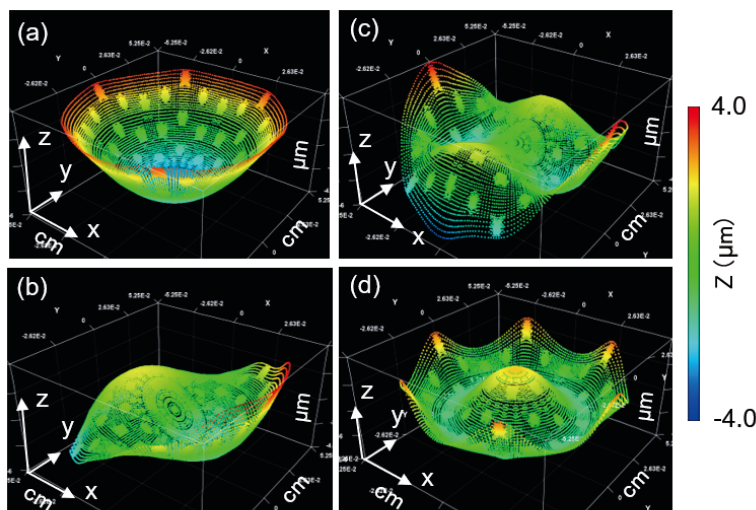


CONTENTS

- 大口径デフォーマブルミラーの開発に向けた構造シミュレーション
- 国際会議報告
～ Optical Interference Coatings Conference 2022 ～
- ～レーザークロス隔月発行のお知らせ～



【表紙図】可変形鏡構造モデルに
(a)デフォーカス収差 (b)水平コマ収差 (c)2次の非点収差
(d)球面収差を与えた際の鏡面形状(3次元表示)

大口径デフォーマブルミラーの開発に向けた構造シミュレーション

レーザープロセス研究チーム 稲田順史、コスロービアン ハイク、谷口誠治

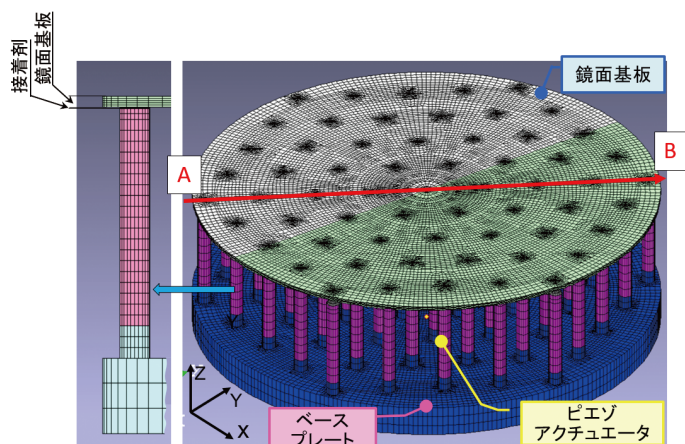
■はじめに

当研究所では、高出力レーザーの遠距離伝送システムを開発するため、要素技術の一つであるデフォーマブルミラー(可変形鏡)の開発を進めている。可変形鏡により、大気ゆらぎなどに起因するレーザーの波面乱れを高速補正できれば、高いエネルギー効率での遠距離レーザー伝送が可能となる。これまでに、駆動素子にピエゾアクチュエータ(以下ピエゾ)を用いた小型可変形鏡(口径50 mm)の構造シミュレーション(Laser Cross No.399,2022 Mar.)を行うとともに、得られた知見に基づき試作品を製作し、高次ゼルニケ(Zernike)

波面の作成が可能であることを明らかとした(Laser Cross No.401,2022 May.)。現在開発の次段階として口径100 mmの大型可変形鏡の開発を進めている。本稿では、口径100 mmの可変形鏡の動作を構造シミュレーションにより解析した結果について報告する。鏡面形状や過渡振動の解析を行うことにより、鏡面基板の素材や厚さ、駆動素子の配置などの条件を具体的に決定し、可変形鏡設計の指針となる知見を得ることが目的である。

■可変形鏡構造モデル

図1に、可変形鏡の3次元構造をモデル化したものを

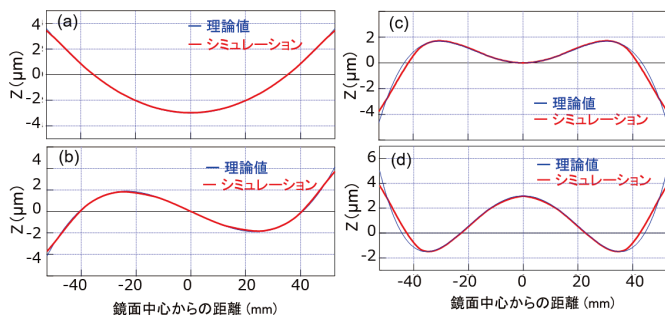


【図1】(右)口径100 mm可変形鏡(ピエゾ61本支持)構造モデル、(左)ピエゾアクチュエータの拡大図

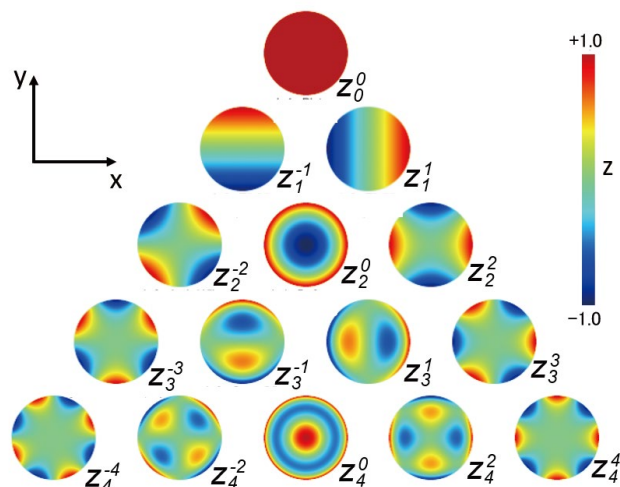
示す。高次のゼルニケ波面をより高精度で作成するためピエゾの本数を61本に増加させ、100 mm径の鏡面を支持した。鏡面の材料は合成石英、厚さは1 mmに設定した。ピエゾの配置は、隣接するピエゾの間隔が全て等しくピエゾ間距離が最も短くなる正三角形格子状配置を選択した。鏡面基板とピエゾの間には薄い接着剤層を入れた。有限要素解析を行うため、構造全体にメッシュを切っている。電圧印加によりピエゾを縦方向(Z軸方向)に伸縮させることで、鏡面の形状を変化させる。シミュレーションでは、過渡応答電場解析ソフトウェア(PHOTO-VOLT、フォトン社)を用いて電圧波形印加時のピエゾの電場分布を解析したのち、弾性応力解析ソフトウェア(PHOTO-ELAS、フォトン社)を用いて電場から生じる圧電効果によるピエゾの伸縮を解析する連成解析を行う。これにより、可変形鏡動作時の鏡面の変位およびその時間変化を解析する。

■波面形成シミュレーション

構造モデルを用いて波面形成シミュレーションを行った。大気の流れによるレーザーの波面乱れは、



【図3】シミュレーションにより (a)デフォーカス収差(b)水平コマ収差、(c)2次の非点収差(d)球面収差を与えた際の鏡面形状(図1中 A-B線上)と理論値との比較



【図2】ゼルニケ多項式の最初の15項(2次元表示)

ゼルニケ多項式(図2)の線型結合で数学的に解析できる。このことから、可変形鏡でそれぞれの波面を正確に再現できれば、波面乱れの補正も可能になると考えられる。シミュレーションでは、それぞれの波面における各ピエゾ位置でのZ軸方向の変位(Z変位)を計算しておき、各ピエゾにその変位量が得られる電圧を同時に印加した。高速動作を模擬するため印加電圧の立ち上がり時間は $50 \mu\text{s}$ に設定し、その後の電圧は一定として1ステップ $10 \mu\text{s}$ で $500 \mu\text{s}$ までの鏡面形状を計算した。シミュレーションの例として、ゼルニケ多項式のうち(a)デフォーカス収差(Z_2^0)、(b)水平コマ収差(Z_3^{-1})、(c)2次の非点収差(Z_4^2)、(d)球面収差(Z_4^0)、を与えた際の可変形鏡の表面形状を表紙図に示す。それぞれの波面がよく再現されている。さらに詳細な検討を行うため、図1に示したA-B間の2次元形状をそれぞれ理論値と比較した。結果を図3に示す。デフォーカス収差(図3(a))、水平コマ収差(図3(b))については理論値とシミュレーション結果はほぼ完全に一致している。(c)2次の非点収差(Z_4^0)、(d)球面収差(Z_4^2)では、中心からの距離が40 mm以上の領域(可変形鏡の端部)で理論値とのずれがややみられるものの、それ以下の領域(可変形鏡の内部)では理論値と一致しており、形状がより複雑な高次のゼルニケ波面においても高い再現性を示した。その他の波面に関しても同様の結果が得られており、4次15項までのゼルニケ波面の形成が可能であることがわかった。

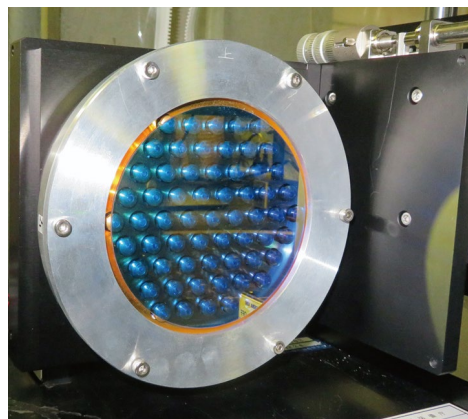
■まとめと今後

本研究では、大口径可変形鏡の開発指針となる知見を得ることを目的に、その動作を構造シミュレーショ

ンにより解析した。口径 100 mm、ピエゾ61本支持の可変形鏡モデルにおいてゼルニケ多項式の4次15項までの波面収差をよく再現できることが明らかとなった。現在これらの知見をもとに実際に口径100 mmの可変形鏡の開発を行っており(図4)、レーザー伝送技術への適用に向けた研究を進めていく。

謝辞:

本研究は、防衛装備庁安全保障技術研究推進制度JPJ004596(研究課題「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」)の支援の下行われた。



【図4】可変形鏡(ピエゾ61本支持)の写真

REPORT

国際会議報告

～ Optical Interference Coatings Conference 2022 ～

レーザー技術開発室 本越伸二

6月19日～24日にわたり、カナダ、ウィスラーで標記国際会議が開催された。この会議は米国光学会の主催で3年に一度開催され、光学薄膜の設計、材料、成膜技術、評価方法、そしてその応用について40年にわたり議論されてきたものである。今回はコロナ禍でもあり、現地とオンラインを使用したハイブリッド方式で開催された。現地参加は約150名であった。5日間通して単一セッションで進められ、特徴的なのは一般講演が5分間の口頭発表と2時間のポスター発表のセットになっており、口頭発表で気になった講演はポスターでじっくり議論できる点である。その結果、ほぼ全てのポスター発表は人だかり状態が2時間続いていた。筆者は招待講演としてフッ化物コート紫外レーザー損傷耐性について報告した。以下に他機関のトピックスを紹介する。

●広許容角・広帯域反射防止コート

反射防止コートはレンズやウィンドウなどの光学素子表面からの反射を抑制するために施される。コートを施すことにより境界面を増やし、各境界面からの合成反射波が打ち消すように屈折率、膜厚が制御される。入射する光の波長や角度が異なると反射波の振幅および位相が変化するため、合成反射波は打ち消されなくなる。そのため広い波長帯域かつ許容角度が広い反射防止コートの設計、製作は困難である。中国、浙江大学のグループは、空気側に傾斜屈折率コートを施すこ

とにより広帯域、広入射角に対応した反射防止コートを達成した。具体的には、あらかじめ基板面に $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ の8層の反射防止コート(総厚さ約400 nm)を施し、その上に Al_2O_3 のポーラス状コート(厚さ約200 nm)を施すことにより、波長400～1000 nmにわたり1%以下の反射率に抑えている。しかも、入射角度を6～40°に変化させても低反射率を維持している。機械強度が低いなど課題はあるものの、極短焦点レンズなどの反射防止コートへの利用が見込まれる。

● SiO_2 材料のみで構成される多層膜ミラー

誘電体多層膜ミラーは屈折率の異なった材料を光学膜厚 $\lambda/4$ (λ : レーザー波長)ずつ積層することによって製作される。高レーザー耐力のミラーを製作するためには、高耐力の薄膜材料で多層膜を構成する必要がある、材料の耐力はバンドギャップエネルギーに大きく依存する。 SiO_2 は酸化物の中で最も大きなバンドギャップエネルギー(8～9 eV)を持つ。つまり、 SiO_2 の屈折率を制御し、 SiO_2 材料だけで多層膜ミラーを構成すれば高耐力ミラーになると期待できる。リトアニア、物理科学センターでは、成膜時に基板を傾けることにより SiO_2 膜が柱状構造を形成し、屈折率が見かけ上低下することを以前に報告している。今回は、通常角度成膜の SiO_2 と傾斜成膜の SiO_2 の多層膜より波長355 nm用ミラーを製作し、レーザーコンディショニング効果によりレーザー損傷耐力が約200 J/cm²(パル

ス幅2 ns)まで向上したことを報告した。一様性や大口径化にはまだまだ課題があるものの高耐力光学素子への新しいアプローチとして今後も注目していきたい。

●干渉フィルターを用いた高速光スイッチ

レーザー光の光路や偏光を変えるために、電気光学素子や光音響素子などが利用されている。それらの素子の応答時間は、電気回路のパルスの立ち上がりや材料内の音波の伝搬速度で制限される。さらに早いスイッチの開発はさまざまなところで行われているが、ドイツ、ハノーバーレーザーセンターから干渉フィルターと短パルスレーザーを用いた高速スイッチが提案された。干渉フィルターは、2つの多層膜ミラーの間に位相を反転するギャップ層を設けることにより特定の波長の光を透過する素子である。透過する波長はギャップ層の光学膜厚(物理膜厚と屈折率の積)で決まる。このギャップ層にITO膜を採用し、そこに短パルスレーザー光を照射すると、光学膜厚が変化し、瞬時に透過波長が変わることにより光スイッチが可能になる。ITO材料の屈折率は2.0であるのに対して、レーザー強度に依存する非線形屈折率係数は $2.3 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{W}$ である。この係数は他の誘電体材料に比べて3桁も大きい。これは比較的低いレーザー強度でも容易に屈折率が変化することを意味する。報告では、波長

1032 nm、パルス幅250 fsのレーザーを用いた実験結果が示されたが、最大80 μJ の照射でも透過率は10 %低下する程度にとどまっていた。これは、干渉フィルターの消光比やライン幅の影響と思われる。ITO膜のレーザー耐性なども気になるが面白いアイデアと思う。

●どこまで広がるか、原子層堆積法

原子層堆積法という成膜方法を初めて聞かれる方もおられるかもしれない。化学気相(CVD)法の一種で、材料の化学反応により基板上に膜を堆積する方法である。一般のCVD法との違いは、原材料分子を予め基板上に付着し、その後反応ガスにより所望の材料に組成変化する点である。しかも、基本1分子しか吸着しない原材料分子を選択することにより、広い面積にわたり一様で、高い精度で膜厚が制御できる。また成膜チャンバー内全体に同じコートが可能であることから、ロッドレンズやコンデンスレンズなど小さな曲率半径表面でも同じ光学特性が期待できる。しかし、適当な原材料がないため光学薄膜としての利用はされてこなかった。ところが近年、さまざまな装置メーカーから多種の酸化物薄膜が成膜できるようになったと報告されるようになり、今回の会議では、原子層堆積法を用いた光学薄膜素子の報告が20件以上あった。

ドイツ、フラウンホーファー研究所からは、原子

層堆積法による SiO_2 と HfO_2 の多層膜ミラー、および反射防止膜のレーザー損傷耐性について報告があった。波長1064 nmのナノ秒パルスレーザーに対し、反射防止膜で $148 \text{ J}/\text{cm}^2$ の高耐力が得られたとのことであった。

久しぶりの国際会議への参加であった。各国の光分野は非常に活気があると感じ、多くの刺激を受けた。今後の研究に生かしていきたい。

最後に、貴重な機会を頂きました東海大学 室谷裕志教授に感謝の意を表します。

【写真】会議参加者



～レーザークロス隔月発行のお知らせ～

長らく毎月発行しておりました本紙レーザークロスですが、本号から隔月発行に移行させていただくことになりました。今後内容をより充実させ、光・レーザー技術とその応用に関する情報をお届けする予定です。よろしくお願いいたします。