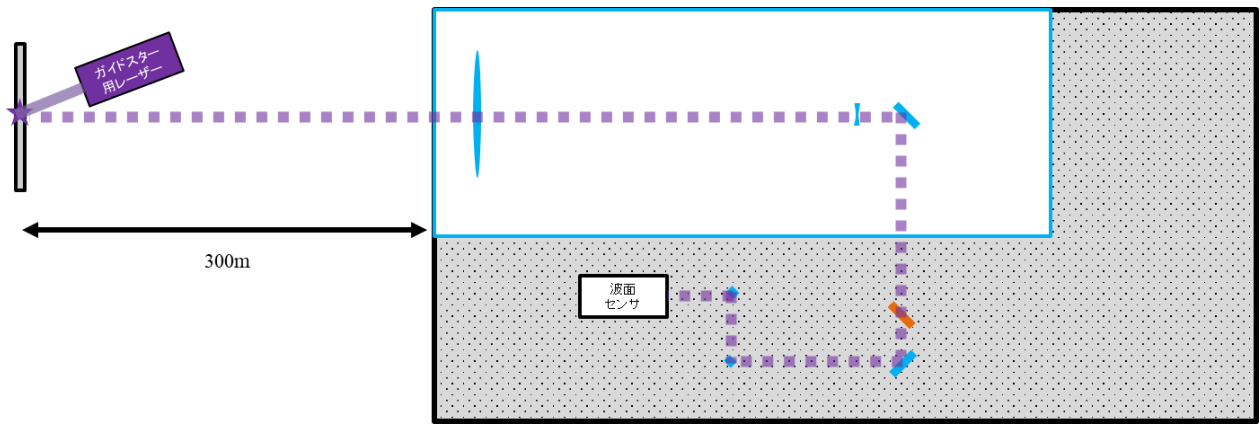


図2.7.2-1 波面取得試験のセットアップ概略

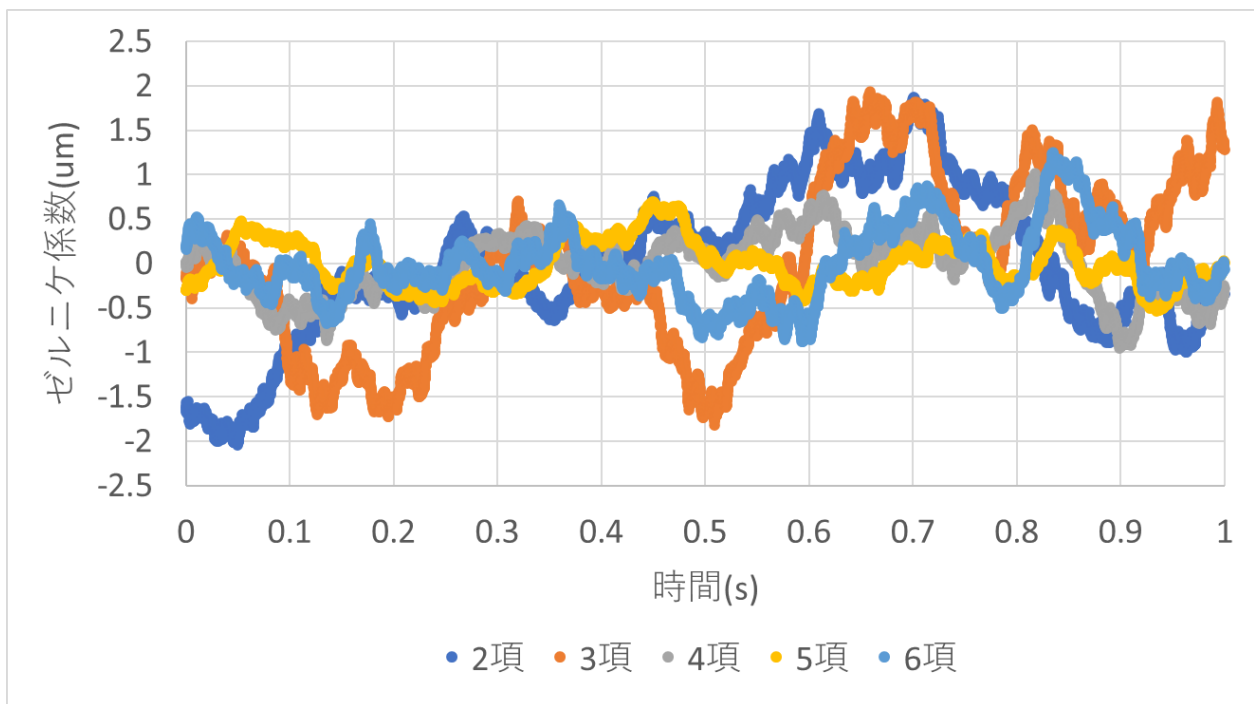


図2.7.2-2 波面センサ(10kHz動作)が取得したゼルニケ係数

取得した波面データのゼルニケ第2項をFFTした結果を図2.7.2-3に示す。100Hzの変動成分は存在するが、1kHzまでは成分がない。これにより1kHzの補正で十分であることが分かったため、以降の補正試験は1kHzで実施した。

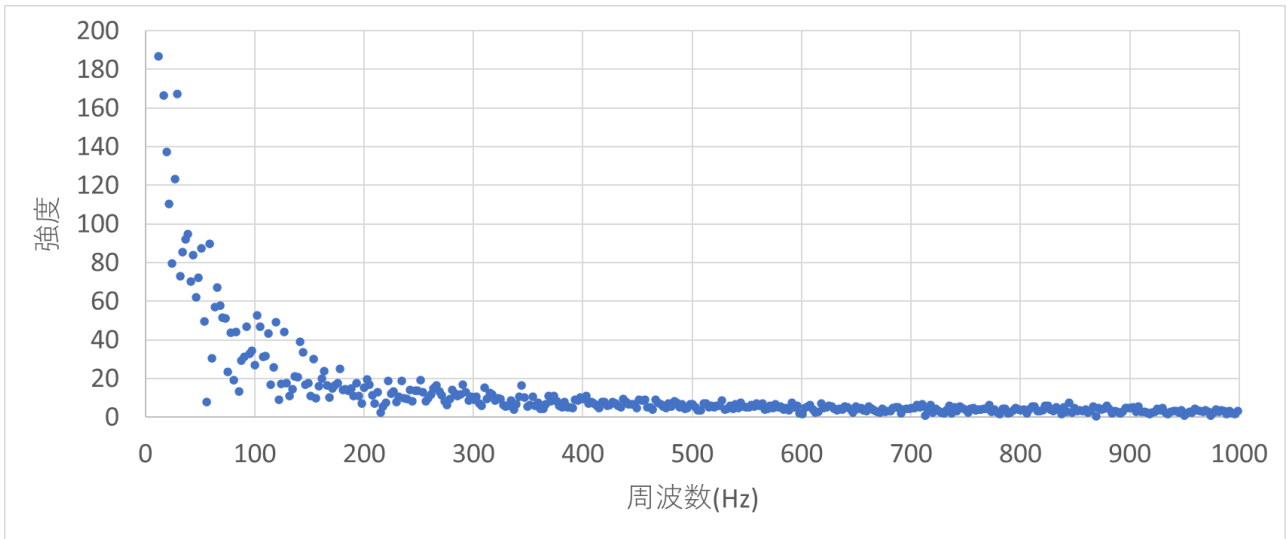


図2.7.2-3 波面センサ(10kHz動作)が取得したゼルニケ係数のFFT結果

2. 7. 3 往路のビーム形状変化と波面センサ取得データの相関

往路のビームが受ける大気擾乱を波面センサが計測できるか確認した。補正は動作させず、ターゲット上でのビーム形状の変化を動画で記録し、画像解析によりビーム重心x、ビーム重心y、ビーム径の10秒間の変化を記録した。一方、波面センサではガイドスターからの光を10秒間観測し、チップチルト及びフォーカス成分のゼルニケ係数を記録した。波面センサ取得データを換算し、チップチルト係数をターゲット上のビーム重心のずれに、フォーカス係数をターゲット上のビーム径に換算した結果をグラフ図2.7.3-1～図2.7.3-3に示す。

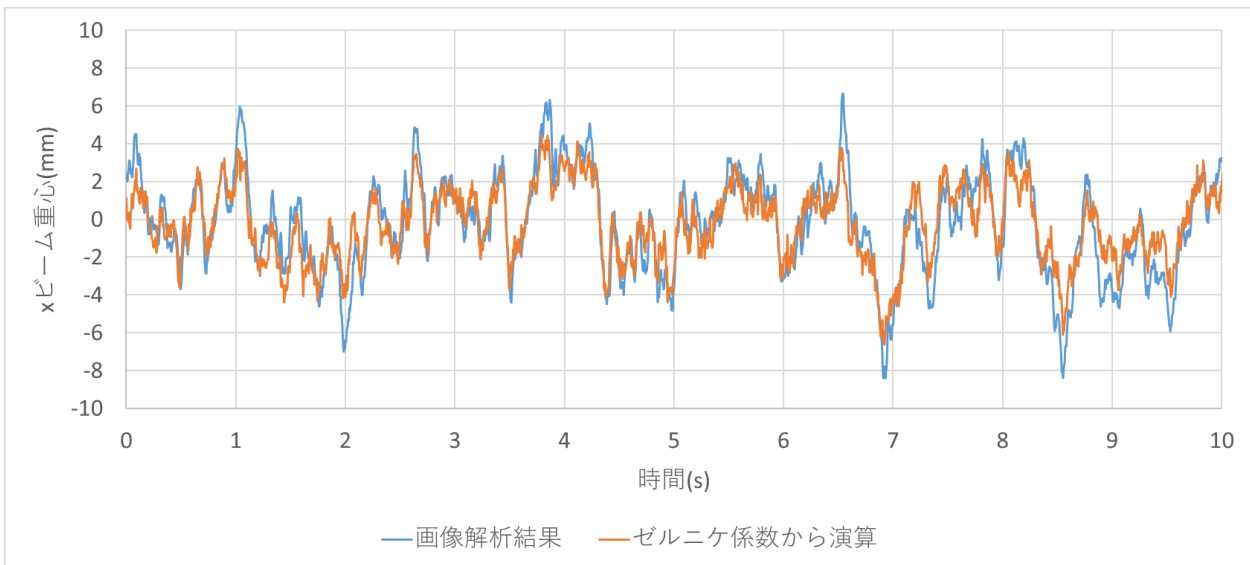


図2.7.3-1 x方向の相関

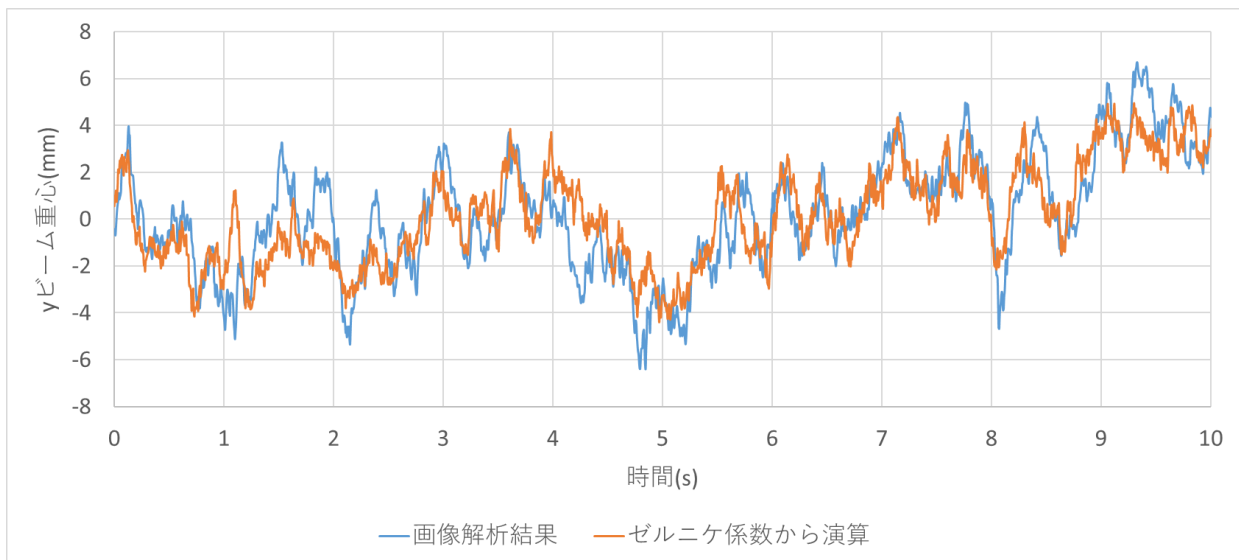


図2.7.3-2 y方向の相関

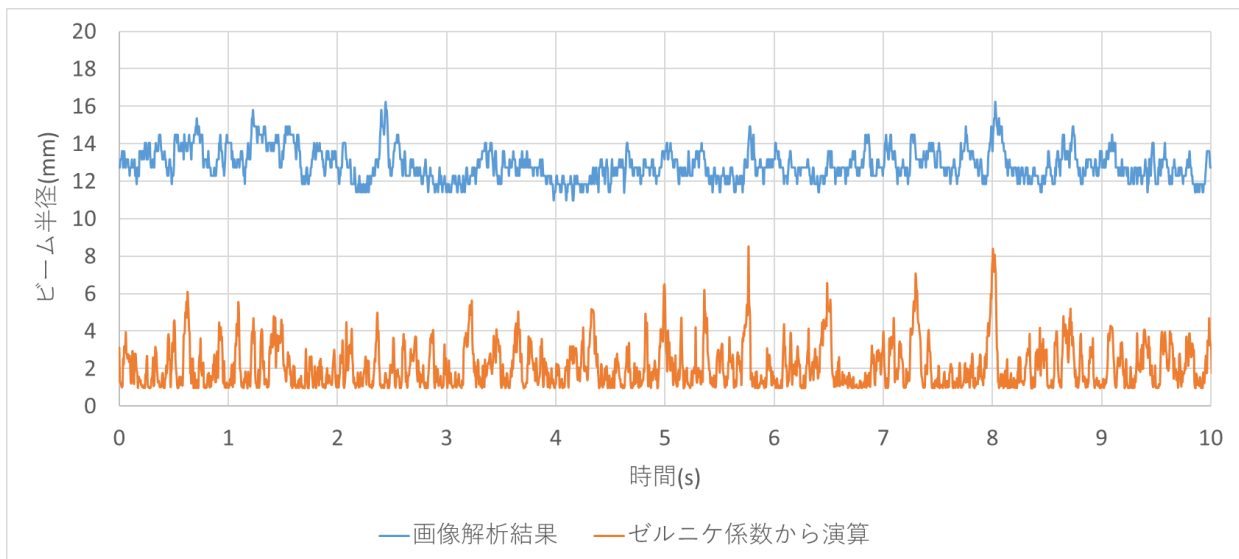


図2.7.3-3 ビーム径の相関

また、それらの相関係数を計算したところ、xビーム重心については0.83、yビーム重心については0.81であり強い相関があるが、ビーム直径に関しては0.20と低い。これは往路のビームが受けている大気擾乱のうち、チップチルト成分は波面センサにより検出できているが、より高次のフォーカス成分に関しては取得できていない。よって、以降の試験ではチップチルト成分のみ補正することとした。

2.7.4 近距離補正試験

200mの距離において、補償システムを動作させることによりピーク強度をどの程度上昇させることができるか試験を行った。図2.7.4-1に試験セットアップ概略を示す。主要な光学部品のみ表示した簡略表記となっている。以下の試験手順で試験を実施した。

- ①ガイドスター用レーザーでターゲット上にガイドスターを作成
- ②ガイドスターを波面センサで観測し、大気擾乱位相を取得
- ③可変形鏡を制御してCWレーザー(40W)に対して補償光学を適用
- ④ビーム形状観測カメラでビーム形状を評価

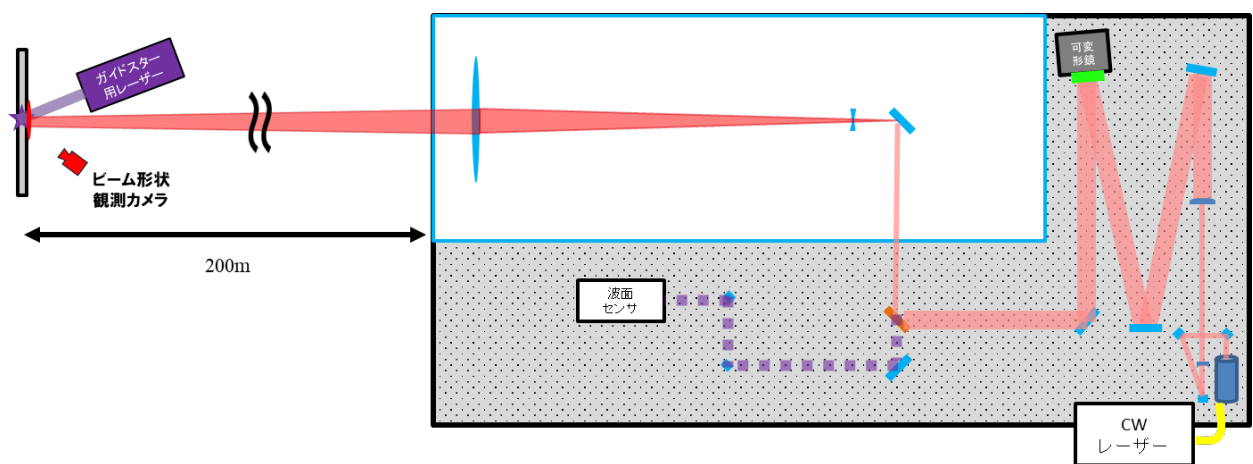


図2.7.4-1 近距離補正試験のセットアップ概略

ビーム形状観測カメラが取得した画像を1秒間平均したものを図2.7.4-2に示す。左側は補正前のビーム形状であり広がっているが、補正を行うことで右側のように集光できることを実証した。

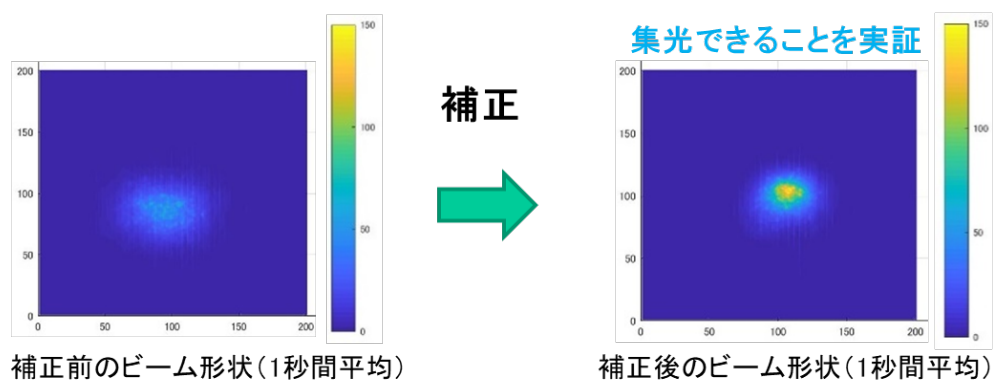


図2.7.4-2 近距離補正試験 集光の様子(1秒間平均)

補正前後のデータを横方向にカットしてピーク強度を比較した結果を図2.7.4-3に示す。補正前に比べて補正後はピーク強度が2.06倍を達成しており、補正により2倍以上のピーク強度上昇が得られた。

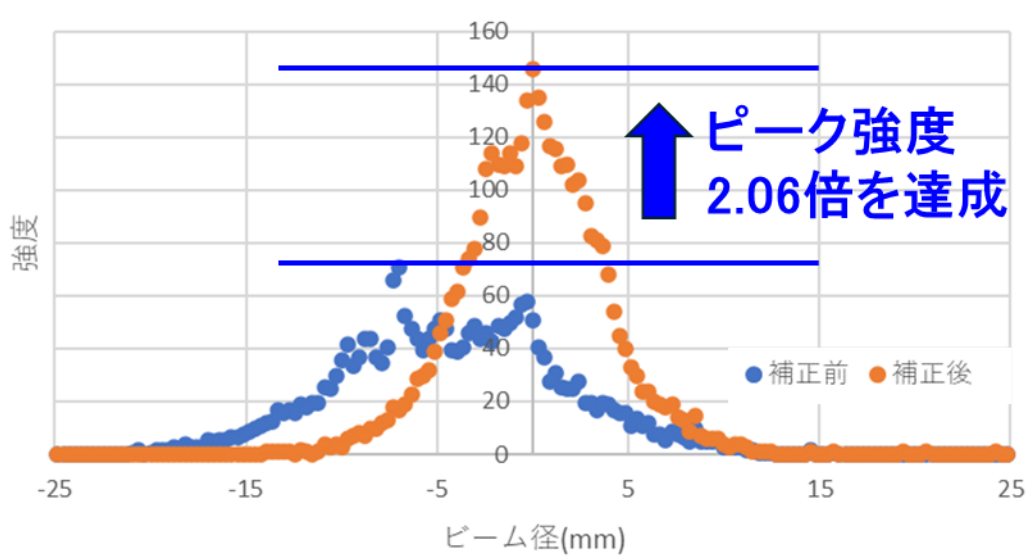


図2.7.4-3 近距離補正試験 ピーク強度の上昇(1秒間平均)

2. 7. 5 遠距離補正試験

1kmの距離においても同様の試験を実施した。試験セットアップ概略を図2.7.5-1に示す。

ガイドスター用レーザーのパワーが弱く(50mW)、波面センサの露光時間を延ばすことで試験したが、補正周期が6Hzまで低下して補正の効果が確認できなかった。ガイドスター用レーザーのパワーを強くする構成を準備していたところ、波面センサが故障したため再試験不可となった。

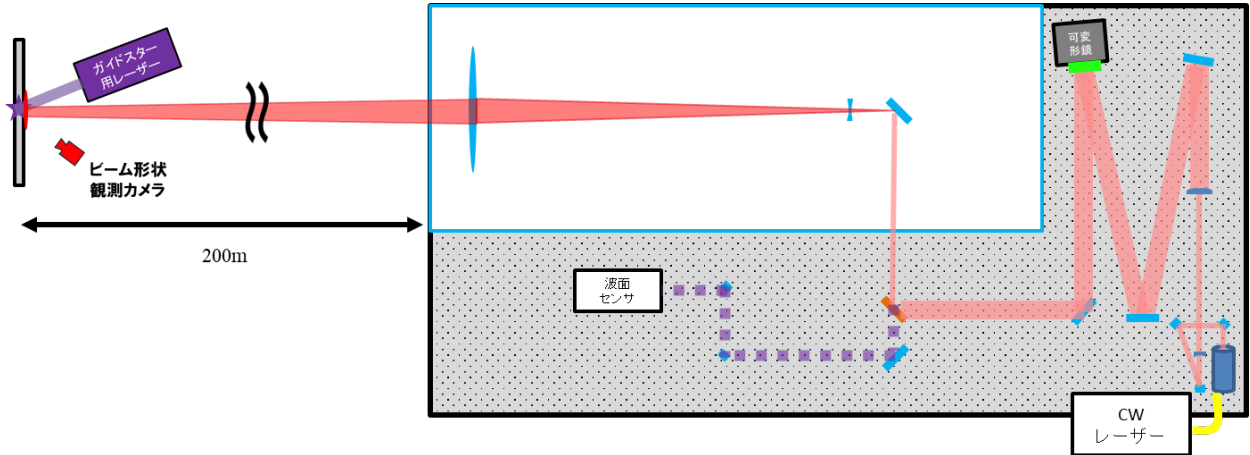


図2.7.5-1 遠距離補正試験のセットアップ概略

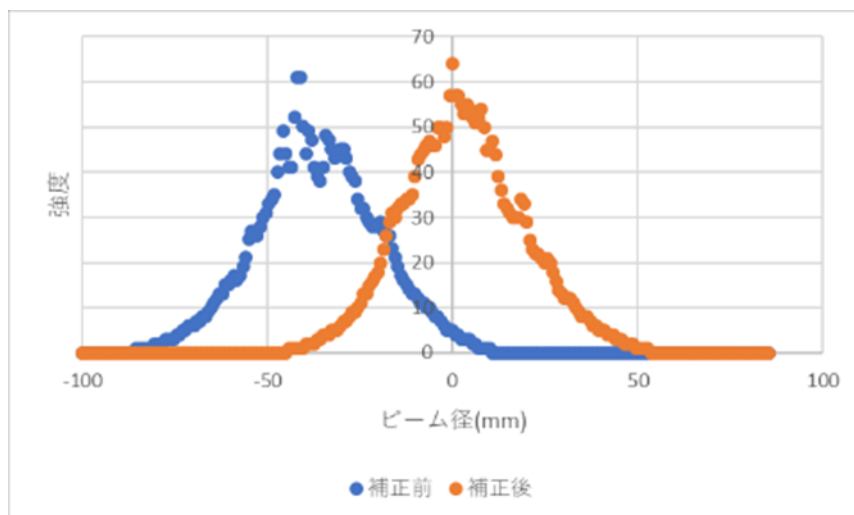


図2.7.5-2 遠距離補正試験 ピーク強度の変化(1秒間平均)

2.7.1項の結果より、スケーリング則が成り立つことを確認したので、業務計画書で目標としていた5kmでもピーク強度2倍とできることを200mの試験からスケーリングにより確認する。下式は擾乱があることで真空中のビーム径が何倍に広がるかを示すパラメータである。イメージを図2.7.5-3に示す。

$$\frac{W_e}{W} = 1.02 * (C_n^2 * k^2 * L)^{\frac{3}{5}} * W_0$$

W_e : 大気擾乱有りのビームの1/e半径@ターゲット上

W : 真空中のビームの1/e半径@ターゲット上

このパラメータを表2.7.5-1の条件にて計算したところ、業務計画書4.3 <実測14.6であり業務計画書よりも厳しい条件においても目標達成した。

業務計画書

実測



図2.7.5-3 スケーリングのイメージ

表 2.7.5-1 スケーリング条件比較

	業務計画書	実測
距離L [m]	5000	200
出射ビーム半径W ₀ [m]	0.035	0.15
大気構造定数C _n ²	1.70 × 10 ⁻¹⁴	2.86 × 10 ⁻¹³
波数k	5.91 × 10 ⁶	5.91 × 10 ⁶
$\frac{W_e}{W}$	4.3	14.6

2.7.6 後方散乱試験

システムから照射したパルスレーザーの大気の後方散乱光を利用して波面が取得できることを確認する。後方散乱試験のセットアップ概略を図2.7.6-1に示す。

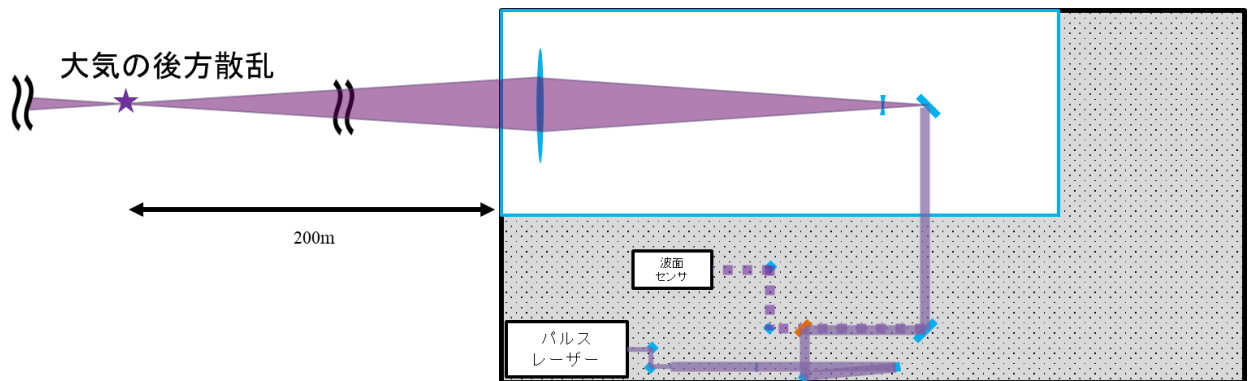


図2.7.6-1 後方散乱試験のセットアップ概略

以下の通りの手順で試験を実施した。

- ①200m地点に焦点を合わせる。
- ②パルスレーザーを発射し、ディレイを与えた後に波面センサを露光する。
- ③焦点は200mに固定したまま、ディレイの時間を調整して後方散乱取得領域を185mから245mまで15m刻みで変化させる。
- ④波面センサで取得したスポット列の動きを評価する。

200m地点からの大気からの後方散乱光を波面センサで取得した。波面センサ画面とその解析結果を図2.7.6-2に示す。中央の大きな光は光学定盤上の光学系の散乱をノイズとして拾っている。光学系の散乱は波面センサのゲートタイミングにより除去できるものであるが、近距離であることから完全には分離できず波面取得を阻害している。光学定盤上の光学系の散乱のため波面

取得には至らなかったが、ディレイを変化させた際の挙動をもって大気の後方散乱光であることを確認した。試験手順は以下の通り。

焦点は200mに固定したまま、ディレイの時間を調整して後方散乱取得領域を185mから245mまで15m刻みで変化させた。焦点が合わない領域を観測することで波面センサがデフォーカスを観測する。波面センサの最上部のスポットの動きに注目して解析した結果を図2.7.6-2右下に記載している。固定物の散乱だった場合、スポット移動量は観測距離を変化させても一定となり赤線のラインに乗るはずであるが、青いラインで示した大気の散乱だった場合に想定されるスポット移動量のラインに観測値が一致していることから、波面センサは大気の散乱を観測していることを確認した。

中心の大きいノイズがもっとも外側のサブアパーチャまで迫っており、波面検出を困難にしている。したがって、パルスレーザーの出射と波面センサの視野を同軸としているところを別軸にする等、定盤上の光学系の散乱が波面センサに入らないように工夫していく必要がある。

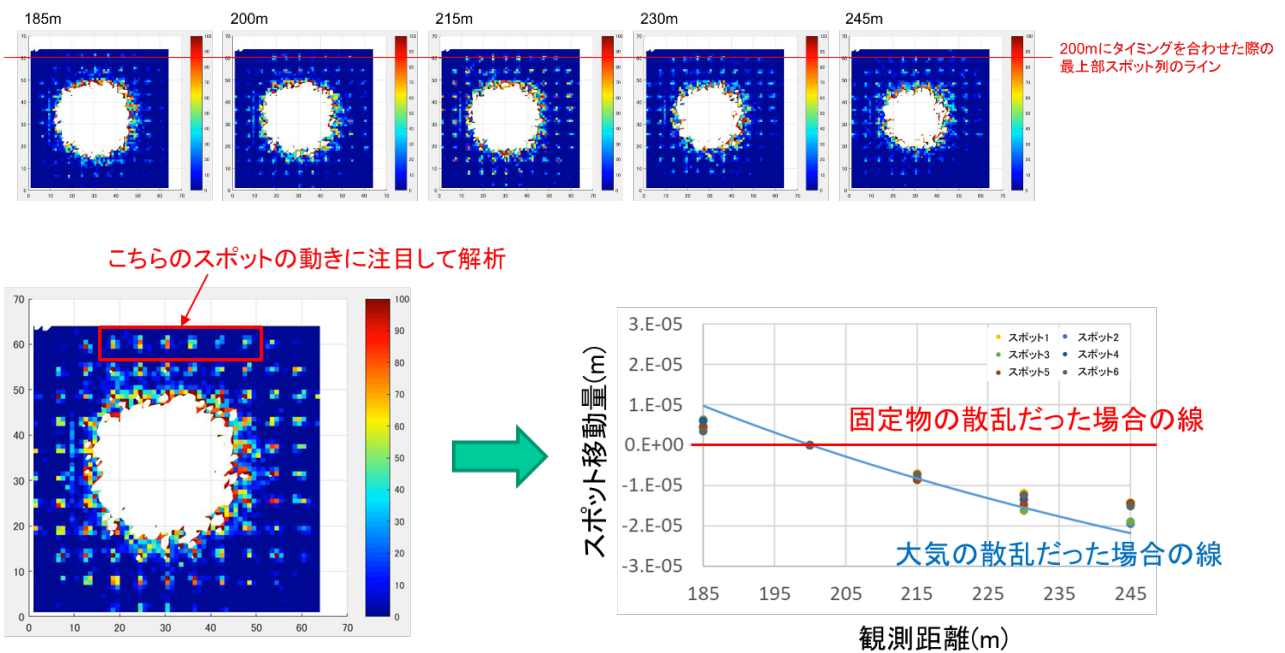


図2.7.6-2 後方散乱試験の結果

2.7.7 当初の目標に向けた方策

遠距離伝搬試験で得た成果をもとに、5km先の目標に対してレーザー出力10kW、送出ビーム直径70mm、大気構造定数 $C_n^2=1.7 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ の条件においてピーク強度を補正なしの場合の2倍にすることを目指した考察を行う。システム全体の補正性能としては2.7.5項のスケールングによって、ピーク強度2倍にできる性能があることが確認できている。波面センサと可変形鏡のダイナミックレンジが十分であることを確認するため、大気擾乱により発生するチップチルト成分を計算する。発生するチップチルト成分はシーイングを計算することによって求めることができる。

ビーム直径がフリード長より十分大きい際には、シーイング θ_K 及びフリード長 r_0 は以下のように記述できる。(オプトロニクス社 フィールドガイド大気光学 Larry C. Andrew 著 第1版, p. 47)

$$\theta_K = \frac{\lambda}{r_0}$$

$$r_0 = \left(0.42 \sec(\zeta) k^2 \int_0^L C_n^2 dz \right)^{-\frac{3}{5}}$$

ζ は天頂角、 z は高さ方向の座標、 L は距離、 k は波数である。積分を高さ方向から水平方向に

変換して実行すると

$$r_0 = 1.67k^{-\frac{6}{5}}L(C_n^2)^{-\frac{3}{5}}$$

である。
したがって

$$\theta_k = 1.195\pi k^{\frac{1}{5}}L^{\frac{3}{5}}(C_n^2)^{\frac{3}{5}}$$

で表される。

距離5km、波長1030nm、大気構造定数 $C_n^2=1.7 \times 10^{-14}m^{-2/3}$ としたとき、シーイングは77uradとなる。

波面センサのダイナミックレンジとして240uradの傾きまで大気チップチルト成分が検出可能であり、シーイング77 μ radよりも十分大きな値である。可変形鏡については望遠鏡入力前において1.86mradまでの傾きの制御が可能であり、望遠鏡倍率10倍を通すと伝搬経路上の波面を186uradまで傾けることができ、シーイングよりも大きな値である。

サーマルブルーミング効果は、レーザー出力10kW、伝搬距離5km、風速1m/sの条件において、送出ビーム直径70mmであればディストーションパラメータ $N=31.8$ となり1を超えることからサーマルブルーミングが顕著となるが、本研究で開発した大型の照射光学系を用いてビーム直径を300mmまで拡大することにより $N=0.4$ となり、サーマルブルーミング効果を回避することができる。

ガイドスター用レーザーのパワーは、固定物からの散乱を利用するのであれば本研究にて200mで50mWあれば十分であることが確認できていることから、5kmでは25²倍のパワーである31.25Wあれば十分であり、本研究のパルスレーザーの平均出力100W程度で問題ない。後方散乱を用いた波面検出については、10mJのパルスを使って200mの距離からの後方散乱光が受信できていることから、5kmにおいては25²倍の6.25Jのパルスレーザーを用いることで十分な受光量が得られることが分かる。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

システム全体としては、業務計画書で予定していた条件よりも厳しい条件において、補正によりレーザーのピーク強度を2倍以上にすることを実現した。

波面センサは、動作を最適化することで1サブアパーチャあたりに使用するピクセル数を計画時よりも2倍にすることで精度向上に成功した。

可変形鏡は、高次補正鏡の高速駆動時の変位量の動作範囲において、当初の目標であった動作範囲2 μ m（ $\pm 1\mu$ m）に対して $\pm 2\mu$ m以上（約2倍以上）の動作範囲を達成した。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

本研究の補償システムの研究成果により、光の伝送距離を飛躍的に増加することが可能となった。それはドローンへのエネルギー伝送やレーザーアブレーションによる宇宙デブリ除去への適用、リモートセンシング、移動体通信、レーザー推進、天体観測（光学・赤外、電波）、工作機械、遠隔解体、レーザー医療などへの幅広い応用が期待される。また、レーザー光源の開発では、高品質であることから遠距離伝搬しても広がりを抑えることが可能で、かつ狭帯域であることから固体レーザーで増幅可能なシングルモードファイバーレーザーを開発したため、ドローンの急速充電や大型ドローンへの給電も可能になった。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

毎年に行われるレーザー関係の国際学会OPIC（Optronics and Photonics International Congress）において、Laser Solutions for Space and the Earth（LSSE）を毎年、研究代表者らが中心となって企画し本研究の研究成果の発表・発信に努めた。折しも、新型コロナウイルス感染症の心配がある中で、運営は困難を極めた。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

研究の大半の期間がコロナ禍の期間と重なっており、県をまたぐ移動や海外渡航及び面着による調整会が推奨されない状況であった。また、世界的な半導体不足や急激な円安により、計画よりもリードタイムが長くなり、価格が高騰した。

上記問題へ対処として、理化学研究所を中心として3機関間での綿密な連携による情報の共有を行った。屋外試験についても十分な換気等の安全衛生に配慮しながら研究を推進した。また、試験機材や供試体の入手性の悪化についても、実施可能な試験を優先して実施すること等により影響を最小限にするように対策を行った。

製造を海外で行った伝送レーザーは製造状況の確認に行けない状況や設置のための技術者の来日日程が制限されるなどの制約があったが、オンライン会議を活用することで世界トップレベルに並ぶ狭帯域高品質かつ偏光保持の種光源ファイバーレーザーを製造した。

5. 2 経費の効率的執行

広角望遠鏡の口径1.5mを当初目標としていたが、照射光学系の口径は0.6mであるため、照射光学系との光量の整合性をとるため1.5mから1.0mに変更し、製造費用を節減した。

また、一部の購入予定の備品につき、前年度購入品を改造することにより利用可能とし、購入を取りやめた。

さらに、原則として機材の購入においては相見積を取得のうえ、最安値の業者と契約した。また試験実施期間を考慮し、レンタル品で対応することが可能な機材は、それらを用いることで研究費を効率的に使用した。試験の実施においては、現有設備、光学部品を最大限に活用して研究費の効率的な執行に努めた。

最後に、試作品の改造や部材の再利用などにより、可変形鏡の製作費を節減した。試験においては、計測装置など現有設備の利用により効率的な研究費の執行に努めた。

6. まとめ、今後の予定

本プロジェクトで実施された、「可変形鏡変位量の予測手法の確立」と「サーマルブルーミング効果計測試験」の結果から、熱拡散がビーム径の拡大に影響を与えることの解析を終えている。今後、取り組みとして、熱影響によるビーム変化によるデフォーカス量の取得や、サーマルブルーミングの条件（大気ガス、ビーム径、吸収係数）などを変えて実験を行う予定である。そして、この実験系から得られた成果は論文にて寄稿する予定である。

波面センサは世界最高レベルの10kHz動作を達成した。波面測定点は最大100点であり、必要に応じて使用する測定点を選択することが可能である。使用するカメラやFPGAはフィールドにおける運用を考慮して耐久性を強化していく必要がある。

可変形鏡は、本プロジェクトでの最終目標である3種（Tip-Tilt補正鏡、Defocus補正鏡、高次項補正鏡）の大型（口径100 mm）可変形鏡を開発した。構造シミュレーションに基づく設計、影響関数を考慮した駆動素子制御法の導入などにより、それぞれの可変形鏡において、大気擾乱補正に必要とされる動作範囲、最大10 kHzの高速動作、高い精度での波面補正性能、光耐性1 kW/cm²を達成した。今後さらなる大口径化や動作性能の向上に取り組む予定である。

伝送ビームの成果を表6-1にまとめる。非線形効果の対策を行うことにより、約2kWの狭帯域（0.45nm以下）で高品質（M²=1.3以下）なシングルモードファイバーレーザーを製造した。コア径を広げ屈折率分布を調整することでモード分散を抑えたファイバーを用いることで1本あたり3kWの更なる高出力のファイバーレーザーの製造できる見込みである。高出力狭帯域かつ高品質のファイバーレーザーの製造技術を確立したことで、コヒーレント偏光ビーム結合や一定の帯域内により多くのレーザーを波長結合することができ、今後のビーム結合技術に繋げることができる。また、固体増幅試験の増幅量停滞に対する対策として、種光波長を蛍光波長に合わせられる波長調整機能を付与する必要がある。

表 6-1 高出力レーザーに必要な技術

必要な技術	達成度	詳細
高出力ファイバーレーザー	○ 約2kW	2. 3. 1. 2項 新しいファイバーを用いることで3kWの出力が可能な見込み
固体増幅技術 ⇒狭帯域ビーム	△ 358Wの増幅 高温時に増幅量の停滞が発生した。	2. 3. 1. 3項 増幅が停滞するまでは高効率で増幅できた 波長シフトにより増幅量の停滞が解消する見込み
高品質	○ 1.3以下	2. 3. 1. 2項
偏光合成 ⇒偏光保持ビーム	○ 15dB以下	2. 3. 1. 2項 偏光合成を実施して、約92%の結合効率を達成した。
波長合成 ⇒狭帯域ビーム	○ 0.38以下	2. 3. 1. 2項 一定帯域内に多くのビームを結合することができる。

5項目のうち4項目について達成した。本研究で実施した製造技術に新しいファイバー技術（コア径拡大と屈折率プロファイル調整を実施）を適用し、中心波長のシフト機能を付与することで種光源の出力増加、かつ固体増幅の出力増加が可能である。

照射光学系は口径600mmの大型照射光学系を製造し、10kW連続波に10分間耐えられることを確認した。遠距離伝搬試験における10mJ、12nsのパルスレーザーにも耐えた。フィールドにおける運用のためには、大口径を維持しつつも小型化軽量化していく必要がある。

これらの構成品を使用し、システム全体として200mの距離において補正をすることでピーク強度を2倍にすることに成功した。また、距離、レーザー出力、送出ビーム直径、大気構造定数を変化させたデータを取得することで、当初の目標よりも厳しい条件で補正できることをスケールリングにより確認した。レーザーにとって大気擾乱は避けられないものであるが、その影響を軽減する技術（本研究での実績はピーク強度を2倍増）を確立したことにより、レーザーのアプリケーションの幅を大きく広げることが可能になった。今後は、ドローンへのエネルギー伝送やレーザーアブレーションによる宇宙デブリ除去への適用など、実用的なシステムに組み込んでいく必要がある。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	10件
展示・講演	該当なし
雑誌・図書	6件
プレス	該当なし
その他	2件

(2) 知的財産権等の状況

該当なし

(3) その他特記事項
該当なし