

課題番号:5RF-2001

体系的番号:JPMEERF20205R01

重点課題:⑯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

令和5年6月29日

令和2年度～令和4年度

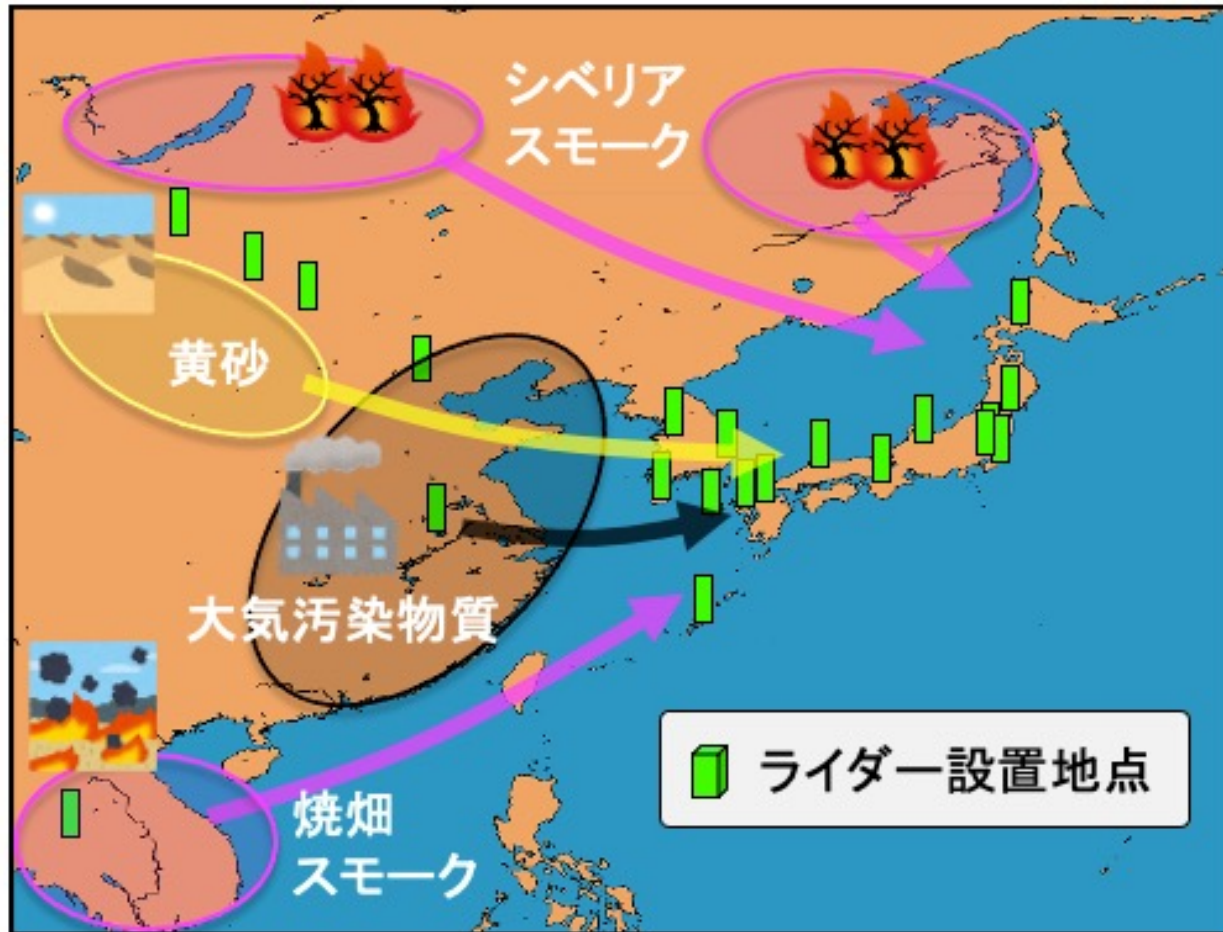
# 大気モニタリングネットワーク用 低コスト高スペクトル分解ライダーの開発 (革新型研究開発 若手枠)

研究代表者 神 慶孝 (国立環境研究所)

研究分担者 青木 誠 (情報通信研究機構)

## 【1. はじめに】ライダー観測網による大気微粒子の常時モニタリング

- ✓ 東アジアでは様々なエアロゾルが飛散し、大気環境に影響を及ぼしている。
- ✓ 国立環境研究所では、約20地点のライダー観測ネットワークを構築し、エアロゾルの高度プロファイルを常時モニタリングしている。



東アジアにおけるエアロゾルライダー観測網

### ◎偏光解消度を用いた粒子の分類

- ライダーデータから非球形成分(黄砂)を抽出し、環境省黄砂飛来情報として提供している。
- 黄砂データは疫学研究にも活用されてきた。

### ◎課題(問題意識)

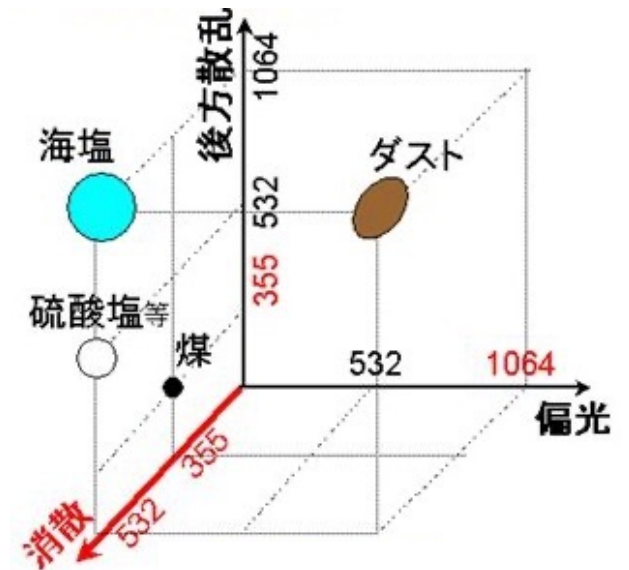
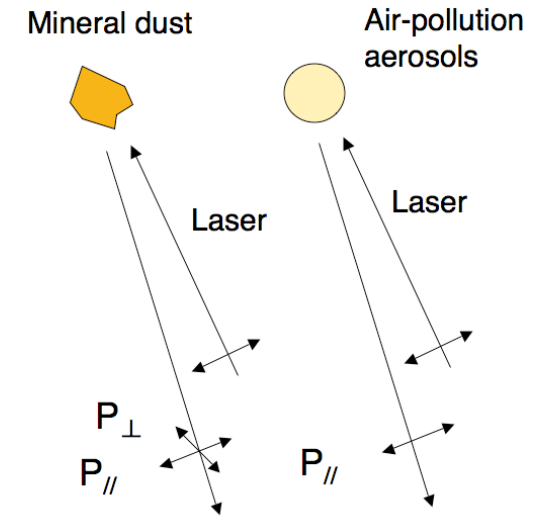
実大気では黄砂以外にも様々なエアロゾルが混在している。

→ 多種類のエアロゾル濃度をライダー観測網で常時モニタリングできないか。

## 【1. はじめに】エアロゾルの種類をどのように分けるか

- 偏光解消度を用いた形状による粒子の分類(非球形と球形:  
鉱物ダストと大気汚染粒子など)←これまで実施してきたこと
- 多波長測定によって粒子サイズで分類(大粒子と小粒子:  
海塩粒子・鉱物ダストと大気汚染粒子など)
- 光吸収特性の情報があれば、吸収性の強いエアロゾル  
(ブラックカーボンなど)と吸収性の弱いエアロゾルが分離可能  
→吸収特性を得るため、消散と散乱を測定する技術が必要

各種エアロゾルの物質特性を把握するには、  
ライダーの高度化(光吸収特性計測・多波長化)が必要



# 【 1. 研究開発背景等、2. 研究開発目的】

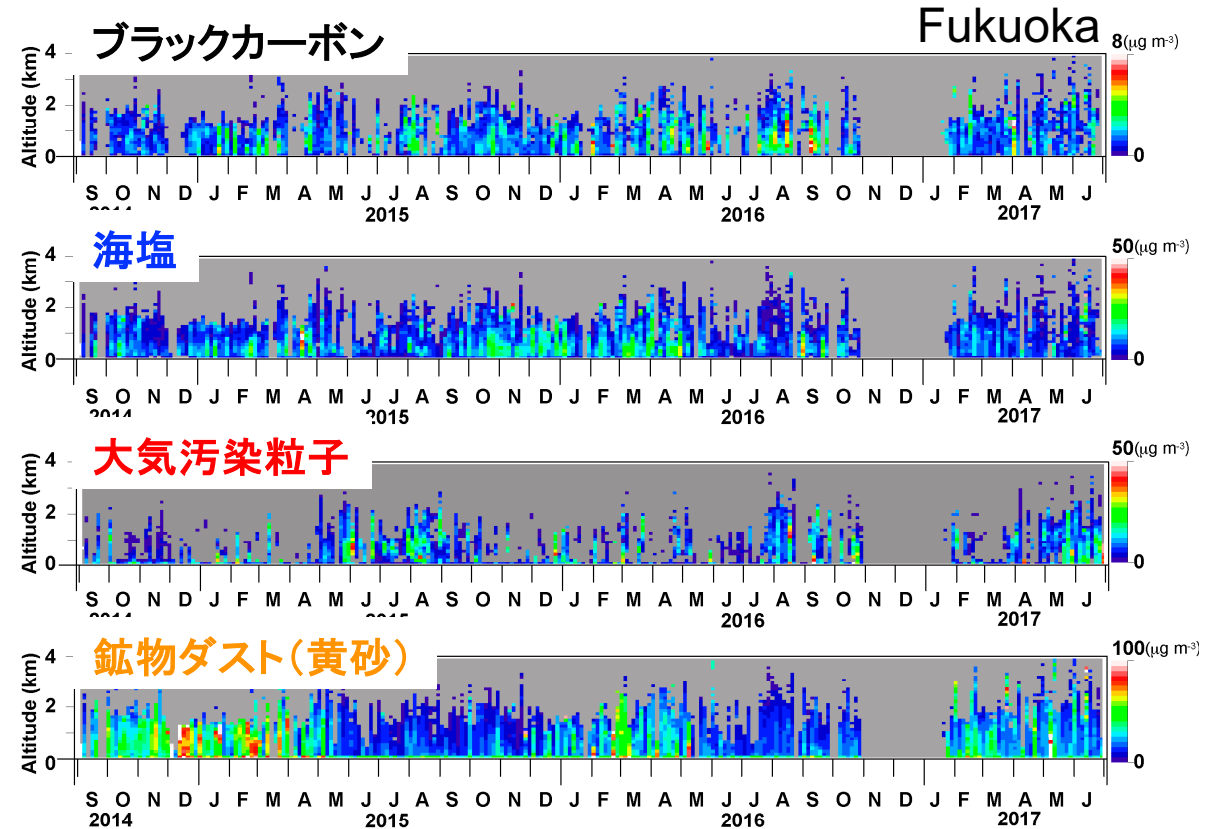
## ライダー高度化に関する従来手法の課題点

- ◎ラマンライダー手法(ラマン散乱を測定):  
簡易的だが、信号強度が微弱で昼間の測定が困難
- ◎高スペクトル分解ライダー手法(レイリー散乱を測定):  
高感度で昼間の測定も可能だが、高コストかつ安定性に欠ける

## 本研究の目的

- ✓ 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を開発することを目的とする  
→本研究ではHSRL手法を導入する
- ✓ (狙い)多種類エアロゾルの動態を把握するための常時監視ライダーネットワークの構築を目指す

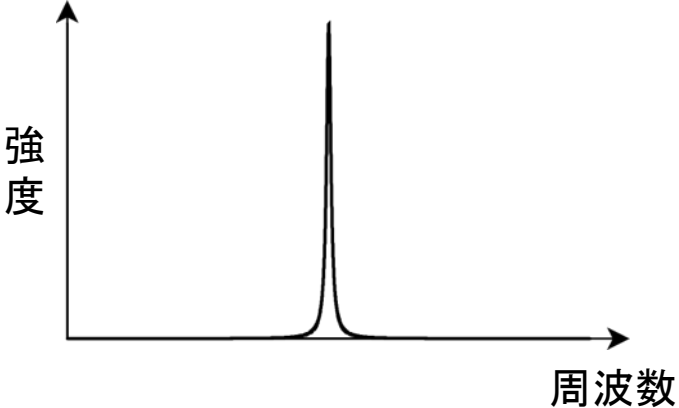
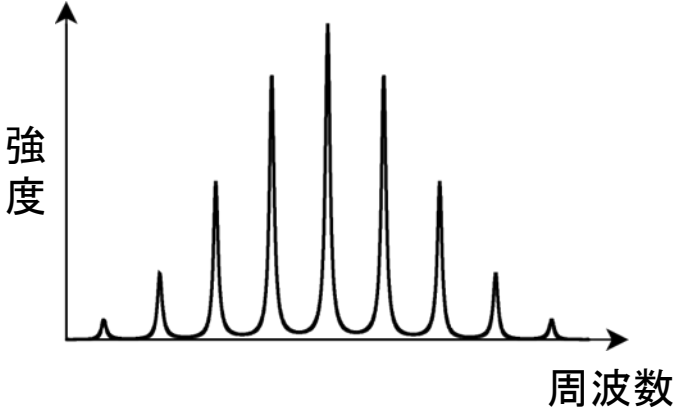
(最終的に得たいデータ)



Hara et al., (2018)

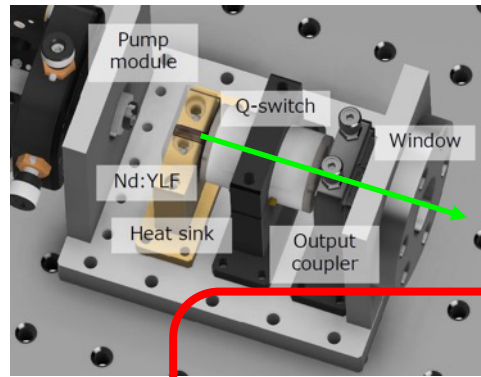
ラマンライダーによる各種エアロゾルの測定の例(夜間のみ)  
→高スペクトル分解ライダーで昼夜で高分解能測定を目指す!

**【 1. 研究開発背景等、2. 研究開発目的】 低コストで簡易的なHSRLにする方法**

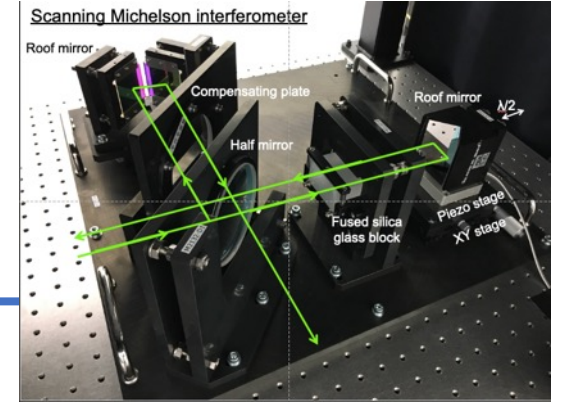
従来のHSRL手法	本研究のHSRL手法
<p data-bbox="542 354 1080 396"><u>光源: シングルモードレーザー</u></p>  <p data-bbox="479 544 524 636">強度</p> <p data-bbox="1021 782 1154 825">周波数</p> <ul data-bbox="402 896 1217 1139" style="list-style-type: none"><li>✓ 高コストのレーザーが必要</li><li>✓ 測定波長毎に分光素子が必要</li><li>✓ レーザーないしは分光器の複雑な波長制御が必要</li></ul> <p data-bbox="453 1218 1174 1325">(過去研究課題(B-0803、H20-22、代表: 西澤智明)にて開発を推進)</p>	<p data-bbox="1454 354 1951 396"><u>光源: マルチモードレーザー</u></p>  <p data-bbox="1409 544 1454 636">強度</p> <p data-bbox="1951 782 2084 825">周波数</p> <ul data-bbox="1319 896 2168 1332" style="list-style-type: none"><li>✓ 安価で頑強なレーザーを使用 (ただし、市販レーザーでは困難)</li><li>✓ 1つの干渉計で多波長化を可能に → 従来手法と比べてコスト半減</li><li>✓ 干渉計(分光器)を常時スキャンする方式で複雑な波長制御を不要に → 従来手法と比べて簡易的</li></ul>

# 【1. 研究開発背景等、2. 研究開発目的】本研究の概要・研究体制

## 最適なレーザーの開発



## 最適な干渉計の開発



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』

レーザー



サブテーマ1 (NIES)  
『ライダーシステムおよびデータ処  
理手法の最適化に関する研究』

分光器 &  
検出器

データ解析

各種エアロゾルの濃度(消散係数)を抽出

鉱物ダスト

海塩粒子

ブラックカーボン

その他  
大気汚染性粒子

### 【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目標：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（NIES）

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。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目標：高スペクトル分解ライダー用小型レーザーの開発（NICT）

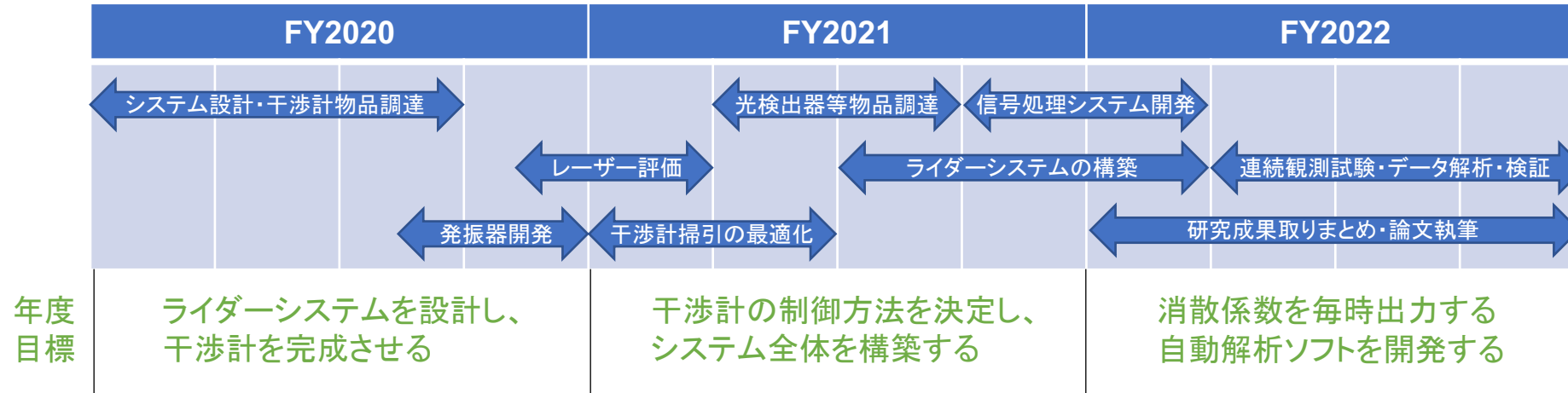
HSRLに適した光源を提供するため、主発振器出力増幅器（MOPA）方式を採用した小型Nd:YLFレーザーを開発する。市販レーザーに比べて小型で、かつスペクトル幅が狭いレーザーをHSRL用に設計する。

### 【3. 研究目標および研究計画】

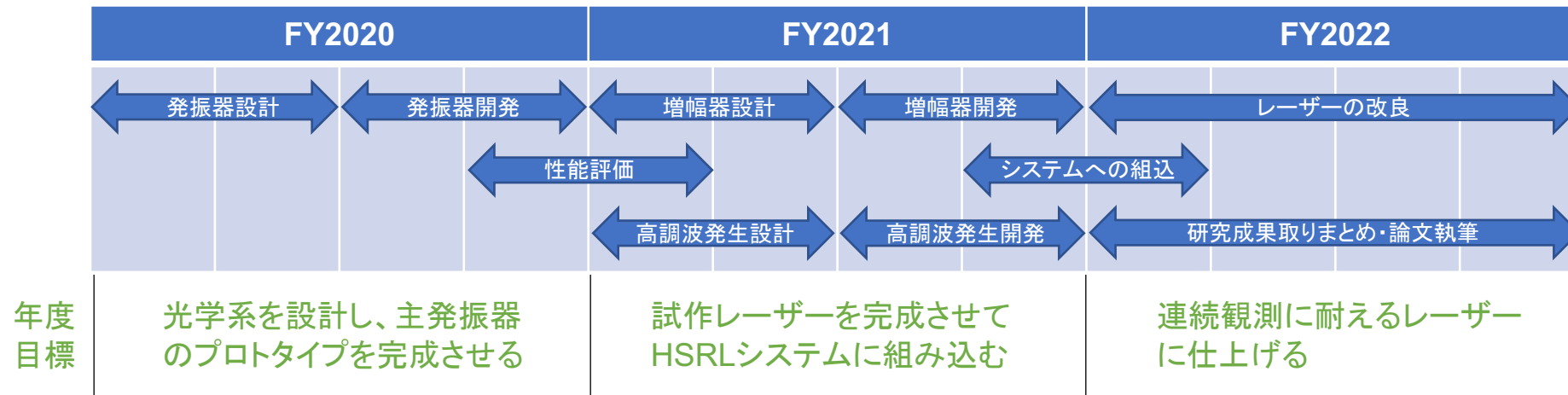
#### ◎本研究の最終到達目標

低コスト高スペクトル分解ライダーでエアロゾル消散係数を連続的に測定し、1ヶ月間のデータセットを作成する

#### 【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



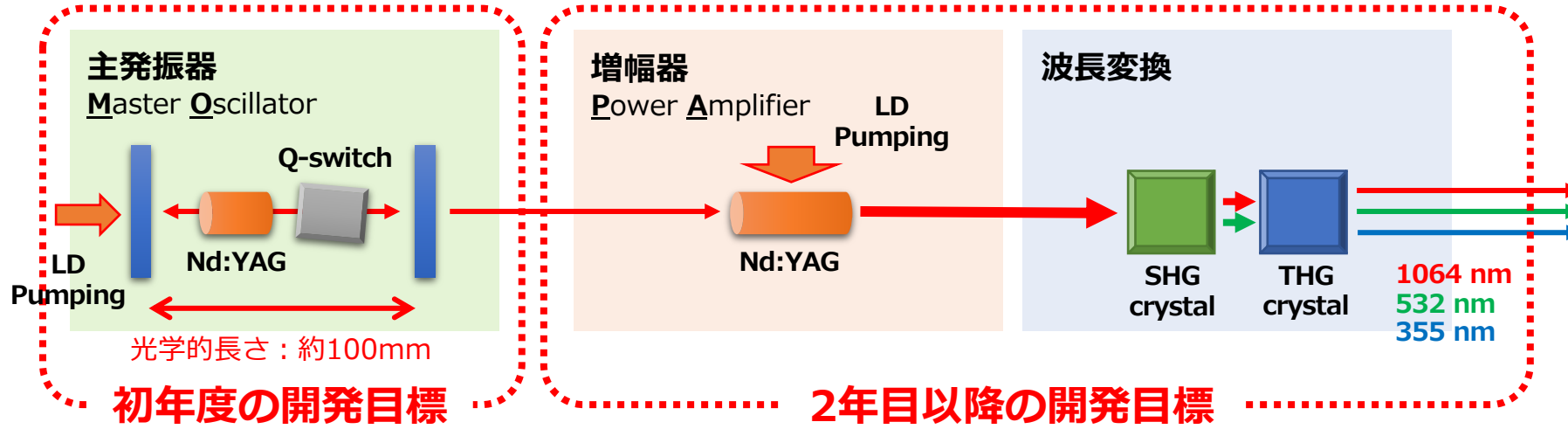
#### 【サブテーマ2】 高スペクトル分解ライダー用小型レーザーの開発



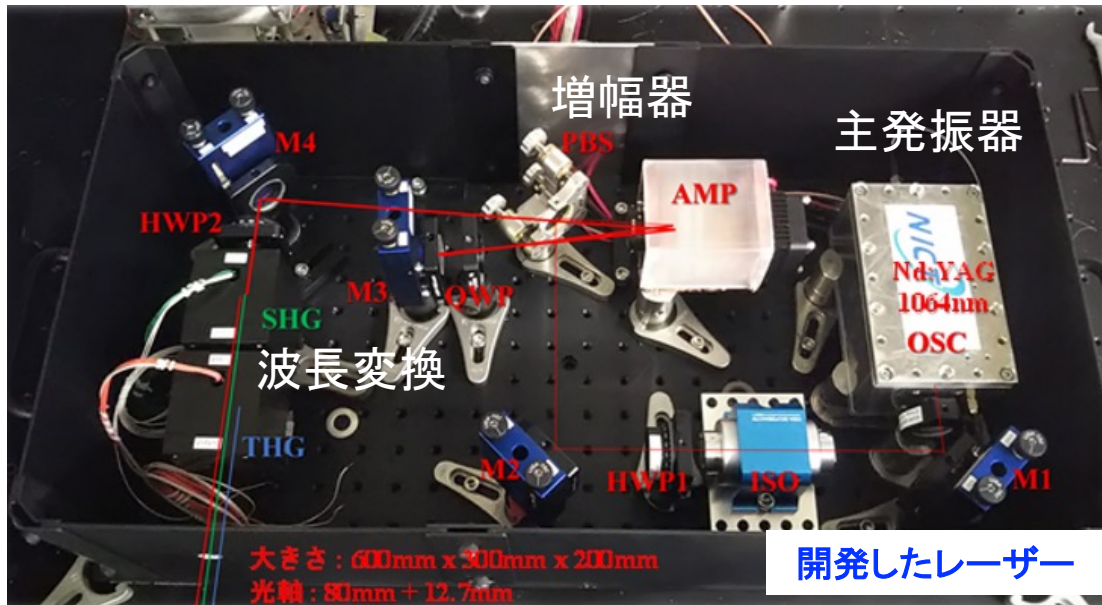
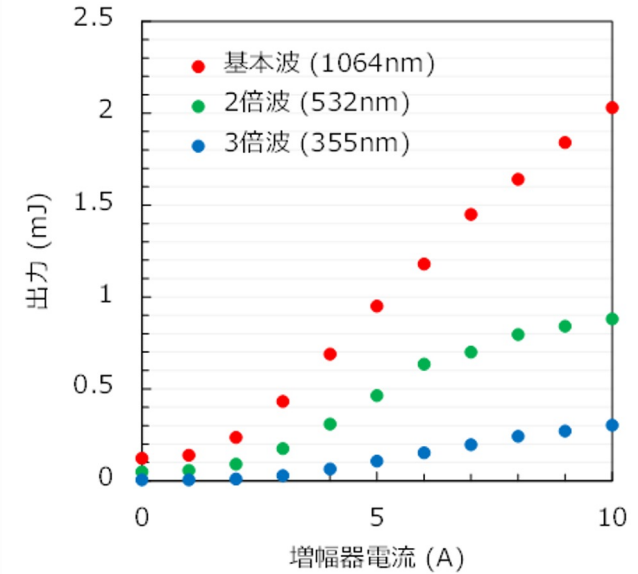


# 【4. 研究開発内容・5-1. 成果の概要】高スペクトル分解ライダー用小型レーザーの開発

## Nd:YAG 主発振出力増幅器 (MOPA)



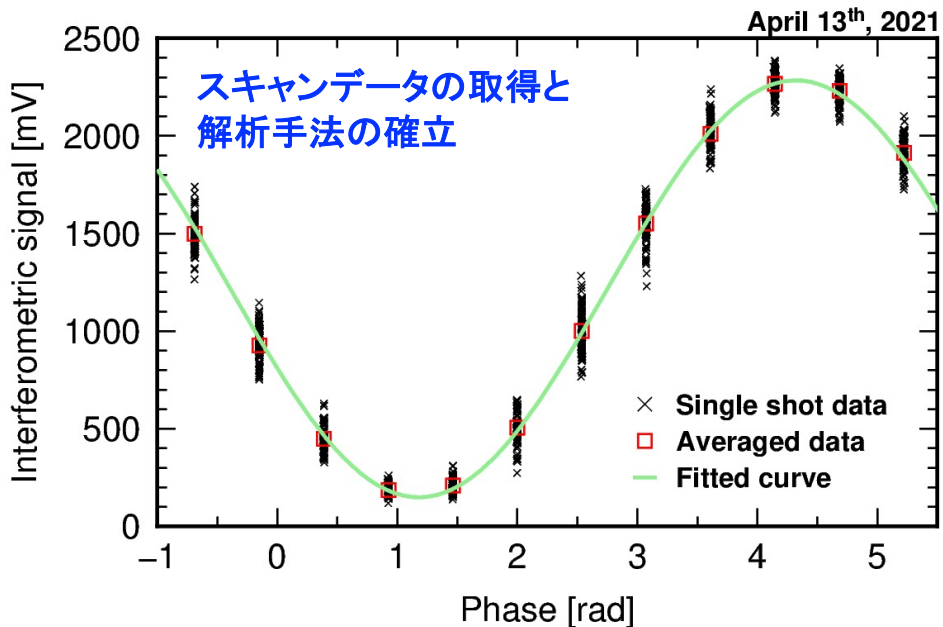
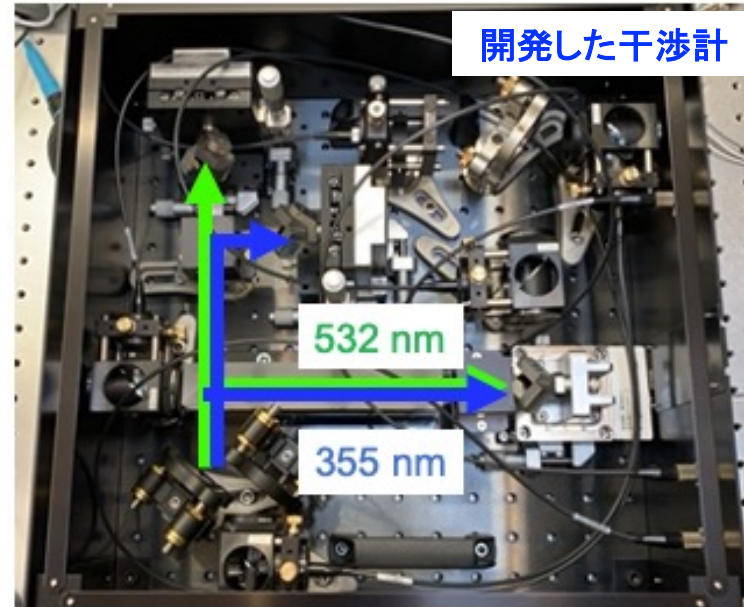
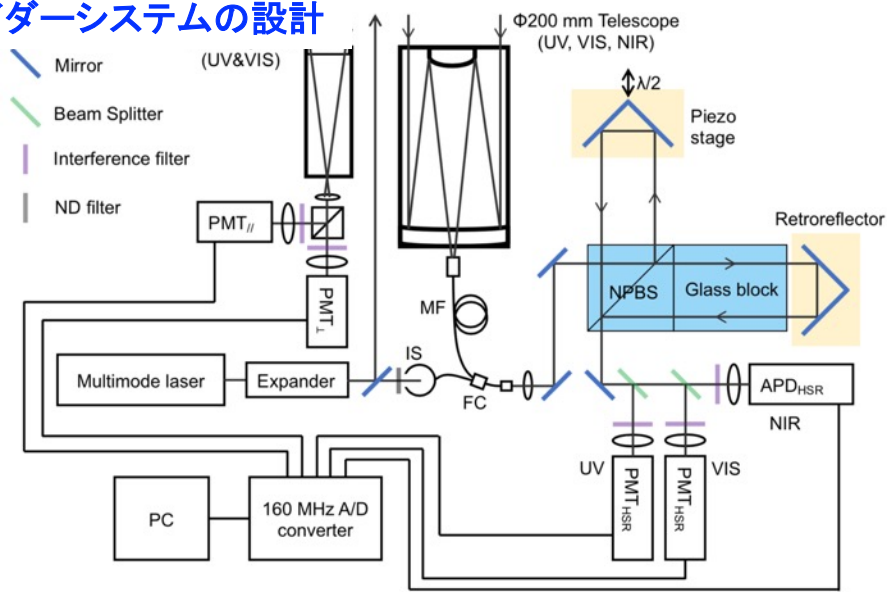
レーザー出力結果



- レーザーの周波数モード間隔、スペクトル幅、周波数変動の要求仕様をクリアし、HSRLに適したスペクトルを有するレーザーを開発に成功した。
- レーザーの構成を主発振器と増幅器に分けることで、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、特許出願を果たした(特願2023-22663)。

# 【4. 研究開発内容・5-1. 成果の概要】走査型干渉計の開発とライダーシステム全体の構築

## ライダーシステム的设计



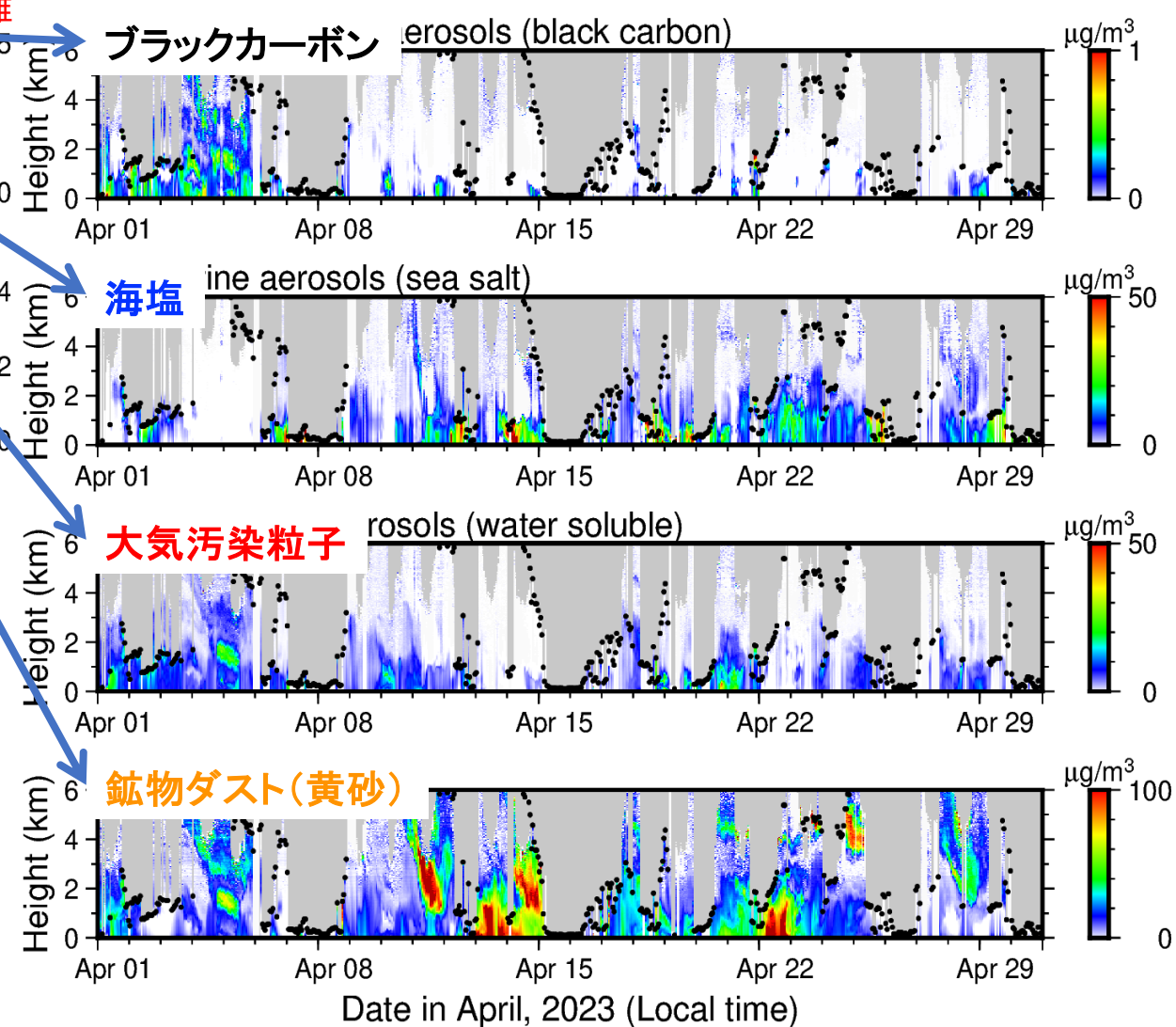
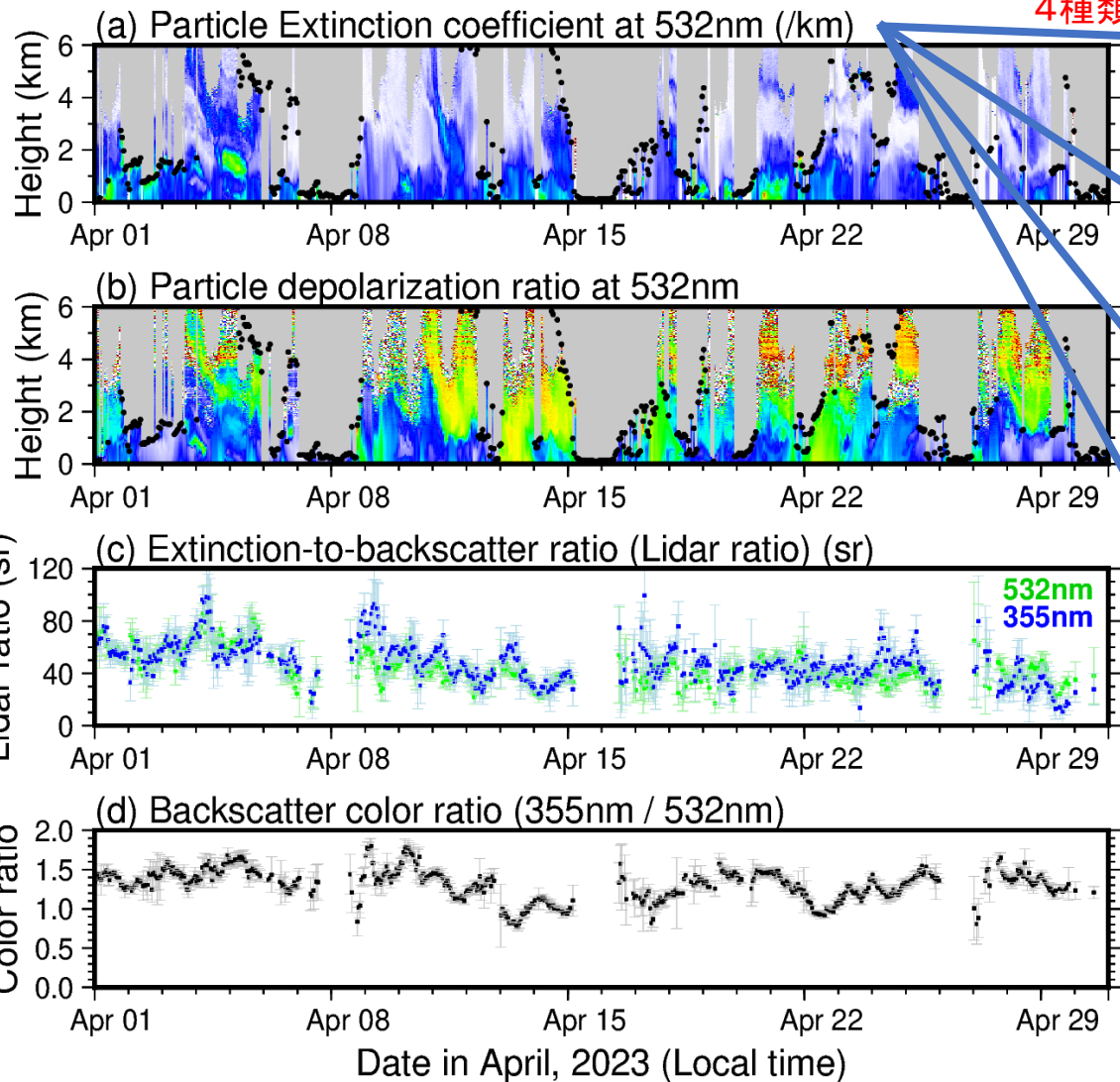
- 走査型干渉計を用いることで、長期運用可能な高安定HSRLシステムの開発に成功した。
- 多波長測定用の干渉計を新たに開発し、レーザー発振と同期した制御を行うことで、測定データ量の大幅な縮小とそれに伴う処理の高速化を実現した。
- 室温が大きく変わる環境下においても安定的に動作することを確認し、将来的なライダー観測網強化に資するシステムを確立した。

# 【4. 研究開発内容・5-1. 成果の概要】多波長HSRL観測データを用いたエアロゾル濃度の推定

開発ライダーによるエアロゾル光学特性の連続観測

各エアロゾル種の重量濃度(2023.04、つくば)

4種類に分離



➤ 開発ライダーの連続観測データから、最終到達目標であるエアロゾル濃度の1ヶ月間データセットの導出を達成した。

## 【5-2. 環境政策等への貢献】

- 現行の環境省ライダー観測網を強化するシステムを開発。より定量的な測定を低コストで実現。
- 黄砂だけでなく、ブラックカーボン(煤)や海塩粒子、大気汚染粒子のエアロゾル濃度情報を提供できる。

本研究で開発する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	○	○	◎	○

(成分測定の表記) DS: 鉱物ダスト、SS: 海塩粒子、AP: 大気汚染性粒子、BC: ブラックカーボン  
 (運用コストが良い理由) 空冷式レーザーダイオード励起レーザーの導入でメンテナンスフリー化  
 (サイズ) 現状では1,000mm×700mmの光学定盤に搭載(環境省ライダーと同程度)  
 (初期コスト) 干渉計と高速A/D変換器を使用するため偏光ミー散乱ライダーよりも+約500万円  
 (安定性) 干渉計を利用するため相対的に熱や振動の影響を受けやすいが、高安定なシステムを実現

## 【5-3. 研究目標の達成状況】

### ◎全体目標

目標の達成状況: **目標を上回る成果をあげた**

理由: 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: 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

目標の達成状況: **目標を上回る成果をあげた**

理由: 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。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、大きさを約4分の1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。

### ◎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

目標の達成状況: **目標を上回る成果をあげた**

理由: 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。小型レーザーを構成する各要素の性能向上に努めて、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。

## 【6. 研究成果の発表状況】

<主な査読付き論文> (査読付き論文件数: 4件(うち英文3件))

- 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 30<sup>th</sup> International Laser Radar Conference, (2023), Development of low-cost high-spectral-resolution lidar using compact multimode laser for air quality measurement. (in press)

<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

<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