

# 希土類共添加フッ化物ガラスを用いた 中赤外ファイバー光源の開発とセンサー応用

日本板硝子材料工学助成会 成果報告会  
令和6年1月25日

自然科学研究機構 核融合科学研究所  
准教授 上原日和

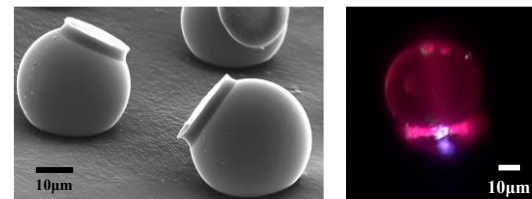
# 発表者の研究経歴 (1)

## ■ ~平成23年度 東工大 無機材料・ガラス研究室 (博士課程)

高屈折率ガラスと有機・無機ハイブリッド材料を使った微小光学素子の研究

### ガラスを使った光デバイスの研究

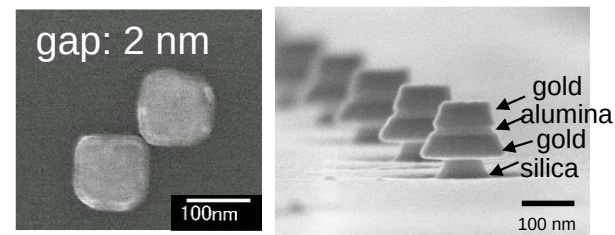
微小球共振器ラマンレーザー →



## ■ 平成24~27年度 北大 電子研・三澤研究室 (ポスドク)

局在プラズモンを使った光化学反応場の研究

### 半導体微細加工、光計測、光化学の研究



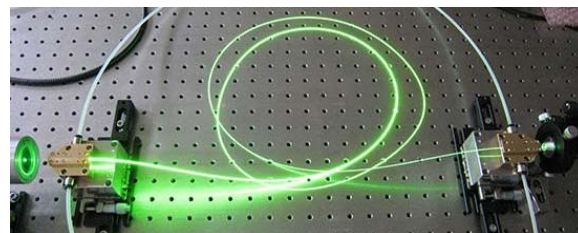
高効率反応場のための金属ナノ構造体 ↑

## ■ 平成28~30年度 阪大 レーザー研・パワーレーザー研究室 (ポスドク)

高出力な新規波長帯レーザー光源の開発

### 固体・ファイバーレーザー装置の研究

中赤外フッ化物ファイバーレーザー →



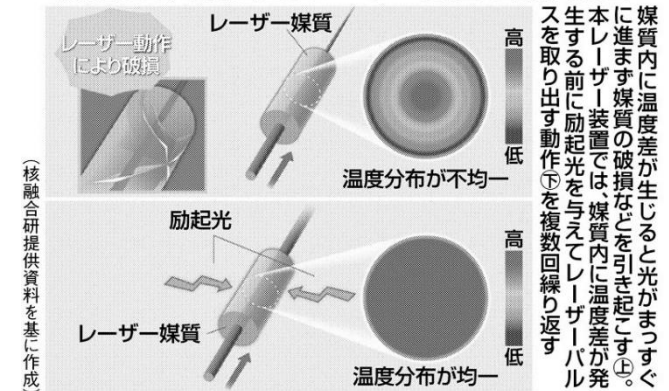
# 発表者の研究経歴 (2)

## ■ 令和元~現在 核融合研・高温プラズマ系

レーザーを使ったプラズマ計測  
(大型ヘリカル装置実験)

### 核融合プラズマ計測の研究

開発した高繰り返しレーザー装置の動作原理

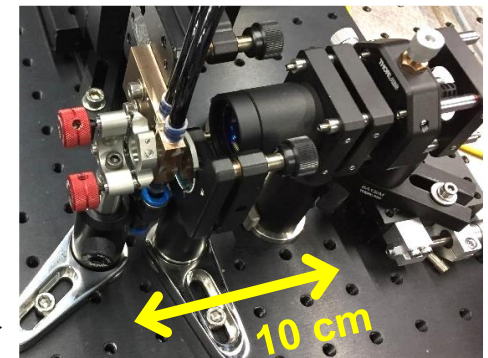


「核融合発電へプラズマ変化を毎秒2万回捕捉する温度計、核融合研などが開発した意義」  
(日刊工業新聞2022年10月6日)

高出力な新規波長帯固体レーザー光源の研究

### 固体レーザー装置の研究、その他の研究

小型で低コストな中赤外固体レーザー →



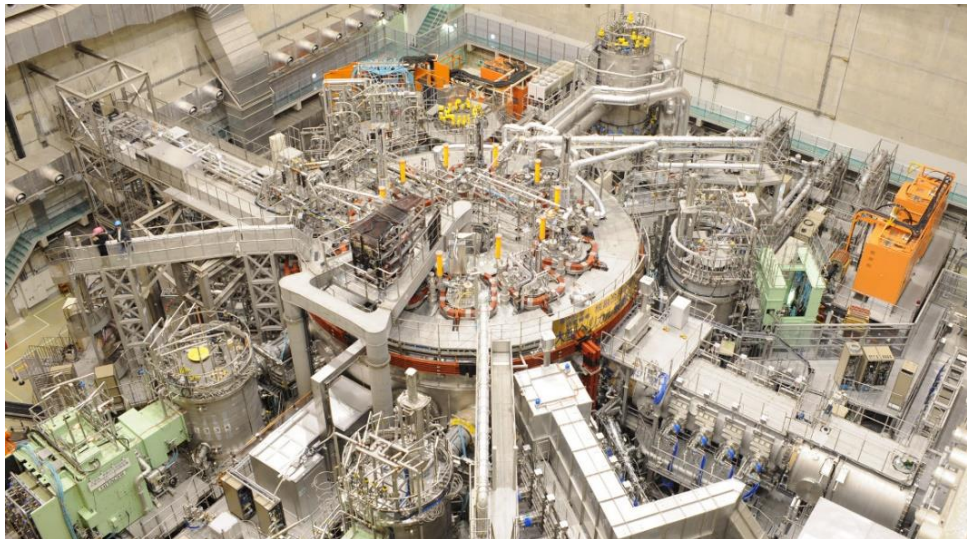
全国の産・学・官機関との共同研究に基づいた、多彩な研究を推進している

➡ 日本板硝子財団のご支援で産まれた研究成果について紹介

# 所属機関・核融合科学研究所の紹介

## < 自然科学研究機構 >

- ・ 国立天文台
- ・ 核融合科学研究所 (NIFS) 総合研究大学院大学を併設・併任
- ・ 基礎生物科学研究所
- ・ 生理学研究所
- ・ 分子科学研究所



大型ヘリカル装置LHDの外観↑と内部→



核融合エネルギー実現のため、高温プラズマの閉じ込め実験を推進

# 本研究の概要

- 特殊な光ファイバーを使った優位性の高い赤外式のガスセンサーを新たに開発した
- 開発したセンサーは、光源部（広帯域中赤外ASE光源）とセンサー部からなり、主に光源部を本研究助成で開発

## 【本発表のアウトライン】

- 赤外光ファイバーセンサー研究の背景
- センシング用光源研究の背景
- 中赤外ASE光源開発の詳細
- 赤外光ファイバーセンサーの実証と特徴
- 想定される応用
- まとめ

# 従来のガスセンサーと問題点

## 【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

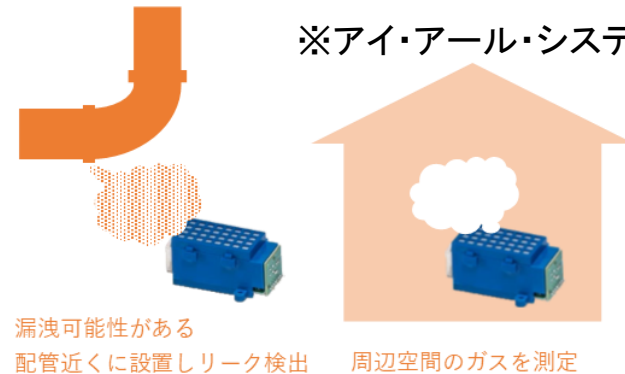
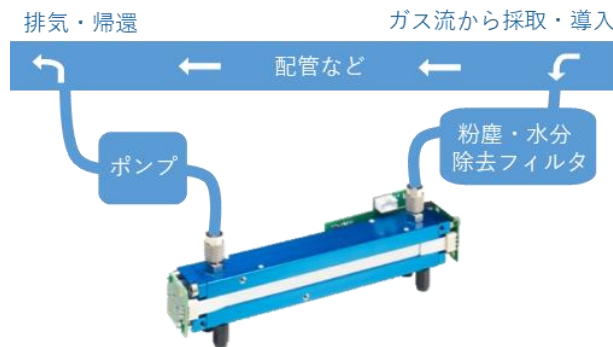
*欧米ではシェアが増加(日本も今後追従)*



**高速で高感度**  
計測部が変化しない  
多くのガス種に対応

# 赤外式センサーの方式

## 【一般的な赤外式ガスセンサー】 NDIR(非分散型赤外吸収)方式



## 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)

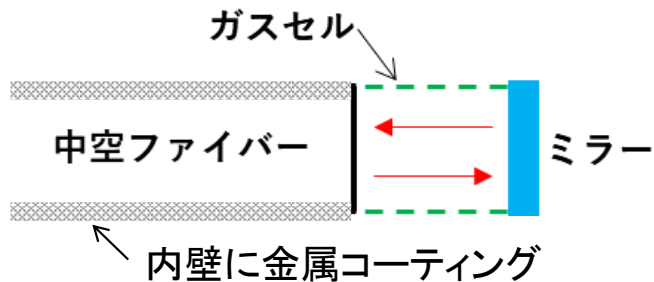
- ・遠隔性
  - ・局所的なセンシング
  - ・軽量、省スペース
  - ・メンテナンス性
- を付与

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・・・

# 赤外式光ファイバーセンサーの報告例

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。

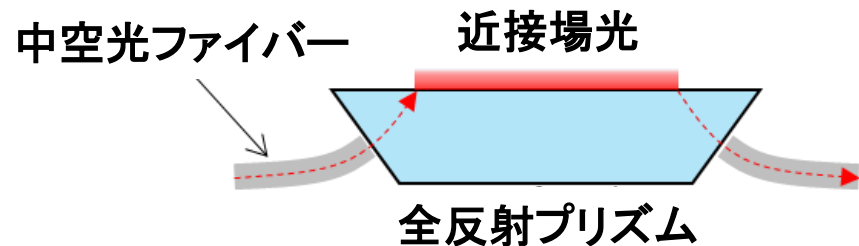
## 【中空光ファイバー】



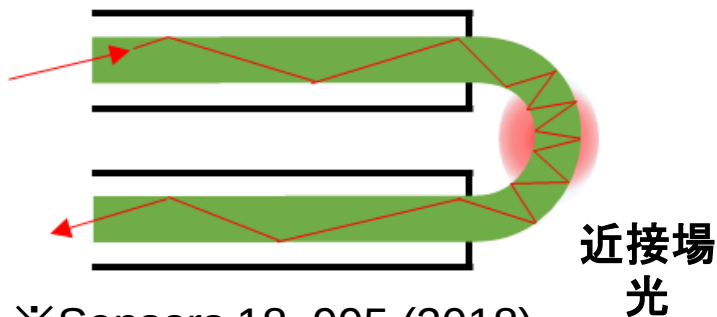
※Med. Phys. 47, 5523 (2020).

## 【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

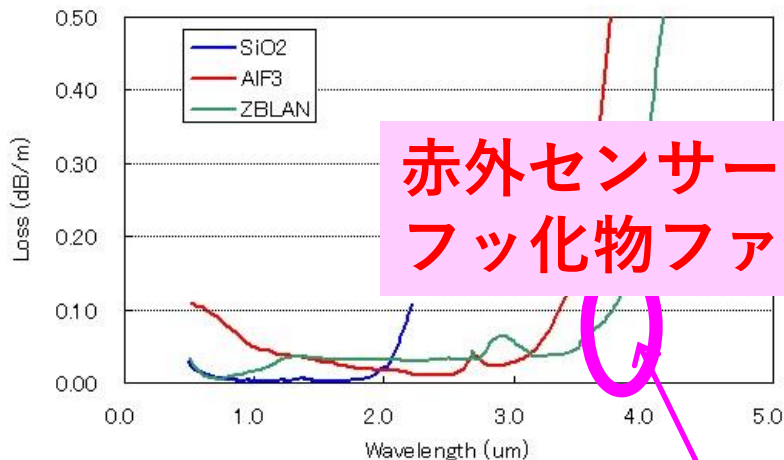
# フッ化物ファイバーの特徴

**波長2~4  $\mu\text{m}$ 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  $< 0.05 \text{ dB/m}$   $\Rightarrow$  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:  $0.2 \sim 1 \text{ dB/m}$ )

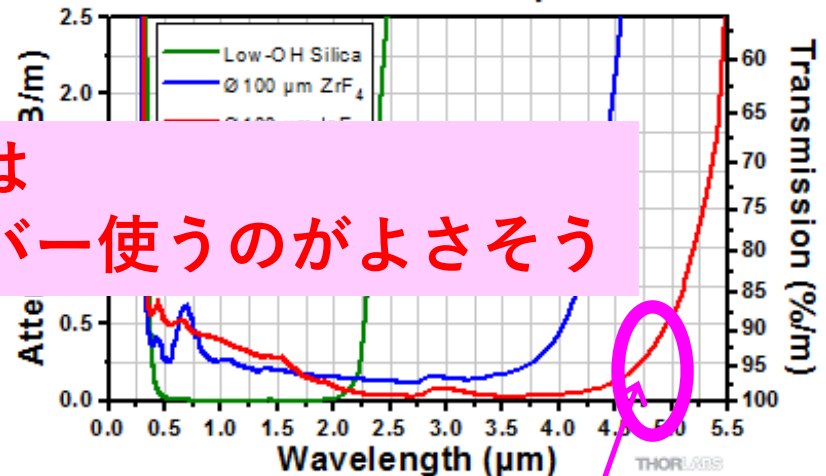
許容曲げ半径  $< 10 \text{ cm}$  (中空ファイバー:  $50 \text{ cm}$ 程度)

## 伝送損失の例



赤外センサーには  
フッ化物ファイバー使うのがよさそう

※ファイバーラボ社HPより



※ソーラボ社HPより

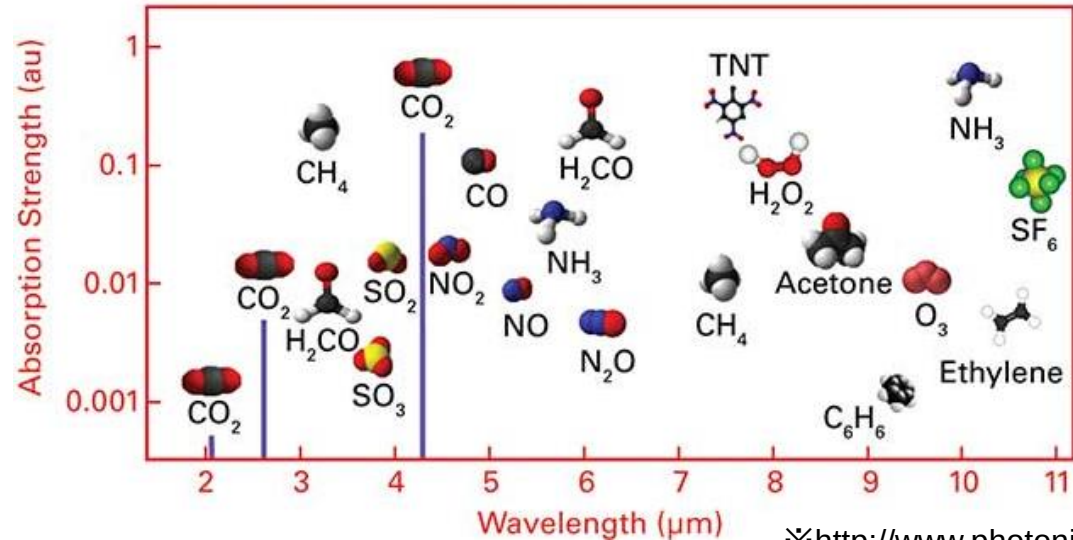
本研究で実際に使用したZBLANファイバー、フッ化インジウムファイバー  
(ジルコニウム系)

# 研究のコンセプト

## 中赤外センシング

- ・ 環境モニター
- ・ ガス漏れ検知
- ・ 危険物検知
- ・ 匂いセンサー
- ・ 分子構造解析
- ・ 同位体計測
- ・ 血液検査
- ・ 呼気診断

↓ 中赤外波長域には多くの分子の共鳴線が存在する



※<http://www.photonics.com/>

## 光ファイバーセンサー

小型・高感度・遠隔性に優れ、卒研が期待される

- ・ 広帯域 (or波長可変)
- ・ 高輝度
- ・ 高安定
- ・ 高ビーム品質
- ・ 小型で安価安価

まず、使えそうな光源がないので  
広帯域な中赤外光源を独自開発する

中赤外光源

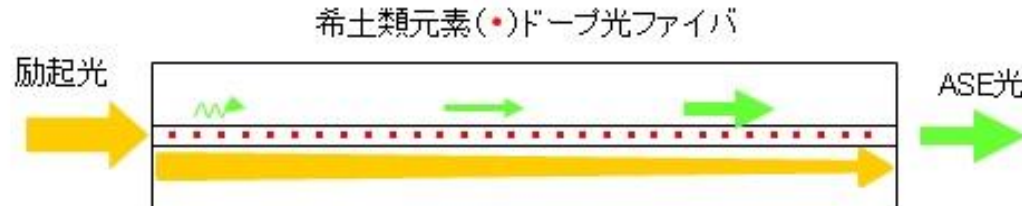


検出器



# ASE光源とは

## 自然放射増幅光 (amplified spontaneous emission)



※図はファイバーラボ社HPより拝借

希土類金属イオンなどの広帯域な自然放出光が誘導放出によって増幅されたもの。  
光共振器による波長選択機構が無い。

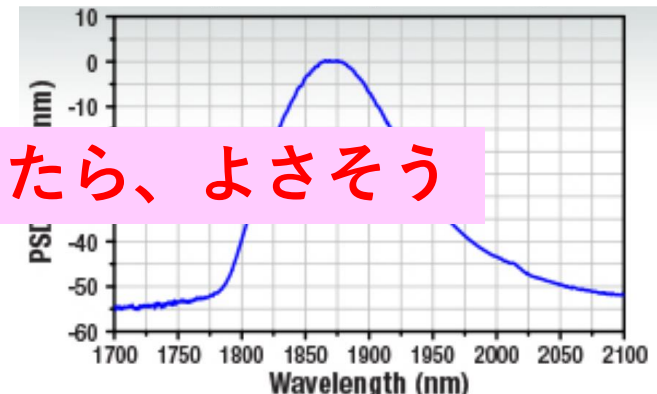
### ASE光源の特徴

- ・ 広帯域 (低コヒーレンス)
- ・ 高輝度、高安定
- ・ 高いビーム品質

- ・ 光通信波長帯 (1.5~1.6  $\mu\text{m}$ , 1.3  $\mu\text{m}$ )
- ・ 可視~1.0  $\mu\text{m}$ 帯
- ・ ツリウムファイバーを使った2  $\mu\text{m}$ 帯が主流。

中赤外のASE光源ができれば、よさそう

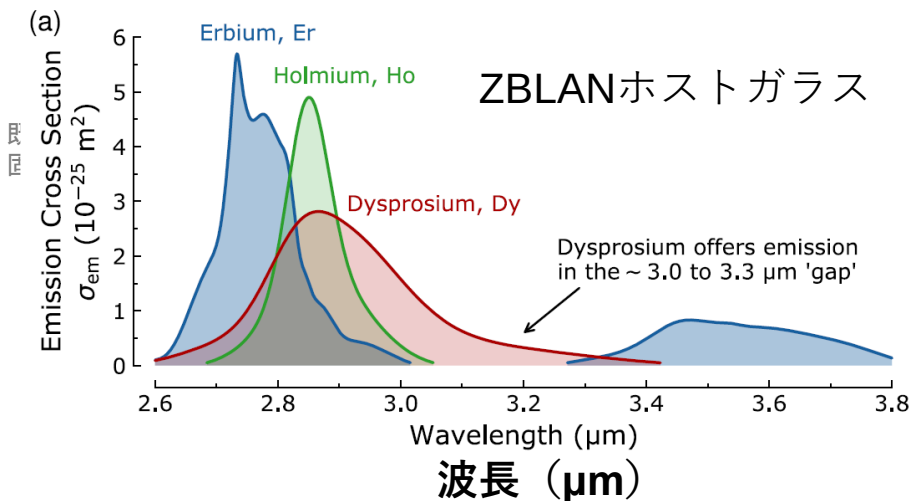
中赤外域 (特に>3  $\mu\text{m}$ ) のASE光源は希少！



※ソーラボの波長2  $\mu\text{m}$ のASE光源、価格100万円

# ジスプロシウム ( $\text{Dy}^{3+}$ ) レーザーについて

本研究で着目するDy系レーザーの波長

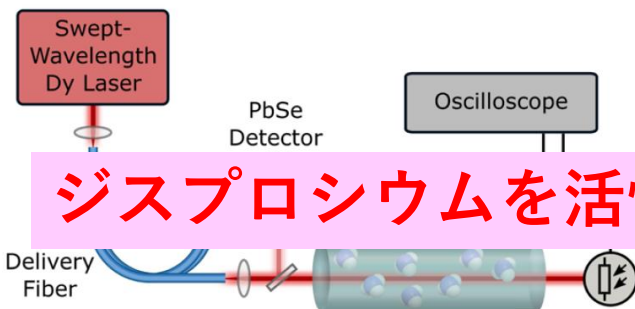


ジスプロシウムは、  
空白の波長域 (3.0~3.3  $\mu\text{m}$ ) をカバー

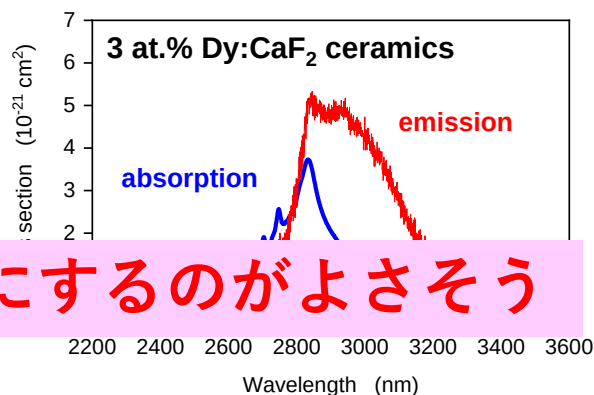
→ 次世代の中赤外レーザーとして期待

→ 広帯域なASE光源としても有望!

## Dyレーザーでの アンモニアセンシングの例



## Dyレーザー媒質の開発の例 (著者ら)



ジスプロシウムを活性元素にするのがよさそう

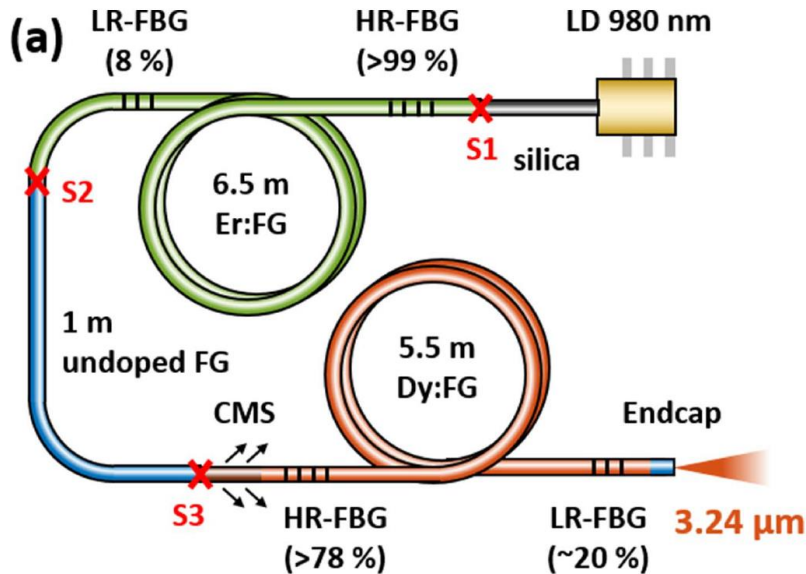
※ Jackson et al., APL Photon. 4, 020801 (2019).

※ Dy:CaF<sub>2</sub>の開発: Uehara et al., OSA Continuum 3, 1811 (2020).

※ Dy:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の開発: Yasuhara, Uehara et al., Opt. Mater. Express 10, 2998 (2020).

# Dyファイバーレーザーの課題点

## Dyフッ化物ファイバーレーザーの例



- ・ 安価な高出力LDで励起できない  
励起波長2.8  $\mu\text{m}$  (1.7  $\mu\text{m}$ , 1.3  $\mu\text{m}$ , 1.1  $\mu\text{m}$ )
- ・ 励起光源が低出力で不安定
- ・ コア励起が必須  
(ダブルクラッドファイバー使用不可)
- ・ システムが複雑で高コスト

- ・ 汎用的な半導体レーザー (LD) で励起できないのがジスプロシウム系の問題
- ・ LD励起をできるようにする←本助成研究のメインテーマ

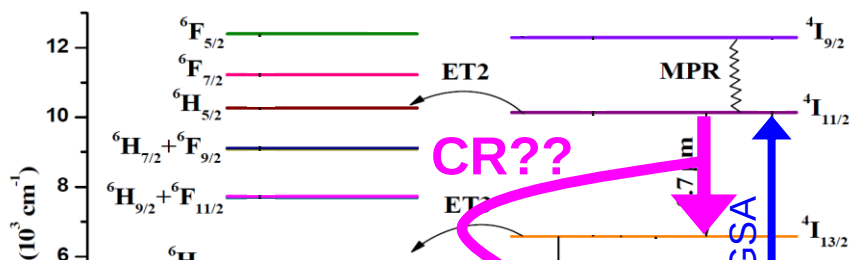
小型化・低コスト化のためには、  
LD励起が望ましい

※Uehara et al., Opt. Lett. 44, 4777 (2019).

# 本助成研究の目的

エルビウム→ジスプロシウム  
エネルギー移動

エネルギー移動：  
近接した活性元素間でエネルギーをやり取り



レーザー材料から新たに開発して、センシング光源をつくる  
希土類を共添加 (2種類一緒に入れる) したフッ化物ガラスで調査



ができないか？

※J. Wang et al., Opt. Express 28, 5189 (2020).



LD励起の広帯域な中赤外ASE光源を実証する

➤ Er/Dy共添加フッ化物 (ZBLAN) ファイバーを用いる

# 新しいガラス

いろんな添加濃度（10種類くらい）  
板硝子財団のご支援で作製 ↓

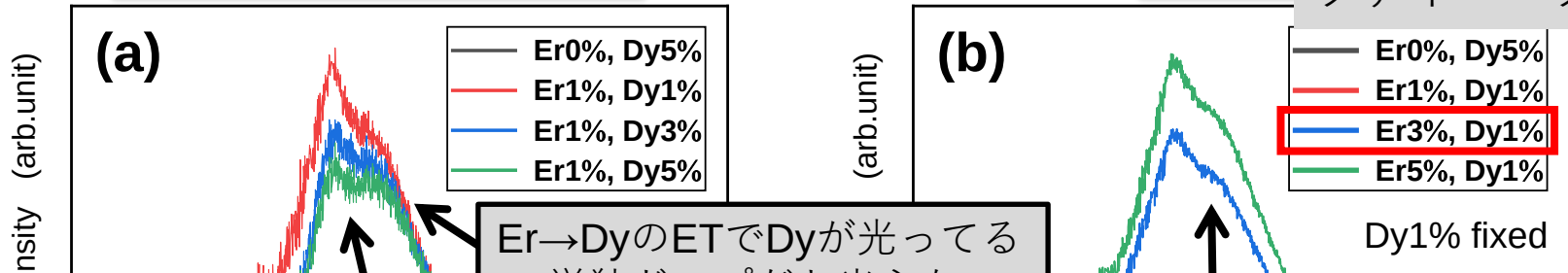
Er/Dy共添加ZBLANガラス(バルク体)を波長976 nmで励起



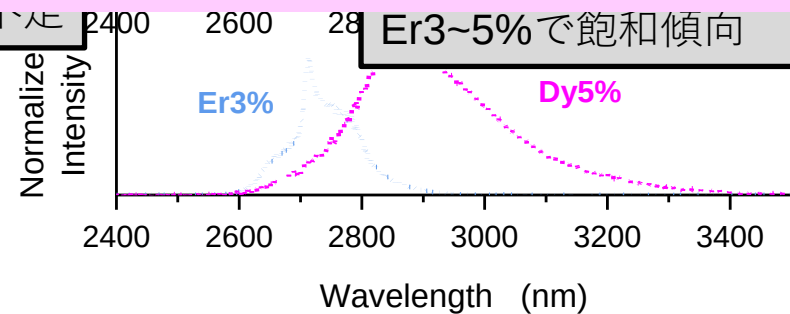
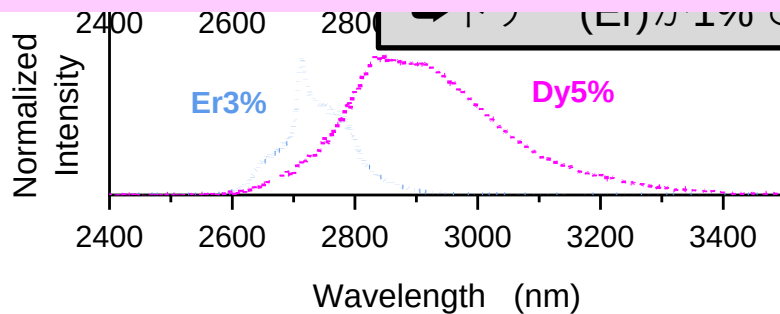
蛍光スペクトル Er1%

Dy1%

ファイバーラボ(株)



- ・フッ化物のレーザー材料を最適化できた
- ・Dyが976 nmの汎用LDで効率よく励起できるようになった

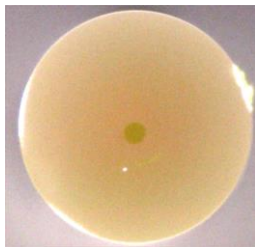


Er5%, Dy1%：ファイバー線引きで結晶化（失透）のリスク、濃度消光も懸念。

➡ Er3%, Dy1%のZBLANガラスで光ファイバー作製

# ファイバーASE光源の構築

Er3%, Dy1%共添加ZBLANファイバー



ダブルクラッドファイバー

コア： $\varnothing 15 \mu\text{m}$

(シング

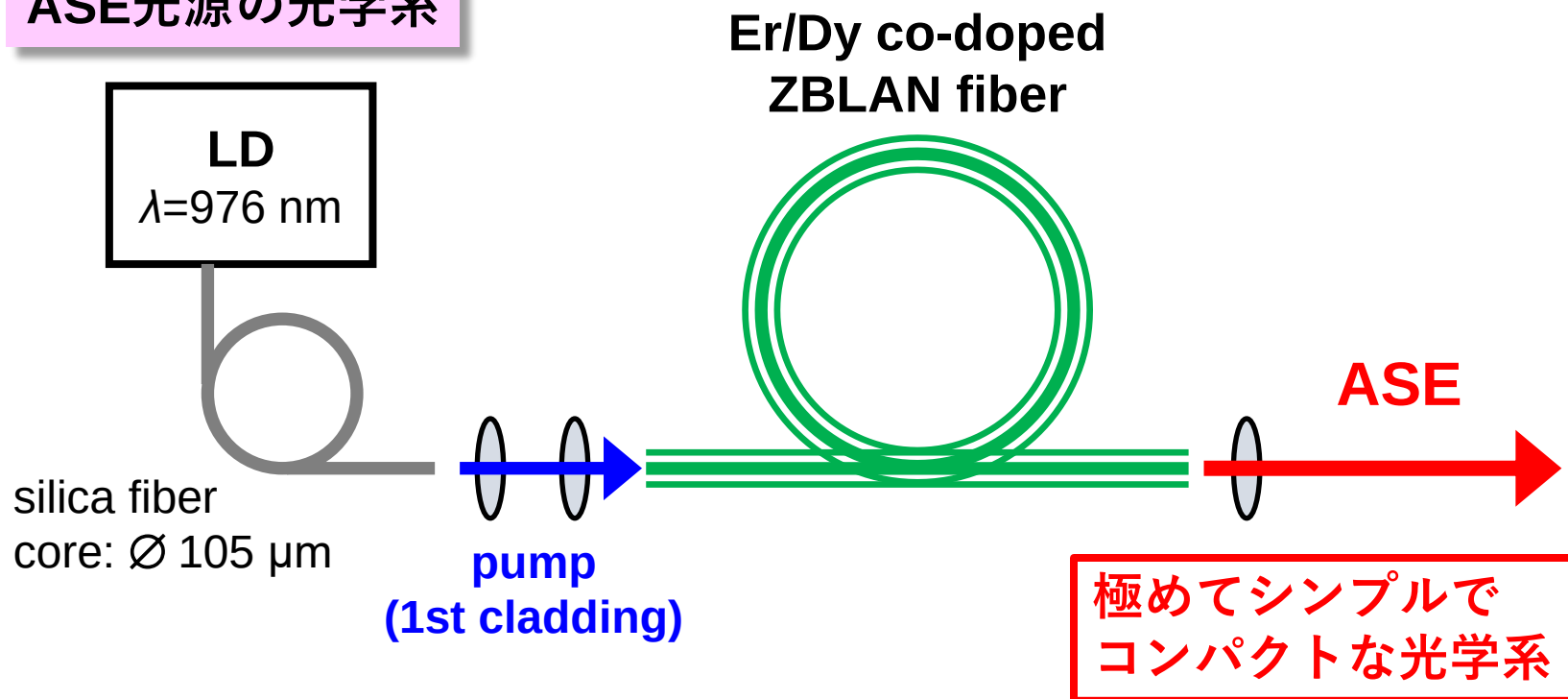
第一クラッド： $\varnothing 200 \mu\text{m}$

ファイバーラボ(株)

←板硝子財団のご支援でファイバー作製

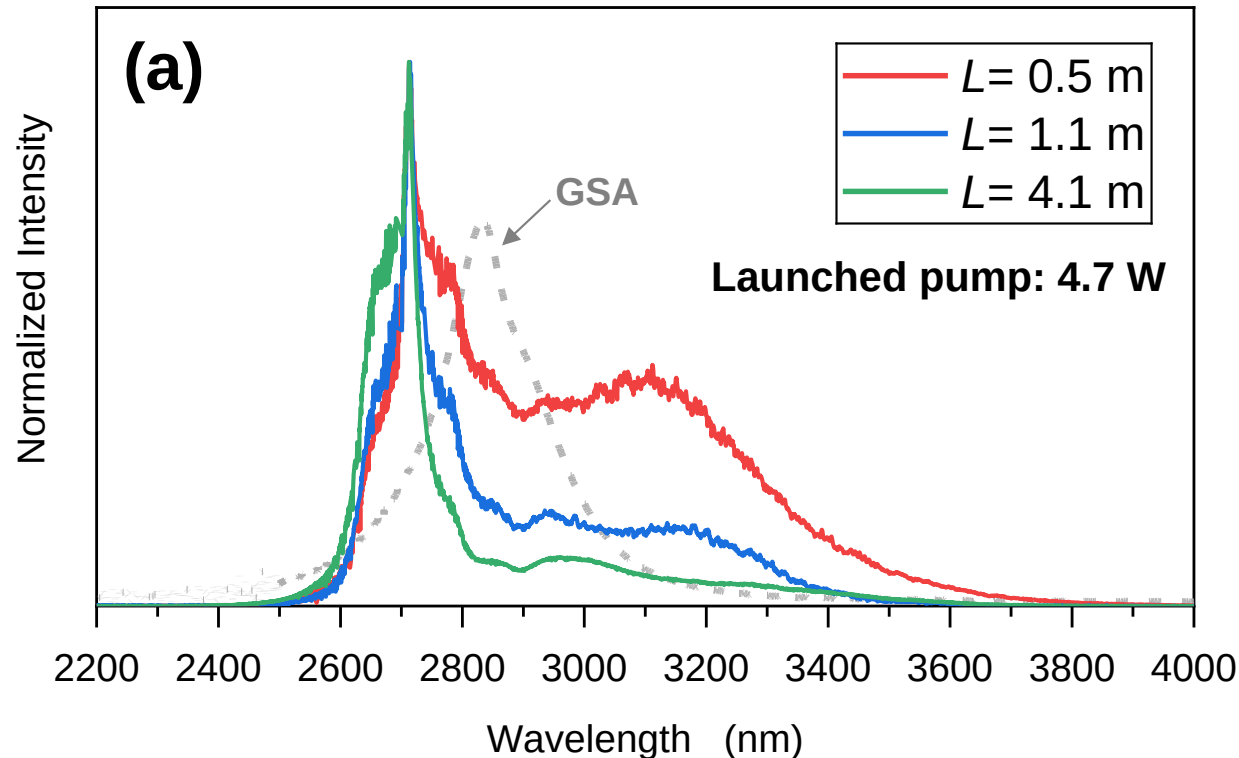
励起光吸収係数：2.0 dB/m

## ASE光源の光学系



# ASEスペクトル（ファイバー長さ依存）

励起パワー：5 W（十分に強い）



ファイバーが長いと、長波長側が出力しなくなる

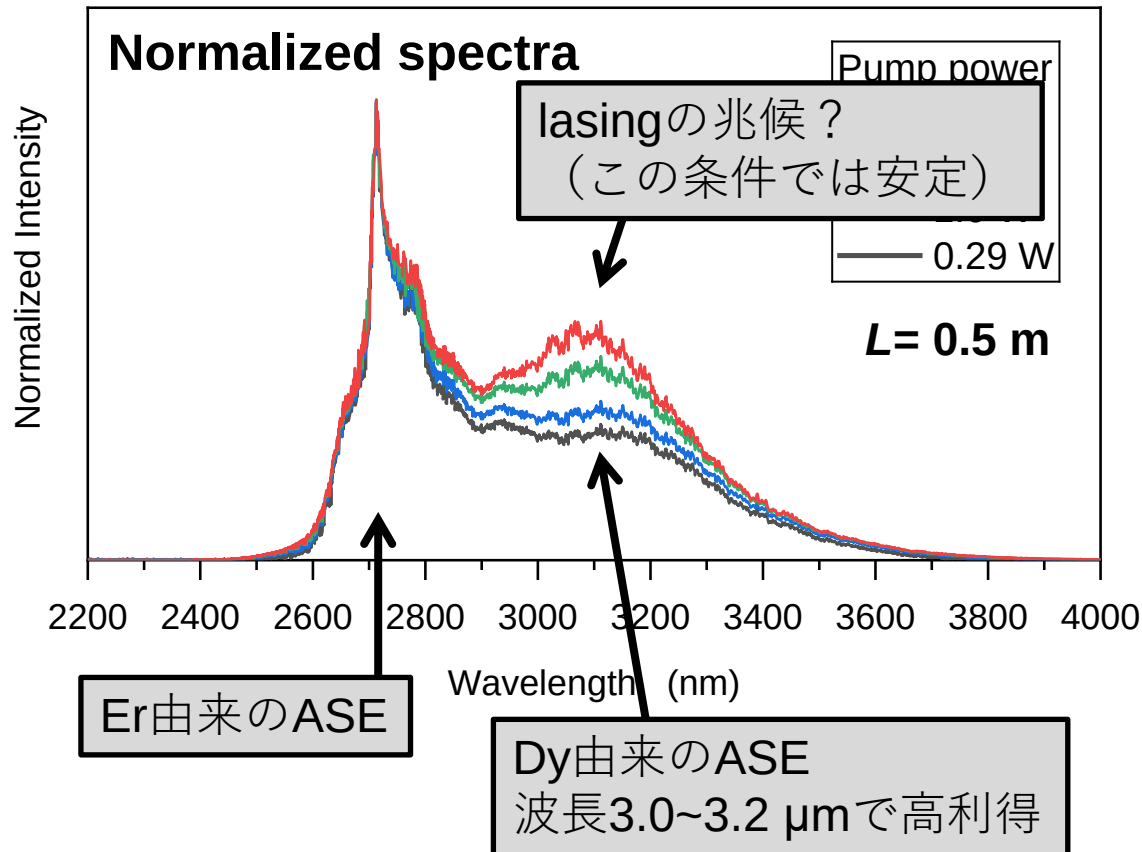
：ファイバー全域が反転分布にならず、再吸収の影響を受けるため

➡ 長さ0.5 mで評価を行った

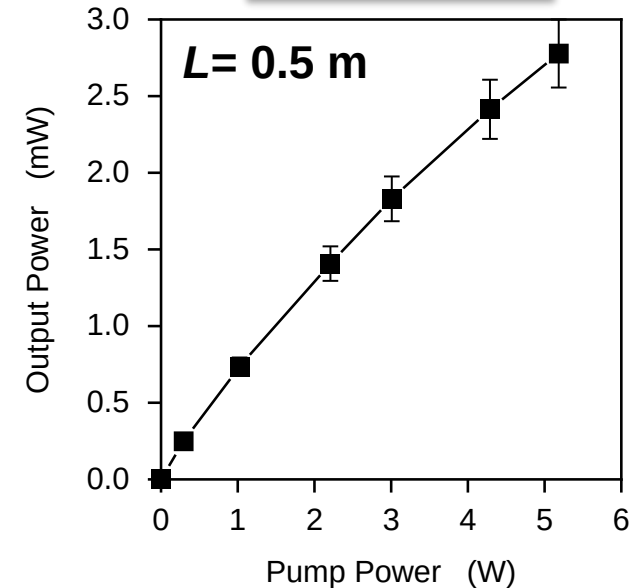
ファイバー長さを最適化  
短いほど特性良く、小型化に寄与

# ASE光源の出力特性(1)

## ASEスペクトル



## 入出力特性

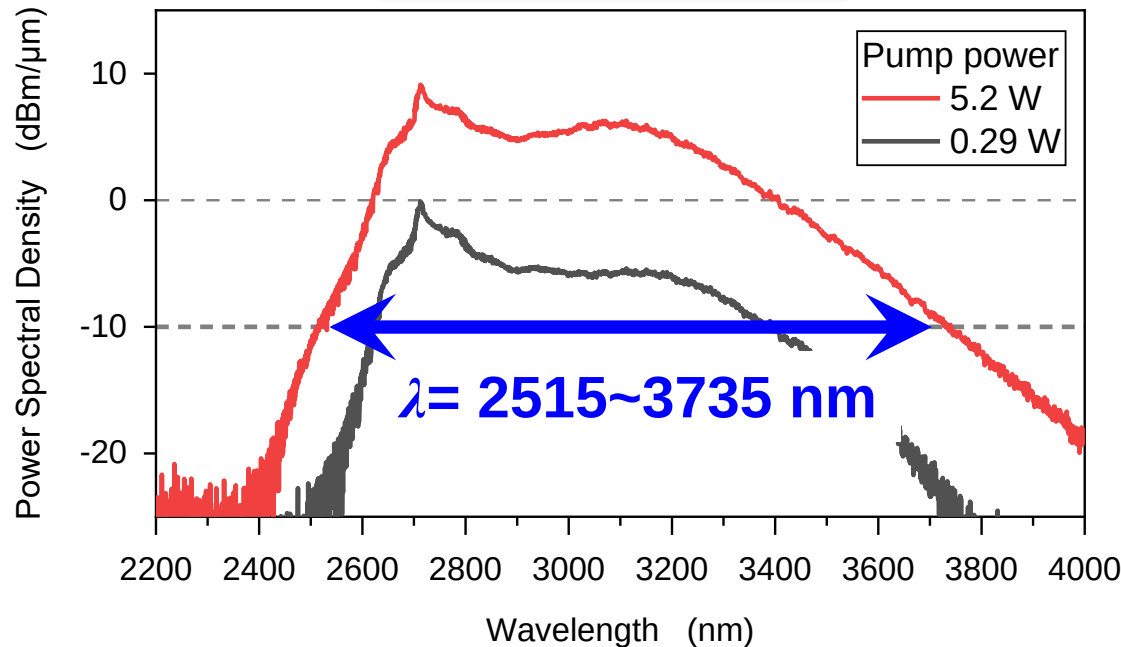


**ASE出力は~3 mW**

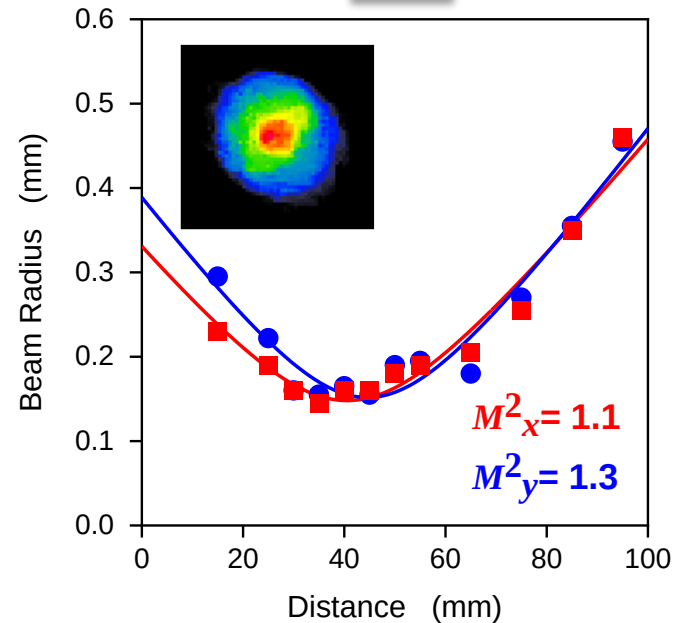
**波長2.5~3.7  $\mu\text{m}$ に亘る広帯域なASE**

# ASE光源の出力特性(2)

パワースペクトル



$M^2$

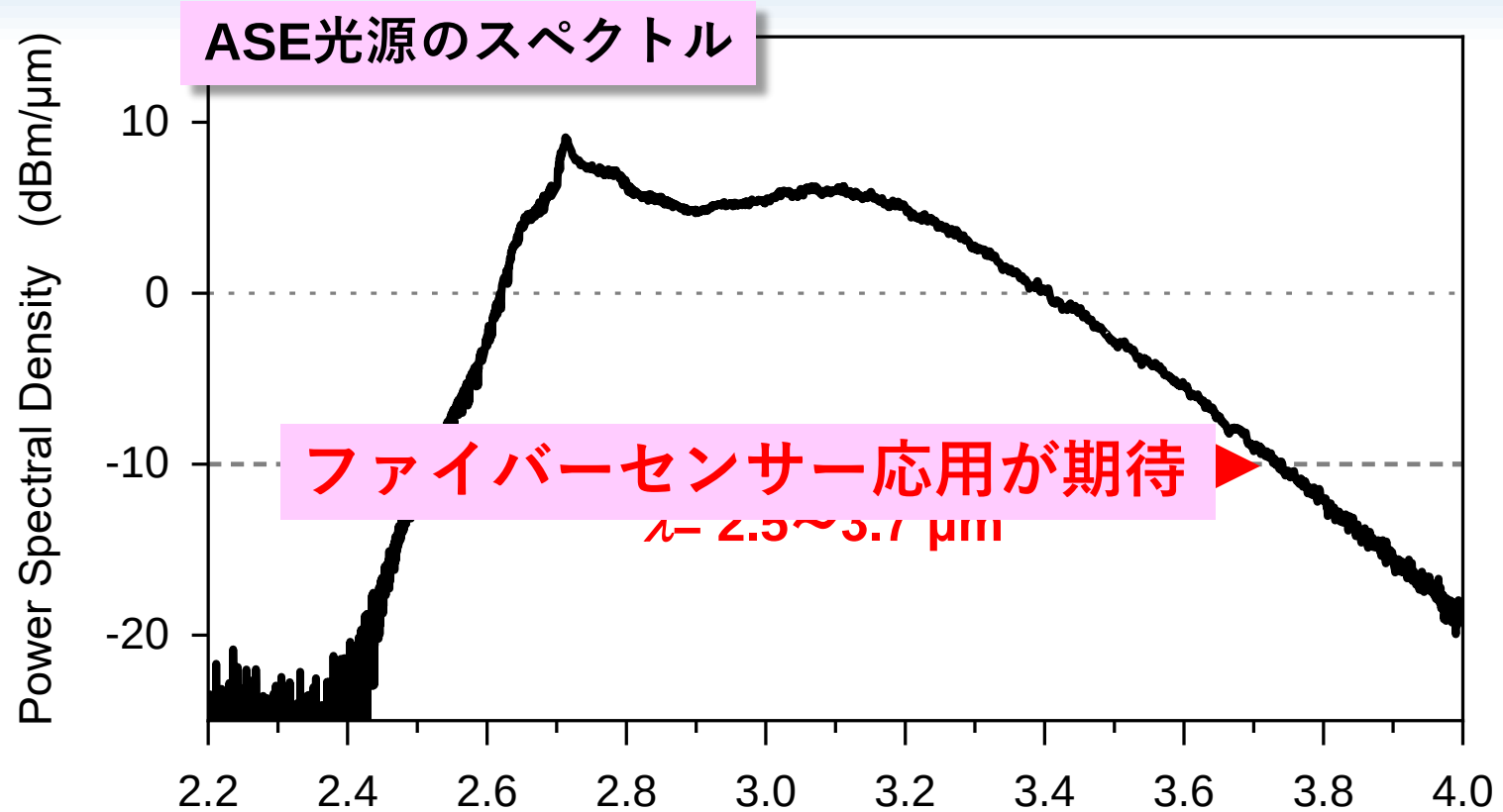


波長2.5~3.7  $\mu\text{m}$ に亘る広帯域なASE

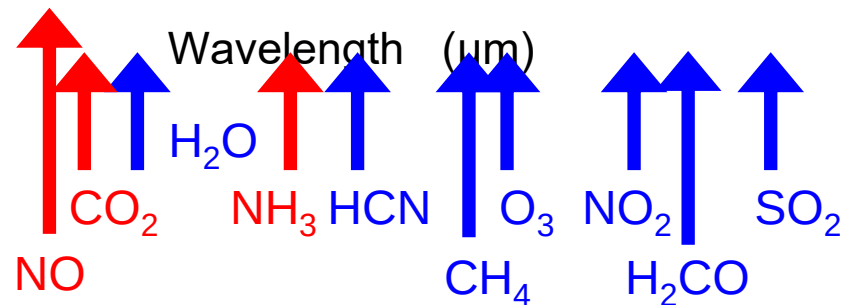
$M^2 = 1.1 \sim 1.3$   
高効率なファイバー結合可能

- ・ 極めて広帯域 (波長2.5~3.7  $\mu\text{m}$ )
  - ・ 高輝度、高ビーム品質、高安定
- ASE光源を  
小型かつ安価な構成で実現！！

# ガスセンシングの可能性



センシング用光源  
として有望！



呼吸診断（肺炎etc）

環境モニター（危険物、規制ガスetc）

# フッ化物ファイバーを使った **作った光源の応用** 提案

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！

フッ化物ガラス製  
光ファイバー

赤外光源

**新技術①**  
中赤外・自然放射増幅(ASE)光源

※特願2020-208308

**新技術②**  
インライン型・赤外式  
フッ化物光ファイバーセンサー

※特願2021-069885

ガス

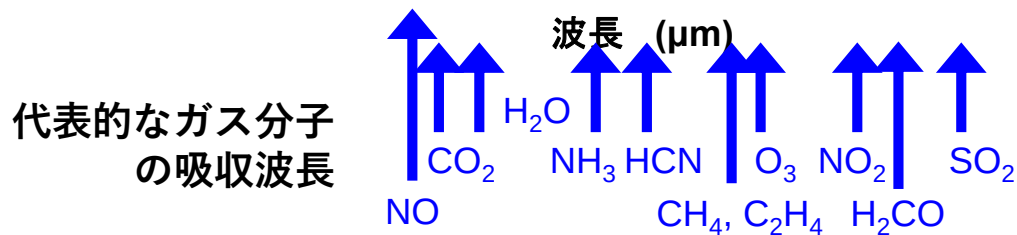
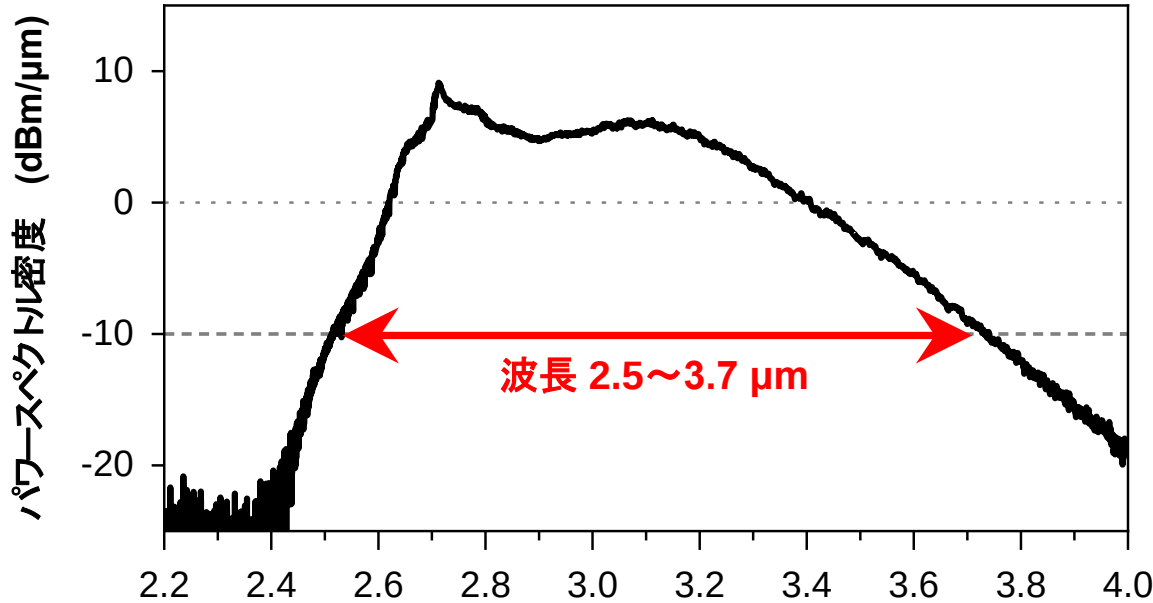
センサー部

光検出器

ASE: amplified spontaneous emission

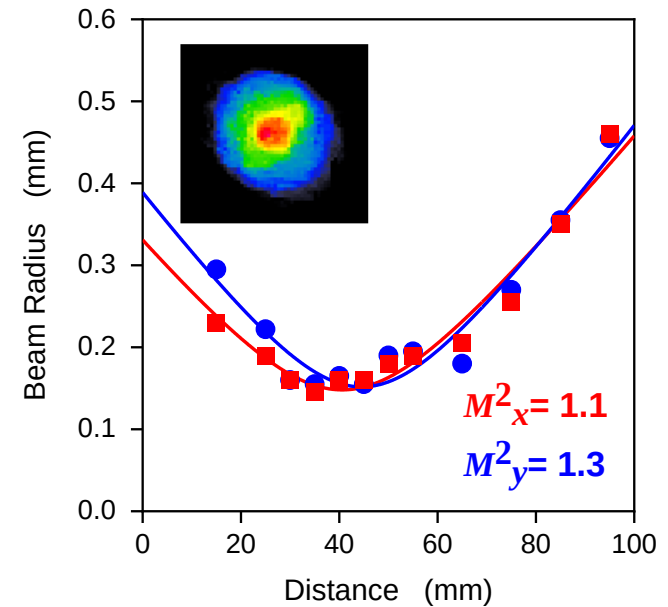
# ASE光源の特徴 1

## 【スペクトル特性】



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

## 【ビーム品質】

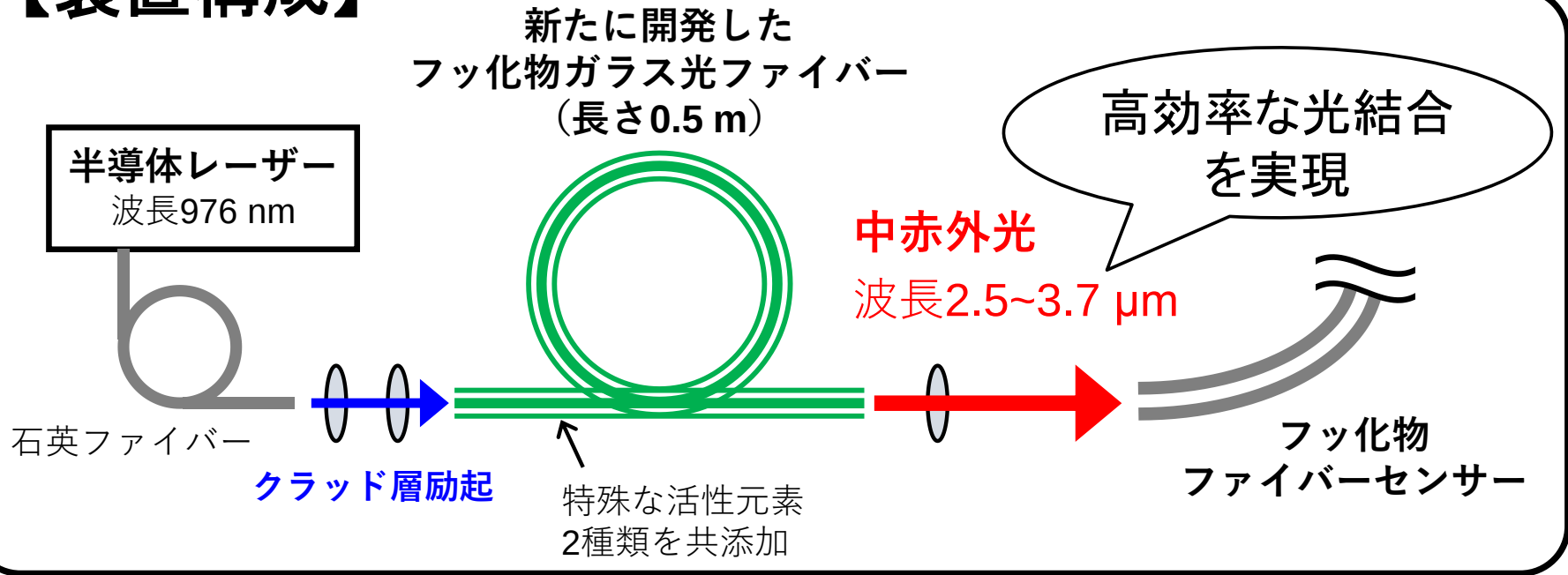


※発表者ら、Sci. Rep. 11, 5432 (2021).

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

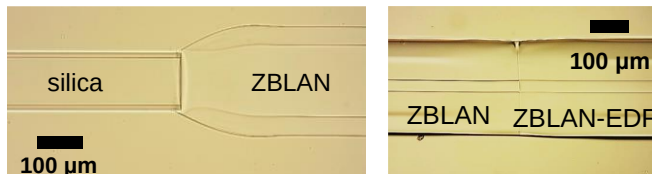
# ASE光源の特徴 2

## 【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

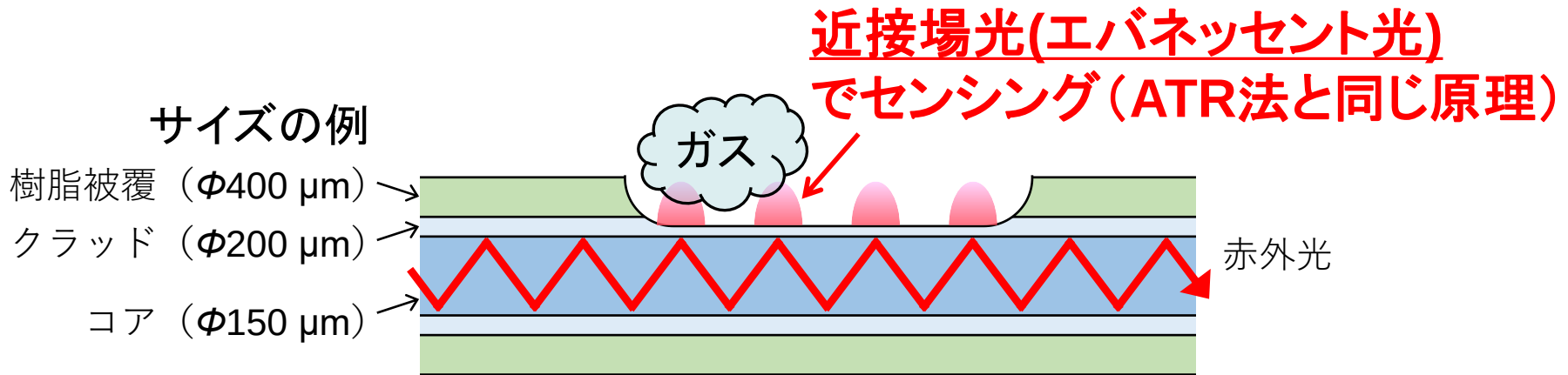
: (例) 波長1~5 μm、出力1 W

: 500~1000万円、ビデオデッキ大

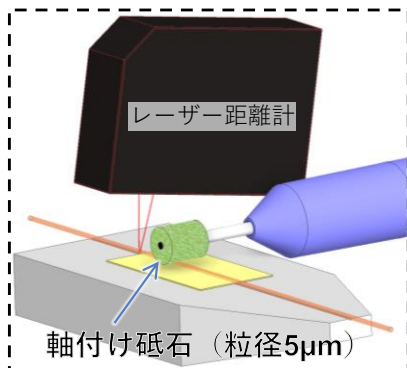
# フッ化物ファイバーセンサーの特徴 1

## 【センサーの構成】

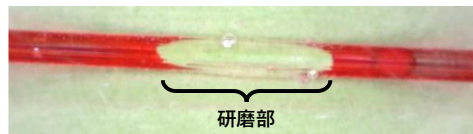
光ファイバー材料：ZBLAN、フッ化インジウム系



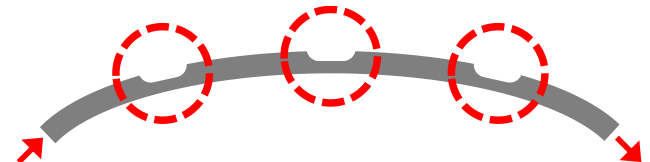
## 【研磨作業】



クラッド層  
わずかに残す

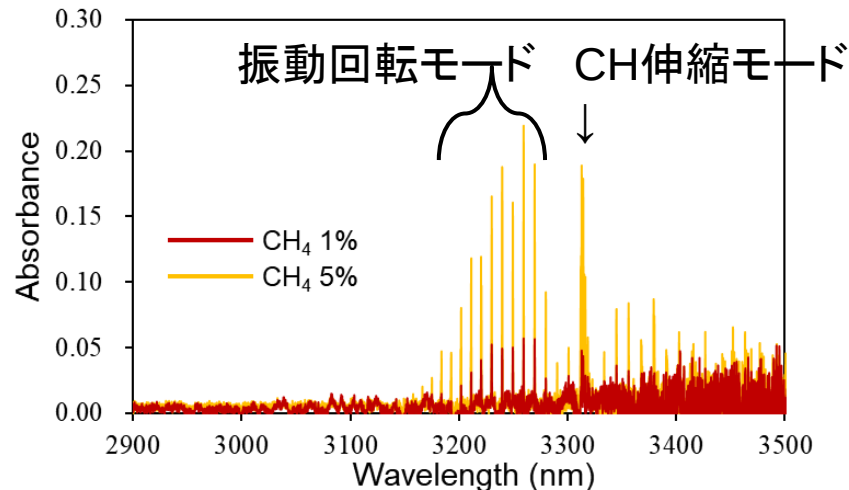
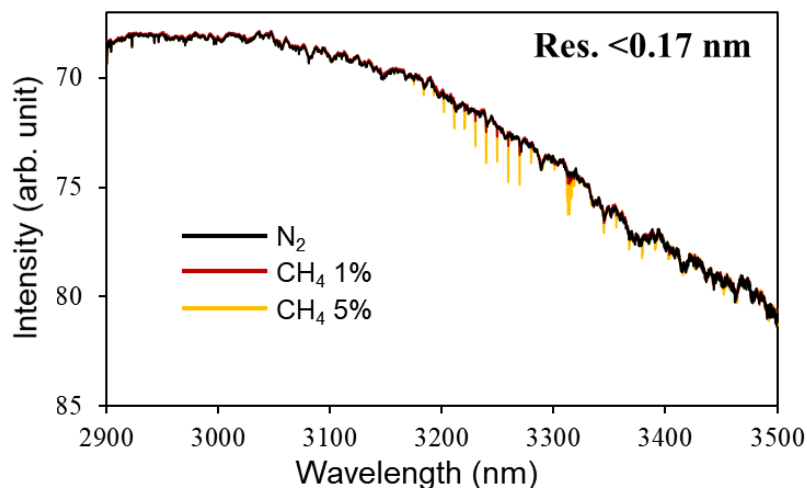


- ・側面研磨のみ(融着など不要)
- ・完全なインライン型のセンサー
- ・多点計測が容易に



# フッ化物ファイバーセンサーの特徴 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 < 1ppmの見積もり

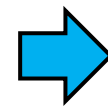
# フッ化物ファイバーセンサーの特徴 3

## 【特徴まとめ】

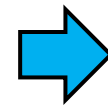
### 利点

- ・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



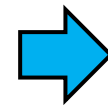
- ・リアルタイム計測
- ・様々な計測対象(後述)



- ・遠隔性が求められる計測
- ・狭小空間への敷設

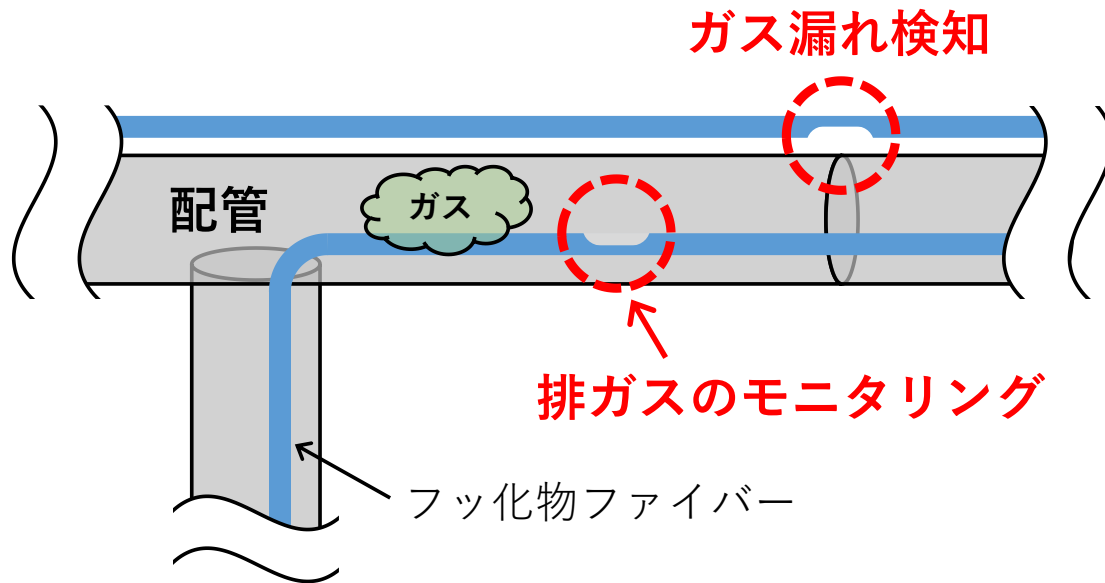
### 欠点

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



- ・高波数側のみターゲット
- ・中空ファイバーとの差別化

# 想定される用途 1



## 【場所】

- ・工場施設
- ・配管
- ・家庭、オフィス

## 【優位点】

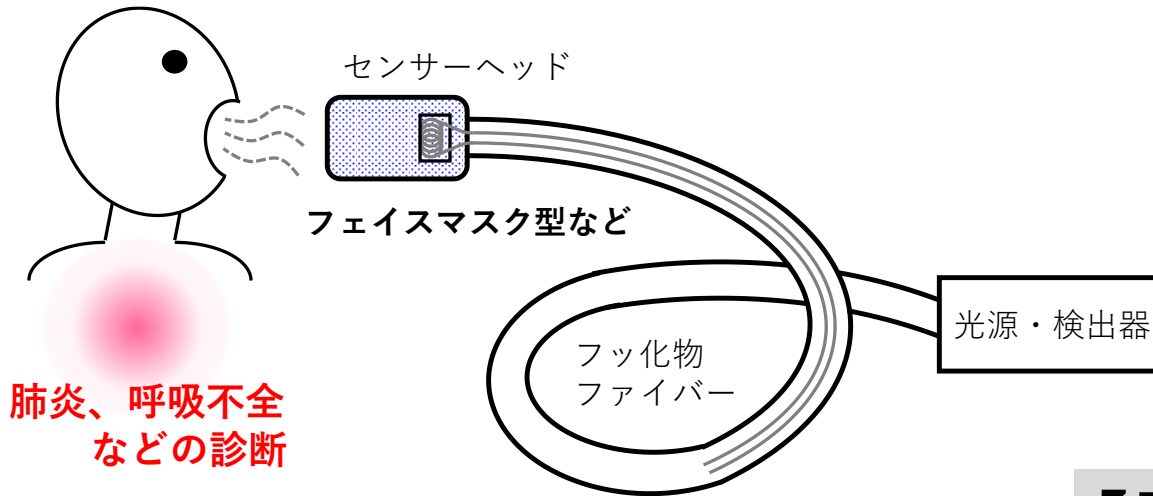
- ・遠隔性が求められるケース
- ・高い敷設性
- ・局所的なモニタリング

## 【計測対象の例】

- ・排ガスモニタリング
  - CO<sub>2</sub> (波長4.2 μm)
  - NO<sub>2</sub> (3.5 μm)
  - SO<sub>2</sub> (3.7 μm)
- ・可燃性ガス漏れ検知
  - CH<sub>4</sub> (3.2 μm)
  - C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (3.4 μm)
- ・毒性ガス検知
  - NH<sub>3</sub> (2.9 μm)
  - CO (4.7 μm)
  - HCN (3.1 μm)
- ・住環境
  - H<sub>2</sub>CO (3.5 μm)
  - CO<sub>2</sub> (4.2 μm)
  - H<sub>2</sub>O (2.8 μm)

# 想定される用途 2

## 【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

### 【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

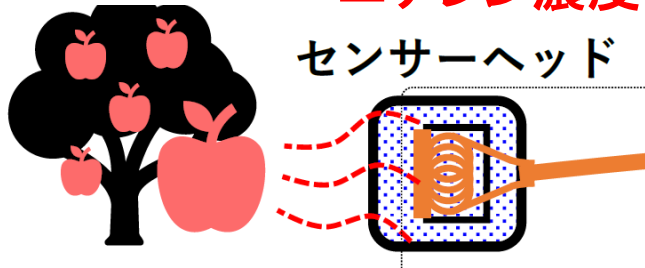
### 【計測対象の例】

- ・肺炎、喘息などの診断  
NO(波長2.7  $\mu\text{m}$ )  
CH<sub>4</sub>(3.2  $\mu\text{m}$ )  
NH<sub>3</sub>(2.9  $\mu\text{m}$ )
- ・健康管理など  
CO<sub>2</sub>(4.2  $\mu\text{m}$ )  
H<sub>2</sub>O(2.8  $\mu\text{m}$ )

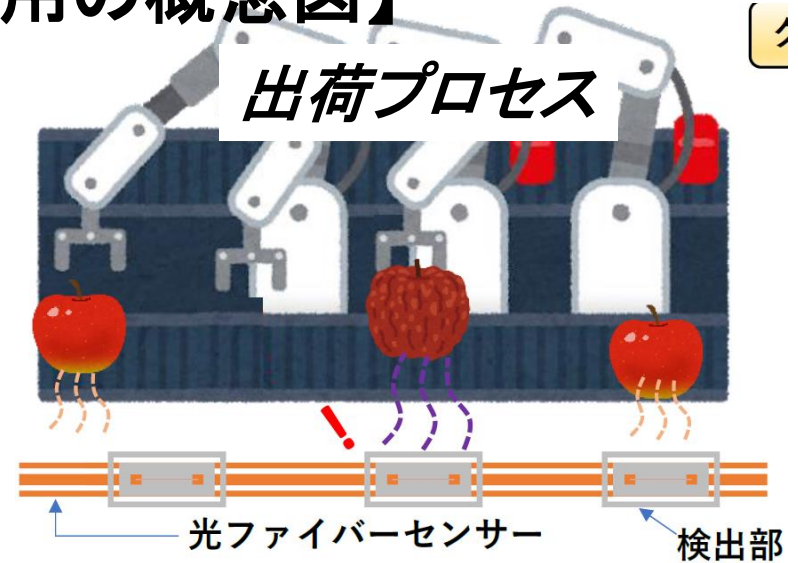
# 想定される用途 3

## 【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



出荷プロセス



### 【優位点】

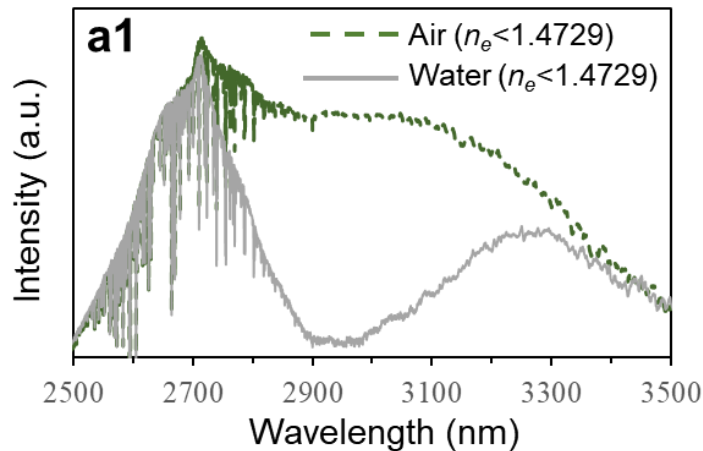
- ・局所的なセンシング
  - ➡ 農作物を個別に管理
- ・可搬性
  - ➡ 収穫の判断
- ・リアルタイム性
  - ➡ 流れ作業での出荷判断
  - ➡ 大量生産

### 【計測対象】

- ・農作物の成熟度管理  
 $C_2H_4$  (波長  $3.2 \mu m$ )

# 想定される用途 4

## 【液体の水のセンシングスペクトル】

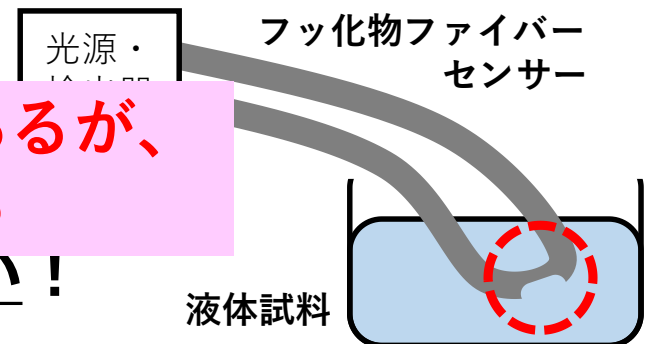


センサー部長さ10 mmでも  
水の吸収が飽和しない

液体の場合、  
10  $\mu\text{m}$ 未満のセル厚さに相当！

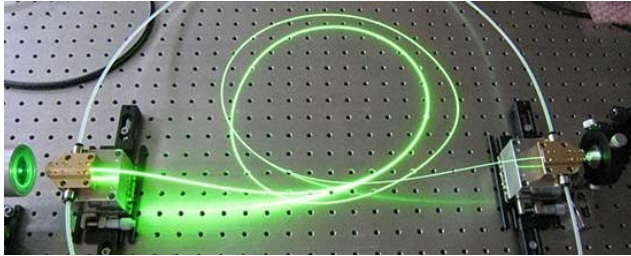
試料の濃度調製や薄膜化をせずに、  
ATR法のような液体・固体の成分分析が容易に

イン  
プリズムのATRよりも計測の目田度が高い！  
実用化にはいろいろ改善の余地があるが、  
いろんな用途での応用が期待できる



# 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



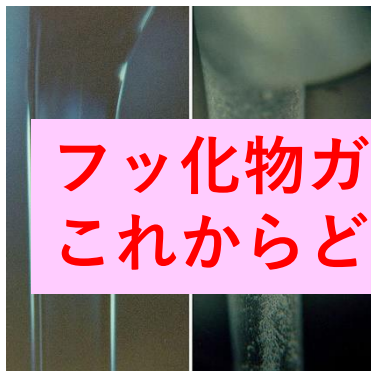
中赤外フッ化物ファイバーレーザー  
※発表者ら, Opt. Lett. 44, 4777 (2019).

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(宇宙)での高品質なフッ化物ファイバー製造が実証

**フッ化物ガラスを使ったデバイスが  
これからどんどん登場すると予想**

価格:1万円~4万円/メートル

※ISS National LabのHPより

# まとめ

- 希土類を共添加したフッ化物ガラスを材料から開発し、ファイバー化して、広帯域な中赤外ASE光源を実現した
- 開発した光源を使った赤外式のフッ化物光ファイバーセンサーを初めて実証した
- このセンサーデバイスは、さまざまな用途での実用化が期待される
- フッ化物ガラス光ファイバーを使ったデバイスの社会実装が増える  
と予想

# 謝辞

本研究は、令和2年度日本板硝子材料工学助成会の助成を受け実施されたものであり、ここに謝意を表します。

本研究に関連したその他の助成金

- JST A-STEP R3年度・産学共同(育成型)
- NEDO 若サポ R4年度・マッチングフェーズ
- 科研費 基盤C 20K05374
- NINS 産学連携支援事業 R2, R3年度
- 池谷科学技術振興財団 R3年度
- 田中貴金属記念財団 R4年度

ほか

本研究に関連した共同研究者

・秋田県立大学

・横浜国立大学

・ファイバーラボ株式会社 小川 和彦様

・京都大学

・東京工業大学

・京都大学

ほか

合谷賢治 助教

西島喜明 准教授

田部勢津久 教授

岸哲生 准教授

時田茂樹 教授

# お問い合わせ

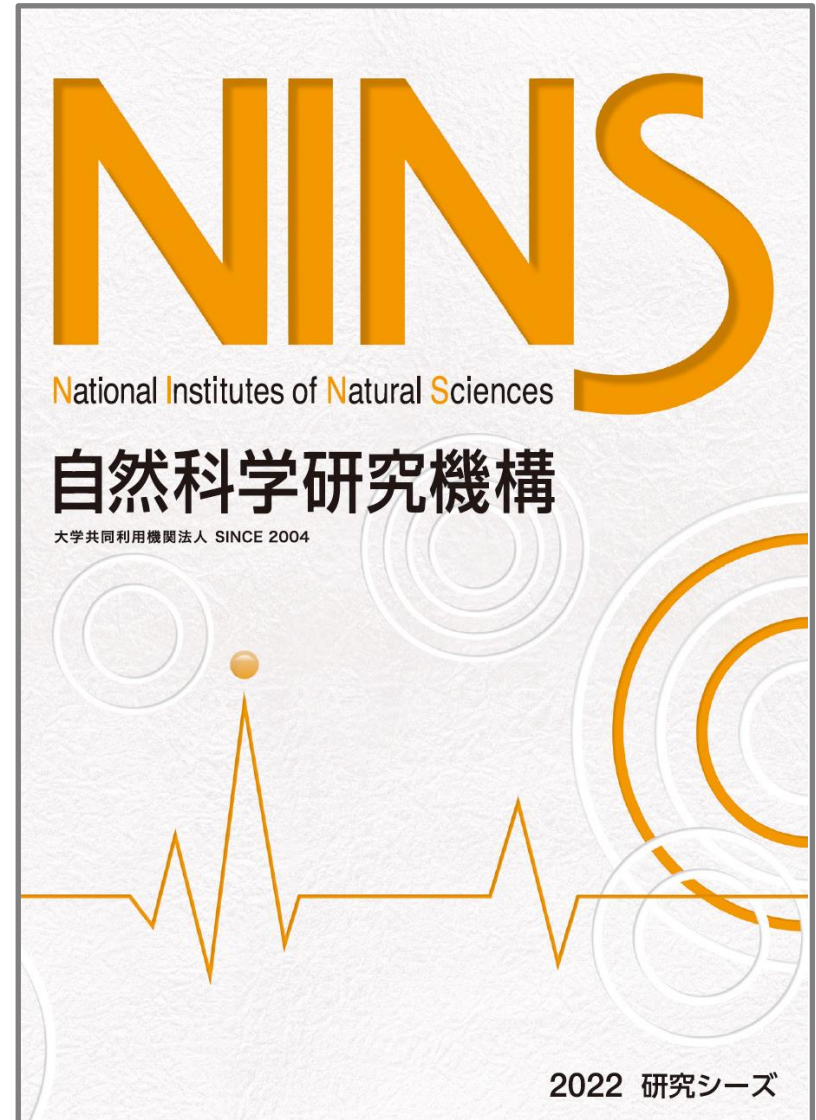
詳しくは...

「自然科学研究機構 研究シーズ集」  
をご覧ください。

<https://innovation.nins.jp/seeds/>

お問い合わせください

[uehara.hiyori@nifs.ac.jp](mailto:uehara.hiyori@nifs.ac.jp)



# クラウドファンディングの宣伝

## クラウドファンディング 始めました！

<https://www.nifs.ac.jp/kikin/menu-projects.html>

[uehara.hiyori@nifs.ac.jp](mailto:uehara.hiyori@nifs.ac.jp)

文科省寄附ポータルサイトに掲載

[https://www.mext.go.jp/donation\\_portal-site.html](https://www.mext.go.jp/donation_portal-site.html)



## プロジェクト型寄附へのご支援のお願い

### プロジェクトNo.1

#### 「めざせ、地上の太陽」プロジェクト

～究極の耐熱材料をめざして～ 目標金額：500万円



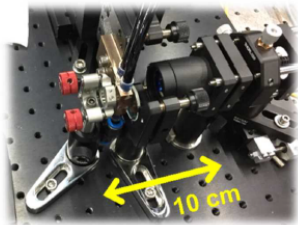
レーザー加工を施したタングステン複合材料を開発し、従来にない耐熱材料を実現します。これにより、近い将来実現する核融合発電の効率化に貢献できます。

核融合応用のほかにも、放熱特性の求められるコンピュータ、LEDなどの産業機器の高性能化、金属接合技術の高度化などの波及効果が大きい期待できます。

### プロジェクトNo.2

#### 国産モバイルレーザーで

世界をもっと快適に！プロジェクト 目標金額：500万円



透明材料の加工に適した中赤外波長で発振する小型で低コストなレーザー光源を使い、高性能な樹脂フィルム切断装置を開発します。これにより、次世代型電子デバイスの開発が加速し、皆様の生活がより快適なものになります。

さらに、本プロジェクトで作製するレーザー光源を搭載した治療器具を開発することで、将来的に医療・生体分野への貢献を目指します。

■募集期間：～2025年3月31日

■特典：感謝状、特製文具 ※寄附額に応じて特典が上乘せされます

■税制上の優遇措置：核融合科学研究所は自然科学研究機構の一機関です。自然科学研究機構への寄附金は、税制上の優遇措置を受けることができます。

■関連するSDGs：

目標7（エネルギーをみんなに そしてクリーンに）

目標9（産業と技術革新の基盤をつくろう）

■寄附金使用用途：研究に必要な実験機器、消耗品等の購入等