

1. 評価対象研究課題

- (1) 研究課題名：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
- (2) 研究代表者：理化学研究所 戎崎 俊一
- (3) 研究期間：平成30年度～令和4年度

2. 終了評価の実施概要

日時：令和5年10月27日

場所：TKP 東京駅大手町 カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所 理事長、上席研究員／東京大学 名誉教授  
平澤 洽（委員長）  
東京工業大学 工学院 電気電子系 教授  
梶川 浩太郎  
東京農工大学 名誉教授  
佐藤 勝昭  
東京工業大学 名誉教授  
谷岡 明彦  
科学技術振興機構 研究開発戦略センター 企画運営室長、  
フェロー  
中山 智弘  
理化学研究所 光量子工学研究センター センター長  
緑川 克美  
量子科学技術研究開発機構 量子技術基盤研究部門  
研究企画部長  
八巻 徹也  
情報通信研究機構 電磁波研究所 リモートセンシング研究室  
主任研究員（兼務）経営企画部 プランニングマネージャー  
山本 真之

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3. 研究と成果の概要

研究の概要

本研究は、高速移動物体に対する追尾能力を備えた遠距離・高強度光伝送システムの構築とフィールド試験を目的として、予測的波面制御技術（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）及び高出力補償ビーム送信技

術について研究する。本システムの発展型としてはスペースデブリの除去への適用を想定している。

#### 成果の概要

サーマルブルーミングによるビームの乱れを補正するため、波面制御システムを開発し、伝送ビームとは別に探索ビームの後方散乱光を検出し波面制御に用い、レーザーの波面位相を補正できることを確認した。さらに、大気揺らぎにより広がるレーザー光の補正を行うことで、レーザーのピーク強度を2倍以上にすることに成功した。本研究の中で実施された、「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行った。試験場の制約のため移動体の追尾試験、遠距離の試射、それに高出力レーザーシステムの構築を実現できなかった。

#### 4. 終了評価の評点

|              |
|--------------|
| B 一応の成果があった。 |
|--------------|

#### 5. 総合コメント

伝搬を考慮した光源側波面制御に成功しており、フィールド実験における乱流構造定数（屈折率擾乱）の影響評価は気象測定への応用が想定されるなど、個々技術では注目できる結果が得られている。

しかし、研究計画の見通しが甘く、全体的には達成度は満足できるものではない。

目的の達成のためのコア技術は何なのか、次に向けてしっかり整理し、今後の応用展開を目指した取り組みを期待する。

#### 6. 評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

##### 6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

波面センサの開発では、世界最高レベルの10kHzで、300m先の点光源を実際に観測し、大気の揺らぎの取得に成功した。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。

可変形鏡開発では、3種（Tip-Tilt補正鏡、Defocus補正鏡、高次項補正鏡）の大型（口径100mm）可変形鏡を製作した。出力100Wの高出力CWレーザーを集光照射する動作試験により、 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ の耐光性および最大10kHzでの高速制御が可能であることを確認した。

伝送ビームは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（ $M^2=1.3$ 以下）なシングルモードファイバーレーザーを製造した。

照射光学系は口径600mmの大型照射光学系を製作し、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。

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リングにより確認した。

#### 【個々の委員によるコメント】（主題的成果）

- ・野外実験は当初の目標である 5km の伝送実験はできなかったが、野外実験によって波面補正効果が実証できた点は評価できる。
- ・採択条件で装置の構築と作動原理の確認を求め、中間評価では波面制御、高出力レーザーの作製、追尾実験の実施を具体的な目標としたが、予期せぬ制約があったとはいえ、評価できる成果は波面制御にとどまっている。
- ・出力など必ずしも目標を達していないが、中間評価で指摘された事項を含めて全体としては概ねできていると思われる。
- ・当初目標をおおむね達成した。レーザー光源の出力未達については、今後の取り組みにより解決をお願いしたい。
- ・目標の達成度を要素技術に絞って評価すれば、かなり未達成項目が多い。
- ・波面センサと可変形鏡に関しては、ほぼ目標を達成しているが、レーザー開発や統合試験については十分な成果が得られていない。
- ・設定の目標に対し未達のものがあるとともに、高速移動物体への適用がなかったのは非常に残念である。
- ・将来のアプリケーションに向けた深堀が足りないように感じた。

#### 6-2. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

システム全体としては、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  $2\mu\text{m}$  ( $\pm 1\mu\text{m}$ ) に対して  $\pm 2\mu\text{m}$  以上（約 2 倍以上）の動作範囲を達成した。

#### 【個々の委員によるコメント】（副次的成果）

- ・大きな成果ではないが、気象関係のセンサへの応用可能性など、いくつかの副次的成果が得られている。
- ・本研究としてはうまくいかなかったが、その経験は多方面で活きると思われる。

#### 6-3. 他の者により派生した成果（間接的成果）

特に無し。

#### 6-4. 科学技術上特筆すべき成果

- ①波面センサは世界最高レベルの 10kHz 動作を達成。
- ②可変形鏡は 10 kHz の高速動作を達成。
- ③レーザー光源は高出力 (2kW)、狭帯域 (0.45nm)、高品質 (M2 = 1.3 以下)、偏光保持 (15/12dB 以下) の種光源を作成。ビーム結合効率 90%以上を達成。
- ④補償光学システムとして 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。

#### 【個々の委員によるコメント】(科学技術上特筆すべき成果)

- ・波面制御を詳細に検討した点は評価できる。フィールド実験における乱流構造定数(屈折率擾乱)の影響評価は興味深かった。気象測定への応用など、広がりのある結果だと考える。
- ・波面センサなど特筆すべき成果をあげている。フィールドワークを行うなど、その成果は得られていると言える。

#### 6-5. 論文(投稿中のものも含む)、学会発表等

学会発表 9件、雑誌・図書 6件、その他 3件

#### 6-6. 特許(出願中のものも含む)

該当なし。

#### 【個々の委員によるコメント】(論文(投稿中のものも含む)、特許、学会発表等)

- ・それなりの成果は見られる。
- ・論文発表や特許がないので、得られた成果を社会に還元できていない。
- ・着実に成果発表を行っているが、インパクトファクターの高い国際学会誌への成果公表があるとなおよかった。

#### 6-7. 科学技術への波及効果

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。

## 6-8. 効率的な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対面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。

### 【個々の委員によるコメント】（効率的な研究実施体制とマネジメント）

- ・効率的な運営ではなく、行き当たりばったり感がある。
- ・幅広い情報収集やそれに基づく議論が研究グループ内で十分に行われていたのか疑問である。

## 6-9. 研究推進時に生じた問題への対応

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作した。

### 【研究推進時に生じた問題への対応】

- ・当初から屋外実験での困難は、ある程度予測されたはずであり、対処が不十分である。フィールド測定につき、より入念な事前検討があるとよかった。
- ・機器の故障など、予想されなかった事態が生じてしまったとのことであるが、ラボと種子島空港の間の環境で十分結果を積み重ねておけばよかったのではないかと感じた。
- ・コロナの影響もあり想定外の問題も多かったと思われるが、それぞれに対する対処が適切であったのか疑問である。

## 6-10. 経費の効率的な執行

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。

**【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）**

- ・予算通りには使用されている。ただし、実験時の予備がないなど、見通しの甘い面があった。
- ・自作装置に係る費用が多くを占める「その他」の経費が多い。