

# マルチモダル（磁場、温度、電場、圧力）対応 高信頼性ダイヤモンド量子センサデバイス

荒井 慧悟

東京科学大学工学院・准教授

## ダイヤモンド量子センシングが人類の知覚の地平線を広げる Executive Summary

- ▶ **量子センシング**は、量子系を環境の物理量に対して最も変化しやすく設計した計測技術である。
- ▶ 数ある量子センシング技術のなかでも、**ダイヤモンド中の窒素・空孔欠陥（NVセンター）**は、極限環境での安定性や、空間分解能及び計測感度の高さ、といった特徴を持つ。
- ▶ NVセンターの駆動には、金属で作成した電気回路が一般に用いられる。ところが、金属による回路では、**腐食や加熱による精度の劣化**など、技術的な課題があった。
- ▶ 本説明会では、NVセンターとその駆動に必要なマイクロ波導波路を同じ**ダイヤモンドに実装する新技術**について報告する。
- ▶ 本技術は、**耐腐食性・耐温性のある次世代量子チップ**を構成するのに有用であり、海中や工業炉などの**極限環境に人類の知覚を広げる**可能性をもつ。

## 産官学の経験を持つ物理学者が量子センシングをご案内します

### 講演者略歴

|           |                                       |
|-----------|---------------------------------------|
| 2004-2008 | 東京大学理学部物理学科                           |
| 2008-2017 | マサチューセッツ工科大学物理学科/<br>ハーバード大学物理学科      |
| 2017-2020 | 株式会社ボストンコンサルティンググループ                  |
| 2020-2024 | 東京工業大学工学院                             |
| 2024-     | 東京科学大学工学院<br>科学技術振興機構<br>経済産業省商務情報政策局 |

# ダイヤモンド量子センシングと課題

社会実装に向けて期待の高まる量子センシング。  
量子系の駆動に技術的課題あり

# 未来社会において物理空間の情報をより効率的に獲得する量子

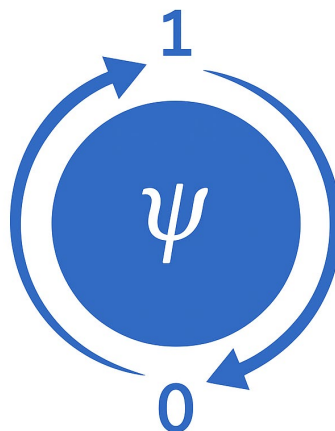
背景：量子センシング

物理空間とサイバー空間をつなぐ

センシング、プロセッシング、メモリ、アクチュエーション

なかでも**センシング**は2030年に50兆円を見込むCAGR10%市場<sup>[1]</sup>

量子センシングは**量子ビット**系を外界に対して最も変化しやすく設計した技術

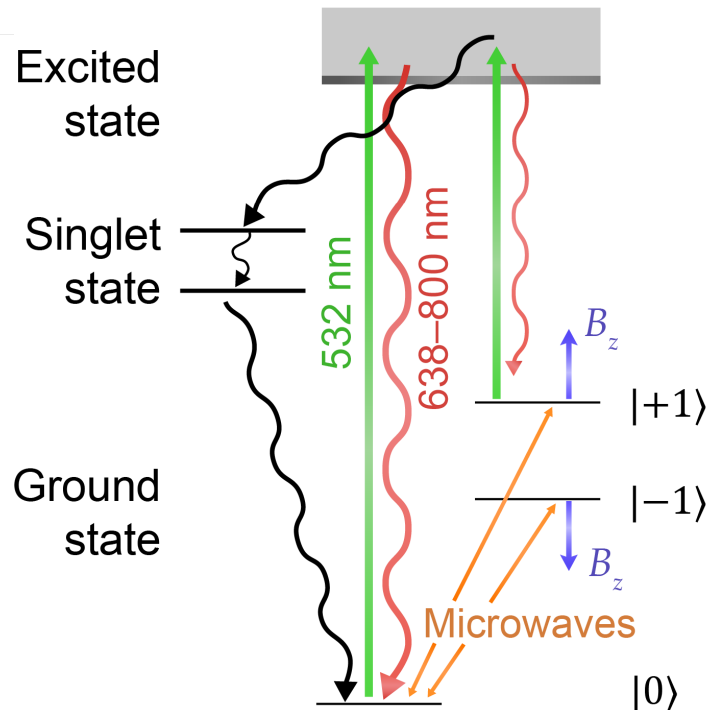
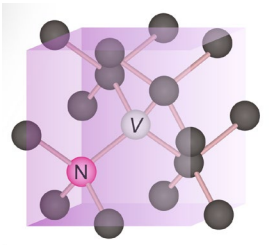


Spin Quantum Bit

# 量子ビットをダイヤモンド中の窒素・空孔欠陥で実装する

背景：NVセンターのエネルギー準位と制御

## NV ground/excited states

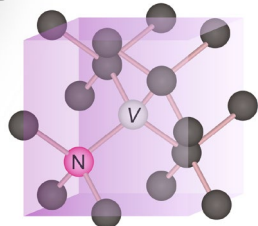


## NV state control

- **Qubit** defined by  $m_s=0$  and  $-1$  after Zeeman splitting with B-field.
- **Initialization** into  $m_s = 0$  with 532 nm laser.
- **Readout** from emission intensity into 637-840 nm band.
- **Mixing** states coherently via microwaves.

## 量子の特徴（空間分解能・感度・マルチモダル性）を生かす

背景：ダイヤモンド量子センシングの強み



### 感度

磁場や温度などを従来のセンサよりも大幅に高い精度で測定可能

### 室温動作

量子デバイスの多くが極低温での冷却を必要とするのに対し、固体量子センサは室温で動作するため、小型化や設置場所の自由度が高まる

### 広いダイナミックレンジ:

測定できる信号の範囲が広く、微弱な変化から強い変化まで、幅広い範囲を測定可能

### ナノレベル計測

ナノメートルサイズの微小領域での計測が可能で、細胞や物質の内部構造を調べることが可能

### マルチセンシング

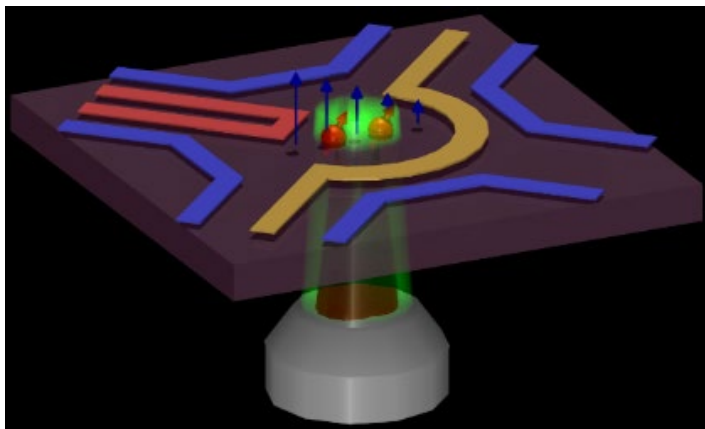
温度と磁場を同時に計測するなど、複数の物理量を同時に測定できる

### 極限環境耐性

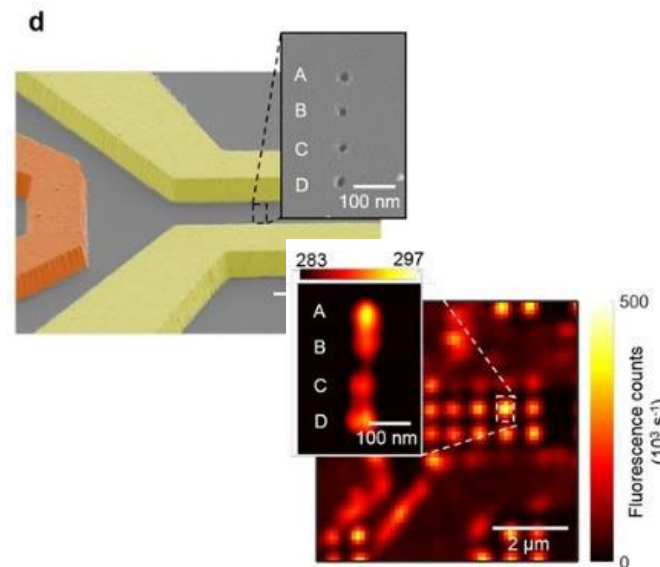
低温～高温、低圧～高圧などの環境下でも動作

## NVセンターの制御には金属の電気回路を使用

背景：マイクロ波回路の例と課題



KA et al., **Nature Nanotech** (2015)



H. Zhang, KA et al., **npj Quantum Information** (2016)

金属回路には、腐食や加熱による材質劣化の課題あり

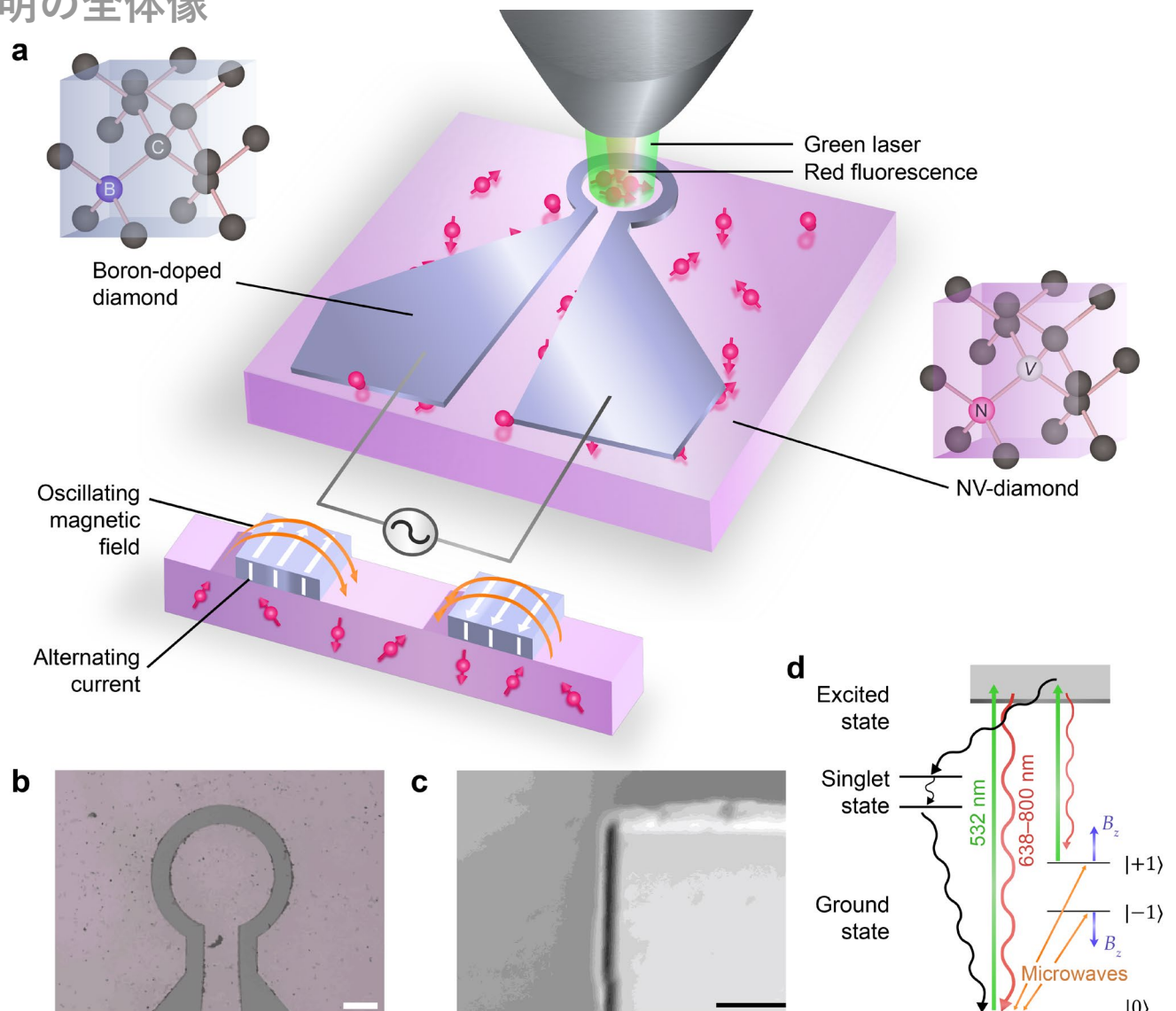
# 新技術：ダイヤモンド量子デバイス

NVセンターと

その駆動に必要なマイクロ波導波路を  
同じダイヤモンドに実装する技術を開発した

# NVセンターとマイクロ波回路を同じダイヤモンドに実装

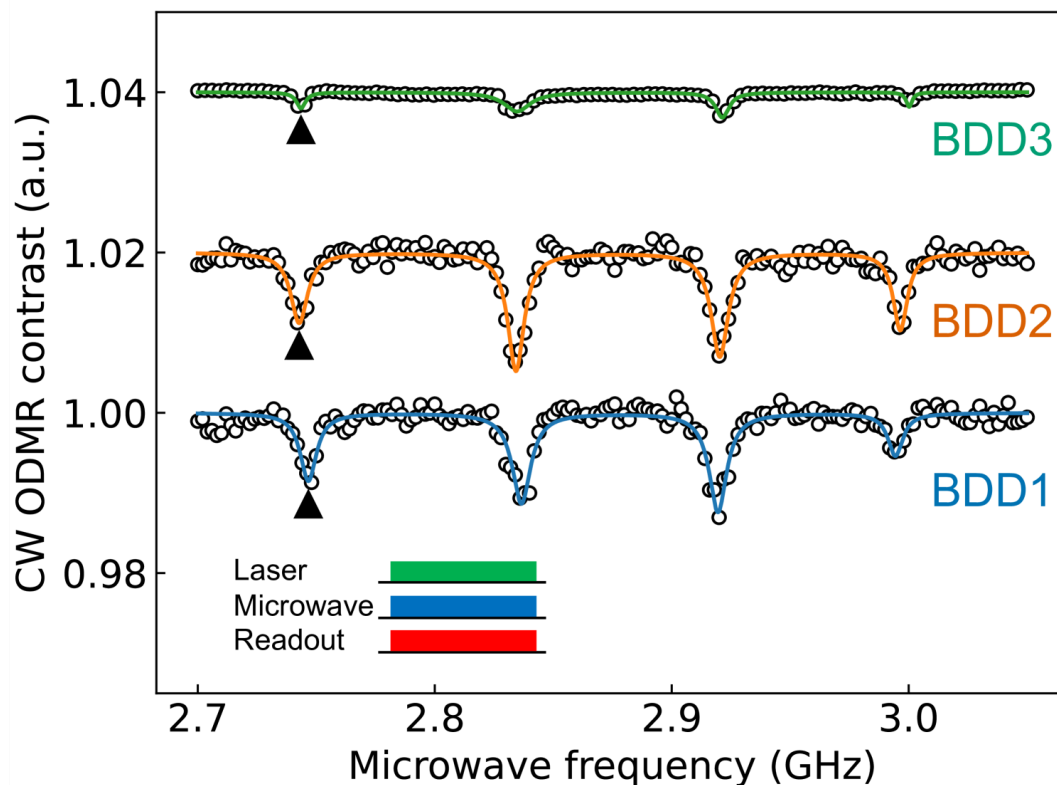
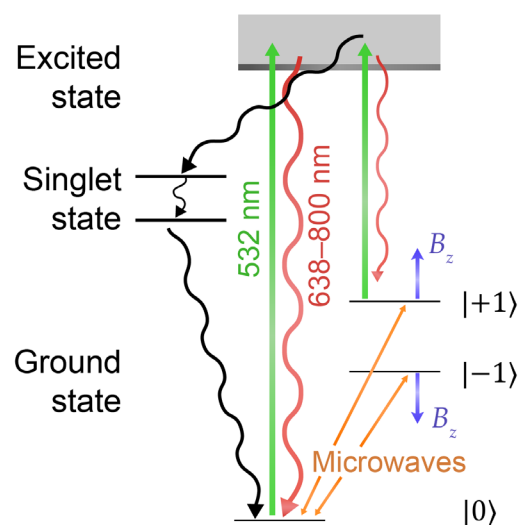
新技術：発明の全体像



Ohkuma *et al.*, arXiv2412.15586 (2024)

# ホウ素添加回路で連続波光検出磁気共鳴を実証

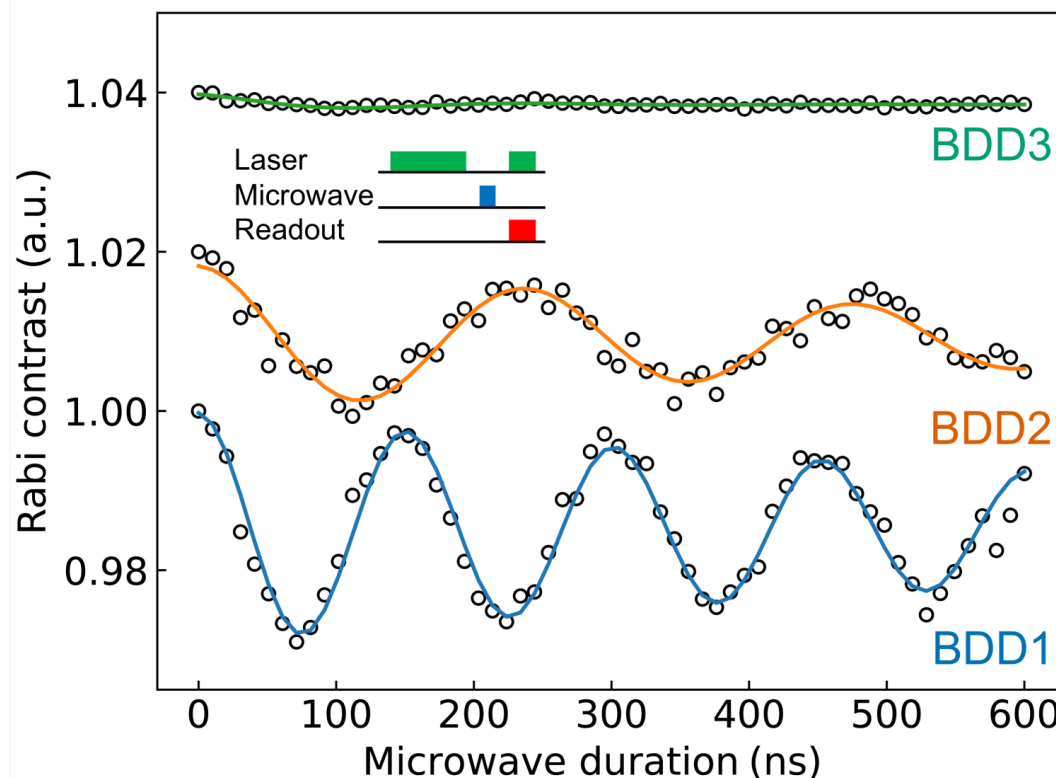
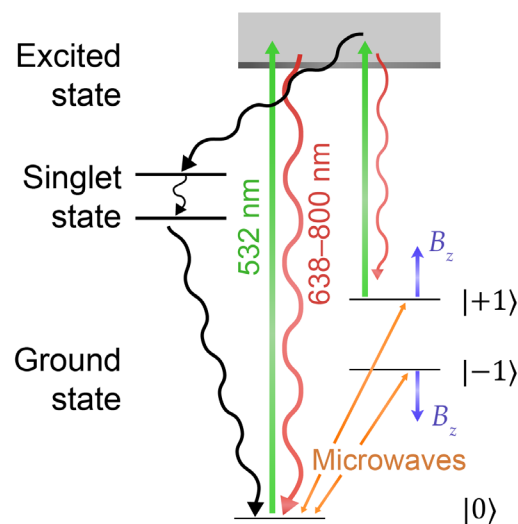
## 新技術：主要結果①



金属回路と同様にNVの連続駆動ができることを確認

# ホウ素添加回路でラビ振動を実証

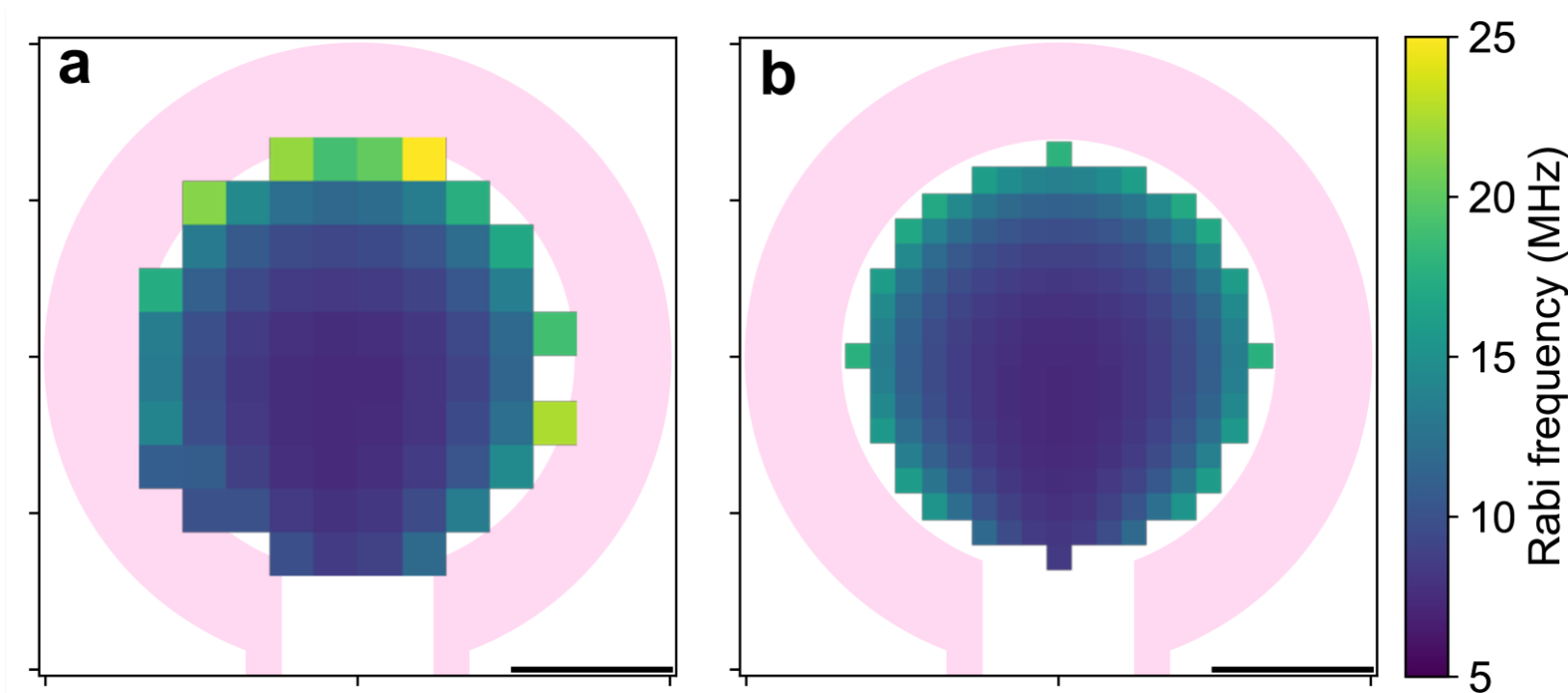
## 新技術：主要結果②



金属回路と同様にNVのコヒーレント制御を確認

## マイクロ波強度の空間パターンも数値計算と整合

新技術：主要結果③



大規模量子デバイスへの応用可能性を示唆

## 本技術の応用可能性

本技術は、耐腐食性・耐温性のある量子チップの構成に有用で、海中や工業炉などの極限環境へと人類の知覚の地平線を広げる可能性をもつ

# インフラ & 海洋で新たなセンサが必要とされている

応用可能性：ターゲット産業セグメント & Total Addressable Market

## Infrastructure Industry

## Ocean Industry

Power

Water

Railroad

Machinery

Resources

Climate

Diastrophism

2030年 インフラ維持管理技術投資  
(国内)

**800** 億円

富士経済(予測)

2023年 工場DX  
(国内)

**1.8** 兆円

矢野経済(予測)

2021年 政府地下資源探鉱投資  
(グローバル)

**1.7** 兆円

S&P Global Market Intelligence (実績)

市場

●———— 足元で大きな市場あり

●———— 今後の急拡大を予見

人類の知覚の地平線を拡大して、  
人々の生活の攻（海洋進出）・守（インフラ保守）に貢献したい

# 感度・耐環境性に欠く既存センサは、課題解決が困難

応用可能性：顧客のアンメットニーズと既存技術の分析

## Infrastructure

## Ocean

### Power

### Water

### Railroad

### Machinery

### Resources

### Climate

### Diastrophism

既存技術 & 課題

#### 電流メータ

計測に手間  
破損個所が不明

#### 水流メータ

破損特定が不明

#### 電流メータ

計測に手間  
破損個所が不明

#### 渦流探傷

分解能が低い  
高温で使えない

#### ホールセンサ

感度が低い  
海底環境で劣化

#### pH計

感度が低い  
海底環境で劣化

#### 地震計

音源が地質環境  
に左右される

#### ドローンカメラ

電線内部は  
見られない

#### 衛星写真/AI

確定診断でない

#### ドローンカメラ

電線内部は  
見られない

#### 光学顕微鏡

内部き裂は  
見られない

### 遠隔性・高解像

インフラの内部の様子を詳細に見たい

### 高感度

短時間で小さい信号を計測したい

### 耐温性

### 耐温性・耐圧性・耐腐食

期待

## ダイヤモンド材料が耐環境性を、量子が高感度・分解能を提供 応用可能性：ダイヤモンド量子センシングの競合優位性

### 耐環境性 ダイヤモンドとしての価値

#### 耐温性

極低温から高温（～1,000 °C）までダイヤモンドの結晶性が安定

#### 耐圧性

真空から高圧（300+ GPa）までダイヤモンドの結晶性が安定

#### 耐腐食

酸・アルカリや表面イオンに対して結晶が壊れにくい

### 高感度・分解能 量子としての価値

#### 遠隔性

磁場信号は物質を透過するため、遠隔検出が可能

#### 高感度

古典センサを超える精度（～nT@1秒）で磁場を計測可能

#### 高解像

古典センサを超える分解能（～nm）でイメージング可能

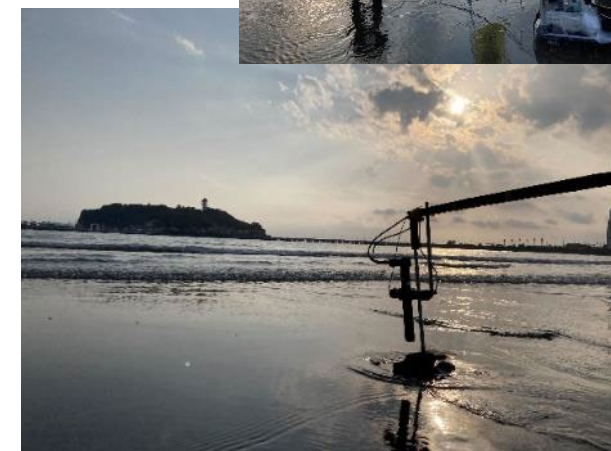
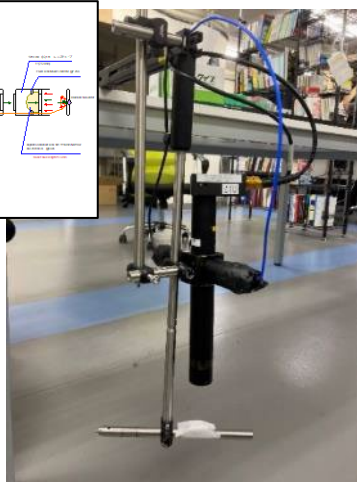
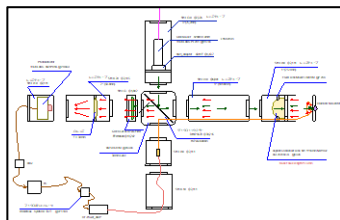
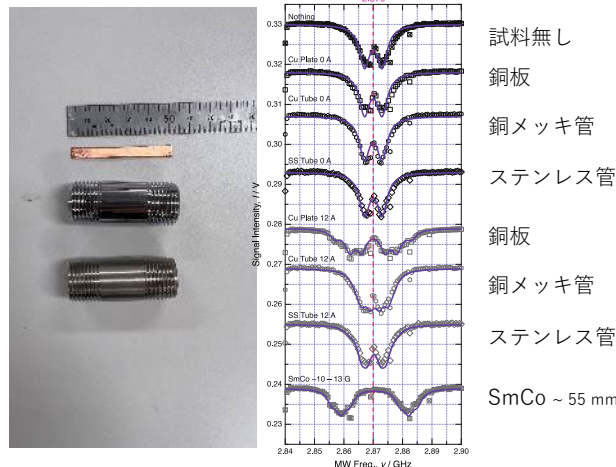
# スピード感を大切に、様々な簡易実証に挑戦中

応用可能性：研究チームの強み

## 量子センサの 小型化・ポータブル化

## 模擬インフラ計測実証

## 海中計測実証



# ダイヤモンド量子センシングで 人類の知覚の地平線を広げたい

## ダイヤモンド量子センシングが人類の知覚の地平線を広げる Executive Summary

- ▶ **量子センシング**は、量子系を環境の物理量に対して最も変化しやすく設計した計測技術である。
- ▶ 数ある量子センシング技術のなかでも、**ダイヤモンド中の窒素・空孔欠陥（NVセンター）**は、極限環境での安定性や、空間分解能及び計測感度の高さ、といった特徴を持つ。
- ▶ NVセンターの駆動には、金属で作成した電気回路が一般に用いられる。ところが、金属による回路では、**腐食や加熱による精度の劣化**など、技術的な課題があった。
- ▶ 本説明会では、NVセンターとその駆動に必要なマイクロ波導波路を同じ**ダイヤモンドに実装する新技術**について報告する。
- ▶ 本技術は、**耐腐食性・耐温性のある次世代量子チップ**を構成するのに有用であり、海中や工業炉などの**極限環境に人類の知覚を広げる**可能性をもつ。

## 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : ダイヤモンド量子センサー、  
ダイヤモンドアンビルセル型  
量子センサーおよび測定装置
- 出願番号 : 2023-217474
- 出願人 : 東京科学大学、NIMS
- 発明者 : 荒井慧悟、大山隼平  
松本凌、高野義彦

## お問い合わせ先

**東京科学大学 (Science Tokyo)**

産学共創機構技術プロモーション室

T E L 03-5734-3817

e-mail [consult@cim.isct.ac.jp](mailto:consult@cim.isct.ac.jp)