

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

5RF-2001 大気モニタリングネットワーク用低コスト高スペクトル分解ライダーの開発
(JPMEERF20205R01)

令和2年度～令和4年度

Development of low-cost high-spectral-resolution lidar for air quality monitoring network

<研究代表機関>

国立研究開発法人国立環境研究所

<研究分担機関>

国立研究開発法人情報通信研究機構

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	.....	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究目標		
4. 研究開発内容		
5. 研究成果		
5-1. 成果の概要		
5-2. 環境政策等への貢献		
5-3. 研究目標の達成状況		
6. 研究成果の発表状況		
6-1. 査読付き論文		
6-2. 知的財産権		
6-3. その他発表件数		
7. 国際共同研究等の状況		
8. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 ライダーシステムおよびデータ処理手法の最適化に関する研究	.....	14
（国立研究開発法人国立環境研究所）		
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-2 高スペクトル分解ライダー用小型レーザーの開発	.....	27
（国立研究開発法人情報通信研究機構）		
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
III. 研究成果の発表状況の詳細	.....	35
IV. 英文Abstract	.....	37

I. 成果の概要

課題名 5RF-2001 大気モニタリングネットワーク用低コスト高スペクトル分解ライダーの開発

課題代表者名 神 慶孝（国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域
大気遠隔計測研究室主任研究員）

重点課題 主：【重点課題⑩】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び
評価・解明に関する研究

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） 非該当

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

17,290千円（合計額）

（各年度の内訳：令和2年度：5,980千円、令和3年度：5,850千円、令和4年度：5,460千円）

研究体制

（サブテーマ1）ライダーシステムおよびデータ処理手法の最適化に関する研究

（国立研究開発法人国立環境研究所）

（サブテーマ2）高スペクトル分解ライダー用小型レーザーの開発

（国立研究開発法人情報通信研究機構）

研究協力機関

研究協力機関はない。

本研究のキーワード 大気エアロゾル、PM2.5、黄砂、ブラックカーボン、大気汚染、物質循環、環
境計測、リモートセンシング、ライダー

1. はじめに（研究背景等）

大気微粒子（エアロゾル）は日傘効果や雲形成等を通じて地球の気候に影響を与える一方で、吸入ばく露を通じてヒトの健康にも影響を与えている。とりわけPM2.5については日々の濃度の監視のみならず、その成分や健康影響の解明が求められている。しかし、エアロゾルの構成は複雑で、鉱物ダストや海塩粒子、ブラックカーボンやその他の大気汚染性粒子など多種にわたり、実大気中ではそれらが混在している。さらに、越境汚染など、発生源から離れた地域に汚染物質が輸送されるケースも多くあり、その動態を把握することは容易ではない。これまで国立環境研究所では、直接サンプリングによる研究以外にも、環境省や様々な研究機関と共同で東アジア域に約20地点のレーザーライダー（ライダー）観測網を構築し、その観測域においてエアロゾルの高度分布の時間変化を多地点で同時に観測することで、エアロゾルの立体的な分布を調査してきた。また、ライダーデータから鉱物ダストやブラックカーボンなどのエアロゾル種を抽出する解析手法の開発にも成功している。しかし、これら多種類のエアロゾル濃度を測定するためには、現状のネットワークライダーの高度化が不可欠である。

ライダーの高度化には、ラマン散乱ライダーと高スペクトル分解ライダー（HSRL）の2つの手法が

ある。ラマン散乱ライダーは、現在観測網の約半数の地点で導入されているが、極めて微弱な信号であるため昼間の観測は困難である。一方で、HSRLは昼間でも高感度でエアロゾル濃度を測定できる有力な手法である。しかし、HSRLで使われるシングルモードレーザー（周波数モードが一つのレーザー）は、環境省ライダー等に広く使われているマルチモードレーザー（周波数モードが複数のレーザー）と比べて高価である（約2倍のコスト）。また、従来の手法では、レーザー波長や分光器の精緻な制御を必要とするため、安定した常時測定が難しくなる。さらに、多波長で測定する場合、複数の分光器が必要になり、高コストで制御も複雑化する。このような背景から、多地点で常時運用するような多波長HSRLシステムの構築は困難であった。

近年、研究代表者のグループは、上記の高コストや技術課題を克服できる革新的な手法として、マルチモードレーザーと走査型干渉計を用いたHSRL手法を開発した。この手法によって、「シングルモードレーザーは必須条件」、「レーザー波長ないしは分光器の制御は複雑」、「測定波長毎に分光器が必要」とされてきたHSRL手法の常識を覆し、安価で簡易的な多波長HSRLシステムの構築が可能となった。この手法は国際雑誌に論文として発表しただけでなく、研究代表者が筆頭開発者として特許権も取得した（特許 第6243088号）。しかし、市販のレーザーではHSRL用に設計されておらず、最適なレーザー光源がないことから、現状では常時運用可能なシステムの実現には至っていない。

2. 研究開発目的

本研究では、大気微粒子の動態を把握するための観測ネットワークの構築を主眼とし、昼夜で多種類のエアロゾルの定量観測ができる低コストで簡易的なライダーシステムの開発を目的とする。最新の特許技術を活用・発展させることで、エアロゾルを高精度かつ連続的に測定できる全く新しいHSRLシステムを開発し、将来的には自動連続観測システムとして多地点に展開することを目指す。

3. 研究目標

全体目標	マルチモードレーザーを光源とする高スペクトル分解ライダーシステムを構築し、毎時のエアロゾル消散係数の高度プロファイルを連続的に測定して、1ヶ月間のデータセットを導出することを本研究の最終目標とする。この時、エアロゾル消散係数は種類別（鉱物ダスト、海塩粒子、ブラックカーボン、大気汚染性粒子等）に抽出する。この目標を達成することによって、自動連続運用可能で将来的なライダー観測網強化に資するシステムを確立する。
サブテーマ1	ライダーシステムおよびデータ処理手法の最適化に関する研究
サブテーマリーダー/所属機関	神 慶孝/国立研究開発法人国立環境研究所
目標	低コストで簡易的なライダーで多種類のエアロゾルを定量的に測定するため、走査型干渉計を用いた高スペクトル分解ライダーを構築して連続観測実験を実施し、測定データを準リアルタイム（1時間毎）で自動解析してエアロゾル消散係数を出力するシステムを開発する。また、多波長測定に係る干渉計の制御方法およびデータ解析手法を確立する。
サブテーマ2	高スペクトル分解ライダー用小型レーザーの開発
サブテーマリーダー/所属機関	青木 誠/国立研究開発法人情報通信研究機構
目標	HSRLに適した光源を提供するため、主発振器出力増幅器（MOPA）方式を採用し

た小型Nd:YLFレーザーを開発する。市販レーザーに比べて小型で、かつスペクトル幅が狭いレーザーをHSRL用に設計する。

4. 研究開発内容

本研究の研究開発内容の概要と研究体制を図-0.1に示す。多種エアロゾルの定量観測を目的とした低コストで簡易的なライダーシステムを実現するため、マルチモードレーザーと走査型干渉計を用いた高スペクトル分解ライダー(HSRL)システムを開発した。本研究は2つのサブテーマで構成される。サブテーマ1(国立環境研究所)では、レーザー光源を除くライダーシステム全体の開発と測定データの解析手法に関する研究を実施した。サブテーマ2(情報通信研究機構)では、HSRL用の小型レーザーを開発した。通常のHSRL手法ではシングルモードレーザーを用いるが、本研究ではより安価なマルチモードレーザー(複数の波長ピークを持つレーザー)を用いる。市販のレーザーでは高感度なHSRL測定が困難であるため、本研究で最適なレーザーを開発した。各サブテーマの3年間の研究内容と課題全体の年度目標についてまとめた表を表-0.1に示す。初年度でシステムの肝となる干渉計とレーザーの設計・開発を進め、2年目でライダーシステムのプロトタイプを完成させた。レーザーなど装置の改良を加えた後、最終年度で長期観測実験を実施し、測定データを解析して、種々のエアロゾルの消散係数を推定した。また、各エアロゾル種の消散係数を重量濃度に換算し、1ヶ月間データセットを導出した。以下に各サブテーマで実施した研究内容の概要を記述する。

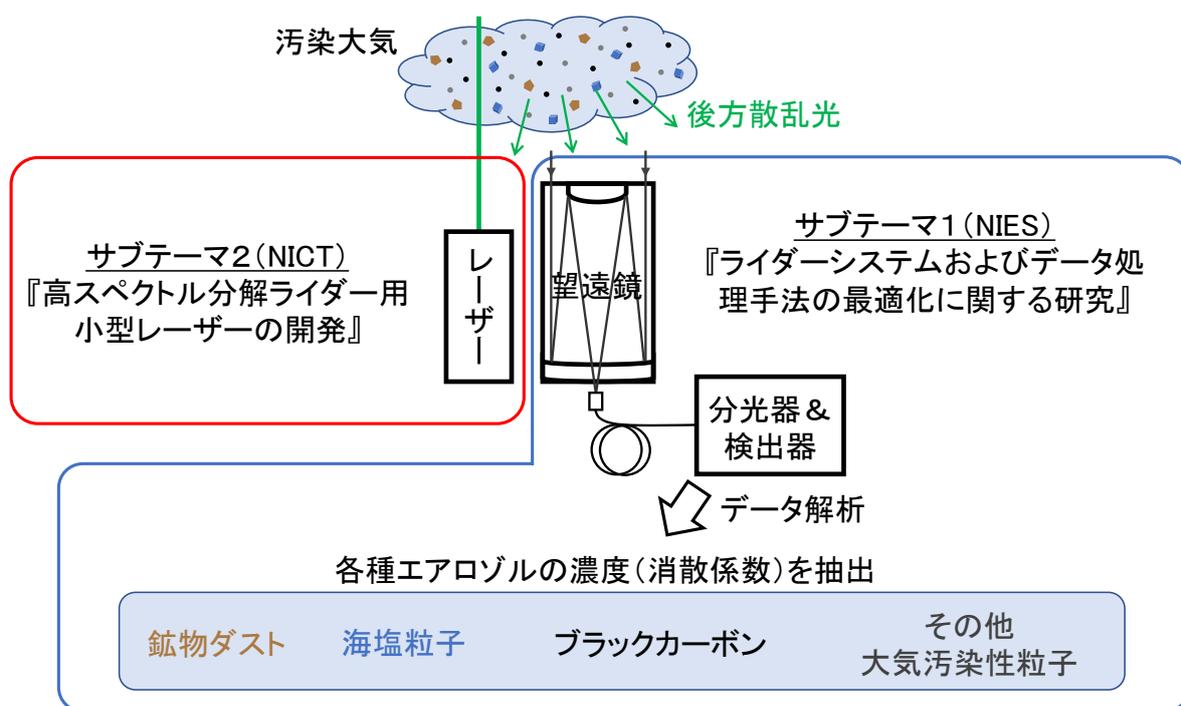


図-0.1 本課題の研究内容の概要と研究体制

表-0.1 各サブテーマの研究内容と課題全体の年度目標

	研究課題全体としての 年度毎の到達目標	サブテーマ1 (NIES): ライダーシステムおよび データ処理手法の最適化	サブテーマ2 (NICT): 高スペクトル分解ライダー用 小型レーザーの開発
令和2年	・試作レーザーのスペクトル特性を干渉計を使って評価する	・ライダーシステムの設計と干渉計の製作	・レーザー光学系の設計と主発振器の製作
令和3年	・ライダーシステムのプロトタイプを完成させる	・干渉計スキャンの最適化とライダーシステムの組立	・試作レーザーの完成
令和4年	・エアロゾル消散係数の1ヶ月間データセットを導出する	・データ解析手法の最適化、ライダーの性能評価、論文執筆	・レーザー改良と論文執筆

【サブテーマ1】

表-0.2にサブテーマ1の研究スケジュールを示す。サブテーマ1では、初年度にライダーシステム全体を設計し、目標の測定感度（消散係数で0.01 /km、PM2.5の重量濃度に換算すると2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）を達成するための仕様を決定した。設計に基づいて物品を調達し、システムの肝となる干渉計を製作した。また、干渉計の周波数スキャンの制御方法について最適化を図った。開発した干渉計を用いてサブテーマ2のレーザーのスペクトル特性（レーザーの周波数モード間隔、スペクトル幅、周波数安定性）を評価した。2年目は、マルチモードレーザーの開発（高出力化）と並行して、シングルモードレーザーを用いた多波長HSRLによる連続観測実験を実施し、走査型干渉計を用いた手法による安定性を確認するとともに、測定データの解析プログラム（信号処理システム）の開発を行った。また、サブテーマ2の開発レーザーを組み込んだライダーシステムのプロトタイプを構築した。最終年度では、開発したライダーシステムによる大気エアロゾルの高度プロファイルの連続観測実験を実施した。観測データを1時間毎に解析し、エアロゾルの消散係数および各エアロゾル種（ブラックカーボン、海塩粒子、大気汚染粒子、鉱物ダスト）の重量濃度の推定を行った。

表-0.2 研究計画のロードマップ（サブテーマ1）



【サブテーマ2】

表-0.3にサブテーマ2の研究スケジュールを示す。サブテーマ2では、HSRL観測に適した光源を提供するため、主発振器出力増幅器（MOPA）方式を採用した小型レーザーの開発に取り組んだ。小型レーザーは主発振器レーザー、レーザー増幅器、波長変換部から構成される（図-2.2）。初年度には、主発振器レーザーの設計、開発、性能評価を実施した。2年目には、レーザー増幅器、波長変換部の設計と開発を実施して小型レーザーを完成させた。完成させた小型レーザーをサブテーマ1で開発したHSRLシステムに組み込んだ。最終年度は、小型レーザーを構成する各要素の性能向上に努めて、レーザー出力

の向上および連続観測に向けた装置改良を実施した。なお、当初の計画では、レーザーの種類としてNd:YLFレーザーを導入する予定だったが、システム設計や構成部品の価格調査を実施した結果、HSRL全体の開発コストをより低く抑えられるNd:YAGレーザーに計画を変更した。発振器の変更によりレーザー開発の難易度が上がったが、アドバイザーおよびプログラムオフィサーの指導助言を受け、要求仕様の変更や設計の見直しにより、十分に実現可能な設計となった。

表-0.3 研究計画のロードマップ（サブテーマ2）

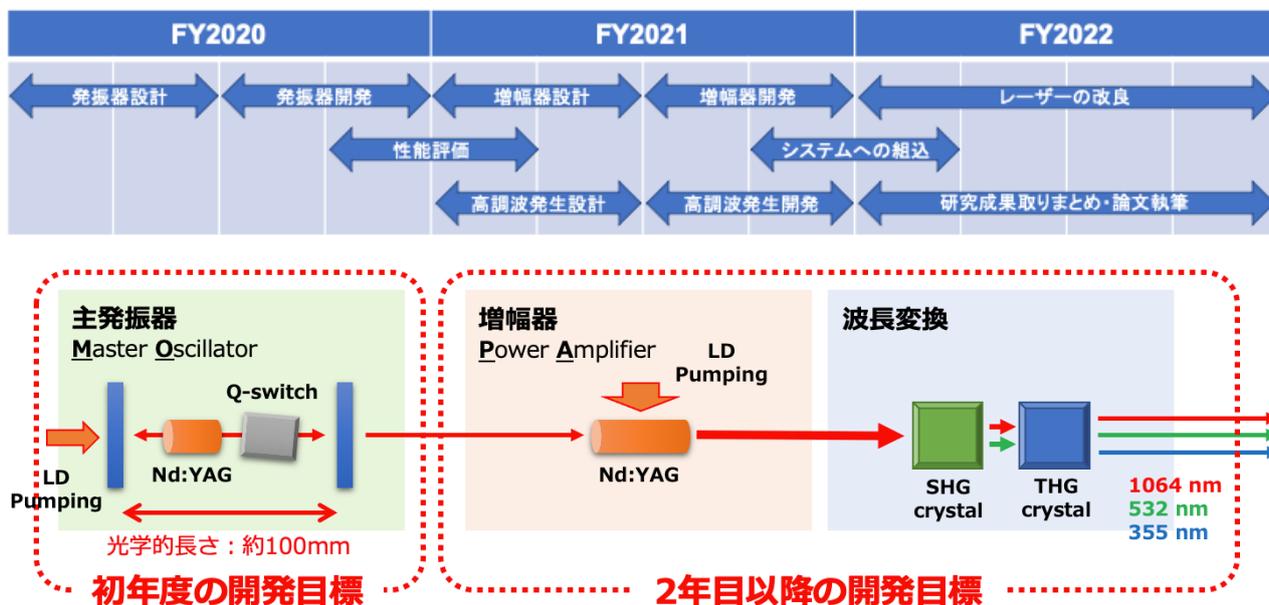


図-2.2 HSRLに適したMOPA方式のレーザーの概略

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

以下に研究成果のハイライトを記述する。

- (1) 高スペクトル分解ライダー用に適した小型・低コストのマルチモードレーザーの開発に成功した。レーザーの構成を主発振器（出力は低いがHSRLに適したスペクトルを持つ）と増幅器（主発振器からの光を増幅して出力を大きくする）に分けることで、HSRLの光源として実用的なレーザーを実現した。レーザー開発に関して、特許出願を果たしている。（サブテーマ2）
- (2) 走査型干渉計を用いることで、長期運用可能な高安定HSRLシステムの開発に成功した。多波長測定用の干渉計を新たに開発し、レーザー発振と同期した制御を行うことで、測定データ量の大幅な縮小（約10分の1）とそれに伴う処理の高速化を実現した。室温が大きく変わる環境下においても安定的に動作することを確認し、将来的なライダー観測網強化に資するシステムを確立した。（サブテーマ1とサブテーマ2の連携）
- (3) 多波長HSRL観測データから準リアルタイム（1時間毎）でエアロゾル消散係数を自動解析し、各エアロゾル種の濃度を推定する解析アルゴリズムを開発した。黄砂濃度以外にもブラックカーボンや海塩粒子、大気汚染粒子の濃度を測定することに成功した。最終目標であるエアロゾル濃度の1ヶ月間データセットの出力を達成した。（サブテーマ1）

上記のハイライトについて、以下に具体的な内容を記述する。

(1) 高スペクトル分解ライダー用のレーザー開発

HSRLシステムに適した光源の条件は、レーザーの各モードのスペクトル幅が狭く（時間的なパルス幅が長く）、各モードのピーク周波数が安定かつ干渉計のスペクトル間隔と一致する必要がある。レーザーの各モードのピーク周波数間隔は、レーザーの共振器長によって決定される。本研究では、各モードのピーク周波数とHSRLに最適化された干渉計のスペクトル間隔を一致させるために、従来のエアロゾルライダーに使用されているNd:YAGレーザーよりも短い100 mmの光学的距離を持つ小型の主発振器レーザーを開発した。サブテマ1の干渉計を用いて主発振器レーザーのスペクトル特性を評価したところ、周波数モード間隔（ ~ 1.5 GHz）、スペクトル幅（ ~ 60 MHz）、周波数変動（ < 20 MHz）のいずれも要求仕様を満たしており、HSRL用の光源として実用的なスペクトルを持つレーザーを実現した。発振器出力はレーザーダイオード端面励起のレーザー増幅器によって増幅され、エアロゾルライダーとして利用可能な出力を得た。図-2.8に、開発したMOPA方式の3波長レーザーの入出力特性を示す。最大励起時には、203 mW (2.03 mJ) の基本波出力、88.1 mW (0.881 mJ) の第二高調波出力、30.3 mW (0.303 mJ) の第三高調波出力が得られた。

図-2.7に、開発した主発振器モジュール、増幅器モジュール、波長変換モジュールによって構成した3波長MOPAレーザーを示す。主発振器レーザー出力は、戻り光対策用のアイソレータを通過した後、1/2波長板によって偏光方向をs偏光に調整されて、増幅器モジュールに入射する。増幅パスは、増幅用のレーザーロッド内に蓄積されたエネルギーを効率的に利用するために4パス構成としており、偏光ビームスプリッタ（PBS）と1/4波長板を使用してレーザーの偏光を利用することでこれを実現した。増幅器モジュールによって増幅された主発振器のレーザー光は、1/2波長板によって偏光方向を調整された後、波長変換部（第二高調波発生及び第三高調波発生）によって、532 nmと355 nmのレーザー光に波長変換される。また、レーザーの安定動作化のために、光学系全体は600 mm \times 300 mm \times 200 mmの可搬型レーザー筐体内に収められている。レーザーを構成する発振器等には、温度調整機能が付加されており、動作環境温度が変動したとしても、長期の連続観測に耐えることが可能である。また、研究成果の一環として本課題で開発を行ったレーザー装置とそれを用いるライダー装置に関する特許出願を行った。

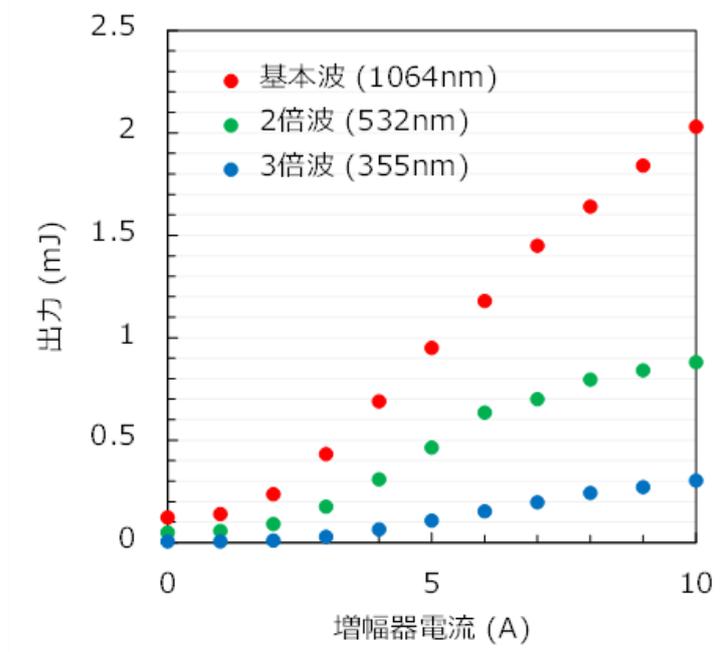


図-2.8 MOPA方式の3波長レーザーの発振特性

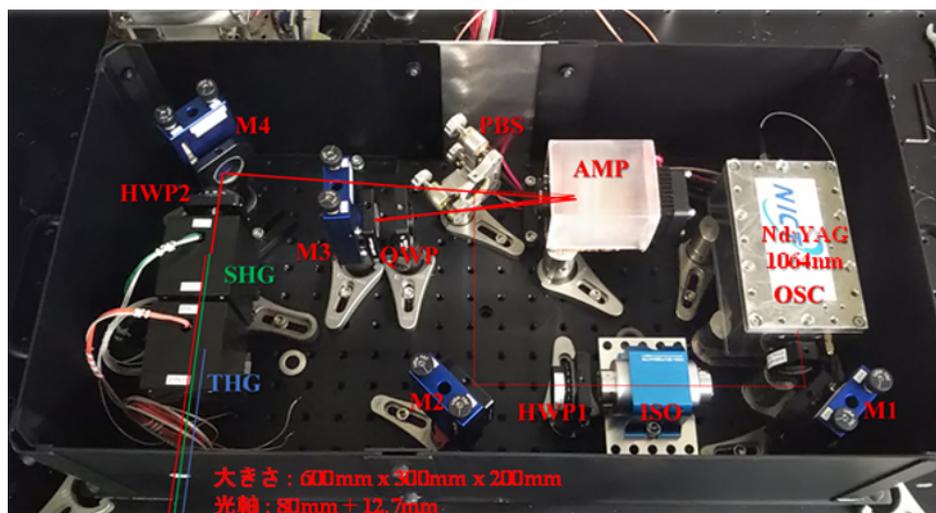


図-2.7 MOPA方式の3波長レーザー (M1～M4：ミラー、ISO：アイソレータ、OSC：主発振器、AMP：増幅器、PBS：偏光ビームスプリッター、QWP：1/4波長板、HWP1～HWP2：半波長板、SHG：第二高調波発生モジュール、THG：第三高調波発生モジュール)

(2) 走査型干渉計を用いた高安定HSRLシステムの開発

本研究は、走査型干渉計を用いた高スペクトル分解ライダー (HSRL) 手法を導入した。干渉計を用いてエアロゾルからのミー散乱と大気分子からのレイリー散乱を分離して測定することで、エアロゾルの消散係数を後方散乱係数とは独立して抽出することができ、環境省ライダーよりも高精度な測定が可能となる。本研究の走査型干渉計では、干渉縞の1フリンジ分だけ周期的にスキャンする。得られたスキャン信号を正弦関数でフィッティング解析することで、干渉信号の最小値と最大値を推定し、干渉鮮明度を抽出する。この時、1フリンジ分のスキャン幅は波長によって異なり、波長が長くなるほどスキャン幅は広がるため、スキャン幅を長波長側に合わせた。また、レーザーの発振タイミングに同期して干渉計を制御することで、スキャン方法を最適化した。このスキャン方式を使って測定されたスキャンデータを図-1.7に示す。横軸は干渉計位置決めを使用したピエゾ素子の印加電圧を干渉縞の位相に変換している。図中の赤四角は各点の平均値を、実戦はスキャンデータについてフィッティングされた曲線を示す。固定のステップ幅でスキャンすることで、測定データの積分が可能になり、ノイズを低減できるだけでなく、データ量の縮小とデータ解析の高速化に成功した。

走査型干渉計とサブテマ2で開発されたマルチモードレーザーを組み合わせることでライダーシステム全体を構築し、1ヶ月間の連続測定実験を実施した。図-1.3にライダーシステム全体と干渉計の写真を示す。レーザーや干渉計、受信望遠鏡は1,000 mm×700 mmの光学定盤に固定し、高安定ミラーホルダーを用いて光軸を調整した。環境省ライダーの環境下で運用すること想定し、開発装置は国立環境研究所構内における15フィートコンテナの中に設置した。ライダーシステム全体は環境省ライダーと同等であるが、従来型のHSRLと比べて約4分の1の大きさになっている。また、干渉計は温度変化による光軸ズレの影響を強く受けるため、断熱材でカバーした。また、波長毎に光路差を最適化できるようにするため、干渉計の片側のアーム (図-1.3(b)では上側) にビームスプリッターを設置した。また、検出器には光電子増倍管よりも光検出感度の高いMulti-pixel photon counter (MPPC)を導入した。

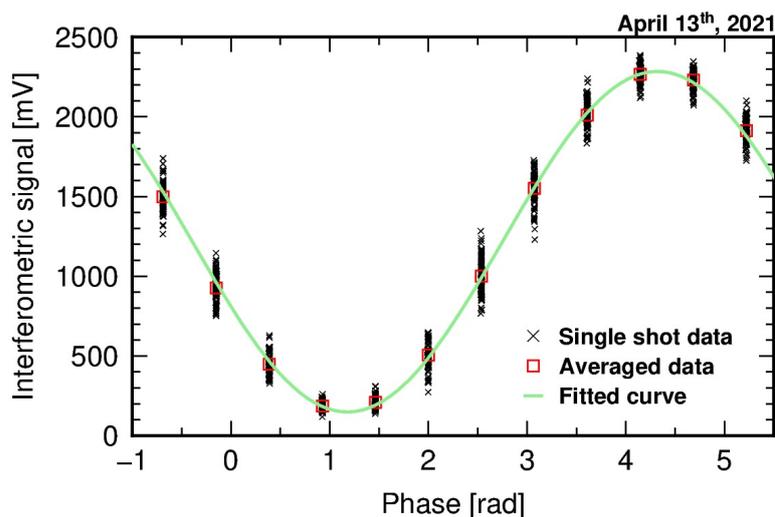


図-1.7 スキャン信号とフィッティング解析の例

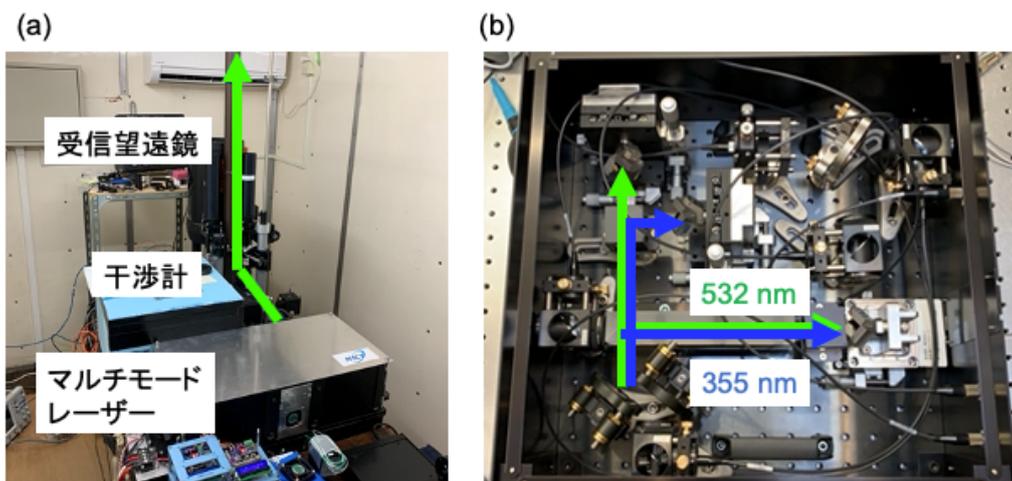


図-1.3 (a) ライダーシステム外観、(b) 2波長分光用干渉計

本課題で開発されたライダーで観測されたエアロゾル光学特性（粒子消散係数、粒子偏光解消度、ライダー比、後方散乱カラー比）の時系列データを図-1.12 に示す。走査型干渉計を用いた手法で安定的に1ヶ月間の連続観測データが得られた。観測期間中、コンテナ内部の温度は最大で約10度の寒暖差があったが、レーザーや干渉計、受信望遠鏡の光軸のズレはなく、厳しい環境下においても問題なく稼働できることを示した。また、高度1~2 kmまでの境界層内のエアロゾルだけでなく、自由対流圏でのエアロゾルの分布も観測できているため、長距離輸送されてきたエアロゾルについても解析が可能である。開発ライダーでは、干渉計を用いた手法により、地上付近（約15 m）から後方散乱係数を観測することが可能となった。環境省ライダーでは、高度600 m以下のデータについて高度毎に補正係数を決定する必要があったが、開発ライダーでは補正係数が不要であることは大きな特長である。さらに、従来型の高スペクトル分解ライダーと比べてレーザーの出力が約2桁低い（約400分の1）にも関わらず、従来型のシステムと同等の測定誤差を持つことから、測定効率が大幅に向上したことを示唆している。また、設定した消散係数の目標感度（0.01 /km）を高度6 kmまで十分に達成していることがわかった。

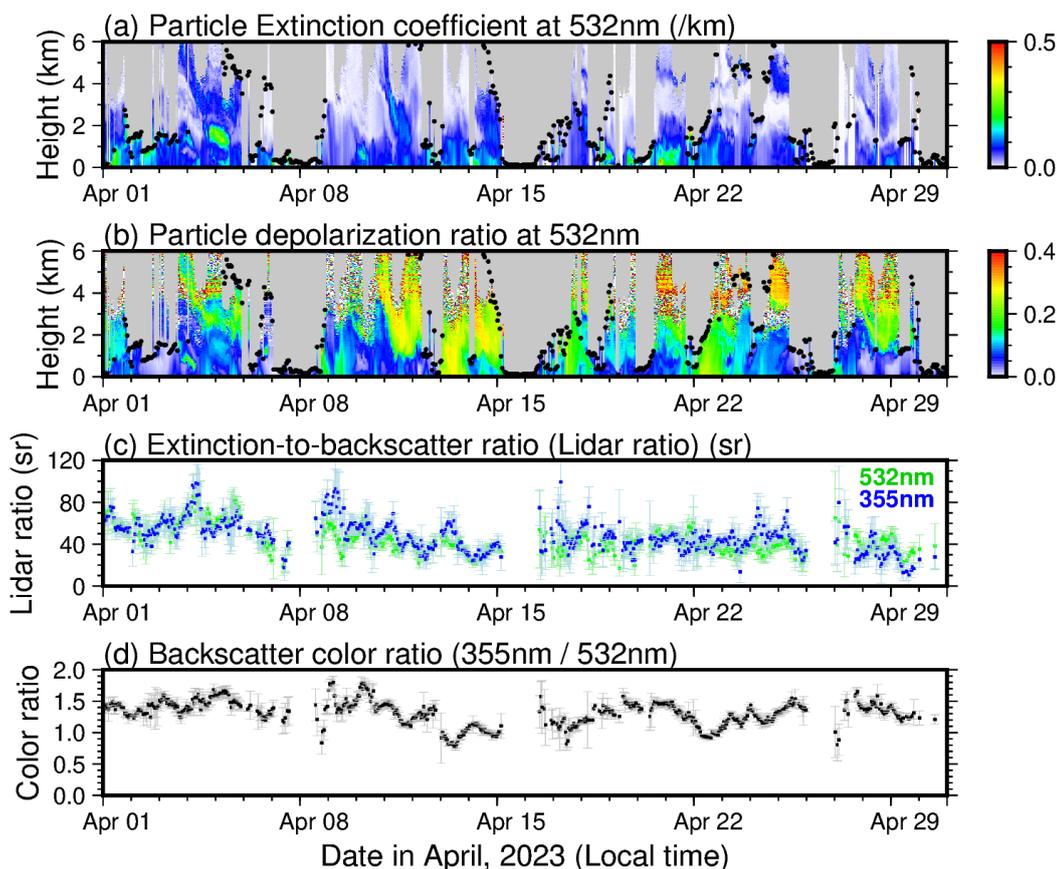


図-1.12 開発ライダーで観測されたエアロゾル光学特性の1ヶ月間データ：(a)波長 532 nm の粒子消滅係数、(b)波長 532 nm の粒子偏光解消度、(c)消滅係数/後方散乱係数比（ライダー比）、(d)後方散乱カラー比（355 nm/532 nm）、(a)と(b)の時間・高度分解能は1時間・30m、(a)と(b)の黒点は雲底または降水を示し、黒点より上空のデータは灰色でマスクされている

(3) 多波長 HSRL 観測データを用いたエアロゾル濃度の推定

図-1.12 で示した粒子消滅係数、粒子偏光解消度、ライダー比、後方散乱カラー比の4つのパラメータを用いることで4種のエアロゾル（ブラックカーボン、海塩粒子、大気汚染粒子、鉱物ダスト）について消滅係数を推定し、さらに重量濃度に変換した（図-1.13）。偏光解消度が大きい時は黄砂（鉱物粒子）が卓越しており、関東で報道された4月13日のイベントでは地上付近において約 0.1 mg/m^3 の黄砂が観測された。4月22日にも同様に約 0.1 mg/m^3 の黄砂が観測されている。黄砂イベント前の4月20日～21日には大気汚染粒子が卓越しており、約 $30 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ のエアロゾル濃度が観測された。4月29日は低いライダー比の特徴を持つ海塩粒子が観測されている。この日はつくばにおいて強い南風（最大瞬間風速 15 m/s ）が1日中観測されており、太平洋からの海塩粒子が輸送されてきた可能性がある。ブラックカーボンについては、観測期間中は濃度 $1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 以下であり、高濃度イベントは発生しなかった（図-1.13(a)のカラースケールの値が他のエアロゾル種とは1桁異なることに注意）。4月3日～5日にかけて黄砂イベントが上空に飛来していたが、この時の偏光解消度はその他の黄砂イベントと比べて小さく、大気汚染粒子やブラックカーボンなどの微小粒子と黄砂が混合して飛来してきたことを示唆している。図-1.13 に示すように、本課題の最終目標であるエアロゾル濃度の1ヶ月間データセットを出力することに成功した。また、種類別のエアロゾル濃度を足し合わせることで、PM_{2.5}濃度の高度プロファイルの時系列を推定した（図-1.14）。今後、PM_{2.5}濃度やブラックカーボンの濃度を地上成分測定器の結果と比較することで本ライダーで観測されるエアロゾル濃度の有効性を検証する予定である。

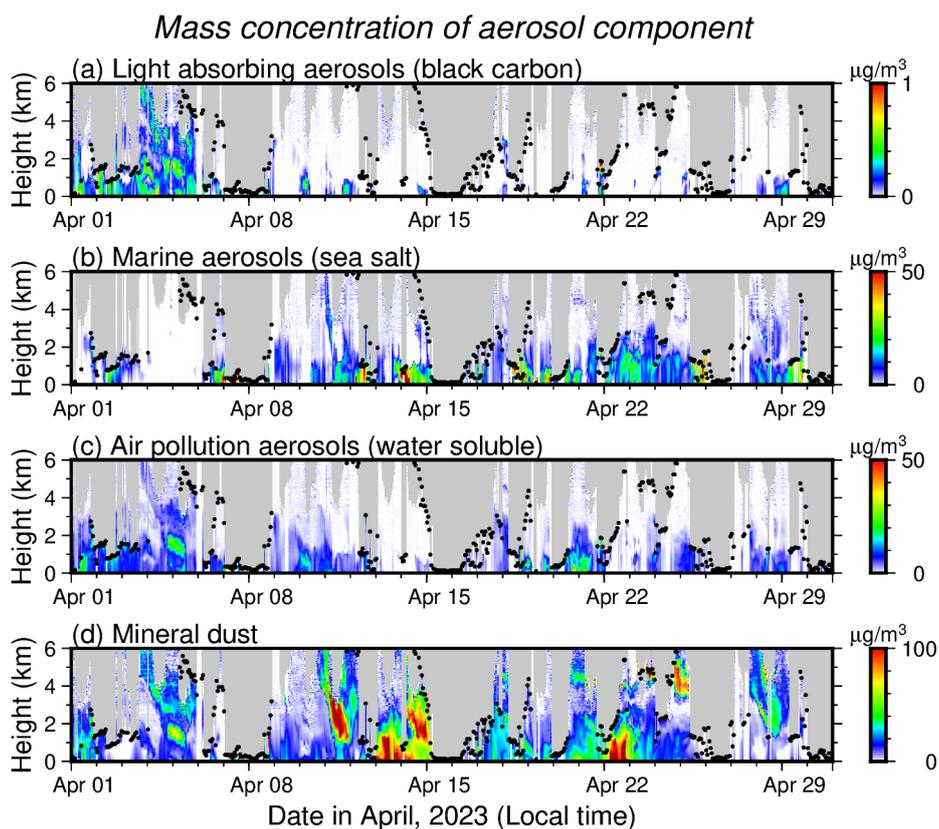


図-1.13 エアロゾル消散係数から推定された各種エアロゾルの重量濃度の1ヶ月間データ：(a)ブラックカーボン、(b)海塩粒子、(c)大気汚染粒子、(d)鉱物ダスト、図中の黒点は雲底または降水を示し、黒点より上空のデータは灰色でマスクされている

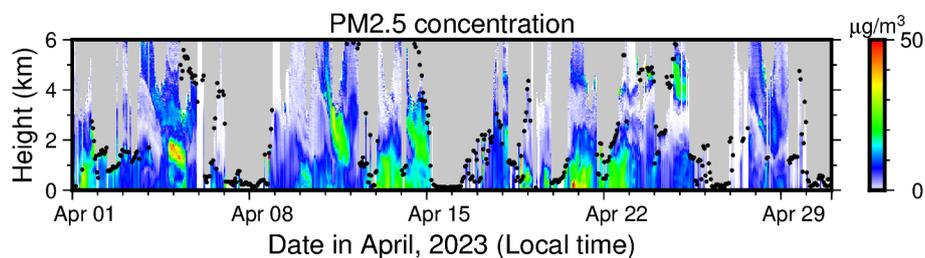


図-1.14 開発ライダーで観測されたPM2.5重量濃度の1ヶ月間データ、図中の黒点は雲底または降水を示し、黒点より上空のデータは灰色でマスクされている

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

特になし。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

本研究によるライダー開発によって、多種類のエアロゾル濃度の測定が可能となり、将来的には環境省のエアロゾルライダー観測網の強化につながる。環境省ライダーを含む従来のライダーと本課題のライダーとの比較を表-0.3に示す。現行の環境省ライダーでは、非球形粒子（主に鉱物ダスト）とその他の球形粒子に分類しているが、新規ライダーでは、さらに煤と海塩粒子も測定する。また、現行のライダーよりも消散係数の測定精度が向上するため、 0.05 mg/m^3 以下の精度で黄砂重量濃度を提

供で見ることが見込まれる（現行の黄砂飛来情報の最低検出感度は0.1 mg/m³）。また、開発ライダーをネットワーク展開することで、東アジアにおける大気エアロゾルの動態解明や健康影響評価への貢献が見込まれる。エアロゾルの高度分布のデータは、地上サンプリングでは得られない情報であり、化学輸送モデルの改良やデータ同化への活用が期待される。

表-0.3 本研究の開発ライダーと既存ライダーとの違い

ライダーの種類	測定感度	測定精度・定量性	成分測定	安定性	初期コスト	運用コスト	サイズ
偏光ミュー散乱ライダー (現行の環境省ライダー)	○	△	DS	◎	◎	△	○
ラマンライダー (一部地点で設置)	△ (昼間×)	◎	DS, AP, SS, BC	◎	◎	△	△
高スペクトル分解ライダー (従来手法)	◎	◎	DS, AP, SS, BC	△	×	△	×
高スペクトル分解ライダー (本研究)	◎	◎	DS, AP, SS, BC	○	○	◎	○

DS: 鉱物ダスト、SS: 海塩粒子、AP: 大気汚染性粒子、BC: 煤

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
マルチモードレーザーを光源とする高スペクトル分解ライダーシステムを構築し、毎時のエアロゾル消散係数の高度プロファイルを連続的に測定して、1ヶ月間のデータセットを導出することを本研究の最終目標とする。この時、エアロゾル消散係数は種類別（鉱物ダスト、海塩粒子、ブラックカーボン、大気汚染性粒子等）に抽出する。この目標を達成することによって、自動連続運用可能で将来的なライダー観測網強化に資するシステムを確立する。	<u>目標を上回る成果をあげた。</u> 本課題で開発したライダーを用いて毎時の種類別エアロゾル濃度の高度プロファイルを連続的に測定し、最終目標である1ヶ月間データセットの導出に成功した。マルチモードレーザーを用いた高スペクトル分解ライダーによる長期運用の例は世界初であり、次世代のエアロゾルライダーとして先駆的な研究成果をあげることができた。さらに、レーザー開発に関連して、当初の研究計画には無い特許出願を果たした。
サブテーマ1目標	目標の達成状況
低コストで簡易的なライダーで多種類のエアロゾルを定量的に測定するため、走査型干渉計を用いた高スペクトル分解ライダーを構築して連続観測実験を実施し、測定データを準リアルタイム（1時間毎）で自動解析してエアロゾル消散係数を出力するシステムを開発する。また、多波長測定に係る干渉計の制御方法およびデータ解析手法を確立する。	<u>目標を上回る成果をあげた。</u> 走査型干渉計を用いた高スペクトル分解ライダーを構築し、測定データを1時間毎に自動解析してエアロゾル消散係数および種類別エアロゾル濃度を出力するシステムの開発に成功した。また、干渉計のスキャンをレーザー発振と同期して制御することによって、データサイズの縮小と信号処理の高速化に成功した。マルチモードレーザーと走査型干渉計を用いることで、従来型の高スペクトル分解ライダーと比べてコストを約半分に抑える

	<p>ことができ、大きさも約4分の1とコンパクトなシステムにすることができた。また、高スペクトル分解ライダーに適したマルチモードレーザーを導入したことにより、長期運用が可能なシステムを実現した。</p>
--	---

サブテーマ2目標	目標の達成状況
<p>HSRLに適した光源を提供するため、主発振器出力増幅器（MOPA）方式を採用した小型Nd:YLFレーザーを開発する。市販レーザーに比べて小型で、かつスペクトル幅が狭いレーザーをHSRL用に設計する。</p>	<p>目標を上回る成果をあげた。</p> <p>高スペクトル分解ライダー観測に適した、市販レーザーに比べて小型で、かつスペクトル幅が狭いレーザーの開発に成功した。小型レーザーは主発振器レーザー、レーザー増幅器、波長変換部から構成される。初年度には、主発振器レーザーの設計、開発、性能評価を実施して、当初計画していた性能が得られることを確認した。2年目には、レーザー増幅器、波長変換部の設計と開発を実施、小型レーザーを完成させてサブテーマ1で開発した高スペクトル分解ライダーシステムへの組み込みを実施した。最終年度には、小型レーザーを構成する各要素の性能向上に努めて、最終的に連続観測に耐えるレーザーの開発に成功した。また、研究成果の一環として本課題で開発を行ったレーザー装置とそれを用いるライダー装置に関する特許出願を行った。</p>

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

4件

<主な査読付き論文>

- 1) 神慶孝：レーザー研究, 48, 11, 585-590 (2020), 高スペクトル分解ライダー手法による大気エアロゾル計測.
- 2) Y. JIN, T. NISHIZAWA, N. SUGIMOTO, S. TAKAKURA, M. AOKI, S. ISHII, A. YAMAZAKI, R. KUDO, K. YUMIMOTO, K. SATO, and H. OKAMOTO: Applied Optics, 61, 13, 3523-3532 (2022), Demonstration of aerosol profile measurement with a dual-wavelength high-spectral-resolution lidar using a scanning interferometer. (IF: 1.905)
- 3) Y. JIN and M. AOKI: EquinOCS conference proceedings of the 30th International Laser Radar Conference, (2023), Development of low-cost high-spectral-resolution lidar using compact multimode laser for air quality measurement. (in press)

6-2. 知的財産権

- 1) 青木誠、神慶孝：情報通信研究機構、国立環境研究所；「固体パルスレーザー装置およびそれを用いたライダー装置」、特願2023-22663、令和5年2月16日

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	2件
口頭発表（学会等）	12件
「国民との科学・技術対話」の実施	1件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究費の研究成果による受賞	0件
その他の成果発表	1件

7. 国際共同研究等の状況

2022年度よりフランス国立航空宇宙研究所(ONERA)と「大気エアロゾル特性評価のための近距離用高スペクトル分解ライダーの開発」に関する国際共同研究を開始した（カウンターパート氏名・所属：Romain Ceolato・ONERA Optics and Associated Techniques Department）。本共同研究では、ブラックカーボンやブラウンカーボンなどの光吸収性エアロゾルの放射特性を評価することを主眼としており、エアロゾルチャンバーで生成した光吸収性エアロゾルを近距離用高スペクトル分解ライダーで計測することにより、ライダー信号と光散乱理論のギャップを埋める重要な観測データを得ること目指している。本共同研究で得られる光吸収性エアロゾルの散乱・吸収特性の観測データおよび散乱理論を応用することで、本課題で開発するライダーのブラックカーボン測定精度の向上に繋がる他、将来的なブラウンカーボンの測定手法の開発を見据えている。

8. 研究者略歴

研究代表者

神 慶孝

名古屋大学大学院環境学研究科博士後期課程修了、博士（理学）、現在、国立研究開発法人国立環境研究所 主任研究員

研究分担者

1) 青木 誠

静岡大学創造科学技術大学院博士後期課程修了、博士（工学）、現在、国立研究開発法人情報通信研究機構 主任研究員

II. 成果の詳細

II-1 ライダーシステムおよびデータ処理手法の最適化に関する研究

国立研究開発法人国立環境研究所

地球システム領域 大気遠隔計測研究室

神 慶孝

[要旨]

多種類のエアロゾルを定量的に観測するための低コストで簡易的なライダーシステムを実現するため、マルチモードレーザーと走査型干渉計を用いた高スペクトル分解ライダーシステムを開発した。最初にライダーシステム全体を設計し、目標の測定感度（消散係数で0.01 /km、PM2.5の重量濃度に換算すると2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）を達成するための仕様を決定した。設計に基づいてシステムの肝となる干渉計を製作し、周波数スキャンの制御方法について最適化を図った。レーザー発振のタイミングと同期して固定のステップ幅でスキャンすることで、干渉縞の位相毎に測定データを積算することが可能になり、データ量の縮小とデータ解析の高速化に成功した。次に、開発した干渉計を用いてサブテーマ2のレーザーのスペクトル特性を評価した。マルチモードレーザーの周波数モード間隔、スペクトル幅、周波数変動について要求仕様を満たしていたことから、高スペクトル分解ライダー用の光源として実用的なスペクトルを有していることがわかった。次に、走査型干渉計を用いた手法による安定性を確認するため、シングルモードレーザーを用いた多波長高スペクトル分解ライダーによる連続観測実験を行った。走査型干渉計を用いることで1ヶ月以上安定して動作することを確認し、本研究で開発するライダー受光部の有効性を実証した。最終年度では、サブテーマ2の開発レーザーを組み込んだライダーシステムによる連続観測実験を実施した。目標の測定感度を達成し、先行研究のシステムよりも測定効率が大幅に向上したことがわかった。観測データを1時間毎に解析し、エアロゾルの消散係数および各エアロゾル種（ブラックカーボン、海塩粒子、大気汚染粒子、鈦物ダスト）の重量濃度の推定を行った。本課題の最終目標であるエアロゾル濃度の1ヶ月間データセットを構築することに成功した。

1. 研究開発目的

サブテーマ1ではレーザーを除くライダーシステム全体の開発と測定データの解析を行う。ライダーシステムで肝となる干渉計の設計および制御方法の最適化を行い、長期運用が可能な高安定システムの実現を目指す。また、測定データを準リアルタイムで処理するための解析システムを目指す。

2. 研究目標

低コストで簡易的なライダーで多種類のエアロゾルを定量的に測定するため、走査型干渉計を用いた高スペクトル分解ライダーを構築して連続観測実験を実施し、測定データを準リアルタイム（1時間毎）で自動解析してエアロゾル消散係数を出力するシステムを開発する。また、多波長測定に係る干渉計の制御方法およびデータ解析手法を確立する。

3. 研究開発内容

研究計画書に沿って、初年度では（1）ライダーシステムの設計と干渉計の開発を実施した、次に、2年目には（2）開発した干渉計を用いてサブテーマ2のレーザーのスペクトル特性を評価し、レーザーの開発と並行して（3）シングルモードレーザーと走査型干渉計を用いた多波長高スペクトル分解ライダーの連続観測実験を行った。最終年度では、（4）サブテーマ2のレーザーを組み込んだライダーシステムによる連続観測実験およびエアロゾル濃度の推定を行った。各項目の内容を以下に記述する。

（1）ライダーシステムの設計および干渉計の開発

本課題の最初のステップとして、ライダーシステム全体の設計を行った。図-1.1に開発するライダーのブロック図を示す。ライダーは、送信部、受信部、分光部、光検出部、信号処理部から構成される。送信レーザーには、エアロゾルライダーで広く使われているNd:YAGレーザー^{*1}とNd:YLFレーザー^{*2}を検討した(→サブテーマ2)。エアロゾル散乱の波長依存性を測定するため、使用する波長はレーザーの基本波、2倍波、3倍波の3波長とした。受信部では、環境省ライダー観測網で運用されている既設ライダー(以下、環境省ライダーと呼ぶ)と同様に遠距離用(口径20 cm)と近距離用(口径5 cm)の2種類の望遠鏡を使用する。分光部では、非球形エアロゾル(鉱物ダスト)を検出するため、偏光ビームスプリッターを用いて大気散乱光の垂直・水平偏光成分を分離する。また、消散係数と後方散乱係数の計測のため、干渉計を使って大気散乱光を分光する。分光された光は、光電子増倍管を用いて光強度を電気信号として測定し、電気信号はA/D変換器を用いてデジタル信号に変換する。測定信号はPCに記録し、解析をして各波長の消散係数、後方散乱係数、偏光解消度を抽出する(基本波に対しては後方散乱係数のみ抽出)。システム設計では、ライダーの各要素のスペックによって決まる信号対雑音比をシミュレートし、目標の測定感度を達成するための仕様を決定した。なお、大気粒子の常時モニタリングに有用な装置とする観点から、PM2.5質量自動測定器と比較可能なレベルを目指し、エアロゾル消散係数の1時間値の測定感度を0.01 /km以下(重量濃度に換算すると2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (PM2.5の日平均の環境基準値: 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) に設定した。

^{*1} イットリウム・アルミニウム・ガーネットにネオジウムを添加した結晶を固体レーザー媒質として使用したレーザー。レーザーの基本波長は1064 nm。

^{*2} イットリウム・リチウム・フルオライドにネオジウムを添加した結晶を固体レーザー媒質として使用したレーザー。レーザーの基本波長は1047 nmないしは1053 nm。

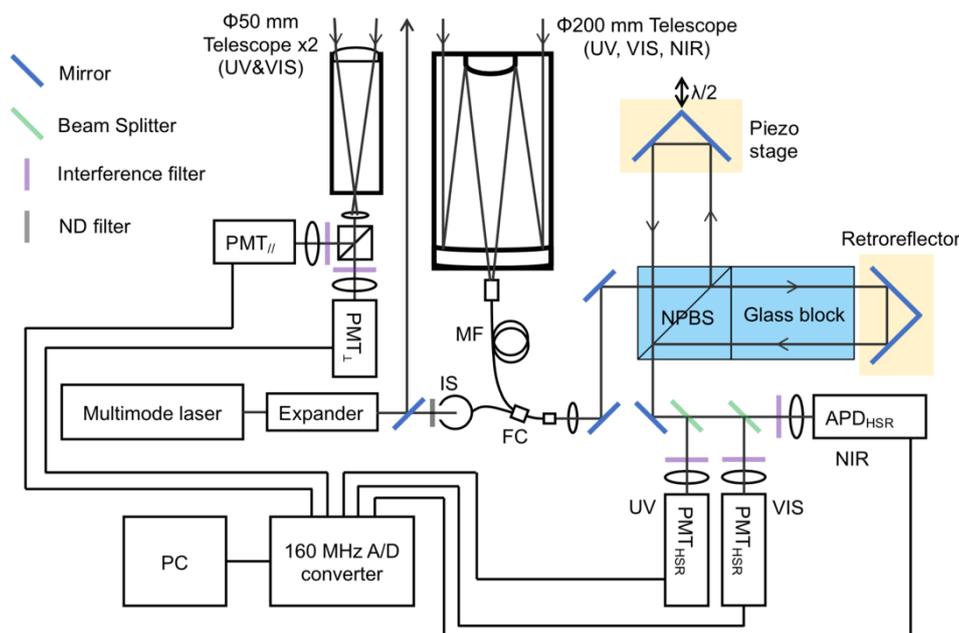


図-1.1 ライダーシステムのブロック図 (PMT: 光電子増倍管、APD: アバランシェホトダイオード、UV: 紫外波長、VIS: 可視波長、NIR: 近赤外波長、ND filter: 中性濃度フィルター、IS: 積分球、MF: マルチモードファイバー、FC: ファイバーコプラ)

本ライダーシステムでは、マルチモードレーザーと走査型干渉計を用いた高スペクトル分解ライダー(HSRL)手法を導入する¹⁾。干渉計を用いてエアロゾルからのミー散乱と大気分子からのレイリー散乱を分離して測定することで、エアロゾルの消散係数を後方散乱係数とは独立して抽出することができ、環境省ライダーよりも高精度な測定が可能となる。ミー散乱のスペクトルは送信レーザーのスペクトルとほぼ同じであるが、レイリー散乱はドップラー拡がりのためスペクトル幅が相対的に大きくなるため、両者のスペクトル幅の違いを利用して分光することが可能となる。このため、干渉計のスペクトル

ル間隔がミー散乱のスペクトル幅よりも大きく、レイリー散乱のスペクトル幅よりも小さくなるように干渉計の光路差を決定した。また、干渉計光路差の入射角依存性を低減するため、光路にガラスブロックを挿入した広視野角マイケルソン干渉計を設計した。光軸安定性の高い干渉計とするため、折り返しミラーには自己補償ミラーであるレトロリフレクタを使用した。さらに、ビームスプリッターやガラスブロックの可動部を無くし、光軸のズレを小さくする工夫をした。上記干渉計から得られる干渉鮮明度（干渉縞の明暗コントラスト）をシミュレートし、干渉計の各要素（ビームスプリッター、ミラー、ガラスブロックなど）の反射率や寸法、面精度の仕様を決定した。

ライダー用の光源として、通常のHSRLで使用されるシングルモードレーザーではなく、低コストのマルチモードレーザーを使用する。マルチモードレーザーは周波数モードが複数存在するが、モード間隔は周期的であるため、同じ周期の透過スペクトルを持つ干渉計を用いて分光する。このため、レーザーのモード間隔を干渉計のスペクトル間隔と一致させる必要があるほか、HSRLで実用的なものとするためには、レーザーの各モードのスペクトル幅が狭く、各モードの周波数が安定していることが条件となる。これらのスペクトル特性と必要なレーザーの出力について、感度解析を実施して仕様を決定した。

本研究では、干渉計を1フリンジ分だけ周期的にスキャンする仕様とした。この手法では、スキャン信号を正弦関数でフィッティング解析することで、干渉信号の最小値と最大値を推定し、干渉鮮明度を抽出する。この時、1フリンジ分のスキャン幅は波長によって異なり、波長が長くなるほどスキャン幅は広がる。ここでは、3波長の光を干渉計に入れるため、スキャン幅を長波長側に合わせた。そのため、基本波に対して1フリンジ分だけスキャンするが、2倍波、3倍波に対してはそれぞれ2フリンジ、3フリンジ分だけスキャンすることになる。スキャン信号に対してフィッティング解析するためには、1フリンジあたり最低4点の測定値が必要になる。3倍波では3フリンジ分スキャンすることから、1スキャンあたり12点だけ測定する。干渉計を周期的にスキャンするため、干渉計の折り返しミラーをピエゾステージにマウントし、ファンクションジェネレータを用いてピエゾ素子の印加電圧を制御する仕様にした。これまでの研究では、ファンクションジェネレータからランプ波を生成し、レーザーと同期せずに周期的に印加電圧を変えていた。本研究では、レーザーと同期したステップ関数を与えることで、同じステップ幅でスキャン信号を測定できるように新たに工夫した。

(2) サブテーマ2 試作レーザーの評価

開発した干渉計を用いて、サブテーマ2で開発されたレーザー（主発振器）のスペクトル特性を評価した。ここでは、主発振器の周波数モードのモード間隔と、ショット毎の周波数変動を調べた。図-1.2に実験設定と写真を示す。レーザー光を干渉計に入射し、周期的にスキャンされた干渉信号を測定した。また、干渉計に入射する前の光強度も測定した。まず、レーザーのモード間隔を調べるため、干渉計の光路差を変えながら干渉鮮明度を測定した。この時、干渉縞をCCDカメラでモニターし、干渉計の光軸調整を行なった。また、折り返しミラーの位置を0.5 mmずつ移動させることで干渉計の光路差を変えるように工夫し、干渉鮮明度が最大値になる時の干渉計の光路差からレーザーのモード間隔を推定することを試みた。さらに、レーザーの周波数変動を調べるため、同じ実験システムを用いて干渉縞の位相の時間変化をモニターした。この時、干渉計を周期的にスキャンするのではなく、光路差を固定して干渉信号を連続的に測定した。干渉信号強度からフリンジの位相を計測し、さらに位相から周波数に変換した。この時、干渉計に入れる前の光強度の信号を用いて、干渉信号の変動成分のうち、レーザーの出力変動の影響を取り除けるようにした。

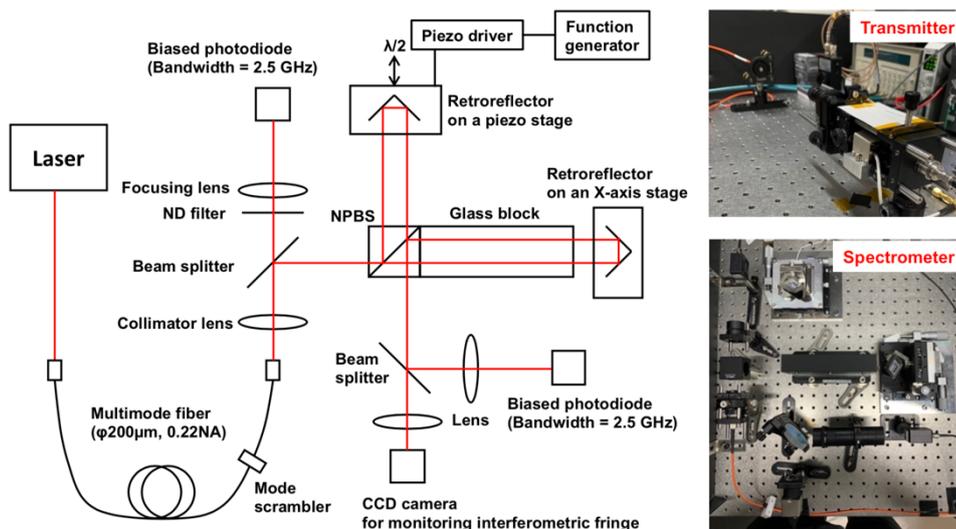


図-1.2 レーザースペクトル特性の評価実験の設定

(3) シングルモードレーザーと走査型干渉計を用いた HSRL システムによる連続測定実験

本研究の測定手法の有効性を実証するため、干渉計とレーザーの開発と並行して、従来型のシングルモードレーザー (Nd:YAG レーザー) と走査型干渉計を用いた HSRL による大気観測実験を実施した。波長 355 nm と 532 nm の 2 波長同時計測システムを国立環境研究所にて構築し、2020 年 8 月にエアロゾル消散係数の高度プロファイルを連続的に測定する試験を実施した。

(4) 開発システムによる連続測定実験および種類別エアロゾル濃度の推定

走査型干渉計とサブテマ 2 で開発されたマルチモードレーザーを組み合わせてライダーシステム全体を構築し、1 ヶ月間の連続測定実験を実施した。図-1.3 にライダーシステム全体と干渉計の写真を示す。レーザーや干渉計、受信望遠鏡は 1,000 mm × 700 mm の光学定盤に固定し、高安定ミラーホルダーを用いて光軸を調整した。環境省ライダーの環境下で運用すること想定し、開発装置は国立環境研究所構内における 15 フィートコンテナの中に設置した。ライダーシステム全体のサイズは環境省ライダーと同等であるが、従来型の HSRL と比べて約 4 分の 1 の大きさになっている。また、干渉計は温度変化による光軸ズレの影響を強く受けるため、断熱材でカバーした。また、波長毎に光路差を最適化できるようにするため、干渉計の片側のアーム (図-1.3 (b) では上側) にビームスプリッターを設置した。また、検出器には光電子増倍管よりも光検出感度の高い Multi-pixel photon counter (MPPC) を導入した。

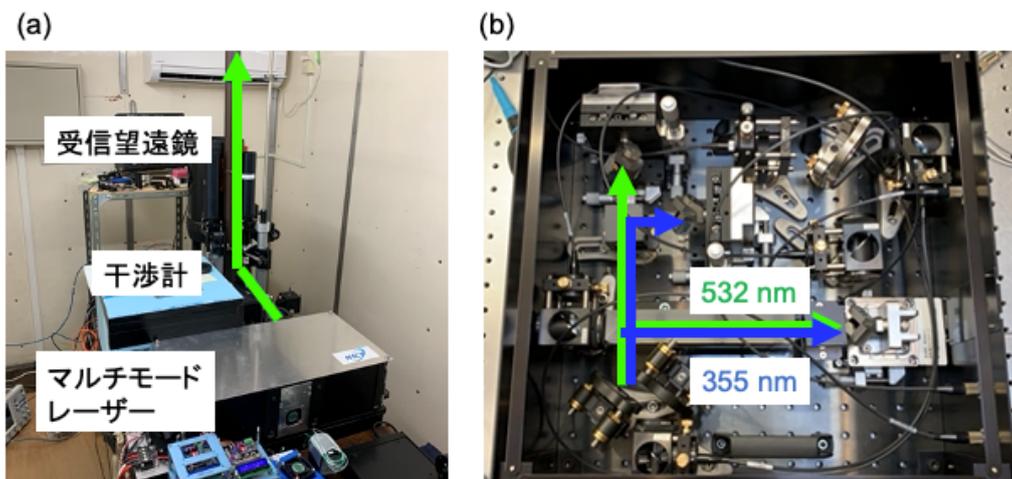


図-1.3 (a) ライダーシステム外観、(b) 2 波長分光用干渉計

開発ライダーによる連続測定実験を 2023 年 3 月下旬から開始し、2023 年 4 月の 1 ヶ月間データを取得

した。シングルモードレーザーを用いた装置の連続測定実験で開発されたソフトを利用して測定データを1時間毎に自動解析し、エアロゾル消散係数を計算するようにした。また、国立環境研究所で開発された解析アルゴリズム²⁾を用いてエアロゾル種毎の消散係数を推定した。本研究では、4種のエアロゾル（ブラックカーボン、海塩粒子、大気汚染粒子、鉱物ダスト）が外部混合していると仮定し、各種エアロゾルの波長532 nmの消散係数を推定した。ここで、大気汚染粒子は硫酸塩エアロゾル、硝酸塩エアロゾル、有機エアロゾルを含む水溶性エアロゾルを想定している。4つの未知数を独立に推定するため、波長532 nmの消散係数（ α_{532}^{obs} ）、波長532 nmの水平偏光成分の後方散乱係数（ $\beta_{532,co}^{obs}$ ）、垂直偏光成分の後方散乱係数（ $\beta_{532,cr}^{obs}$ ）、波長355 nmの後方散乱係数（ β_{355}^{obs} ）を入力データ（観測値）とした。推定する4種エアロゾルの消散係数（ $\alpha_{532,i}$ ）と入力データの関係は以下の式で与えられる。

$$\alpha_{532}^{obs} = \sum_{i=1}^4 \alpha_{532,i} \quad (1a)$$

$$\beta_{532,co}^{obs} = \sum_{i=1}^4 \frac{\alpha_{532,i}}{S_{532,i}^{model} (1 + \delta_{532,i}^{model})} \quad (1b)$$

$$\beta_{532,cr}^{obs} = \sum_{i=1}^4 \frac{\delta_{532,i}^{model} \alpha_{532,i}}{S_{532,i}^{model} (1 + \delta_{532,i}^{model})} \quad (1c)$$

$$\beta_{355}^{obs} = \sum_{i=1}^4 \frac{\chi_i^{model} \alpha_{532,i}}{S_{532,i}^{model}} \quad (1d)$$

ここで、 $S_{532,i}^{model}$ 、 $\delta_{532,i}^{model}$ 、 χ_i^{model} はエアロゾル種毎にモデル化された波長532 nmのライダー比、偏光解消度、後方散乱係数の波長比（カラー比、355 nm / 532 nm）である。本研究で用いたエアロゾル光学モデル³⁾を表-1.1に示す。上記方程式の残差の二乗和が最小になるように数値解（ $\alpha_{532,i}$ ）を推定した。また、推定された消散係数から重量濃度に変換した。消散係数と重量濃度の換算係数MECF（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）/（/m）を表-1.1に示している。黒色炭素についてはシングルモードレーザーを用いた実験で観測された消散係数と地上測定データ（紀本電子PM-712）との比較により得られた値を用いた。

表-1.1 各エアロゾル種毎の光学特性（相対湿度60%の値）と消散係数—重量濃度換算係数(MECF)

	Black carbon	Sea salt	Air pollution (water soluble)	Mineral dust
$S_{532,i}^{model}$ (sr)	101	19	53	47
$\delta_{532,i}^{model}$	0.02	0.02	0.02	0.35
χ_i^{model}	0.97	1.1	1.7	0.53
MECF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/(/km)	8.5	715 ⁴⁾	150	1000

4. 結果及び考察

(1) ライダーシステムの設計および干渉計の開発

まず、ライダーシステムの肝となる干渉計の光路差を決定した。干渉計の光路差の違いによる干渉鮮明度のシミュレーション結果を図-1.4(a)に示す。ミー散乱に対する干渉鮮明度が高いほどエアロゾル消散係数の測定感度が高くなるため、干渉計の光路差は短い方が望ましい。一方で、短い光路差の場合、レイリー散乱に対しても干渉鮮明度が高くなるため、干渉信号に2つの成分（ミー散乱、レイリー散乱）が含まれてしまい、両者を分離するのは難しくなる。レイリー散乱はミー散乱よりもブロードなスペクトル幅を持つため、光路差の増加に伴い干渉鮮明度はミー散乱よりも早く低下する。光路差が

200 mmの時には、レイリー散乱の影響が無視できる。また、気温変化に伴う消散係数の系統誤差についても、光路差が200 mmの時はほぼゼロになる（図-1.4(b)）。そのため、本研究では、干渉計の光路差を200 mmに設定した。

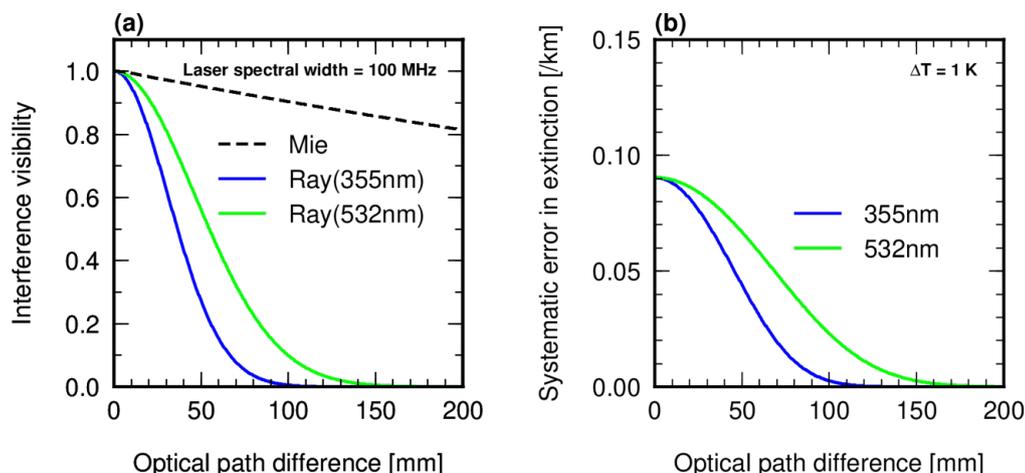


図-1.4 (a)干渉計光路差の違いによる干渉鮮明度のシミュレーション、(b)実気温と設定気温の差 (ΔT) が1度異なる場合の消散係数の系統誤差（レイリー散乱のスペクトル幅の気温変化の影響）

次に、レーザーのスペックを決定した。レーザーの出力に対する消散係数のランダム誤差についての計算結果を図-1.5に示す。レーザーの出力が大きいほど、信号対雑音比が大きくなるため、誤差は小さくなる。また、信号強度は高度の2乗に反比例するため、高高度の誤差が大きくなる。本研究では、エアロゾルが多く存在する高度3 km以下について、消散係数のランダム誤差が0.01 /km以下になるようにレーザー出力を決定した。図中に示す誤差の下限値は、レーザーの周波数変動によって決まる。ここでは、下限値が0.01 /km以下になるように、基本波の周波数変動を20 MHzに設定した。送信レーザーをNd:YAGレーザーと想定し、出力の要求仕様を0.5 mJ@355 nm、5 mJ@532 nmとした。波長355 nmの方が低い主な理由としては、波長532 nmと比べてレイリー散乱強度が5倍以上大きく、日中の背景光強度が約1/2倍であることが挙げられる。上記システム設計によって決定された仕様の諸元を表-1.2に示す。

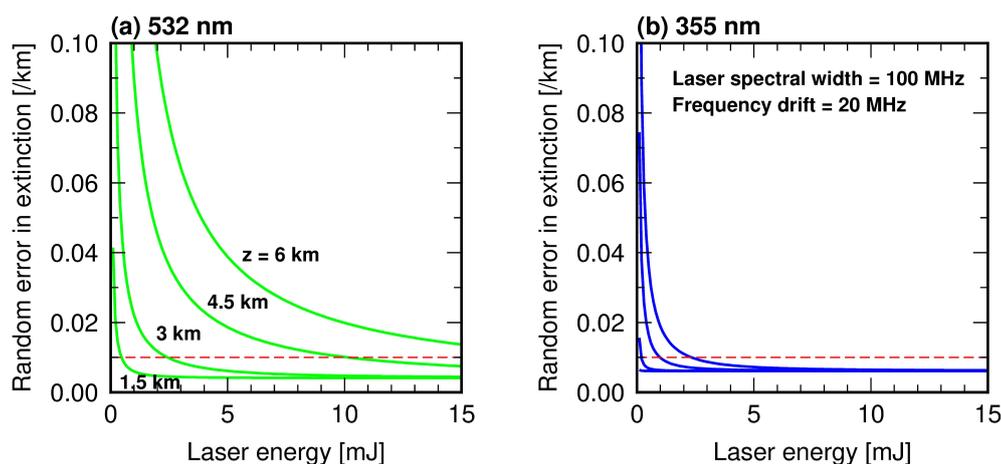


図-1.5 レーザー出力と消散係数のランダム誤差の関係（赤点線は目標精度）

表-1.2 ライダーシステムの諸元

Specification of 5RF-2001 HSRL	
Laser system	Diode-pumped, MOPA, multimode, Nd:YAG laser
Laser energy	5mJ@1064&532nm, 0.5mJ@355nm
Repetition rate	100 Hz
Laser mode spacing	1.5 GHz
Spectral width	< 100 MHz (for each longitudinal mode)
Stability	< $\pm 3\%$ (Power), < 20 MHz@1064 nm (Frequency drift)
Beam divergence	< 0.5 mrad (full angle for 86% energy)
Telescope	Schmidt-Cassegrain, Dia.=200mm
Field-of-view	0.5 mrad
Band-path filter	0.5 nm (full width at half maximum)
Interferometer	Scanning Michelson interferometer (FSR=1.5GHz)
Detectors	Photomultiplier (UV, VIS) and Avalanche photodiode (NIR)
Data acquisition	A/D converter (160 MHz, 16 bit)

上記の設計に基づいて走査型マイケルソン干渉計を開発した。レーザーの発振タイミングに同期して干渉計を制御することで、スキャン方法を最適化した。図-1.6に、ファンクションジェネレータからの入力電圧信号（黒線）、干渉計のピエゾ素子の応答信号（赤線）、レーザー射出のインパルス信号（青線）について計測された結果を示す。ピエゾ素子は、入力電圧から約5 ms遅れて立ち上がり、レーザー射出のタイミング（大気計測）では定常状態になる。1スキャンあたり12点の電圧を設定することにより、3倍波の波長に対してもフィッティング解析に必要な4点の測定点を確保した。このスキャン方式を使って測定されたスキャンデータを図-1.7に示す。光源はサブテーマ2で開発されたレーザーを使用している（結果の詳細は次節で説明）。横軸はピエゾ素子の印加電圧を干渉縞の位相に変換している。図中の赤四角は各点の平均値を、実戦はスキャンデータについてフィッティングされた曲線を示す。固定のステップ幅でスキャンすることで、測定データの積分が可能になり、ノイズを低減できるだけでなく、データ量の縮小とデータ解析の高速化に成功した。

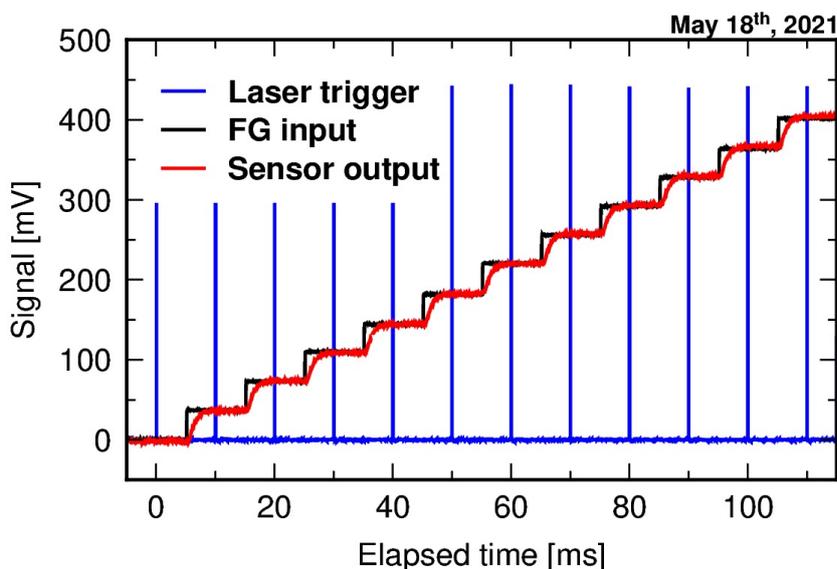


図-1.6 干渉計スキャン制御の例 (FGはファンクションジェネレータ)

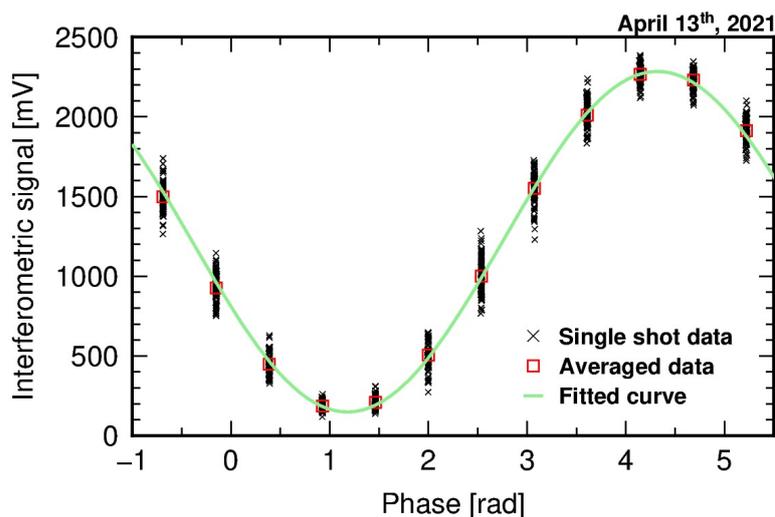


図-1.7 スキャン信号とフィッティング解析の例

(2) サブテマ2 試作レーザーの評価

サブテマ2で開発したレーザー光を干渉計で分光し、干渉鮮明度を測定した結果を図-1.8に示す。干渉計の光路差が約200 mmの時に干渉鮮明度の最大値が測定された。マルチモードレーザーのモード間隔が約1.5 GHzであることを示しており、仕様で設定した干渉計のスペクトル間隔に一致することを示している。ピーク位置は200 mmから約1 mmズレているが、レーザー共振器の長さを変えることで200 mmに一致させることが可能である。この実験結果から、レーザー共振器の長さを0.5 mm単位で調整する機構を取り入れることになった。また、図中の点線はシミュレーション結果を示している。干渉鮮明度の大きさはレーザーの周波数モードのスペクトル幅によって、分布の幅はレーザーのゲイン幅によって決まる。今回の実験結果から、周波数モードのスペクトル幅は60 MHz、ゲイン幅は約20 GHzと推定された。ゲイン幅については、Nd:YAGレーザーに対して先行研究で得られた値と一致した。また、周波数モードのスペクトル幅は、要求仕様の100 MHzよりも狭く、HSRL用のレーザーとして理想的なスペクトルを実現している。

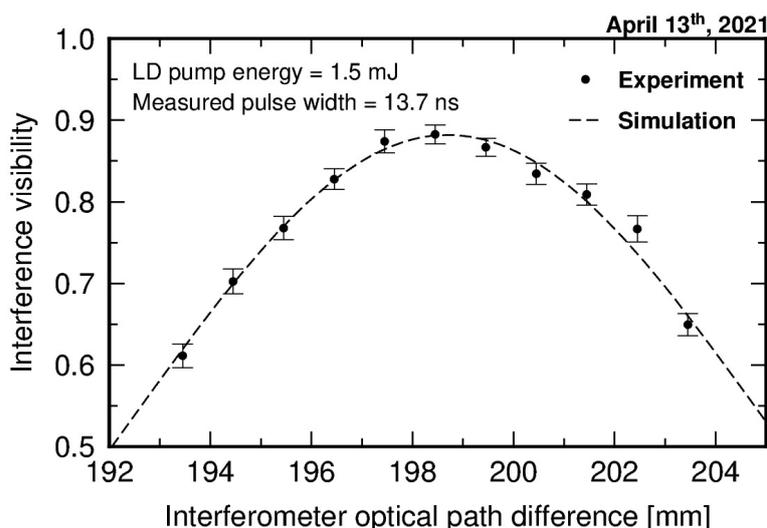


図-1.8 サブ2 開発レーザーに対する干渉鮮明度の測定結果 (LD: レーザーダイオード)

同干渉計を用いてレーザーショット毎の周波数変動を計測した結果を図-1.9に示す。周波数変動の標準偏差は約18 MHzであり、干渉計の周波数間隔 (1.5 GHz) と比べて約1%の変動を持つ。これは、先行研究で使用されたレーザーと同レベルの変動であり、要求仕様を満たしている。

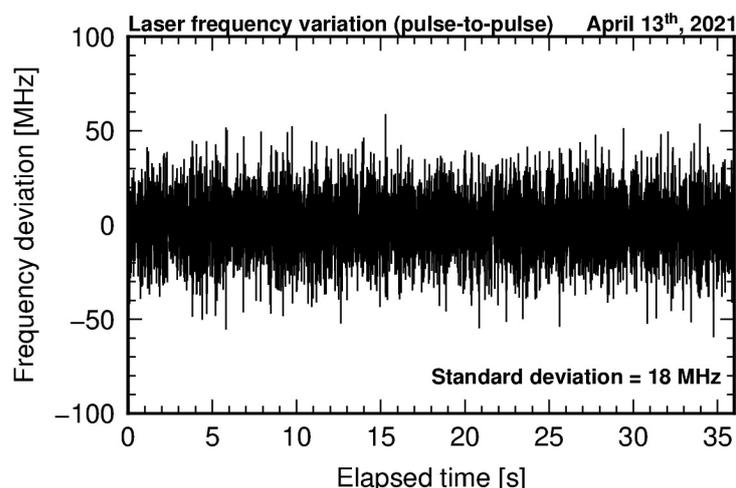


図-1.9 サブ2開発レーザーのショット毎周波数変動の測定結果

上記スペクトル特性の評価実験から、本研究で開発するレーザーは、HSRL用のレーザーに適したスペクトルを有していることが示唆された。

(3) 走査型干渉計を用いたシステムによる連続計測実験

図-1.10に多波長HSRLで測定された各波長の消散係数と後方散乱係数の時間高度断面図を示す。これは2020年8月の1ヶ月間の測定結果であり、本研究の最終目標である1ヶ月間のデータセットに相当する。時間分解能は5分、高度分解能は30 mとしている。本研究で設定している時間分解能（1時間）よりも高い分解能で測定出来ているが、この理由として、シングルモードレーザーを用いることで本課題システムと比べて干渉鮮明度が約1.5倍高く、レーザー出力も2倍以上大きいためと考えられる。測定された波長532 nmの消散係数からPM2.5濃度に変換し、地上測定（国立環境研究所構内）の結果と比較した結果を図-1.11に示す。PM2.5濃度への変換係数は50-200 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/(/km)と幅があるが、ここでは先行研究で得られた係数として100を用いている。ライダーと地上測定値との結果は概ね一致しており、十分比較可能なレベルでPM2.5濃度を測定できることを確認した。今回のような多波長HSRLによる連続計測データは世界的にも殆ど例がなく、先駆的な成功例と言える。従来システムのような波長制御機構が無くても、走査型干渉計を用いることで1ヶ月以上安定して動作することを確認し、本研究で開発するライダー受光部の有効性を実証した。

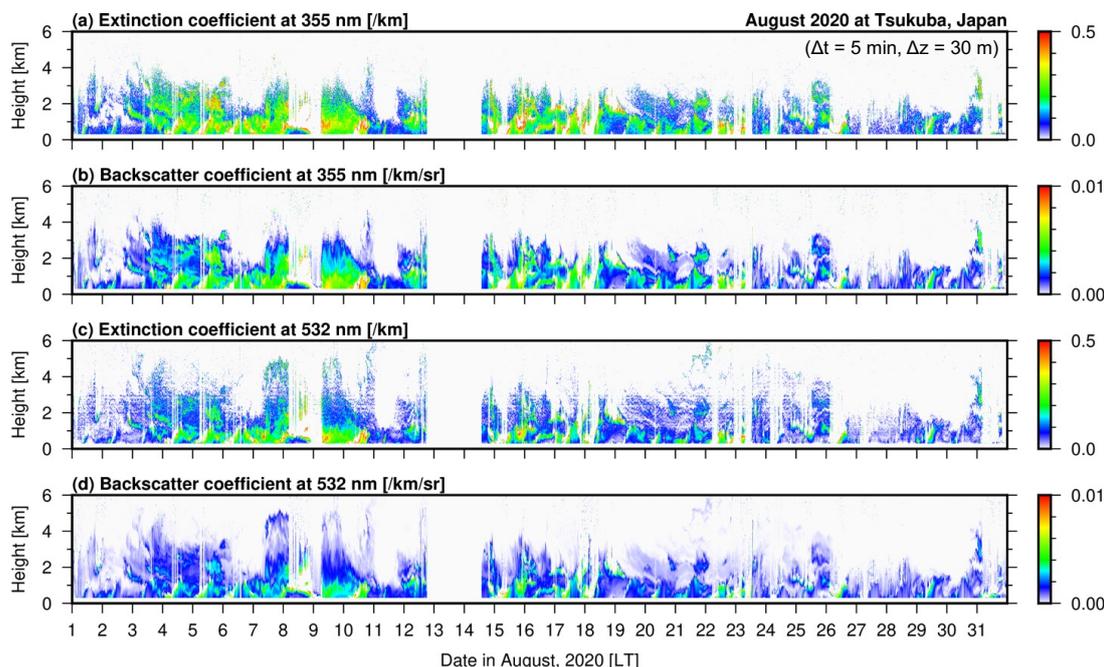


図-1.10 2波長HSRLで測定されたエアロゾルの消散係数と後方散乱係数の時間高度断面図

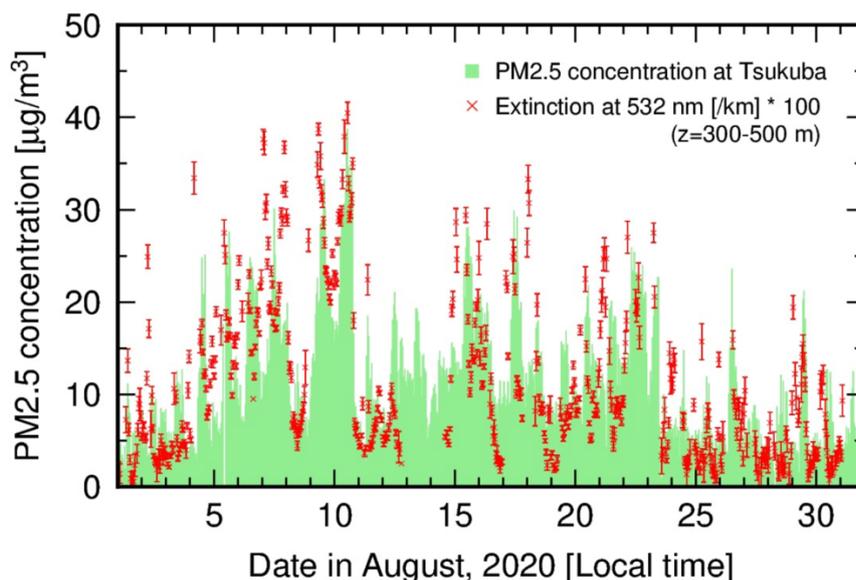


図-1.11 地上測定PM2.5濃度とライダー測定によるPM2.5推定濃度との比較結果（国立環境研究所大気観測・実験施設（大気モニター棟）のPM2.5測定データを利用）

（4）開発システムによる連続測定実験および種類別エアロゾル濃度の推定

本課題で開発されたライダーで観測されたエアロゾル光学特性（粒子消散係数、粒子偏光解消度、ライダー比、後方散乱カラー比）の時系列データを図-1.12 に示す。シングルモードレーザーを用いた実験と同様に、走査型干渉計を用いた手法で安定的に1ヶ月間の連続観測データが得られた。観測期間中、コンテナ内部の温度は最大で約10度の寒暖差があったが、レーザーや干渉計、受信望遠鏡の光軸のズレはなく、厳しい環境下においても問題なく稼働できることを示した。また、高度1~2 kmまでの境界層内のエアロゾルだけでなく、自由対流圏でのエアロゾルの分布も観測できているため、長距離輸送されてきたエアロゾルについても解析が可能である。開発ライダーでは、干渉計を用いた手法により、地上付近（約15 m）から消散係数を観測することが可能となった。環境省ライダーでは、高度600 m以下のデータについて高度毎に補正係数を決定する必要があったが、開発ライダーでは補正係数が不要であることは大きな特長である。さらに、従来型の高スペクトル分解ライダーと比べてレーザーの出力が約2桁低いにも関わらず、従来型のシステムと同等の測定誤差を持つことから、測定効率が大幅に向上したことを示唆している。また、設定した消散係数の目標感度（0.01 /km）を高度6 kmまで十分に達成していることがわかった。なお、図-1.12 では雲や降水データについて黒点で示している。雲・降水データの検出には、波長1064 nmの信号を利用した。

粒子消散係数、粒子偏光解消度、ライダー比、後方散乱カラー比の4つのパラメータを用いることで4種のエアロゾル（ブラックカーボン、海塩粒子、大気汚染粒子、鉍物ダスト）について消散係数を推定し、さらに重量濃度に変換した（図-1.13）。偏光解消度が大きい時は鉍物ダスト（黄砂）が卓越しており、関東で報道された4月13日のイベントでは地上付近において約0.1 mg/m³の鉍物ダストが観測された。4月22日にも同様に約0.1 mg/m³の鉍物ダストが観測されている。黄砂イベント前の4月20日~21日には大気汚染粒子が卓越しており、約30 µg/m³のエアロゾル濃度が観測された。4月29日は低いライダー比の特徴を持つ海塩粒子が観測されている。この日はつくばにおいて強い南風（最大瞬間風速15 m/s）が1日中観測されており、太平洋からの海塩粒子が輸送されてきた可能性がある。ブラックカーボンについては、観測期間中は濃度1 µg/m³以下であり、高濃度イベントは発生しなかった（図-1.13(a)のカラースケールの値が他のエアロゾル種とは1桁異なることに注意）。地上放射計（スカイラジオメーター）による長期観測結果によると⁵⁾、つくばにおける単散乱アルベドは春から夏にかけてが大きく、秋から冬にかけて小さくなることから、秋~冬にモニタリングする必要がある。4月3日~5日

にかけて黄砂イベントが上空に飛来していたが、この時の偏光解消度はその他の黄砂イベントと比べて小さく、大気汚染粒子やブラックカーボンなどの微小粒子と鉱物ダストが混合して飛来してきたことを示唆している。

種類別のエアロゾル濃度を足し合わせることで、PM_{2.5} 濃度の高度プロファイルの時系列を推定した(図-1.14)。この時、黄砂の PM_{2.5} の重量濃度換算は表-1.1 にある 1000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/(/km)ではなく 224⁶⁾ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/(/km)を使用している。今後、PM_{2.5} 濃度や黒色炭素の濃度を地上成分測定器の結果と比較することで本ライダーで観測されるエアロゾル濃度の有効性を検証する予定である。

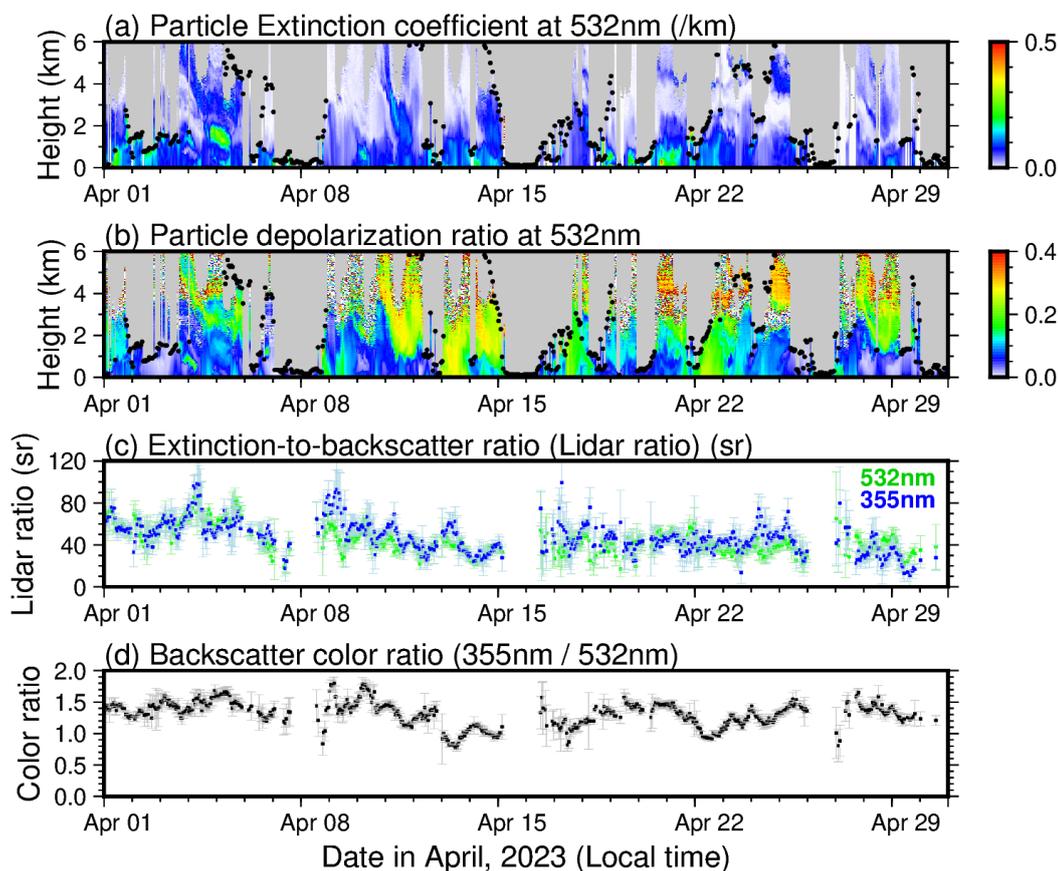


図-1.12 開発ライダーで観測されたエアロゾル光学特性の1ヶ月間データ：(a)波長 532 nm の粒子消滅係数、(b)波長 532 nm の粒子偏光解消度、(c)消滅係数/後方散乱係数比(ライダー比)、(d)後方散乱カラー比(355 nm/532 nm)、後方散乱係数、粒子偏光解消度の時間・高度分解能は1時間・30m、(a)と(b)の黒点は雲底または降水を示し、黒点より上空のデータは灰色でマスクされている

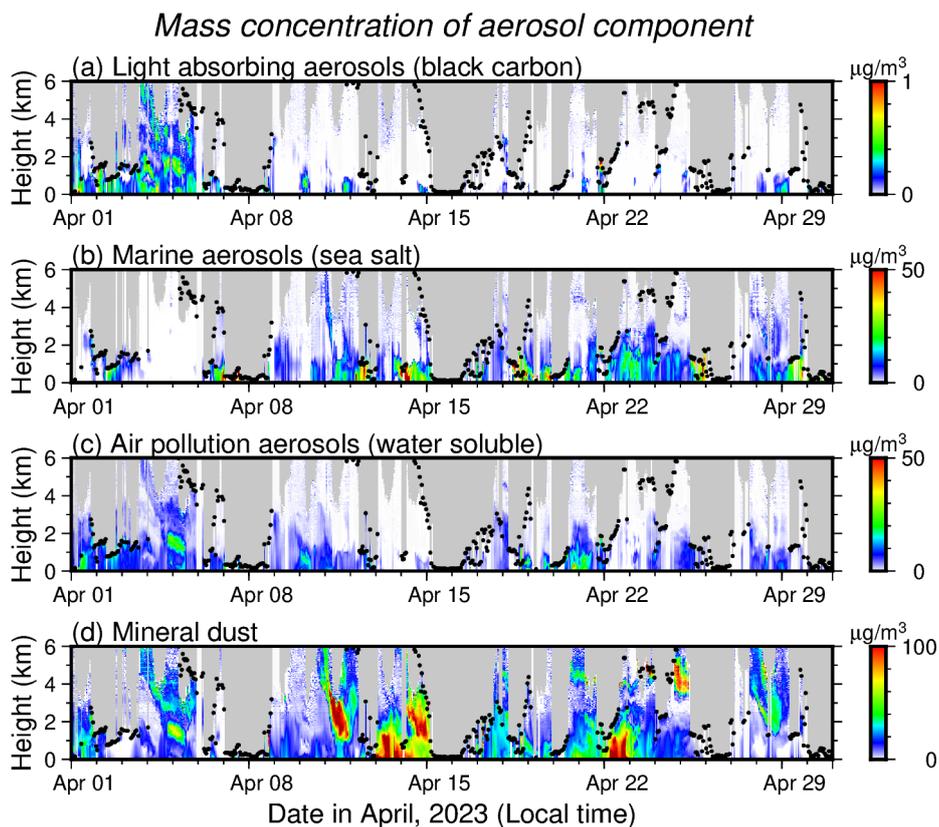


図-1.13 エアロゾル消散係数から推定された各種エアロゾルの重量濃度の1ヶ月間データ：(a)ブラックカーボン、(b)海塩粒子、(c)大気汚染粒子、(d)鉱物ダスト、図中の黒点は雲底または降水を示し、黒点より上空のデータは灰色でマスクされている

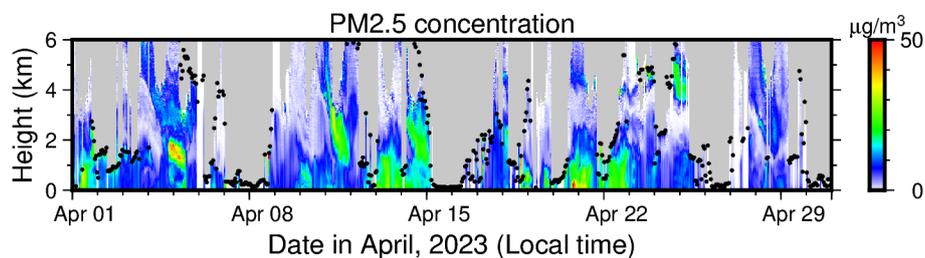


図-1.14 開発ライダーで観測されたPM2.5重量濃度の1ヶ月間データ、図中の黒点は雲底または降水を示し、黒点より上空のデータは灰色でマスクされている

5. 研究目標の達成状況

表-1.3に示すように、当初の研究計画のタスクを全て遂行し、設定した研究目標を達成することができた。走査型干渉計を用いた高スペクトル分解ライダーを構築し、測定データを1時間毎に自動解析してエアロゾル消散係数および種類別エアロゾル濃度を出力するシステムの開発に成功した。また、干渉計のスキャンをレーザー発振と同期して制御することによって、データサイズの縮小と信号処理の高速化に成功した。マルチモードレーザーと走査型干渉計を用いることで、従来型の高スペクトル分解ライダーと比べてコストを約半分に抑えることができ、大きさも約4分の1とコンパクトなシステムにすることができた。また、長期運用が可能なシステムを実現した。

表-1.3 研究計画のロードマップ（サブテーマ1）



6. 引用文献

- 1) Y. JIN, N. SUGIMOTO, P. RISTORI, T. NISHIZAWA, L. OTERO, and E. QUEL: Applied Optics, 56, 21, 5990–5995 (2017), Measurement method of high spectral resolution lidar with a multimode laser and a scanning Mach-Zehnder interferometer.
- 2) T. NISHIZAWA, N. SUGIMOTO, I. MATSUI, A. SHIMIZU, Y. HARA, I. UNO, K. YASUNAGA, R. KUDO, and S.-W. KIM: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 188, 79–93, (2017), Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components.
- 3) Y. HARA, T. NISHIZAWA, N. SUGIMOTO, K. OSADA, K. YUMIMOTO, I. UNO, R. KUDO, and H. ISHIMOTO: Remote Sensing, 10, 937, (2018), Retrieval of aerosol components using multi-wavelength Mie-Raman lidar and comparison with ground aerosol sampling.
- 4) R.-E. MAMOURI and A. ANSMANN: Atmospheric Measurement and Techniques, 10, 3403–3427 (2017), Potential of polarization/Raman lidar to separate fine dust, coarse dust, maritime, and anthropogenic aerosol profiles.
- 5) A. UCHIYAMA, A. YAMAZAKI, R. KUDO, E. KOBAYASHI, H. TOGAWA, and D. UESAWA: Journal of the Meteorological Society of Japan, 92A, 93–108, (2014), Continuous ground-based observation of aerosol optical properties at Tsukuba, Japan: trend and climatology.
- 6) N. SUGIMOTO, T. NISHIZAWA, A. SHIMIZU, and I. MATSUI: Proceeding of SPIE, 9232, (2014), Aerosol characterization with lidar methods.

II-2 高スペクトル分解ライダー用小型レーザーの開発

国立研究開発法人情報通信研究機構

電磁波研究所

リモートセンシング研究室

青木 誠

[要旨]

サブテーマ2では、高スペクトル分解ライダー（HSRL）観測に適した光源を提供するため、主発振器出力増幅器（MOPA）方式を採用した小型レーザーの開発に取り組んだ。小型レーザーは主発振器レーザー、レーザー増幅器、波長変換部から構成される。初年度には、主発振器レーザーの設計、開発、性能評価を実施して、当初計画していた性能が得られることを確認した。2年目には、レーザー増幅器、波長変換部の設計と開発を実施、小型レーザーを完成させてサブテーマ1で開発したHSRLシステムへの組み込みを実施した。最終年度には、小型レーザーを構成する各要素の性能向上に努めて、最終的に連続観測に耐えるレーザーの開発に成功した。また、研究成果の一環として本課題で開発を行ったレーザー装置とそれを用いるライダー装置に関する特許出願を行った。

1. 研究開発目的

昼夜問わず多種類のエアロゾルの定量観測ができる低コストで簡易的なHSRLシステムの開発を目的とする。通常のHSRL手法では高価で複雑なシングルモードレーザーを用いるが、本研究ではより安価なマルチモードレーザー（複数の波長ピークを持つレーザー）を用いる。市販のマルチモードレーザーでは高感度なHSRL観測が困難であるため、サブテーマ2では、HSRL観測に適した小型レーザーを開発することを目的とする。

2. 研究目標

HSRLに適した光源を提供するため、主発振器出力増幅器（MOPA）方式を採用した小型Nd:YLFレーザーを開発する。市販レーザーに比べて小型で、かつスペクトル幅が狭いレーザーをHSRL用に設計・開発する。

3. 研究開発内容

サブテーマ2では、研究計画書に沿って以下の3点について研究を進めた。

(1) レーザー光学系の設計

サブテーマ1で検討されたHSRLシステムで目標とする測定精度を達成するための低コストで小型なマルチモードレーザーの光学系設計を行った。HSRLで高い干涉鮮明度を得るためには、レーザーの各モードのスペクトル幅が狭く（時間的なパルス幅が長く）、各モードのピーク周波数が安定かつ干涉計のスペクトル間隔と一致する必要がある。レーザーの各モードのピーク周波数間隔は、レーザーの共振器長によって決定される。本研究では、各モードのピーク周波数とHSRLに最適化された干涉計のスペクトル間隔を一致させるために、従来のエアロゾルライダーに使用されているNd:YAGレーザーよりも短い100mmの光学的距離を持つ小型の主発振器レーザーを設計した（図-2.1）。

レーザーのパルスエネルギーと時間パルス幅には反比例の関係があり、パルスエネルギーを大きくするとパルス幅は短くなる。また、共振器長と時間パルス幅には比例関係があり、共振器長が短いレーザーの場合は時間パルス幅が短くなる。HSRLで高い干涉鮮明度を得るためには、レーザーの各モードのスペクトル幅が狭い（時間的なパルス幅が長い）必要がある。この問題を解決するために、HSRLに適した安定して長パルス幅を持つレーザー主発振器出力を、レーザー増幅器を用いて観測に必要なパルスエネルギーまで増幅する、MOPA方式のレーザーを設計した（図-2.2）。また、レーザー媒質については、エアロゾルライダーとして世界的に使われているNd:YAGレーザーとNd:YLFレーザーを、長さやNdドープ濃

度を含めて様々な観点から検討した。

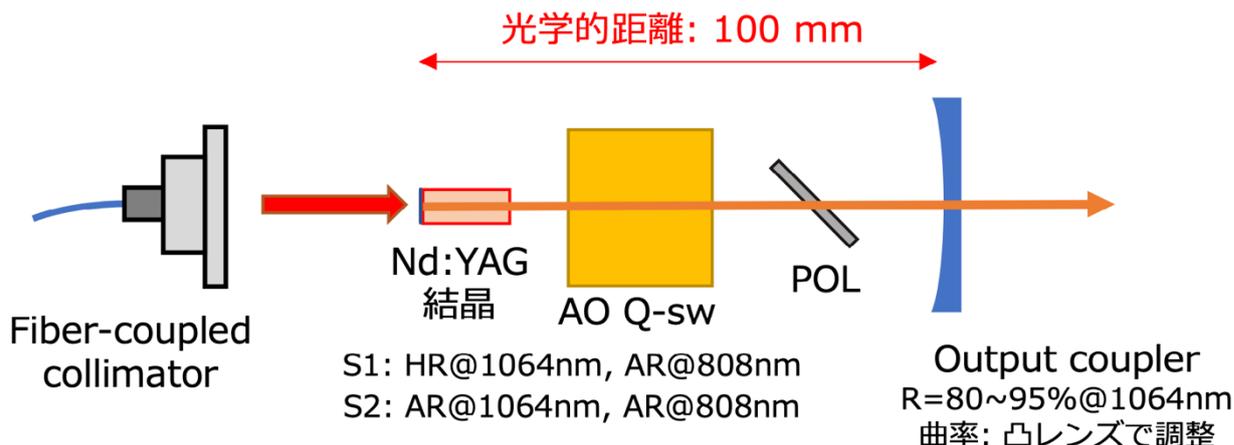


図-2.1 MOPA方式のレーザーの主発振器レーザーの概略

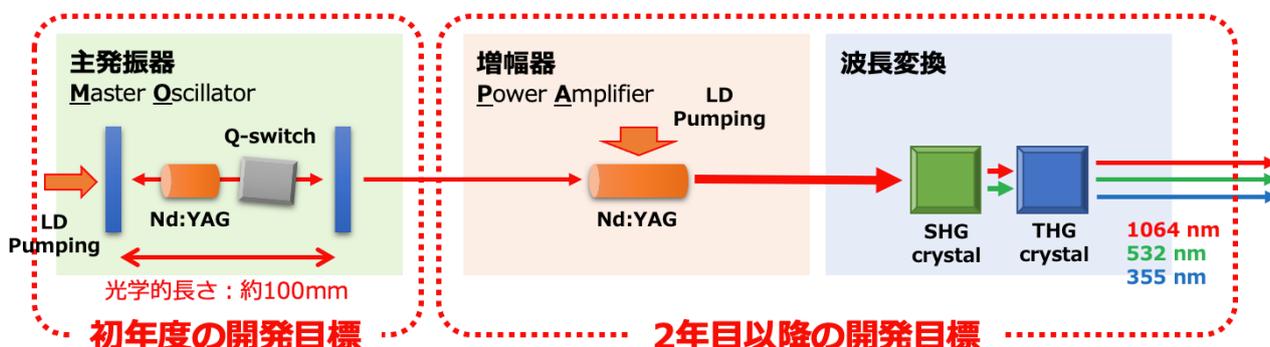


図-2.2 HSRLに適したMOPA方式のレーザーの概略

(2) 主発振器レーザーの開発

レーザーは主発振器と増幅器から構成されるが、令和2年度では主発振器のプロトタイプを製作した。主発振器は、低コスト化と安定化を主眼として、主にレーザー媒質、Qスイッチ素子、出力鏡から構成されるシンプルな端面励起レーザーとした。レーザー媒質を励起する励起用のレーザーには、808 nmで発振するマルチモードファイバーが結合したレーザーダイオードを用い、励起光を高効率でレーザー媒質に結合させるために光線行列解析を用いて励起光学系を設計した。Qスイッチ素子については、能動的及び受動的な素子を検討し、長パルス化の観点とパルス発生タイミングの制御性の観点から、能動的なQスイッチ素子であるAcousto-Optic (AO) Qスイッチ素子を選択した。出力鏡は、共振器の安定条件を満たすために適切な曲率を持たせる必要があるが、本研究では、低コスト化及び曲率パラメータの最適化と反射率の最適化を独立して考えるために、反射率の最適化については複数種類(80, 90, 95%)の反射率を持つ平面出力鏡を調達し、曲率パラメータの最適化に関しては共振器内に様々な焦点距離を持つ平凸レンズを挿入することで実施した。

主発振器のプロトタイプは2段階の研究開発のプロセスを経て開発された。第一段階では、Thorlabs社の30 mm ケージシステム用のマウントを用いて簡易的な実験系を構成してレーザーの技術実証を行った。この段階では、実際の光学実験を通して、レーザーを構成する光学素子の設置位置決定や機能実証、出力鏡反射率の最適化及び共振器安定化用のレンズの焦点距離の最適化を実施した。第二段階では、第一段階の実験結果を反映させて主発振器専用の光学筐体を設計した。専用筐体は、市販のクラウドベースCADソフトウェア(Autodesk® Fusion 360)を用いて、サブテーマ1のリーダーと議論を重ねながら設計された。試作期間の短縮及び開発コストを下げるために、実施機関の金工室や試作室を利用して筐体部品を試作、それと調達した光学素子を組み合わせ、主発振器レーザーを完成させた。

(3) MOPA方式の3波長レーザーの開発

令和3年度以降は小型レーザーの完成を目指して、増幅器及び第二・第三高調波の発生機構の開発を進めた。増幅器は、低コスト化と安定化を主眼として、シンプルな端面励起レーザー増幅器とした。レーザー媒質励起用のレーザーには、808 nmで発振するバータイプのレーザーダイオードとマルチモードファイバーが結合したレーザーダイオードの2種類で検討を進めた。励起光を高効率でレーザー媒質に結合させるために光線行列解析を用いて励起光学系を設計した。増幅器は、励起光のパワーが大きいので、レーザーを安定して効率的に発振させるためには、レーザーダイオードやレーザー媒質内で発生する熱を効率的に排熱する必要がある。レーザーダイオードやレーザー媒質の冷却及び温度調整には、装置の簡略化と長期安定動作化の観点から、一般的によく用いられる水冷方式ではなく、ペルチェ素子と空冷を組み合わせたシステムを検討した。増幅器の専用筐体も主発振器レーザーと同様に市販のCADソフトウェアを用いて、サブテマ1のリーダーと議論を重ねながら設計された。試作期間の短縮及び開発コストを下げるために、実施機関の金工室や試作室を利用して筐体部品を試作、それと調達した光学素子を組み合わせて、増幅器モジュールを完成させた。

増幅された主発振器のレーザー光(1064 nm)は、波長変換部(第二高調波発生及び第三高調波発生)によって、532 nmと355 nmのレーザー光に波長変換される。様々な非線形光学結晶の中からトレードオフ(性能、入手性など)を考慮して使用する非線形光学結晶の検討を実施した。非線形光学結晶の波長変換効率は、結晶へのレーザー光の入射角度や結晶の動作温度を変えて最適化する必要がある。また非線形光学結晶には潮解性を持つものも多く、長期的に安定して使用するためには、湿度の低い環境で使用する必要がある。そのため、非線形光学結晶用に温度調節と角度調整機能を備えた専用の気密筐体の設計と開発を実施した。

最終年度では、開発した主発振器モジュール、増幅器モジュール、波長変換モジュールのインテグレーション作業を実施して、HSRLシステムへの組み込み作業を実施した。また、レーザーを構成する発振器等に温度調整機能を付加して、連続観測に耐えるレーザーに改良する作業を行った。

4. 結果及び考察

(1) レーザー光学系の設計

表-2.1にNd:YAGレーザーとNd:YLFレーザーの比較結果を示す。当初の計画では、Nd:YLFレーザーを導入する予定だったが、システム設計や構成部品の価格調査を実施した結果、HSRL全体の開発コストをより低く抑えられるNd:YAGレーザーに計画を変更した。発振器の変更によりレーザー開発の難易度が上がったが、アドバイザーおよびプログラムオフィサーの指導助言を受け、要求仕様の変更や設計の見直しにより、十分に実現可能な設計となった。また、Qスイッチ素子については、能動的及び受動的に素子を検討し、長パルス化の観点とパルス発生タイミングの制御性の観点から、能動的なQスイッチ素子であるAO Qスイッチ素子を選択した。

表-2.1 Nd:YAGレーザーとNd:YLFレーザーの比較

	Nd:YLF レーザー	Nd:YAG レーザー
レーザーの 開発難易度	○ (易しい)	△ (やや難しい)
レーザーの 開発コスト	△ (やや高価)	○ (安価)
HSRLの 総開発コスト	× (高価)	○ (安価)

(2) 主発振器レーザーの開発

図-2.3にNd:YAG主発振器レーザーの出力パルスエネルギーとパルス幅の出力鏡反射率依存性を示す。実験には、Thorlabs社の30mmケージシステム用のマウントを用いて簡易的な実験系を使用した。レーザー媒質には、S1: 1064nm ARコート, S2: 1064nm HRコート及び808nm ARコートのNd:YAGレーザーロッドを用いており、S2側から808nmのLDと励起用の光学系を用いて端面励起する構造となっている。横軸は励起用のレーザーダイオードの入力パルスエネルギーであり、入力が大きくなると出力パルスエネルギーが大きくなり、パルス幅が短くなることからわかる。発振閾値は反射率が高くなるほど低下するが、最大励起時(3mJ程度)に得られるエネルギーはほとんど変わらなかった。HSRLで高い干渉鮮明度を得るためには、レーザーのパルス幅が長い(周波数スペクトルが狭い)必要がある。反射率が高いほどパルス幅が長くなることから、反射率が高い出力鏡が有利であることがわかった。ただし、反射率を上げすぎると光学素子のダメージを引き起こしやすくなるため、長期動作を実現するために反射率90%前後のミラーを用いることとした。

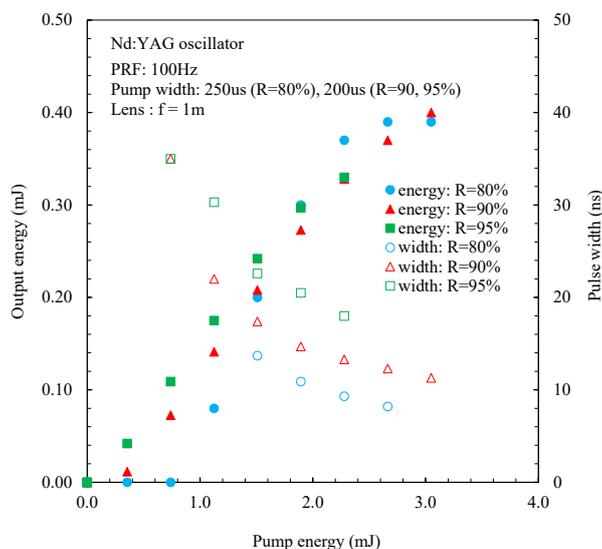


図-2.3 主発振器レーザーの出力特性の出力鏡反射率依存性

図-2.4に試作した主発振器のプロトタイプを示す。AO Qスイッチ素子やポラライザの各光学素子は金属筐体内の適切な位置に設置されており外乱による影響が抑えられている。レーザー筐体のベースプレートには、熱的な安定度が高い鉄が用いられており、レーザーを安定化させるためにヒーターを用いて動作温度をコントロールされている。出力鏡は高安定な上方操作型フレクシャーミラーマウントに収められており、このマウントを調整することでレーザー出力の調整を行う。発振特性の評価を実施した結果、200 mWの励起(パルスエネルギー2 mJ、パルス繰り返し周波数100 Hz)に対して、30 mW (0.3 mJ、100 Hz、パルス幅12 ns)の当初計画していた性能が得られることを確認した。

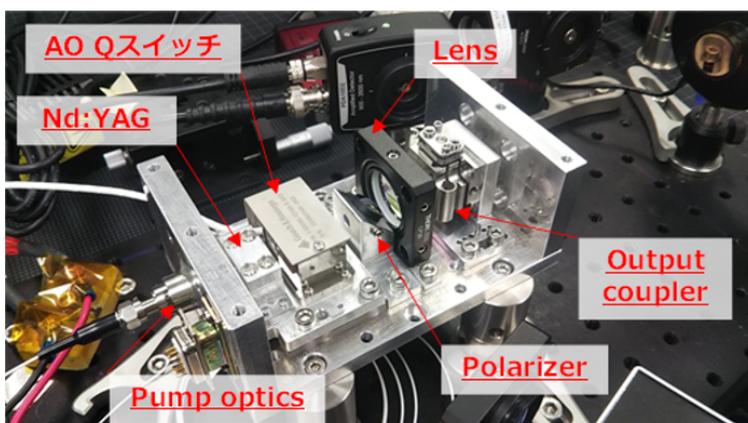


図-2.4 主発振器のプロトタイプ（実際には側面と上面に蓋をする）（AO：音響光学）

（3）MOPA方式の3波長レーザーの開発

図-2.5に、開発したレーザーダイオード端面励起レーザー増幅器の概要を示す。レーザー増幅器の媒質には、S1: 1064 nm ARコート, S2: 1064 nm HRコート及び808 nm ARコートのNd:YAGレーザーロッドを用いており、S2側から808 nmのレーザーダイオードと励起用の光学系を用いて端面励起する構造となっている。レーザー媒質励起用のレーザーには、808 nmで発振するバータイプのレーザーダイオードとマルチモードファイバーが結合したレーザーダイオードの2種類で検討を進め、両方が使えるような筐体構成としたが、最終的には励起光と増幅するレーザー光の結合効率が高いマルチモードファイバーが結合したレーザーダイオードを選択した。装置の簡略化と長期安定動作化の観点から、レーザーダイオードとレーザー媒質の冷却及び温度調整には、ペルチェ素子と空冷を組み合わせたシステムを採用した。この冷却システムを使用することで、レーザーダイオードを最大励起したときでも、レーザーダイオードとレーザー媒質で発生する熱が排熱可能であることが実験的に確かめられている。

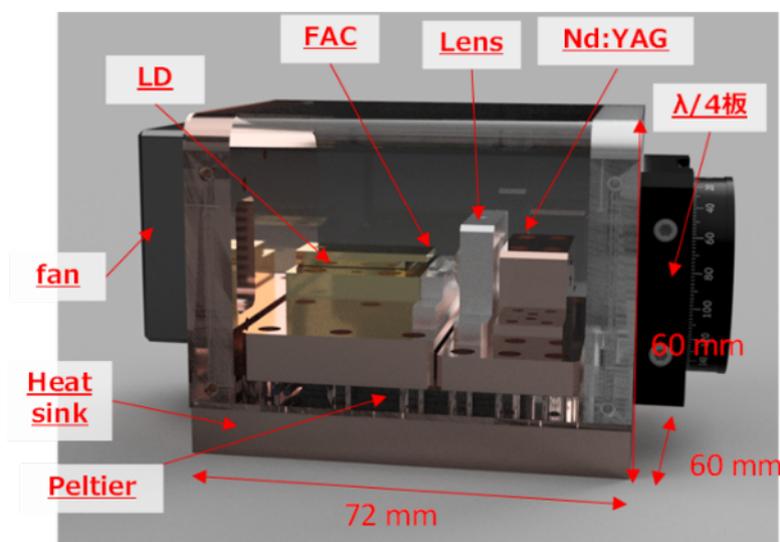


図-2.5 端面励起Nd:YAGレーザー増幅器（LD：レーザーダイオード、FAC：ファスト軸コリメーションレンズ）

増幅された主発振器のレーザー光は、波長変換部（第二高調波発生及び第三高調波発生）によって、532 nmと355 nmのレーザー光に波長変換される。様々な非線形光学結晶の中からトレードオフ（性能、入手性など）を考慮して使用する非線形光学結晶を検討した。その結果、第二高調波発生には波長変換効率が高く取り回しが容易なType-II KTP結晶を、第三高調波発生には入手性が高く優れた光学特性を持つType-II LBO結晶を使用することとした。これらの非線形光学結晶は温度調節機能を備えた専用の気密筐体に設置されており（図-2.6）、レーザー光の非線形光学結晶への偏光、入射角度と温調を組み合わせて、波長変換効率の調整を行うことが可能である。

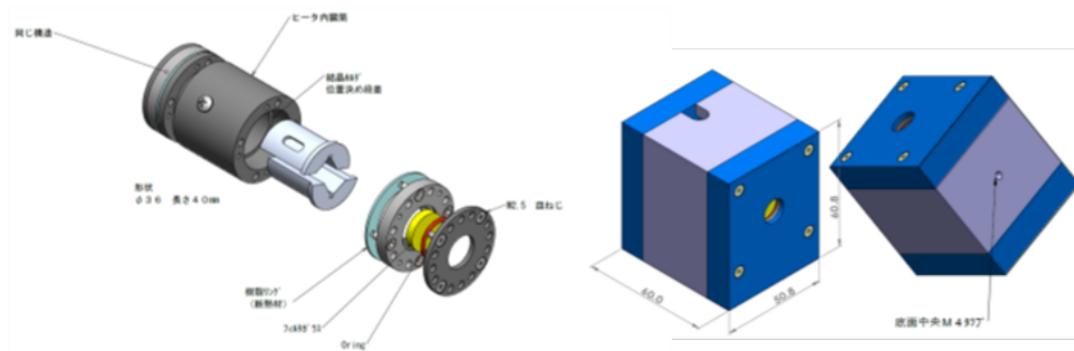


図-2.6 非線形光学結晶用の筐体

図-2.7に、開発した主発振器モジュール、増幅器モジュール、波長変換モジュールによって構成した3波長MOPAレーザーを示す。当初の研究計画では増幅器モジュールを2個用いたシステムを検討していたが、サブテーマ1で検出器にMulti-Pixel Photon Counter (MPPC)を導入したことにより、レーザー出力に対する要求が下がったので、1段増幅のシステムで開発を進めた。これにより、装置をより小型化して低コスト化することに成功した。主発振器レーザー出力は、戻り光対策用のアイソレータを通過した後、1/2波長板によって偏光方向をs偏光に調整されて、増幅器モジュールに入射する。増幅パスは、増幅用のレーザーロッド内に蓄積されたエネルギーを効率的に利用するために4パス構成としており、偏光ビームスプリッタ (PBS) と1/4波長板を使用してレーザーの偏光を利用することでこれを実現した。増幅器モジュールによって増幅された主発振器のレーザー光は、1/2波長板によって偏光方向を調整された後、波長変換部 (第二高調波発生及び第三高調波発生) によって、532 nmと355 nmのレーザー光に波長変換される。また、レーザーの安定動作化のために、光学系全体は600 mm×300 mm×200 mmの可搬型レーザー筐体内に収められている。レーザーを構成する発振器等には、温度調整機能が付加されており、動作環境温度が変動したとしても、長期の連続観測に耐えることが可能である。また、研究成果の一環として本課題で開発を行ったレーザー装置とそれを用いるライダー装置に関する特許出願を行った。

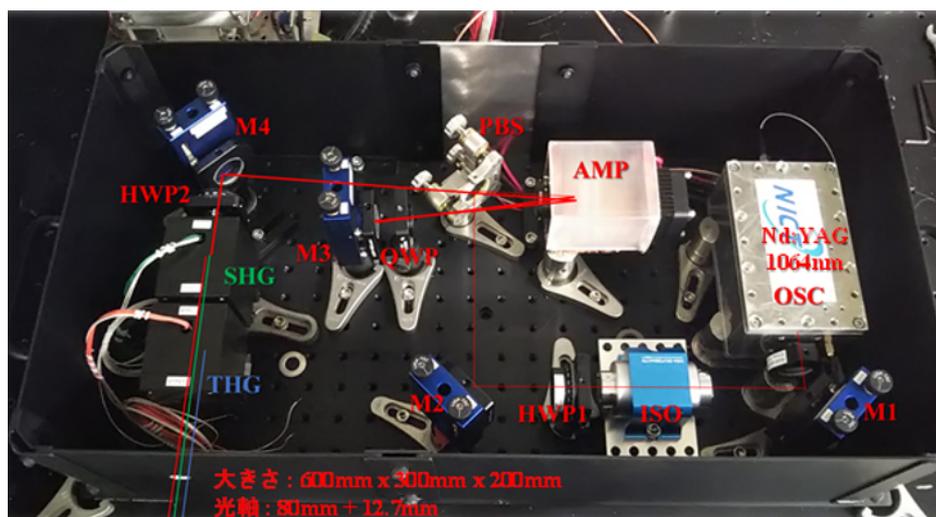


図-2.7 MOPA方式の3波長レーザー (M1～M4: ミラー、ISO: アイソレータ、OSC: 主発振器、AMP: 増幅器、PBS: 偏光ビームスプリッタ、QWP: 1/4波長板、HWP1～HWP2: 半波長板、SHG: 第二高調波発生モジュール、THG: 第三高調波発生モジュール)

図-2.8に、開発したMOPA方式の3波長レーザーの入出力特性を示す。増幅器に入力する主発振器レー

ザーは、20 mW (0.2 mJ、100 Hz、パルス幅23 ns) とした。第3高調波出力が最大になるように調整を行った後、ハーモニックビームスプリッターを用いて、基本波 (1064 nm)、第二高調波 (532 nm)、第三高調波 (355 nm) を分離して出力測定を行った。最大励起時には、203 mW (2.03 mJ) の基本波出力、88.1 mW (0.881 mJ) の第二高調波出力、30.3 mW (0.303 mJ) の第三高調波出力が得られた。また、増幅後のレーザーパルス幅は、HSRLの観測に適した20 ns以上の長パルス幅 (狭スペクトル幅) を保ったままのレーザー増幅が実現した。得られた各波長のパルスエネルギーは当初想定していた値 (5 mJ@1064 nm, 532 nm, 0.5 mJ@355 nm) よりも低い値であるが、サブテーマ1で検出器にMPPCを導入したことにより、レーザー出力に対する要求が下がったので、観測仕様を満たすことが可能である。

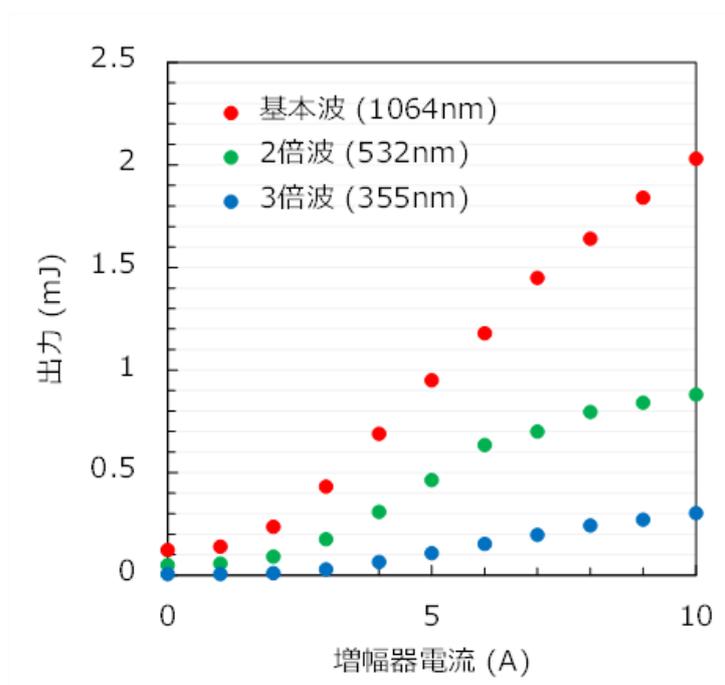


図-2.8 MOPA方式の3波長レーザーの発振特性

5. 研究目標の達成状況

レーザー媒質に関しては、当初の計画ではNd:YLFレーザーを導入する予定だったが、Nd:YAGレーザーに計画を変更して開発を実施した。その結果、当初の計画よりも低コストなHSRLシステムを構築することに成功した。小型レーザーは主発振器レーザー、レーザー増幅器、波長変換部から構成される。3年間の研究期間において、ほぼ計画通りに各構成要素の設計開発を実施することができた。最終年度には、小型レーザーを構成する各要素の性能向上に努めて、最終的に連続観測に耐えるレーザーの開発に成功した。また、研究成果の一環として本課題で開発を行ったレーザー装置とそれを用いるライダー装置に関する特許出願を行った。特許出願については当初の研究計画にはなく、研究目標を上回る成果をあげることができた。

表-2.2 研究計画のロードマップ (サブテーマ2)



6. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) 神慶孝：レーザー研究, 48, 11, 585-590 (2020), 高スペクトル分解ライダー手法による大気エアロゾル計測.
- 2) N. SUGIMOTO, Y. JIN, and T. NISHIZAWA: Applied Optics, 60, 13, 3617-3622 (2021), Possible use of fluorescence from iodine blocking filter in high-spectral-resolution lidar to detect Mie scattering signals. (IF:1.905)
- 3) Y. JIN, T. NISHIZAWA, N. SUGIMOTO, S. TAKAKURA, M. AOKI, S. ISHII, A. YAMAZAKI, R. KUDO, K. YUMIMOTO, K. SATO, and H. OKAMOTO: Applied Optics, 61, 13, 3523-3532 (2022), Demonstration of aerosol profile measurement with a dual-wavelength high-spectral-resolution lidar using a scanning interferometer. (IF: 1.905)
- 4) Y. JIN and M. AOKI: EquinOCS conference proceedings of the 30th International Laser Radar Conference, (2023), Development of low-cost high-spectral-resolution lidar using compact multimode laser for air quality measurement. (in press)

<その他誌上発表 (査読なし) >

【サブテーマ1】

- 1) 神慶孝：地球環境研究センターニュース、33, 8 (2022)
「東アジアにおける多様な大気エアロゾルをライダーで測る -環境総合推進費課題5RF 2-1「大気モニタリングネットワーク用低コスト高スペクトル分解ライダーの開発での取り組み-」
- 2) 神慶孝：地球環境研究センターニュース、33, 6 (2022)
「Lidarで繋がる世界の大気エアロゾル観測 -アジアの黄砂から南米の火山灰まで-」

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) Y. JIN: OSA sensors and sensing congress (2020)
“Dual-wavelength high-spectral-resolution lidar using a scanning interferometer for monitoring aerosol profiles.”
- 2) 神慶孝、青木誠：第39回レーザセンシングシンポジウム、(2021)
“小型マルチモードレーザーを用いた低コスト高スペクトル分解ライダーの開発”
- 3) Y. JIN, T. NISHIZAWA, A. SHIMIZU, N. SUGIMOTO, A. MIZUNO, and S. PAPANDREA: XI Workshop on Lidar Measurements in Latin America, (2021)
“Dust and smoke events observed by a SAVER-Net lidar in northern Argentina in September 2019.”
- 4) 神慶孝、西澤智明、杉本伸夫、石井昌憲、岡本創：2021年度気象学会秋季大会、(2021)
“大気粒子・気温・風の鉛直プロファイル計測ライダーの考案”
- 5) Y. JIN and M. AOKI: The 30th International Laser Radar Conference, (2022)
“Development of low-cost high-spectral-resolution lidar using compact multimode laser for air quality measurement.”
- 6) 神慶孝、青木誠：第40回レーザセンシングシンポジウム、(2022)
“小型マルチモードレーザーを用いた低コスト高スペクトル分解ライダーの開発 その2”
- 7) 神慶孝、西澤智明、杉本伸夫、石井昌憲、岡本創：第40回レーザセンシングシンポジウム、(2022)

- “大気粒子・気温・風の鉛直プロファイル計測ライダーの開発 その1”
- 8) 神慶孝、西澤智明、杉本伸夫、岩井宏徳、青木誠、石井昌憲、岡本創：2022年度気象学会秋季大会、(2022)
“衛星搭載ライダーの検証に向けた雲・エアロゾル光学特性データセットの構築”
- 9) 神慶孝、青木誠：第25回大気ライダー研究会、(2023)
“マルチモード高スペクトル分解ライダーによる大気エアロゾル観測”
- 10) N. SUGIMOTO, Y. JIN, T. NISHIZAWA: The 30th International Laser Radar Conference, (2022)
“Possible use of iodine absorption/fluorescence cell in high-spectral-resolution lidar.”

【サブテーマ2】

- 1) 青木誠、神慶孝：第39回レーザセンシングシンポジウム、(2021)
“高スペクトル分解ライダー用Nd:YAGレーザーの開発”
- 2) 青木誠、神慶孝：第40回レーザセンシングシンポジウム、(2022)
“高スペクトル分解ライダー用Nd:YAGレーザーの開発 その2”

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 国立環境研究所公開シンポジウム2022「未来につなぐ世界との絆-持続可能な地球を目指して-」（主催：国立環境研究所、2022年6月23日、聴講者約400名）にて講演

(4) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

特に記載すべき事項はない。

(6) その他の成果発表

【サブテーマ1】

- 1) 2022年度環境研究・技術開発 新技術説明会（主催：科学技術振興機構、環境再生保全機構、国立環境研究所、他3機関、2023年3月9日、聴講者約150名）「次世代エアロゾルライダーを用いた大気エアロゾルモニタリング技術」にて講演

IV. 英文Abstract

Development of low-cost high-spectral-resolution lidar for air quality monitoring network

Principal Investigator: Yoshitaka Jin and Makoto Aoki

Institution: National Institute for Environmental Studies, 16-2 Tsukuba, Ibaraki
305-8506, JAPAN

Tel: +81-29-850-2526

E-mail: jin.yoshitaka@nies.go.jp

Cooperated by: National Institute of Information and Communications Technology

[Abstract]

Key Words: Atmospheric aerosols, PM2.5, Mineral Dust, Black Carbon, Air pollution, Biogeochemical Cycle, Environmental Measurement, Remote Sensing, Lidar

A low-cost high-spectral-resolution lidar (HSRL) was developed for monitoring air quality. A multi-longitudinal mode laser, which was widely used for aerosol lidars and lower cost compared to single-mode lasers, was used as the light source of HSRL. The multimode laser was designed to have the same mode spacing as the free spectral range of interferometer optimized for the HSRL measurement. As a result, the laser had a short cavity length and large mode spacing, but it had a narrow spectral width comparable to single-mode lasers. The interferometer was scanned over the range of one fringe, and the interference visibility containing aerosol backscatter information was obtained at each height through fitting analysis of the scan data. The interference visibility and fringe position were calibrated with the reference signals taken from the part of the transmitted laser. We successfully carried out continuous measurement of aerosol profiles during the daytime and nighttime. The performance of the new system was greater than a previous version, which employed a laser with a much longer cavity. Vertical profiles of aerosol optical properties were retrieved from lidar signals every hour in near real-time. Aerosol extinction coefficients for four types of aerosol component (mineral dust, sea salt, black carbon, and air pollution aerosols) were then estimated from aerosol optical properties (extinction coefficient, extinction-to-backscatter ratio, backscatter color ratio, and depolarization ratio) measured by the lidar. Mass concentration of each aerosol component was converted from retrieved aerosol extinction coefficients. We successfully produced 1-month data set of aerosol concentrations from the continuous lidar measurement. In the future, the developed lidar can be used in the current lidar observation network of the Ministry of Environment of Japan to enhance monitoring of mass concentrations for various types of aerosol component.