

# PCV気相漏洩位置及び漏洩量推定のための 遠隔光計測技術の研究開発 (委託研究)

—令和5年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

Research and Development of Remote Optical Measurement Technology for  
PCV Gas-phase Leakage Location and Leakage Volume Estimation  
(Contract Research)

– FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource  
Development Project –

福島廃炉安全工学研究所 廃炉環境国際共同研究センター  
千葉大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,  
Fukushima Research and Engineering Institute  
Chiba University

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。  
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の  
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）  
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課  
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49  
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).  
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under  
the same terms and conditions as CC-BY.  
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,  
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan  
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発  
(委託研究)

—令和 5 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

日本原子力研究開発機構 福島廃炉安全工学研究所  
廃炉環境国際共同研究センター

千葉大学

(2025 年 7 月 9 日受理)

日本原子力研究開発機構 (JAEA) 廃炉環境国際共同研究センター (CLADS) では、令和 5 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（以下、「本事業」という。）を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等をはじめとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。

平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、令和 5 年度に採択された研究課題のうち、「PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発」の令和 5 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、ライダーをはじめとする遠隔光計測システムにより漏洩箇所の位置を特定するとともに、その位置における漏洩の可視化手法を開発することを目的としている。

ライダーは視線方向に距離分解することができ、建屋内での壁面・配管とその周囲の気相分子（窒素 N<sub>2</sub>、水蒸気 H<sub>2</sub>O など）及び浮遊粒子（エアロゾル）からの信号を分離して観測することができる。また、レーザー光と高感度画像センサーを組み合わせたフラッシュライダー並びに光波の干渉を利用した高感度のシアログラフィーによって、漏洩箇所の画像化・可視化を図り、漏洩量の推定を目指す。これら複数の手法の比較を通じて、漏洩箇所を特定する際の位置分解能と可視化可能な漏洩量の検出下限を明らかにする。

---

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、千葉大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

Research and Development of Remote Optical Measurement Technology  
for PCV Gas-phase Leakage Location and Leakage Volume Estimation  
(Contract Research)

— FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,  
Fukushima Research and Engineering Institute  
Japan Atomic Energy Agency  
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

Chiba University

(Received July 9, 2025)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) in FY2023.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2023, this report summarizes the research results of the “Research and development of remote optical measurement technology for PCV gas-phase leakage location and leakage volume estimation” conducted in FY2023.

The present study aims to locate leakage points using a remote optical measurement system including Lidar, and to develop a visualization method for leakage at those points. The Lidar can be distance-resolved in the line-of-sight direction and can separate and observe signals from walls and pipes in the building and surrounding gas-phase molecules (nitrogen N<sub>2</sub>, water vapor H<sub>2</sub>O, etc.) and suspended particles (aerosols). In addition, flash Lidar, which combines a laser beam with a high-sensitivity imaging sensor, and high-sensitivity shearography, which uses interference of light waves, are used to image and visualize the leakage location and to estimate the amount of leakage. Through comparison of these methods, we will clarify the positional resolution in locating the leakage point and the lower detection limit of the leakage amount that can be visualized.

---

Keywords: Lidar, Raman, Fukushima, PCV, Nitrogen, Remote, Leakage, Shearography

This work was performed by Chiba University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

## 目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要 .....	1
2. 平成 30 年度 採択課題 .....	2
3. 令和元年度 採択課題 .....	5
4. 令和 2 年度 採択課題 .....	8
5. 令和 3 年度 採択課題 .....	10
6. 令和 4 年度 採択課題 .....	12
7. 令和 5 年度 採択課題 .....	14
付録 成果報告書 .....	17

## Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project .....	1
2. Accepted Proposal in FY2018 .....	2
3. Accepted Proposal in FY2019 .....	5
4. Accepted Proposal in FY2020 .....	8
5. Accepted Proposal in FY2021 .....	10
6. Accepted Proposal in FY2022 .....	12
7. Accepted Proposal in FY2023 .....	14
Appendix Result Report .....	17

This is a blank page.

## 1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン(平成26年6月文部科学省)」等を踏まえ、平成27年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」(以下、「本事業」という。)を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という。)では、平成27年に廃炉国際共同研究センター(以下、「CLADS」という。現:廃炉環境国際共同研究センター)を組織し、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所廃炉(以下、「1F廃炉」という。)に係る研究開発を進めている。

また、平成29年4月にCLADSの中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後はCLADSを中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム(令和元年度より新設)に再編した。

## 2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム	11 課題（若手研究 6 課題、一般研究 5 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム	6 課題
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英）

## 平成 30 年度 採択課題一覧

## 共通基盤型原子力研究プログラム

## 【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山崎 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

## 共通基盤型原子力研究プログラム

## 【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斎藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

## 課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究 機構

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 肇	京都大学

## 3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）

課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英 2 課題、日露 2 課題）

研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

## 令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

## 【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

## 共通基盤型原子力研究プログラム

## 【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (～R2. 3. 31) 大曲 新矢 (R2. 4. 1～)	産業技術総合研究所

## 課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立 G E ニュークリア・エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塚原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (～R3. 3. 31) 岡山大学 (R3. 4. 1～)

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾大学

## 研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	淺間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (～R2. 3. 31) 竹下 健二 (～R3. 6. 30) 塙原 剛彦 (R3. 7. 1～)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

#### 4. 令和 2 年度 採択課題

令和 2 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。  
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和 2 年 3 月 17 日～令和 2 年 5 月 14 日（課題解決型）  
令和 2 年 5 月 13 日～令和 2 年 7 月 15 日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム	8 課題（若手研究 2 課題、一般研究 6 課題）
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英）

#### 令和 2 年度 採択課題一覧

##### 課題解決型廃炉研究プログラム

###### 【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 (～R4. 7. 31) 村上 健太 (R4. 8. 1～)	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料研究機構

## 課題解決型廃炉研究プログラム

## 【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー 加速器研究 機構
$\alpha / \beta / \gamma$ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現:ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
$\beta$ 、 $\gamma$ 、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析 センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畠 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・ 航空技術 研究所

## 5. 令和 3 年度 採択課題

令和 3 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。  
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和 3 年 3 月 16 日～令和 3 年 5 月 17 日（課題解決型）  
令和 3 年 4 月 13 日～令和 3 年 7 月 1 日（国際協力型 日英共同研究）  
令和 3 年 7 月 12 日～令和 3 年 8 月 18 日（国際協力型 日露共同研究）

課題数：12 課題

課題解決型廃炉研究プログラム	8 課題
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英）、2 課題（日露）

### 令和 3 年度 採択課題一覧

#### 課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水・補修及び安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太朗	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮	自然科学 研究機構

課題名	研究代表者	所属機関
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦	東京工業大学

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet (～R4. 1. 31) 三輪 修一郎 (R4. 2. 1～)	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	淺間 一	東京大学

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一発電所 2、3 号機の事故進展シナリオに基づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握	小林 能直	東京工業大学
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化	小原 徹	東京工業大学

## 6. 令和 4 年度 採択課題

令和 4 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。

公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和 4 年 3 月 1 日～令和 4 年 5 月 6 日（課題解決型）

令和 4 年 4 月 7 日～令和 4 年 6 月 16 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：8 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 6 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

### 令和 4 年度 採択課題一覧

#### 課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3 次元線量拡散予測法の確立と $\gamma$ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
$\alpha$ 汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学 (～R5. 3. 31) 理化学研究所 (R5. 4. 1～)
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッジブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学
無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発	渡邊 実	岡山大学
マイクロ・ナノテクノロジーを利用したアルファ微粒子の溶解・凝集分散に及ぼすナノ界面現象の探求	塚原 剛彦	東京工業大学

## 7. 令和 5 年度 採択課題

令和 5 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。  
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和 5 年 3 月 1 日～令和 5 年 4 月 14 日（課題解決型）

令和 5 年 4 月 12 日～令和 5 年 6 月 15 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：9 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 7 課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

### 令和 5 年度 採択課題一覧

#### 課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な耐放射線性ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発	金子 純一	北海道大学
簡易非破壊測定に向けた革新的な $n \cdot \gamma$ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理・化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	名古屋大学
動画像からの特微量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング	中村 啓太	札幌大学
放射性コンクリート廃棄物の減容を考慮した合理的処理・処分方法の検討	小崎 完	北海道大学

課題名	研究代表者	所属機関
高バックグラウンド放射線環境における配管内探査技術の開発	鳥居 建男	福井大学
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的分光画像解析による燃料デブリの可視化への挑戦と LIBS による検証	牟田 浩明	大阪大学
燃料デブリ除去に向けた様々な特性をもつメタカオリンベースのジオポリマーの設計と特性評価	Yogarajah Elakneswaran	北海道大学

本報告書は、以下の課題の令和5年度分の研究成果について取りまとめたものである。

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

## 付録

### 成果報告書

This is a blank page.

令和 5 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための  
遠隔光計測技術の研究開発

(契約番号 R05I109)

成果報告書

令和 6 年 3 月

国立大学法人千葉大学

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、国立大学法人千葉大学が実施した「PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発」の令和 5 年度分の研究成果を取りまとめたものである。

## 目次

概略 .....	vii
1. はじめに .....	1-1
2. 業務計画 .....	2-1
2.1 全体計画 .....	2-1
2.1.1 研究目標の妥当性 .....	2-1
2.1.2 研究内容の革新性、独創性、新規性 .....	2-1
2.1.3 研究効果、有効性、発展性、相乗効果 .....	2-1
2.1.4 研究計画、研究遂行能力、研究体制の妥当性 .....	2-2
2.2 実施体制 .....	2-6
2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法 .....	2-7
2.3.1 ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる漏洩箇所検出（千葉大学） .....	2-7
2.3.2 フラッシュライダーとシアログラフィーによる漏洩箇所の可視化（再委託先：ILT）	2-7
3. 実施内容及び成果 .....	3-1
3.1 ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる漏洩箇所検出（千葉大学） 【令和5年度】 .....	3-1
3.1.1 ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーの構築とガス計測 .....	3-1
3.1.2 まとめ .....	3-28
3.2 フラッシュライダーとシアログラフィーによる漏洩箇所の可視化（再委託先：ILT） 【令和5年度】 .....	3-29
3.2.1 ハイペースペクトル型フラッシュライダーの開発 .....	3-29
3.2.2 シアログラフィー光学系の開発 .....	3-38
3.2.3 まとめ .....	3-45
3.3 研究推進 .....	3-46
4. 結言 .....	4-1
参考文献 .....	5-1

執筆者リスト

研究代表者

国立大学法人千葉大学

准教授

椎名 達雄

名誉教授

久世 宏明

再委託先

公益財団法人レーザー技術総合研究所

研究員

松田 晶平

研究員

倉橋 慎理

主任研究員

染川 智弘

## 表一覧

表 2.1-1	「PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発」年度別全体計画	.....	2-5
表 3.1-1	気体種によるラマンシフト及び光源波長 355 nm に対するラマン散乱光波長	.....	3-3
表 3.1-2	ライダー送信レーザー光源 仕様	.....	3-4
表 3.1-3	ライダー受信光学系 干渉フィルターの仕様	.....	3-8
表 3.1-4	ライダー受信光学系 バンドパスフィルター及びビームスプリッタの仕様	.....	3-9
表 3.1-5	ライダー受信光学系 受光 PMT の仕様	.....	3-9
表 3.1-6	ライダー受信系 フォトンカウンター仕様	.....	3-10
表 3.1-7	ライダーオン大気計測の測定条件	.....	3-11
表 3.1-8	ライダーデータより求めた消散係数	.....	3-14
表 3.1-9	水ラマン計測の測定条件	.....	3-15
表 3.1-10	ライダーによる定量性評価の測定条件	.....	3-18
表 3.1-11	ライダーオン定量評価 漏洩率計測の条件	.....	3-20
表 3.2-1	測定対象のラマン散乱波長と干渉フィルターの仕様	.....	3-31

## 図一覧

図 2.1-1	ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる漏洩検知の概念図	.....	2-3
図 2.1-2	フラッシュライダー・シアログラフィーによる漏洩箇所の可視化 イメージ	.....	2-4
図 2.2-1	プロジェクト実施体制	.....	2-6
図 3.1-1	ミー散乱	.....	3-1
図 3.1-2	ラマン散乱	.....	3-2
図 3.1-3	355 nm の光に対するラマンスペクトル	.....	3-3
図 3.1-4	繰り返し周波数による出力、パルス幅、安定性	.....	3-4
図 3.1-5	レーザー光源 繰り返し周波数による出力、パルス幅	.....	3-5
図 3.1-6	レーザー光源 QSW による光出力強度	.....	3-6
図 3.1-7	ライダー送信系外観	.....	3-6
図 3.1-8	ライダー受信系の完成予定 構成図	.....	3-7
図 3.1-9	令和 5 年度のライダー受信系 構成図	.....	3-7
図 3.1-10	ライダー受信系 干渉フィルターによる透過波長	.....	3-8
図 3.1-11	ライダー受信系 外観図	.....	3-8
図 3.1-12	フォトンカウンター外観	.....	3-10
図 3.1-13	ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダー装置 外観	.....	3-10
図 3.1-14	ライダーによる大気測定値の様子	.....	3-11
図 3.1-15	ライダー大気計測結果 窒素ラマンチャンネル	.....	3-12
図 3.1-16	ライダー大気計測結果 水ラマンチャンネル	.....	3-12
図 3.1-17	ライダー大気計測結果 ミー散乱チャンネル	.....	3-13
図 3.1-18	ライダー大気計測結果 ラマン散乱距離二乗補正対数表示	.....	3-13
図 3.1-19	ライダー大気計測結果 ミー散乱距離二乗補正対数表示	.....	3-14
図 3.1-20	ライダーによる水ラマン測定 実験模式図	.....	3-15
図 3.1-21	水ラマン測定 実験結果 加湿器なし信号	.....	3-16
図 3.1-22	水ラマン測定 実験結果 11.1 m で加湿器あり信号	.....	3-16
図 3.1-23	水ラマン測定 実験結果 加湿器なしの信号を引いた 11.1 m の信号	.....	3-17
図 3.1-24	定量評価 加湿器による実験結果 実線：水ラマン 点線：窒素ラマン	.....	3-18
図 3.1-25	ライダーによる定量評価 加湿器による実験結果 水の噴出量と ライダーカウント数の関係	.....	3-19
図 3.1-26	ライダーによる定量評価 実験結果 距離 10 m での漏洩窒素発生時 の窒素ラマン	.....	3-20
図 3.1-27	ライダーによる定量評価 実験結果 距離 10 m での漏洩窒素発生時 の窒素ラマン 拡大図	.....	3-21
図 3.1-28	ライダーによる定量評価 実験結果 窒素ラマン 漏洩窒素有無で差分	.....	3-21
図 3.1-29	ライダーによる定量評価 実験結果 距離 10 m での漏洩窒素発生時 のミー散乱	.....	3-22
図 3.1-30	ライダーによる定量評価 実験結果 ミー散乱 漏洩窒素有無で差分	.....	3-22

図 3.1-31	ライダーによる定量評価 実験結果 距離 10 m での漏洩窒素発生時の水ラマン	.....	3-23
図 3.1-32	ライダーによる定量評価 実験結果 水ラマン 漏洩窒素有無で差分	.....	3-23
図 3.1-33	ライダーによる定量評価 実験結果 距離 7.5 m の漏洩窒素発生時の窒素ラマン 窒素あり (10 NL/min) と窒素なしの差分	.....	3-24
図 3.1-34	ライダーによる定量評価 実験結果 距離 7.5 m での漏洩窒素発生時の窒素ラマン	.....	3-25
図 3.1-35	ライダーによる定量評価 実験結果 距離 7.5 m での漏洩窒素発生時の窒素ラマン 流量 5 NL、10 NL の差分	.....	3-25
図 3.1-36	パルス幅範囲に存在する窒素の模式図	.....	3-26
図 3.2-1	構築したチューナブルバンドパスフィルター方式のハイパー スペクトル型フラッシュライダーの光学配置	.....	3-29
図 3.2-2	構築したフラッシュライダー装置の外観	.....	3-30
図 3.2-3	アッテネータによるレーザー出力の制御	.....	3-31
図 3.2-4	凹レンズの焦点距離と 2 m 位置でのビーム直径 (左) 及びビーム 断面積 (右)	.....	3-32
図 3.2-5	emICCD カメラの積算とゲインの寄与	.....	3-32
図 3.2-6	水の測定結果	.....	3-33
図 3.2-7	窒素と酸素の測定結果	.....	3-33
図 3.2-8	加湿器による水蒸気の噴霧	.....	3-34
図 3.2-9	水蒸気の測定結果	.....	3-34
図 3.2-10	標準窒素試料の調整	.....	3-35
図 3.2-11	窒素濃度の定量性の検討のための試料配置	.....	3-36
図 3.2-12	各窒素圧力に対して取得したラマンライダー画像と信号強度	.....	3-37
図 3.2-13	窒素圧力とラマン信号強度の検量線	.....	3-38
図 3.2-14	構築した計測装置	.....	3-39
図 3.2-15	検査面に投影された影絵	.....	3-40
図 3.2-16	シアリング干渉計を用いた影絵取得のための試験配置	.....	3-41
図 3.2-17	エアダスター配置前の CMOS カメラで撮影された画像	.....	3-41
図 3.2-18	エアダスターからガスを噴射したときの画像	.....	3-42
図 3.2-19	エアダスターから噴出するガスのシャドウグラフ (検査面から 20 cm)	.....	3-43
図 3.2-20	エアダスターから噴出するガスのシャドウグラフ (検査面から 200 cm)	.....	3-43
図 3.2-21	エアダスターから噴出するガスのシャドウグラフ (露光時間 5 ミリ秒)	.....	3-44
図 3.2-22	エアダスターから噴出するガスのシャドウグラフ (露光時間 20 ミリ秒)	.....	3-45

略語一覧

CLADS	:	Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science	(廃炉環境国際共同研究センター)
JAEA	:	Japan Atomic Energy Agency	(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構)
東電	:	東京電力ホールディングス株式会社	
1F	:	東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所	
千葉大学	:	国立大学法人千葉大学	
ILT	:	Institute of Laser Technology	(公益財団法人レーザー技術総合研究所)
PMT	:	Photomultiplier Tube	(光電子増倍管)
SN	:	Signal Noise	(信号-雑音)

## 概略

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、「1F」と略す。）では、窒素封入により原子炉格納容器（PCV）は微正圧に保たれているが、上部の気相部では建屋内への気体の漏洩が想定されている。漏洩箇所、漏洩量をオンラインで検知・測定するために、光センシングによる計測は指向性や空間分解能の点で大きな利点がある。本研究は、ライダーをはじめとする遠隔光計測システムにより漏洩箇所の位置を特定するとともに、その位置における漏洩の可視化手法を開発することを目的としている。ライダーは視線方向に距離分解することができ、建屋内での壁面・配管とその周囲の気相分子（窒素  $N_2$ 、水蒸気  $H_2O$  など）及び浮遊粒子（エアロゾル）からの信号を分離して観測することができる。また、レーザー光と高感度画像センサーを組み合わせたフラッシュライダーと光波の干渉を利用した高感度のシアログラフィーによって漏洩箇所の画像化・可視化を図り、漏洩量の推定を目指す。これら複数の手法の比較をつうじて、漏洩箇所を特定する際の位置分解能と可視化可能な漏洩量の検出下限を明らかにする。

## 1. はじめに

1F では、東日本大震災の事後処理を行っており、窒素封入により PCV は微正圧に保たれている。しかし、上部の気相部では建屋内への気体の漏洩が想定されている。

光センシングによる遠隔計測は、PCV 気相部からの気体漏洩検知において、高い指向性や時間・空間分解能を提供できる。浮遊微小粒子であるエアロゾルや  $N_2$ 、 $H_2O$  など大気を構成する気体種の濃度変動を可視化させるライダー技術は、野外では大気観測に広く活用されており、屋内でも適用可能になりつつある。原子炉建屋内での観測では、複雑な形状の PCV 壁面や配管類が問題となるが、ライダーでは背景となる表面（ハードターゲット）や表面付近の大気（ソフトターゲット）からの信号を高速時間ゲートにより、区別してモニタリングできる。複数の波長で後方散乱光を受光すれば、送信光と同一波長でエアロゾルを、そして、分子種に応じた特定のラマン散乱波長で大気中の  $N_2$ 、 $H_2O$ 、 $H_2$  など気体の空間分布を計測することができる。

本研究は、ライダーをはじめとする遠隔光計測システムにより漏洩箇所の位置を特定するとともに、その位置における漏洩の可視化手法を開発する。テーマ 1 は、ライダーの視線方向に距離分解し、建屋内での壁面・配管とその周囲の気相分子（窒素  $N_2$ 、水蒸気  $H_2O$  など）及び浮遊粒子（エアロゾル）からの信号を分離して観測することを実証するものである。また、テーマ 2 は、レーザー光と高感度画像センサーを組み合わせたフラッシュライダーと光波の干渉を利用した高感度のシアログラフィーによって漏洩箇所の画像化・可視化を図り、漏洩量の推定を目指すものである。

テーマ 1 は、コンパクトな送受光一体（モノスタティック）のライダー観測を行うもので、取得できる情報は、受光望遠鏡の視野角内での奥行方向の情報と観測方向を走査して取得する 3 次元（3D）情報になる。テーマ 2 は、ゲート付き電子増倍画像センサー（ICCD）の観測視野にパルスレーザー光を拡散照射するフラッシュライダー方式によるものであり、 $N_2$ 、 $H_2O$  からのラマン信号を観測するが、時間的な掃引を行うことで 3D 情報が取得できる。さらに、高感度で大気屈折率の時空間変動が検出可能な干渉計測法であるシアログラフィーを適用し、漏洩を直接可視化させる技術の研究を進め、漏洩状況の把握と漏洩量の推定を試みる。これら複数の手法の比較をつうじて、漏洩箇所を特定する際の位置分解能と可視化可能な漏洩量の検出下限を明らかにする。

## 2. 業務計画

### 2.1 全体計画

#### 2.1.1 研究目標の妥当性

光センシングによる遠隔計測は、PCV気相部からの気体漏洩検知において、高い指向性や時間・空間分解能を提供できる。浮遊微小粒子であるエアロゾルやN<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oなど大気を構成する気体種の濃度変動を可視化させるライダー技術は、野外では大気観測に広く活用されており、屋内でも適用可能になりつつある。原子炉建屋内での観測では、複雑な形状のPCV壁面や配管類が問題となるが、ライダーでは背景となる表面（ハードターゲット）と表面付近の大気（ソフトターゲット）からの信号を高速時間ゲートにより区別してモニターできる。複数の波長で後方散乱光を受光すれば、送信光と同一波長でエアロゾルを分子種に応じた特定のラマン散乱波長で大気中のN<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>など気体の空間分布を計測可能である。テーマ1では、こうしたコンパクトな送受光一体（モノスタティック）でのライダー観測を行う。基本的に取得できる情報は、受光望遠鏡の視野角内での奥行方向の情報であり、観測方向を走査して3次元（3D）情報を取得できる。テーマ2においては、ゲート付き電子増倍画像センサー（ICCD）の観測視野にパルスレーザー光を拡散照射するフラッシュライダー方式により、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oからのラマン信号を観測する。この場合、時間的な掃引を行うことで3D情報が取得できる。さらに、高感度で大気屈折率の時空間変動が検出可能な干渉計測法であるシアログラフィーを適用し、漏洩を直接可視化させる技術の研究を進め、漏洩状況の把握と漏洩量の推定を試みる。

#### 2.1.2 研究内容の革新性、独創性、新規性

測距を主目的とするハードターゲットライダー、大気成分を計測対象とするソフトターゲットライダーは、ともに研究の積み重ねがあり、確立された技術である。一方、今回の場合のように屋内の比較的近距離で壁や配管など複雑なハードターゲットからの信号上に、その近傍の大気成分からの信号が重畳する状況下でライダー信号から気体の漏洩箇所を検知することは前例がなく、また、難度が高いことが予想される。ライダー計測は、Time of Flight (ToF) 計測であり、気相の計測では距離分解能と計測感度がトレードオフの関係となる。この両者のバランスを取りながら、建屋内でのエアロゾルやN<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O気体の分布・流れをモニターして漏洩箇所検知に結び付ける技術開発には、革新性と独創性を要する。本研究では、ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる漏洩箇所の推定、漏洩成分の推定を行ったうえで、フラッシュライダーとシアログラフィーの方式による漏洩の可視化を行い、漏洩状況の直接的把握と漏洩量の推定を試みる。これら異なる手法はそれぞれ適用しやすい条件があると考えられ、漏洩の形態や時空間変動との関係性を明らかにすることは新規性が高い。さらに、計測システムの設置場所や運用にかかる制限など諸条件を考慮しながら目的の達成につなげていく。

#### 2.1.3 研究効果、有効性、発展性、相乗効果

##### ・実用化に向けた発展性

本研究は、近い将来1Fの廃炉作業に実用可能な高い技術としてのポテンシャルをもっている。光センシング機器では送受光の装置を一箇所または近接して配置可能であり、かつ機器は比較的コンパクトであるため、線量管理が必要な場所でも短時間での設置が可能である。さらに、ライダー装置の送受光に光ファイバーを導入すればヘッド部分の小型・軽量化が見込め、建屋内には光学系のみを配置させればよく、電源部・レーザー発振器・解析装置はより安全性の高い場所に設置して運用することが可能になる。

- ・他の技術分野への波及効果

ライダーによる空間内の計測対象位置特定の技術は、ガンマカメラ等の画像化技術と組み合わせにも親和性がよい。画像に位置情報を付するのみならず、漏洩箇所や特定気体種の分布状況等の3次元的な把握に有益である。ヘッド部に光学系のみを配置させる構成であれば、ロボット等への搭載も容易である。

- ・拠点形成を見据えた実施体制

拠点形成を見据えた実施体制として、これまで主として低層・表層大気のモニタリングを行ってきた研究者とガス計測・漏洩検知を行ってきた研究者でチームを組み、課題解決にあたる。建屋の閉空間内での計測、特に、内部が複雑で予測できない配管が存在するような空間内での漏洩箇所検知は、通常の大気環境下での障害物のないレーザー計測に比べてはるかに難度が高い。ライダー信号の時空間解析に基づく漏洩位置計測並びに漏洩状況可視化の技術とノウハウは、原子力発電所の廃炉処理のみならず、プラント設備やガス輸送タンカー内、さらには工場やビル、地下鉄等閉所内でのエアロゾルや特定気体種のモニタリング技術として、社会基盤のリスク管理のさまざまな場面への展開が期待できる。

- ・分野横断的な実施体制

国立大学法人千葉大学（以下、「千葉大学」と略す。）と公益財団法人レーザー技術総合研究所（以下、「ILT」と略す。）との実施体制は、テーマによる研究開発項目の区分けをともなう。一方、プロジェクトチームとしては理学的な観点で現象の理解、状況判断（久世、染川）を、また、工学的な観点で光計測システムの開発並びに計測値の定量化（椎名、松田）をそれぞれ担当する。いずれもこれまでの経験から低層・表層大気のモニタリング、気体計測・漏洩検知を専門に行ってきました研究者でチームを組み、課題解決にあたる。模擬漏洩試験は、両チームが連絡を密にして実施する。両チームはまた、放射性物質の光モニタリングに関しても知見を共有し、俯瞰的な観点ももちろん課題解決へ臨む。

#### 2.1.4 研究計画、研究遂行能力、研究体制の妥当性

本研究の計画では、1. ライダーによる漏洩箇所の位置特定、2. その位置における漏洩可視化の二つのテーマに分けて課題解決を試みる。この研究課題の遂行をつうじて、漏洩箇所の検出にあたっての位置分解能と可視化可能な漏洩量の下限を明確化することが本研究の課題となる。

- ・研究遂行能力、研究体制の妥当性

これまで低層・表層大気のモニタリング、H<sub>2</sub>やSO<sub>2</sub>を含む各種の気体計測・漏洩検知を専門に行ってきました研究者のチームにより研究体制を組んでいます。研究代表者は、日本原子力研究開発機構との共同研究を平成23年より継続的に実施しており、研究遂行にも実績をもつている。

- ・39歳以下の若手研究者を含めた体制

39歳以下の若手研究者（松田）がテーマ2の研究責任者を担うことによって、長期的に携わっていくことのできる、拠点形成を見据えた実施体制を取ることができる。

### 【テーマ1】ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる漏洩箇所検出（主担当：千葉大学）

視線方向に距離分解できるライダー技術は、建屋内の壁・配管位置の把握とともに、気相成分（エアロゾルと特定の気体種）の濃度分布測定が可能である。ミー散乱ライダーによってエアロゾルの拡散・移流状況を、また、ラマン散乱ライダーによって特定気体種の挙動をモニターし、その時空間データから漏洩箇所の位置特定を試みる。

ライダーは、図2.1-1のように1台のレーザー及び送受信光学系で構築し、複数の受光器にエアロゾル用並びに各種気体（主にN<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O及び必要に応じてH<sub>2</sub>）用の光学干渉フィルターを装着して計測する。この方式により、時間的に同期する形で各計測対象の挙動をモニターできる。空間内をラスター走査し、複雑な建屋内壁面の形状や配管の空間位置を把握し、同時に各種計測対象の3D分布を調べる。距離分解能を30 cm程度まで向上させるため、1 nsオーダーの短いパルスを生成するレーザー装置及び対応する高速ゲート装置によるパルス遅延制御を利用し、時系列上での挙動を把握して漏洩箇所検知を試みる。

出射レーザー光と同一波長で観測するチャンネル（ミー散乱ライダー）では、大気からの後方散乱光と構造物表面からの後方散乱光を時間分解により区別できる（左成ら、レーザセンシング学会誌、令和4年）。PCVからの気体の漏洩にともなう気流により建屋内でのエアロゾルの動き・濃度変化があれば、信号強度の時空間変動として検出される。PCVからの気体の漏洩にともなう気流により建屋内での空気密度や水蒸気量の変化があれば、ラマン信号強度の時空間変動として検出される[1]。ミー散乱、ラマン散乱のいずれも実験室における模擬的なテストをつうじて、気体の漏れ方や流量とライダーによる検出感度の関係を実験的に調べる。

テーマ1の研究課題の一つとして、レーザー装置及び検出システムは建屋外の安全な場所に設置し、光ファイバーを利用して送光・受光を行う方式を検討する。建屋内には光学系のみを設置すればよく、将来的な現場への導入が簡便化できる。その際に必要となる機材の仕様を理論解析による漏洩ガス濃度検知をもとに設計し、かつ送受信効率等実際の使用デバイスに則した実開発との比較を検討する（図2.1-1）。

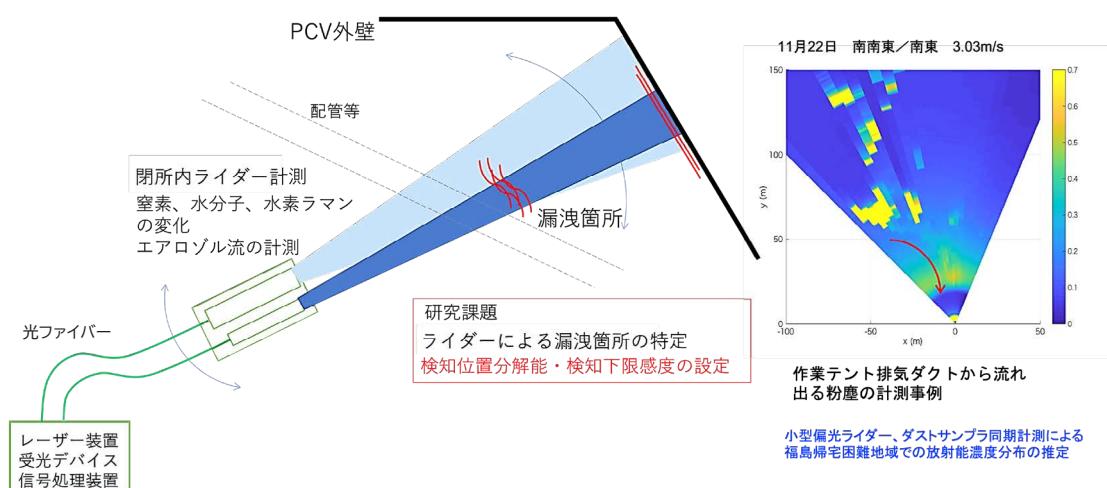


図2.1-1 ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる漏洩検知の概念図

## 【テーマ2】フラッシュライダーとシアログラフィーによる漏洩箇所の可視化（主担当：ILT）

### ●フラッシュライダーによる気相漏洩可視化技術の開発

ライダーで漏洩箇所を可視化する方式には、テーマ1で開発するラスター走査方式に加えてフラッシュ方式がある。この方式では、高感度画像センサーの視野内にレーザー光を拡散照射することによって2D画像を取得し、その取得時間を時間的に掃引することで3D画像を撮像する。テーマ2では、図2.1-2に示すように、3 nsのゲート付き電子増倍画像センサー（ICCD）の観測視野にパルスレーザーを照射して窒素N<sub>2</sub>、酸素O<sub>2</sub>、水蒸気H<sub>2</sub>Oなど気体の2D像を取得し、その測定タイミングを掃引することで対象物質の3Dマッピングによって気体漏洩箇所を可視化する。

フラッシュ方式は、撮像画面内の時刻ずれのない画像が広い視野範囲内で得られるため、ライダーによる気体漏洩箇所の可視化に有効である[2]。一方、一度に広範囲な可視化を実施するためには、レーザーの広範囲な拡散照射が必要となり、単位面積当たり得られるライダー信号強度は弱くなる欠点がある。これに対処するため、PCV周りの建屋空間の現実的なスケールを想定し、送信光量と視野角の設計を最適化する（図2.1-2）。

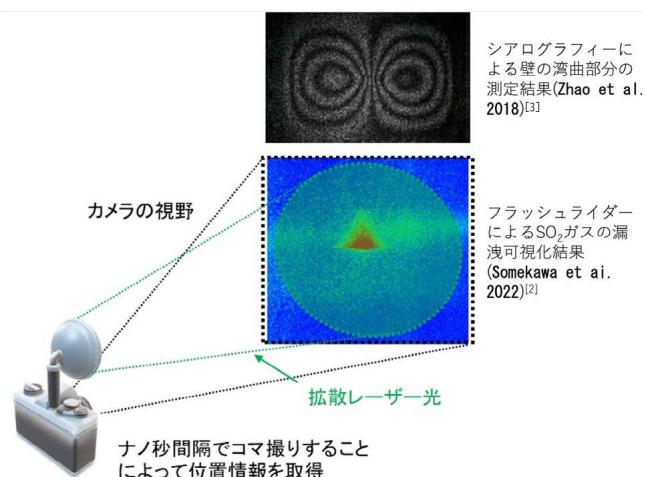


図2.1-2 フラッシュライダー・シアログラフィーによる漏洩箇所の可視化イメージ

### ●シアログラフィーによる気相漏洩可視化技術の開発

シアログラフィーは、構造物や大型製品の欠陥を非破壊で診断する技術として使われている。シアログラフィーでは2枚の画像を撮像し、その「ずれ（シア）」による干渉変化を計測するため、壁面を構成する材料の欠陥のような不均一な勾配が抽出できる。また、干渉像には周辺大気の屈折率変化の影響が含まれるため、画像から漏洩気体を可視化することも試みられている[4]。そこで本研究では、配管など複雑な構造物が存在する原子力発電所の建屋内での気相漏洩観測にシアログラフィーが適用可能かどうかを実験に基づき検討する。

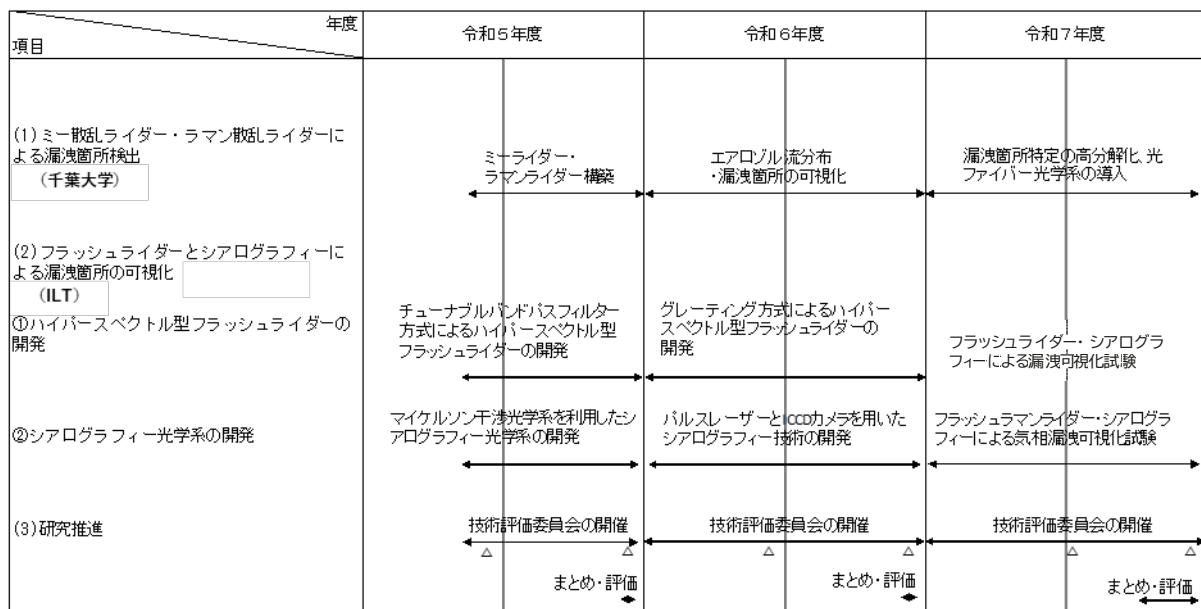
図2.1-2に示したカメラ部分の受光光学系部分をマイケルソン干渉計型のシアログラフィー光学系に置き換えることで干渉画像を得るシステムを構築し、窒素ガスボンベからのガスの噴出やスチーム式加湿器などで発生させた水蒸気を可視化することで、ガス漏洩への本手法の適用可能性を検討する。

本研究計画の年度展開を表 2.1-1 にまとめる。

- (1) ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる漏洩箇所検出では、令和 5 年度にライダーの構築を行い、令和 6 年度にミー散乱ライダーによるエアロゾル流分布並びにラマン散乱ライダーにて窒素の漏洩箇所の可視化をモデル実験にて遂行する。令和 7 年度には、漏洩箇所特定の高分解化を図り、実装に向けたファイバー光学系の導入を検討する予定である。
- (2) フラッシュライダーとシアログラフィーによる漏洩箇所の可視化においては、①ハイパースペクトル型フラッシュライダーの開発を、令和 5 年度にチューナブルバンドバスフィルター方式によって、また、令和 6 年度にグレーティング方式を検討する。また、②シアログラフィー光学系の開発においては、令和 5 年度にマイケルソン干渉光学系を、令和 6 年度にパルスレーザーと CCD カメラを用いたシアログラフィー技術の開発を試みる。①、②いずれも令和 7 年度には、フラッシュライダー・シアログラフィーによる気相漏洩可視化試験を予定している。

令和 7 年度に本研究のフィージビリティ研究を終え、その成果をもとに PCV 気相漏洩の現場への実装へと研究を進める予定である。

表 2.1-1 「PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発」年度別全体計画



## 2.2 実施体制

実施体制を図 2.2-1 に示す。

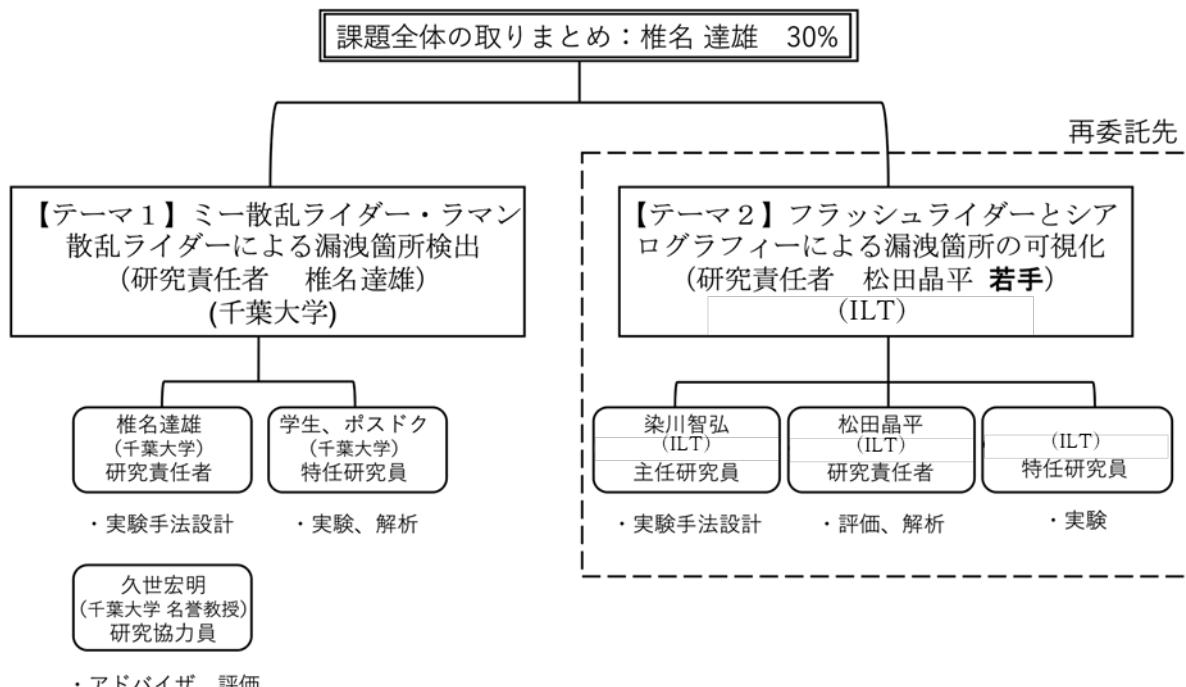


図 2.2-1 プロジェクト実施体制

## 2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法

### 2.3.1 ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる漏洩箇所検出（千葉大学）

各計測対象の挙動を同期してモニターするため、エアロゾルと対象気体（N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 及び必要に応じて H<sub>2</sub>）の光学干渉フィルターを装着した複数の受光器を有するライダー装置を構築した。建屋内空間を模擬し、気体漏洩箇所付近をラスター走査し、壁面や配管の空間位置を把握しつつエアロゾルと気体の空間分布を計測することにより、漏洩位置の推定及び漏洩濃度の算出のためのモデル実験を行った。

### 2.3.2 フラッシュライダーとシアログラフィーによる漏洩箇所の可視化（再委託先：ILT）

#### (1) ハイペースペクトル型フラッシュライダーの開発

ナノ秒パルスレーザーで凹レンズを利用して拡散照射し、波長 532 nm のレーザーで励起した場合の酸素、窒素、水蒸気のラマン波長に相当する干渉フィルターで観測することにより、それぞれのガスの広域画像を取得した。水蒸気を含んだ窒素ガスや水蒸気で、建屋からの漏洩を模擬して装置の性能を評価することで凹レンズ等の仕様を決定した。

#### (2) マイケルソン干渉光学系を利用したシアログラフィー光学系の開発

波長 532 nm の連続発振のレーザーと CMOS カメラを用いて、シアログラフィーの基礎検討を開始した。高さ勾配がある壁面の画像を取得することで、シアログラフィーの性能を評価した。

### 3. 実施内容及び成果

#### 3.1 ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる漏洩箇所検出（千葉大学）【令和5年度】

##### 3.1.1 ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーの構築とガス計測

###### (1) ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーの測定原理

本研究では、30 m 以内の屋内運用を想定し、漏洩をリアルタイムで捉えるために短時間で測定を可能にする繰り返し周波数 50 kHz の高出力 DPSS レーザーを用いてミー散乱、窒素、水ラマン散乱の 3 チャンネルの小型可動式のライダーシステムを開発した。

光が物質に入射した際、吸収と散乱が起こる。どのような散乱が起こるかは入射する光の波長と散乱体の粒子半径によって異なり、主にミー散乱、レイリー散乱、ラマン散乱の 3 種類に分類される。ミー散乱、レイリー散乱は散乱前後で光の波長が変化しない弹性散乱であり、ラマン散乱は変化する非弹性散乱である。以下に、本研究で使用するミー散乱とラマン散乱について説明する。

###### ミー散乱 (Mie scattering)

入射する光の波長と散乱体の粒子半径が同程度の大きさである場合、ミー散乱が起こる。雲粒子や粉塵などの大気中のエアロゾルがこの散乱に関係する。ミー散乱による散乱光の強度は (3.1-1) 式で与えられ、図 3.1-1 のように前方散乱が強くなる異方散乱であり、散乱光強度は波長の二乗に反比例する。晴れた日に空に浮かぶ雲が白くみえる現象は、ミー散乱によって説明できる。雲に含まれる水滴や氷の粒形は 10  $\mu\text{m}$  程度であり、可視光線が入射するとミー散乱が生じる。太陽光には可視光線の全ての成分が含まれているため、入射した可視光線はどの色も同じように散乱する。そのため、雲が発する散乱光には可視光線の全ての色が含まれており、雲は白色にみえる。

$$I(\theta) = \frac{I_0 \lambda^2 (i_1 + i_2)}{8\pi^2 R^2} \quad (3.1-1)$$

$\theta$ :励起光と散乱光の角度  $\lambda$ :波長  $R$ :散乱点からの距離

$i_1$ :垂直方向のミー散乱パラメータ  $i_2$ :水平方向のミー散乱パラメータ

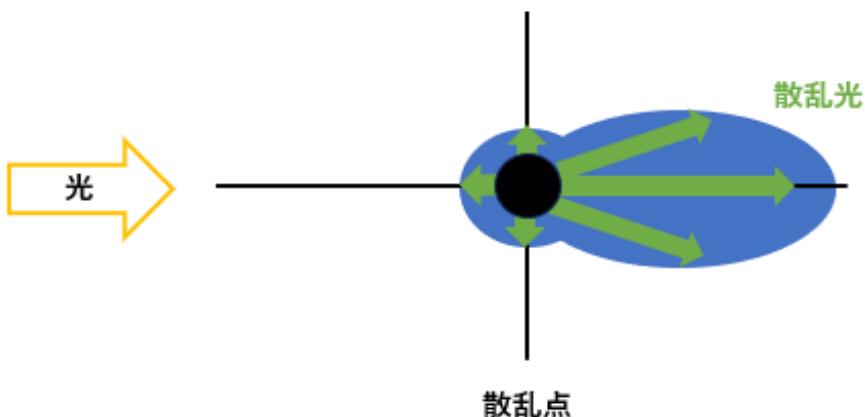


図 3.1-1 ミー散乱

## ラマン散乱 (Raman scattering)

単一の振動数  $\nu$  をもつ光を入射した際に、その一部が振動数の変化した  $\nu \pm \nu_R$  の光に変化して散乱される現象をラマン散乱という。これは光エネルギーの一部が散乱体分子の振動エネルギーに奪われ、加算するために起こる。図 3.1-2 に光源と弾性散乱及びラマン散乱の波長変化の模式図を示す。ラマン散乱光のうち  $\nu - \nu_R$  の光をストークス散乱、 $\nu + \nu_R$  の光をアンチストークス散乱といい、振動数変化  $\nu_R$  をラマンシフトという。ラマンシフトは分子構造に由来しているので物質固有である。光源波長  $\lambda_1$  に対するラマン散乱光波長  $\lambda_2$  は (3.1-2) 式で与えられる。ラマン散乱はレイリー散乱の 1,000 分の 1 程度の弱い信号である。

$$\text{ラマンシフト} (\text{cm}^{-1}) = \frac{1}{\lambda_1 (\text{nm}) \frac{1}{10^7 (\text{nm})}} - \frac{1}{\lambda_2 (\text{nm}) \frac{1}{10^7 (\text{nm})}} \quad (3.1-2)$$

本研究では、窒素と水のラマン散乱光を計測対象としている。355 nm の光源波長に対応するラマンスペクトルを図 3.1-3 に示す[5]。これより水は液体、気体、固体でラマンスペクトルは重なりあっており、スペクトルによって強度差はあるものの完全に分離することはできない。液体状態のラマン散乱光強度が大きい  $3,300 \text{ cm}^{-1}$  を水のラマンシフト、気体状態の強度が大きい  $3,652 \text{ cm}^{-1}$  を水蒸気のラマンシフトに設定した。本研究で測定対象とする気体のラマンシフト及びラマン散乱波長を表 3.1-1 に示す。

ここでは、水分子の液体状態を「水」、気体状態を「水蒸気」として取り扱う。

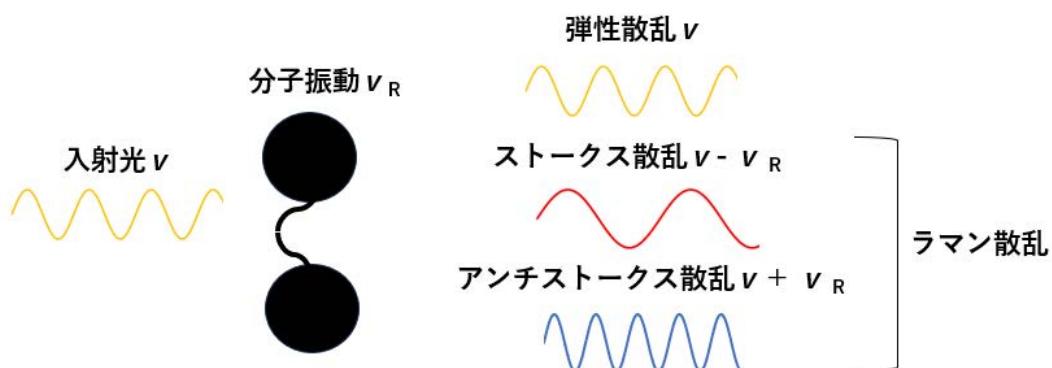


図 3.1-2 ラマン散乱

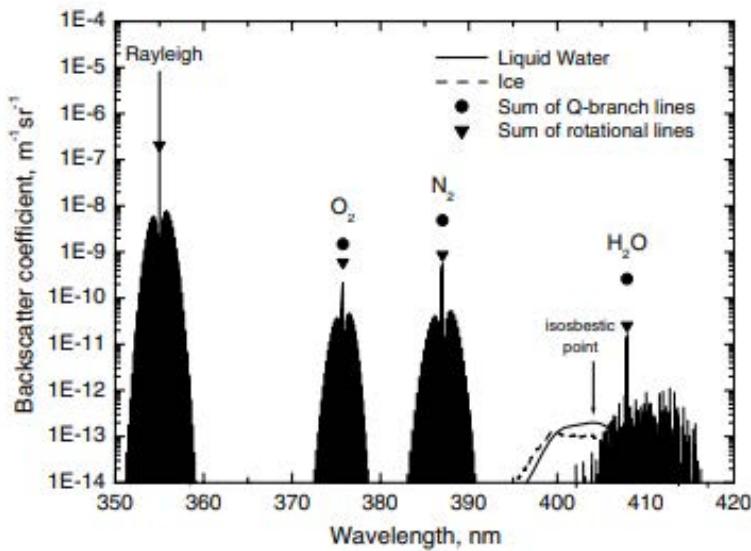


図 3.1-3 355 nm の光に対するラマンスペクトル ([5]より引用)

表 3.1-1 気体種によるラマンシフト及び光源波長 355 nm に対するラマン散乱光波長

	ラマンシフト ( $\text{cm}^{-1}$ )	ラマン波長 $\lambda_2$ [nm]
酸素	1,556	375
窒素	2,331	386
水	3,300	403
水蒸気	3,652	407
水素	4,160	416

## (2) ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーの構築

## ライダー送信系

ライダーの送信光にはDPSS レーザー励起による Nd : YAG レーザーを使用した。表 3.1-2 にレーザーの仕様を示す。このレーザーは電流と二つの周波数 (QSW、EPULSE) を変えることができ、それによって特性が変化する。二つの周波数は以下の意味をもつ。なお、 $EPULSE \geq QSW$  である。

QSW ; レーザーのパルス周波数を定める

EPULSE ; レーザーパルスのパルス幅、1パルス当たりのパワーを定める

図 3.1-4 に繰り返し周波数を変化させた際のレーザーパルス光出力、パルス幅、出力の安定性の関係を示す[6]。実際にレーザーから出力された光の出力、繰り返し周波数、パルス幅をオシロスコープとパワーメーターを用いて計測した。この測定の際は QSW 及び EPULSE を等しくして計測した。本研究での計測結果を図 3.1-5 及び図 3.1-6 に示す。

表 3.1-2 ライダー送信レーザー光源 仕様

メーカー	Spectra Physics
型番	Talon-355-12
波長[nm]	355
出力[W]	15@50kHz
	10@100kHz
	3@300kHz
繰り返し周波数	0~500kHz
ビーム径[mm]	1

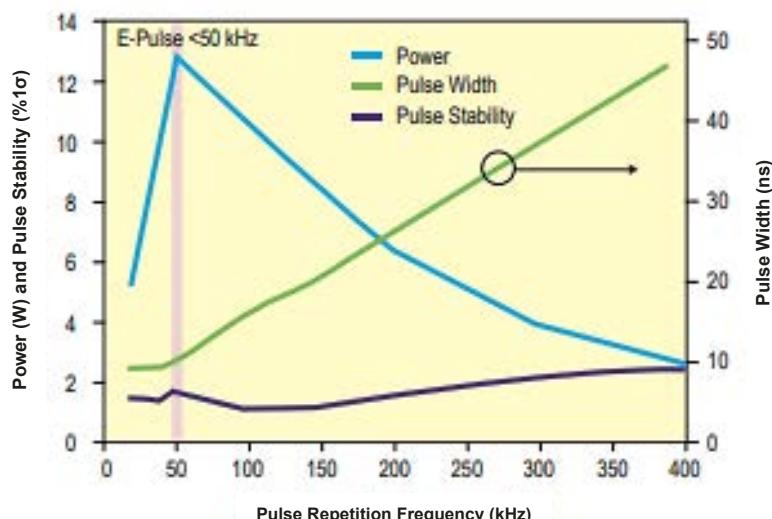
Typical Power and Pulse Stability – Talon 355-12<sup>1</sup>

図 3.1-4 繰り返し周波数による出力、パルス幅、安定性 ([6]より引用)

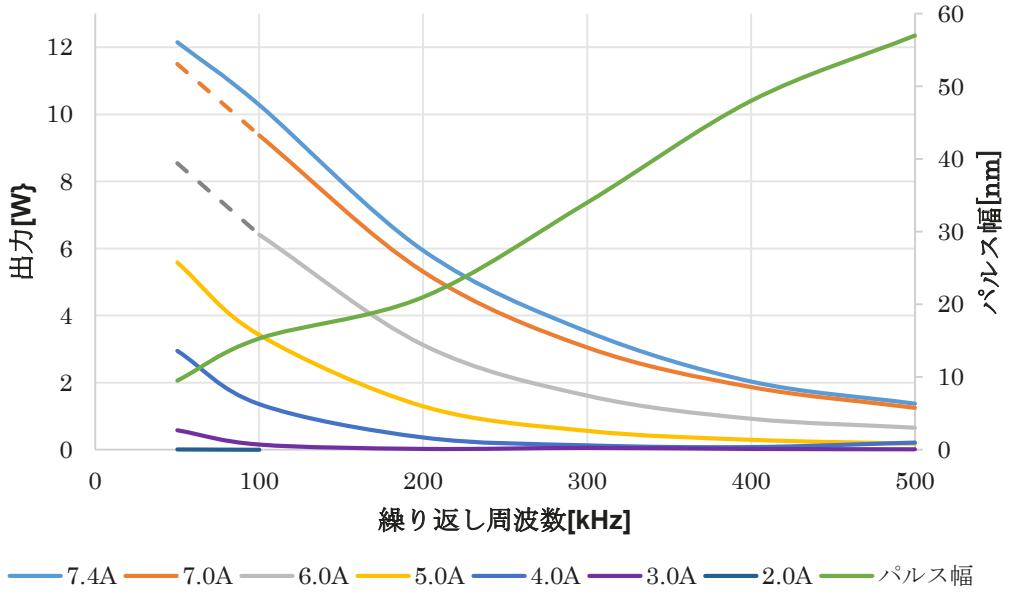


図 3.1-5 レーザー光源 繰り返し周波数による出力、パルス幅

実際に計測するときは、パルス幅を固定するため EPLUSE を固定して測定する。ライダーの分解能はパルス幅が狭いほど向上するため、EPULSE=50 kHz を選択した。このときパルス幅は 9.5 ns のため、分解能は 1.42 m である。EPULSE を 50 kHz に固定し、QSW を変化させた際の出力の測定結果が図 3.1-6 である。用いたパワーメーターの損傷閾値は 1 J/cm<sup>2</sup> である。エネルギー密度の関係式は次のように表される。

$$\text{Energy density} \left( \frac{J}{cm^2} \right) = \frac{\text{Average power}(W)}{\text{Repetition rate}(Hz) \times \text{Beam area}(cm^2)} \quad (3.1-3)$$

ビーム断面積は、定数のため繰り返し周波数でパワーメーターにかけられる平均出力の最大値が決まる。図 3.1-5 よりレーザーにかける電流値を大きくすると装置の損傷閾値に達するため、低い電流値の傾向から直線近似した。

図 3.1-6 によって EPULSE が一定のとき、QSW を上げるほど 1 秒当たりのエネルギーが上がるため、出力が線形的に増加することを確認した。ラマン散乱光強度を上げるためにレーザーの出力は強いほうがよいが、出力が大きすぎると施設内の壁を損傷するおそれがある。今回は照射した際、スライドガラスが割れてしまう出力を閾値として 5.5 W 以下の出力でレーザーを扱うようにした。このレーザー光をビームエキスパンダ (THORLABS BE02-355) (透過率 > 97% @355 nm) でビーム径を 2 倍に拡大した後、2 枚のミラー (反射率 > 97% @ 355 nm) ではねて、受信系との距離が近くなるように光学系を組んだ。なお、レーザーから発生する第二高長波を遮断するためアルミ板を挟んだ。また、ライダー送信系の外観を図 3.1-7 に示す。

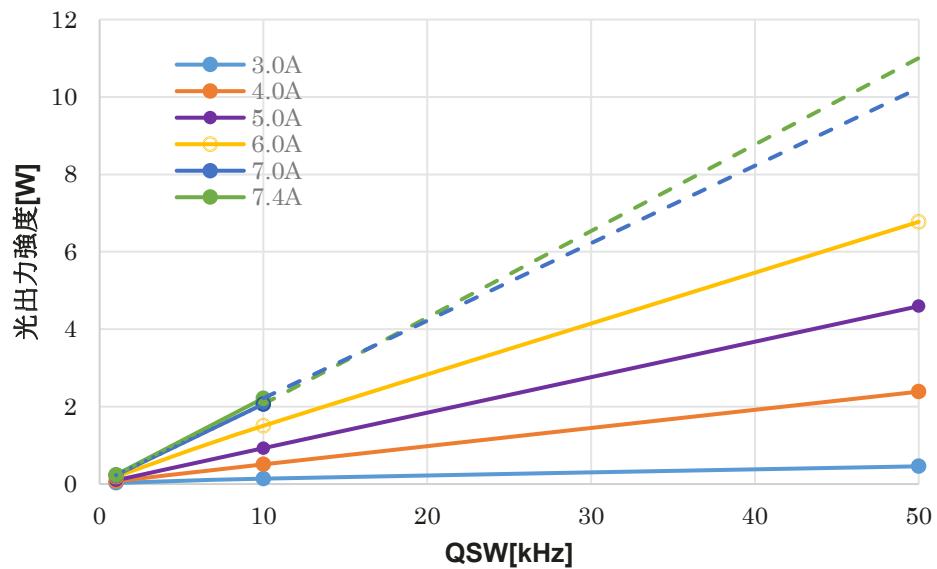


図 3.1-6 レーザー光源 QSW による光出力強度



図 3.1-7 ライダー送信系外観

### ライダー受信系

受光光学系としてケンコー社製望遠鏡 SE102 を導入した。開口径 102 mm、焦点距離 500 mm の屈折式望遠鏡である。この望遠鏡の焦点位置にピンホール径を 1.4~25.0 mm に変化できるアイリスを置き、30 mm 後ろに焦点距離 30 mm の平凸レンズを置くことでケプラー式望遠鏡と同じ構成を取る。受光した光は測定波長以外の光を除くために干渉フィルターを通し、ビームスプリッタで分けられる。その後、目的の気体種のラマン散乱光波長に対応する干渉フィルターを通り、光電子増倍管 (Photomultiplier Tube : PMT) で受光する。

ラマン散乱の複数の気体を一度に測定できるメリットを生かして、図 3.1-8 に示すような 5 種の気体とミー散乱を測定する 6 チャンネルの受信系を最終形として設計している。令和 5 年度は、光学特性を図る目的で窒素及び水とミー散乱の 3 チャンネルで測定を行った。受信系の構成図を図 3.1-9、フィルターによって透過する波長の模式図を図 3.1-10 に、外観図を図 3.1-11 に示す。また、用いるフィルターの特性を表 3.1-3 及び表 3.1-4 に、また、PMT の仕様を表 3.1-5 示す。

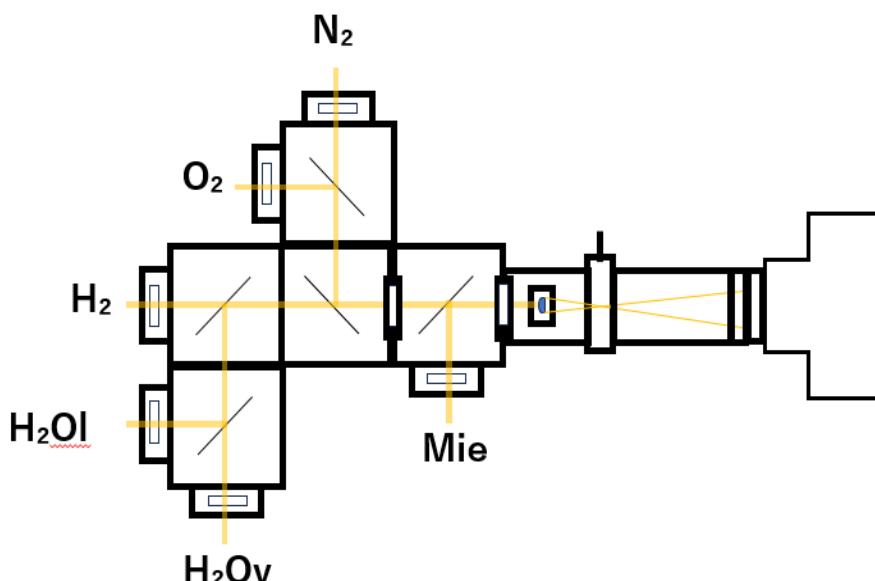


図 3.1-8 ライダー受信系の完成予定 構成図

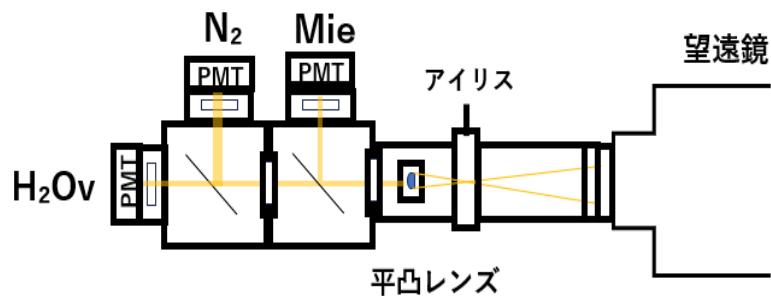


図 3.1-9 令和 5 年度のライダー受信系 構成図

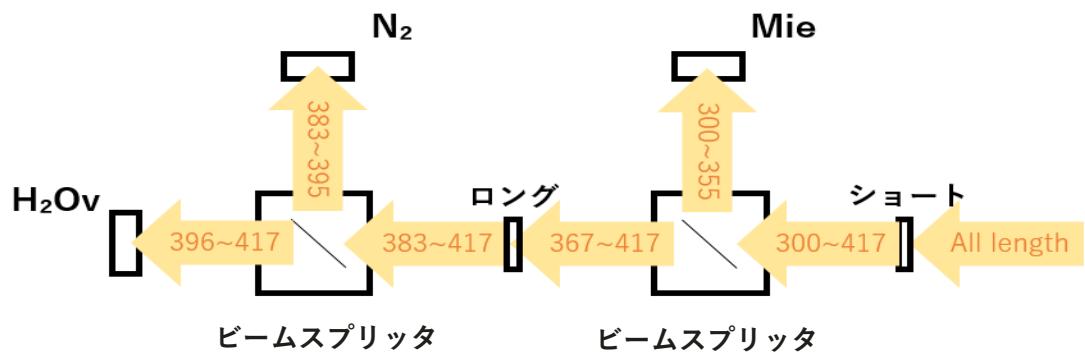


図 3.1-10 ライダー受信系 干渉フィルターによる透過波長

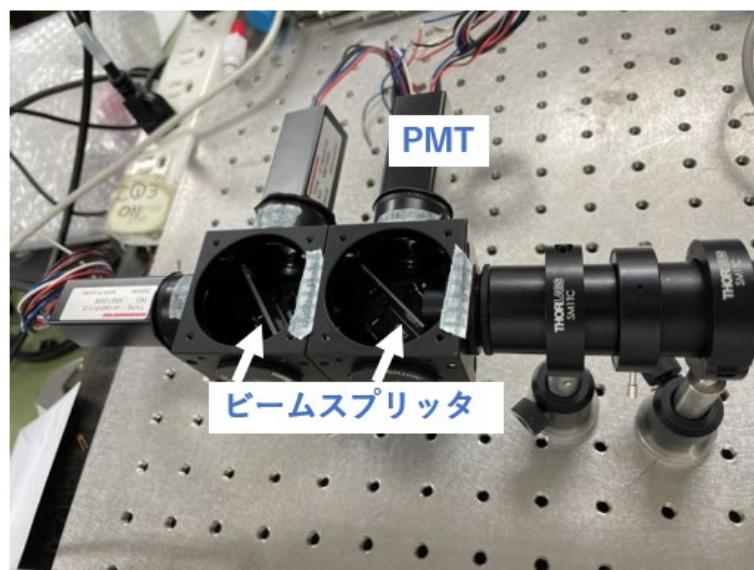


図 3.1-11 ライダー受信系 外観図

表 3.1-3 ライダー受信光学系 干渉フィルターの仕様

気体種	メーカー	型番	ラマン散乱光波長 [nm]	フィルタ中心波長 [nm]	バンド幅[nm]	OD
Mie	Edmund	#68-927	355	355	2.50	6
N <sub>2</sub>	Edmund	#18-368	386	387	15.00	6
H <sub>2</sub> O <sub>l</sub>	Edmund	#39-330	403	405	1.5	6
H <sub>2</sub> O <sub>v</sub>	Semrock	LL01-407-12.5	407	407	5.00	4

表 3.1-4 ライダー受信光学系 バンドパスフィルター及びビームスプリッタの仕様

	メーカー	型番	透過帯 (>90%)[nm]	反射帯 (>94%)[nm]	OD
ショートパスフィルタ	Edmund	#84-690	300-417	—	4
ロングパスフィルタ	Edmund	#34-301	383-1600	—	4
ビームスプリッタ①	Semrock	Di01-R355-25×36	367-1200	322-355	—
ビームスプリッタ②	Semrock	FF389-Di01-25x36x1.5	396-850	350-382	—

表 3.1-5 ライダー受信光学系 受光 PMT の仕様

メーカー	浜松ホトニクス
型番	H11901P-113
受光面サイズ	φ8 mm
感度波長 (Short,Long,Peak)	230,700,400 nm
入力電圧	+11.5～+15.5 V
最大コントロール電圧 (入力インピーダンス30 kΩ)	+1.1 V
【陽極特性】放射感度 Typ.	2.2 × 10 <sup>5</sup> A/W
【陽極特性】暗電流(30分後) (Typ., Max.)	1,10 nA
リップルノイズ (peak to peak) Max.	0.6 mV

### 信号処理

受光系で示したように、受光した光は PMT によってパルス電流に変換される。ミー散乱は、ラマン散乱に比べて小さいためミー散乱とラマン散乱で異なる信号処理を行った。

ミー散乱チャンネルは、オシロスコープで 16 回の平均を取って波形を観測した。

ラマンチャンネルは、フォトンカウンターを用いてフォトンカウンティング法（光子計測法）で処理を行った。フォトンカウンターの制御には、PT2Controller をソフトウェアに使用し、信号閾値、BIN 幅、BIN 長、積算回数などの計測条件を定めることができる。

使用したフォトンカウンターの外観を図 3.1-12 に仕様を表 3.1-6 に示す。

構築したミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダー装置の外観を図 3.1-13 に示す。ライダーの観測方向や高さを自在に変更できるように、装置は傾斜昇降台に設置している。また、レーザー電源ユニットとレーザーヘッドを水冷するためのチラーはラックマウントサイズのアルミフレームで一体化し、可動のためのキャスターをつけている。



図 3.1-12 フォトンカウンター外観

表 3.1-6 ライダー受信系 フォトンカウンター仕様

メーカー	トリマティス
型番	PB-190-001
入力数	2
最大入力レベル[V]	$\pm 5$
パルスペア分解能[ns]	1
BIN幅	1ns, 2ns, 4ns*2 <sup>N</sup> (N=0to19)
BIN長	8to32760, 8step(BIN幅1ns)
積算回数	1to2 <sup>18</sup>
最大カウント数(BIN毎)	2 <sup>18</sup>

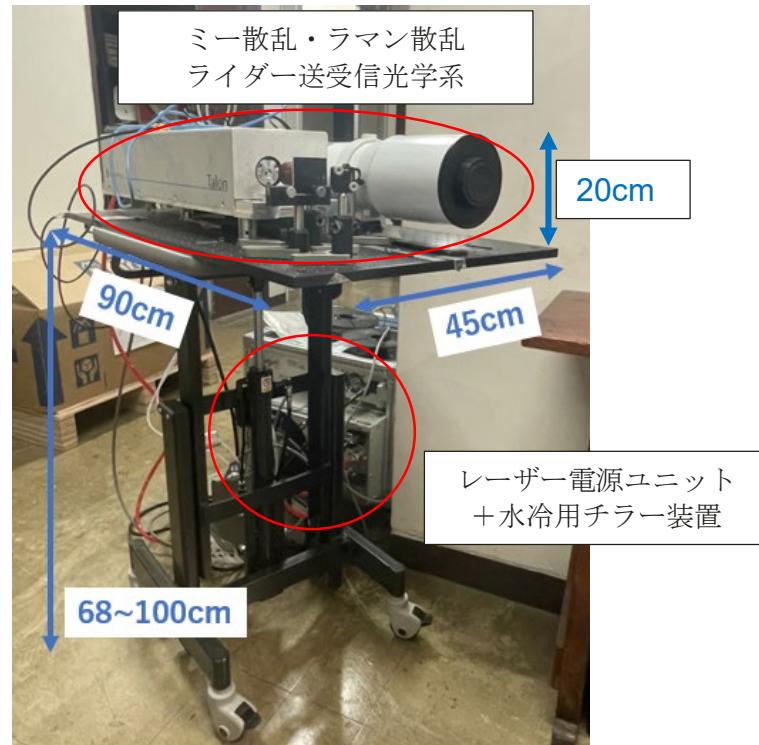


図 3.1-13 ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダー装置 外観

## (3) ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる大気計測

漏洩ガスを測定する前に、完成したラマンライダーで大気中のエアロゾル及び各大気ガス種が測定できるのかを確認した。

実験は千葉大学工学部総合研究棟 9 階にて、令和 6 年 1 月 19 日午後 7 時頃に行った。表 3.1-7 に測定条件を、図 3.1-14 に昼間撮影した実験地の様子を示す。樹木を避けるようにビームを飛ばした。実際の測定は夜に行っている。

大気計測は積算回数を変化させて行った。図 3.1-15 がフォトンカウンターで計測した窒素ラマンの測定結果、図 3.1-16 が水ラマンの結果である。各グラフの横軸の距離は、計測した時間に光速をかけて往復分の 2 で割ることで距離を算出している ( $Distance = \Delta t \times c / 2$ )。図 3.1-17 はシロスコープで計測したミー散乱の結果である。積算回数 1,000,000 回の結果に距離二乗補正と対数表示を行ったものが図 3.1-18 及び図 3.1-19 である。縦軸は距離補正のうえ、対数表示をしている。

表 3.1-7 ライダー大気計測の測定条件

電流値	4.0A
EPULSE	50kHz
QSW	50kHz
BIN幅	1ns
BIN長	256
ピンホール径	6mm
Triger Threshold	100mV
Ch1	窒素
Ch2	水
Ch1 Threshold	-15mV
Ch2 Threshold	-15mV
積算回数	10,000、1,000,000回
計測時間	0.2、20秒

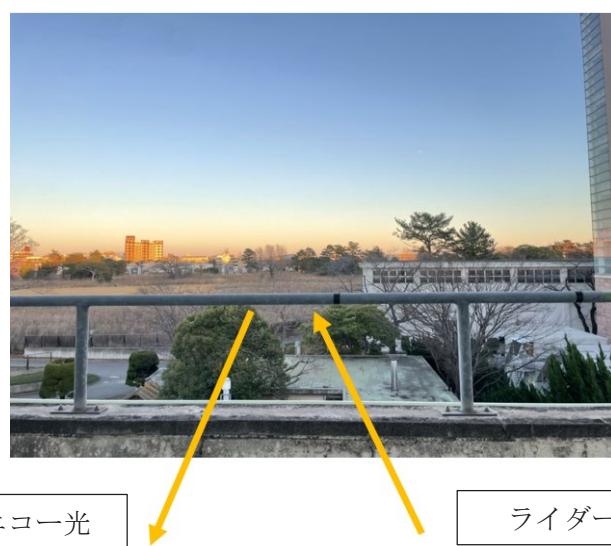


図 3.1-14 ライダーによる大気測定値の様子

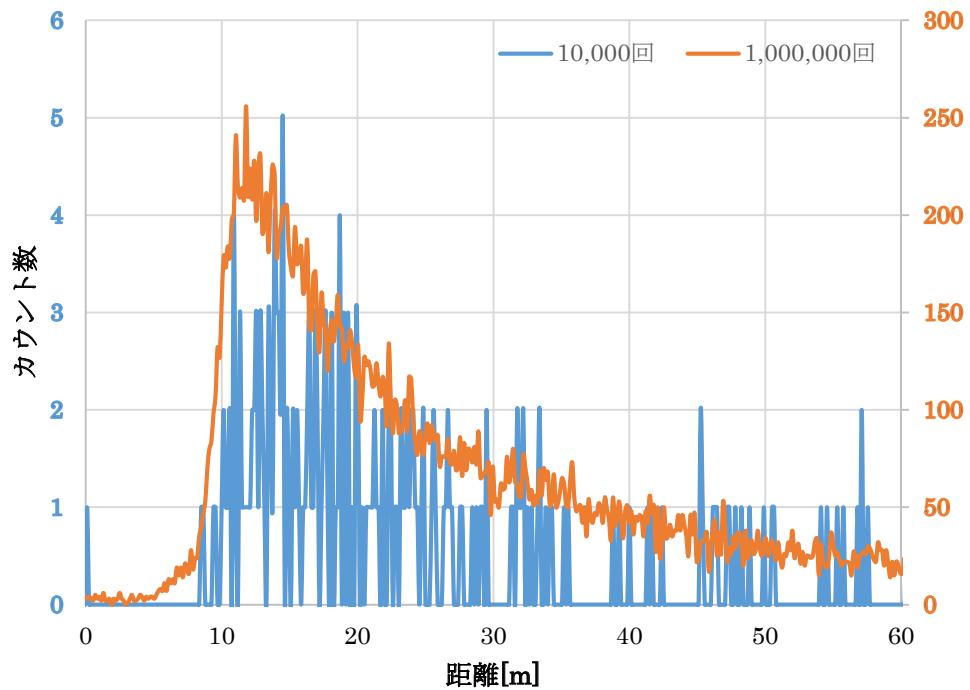


図 3.1-15 ライダー大気計測結果 窒素ラマンチャンネル

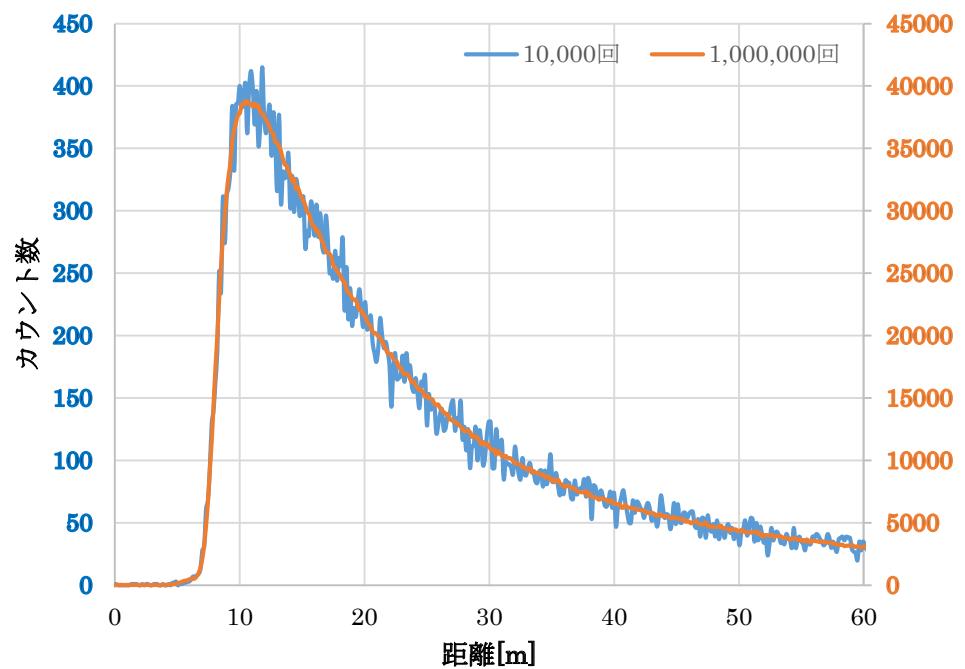


図 3.1-16 ライダー大気計測結果 水ラマンチャンネル

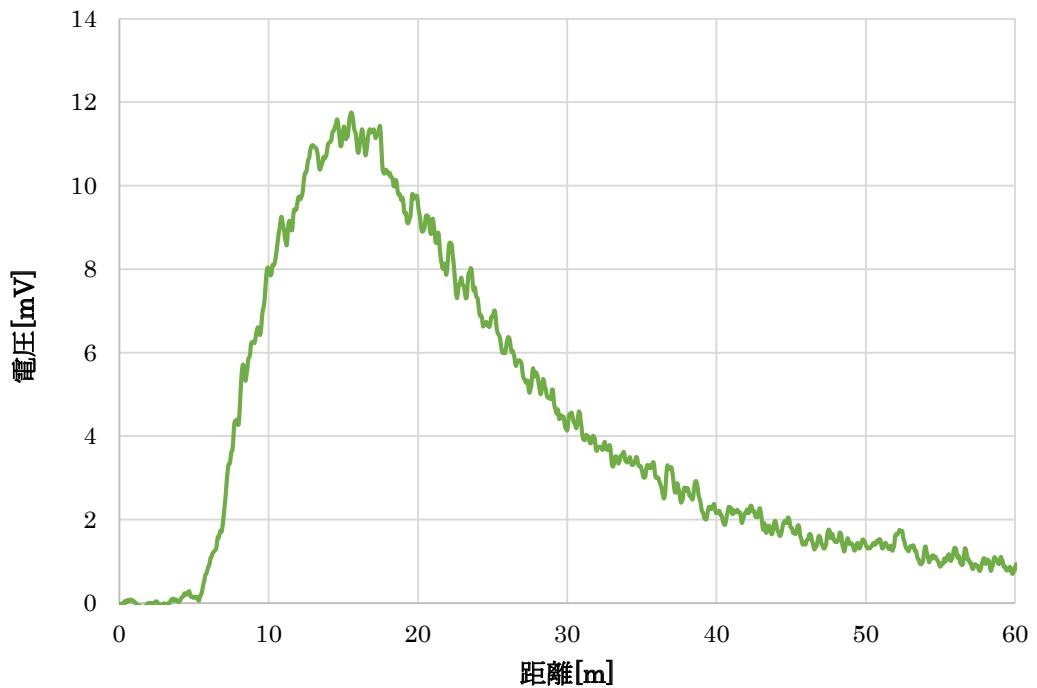


図 3.1-17 ライダー大気計測結果 ミー散乱チャンネル

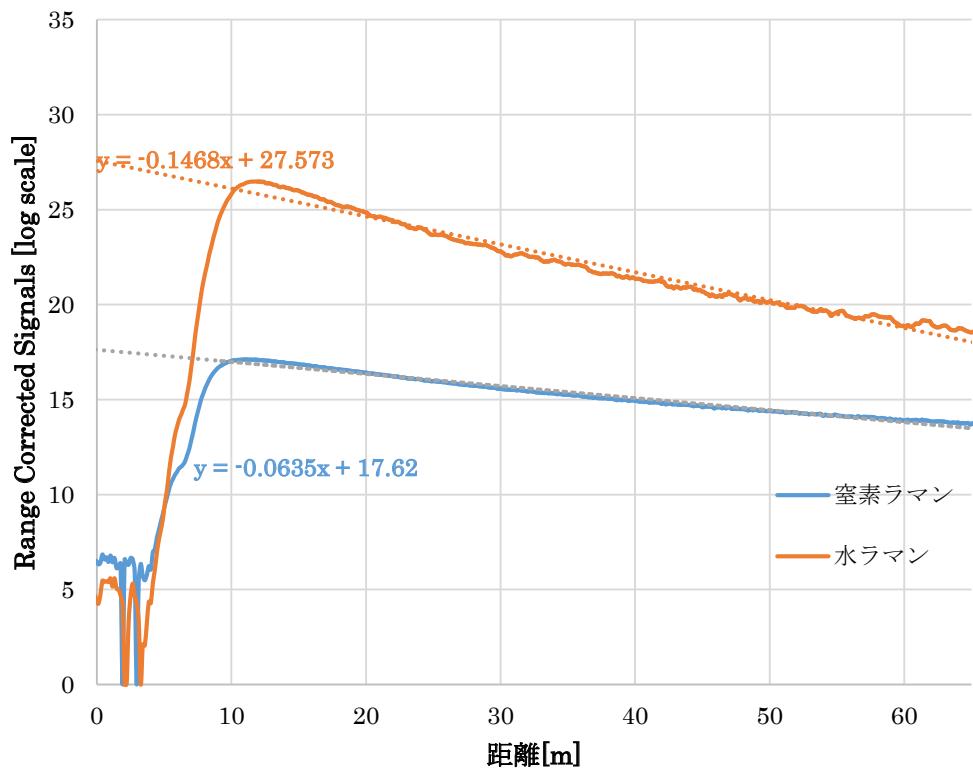


図 3.1-18 ライダー大気計測結果 ラマン散乱距離二乗補正対数表示

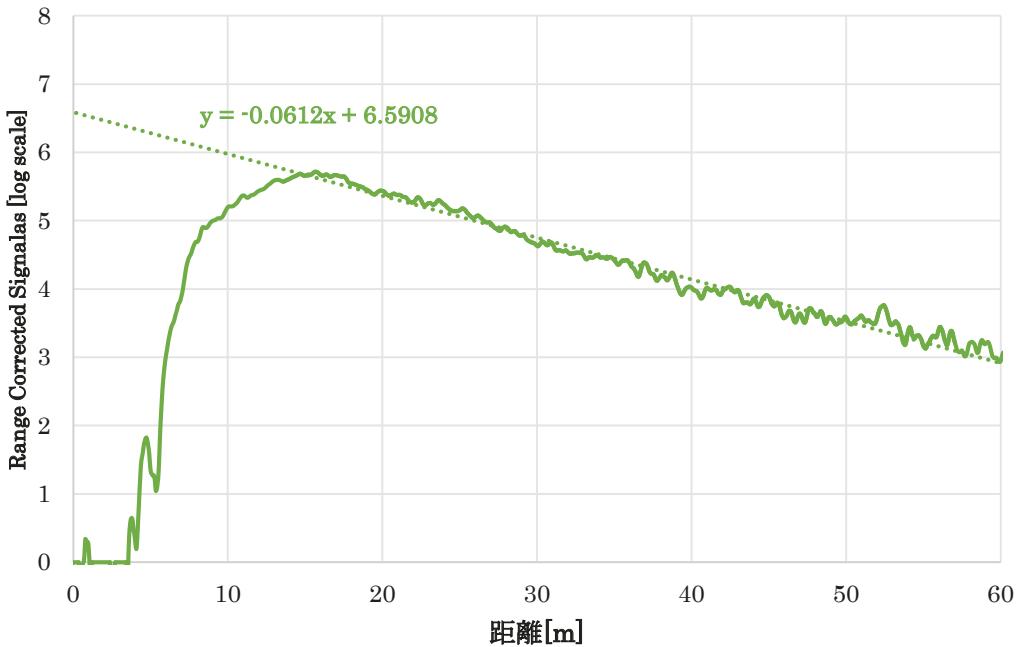


図 3.1-19 ライダー大気計測結果 ミー散乱距離二乗補正対数表示

### 考察

図 3.1-15 から図 3.1-16 よりラマンライダーで信号を確認した。距離二乗補正と対数表示を行うことで図 3.1-18 のような直線的な減衰を示すことから、ラマンライダーで大気による信号を捉えられたと判断した。表 3.1-8 に直線の傾きから求めた消散係数の値を示す。これよりミー散乱と窒素ラマンの消散係数はほぼ等しく、光が減衰していく傾向が近しいといえる。一方、水ラマンはより減衰が大きいことがわかる。前者の理由として、大気の約 80%は窒素であり、ミー散乱でも同じ物質である窒素の散乱の影響が大きいことが考えられる。一方、水は 355 nm で吸収をもたない窒素と異なり、光吸収をもつ[7][8]。ランベルト・ベール則にしたがって、消散係数の和が透過率と関係し透過率が小さいほど消散係数は大きくなる。よって、水ラマンのほうが消散係数の値が大きくなつたと考えられる。

この日の 20 時の気圧は 1,026 hPa、蒸気圧は 7.7 hPa であった[9]。大気中の 8 割が窒素だと仮定すると、窒素の分圧は 820 hPa になり蒸気圧の 107 倍である。図 3.1-14 及び図 3.1-15 より、どちらの積算回数でも窒素ラマンのカウント数は水ラマンより 2 衡大きい。これは測定日の気象状況と傾向が一致している。

積算回数 10,000 回のとき、水チャンネルの波形や消散係数に乱れが生じているが、100,000 回のときはミー散乱や窒素チャンネルと近い挙動を示す。よって、窒素と比較して水は大気中の含有量が少ないため、積算回数が少ない場合ラマン信号が小さく Signal Noise (SN) が悪いことが原因で生じたと考えられる。

表 3.1-8 ライダーデータより求めた消散係数

	傾き- $2\sigma$ [1/m]	消散係数 $\sigma$ [1/m]
ミー散乱	-0.0612	0.0306
窒素ラマン	-0.0635	0.0318
水ラマン	-0.1468	0.0734

## (4) ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる水ラマン計測

次に、加湿器を用いて壁を含む際のライダーの分解能とライダーの定量性を探るための実験を行った。水ラマンを選択した理由は、窒素より空気中の存在割合が小さく検出が容易であるので、ライダーの定量性を測定するのに適していると判断したためである。

レーザー照射に際し、EPLUSE=50kHz の際の分解能は 1.42 m であるが、ハードターゲットの信号はラマン散乱に比べて非常に大きいため、間に障害物がある場合その値が維持されるのか検証した。また、フォトンカウンターは 0.15 m である。よって、障害物から 1.5 m 以内の位置の変化はフォトンカウンターの計測結果に反映される。

実験は千葉大学工学部総合研究棟 9 階にて、令和 5 年 12 月 25 日午後 6 時に行なった。図 3.1-20 のように、ライダーと壁の間に加湿器を用いて水を発生させた。加湿器の位置を 0.15 m ごとに変化させて、壁の信号と水ラマンの信号を区別できるか検証した。表 3.1-9 に、この日の測定条件で表 3.1-7 から異なる箇所を示す。

表 3.1-9 水ラマン計測の測定条件

積算回数	10,000 回
計測時間	0.2秒
加湿器のダイヤル	4(最大)
レーザーと加湿器噴出孔の距離	12cm

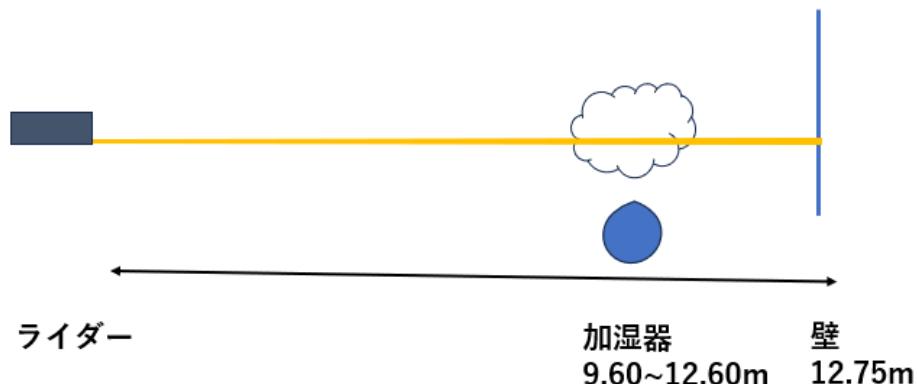


図 3.1-20 ライダーによる水ラマン測定 実験模式図

図 3.1-21 は水を発生させない状態で壁と大気の信号を計測した際の結果である。図 3.1-22 は、ライダーから 11.1 m の位置で水を発生させたときの結果である。図 3.1-22 より距離 11 m 付近に大気信号では、みられなかった信号の増加を確認した。

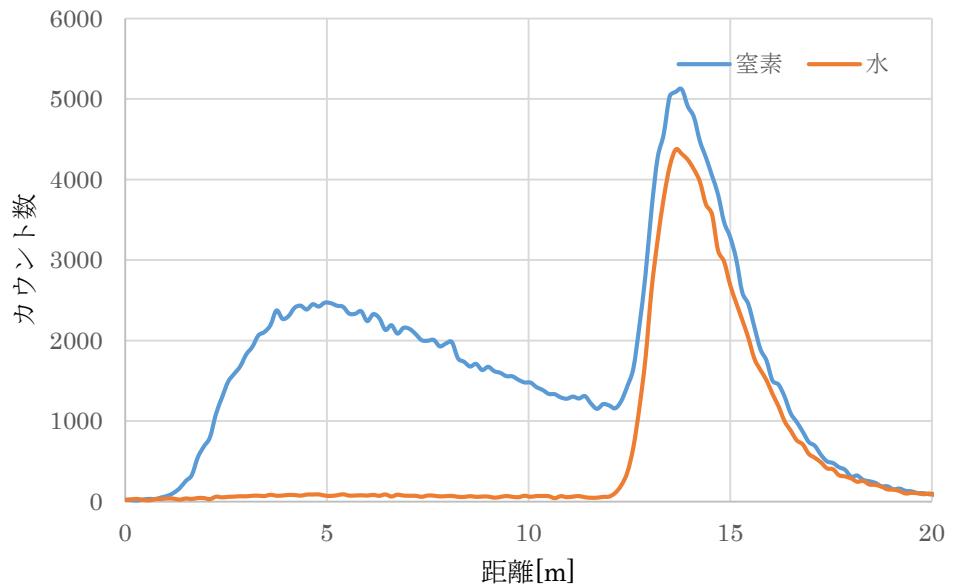


図 3.1-21 水ラマン測定 実験結果 加湿器なし信号

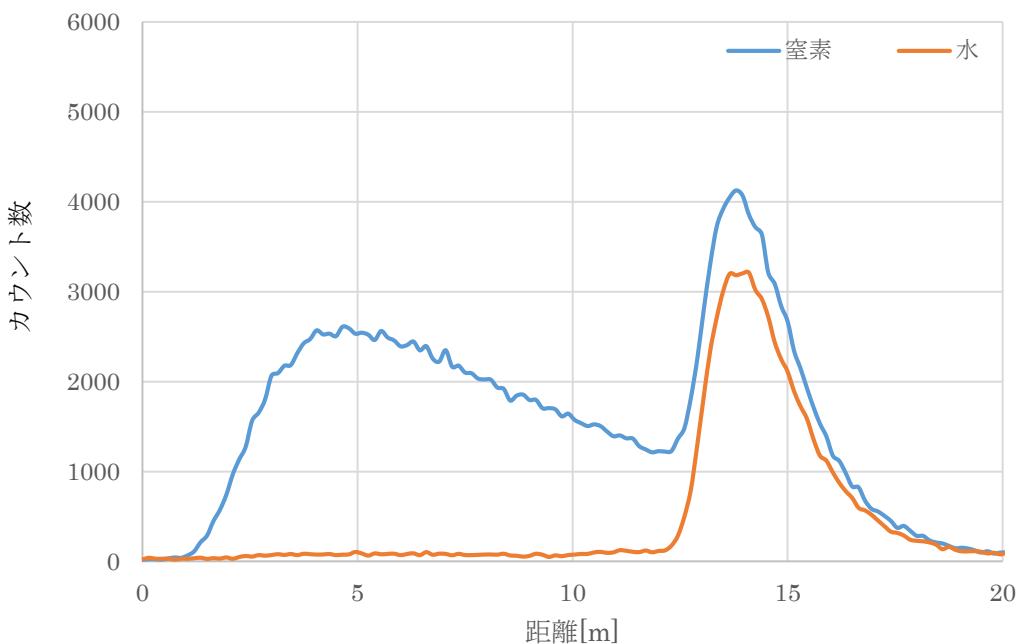


図 3.1-22 水ラマン測定 実験結果 11.1 m で加湿器あり信号

より違いを明確にするため、図 3.1-22 の加湿器の信号と図 3.1-21 の大気信号の差を取った（図 3.1-23）。このとき大気中の窒素の量は一定であるので[10]、

- ① ‘加湿器なし’ 信号の大気窒素のピーク値を ‘加湿器あり’ の大気窒素のピーク値で割る。
  - ② 商を ‘加湿器あり’ 信号にかける。
- （全てのデータで大気の窒素カウント値が同じになるようにした。）

補正を行うことでレーザーショットの出力によるカウント数のブレを補正した。その後、加湿器なしの信号を引いたときのデータが図 3.1-23 である。距離 13.95 m の位置に生じるピークは、壁の蛍光によるものである。

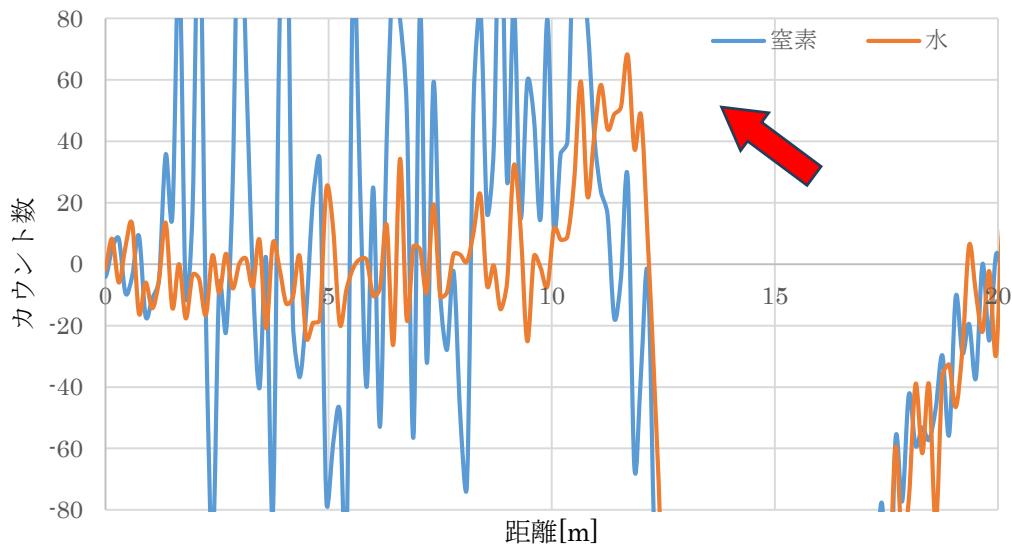


図 3.1-23 水ラマン測定 実験結果 加湿器なしの信号を引いた 11.1 m の信号

図 3.1-23 により、10.75~12 m の位置に信号のピークが生じることを確認した。加湿器の位置は 11 m であり、誤差 1.42 m の範囲に収まるため、加湿器による水ラマン信号を得た。

## (5) ミー散乱ライダー・ラマン散乱ライダーによる定量性の評価

ライダーの定量性を探るため、加湿器から噴出する水の量を変化させて実験を行った。実験は千葉大学工学部総合研究棟9階にて、令和6年1月23日午後6時に行なった。実験系は図3.1-20と同様で、ライダーから壁までの距離は13.0mであった。加湿器の距離を10mの位置に固定した。表3.1-10にこの日の測定条件で表3.1-7と異なる箇所を示す。

図3.1-24に、水の噴出量を変化させた際のライダー測定の結果を示す。背景光を引き5点で移動平均を取った。加湿器の噴出量ごとに色分けを行っており実線が水ラマン、点線が窒素ラマンの結果である。大気窒素による補正を行った。加湿器の噴出量によって変化する信号のピーク位置である位置10.80mのカウント数をまとめたものが図3.1-25である。水蒸気ダイヤル1-4は、噴霧量を上げていく際のリニアな設定である。

表3.1-10 ライダーによる定量性評価の測定条件

Ch1 Threshold	-10mV
Ch2 Threshold	1mV
積算回数	100,000回
計測時間	2秒
水蒸気ダイヤル	1to4
レーザーと加湿器噴出孔の距離	3cm

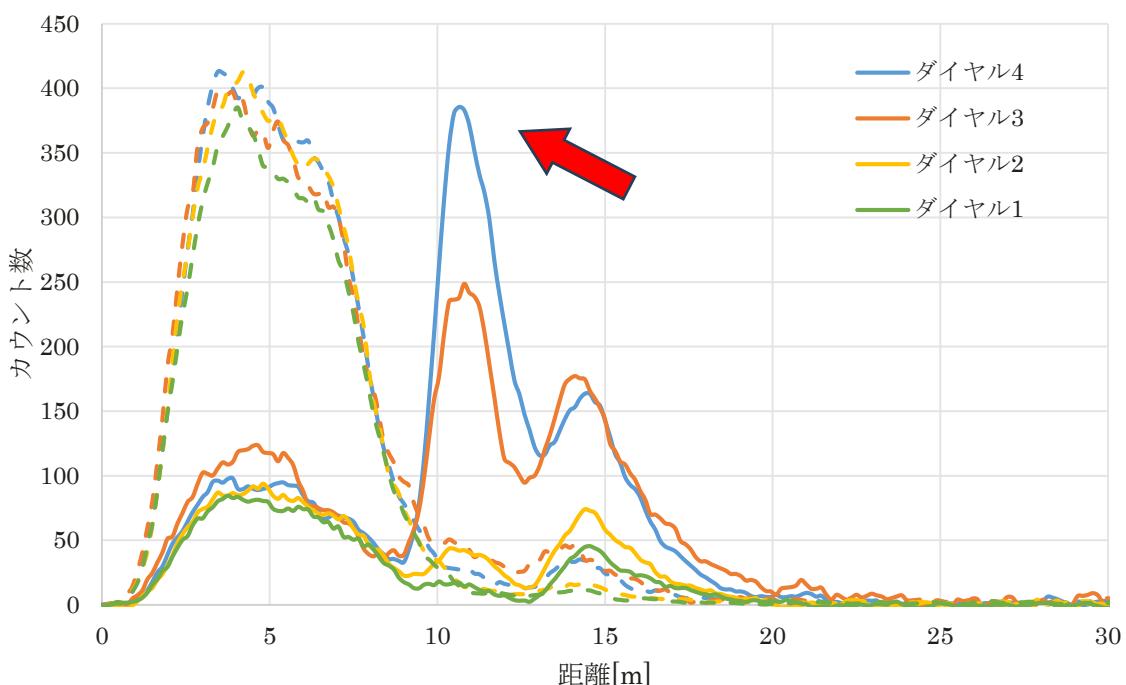


図3.1-24 定量評価 加湿器による実験結果 実線：水ラマン 点線：窒素ラマン

## 考察

横軸に加湿器の噴出量を取り、縦軸にライダーの水ラマンのカウント数を取ると図 3.1-24 のように線形的な関係になる。最小二乗法を用いて近似直線を引くと、決定係数  $R^2$  は 0.98 のため強い相関を示す。よって、作成したライダーは物質の量変化を反映したデータを測定できた。

図 3.1-23 より壁による蛍光は、窒素、水ラマンとともに信号強度に傾向がなく変化が大きいことが結果としてわかった。

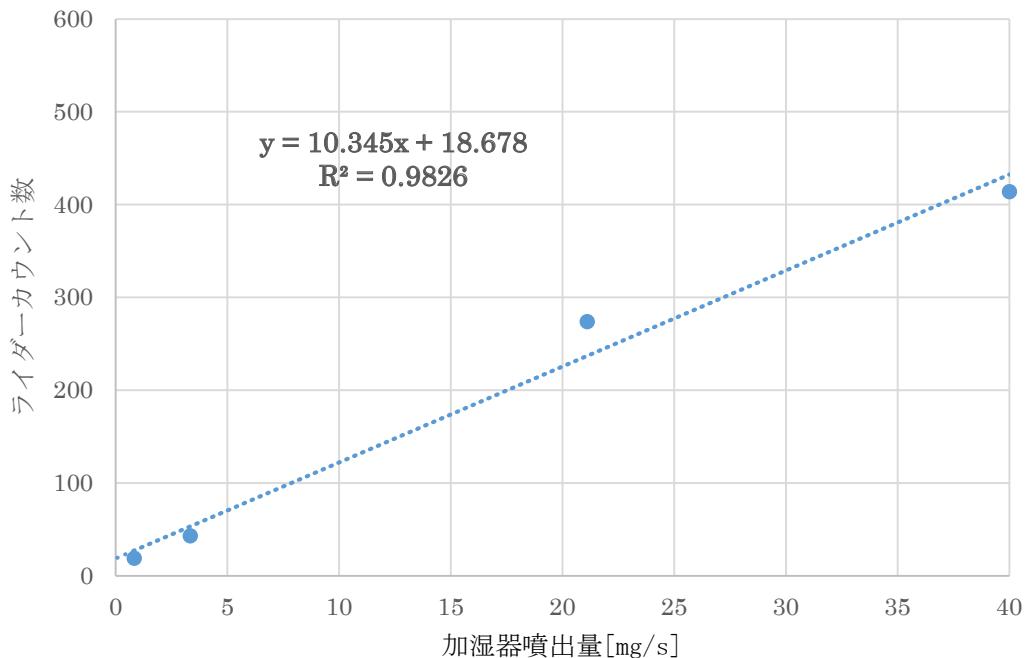


図 3.1-25 ライダーによる定量評価 加湿器による実験結果  
水の噴出量とライダーカウント数の関係

次に、本研究の主なる目的である窒素の漏洩を測定するために実験を行った。実験は千葉大学工学部総合研究棟 9 階にて、令和 6 年 1 月 26 日午後 8 時に行った。実験系は図 3.1-20 と同様で、加湿器が窒素ボンベに繋がった流量計に代わっている。ライダーから壁までの距離は 13.2 m であった。表 3.1-11 に、この日の測定条件で表 3.1-7 から異なる箇所を示す。

流量を 10 NL(ノルマルリットル)/min に固定し、窒素を発生させる位置を 10 m としたときの窒素ラマンの信号が図 3.1-26 の青線である。漏洩窒素がないときの信号が橙線である。大気中の窒素ラマンで補正を行った。7 m から 11 m の距離のデータを拡大したものが図 3.1-27 である。これより 8.5 m から 9.0 m の位置では、窒素があるときの信号のほうが大きいが明確なピークはみられなかった。

表 3.1-11 ライダー定量評価 漏洩窒素計測の条件

電流値	7.4A
Ch1 Threshold	- 5 mV
Ch2 Threshold	1mV
積算回数	1,000,000 回
計測時間	20秒
流量計	10nl/min、 5nl/min
流量計の位置	7.5m、 10m
レーザーとノズルの距離	3 cm

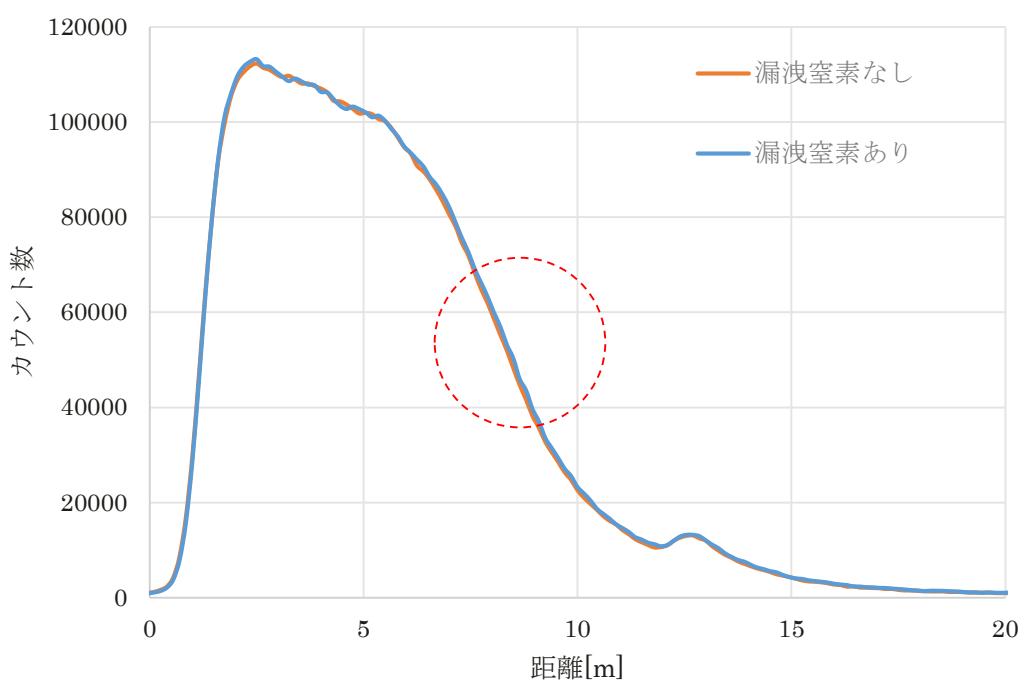


図 3.1-26 ライダーによる定量評価 実験結果 距離 10 m での漏洩窒素発生時の窒素ラマン

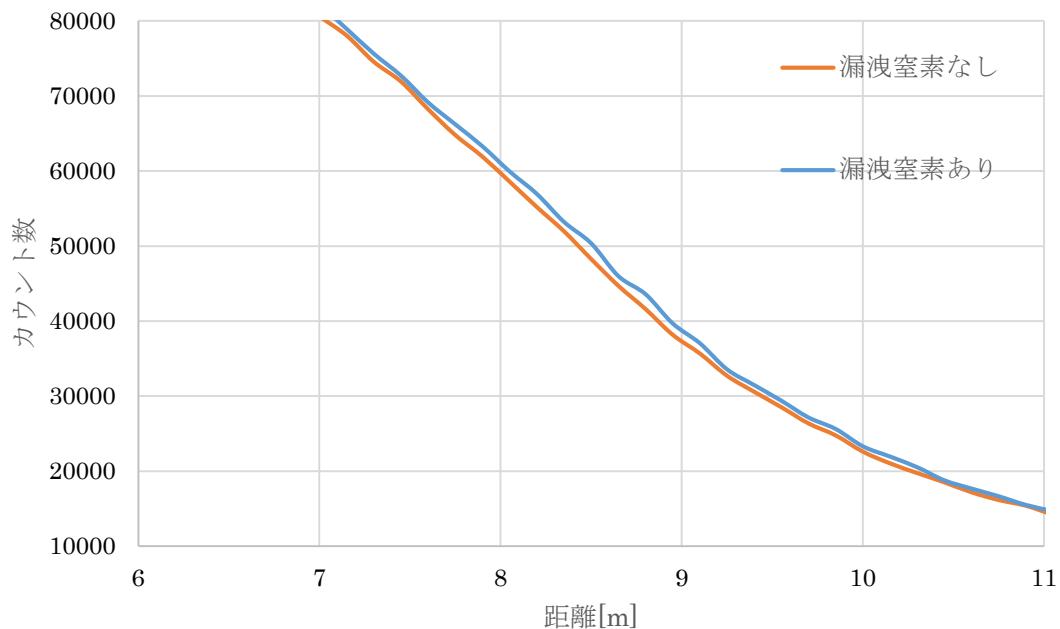


図 3.1-27 ライダーによる定量評価 実験結果 距離 10 m での漏洩窒素発生時の窒素ラマン拡大図

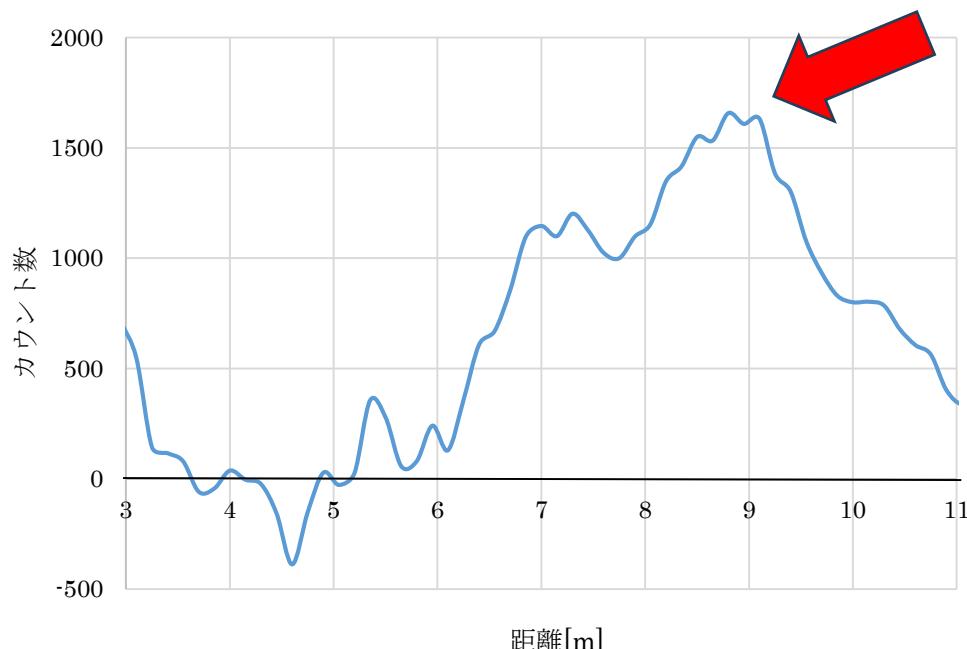


図 3.1-28 ライダーによる定量評価 実験結果 窒素ラマン 漏洩窒素有無で差分

漏洩窒素ありの信号から、漏洩窒素なしの信号を引いたものが図 3.1-28 である。なお、差分は後 5 点で移動平均を取った。図 3.1-28 により、窒素ありの信号と窒素なしの信号の差を取ることで、8.8 m の位置にピークをもつ信号が確認できた。同時測定した水ラマンとミー散乱で、図 3.1-28 と同様に漏洩窒素の有無で差分を取った。結果を図 3.1-29 から図 3.1-32 に示す。

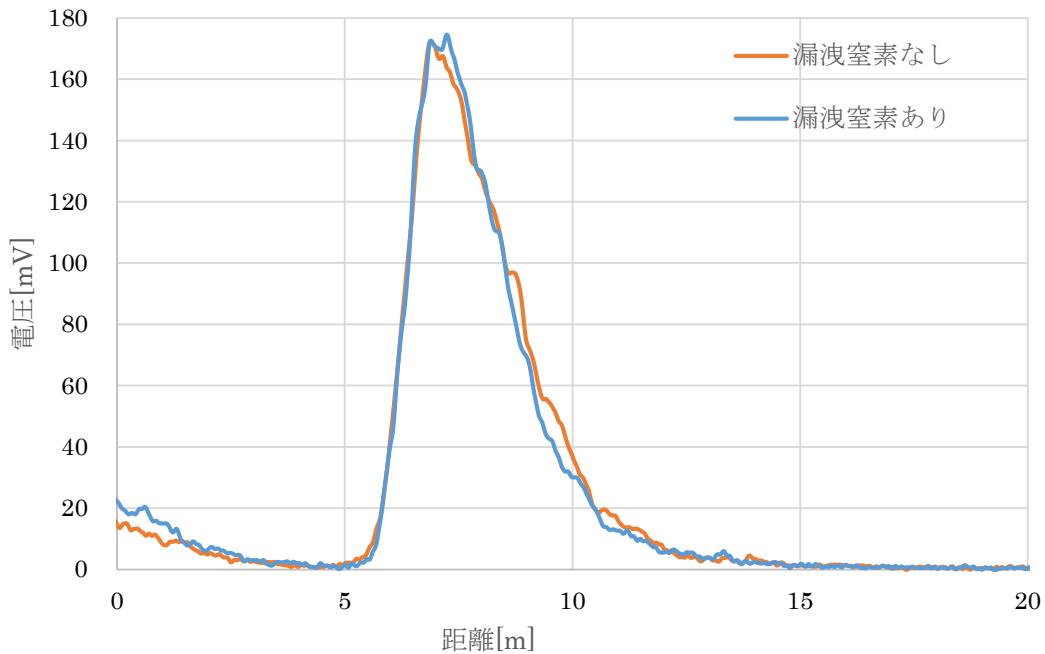


図 3.1-29 ライダーによる定量評価 実験結果 距離 10 m での漏洩窒素発生時のミー散乱

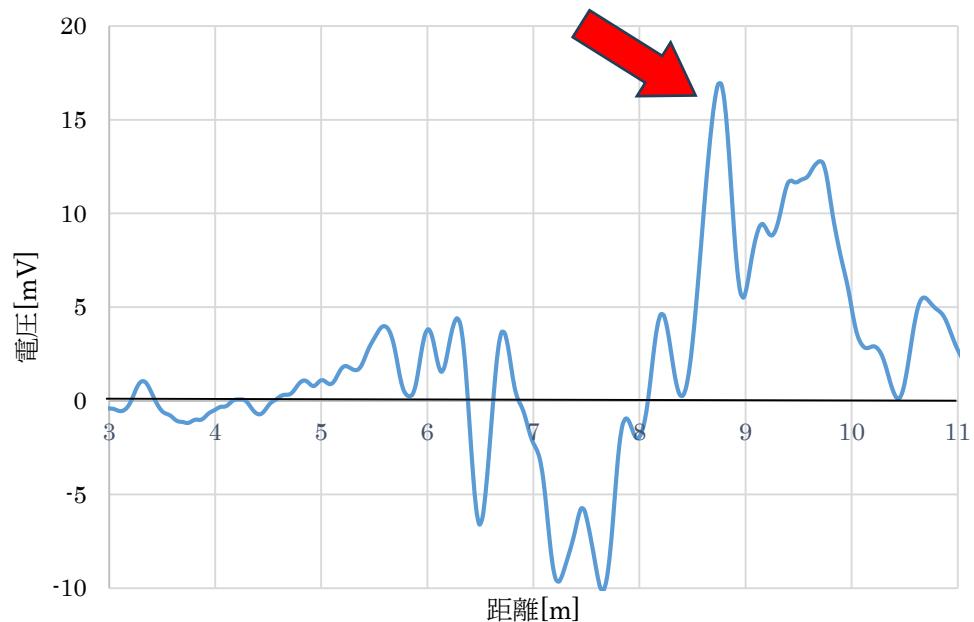


図 3.1-30 ライダーによる定量評価 実験結果 ミー散乱 漏洩窒素有無で差分

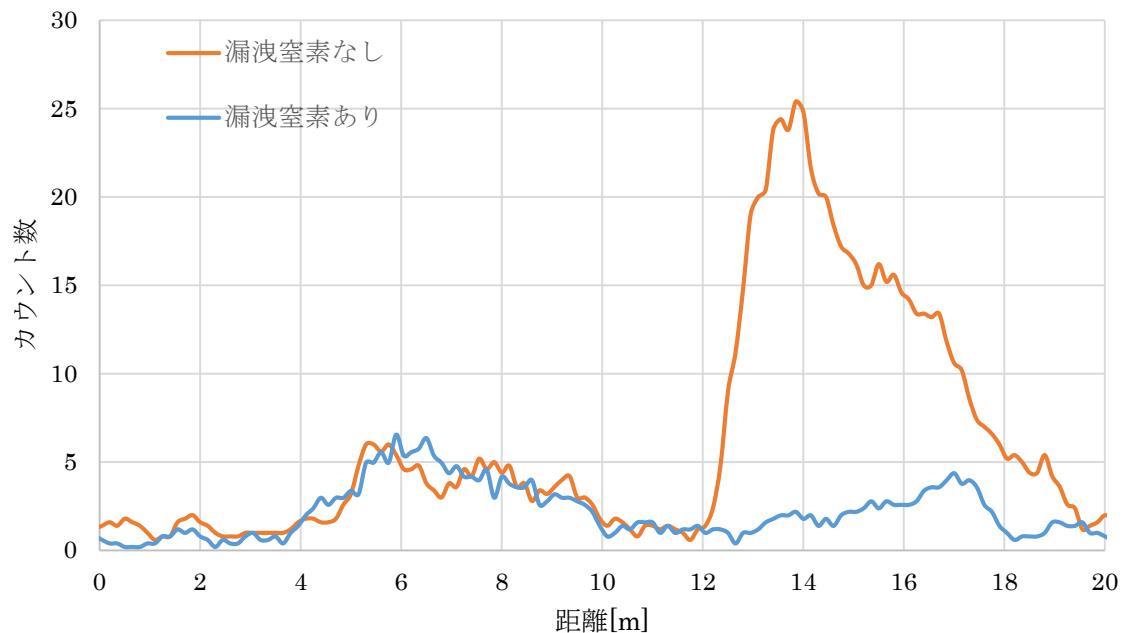


図 3.1-31 ライダーによる定量評価 実験結果 距離 10 m での漏洩窒素発生時の水ラマン

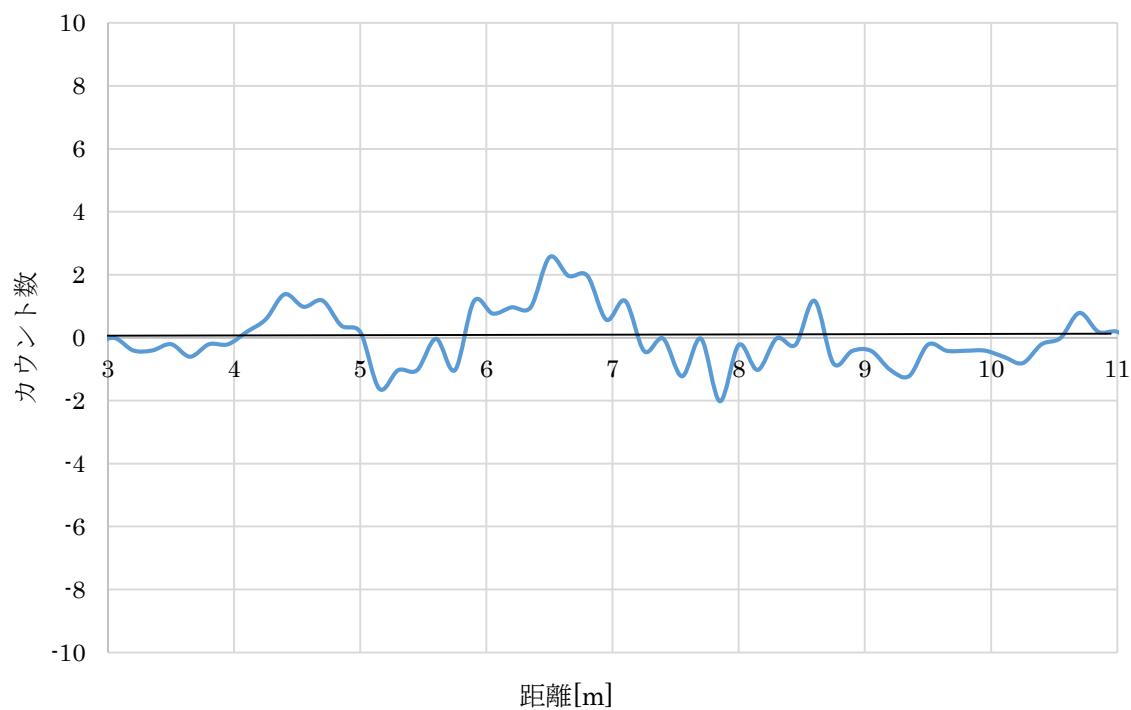


図 3.1-32 ライダーによる定量評価 実験結果 水ラマン 漏洩窒素有無で差分

次に、漏洩窒素の位置を 7.5 m に変更して実験を行った。10 m の位置で流量を 10 NL/min で測定し、窒素なし結果と補正を行った後、差分を取った結果が図 3.1-33 である。

最後に、噴出する窒素の流量を 10 NL/min と 5 NL/min に変化させたときの結果を示す。それぞれの流量及び漏洩窒素なしの信号を図 3.1-34 に示す。二つの異なる流量の差分を取った場合、図 3.1-35 のように 7.5 m の位置に図 3.1-33 よりも明確な窒素ラマンピークを見出した。

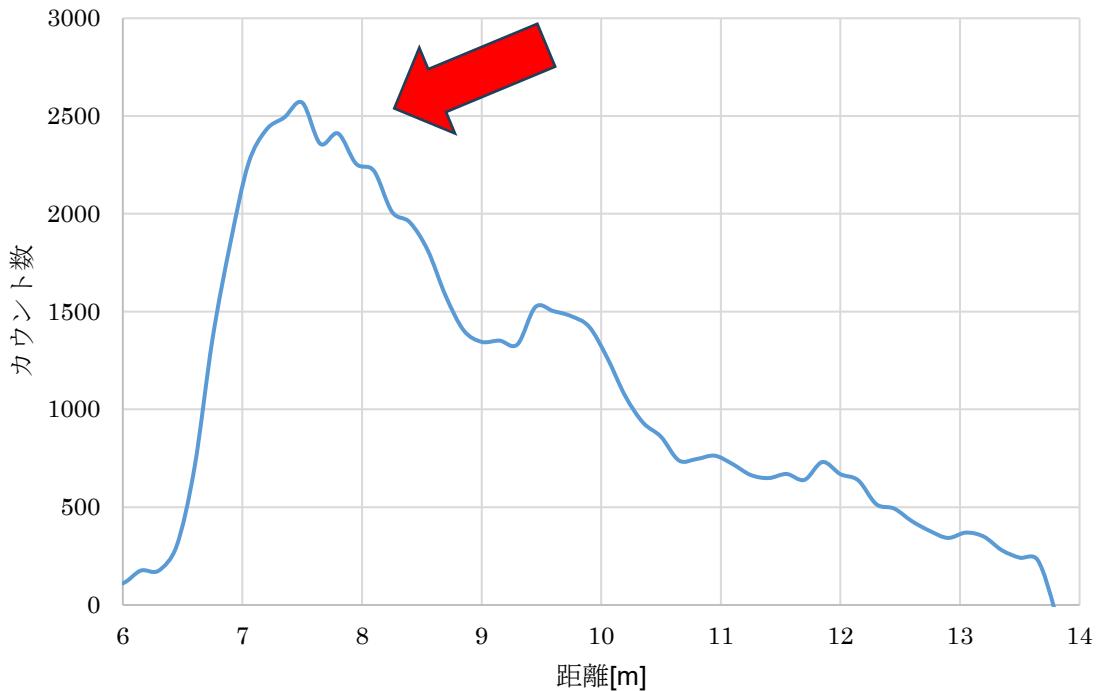


図 3.1-33 ライダーによる定量評価 実験結果 距離 7.5 m の漏洩窒素発生時の窒素ラマン  
窒素あり (10 NL/min) と窒素なしの差分

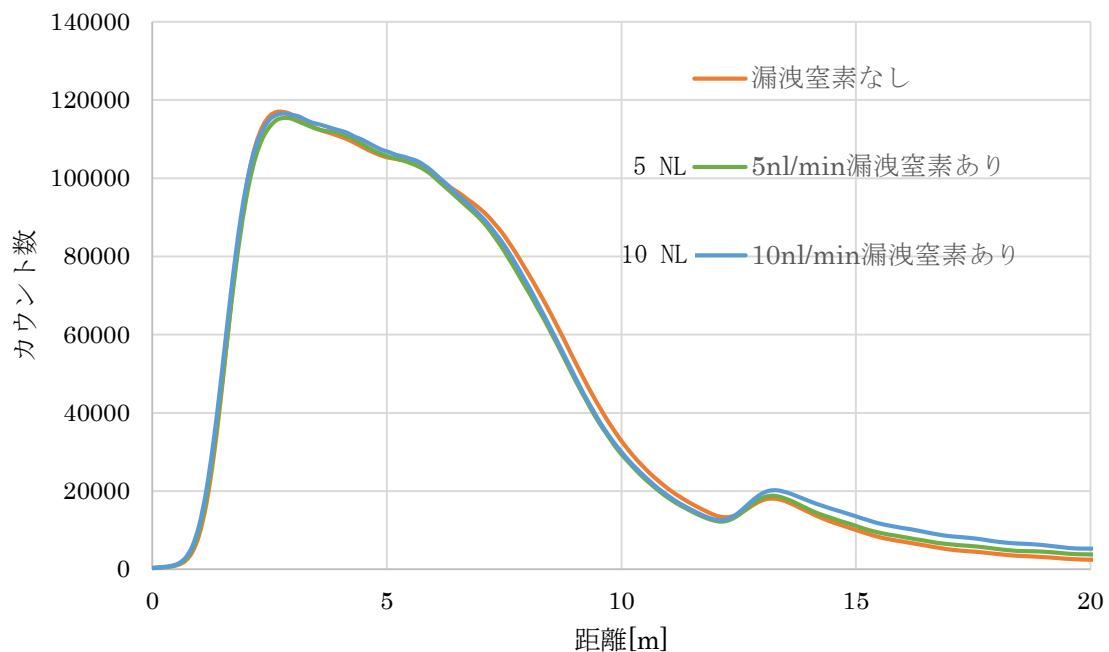
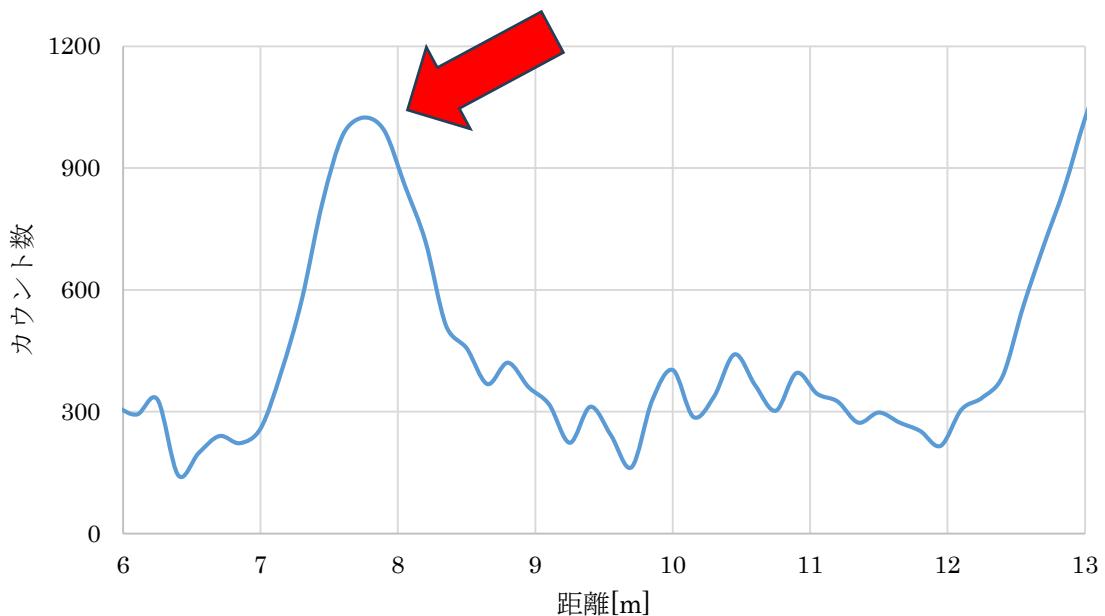


図 3.1-34 ライダーによる定量評価 実験結果 距離 7.5 m での漏洩窒素発生時の窒素ラマン

図 3.1-35 ライダーによる定量評価 実験結果 距離 7.5 m での漏洩窒素発生時の窒素ラマン  
流量 5 NL、10 NL の差分

## 考察

図 3.1-28 より、窒素がないときの信号と窒素があるときの信号で差を取ることで、6.70 m から 10.3 m の範囲で 8.95 m にピークをもつ窒素ラマン信号を捉えることができた。図 3.1-30 及び図 3.1-32 のミー散乱と水ラマンの信号と比較すると、ミー散乱は窒素ラマンと同じ位置にピークをもつ信号を得られたが、水ラマンは信号のピーク位置は存在しなかった。この結果より、ライダーは発生させた窒素の信号を捉えているとみなせる。図 3.1-33 より、差分を取ることで得られる信号は、漏洩窒素の位置を変えるとピークが変化することからも発生させた窒素による信号であるといえる。

10 m の位置で噴出させた窒素信号のピーク値のカウント数が 7.5 m の信号の 0.6 倍であることは、ライダー信号が距離の二乗に比例して減衰することに由来する。図 3.1-28 と図 3.1-33 から、 $\frac{7.5^2}{10^2} = 0.56$  より理論値では 10 m のピーク値は 7.5 m の 0.56 倍になる。よって妥当であると判断した。

図 3.1-28 及び図 3.1-30 でミー散乱と比較して窒素ラマンの信号のピーク幅が広い。これは図 3.1-36 で示すように、ライダーの分解能 1.42 m という範囲に対してノズルから噴出する窒素の量は少なく、また、大気窒素と濃度が異なるため計測時間の 20 秒の間に漏洩窒素が拡散してしまい、裾の広い信号になったと考えられる。

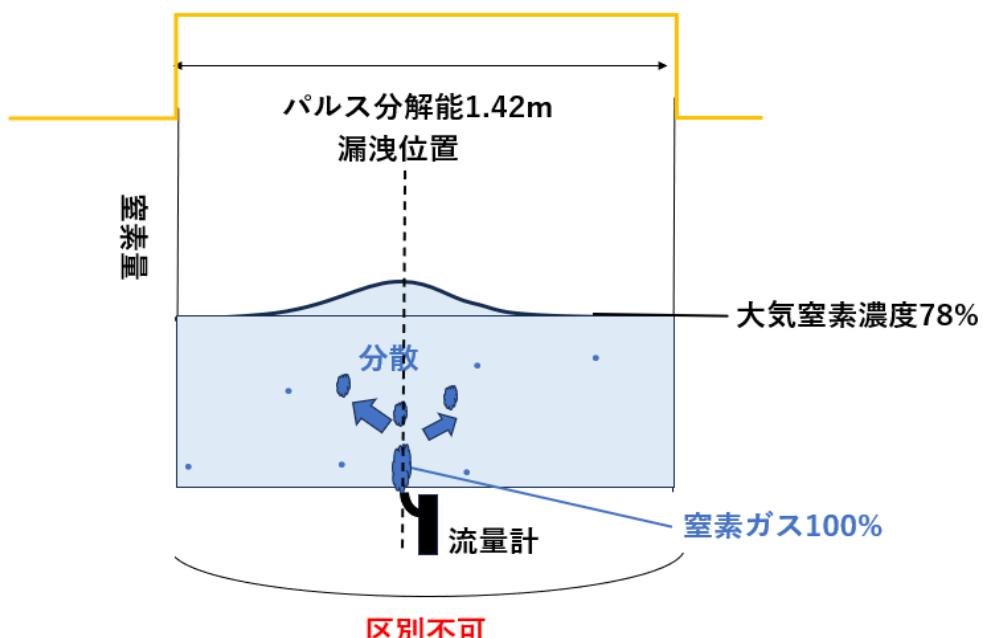


図 3.1-36 パルス幅範囲に存在する窒素の模式図

図 3.1-35 より、漏洩窒素の流量が異なるデータで差分を取った場合も漏洩窒素の有無で差を取ったときと同様に信号ピークが確認することができた。さらに、図 3.1-33 と図 3.1-35 を比較するとピーク幅は半分以下になった。よって、より明確に漏洩窒素の発生場所を捉えられているといえる。これはどちらの流量でも時間とともに漏洩窒素が分散されていくため、窒素の分散の影響が少ないノズル付近の信号で流量の差によるカウント数の変化が大きく表れたためだと考えられる。

実際に原子炉建屋でライダーを運用して漏洩を検知する際、漏洩箇所では常に窒素が漏れており、換気の気流により窒素の揺らぎが生じている。今回の実験結果より、連続的に信号を取り、その差分を取ることで漏洩箇所を発見できる可能性が示唆できる。

しかし、気流による窒素の揺らぎを捉えようとするとき、現在の積算時間 20 秒という条件は窒素の変化を捉えにくいため好ましくない。計測時間を数秒単位にするため、積算回数を  $\frac{1}{10}$  回にすることが理想的である。積算回数を減らした場合、信号雑音比が低下する。

信号雑音比は  $\sqrt{\text{積算回数}}$  に比例するため、積算回数を  $\frac{1}{10}$  にし、計測時間を 2 秒にしたとき、 $\frac{1}{\sqrt{10}} (\approx \frac{1}{3})$  になる。今回の結果の図 3.1-35 で、7.75 m の位置の窒素信号で背景光をノイズ信号とみなして信号雑音比を求めるとき約 160 なので、積算回数を減らしても測定可能であると期待される。しかし、差分を取った際に検出可能であるか、実験の必要がある。感度が足りない場合、望遠鏡の開口径を広げるなどといった装置の改善や信号処理の方法を検討する必要がある。

令和 6 年度以降の研究では、窒素の揺らぎの差を取ることによる窒素の漏洩検出を目指し、窒素の噴出量や計測時間を変えた実験や複数回計測したデータの最適な解析方法、差分を取った際の窒素の定量性の評価方法を検討していく予定である。

### 3.1.2 まとめ

本研究では、充填気体が破損箇所から漏れ出る事例を想定し、小型可搬型のライダーを構築した。ラマン散乱光を計測することで気体の漏洩位置、種類、量を遠隔で検出できる3チャンネルのラマンライダーを作製した。

ライダーの特性を確認するため、繰り返し周波数 50 kHz の設定で大気や加湿器で発生させた水の測定を行った。その結果大気中のエアロゾルや水、窒素の信号をそれぞれ計測し計測日の気象条件との一致を確認できた。また、ハードターゲットを含む場合もライダーのパルスによる分解能 1.42 m 以上の間隔があれば、ハードターゲットと区別してラマン散乱が検出できることを確認した。

さらに、発生させる水の量変化にともないライダーのカウント数が変化することを確かめた。加湿器による水の噴出量とライダーカウント数は線形関係であり、決定係数は 0.98 で高い相関を示した。

しかし、水ラマンと比較して大気中に多く存在する窒素の漏洩を測定することは難しく、現時点では光出力を 12.1 W に上げたうえで、測定時間を 20 秒に増やし窒素がない信号を引く補正が必要である。この処理を行った際、ライダーの窒素の漏洩箇所を変化させたことによるピーク位置の変化を確認した。また、漏洩量の異なるデータの差を取ることで明確な信号ピークを確認した。

今後は、窒素の揺らぎの差を取ることによる窒素の漏洩検出を目指し、窒素の噴出量や計測時間を変えた実験や複数回計測したデータの最適な解析方法などを模索、距離や物質の量に対する検出下限や差分を取った際の窒素の定量性の評価方法を検討していく予定である。

### 3.2 フラッシュライダーとシアログラフィーによる漏洩箇所の可視化（再委託先：ILT） 【令和5年度】

#### 3.2.1 ハイパースペクトル型フラッシュライダーの開発

##### (1) フィルター方式フラッシュライダー装置の構築

ライダーで漏洩箇所を可視化する方式には、ラスター走査方式に加えてフラッシュ方式がある。この方式では、高感度画像センサーの視野内にレーザー光を拡散照射することによって2D画像を取得し、その取得時間を時間的に掃引することで3D画像を撮像する。フラッシュ方式は、撮像画面内の時刻ずれのない画像が広い視野範囲内で得られるため、ライダーによる気体漏洩箇所の可視化に有効と考えられる。一方、一度に広範囲な可視化を実施するためにはレーザーの広範囲な拡散照射が必要となり、単位面積当たり得られるライダー信号強度は弱くなる欠点がある。

図3.2-1に構築したチューナブルバンドパスフィルター方式のハイパースペクトル型フラッシュライダーの光学配置を示す。また、図3.2-2に実際の装置の写真を示す。ライダー送信光にはパルス幅ナノ秒、繰り返し10 HzのNd:YAGレーザー(Quanta-Ray Pro-250-10、Spectra-Physics)を用いた。送信光のパワーは、1/2波長板と偏光ビームスプリッタで構成したアッテネータにより制御した。焦点距離の異なる平凹レンズを図3.2-1のLの位置に設置することで拡散照射の範囲を調整した。サンプルからの後方ラマン散乱の信号は、フィルターホイールに設置した各種干渉フィルターを通過させ、emICCD(PI-MAX4、Princeton Instruments)により2次元情報として検出した。emICCDの直前にはカメラレンズを設置し、測定対象位置に結像することで空間分解能を向上させる工夫をした。また、532 nm ノッチフィルターと550 nm ロングパスフィルターを用いて、迷光としての532 nm の光を除去した。送信光と受信光はミラーM3によって同軸になるように配置した。このように、3 ns のゲート付き電子増倍画像センサー(emICCD)の観測視野にパルスレーザーを照射して、窒素N<sub>2</sub>、酸素O<sub>2</sub>、水蒸気H<sub>2</sub>Oなど気体のイメージを取得し、その測定タイミングを掃引することで気体漏洩箇所を可視化することを目指す。

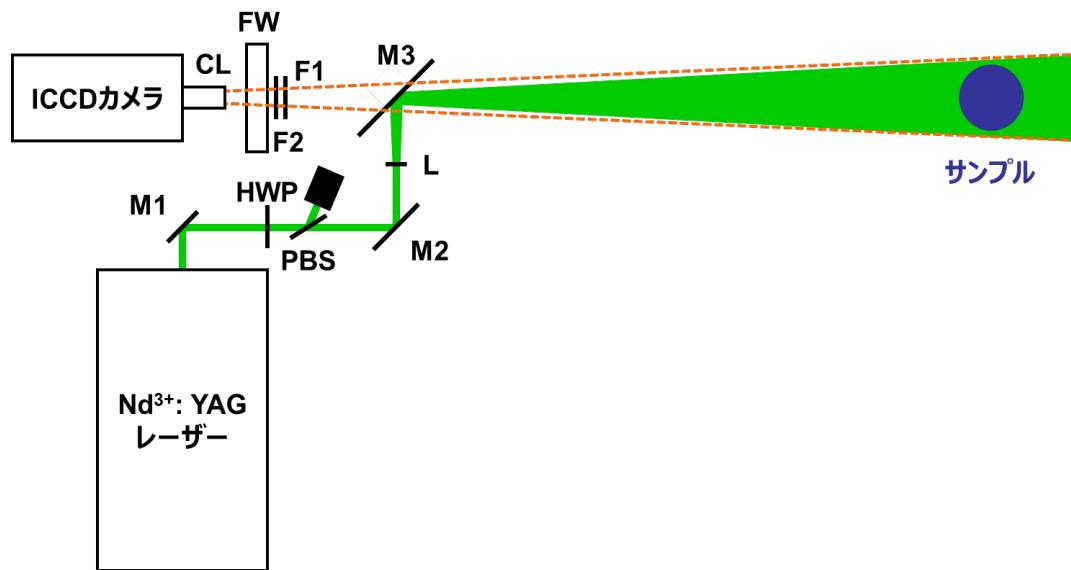


図3.2-1 構築したチューナブルバンドパスフィルター方式のハイパースペクトル型  
フラッシュライダーの光学配置

M1-M3:ミラー、HWP:1/2波長板、PBS:偏光ビームスプリッタ、L:平凹レンズ、

F1:532 nm ノッチフィルター、F2:550 nm ロングパスフィルター、

FW:フィルターホイール、CL:カメラレンズ

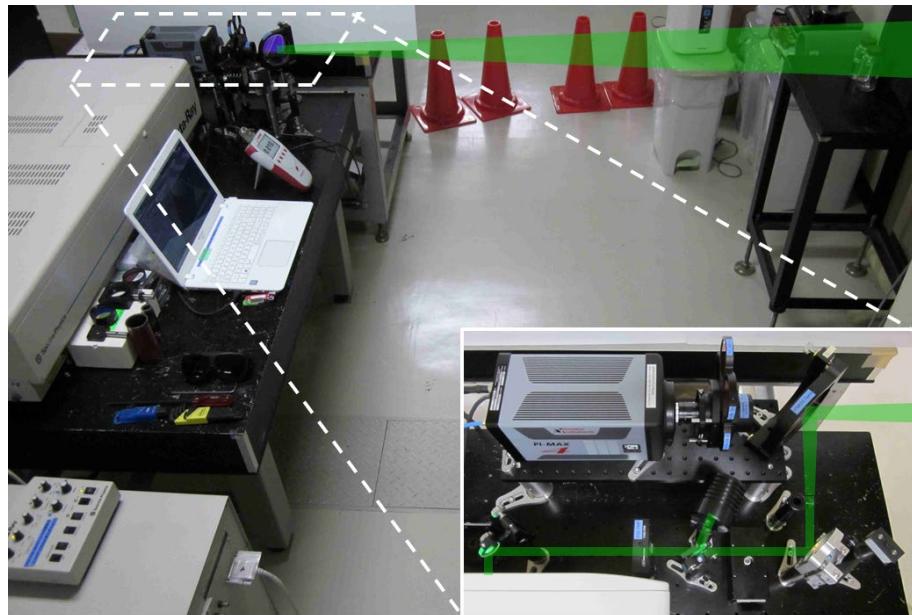


図 3.2-2 構築したフラッシュライダー装置の外観

## (2) フィルター方式フラッシュライダーの基本性能の評価

フィルター方式ライダーでは、図 3.2-1 のようにフィルターホイールに設置した干渉フィルターの切り替えによって測定対象を識別する。そのため、測定対象のラマン散乱波長とフィルターの仕様が重要である。表 3.2-1 にこれらの情報をまとめた。バンドパスフィルターの中心波長は、測定対象のラマン散乱波長に合わせてセミカスタムした。半値幅はどれも 2 nm 程度である。測定対象のラマン散乱波長は対応するバンドパスフィルターの半値幅内に含まれるため、識別することが可能である。

送信光のパワーは 3.2.1 項(1)に記したとおりアッテネータで制御した。照射可能な出力を図 3.2-3 に示す。装置に用いた YAG レーザーの 2 倍波の出力はカタログ値では 800 mJ であるが、実験時の状態では～600 mJ が上限であった。アッテネータを構成する光学素子の回転角と出力は図 3.2-3 のように良好に応答した。

レーザー光の拡散照射に用いる凹レンズの仕様を評価した。例として 2 m 位置でのビーム直径及びビーム断面積と凹レンズの焦点距離との関係を調べた。その結果を図 3.2-4 に示す。ここでは、焦点距離-25、-50、-75、-100、-250、-500 mm の平凹レンズを使用した。図 3.2-1 の平凹レンズ設置位置における 532 nm パルスレーザーのビーム直径は約 10 mm であった。ビームはやや楕円であったので、直径は縦方向と横方向に区別し、面積は楕円として見積もった。拡散させるほど単位面積当たりの光子数が下がるため、特にビームの端を判断することが難しくなるが、測定した値は理論上の値とおおよそ一致した。そのため、これらの凹レンズを用いて拡散照射が可能であることがわかった。また、構築したフラッシュライダー装置を用いる場合、2 m 離れた位置において直径 1 m 程度の視野全体を拡散照射するには、図 3.2-4 から少なくとも-25 mm 程度の短焦点凹レンズが必要であることがわかった。同様に考えると、例えば 10 m 位置で視野 1 m を得るために、-100 mm 程度の短焦点凹レンズが必要であると推定された。

次に、emICCD カメラの積算とゲインの効果を調べた。ここでは、液体の水をサンプルとし、そのラマン散乱波長である 649 nm の干渉フィルターを用いた。送信光は 532 nm、100 mJ (10 Hz) で、-500 mm の凹レンズにより拡散照射した。積算のみを単一変数とした場合、信号雑音比は積算回数の平方根に比例する。一方、ゲインのみを単一変数として増加させた場合、信号と雑音がともに増加した。そのため、これら両方の寄与を確認した。その結果を図 3.2-5 に示す。積算 100×ゲイン 100 と積算 1,000×ゲイン 10 が同程度であることから測定時間を考慮すると、積算 100×ゲイン 100 のような設定が好ましいことがわかった。

表 3.2-1 測定対象のラマン散乱波長と干渉フィルターの仕様

化学種	ラマン散乱 (nm)	フィルター波長(nm)	
		中心	FWHM
O <sub>2</sub> (g)	580.0	580.32	2.03
N <sub>2</sub> (g)	607.3	607.47	2.02
H <sub>2</sub> O(g)	660.3	660.64	1.94

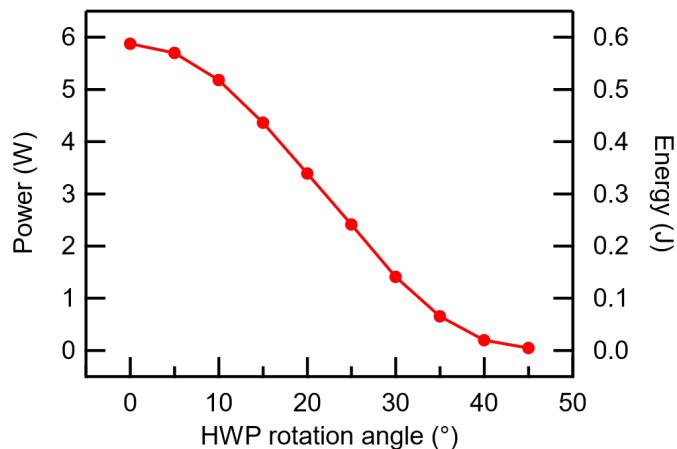


図 3.2-3 アッテネータによるレーザー出力の制御

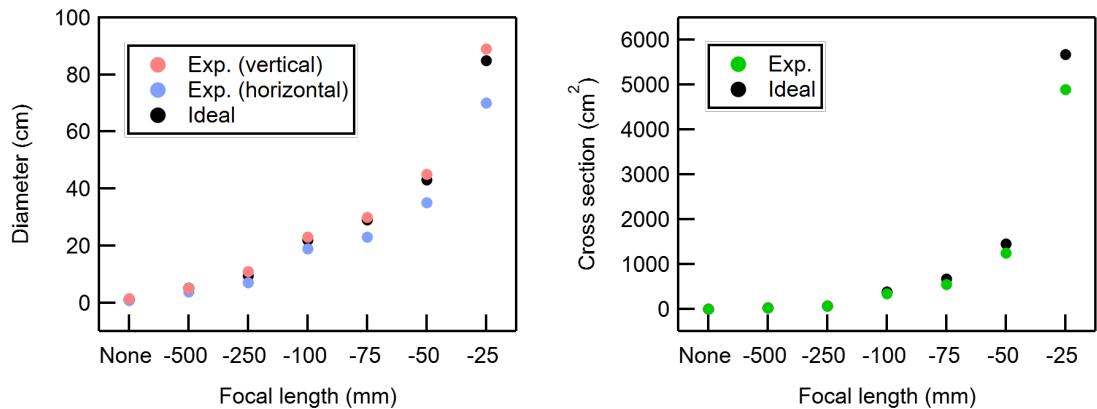


図 3.2-4 凹レンズの焦点距離と 2 m 位置でのビーム直径（左）及びビーム断面積（右）

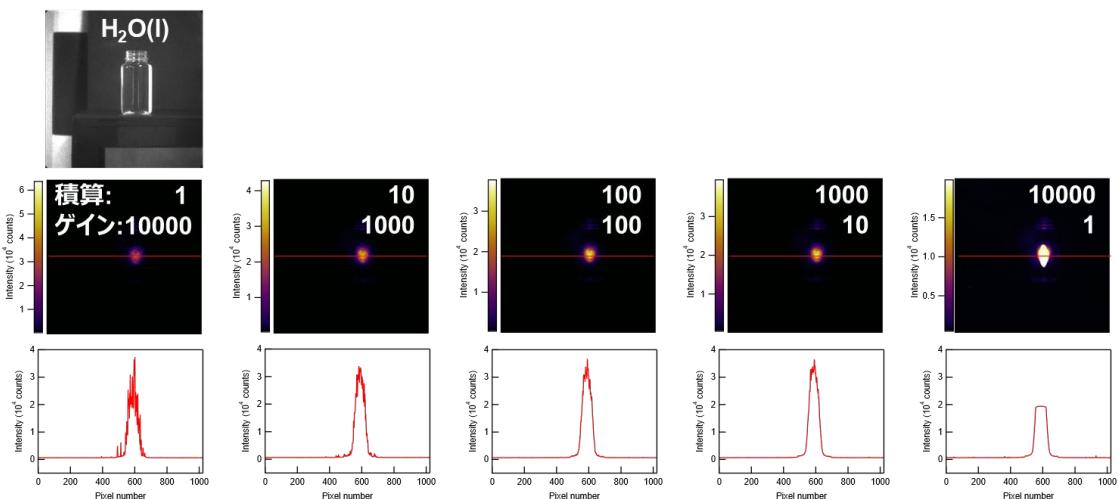


図 3.2-5 emICCD カメラの積算とゲインの寄与

### (3) 水、窒素、酸素、水蒸気の測定

フィルター方式フラッシュライダー装置を構築した後、密度が高くラマン散乱信号が強いと予想できる液体の水の測定を行った。図 3.2-6 に測定結果の例を示す。水の入ったガラス容器と空のガラス容器をサンプルとして設置した。送信光 532 nm は 100 mJ (10 Hz) に制御し、焦点距離-100 mm の凹レンズによりサンプル位置で直径~20 cm 程度に拡散照射した。これにより、どちらの容器にも励起レーザー光を照射した。649 nm のフィルターを選択することで液体の水を測定した。図 3.2-6 のように水の入った容器からのみ信号が得られた。この結果からフラッシュライダーにより水を識別することが実現したと考えられる。

窒素と酸素の測定結果を図 3.2-7 に示す。実験室内の空気を測定対象とした。前述の水に比べて密度が小さくなるため、やや絞って照射した。送信光 532 nm は 200 mJ で、焦点距離-500 mm の凹レンズにより拡散照射した。emICCD の積算は 100 回、ゲイン 2,000 で測定した。これらの信号はバックグラウンドに対して十分に大きいことを確認した。図 3.2-7 では窒素に対して酸素の信号が小さい。これは、使用した 532 nm ミラー（図 3.2-1 の M3）の

酸素ラマン散乱波長 580 nm での透過率が約 13%と低かったためである。実際に 515 nm 用のミラー (580 nm での透過率約 91%) に取り換えたところ、酸素の信号が大きくなつた。また、窒素、酸素ともに送信光の強度に対してもラマン散乱信号が応答することも確認した。これらの結果から、窒素用の 607 nm 干渉フィルターと酸素用の 580 nm 干渉フィルターを切り替えることで、それぞれの信号を得ることに成功したと考えられる。

水蒸気の測定について述べる。一般的な市販の加湿器を用いて水蒸気を噴霧させた。単純に実験室内に噴霧させた状態の計測では信号が得られなかつた。そこで、図 3.2-8 のように丁字型の塩化ビニールパイプを加湿器の吹き出し口に設置した。これにより、発生するエアロゾルと光軸との重なり領域を 5-8 倍程度長くすることができた。この状態でラマン信号の測定を行つた。結果の一例を図 3.2-9 に示す。水蒸気の測定は窒素や酸素に比べて難しく、拡散照射で信号を得ることは困難だつた。ラマン散乱断面積が窒素や酸素に比べて 1-2 衍程度低いため、これらの傾向は妥当である。そこで、凹レンズを設置せず、高いレーザーパワーで測定した。図 3.2-9 の上図は 500 mJ, emICCD 積算 100 回、ゲイン 2,000 で測定した結果である。この条件では水 (エアロゾル) と水蒸気との信号を得ることができた。そのため送信光に波長 532 nm を用いてフラッシュライダー計測を行うには、少なくとも今回用いたレーザーよりもハイパワーのレーザーを用いる必要があることが示唆された。また、同じ条件でフィルターを切り替えて測定した窒素と酸素の結果を図 3.2-9 の下図に示した。水蒸気を噴霧している状況でも窒素と酸素の測定ができたことから、水、水蒸気、窒素、酸素が共存している空気塊の測定に応用できることがわかつた。また、フラッシュライダー装置には表 3.2-1 に示したように、測定対象のラマン散乱波長を中心波長とした半値幅 2 nm 程度の干渉フィルターを用いた。ここでの結果から、半値幅 2 nm 程度の干渉フィルターを用いれば、フィルターの切り替えだけで水、水蒸気、窒素、酸素の 4 種の測定対象を十分に識別することができる事が示唆された。

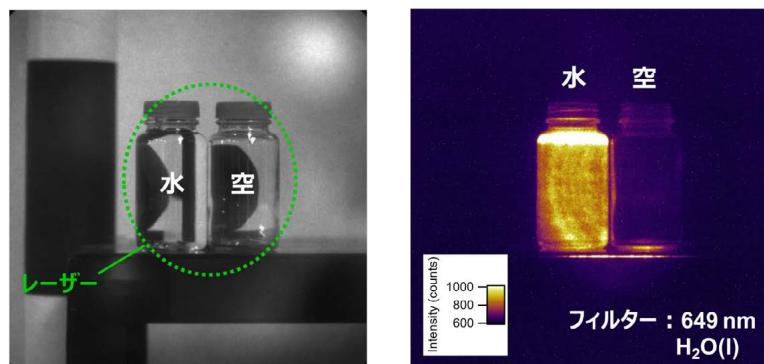


図 3.2-6 水の測定結果

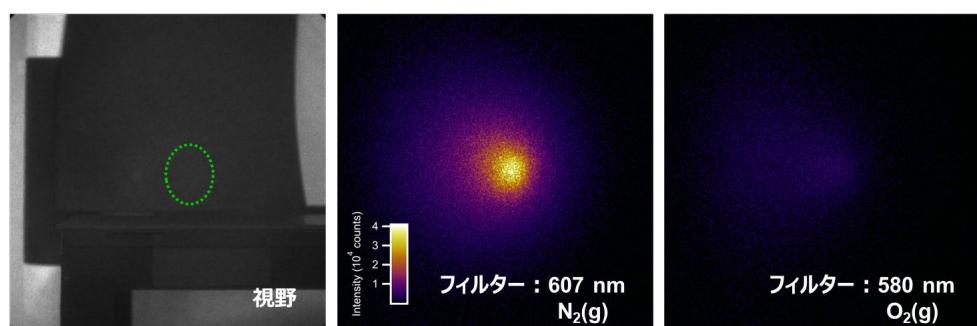


図 3.2-7 窒素と酸素の測定結果



図 3.2-8 加湿器による水蒸気の噴霧

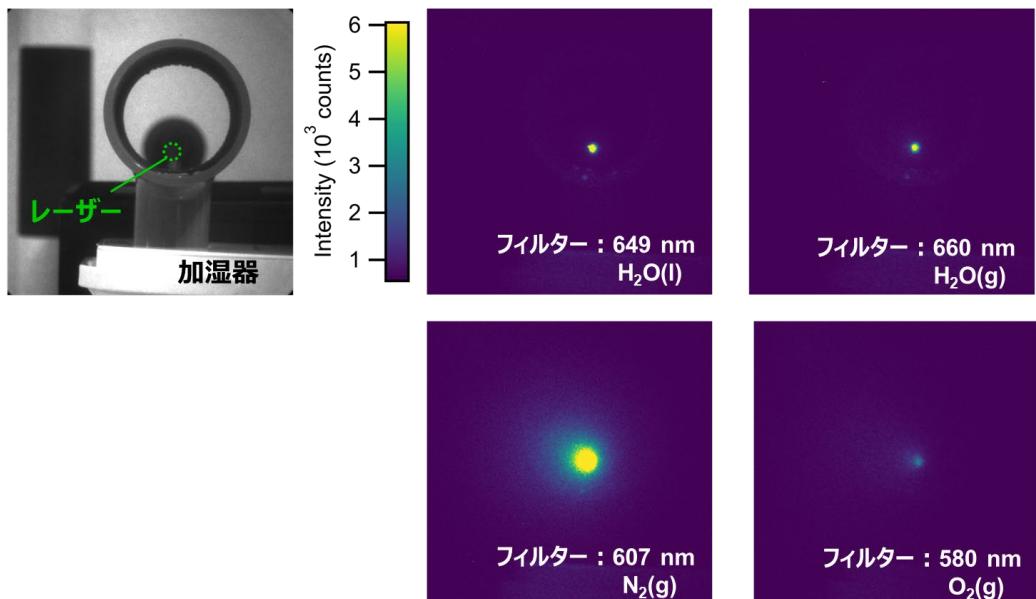


図 3.2-9 水蒸気の測定結果

#### (4) 定量性の検討

これまでチューナブルバンドパスフィルター方式によるハイパースペクトル型フラッシュライダーを用いた定性分析に関して記した。ここでは定量性について議論する。emICCD カメラを検出器として用い、干渉フィルターを透過する狭帯域のラマン散乱信号を観測する本手法は、絶対濃度測定が難しい。そこで、既知濃度の標準試料を事前に測定することで得られる絶対濃度と信号強度との関係から測定対象の濃度を見積もる。以下では、典型的な例として窒素を測定した結果について述べる。

まず、簡易的なガスハンドリングラインを整備した（図 3.2-10）。試料を封入する容器には、市販の光路長 50 cm の円筒型光学セル（TGC500C、Thorlabs）を用いた。この両端には、350–700 nm の反射防止コートを表面に施したガラス製光学窓（WG11050-A、Thorlabs）を設置した。また、99.999% の乾燥窒素ガスを標準試料とした。図 3.2-10 に示したロータリーポンプによって、低真空まで到達させることで圧力 0–800 Torr の測定を可能にした。

また、窒素ガスボンベから試料を導入することにより任意のガス濃度を調製した。測定時の 50 cm 光学セルの配置を図 3.2-11 に示す。三つのセルを直列に並べ、emICCD カメラ側の一つは真空、残り二つは気塊を模擬し目的圧力に調製した。これにより窒素圧力 0, 210, 401, 603, 800 Torr に対するラマン散乱信号強度を測定した。測定結果を図 3.2-12 に示す。ここで、送信光レーザーの波長は 532 nm、パワーは  $\sim 300 \text{ mJ pulse}^{-1}$  (10 Hz) に制御した。セルの断面積の制約から凹レンズは設置せず、拡散照射しなかった。emICCD カメラは積算 1,000 回、ゲイン 10、ゲート幅 3 ns の条件で行った。図 3.2-12 の A は干渉フィルターを外し、露光時間を長くして撮影したカメラからの視野である。カメラレンズにより撮像の焦点を 1.5 m 位置に合わせているため、手前の光学窓ホルダーと背景がぼやけていることが確認できる。酸素 O<sub>2</sub>測定用の 580 nm 干渉フィルターを設置して測定した場合 (図 3.2-12 の B, D, F, H, J)、得られた信号はほとんど変化しなかった。一方、窒素 N<sub>2</sub>測定用の 607 nm 干渉フィルターの場合 (図 3.2-12 の C, E, G, I, K) は、検出された後方ラマン散乱信号が窒素濃度とともに増加した。これらの画像断面のプロファイルからピーク値を読み取りプロットしたものが図 3.2-13 である。酸素 O<sub>2</sub>測定用の 580 nm 干渉フィルターを設置して測定した場合 (図 3.2-13 の ■)、有意な信号が検出できなかった。一方、窒素 N<sub>2</sub>測定用の 607 nm 干渉フィルターの場合 (図 3.2-13 の ●) は、検出された後方ラマン散乱信号が窒素濃度に比例していることがわかる。このことからフィルターによって窒素のみ検出できたことが確認できる。ここで、理想気体の状態方程式から圧力 1 Torr の数密度は、 $3.2 \times 10^{16} \text{ molecules cm}^{-3}$  に相当する。これを用いて圧力から濃度 (数密度) へ換算が可能である。図 3.2-13 の窒素フィルターによる測定結果に対して、一次関数でフィッティングすることで検量線を取得した。なお、切片の値は背景由来の蛍光と考えられるため、差し引く処理をしても構わない。このように検量線を取得し、任意の測定結果のラマン散乱信号強度と比較することで定量することができる。酸素のように他の気体であれば標準ガスを用い、窒素の場合と同じ手順で定量が可能である。つまり、トレーサーに他のガスを用いる場合でもこの方法が適用できると考えられる。また、水蒸気の場合は乾燥空気を用いたバーリングによって湿った気塊を調製し、その流速を制御することで検量線の取得が可能と考えられる。

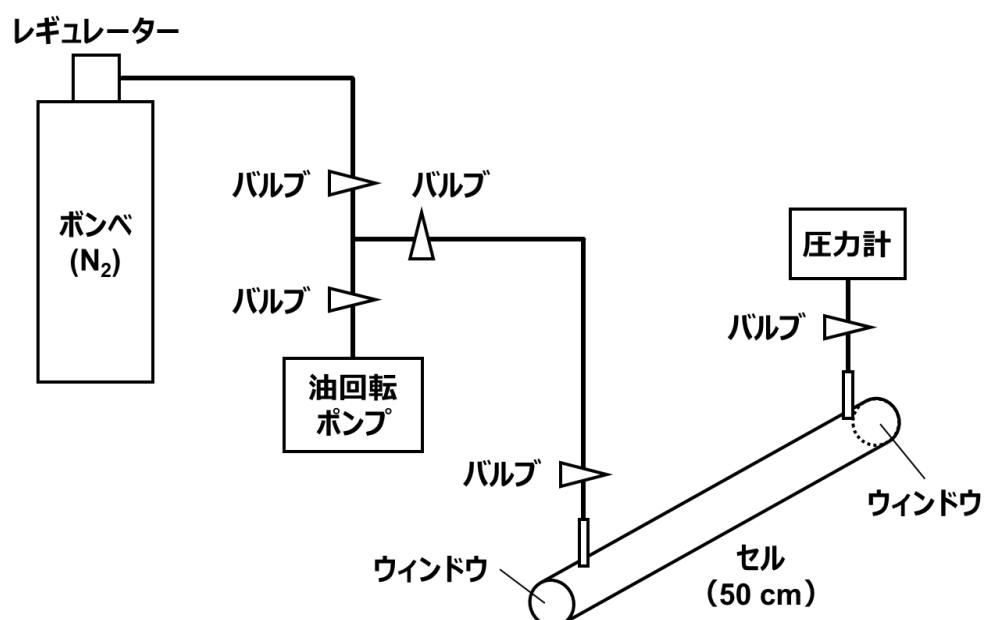


図 3.2-10 標準窒素試料の調整

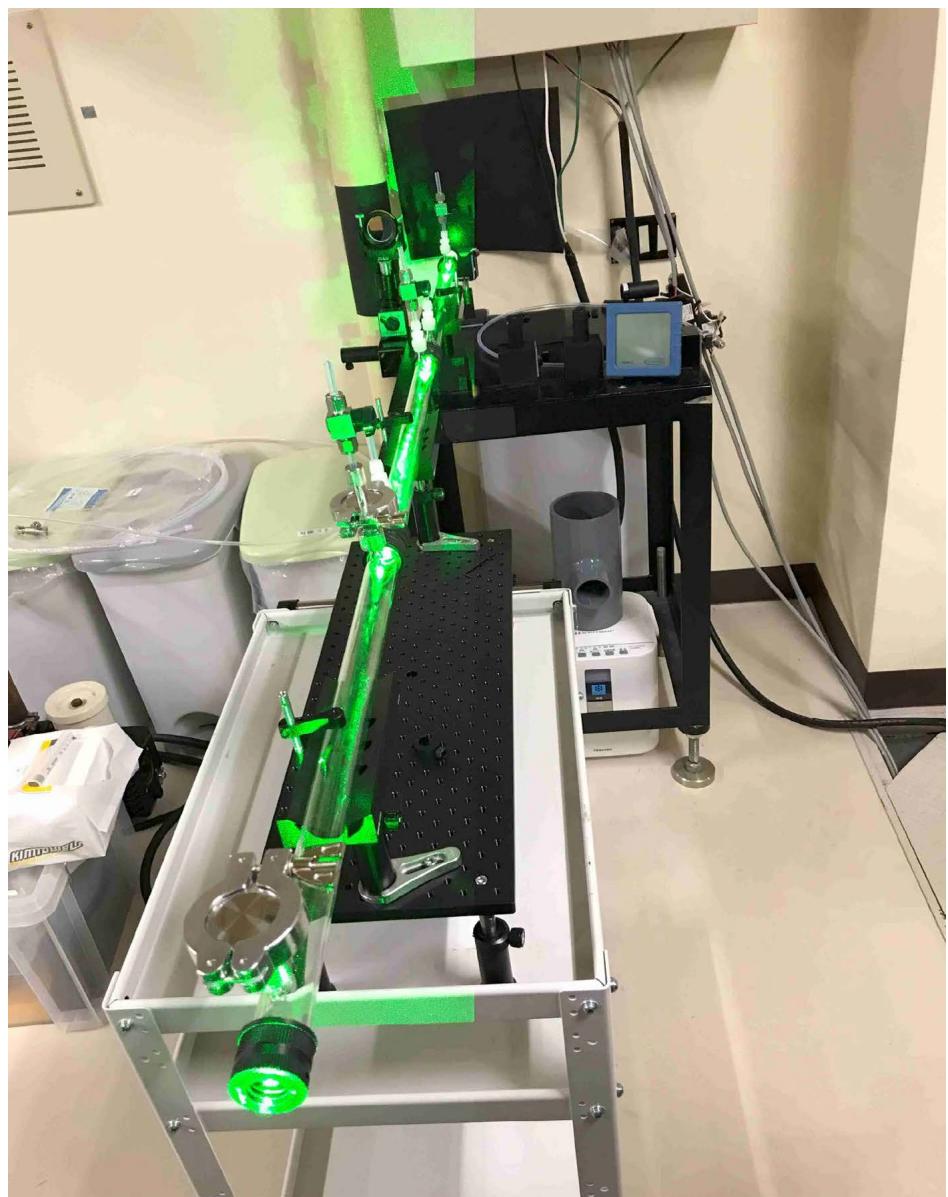


図 3.2-11 窒素濃度の定量性の検討のための試料配置

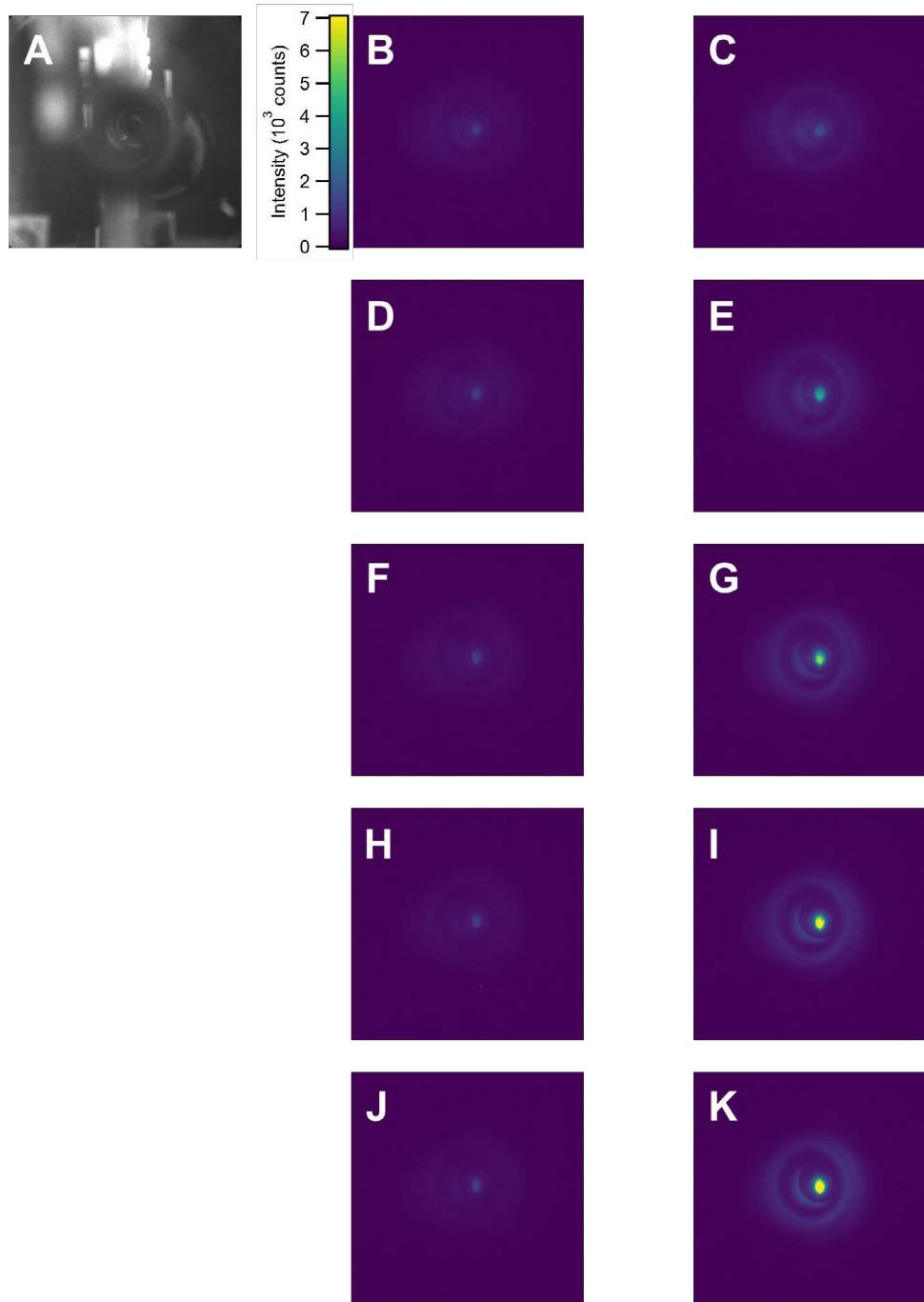


図 3.2-12 各窒素圧力に対して取得したラマンライダー画像と信号強度

(送信光波長 532 nm、パワー  $300 \text{ mJ pulse}^{-1}$  (10 Hz)、拡散なし、emICCD カメラの積算 1,000 回、ゲイン 10、ゲート幅 3 ns)

(A) 視野 (B) 0 Torr、580 nm フィルター (C) 0 Torr、607 nm フィルター (D) 210 Torr、580 nm フィルター (E) 210 Torr、607 nm フィルター (F) 401 Torr、580 nm フィルター (G) 401 Torr、607 nm フィルター (H) 603 Torr、580 nm フィルター (I) 603 Torr、607 nm フィルター (J) 800 Torr、580 nm フィルター (K) 800 Torr、607 nm フィルター

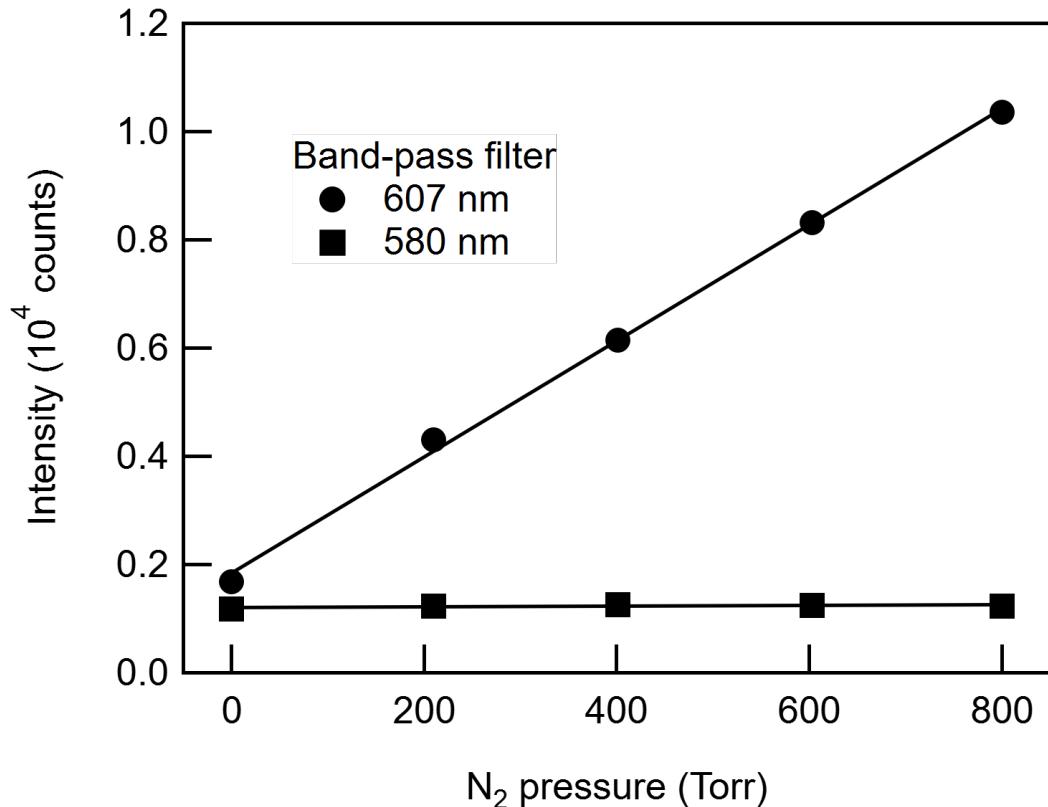


図 3.2-13 窒素圧力とラマン信号強度の検量線

### 3.2.2 シアログラフィー光学系の開発

#### (1) マイケルソン干渉光学系を利用したシアログラフィー光学系の開発

波長 532 nm の連続発振のレーザーと CMOS カメラを用いて、シアログラフィーの基礎検討を開始する。マイケルソン干渉計型のシアログラフィーを構築する。レーザーはレンズ対を利用して測定対象に拡散照射する。その反射画像のイメージを取り、ビームスプリッタに入射させ、光を二分岐する。二分岐された光は、それぞれミラーで反射して合波するが、片方のミラーをわずかに傾けることで二つの画像間でずれが生じ、干渉画像が得られる。高さ勾配がある壁面の画像を取得することで、開発したシアログラフィーの性能を評価し、令和 6 年度以降に開発するナノ秒パルスレーザー、ICCD カメラを利用したシアログラフィー技術開発の指針を与える。

図 3.2-14 に構築した計測装置を示す。装置は、レーザー光を拡大し検査面を照明するための照射光学系と照明された検査面を観測する干渉光学系からなる。

照射光学系は、单一周波数連続発振レーザー (coherent 社製、Verdi G5、波長 532 nm)、スペイシャルフィルター、レンズ ( $f=200$  mm)、虹彩絞りとミラーで構成される。レーザー光は、ミラー M1、M2 によってスペイシャルフィルターへ導光され、ガウシアンビームへと変換される。スペイシャルフィルターを通過したレーザー光は、レンズと虹彩絞りによって壁面でのビーム径が直径 10 cm になるよう拡大され、走査ミラー M3 を介して検査面へ照射される。

干渉光学系は、検査面を観測するためのミラー M4、ビームスプリッタとミラーチューブからなるシアリング干渉計、ズームレンズ、CMOS カメラから構成される。ズームレンズを用いて拡大した検査面を CMOS カメラのセンサー面に結像させる。このとき検査面の画像は、シアリング干渉計によって横ずれした干渉画像としてセンサー面で検出される。

走査ミラーと検査面の間で密度勾配や屈折率変化が生じた場合、それらは図 3.2-15 に示すような検査面をスクリーンとした影絵の形で観測される。本研究では、検査面に投影された影絵を CMOS カメラで撮影することで気体の可視化の達成を目指す。

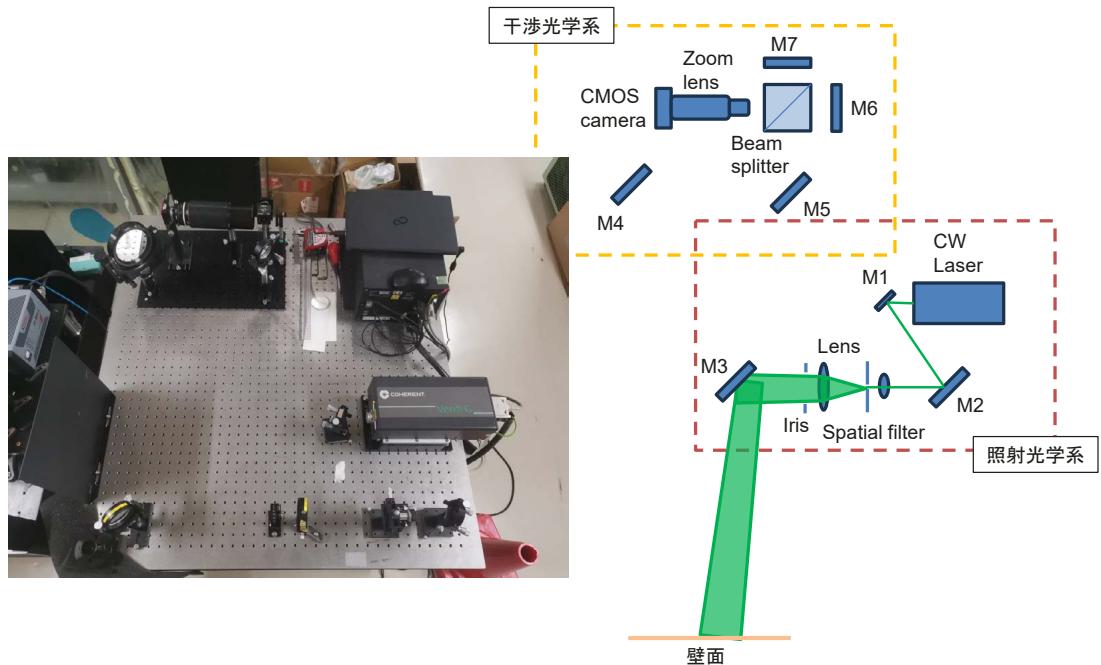


図 3.2-14 構築した計測装置

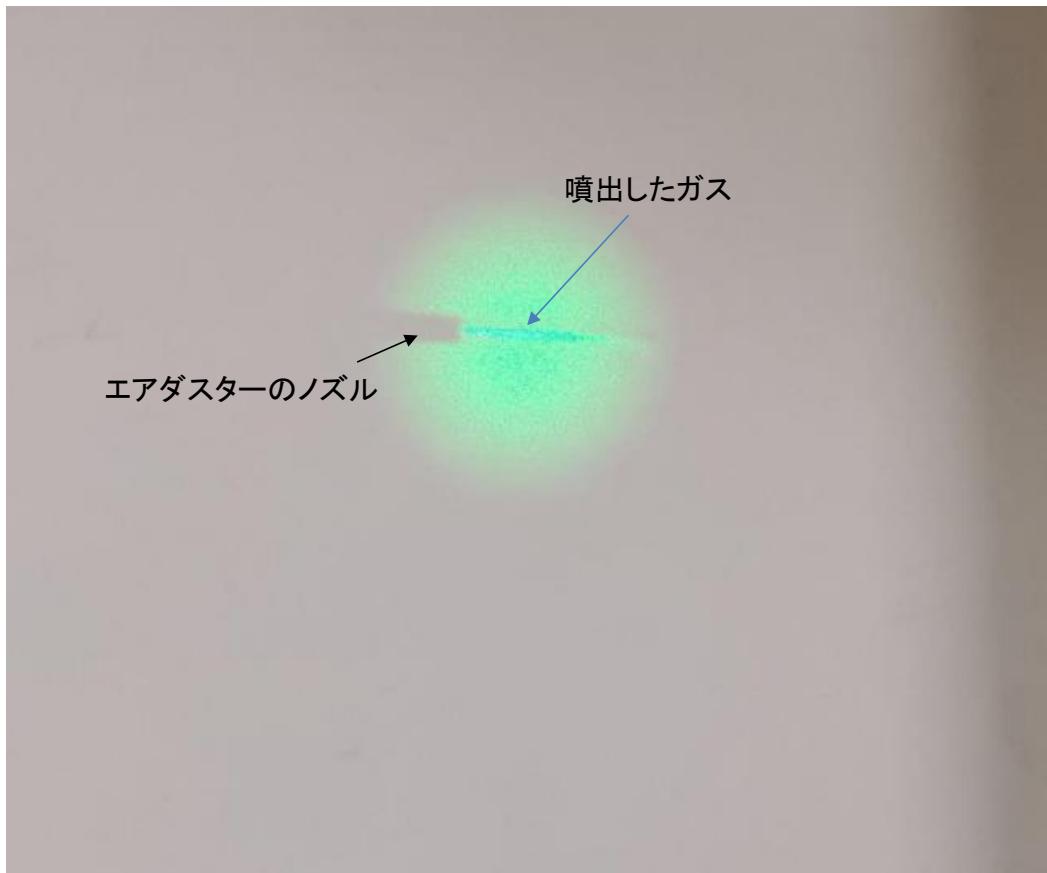


図 3.2-15 検査面に投影された影絵  
(エアダスターから噴き出したガスが密度勾配に応じた影を作る様子がわかる)

## (2) シアリング干渉計による影絵の取得

シアリング干渉計を用いて、影絵を撮影することができるかを確認するための試験を実施した。試験配置を図 3.2-16 に示す。照射光学系のミラーM3 の方向を変え、干渉光学系のミラーM4 に直接入射させ、カメラレンズの焦点位置を無限遠とした。ミラーM3 と M4 の間にエアダスターを配置し、ノズル先端が光路を遮ることで影になるようにした。

エアダスターは、市販（コーナンオリジナル、エアダスター）のスプレー缶タイプのものを用いた。ガスの種類は DME (ジメチルエーテル)、ノズルの内径が  $\phi 1.5$  mm のものを用いた。ノズル先端より約 25 mm 離れた位置での風速が約 1.0 m/秒となるよう噴射量を調節した。

図 3.2-17 にエアダスターを配置する前の画像を示す。左がビームスプリッタとミラーM6 間の光路を遮った場合の画像、中がビームスプリッタとミラーM7 間の光路を遮った場合の画像、右が干渉画像を示す。紙面縦方向にずれを生じさせており、二つのビームが重なる領域が干渉領域となり、干渉パターンが生成されている。

図 3.2-18 にエアダスターからガスを噴射したときの画像を示す。ビームの上部にガスがかかるように配置した。縦方向にずらしているため、噴出されるガスが二つみえている。上部にみえるガスは非干渉領域にあり通常のシャドウグラフである。画像中央のガスは干渉領域におけるシャドウグラフとなり、通常のシャドウグラフ同様、ガスの噴出する様子が影絵としてみることができることを確認した。

今回の条件では、体積流量  $7.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 、比重 1.63 の気体までは観測することが可能であることがわかった。これより少ない、または比重の小さい気体についてもガスの種類や流量を変えた実験を実施し、検出下限を確認する必要があると考えられる。

干渉の有無にかかわらず、噴出するガスの様子を影絵として可視化できることを確認し、コントラスト等にも大きく影響を与えることがないことがわかった。干渉技術を用いることで、本研究では実施しないが、位相シフト法などと組み合わせるなどして 3 次元的な形状を詳細に知ることができるなどの利点があり、干渉技術を用いたガス検知は有用であると考えられる。

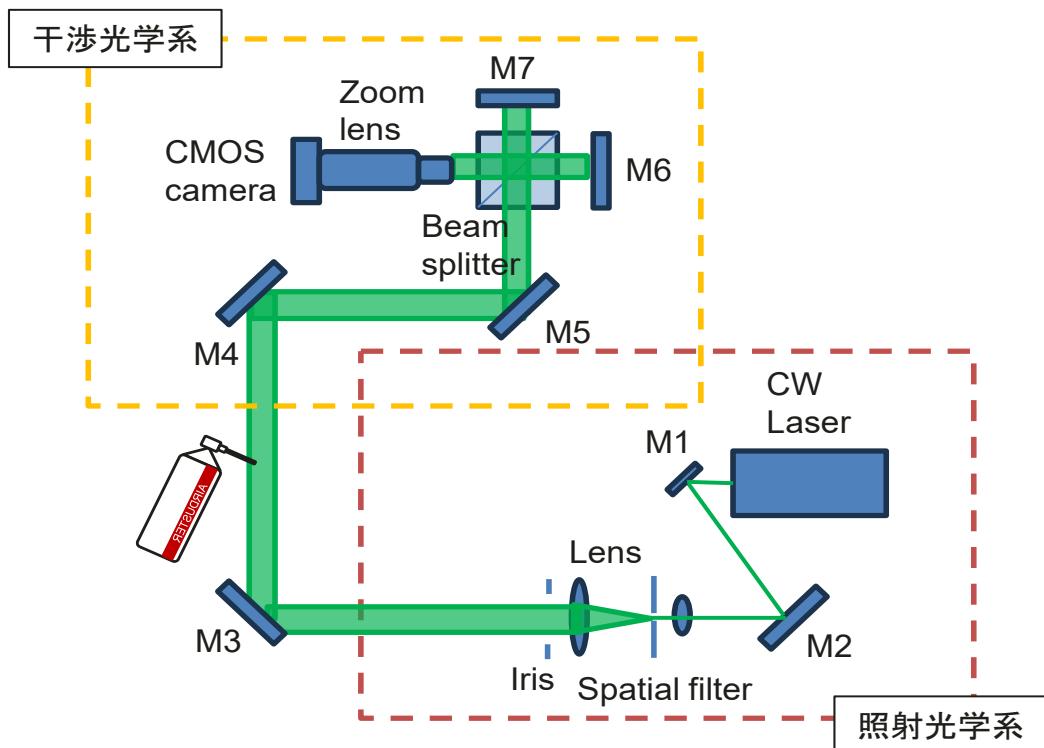


図 3.2-16 シアリング干渉計を用いた影絵取得のための試験配置

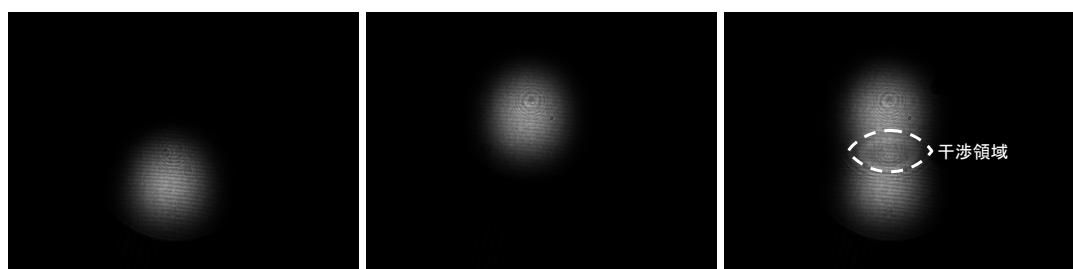


図 3.2-17 エアダスター配置前の CMOS カメラで撮影された画像  
 (左) ビームスプリッタとミラー M6 間の光路を遮った場合  
 (中) ビームスプリッタとミラー M7 間の光路を遮った場合  
 (右) 干渉画像

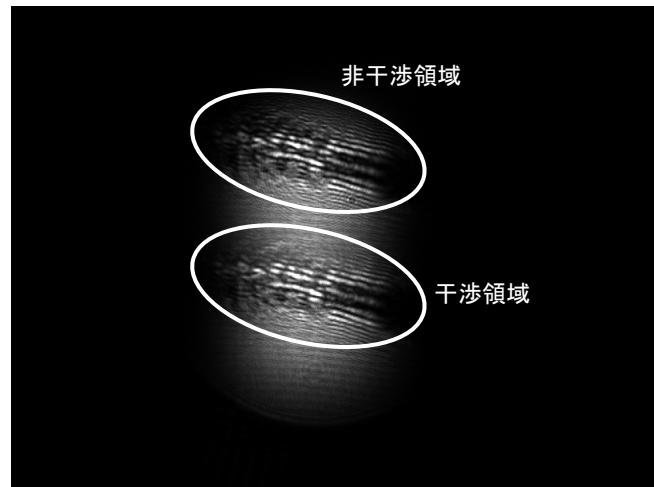


図 3.2-18 エアダスターからガスを噴射したときの画像

### (3) 壁面に投影された影絵の取得

図 3.2-14 に示した計測装置を用いて、気体漏洩に見立てたエアダスターから噴出されるガスを可視化するための実験を行った。

#### ・漏出箇所の壁面からの距離による影響

レーザー光は発散しながら検査面に照射されるため、検査面とガスの距離によって投影される影絵の拡大倍率が異なる。これらの影響を把握するため、検査面からの距離 20 cm の位置にエアダスターのノズルを配置した場合の影絵と距離 200 cm の位置にエアダスターのノズルを配置した場合の影絵を撮影した。レーザー光源の出力は 0.25 W とし、CMOS カメラの露光時間は 10 ミリ秒で固定した。

検査面からの距離 20 cm の位置にエアダスターのノズルを配置した場合の影絵を図 3.2-19 に、距離 200 cm の位置にエアダスターのノズルを配置した場合の影絵を図 3.2-20 に示す。

エアダスターのノズル先端位置以外の条件は固定であり、両図とも検査面の同じ範囲を観測している。エアダスターの位置が検査面に近い場合は、ガスの噴出する様子の全体像が把握しやすく、検査面から離れるほど投影の拡大倍率が上がるため細部の構造が把握しやすくなる傾向がみられる。実際の漏洩箇所と検査面の位置関係は不定であるため、計測範囲と求められる空間分解能に応じて、計測装置側のパラメータを設定する必要がある。

ガス部分のコントラストは、検査面からの距離が遠いほうがくなる傾向がみられた。



図 3.2-19 エアダスターから噴出するガスのシャドウグラフ（検査面から 20 cm）



図 3.2-20 エアダスターから噴出するガスのシャドウグラフ（検査面から 200 cm）

#### ・露光時間の影響

CMOS カメラは、設定した露光時間内にセンサーで感知した光の積算値を輝度とするため、露光時間より短い時間で起こる空間的な密度勾配の変化は、時間平均されて出力され捉えることができない。一方、素早い変化を捉えようと露光時間を短くすると光量が不足し、十分なコントラストの画像が撮影できないことが危惧される。これらの影響を把握するため、露光時間を 5 ミリ秒、10 ミリ秒、20 ミリ秒とした場合のシャドウグラフを撮影した。検査面とエアダスターのノズルの距離を 200 cm で固定し、レーザー光源の出力は 0.25 W とした。画像の明るさではなくコントラストの把握を行ったため、得られたシャドウグラフに正規化処理を行った。

露光時間を 5 ミリ秒にしたときのシャドウグラフを図 3.2-21 に、露光時間を 20 ミリ秒にしたときのシャドウグラフを図 3.2-22 に示す（露光時間 10 ミリ秒は図 3.2-20）。

それぞれの図において、ガスは一定に噴出しているようにみられ、エアダスターからのガスの噴出において、10 ミリ秒オーダーの形状変化は発生していないものと考えられる。

画像で一番輝度の高い領域は噴出したガスの中心部となっており、照明光とのコントラストは露光時間が短いほど低下する傾向がみられた。今回の条件で露光時間が一番短い 5 ミリ秒の場合でも、エアダスターから噴出するガスの可視化は十分に行えていると考えられる。このとき光源出力 0.25 W、ビーム径  $\phi 10$  cm、露光時間 5 ミリ秒であることより、単位面積当たりのエネルギーは約  $1.6 \times 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup> となる。3.2.1 項で構築したフラッシュライダーシステムの光源として用いているパルスレーザーの最大出力が 0.6 J であり、これを直徑 1 m まで広げた場合の単位面積当たりのエネルギーは、約  $7.6 \times 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup> となるため、エネルギーの観点では十分であると考えられる。

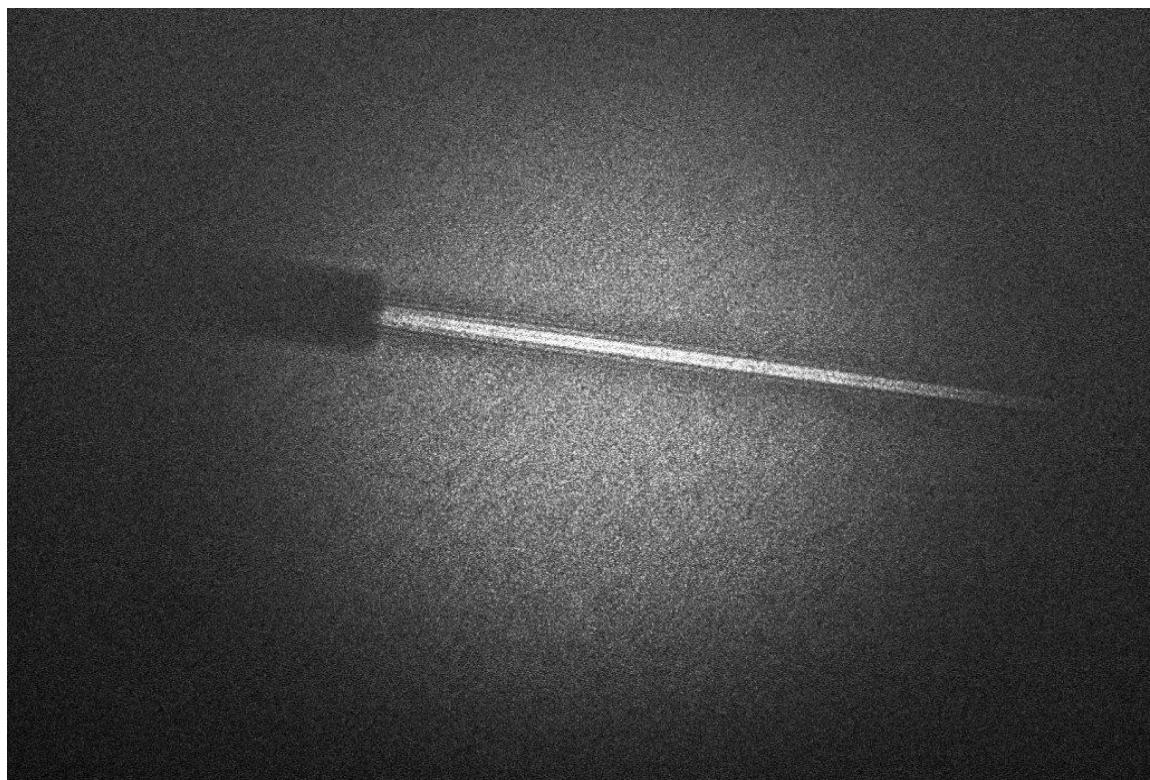


図 3.2-21 エアダスターから噴出するガスのシャドウグラフ（露光時間 5 ミリ秒）

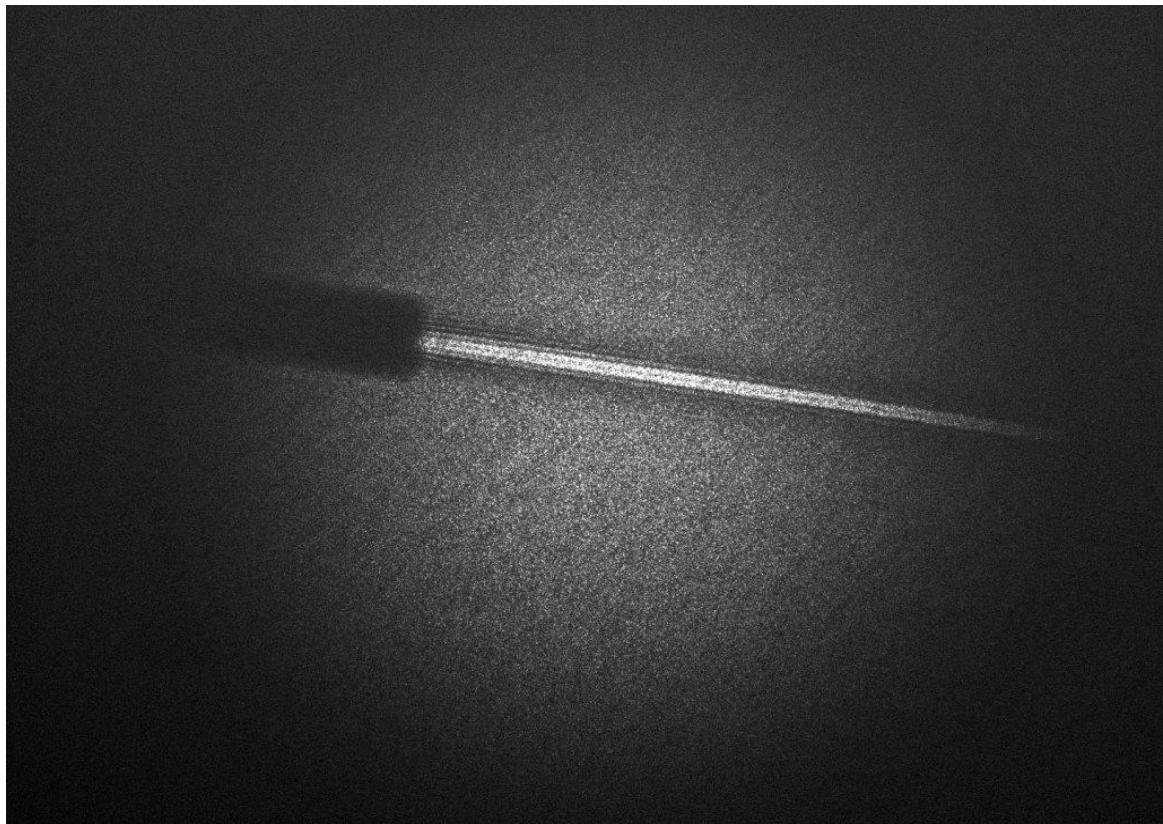


図 3.2-22 エアダスターから噴出するガスのシャドウグラフ（露光時間 20 ミリ秒）

### 3.2.3 まとめ

遠隔から広域監視するによって PCV からの気体漏洩を検知し、その位置を把握することを目的として、チューナブルバンドパスフィルター方式のハイパースペクトル型フラッシュライダーとマイケルソン干渉光学系を利用したシアログラフィー光学系の開発を実施した。

532 nm パルスレーザー、emICCD 干渉フィルターから構成されるチューナブルバンドパスフィルター方式のハイパースペクトル型フラッシュライダーを開発し、性能評価試験を実施することで適切なパラメータを得た。

構築したフィルター方式フラッシュライダーを用いて、水、窒素、酸素、水蒸気の測定を実施した。フィルターを適切に選択することで、各分子からのラマン信号のみを検出することに成功し、それぞれの空間分布像を得た。また、既知濃度の気体分子からのラマン散乱強度を測定し、検量線を予め作成しておくことで定量評価が可能であることを示した。

波長 532 nm の連続発振のレーザーと CMOS カメラを用いて、マイケルソン干渉計型のシアログラフィーを構築し、気体漏洩に見立てたエアダスターから噴出されるガスを可視化するための実験を行った。

シャドウグラフ法を用いることで、エアダスターから噴出するガスを可視化することができる事がわかった。得られたシャドウグラフをシアリング干渉計によって干渉させた場合でも同等の結果が得られた。干渉の有無によらずシャドウグラフは得られるが、干渉画像を用いた場合、位相シフト法などと組み合わせるなどして 3 次元的な形状を詳細に知ることができるなどの利点があり、干渉技術を用いたガス検知は有用であると考えられる。

照明光を発散光学系で拡大して照射する本方式を用いた場合、シャドウグラフを投影する対象となる検査面と漏洩箇所との距離によって空間分解能が異なることを確認した。実際の漏洩箇所と検査面の位置関係は不定であるため、計測範囲と求められる空間分解能に応じて、計測装置側のパラメータを設定する必要があることが示唆された。

CMOS カメラの露光時間が得られるシャドウグラフに与える影響を確認し、今回の実験条件では露光時間 5 ミリ秒に相当する光量があれば、噴出するガスを十分認識可能なシャドウグラフが取得できると考えられる。このとき単位面積当たりのエネルギーは約  $1.6 \times 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup> で、これはフラッシュライダーシステムの光源として用いたパルスレーザーを直径 1 m まで広げた場合の単位面積当たりのエネルギー約  $7.6 \times 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup> を下回っており、エネルギー面において両システムを組み合わせた運用の可能性を示している。

### 3.3 研究推進

12月5日に英知ワークショップ（福島リサーチカンファレンス・第一回ワークショップ）に参加し、他の事業採択者の発表を聞くとともに、研究の遂行や東電とのタイアップに関して有意義な意見を得た。また、自身の研究紹介に関しても小山 P0（プログラムオフィサー）はじめ、さまざまご意見とコメントをご示唆いただいた。

12月18日の中間フォローでは、原子力安全研究協会 森様、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）岡田様及び小山 P0 に千葉大学へお越しいただき、事業研究の進捗を報告するとともに有意義な議論を行い、コメントと知見をいただいた。

#### 4. 結言

本研究では、ライダーをはじめとする遠隔光計測システムによる漏洩箇所の位置特定とその位置における漏洩の可視化手法を開発し、課題解決を試みることを目指している。

【テーマ 1】開発するミー散乱・ラマン散乱ライダーでは視線方向に距離分解ができ、建屋内での壁面・配管とその周囲の気相分子（窒素  $N_2$ 、水蒸気  $H_2O$  等）及び浮遊粒子（エアロゾル）からの信号を分離して観測することを目的としている。

【テーマ 2】レーザー光と高感度画像センサーを組み合わせたフラッシュライダーと光波の干渉を利用した高感度のシアログラフィーによって、漏洩箇所の画像化・可視化を図り、漏洩量の推定を行うことを目的としている。

【テーマ 1】では、充填気体が破損箇所から漏れ出る事例を想定し、小型可搬型のライダーを構築した。ラマン散乱光を計測することで気体の漏洩位置、種類、量を遠隔で検出できる 3 チャンネルのラマンライダーを作製した。

ライダーの特性を確認するため繰り返し周波数 50 kHz の設定で大気や加湿器で発生させた水の測定を行った。その結果、大気中のエアロゾルや水、窒素の信号をそれぞれ計測し計測日の気象条件との一致を確認できた。また、ハードターゲットを含む場合もライダーのパルスによる分解能 1.42 m 以上の間隔があればハードターゲットと区別してラマン散乱が検出できることを確認した。

さらに、発生させる水の量変化にともないライダーのカウント数が変化することを確かめた。加湿器による水の噴出量とライダーカウント数は線形関係であり、決定係数は 0.98 で高い相関を示した。

しかし、水ラマンと比較して大気中に多く存在する窒素の漏洩を測定することは難しく、現時点では光出力を 12.1 W に上げたうえで、測定時間を 20 秒に増やし窒素がない信号を引く補正が必要である。この処理を行った際、ライダーの窒素の漏洩箇所を変化させたことによるピーク位置の変化を確認した。また、漏洩量の異なるデータの差を取ることで明確な信号ピークを確認した。

今後は、窒素の揺らぎの差を取ることによる窒素の漏洩検出を目指し、窒素の噴出量や計測時間を変えた実験や複数回計測したデータの最適な解析方法などを模索、距離や物質の量に対する検出下限や差分を取った際の窒素の定量性の評価方法を検討していく予定である。

【テーマ 2】では、チューナブルバンドパスフィルター方式のハイパースペクトル型フラッシュライダーとマイケルソン干渉光学系を利用したシアログラフィー光学系を開発した。

532 nm パルスレーザー、emICCD チューナブルバンドパス干渉フィルターから構成されるチューナブルバンドパスフィルター方式のハイパースペクトル型フラッシュライダーを開発し、基本性能を評価した。これにより、送信レーザーの拡散照射に必要な平凹レンズの焦点距離、また、ICCD カメラの積算数やゲインの影響などが明らかになり、実効的な測定条件が示唆された。

構築したフィルター方式フラッシュライダーを用いて、水、窒素、酸素、水蒸気の測定を実施した。フィルターを適切に選択することで各分子からのラマン信号のみを検出することに成功し、それぞれの空間分布像を得た。また、既知濃度の気体分子からのラマン散乱強度を測定し、検量線を予め作成しておくことで定量評価が可能であることを示した。

マイケルソン干渉光学系を利用したシアログラフィー光学系の開発に関しては、波長 532 nm の連続発振のレーザーと CMOS カメラを用いて、マイケルソン干渉計型のシアログラフィーを構築し、気体漏洩に見立てたエアダスターから噴出されるガスを可視化するための実験を行った。

シャドウグラフ法を用いることで、エアダスターから噴出するガスを可視化することができるところがわかった。得られたシャドウグラフをシアリング干渉計によって干渉させた場合でも同等の結果が得られた。干渉の有無によらずシャドウグラフは得られるが、干渉画像を用いた場合、位相シフト法などと組み合わせるなどして 3 次元的な形状を詳細に知ることができるなどの利点があり、干渉技術を用いたガス検知は有用であると考えられる。

CMOS カメラの露光時間が得られるシャドウグラフに与える影響を確認し、今回の実験条件では、露光時間 5 ミリ秒に相当する光量があれば噴出するガスを十分認識可能なシャドウグラフが取得できると考えられる。このとき単位面積当たりのエネルギーは約  $1.6 \times 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup> で、これはフラッシュライダーシステムの光源として用いたパルスレーザーを直径 1 m まで広げた場合の単位面積当たりのエネルギー 約  $7.6 \times 10^{-5}$  J/cm<sup>2</sup> を下回っており、エネルギー面において両システムを組み合わせた運用の可能性を示している。

## 参考文献

- [1] B. Djezzar. Eds., Ionizing Radiation Effects and Applications, IntechOpen, Chapter 3, 2018.
- [2] T. Somekawa, et al., Flash resonance Raman lidar for SO<sub>2</sub> gas leak detection, Optics Communications, vol. 513, 2022, 128083.
- [3] Q. Zhao, X. Dan, F. Sun, Y. Wang, S. Wu and L. Yang, Digital Shearography for NDT: Phase Measurement Technique and Recent Developments, MDPI Applied Sciences, vol. 8, 2018, 2662.
- [4] Y. Y. Hung, and H. P. Ho, Shearography: An optical measurement technique and applications, Materials Sci. and Eng. vol. 49, 2005, pp. 61-87.
- [5] U. Wandinger, Lidar: Range-Resolved optical Remote Sensing of the Atmosphere, Claus Weitkamp Ed. Raman Lidar Springer Series in Optical Sciences 102, 2005, p. 252.
- [6] Spectra Physics Talon-355-12 スペックシート,  
[https://www.spectra-physics.com/mam/celum/celum\\_assets/resources/Talon-Datasheet.pdf?3](https://www.spectra-physics.com/mam/celum/celum_assets/resources/Talon-Datasheet.pdf?3)  
(参照: 2024年3月15日).
- [7] 松見豊, 光資源を活用し、創造する科学技術の振興—持続可能な「光の世紀」に向けてー, 第1章光と地球環境,  
[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/attach/1333534.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/attach/1333534.htm)  
(参照: 2024年3月15日).
- [8] 池羽田晶文他, 遠紫外分光法による水及び水溶液の分析, 分析化学, vol. 60, 2011, pp. 19-31.
- [9] 気象庁, 過去の気象データ検索 1時間ごとの値,  
[https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/view/hourly\\_s1.php?prec\\_no=45&block\\_no=47682&year=2024&month=01&day=19&view=p1](https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/view/hourly_s1.php?prec_no=45&block_no=47682&year=2024&month=01&day=19&view=p1) (参照: 2024年3月15日).
- [10] 染川智弘他, ラマンライダーによる数値予報モデルへの水蒸気同化, 日本リモートセンシング学会誌, vol. 33. no. 5, 2013, pp. 360-366.



