

呼気診断や環境モニタリングに 応用可能な光ファイバーガスセンサー

自然科学研究機構 核融合科学研究所
ヘリカル研究部 高温プラズマ物理研究系
助教 上原 日和

2022年3月11日

従来技術とその問題点1

【従来の主なガスセンサー】

- 半導体方式 日本では主流
ガス吸着による抵抗値の変化を見る
- 接触燃焼式
ガス吸着による抵抗値の変化を見る
- 電気化学式
酸化還元反応による電流の変化を見る
- 光ファイバーセンサー(赤外式以外)
ガス吸着による感応層の屈折率変化を見る

吸着や反応を介するため、応答速度に難

計測部が変質するため短寿命

計測可能なガス種が限られる

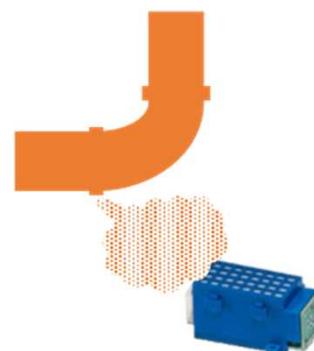
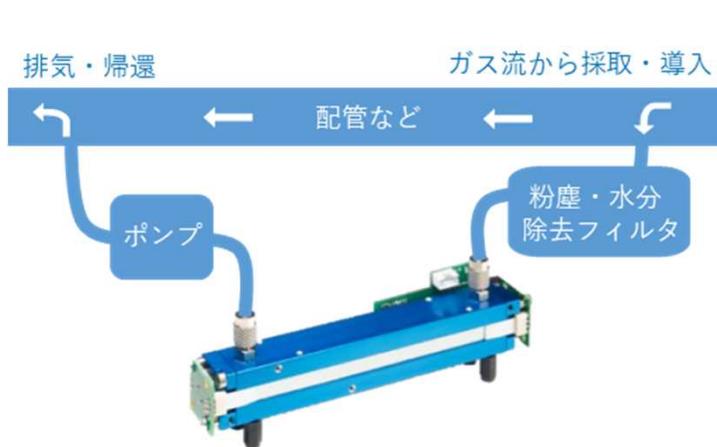
-
- **赤外式**：分子の赤外吸収を利用
ガスの存在を直接的に観測
欧米ではシェアが増加(日本も今後追従)



高速で高感度
計測部が変化しない
多くのガス種に対応

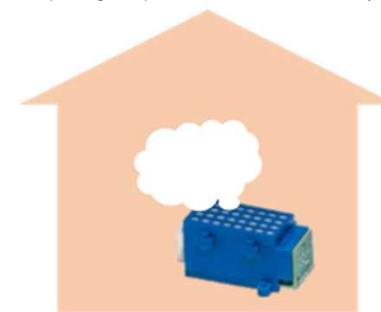
従来技術とその問題点2

【一般的な赤外式ガスセンサー】 NDIR(非分散型赤外吸収)方式



漏洩可能性がある
配管近くに設置しリーク検出

※アイ・アール・システム社HPより



周辺空間のガスを測定

自由空間におけるセンシング



赤外式の光ファイバーセンサー

(光ファイバーをセンサー化)

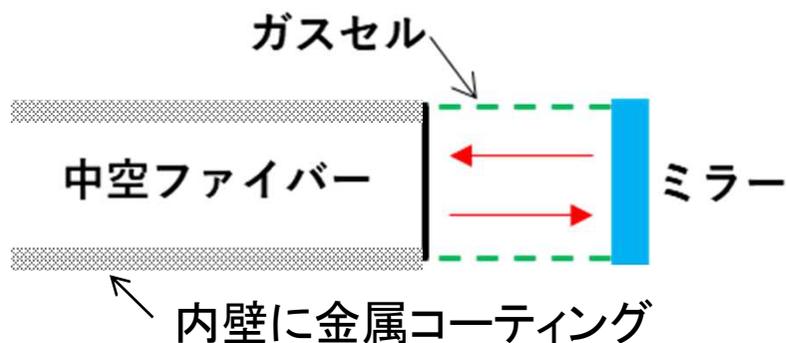
- ・遠隔性
 - ・局所的なセンシング
 - ・軽量、省スペース
 - ・メンテナンス性
- を付与

一般的な光ファイバー(石英ガラス製)では赤外光を伝送できない・・・

従来技術とその問題点3

近年、特殊ファイバーでの赤外式の光ファイバーセンサーが実証されている。

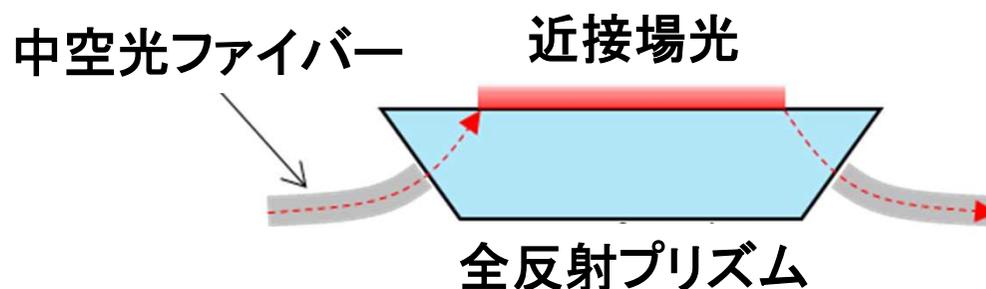
【中空光ファイバー】



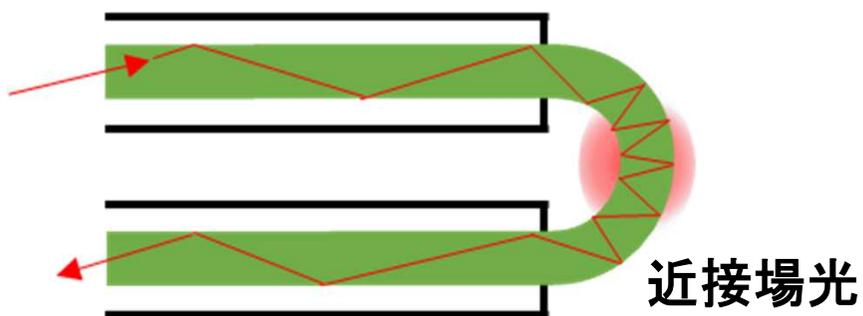
※Med. Phys. 47, 5523 (2020).

【中空光ファイバー + 全反射(ATR)法】

ATR: attenuated total reflection



【カルコゲン化物ガラス光ファイバー】



※Sensors 18, 995 (2018).

利点:

～遠赤外まで伝送可能

問題点:

- ・伝送損失が大きい
(ファイバー長くできない)
- ・曲げ損失が大きい
- ・多点計測が難しい

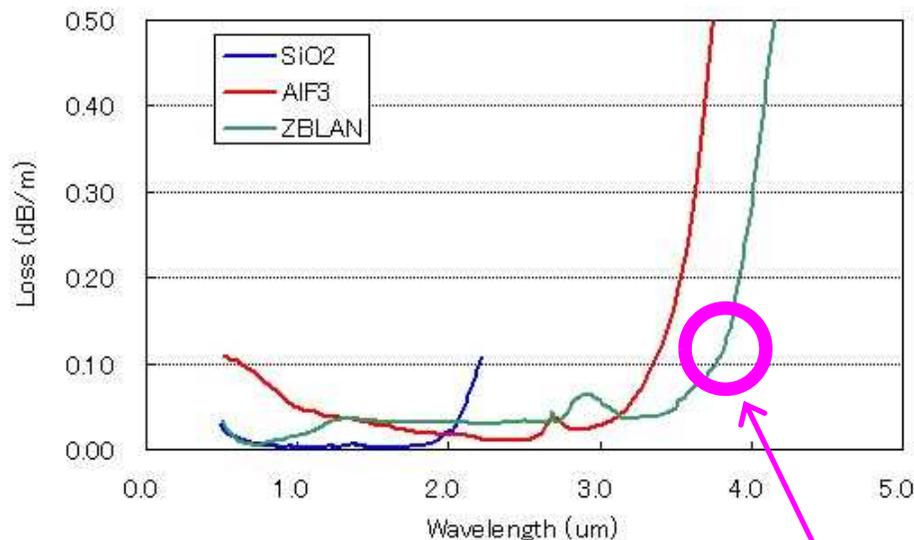
フッ化物ファイバーの特徴

波長2~4 μm ではフッ化物ファイバーが最も低損失、曲げ損失 小

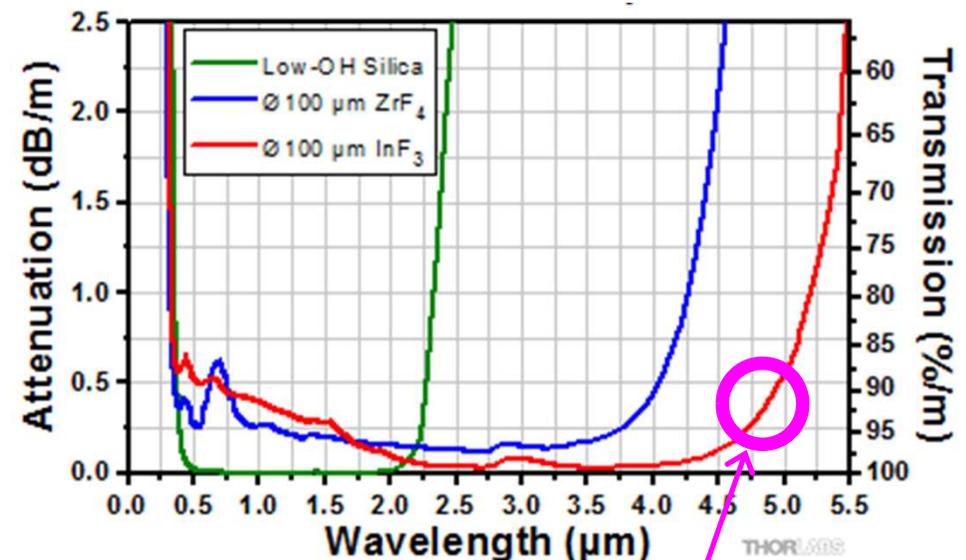
伝送損失 < 0.05 dB/m \Rightarrow 長さ1 mで99%透過、長さ10 mで90%以上透過
(カルコゲナイドファイバー: 0.2~1 dB/m)

許容曲げ半径 < 10 cm (中空ファイバー: 50 cm程度)

伝送損失の例



※ファイバーラボ社HPより

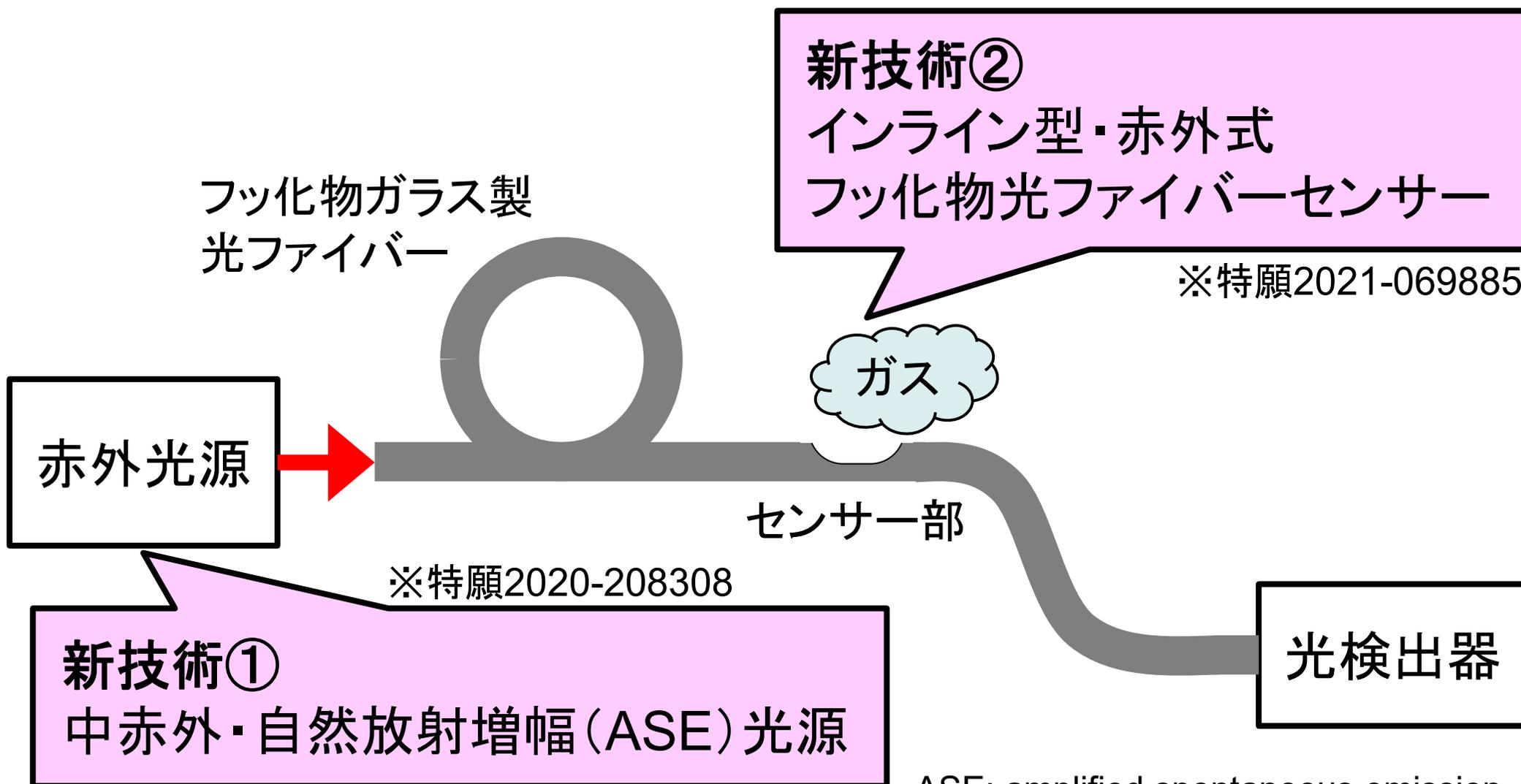


※ソーラボ社HPより

本研究で実際に使用したZBLANファイバー、フッ化インジウムファイバー
(ジルコニウム系)

新技術の概要

独自開発した広帯域赤外光源を用いた
フッ化物赤外光ファイバーセンサーを発明！

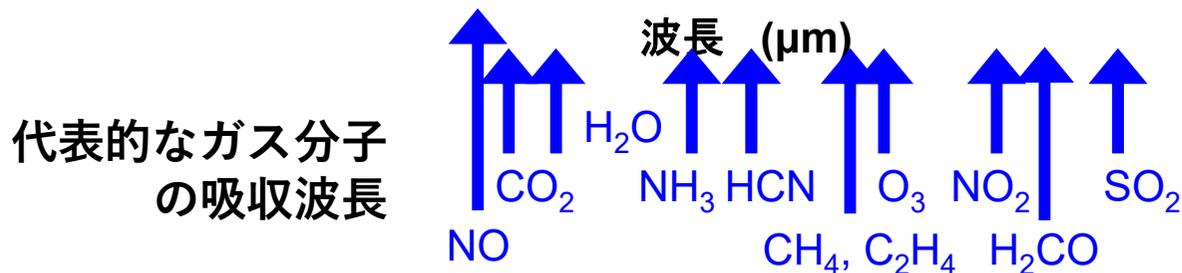
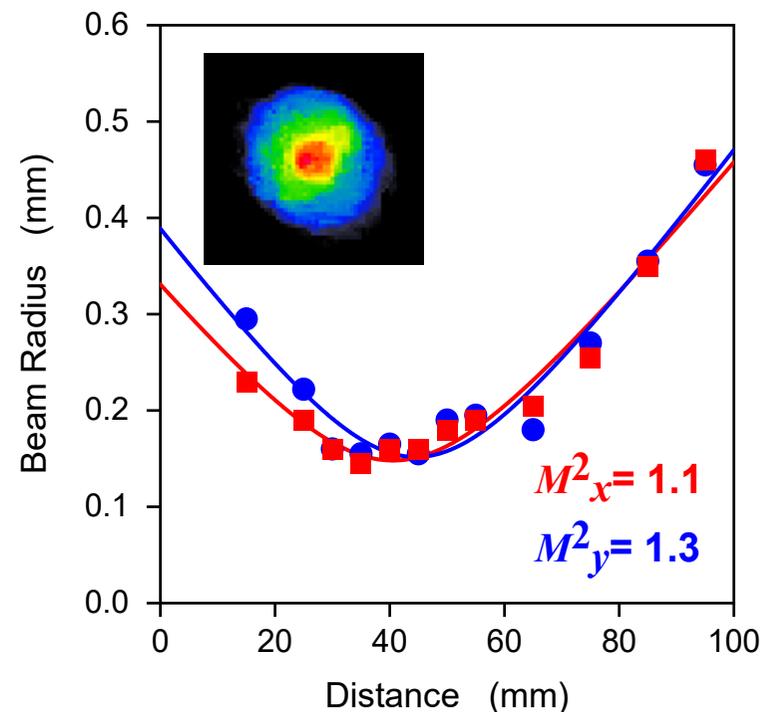
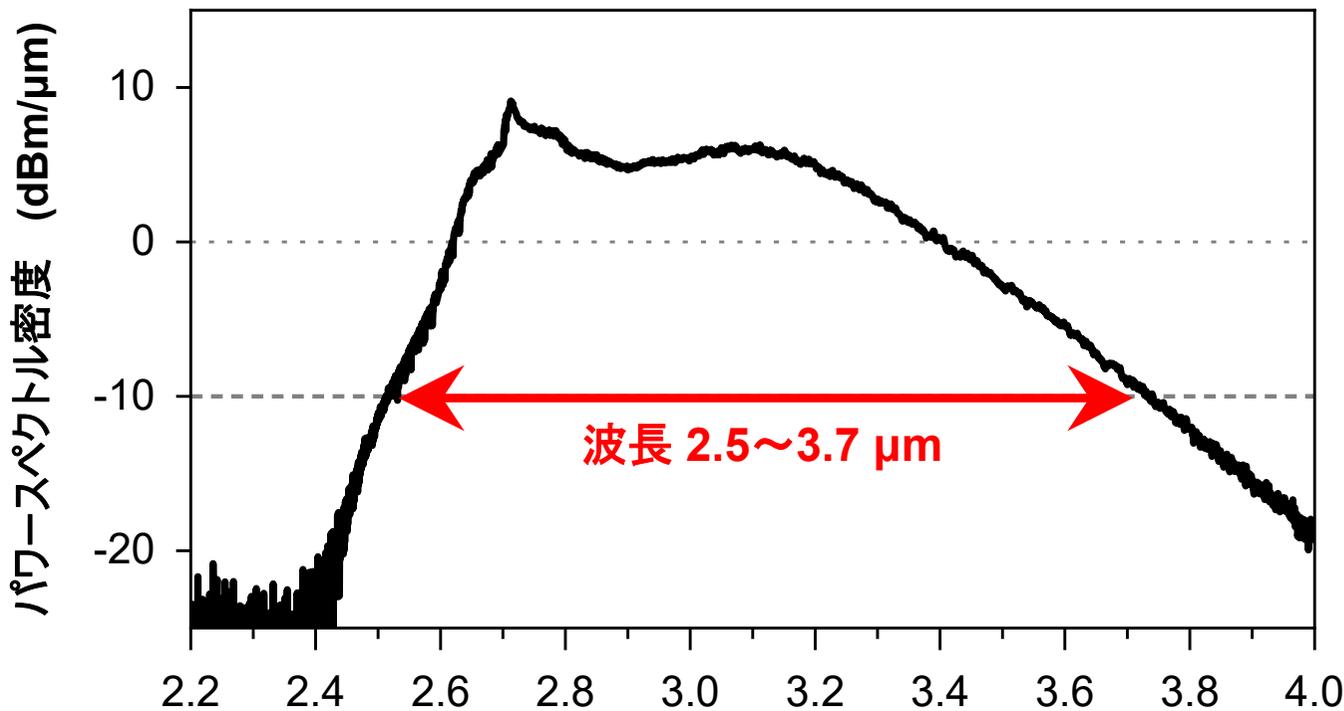


ASE: amplified spontaneous emission

ASE光源：特徴1

【スペクトル特性】

【ビーム品質】



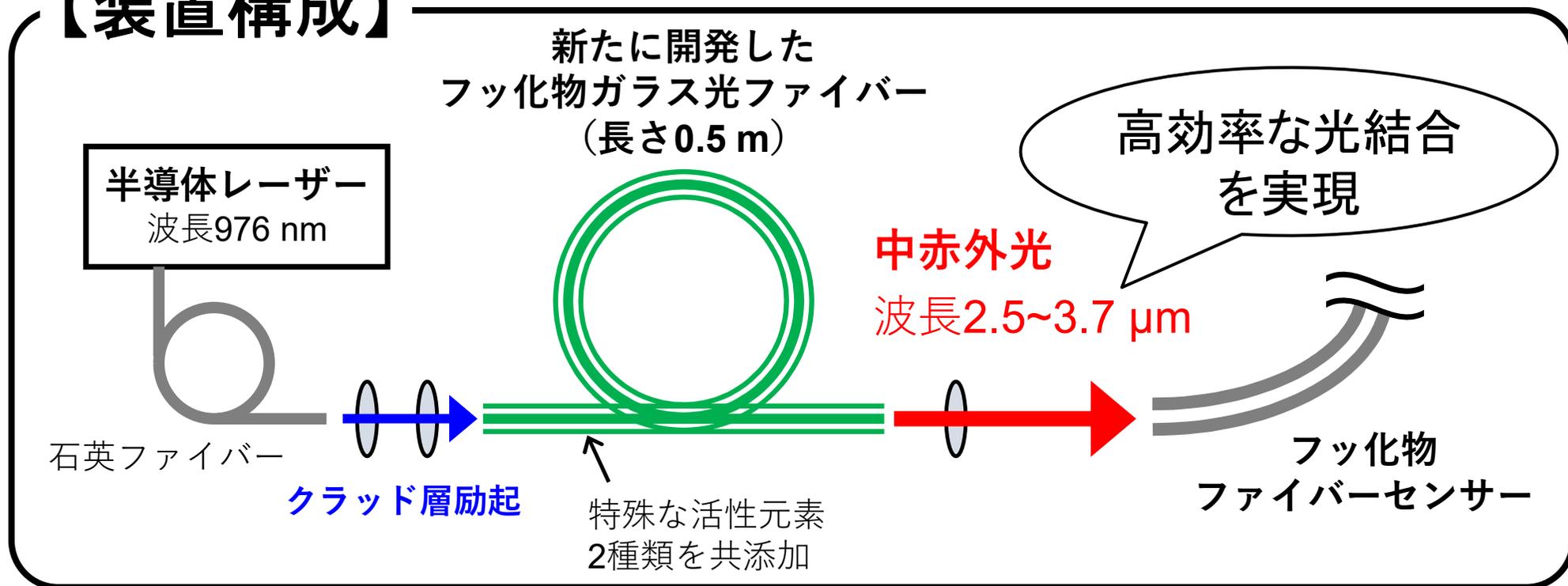
※発表者ら、Sci. Rep. 11, 5432 (2021).

- ・従来になく広帯域 (波長2.5~3.7 μm)
- ・高出力 (~3 mW)

- ・高ビーム品質
ファイバー結合可能
- ・高安定 (標準偏差<0.1%)

ASE光源：特徴2

【装置構成】



・小型、軽量(スマートフォン大が可)

・低コストで作製可(20万円前後)



全ファイバー化できる(特殊ファイバー融着)

※発表者ら、特願2018-184101

※発表者ら、Opt. Lett. 44, 4777 (2019).

【従来技術との比較】

- ・タングステンランプ
: 光ファイバー結合できない
- ・スーパーコンティニウム光源
: (例) 波長1~5 μm 、出力1 W
: 500~1000万円、ビデオデッキ大

フッ化物ファイバーセンサー：特徴1

【センサーの構成】

光ファイバー材料：ZBLAN、フッ化インジウム系

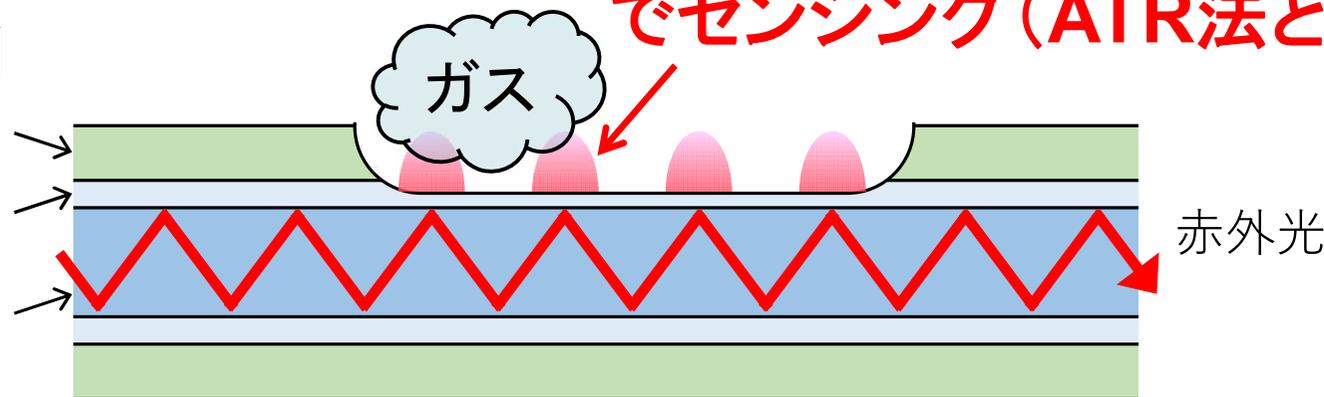
**近接場光(エバネッセント光)
でセンシング(ATR法と同じ原理)**

サイズの例

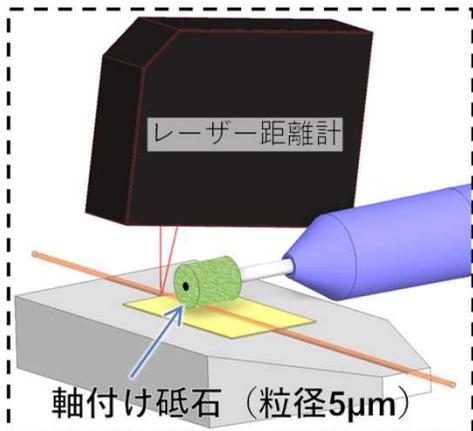
樹脂被覆 (Φ400 μm)

クラッド (Φ200 μm)

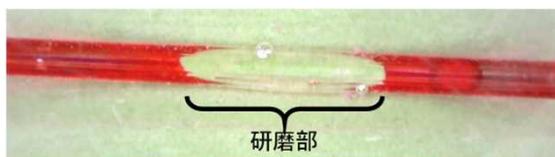
コア (Φ150 μm)



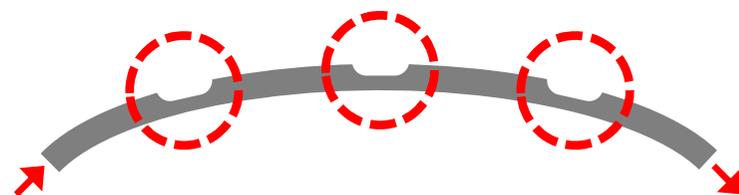
【研磨作業】



クラッド層
わずかに残す

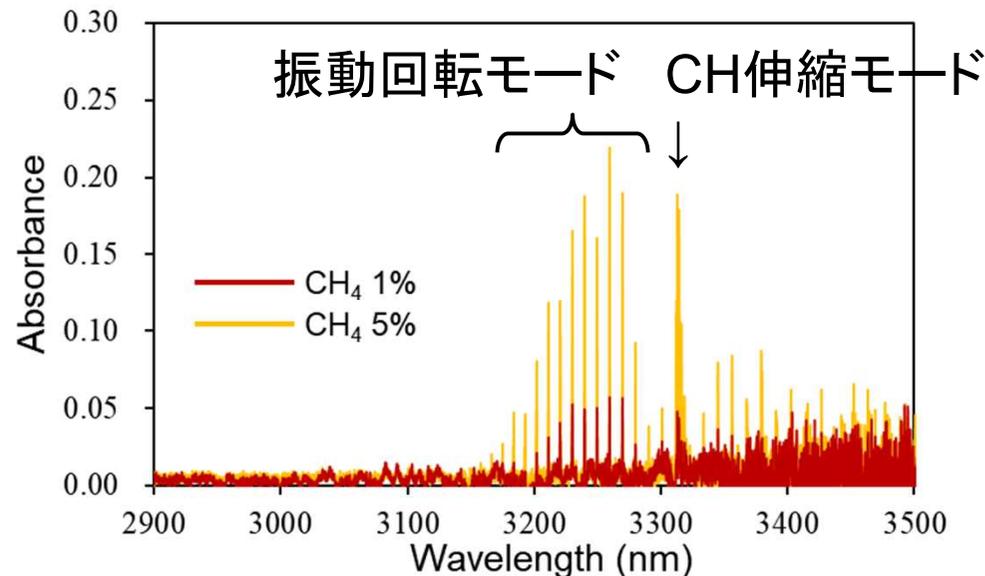
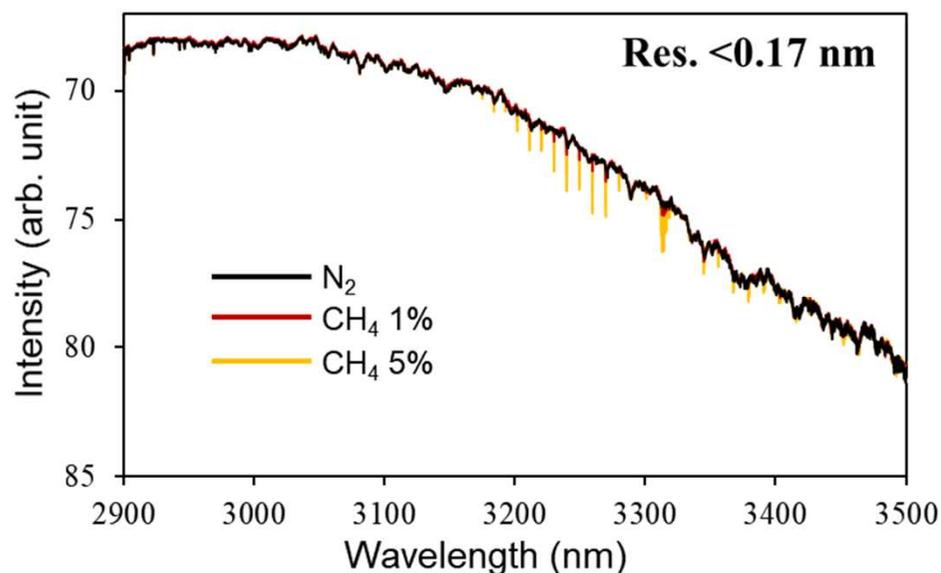


- ・側面研磨のみ(融着など不要)
- ・完全なインライン型のセンサー
- ・多点計測が容易に



フッ化物ファイバーセンサー：特徴2

【メタンガスセンシングの例】



※発表者ら、Sens. Actuators B 351, 130904 (2022).

研磨長さ10 mmで、自由空間長さ1.8 mm相当の吸収量！

【現状の感度】

赤外分光検出器でのスペクトル測定 ⇒ センサー部
長さ10 mmで約**1000ppm**

【改善策】 波長フィルター + 単一チャンネル検出器 (高速応答)

⇒ 長さ10 mm × 10箇所 で 1ppmの見積もり

フッ化物ファイバーセンサー：特徴3

【特徴まとめ】

利点

- ・高速応答
- ・高感度化が可能
- ・多様なガス種に対応
- ・計測部の変質がない
- ・伝送損失が低く、長尺化できる
- ・許容曲げ半径が小さい

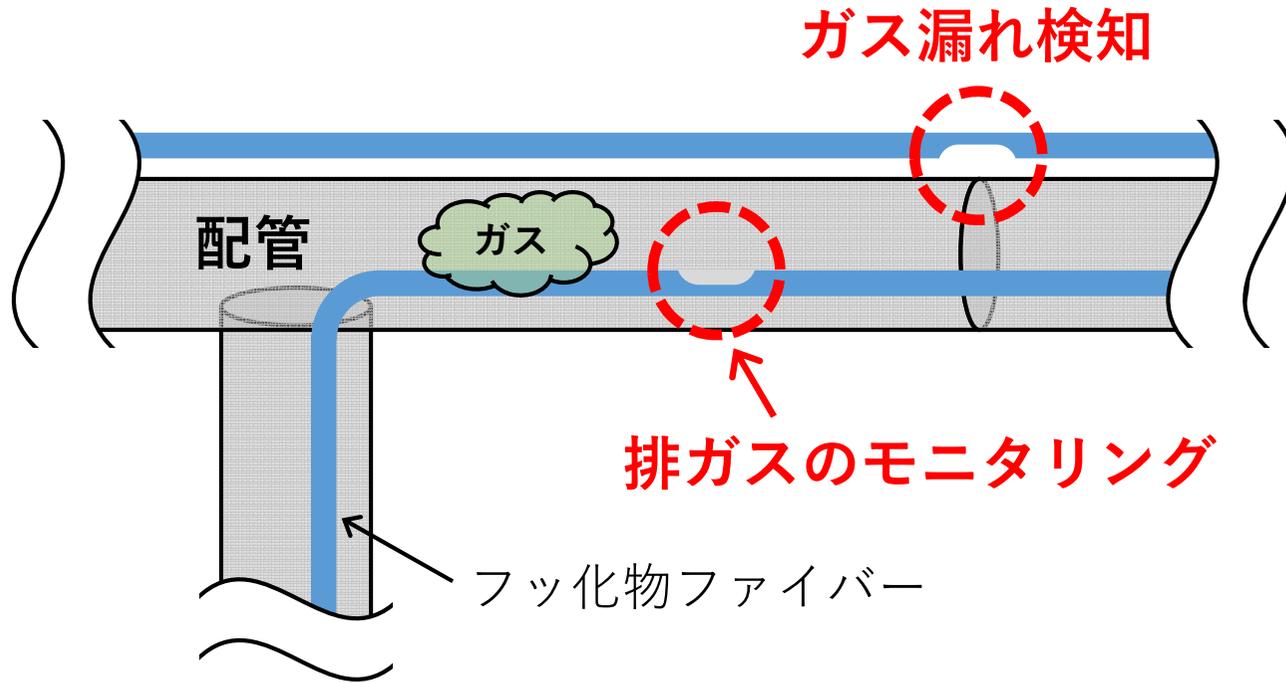
応用形態

- リアルタイム計測
様々な計測対象(後述)
- 遠隔性が求められる計測
狭小空間への敷設
- 高波数側のみターゲット
中空ファイバーとの差別化

欠点

- ・波長5 μm (波数2000 cm^{-1}) まで
低波数側での赤外センシング×

想定される用途1 (工業、家庭)



【場所】

- ・工場施設
- ・配管
- ・家庭、オフィス

【優位点】

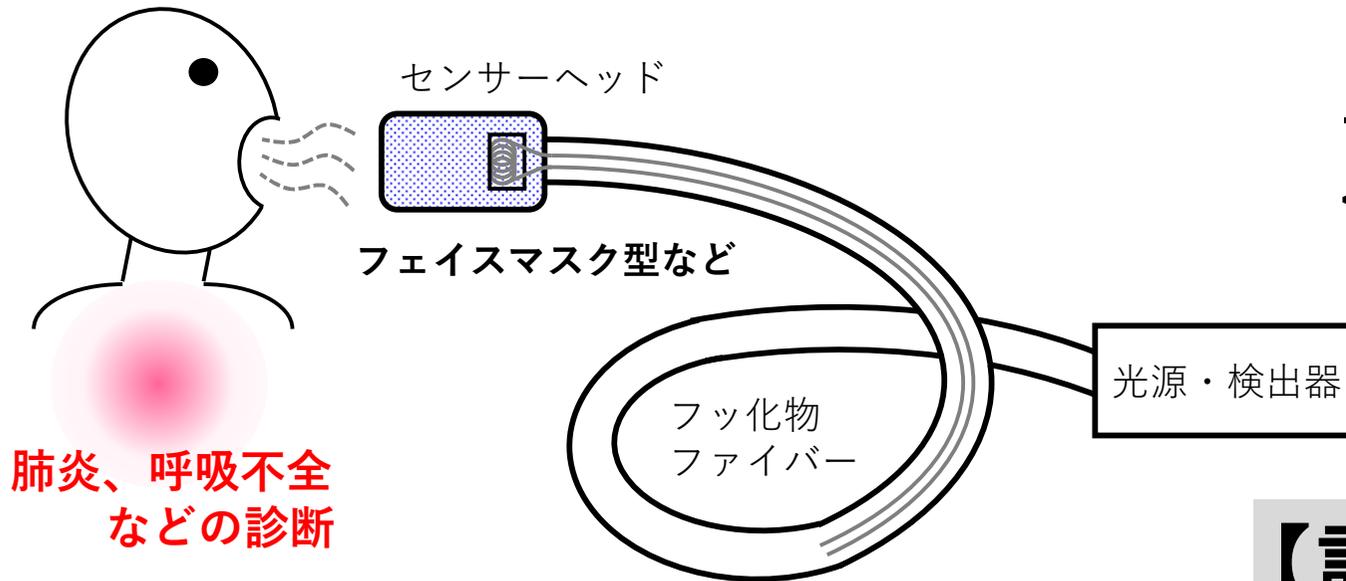
- ・遠隔性が求められるケース
- ・高い敷設性
- ・局所的なモニタリング

【計測対象の例】

- ・排ガスモニタリング
 - CO₂ (波長4.2 μm)
 - NO₂ (3.5 μm)
 - SO₂ (3.7 μm)
- ・可燃性ガス漏れ検知
 - CH₄ (3.2 μm)
 - C₃H₈ ()
- ・毒性ガス検知
 - NH₃ (2.9 μm)
 - CO (4.7 μm)
 - HCN (3.1 μm)
- ・住環境
 - H₂CO (3.5 μm)
 - CO₂ (4.2 μm)
 - H₂O (2.8 μm)

想定される用途2 (医療)

【呼気分析の形態の概念図】



一酸化窒素の場合、
<100 ppbの感度が必要

【計測対象の例】

- ・肺炎、喘息などの診断
NO (波長2.7 μm)
CH₄ (3.2 μm)
NH₃ (2.9 μm)
- ・健康管理など
CO₂ (4.2 μm)
H₂O (2.8 μm)

【優位点】

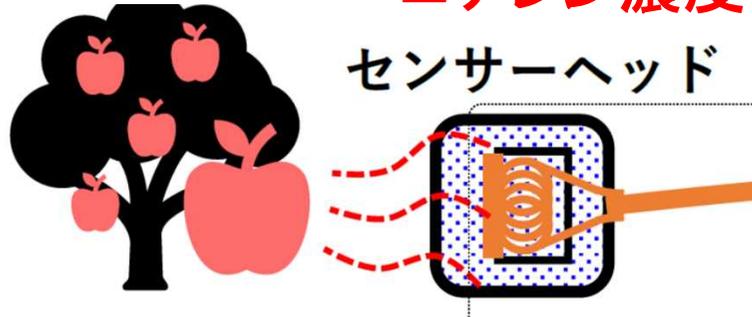
- ・軽量、可搬、低侵襲
- ・リアルタイム性 (呼吸に合わせて)
迅速診断
- ・多成分計測が可能
- ・交換部品がない

想定される用途3 (農業)

【農作物管理の応用の概念図】

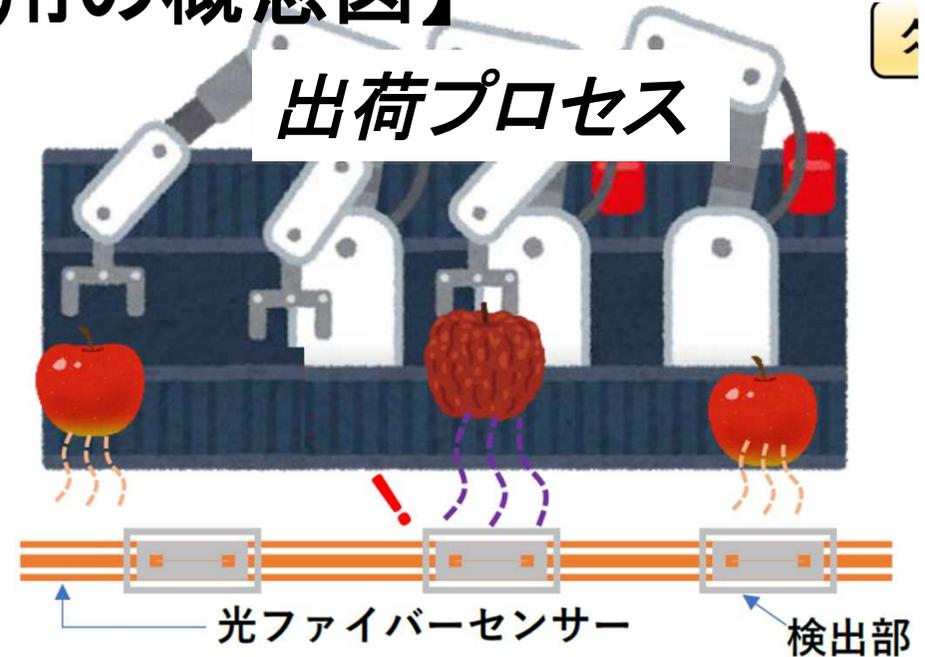
収穫プロセス

エチレン濃度の個別管理



センサーヘッド

出荷プロセス



光ファイバーセンサー

検出部

【優位点】

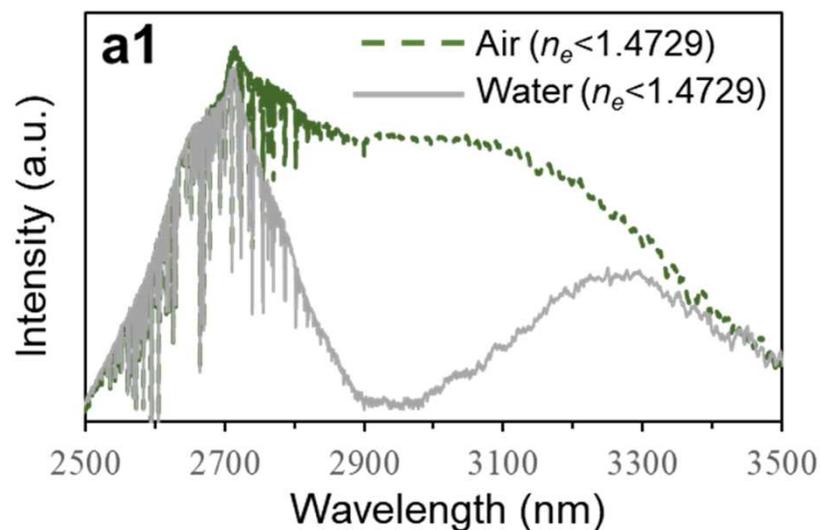
- ・局所的なセンシング
 - ↳ 農作物を個別に管理
- ・可搬性
 - ↳ 収穫の判断
- ・リアルタイム性
 - ↳ 流れ作業での出荷判断
 - ↳ 大量生産

【計測対象】

- ・農作物の成熟度管理
C₂H₄ (波長3.2 μm)

想定される用途4 (理化学研究など)

【液体の水のセンシングスペクトル】

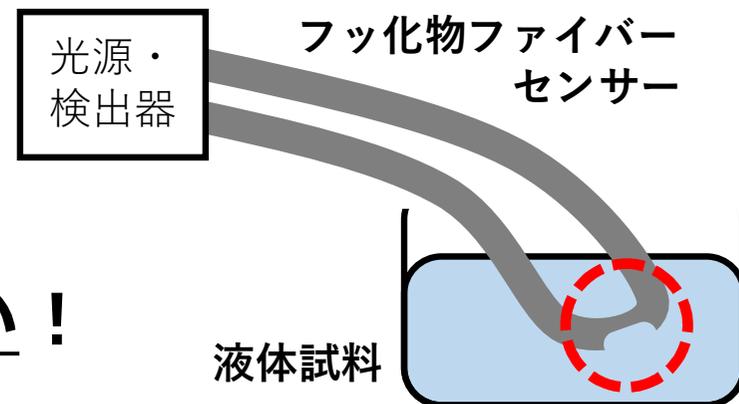


センサー部長さ10 mmでも
水の吸収が飽和しない

液体の場合、
10 μm 未満のセル厚さに相当！

試料の濃度調製や薄膜化をせずに、
ATR法のような液体・固体の成分分析が容易に

インライン型ファイバーセンサーなので、
プリズムのATRよりも計測の自由度が高い！



実用化に向けた課題1

【現状のシステム】

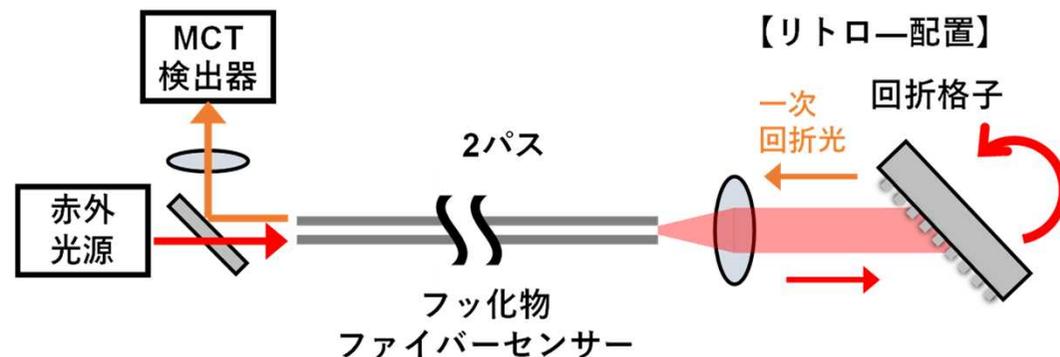
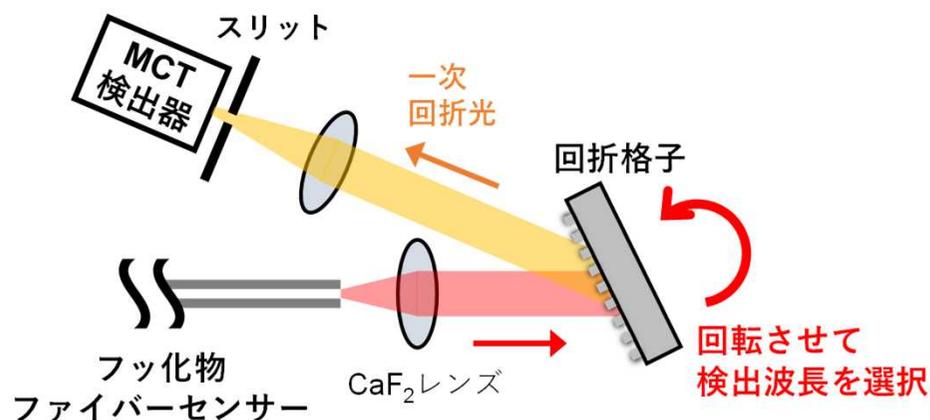
FT-IRでのスペクトル測定：計測感度が約1000ppmにとどまっている
(センサー部長さ 10 mmの場合)

➡感度向上のための開発が必要

【改善案】

- センサー部の長さで感度のスケーリング可能
(0.2倍程度の自由空間長さに相当)
- 単一波長、単一チャンネル検出器での高感度計測

赤外半導体検出器の小型化・高精度化・低コスト化(～数10万円)が進む



実用化に向けた課題2

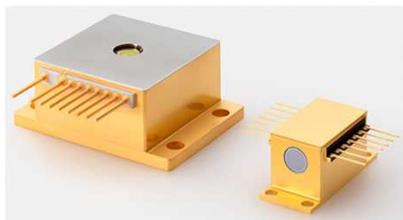
【単一波長光源の導入】

分布帰還型 (DFB) の量子カスケードレーザー (QCL)

インターバンドカスケードレーザー (ICL) を適用



QCL (4 μm 波長帯)



※浜松ホトニクス社HPより

ICL (3 μm 波長帯)



※ソーラボ社HPより

市場価格100~数100万円

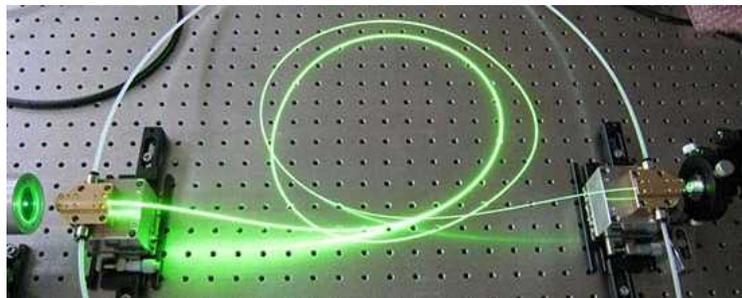
広帯域光源を使用したセンサーとの差別化が必要



感度ppbレベルの高感度版センサーデバイスが実現可能

フッ化物ファイバーデバイスの将来性

赤外光技術・デバイスの発展に伴い、
フッ化物ファイバーの需要が高まっている



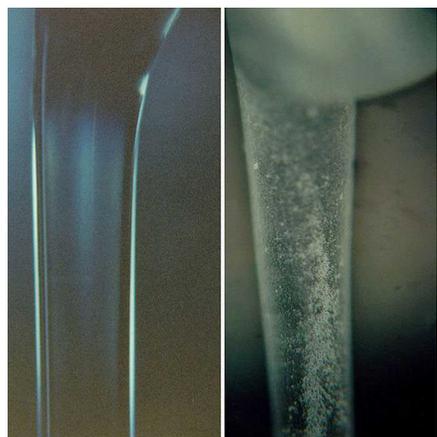
中赤外フッ化物ファイバーレーザー
※発表者ら, Opt. Lett. 44, 4777 (2019).

歯科用Er:YAGレーザーの
伝送フッ化物ファイバー



※モリタ製作所HPより

今後、更なる高品質化、低コスト化が期待！



国際宇宙ステーションでのZBLANファイバー線引き実験
微小重力環境(左)での高品質なフッ化物ファイバー製造が実証

現在のファイバー価格:1万円~4万円/メートル

※ISS National LabのHPより

今後の展望、企業への期待

■ 学術研究グループで、継続して高感度化を図る予定

フッ化物ファイバーセンシング: 学術的価値が高い

- ppm感度の低コストシステム
- ppb感度のQCL (ICL) 搭載システム を実証

■ なるべく早いフェーズでの産学(官)共同研究を希望

- 実用検証
- パッケージ化 などの開発

■ 多様な応用形態が期待

- 電子機器(センサー)
- 医療機器
- 農業関連
- 理化学機器

赤外光源、光ファイバーセンサー
単体での応用も歓迎します

少しでも可能性をお感じでしたら、
ご相談いただきたいと思います！

本技術に関する知的財産権

センサー

- 発明の名称 : 光ファイバーおよびファイバーセンサ
- 出願番号 : 特願2021-069885
- 出願人 : 秋田県立大学、自然科学研究機構
- 発明者 : 合谷賢治、上原日和

光源

- 発明の名称 : 光ファイバおよびASE光源
- 出願番号 : 特願2020-208308
- 出願人 : 自然科学研究機構、秋田県立大学
- 発明者 : 上原日和、安原亮、合谷賢治

耐候化

- 発明の名称 : 光ファイバーおよび光ファイバーの製造方法
- 出願番号 : 特願2022-019461
- 出願人 : 自然科学研究機構、秋田県立大学、北海道大学、三星ダイヤモンド工業(株)
- 発明者 : 上原日和、安原亮、合谷賢治、松尾保孝、村上政直、小西大介

謝辞

本技術は、JST 研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)
令和3年度・産学共同(育成型)によって開発されたものである。

課題名

「呼気成分リアルタイムモニタリングのための
中赤外プラズモン光ファイバーセンサーの開発」

【研究メンバー】



上原日和
核融合科学研究所



合谷賢治
秋田県立大学



西島喜明
横浜国立大学

お問い合わせ先

自然科学研究機構 事務局企画連携課

TEL 03-5425-1316

FAX 03-5425-2049

e-mail nins-sangaku@nins.jp