

# JST新技術説明会

## 磁気・生命現象の僅かな変化を捉える 超高感度量子センサ

2025/09/04

金沢大学 ナノマテリアル研究所

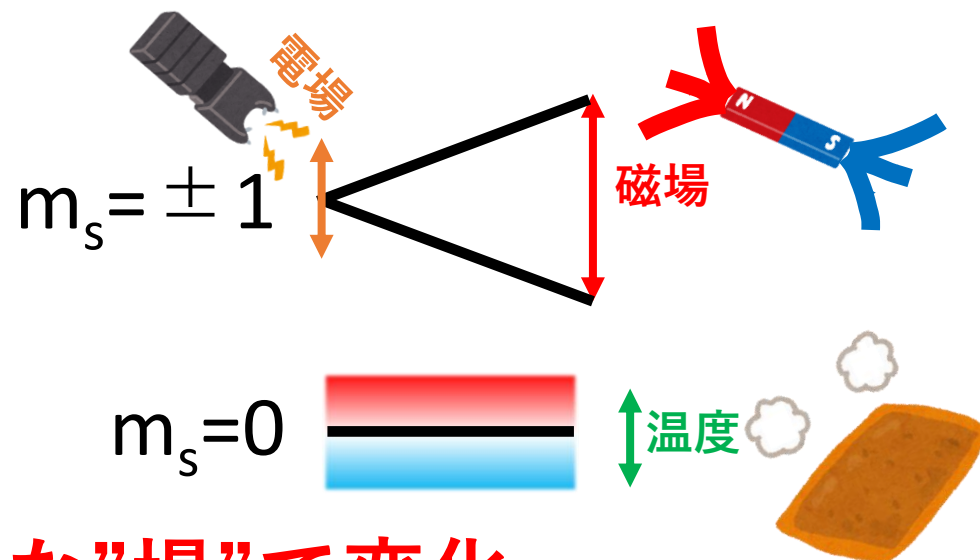
省エネデバイス開発グループ

林寛

# 窒素-空孔ペア(NV センター)

- ・ 環境に対する安定性  
ダイヤモンドの特性
- ・ nm~mmの幅広い空間分解能  
ナノダイヤ~インチダイヤ
- ・ 様々な“場”の測定が可能  
NVセンターの電子スピン特性

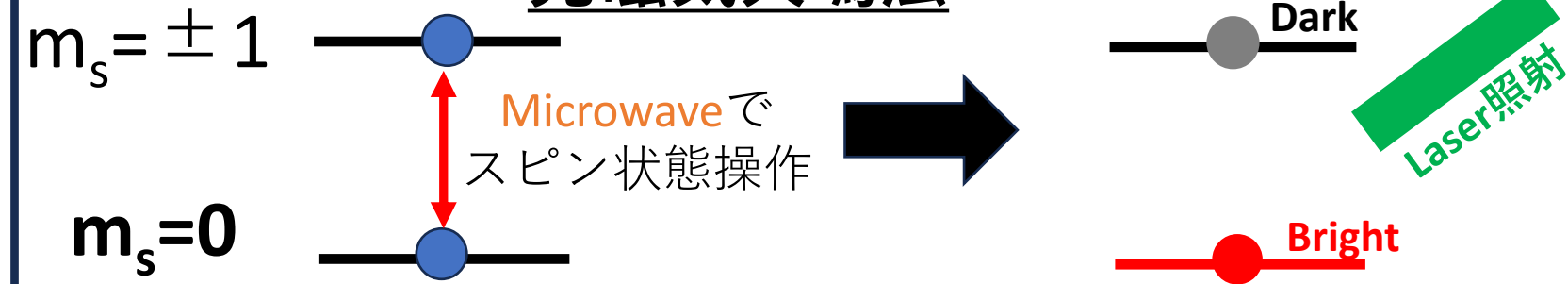
## 電子スピン状態



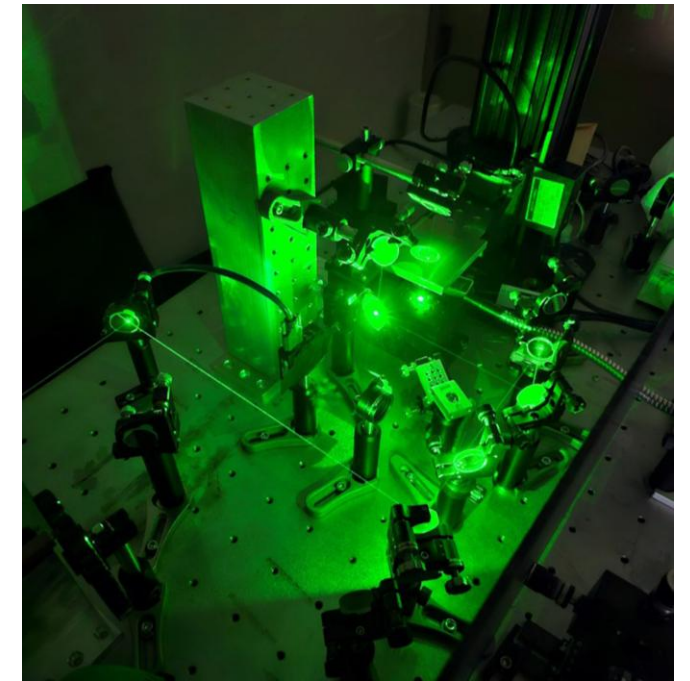
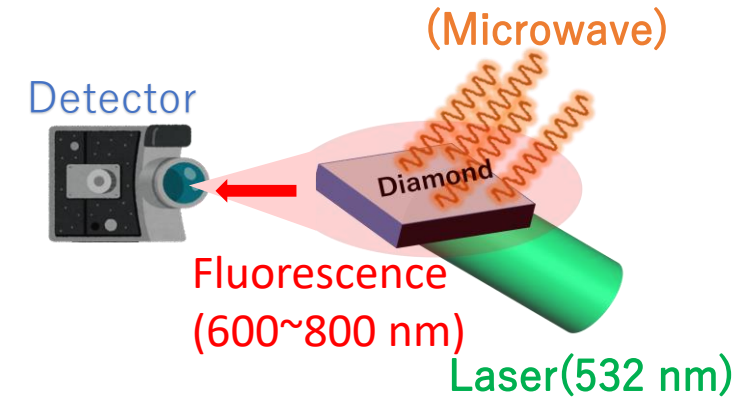
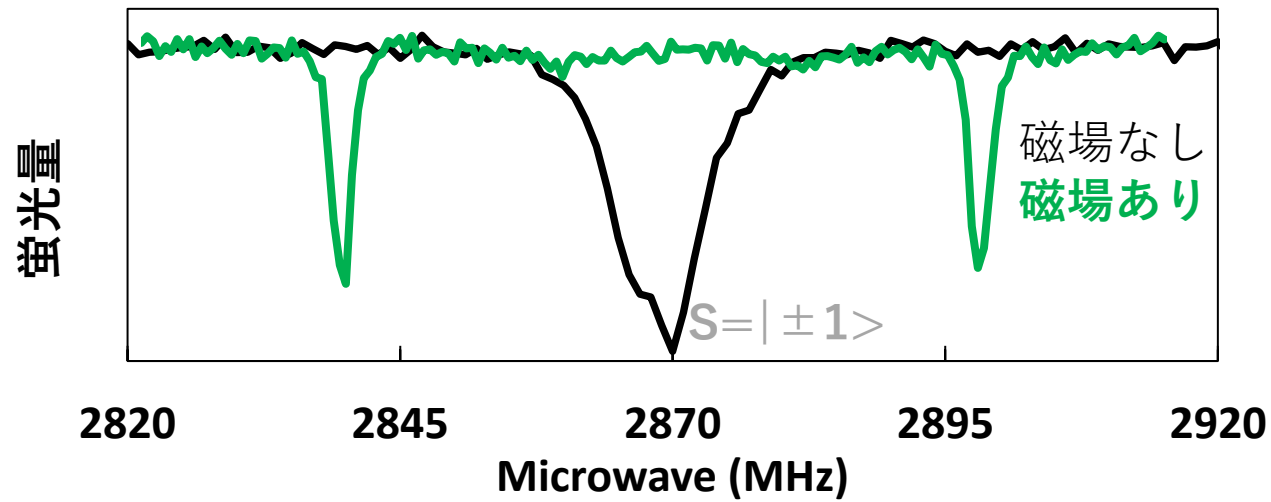
S=1の電子スピンの局在

電子スピン状態が様々な“場”で変化

## 光磁気共鳴法

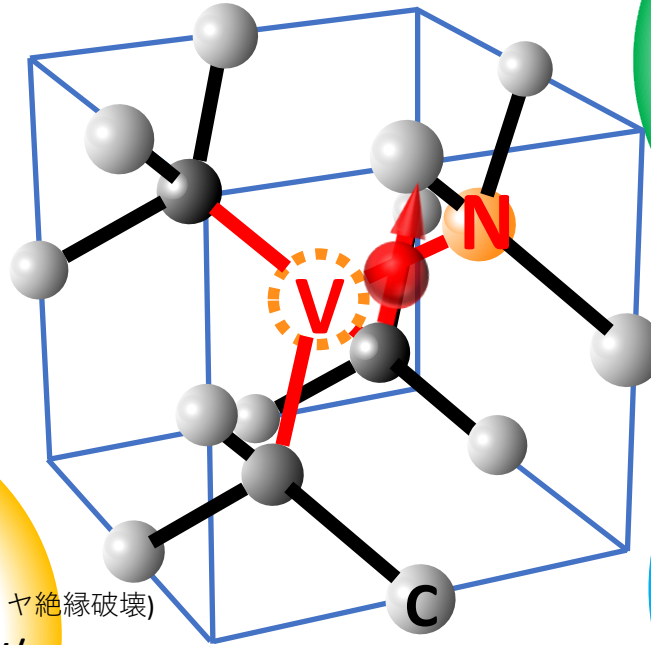
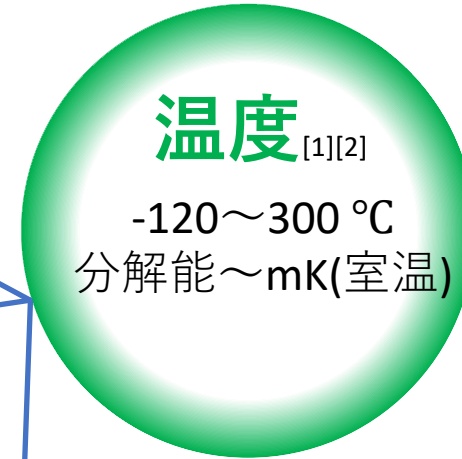
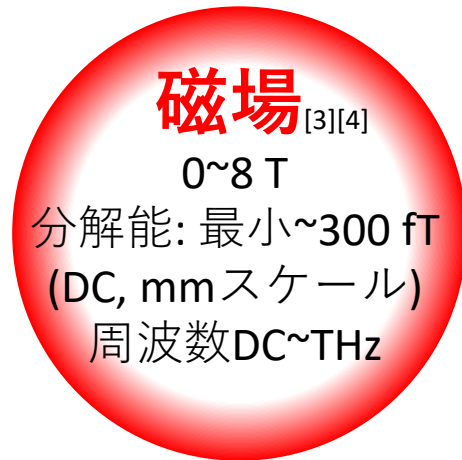


$S=|0\rangle \rightarrow$  光る  $S=|\pm 1\rangle \rightarrow$  光りにくい



ダイヤモンドの蛍光量変化からスピン状態=場を測定する

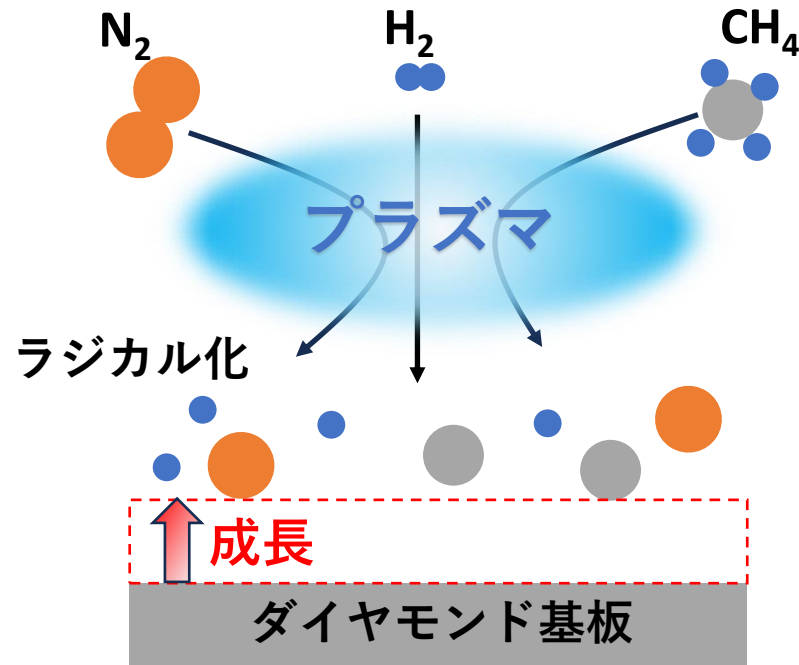
# 量子センサ



環境耐性を備えた高感度ハイブリットセンサ

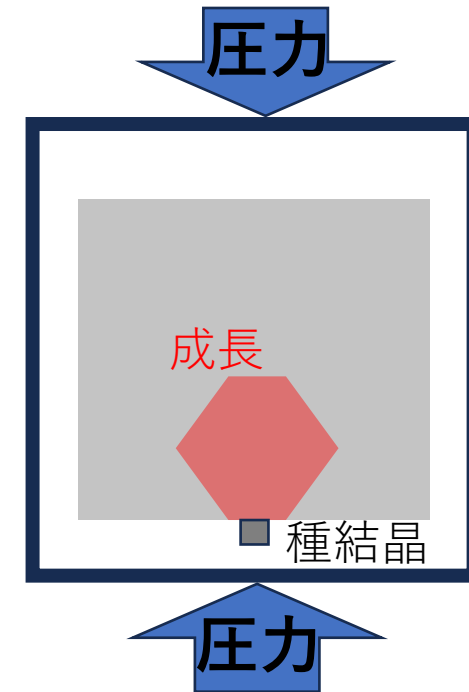
# ダイヤモンド合成法

## プラズマ化学気相堆積(CVD法)



薄膜 & 局所的にダイヤモンド層を作る方法

## 高温高压法(HPHT法)



大きなダイヤモンド結晶を作製する方法

パターニングやデバイス→CVDが主な作製法

# 量子センサの感度

センサー感度の式

$$dS_{\min} = \frac{\sqrt{\langle \delta P^2 \rangle}}{\max \left| \frac{\partial P}{\partial S} \right| \sqrt{n_{NV} TV}}$$

スピノイズ      NV数

$P$  : 信号強度  
 $n_{NV}$  : NVセンタ－濃度  
 $S$  : 測定対象の値  
 $V$  : 測定体積  
 $T$  : 積算時間

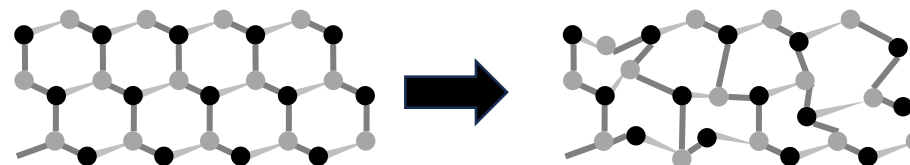
## スピノイズ源

・ 磁気ノイズ



NV?  
窒素原子?

・ 歪みノイズ

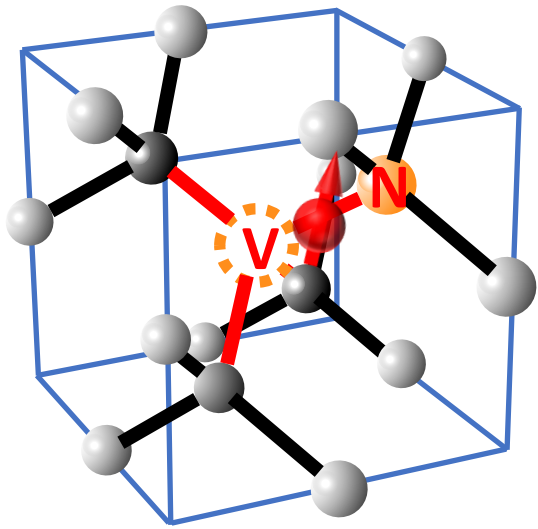


NVセンタ－や、その元となる窒素原子(P1センタ－)もノイズ源

できるだけノイズ源を減らし、NVセンタ－を作る事が重要

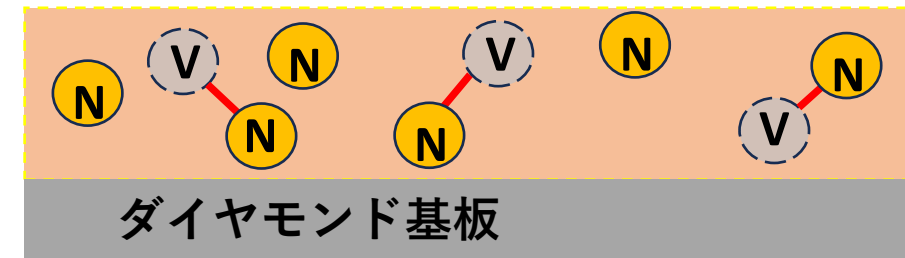
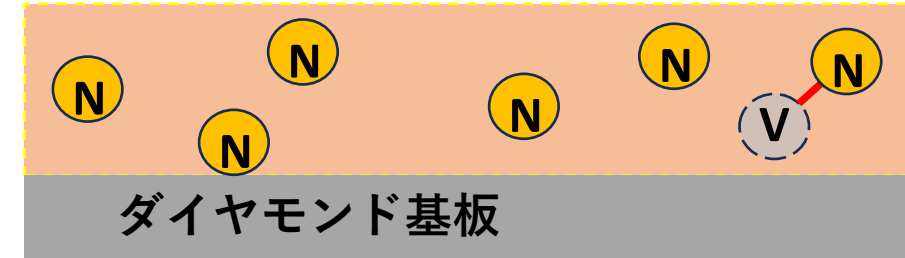
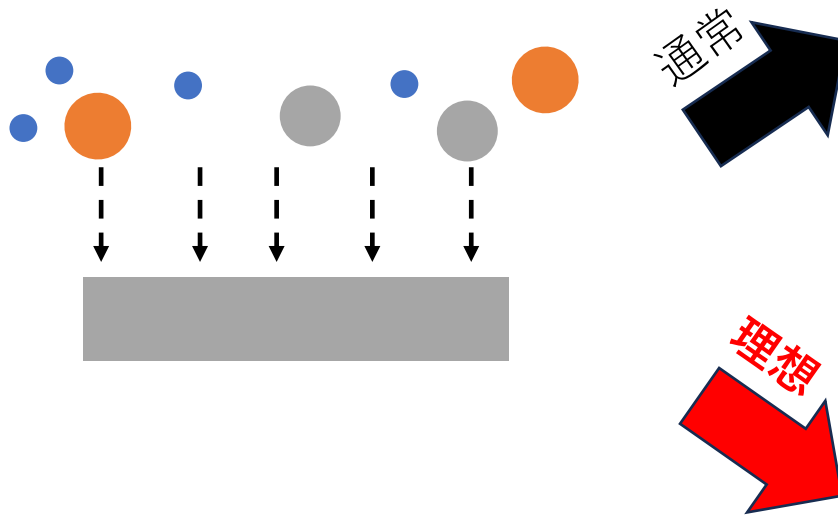
# CVDダイヤモンドの課題

CVD法:置換窒素(P1センター)の**NVセンター**への生成効率が20%未満



窒素と空孔欠陥が隣り同士

CVD成長



成長時に空孔導入が必要

# 先行研究: 金属上へのCVD成膜

金属(Ti:5 $\mu$ /Pt:10 $\mu$ /Au:20 $\mu$ )ストライプパターンを形成し金属上にダイヤモンド成長

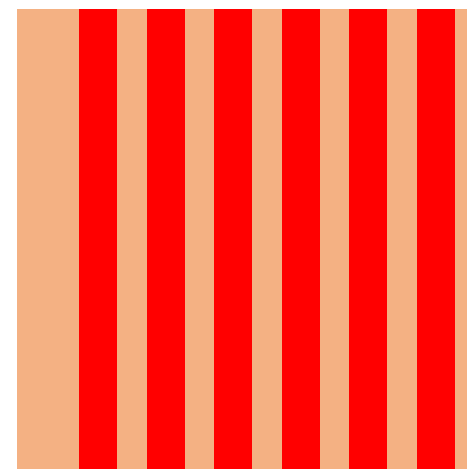
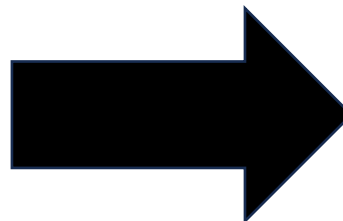
S. Zhang et. al., Carbon, 198, 392(2022).

金属ストライプパターン



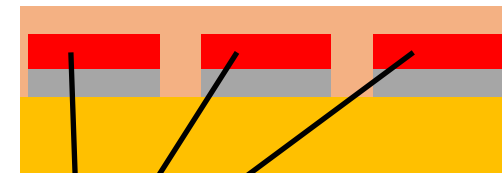
ダイヤモンド基板

横断面



成長ダイヤモンド

横断面



蛍光増大

金属上に成長した多結晶層から単結晶層への空孔導入により  
NV濃度が**6倍に増大**

さらなる空孔欠陥導入を狙える金属は???



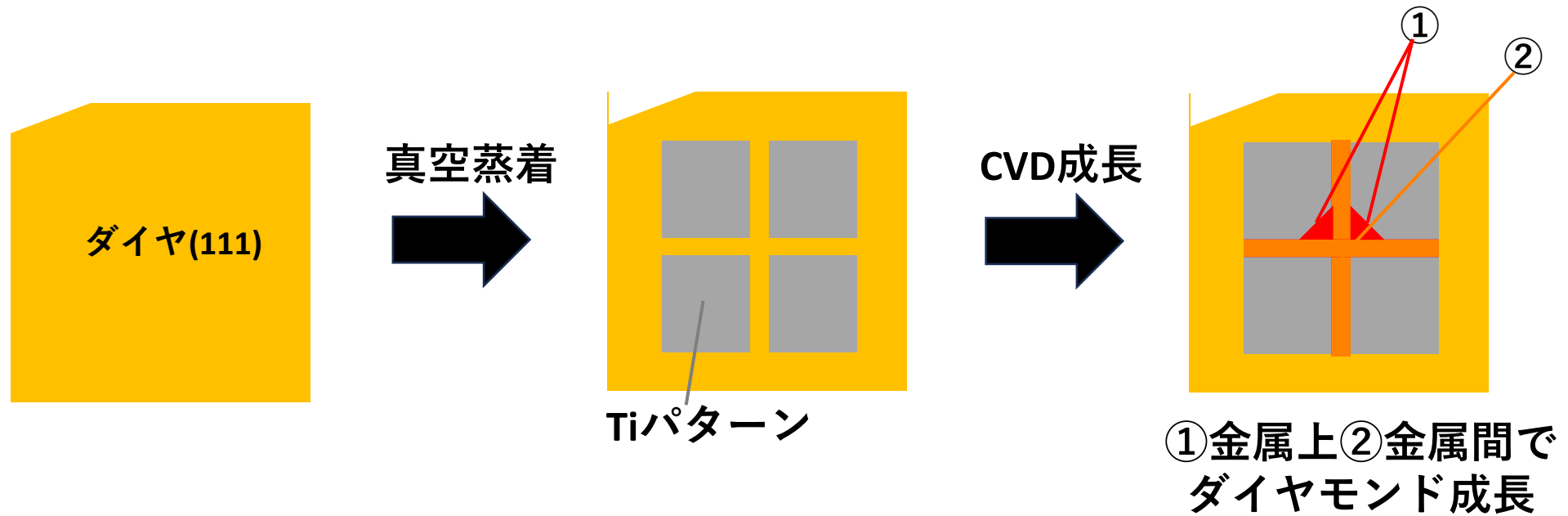
# 先行研究の比較

	蛍光増大	カーバイド化	結晶構造	金属上 Overgrowth
Diamond		-	FCC	-
W	~10倍	○(～ 600℃ )	HCP (WC)	△ (100) (ひび割れ)
Au	6 倍	×	FCC	○(100)
Ti	?	○(< 430℃)	FCC (TiC)	○? (本発表)

Ti→Crackのないダイヤモンド & 蛍光増大が狙えると期待

# 本紹介の技術内容

## Tiを用いたダイヤモンドへの空孔導入

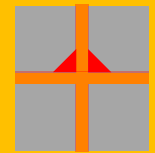


先行研究：金属上のみ空孔導入 & 量子センサ濃度増大(1のみ)

本技術:①だけでなく金属間(②)も蛍光増大

1. 基板洗浄(熱混酸)
2. フォトリソグラフィ
3. 真空蒸着(Ti : 50nm )
4. CVD成長
5. Tiパターン除去(熱混酸)
6. 評価(レーザー顕微鏡, 蛍光測定, ODMR)

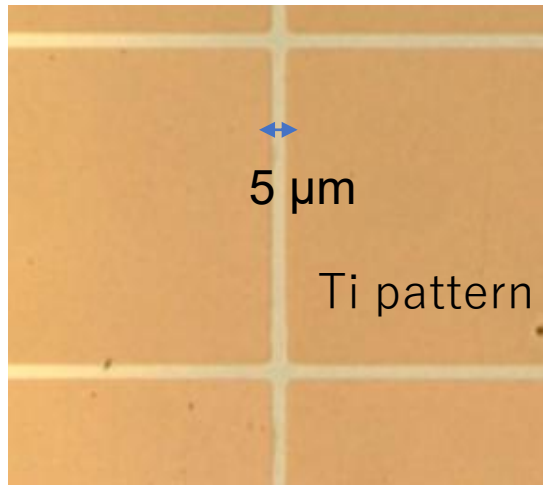
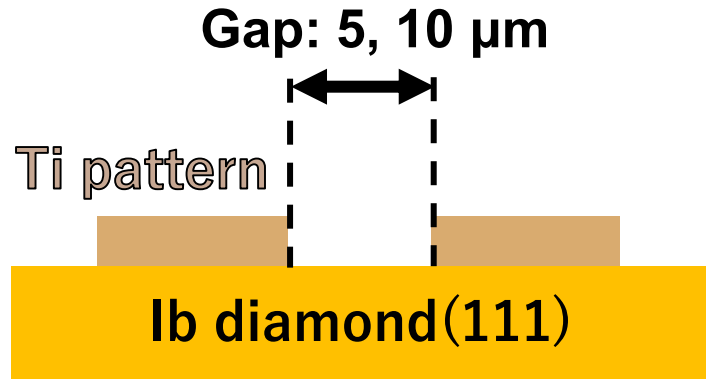
ダイヤ  
(111)



# 実験結果:レーザー顕微鏡像(成長後)

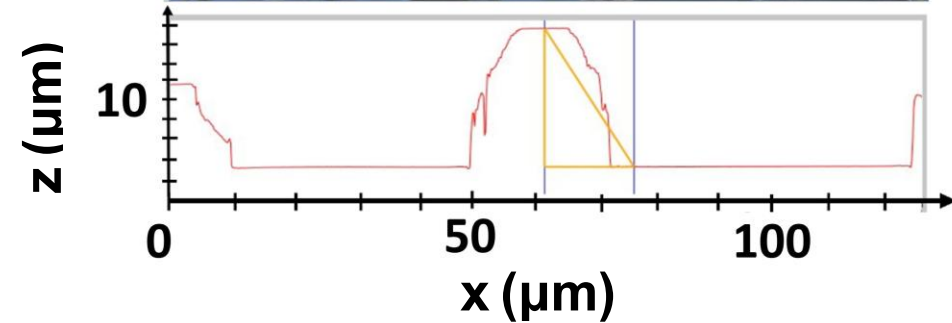
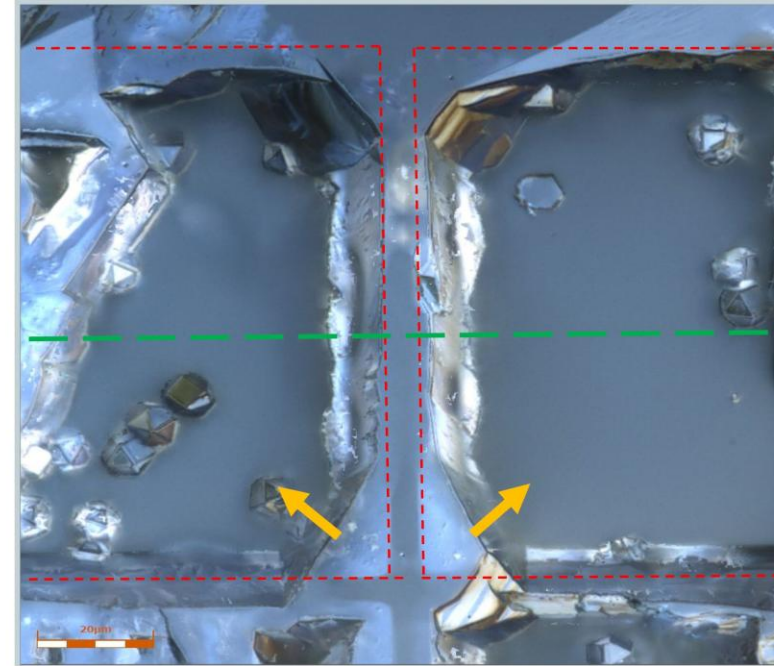
## ・ CVD成長

前



50 μm

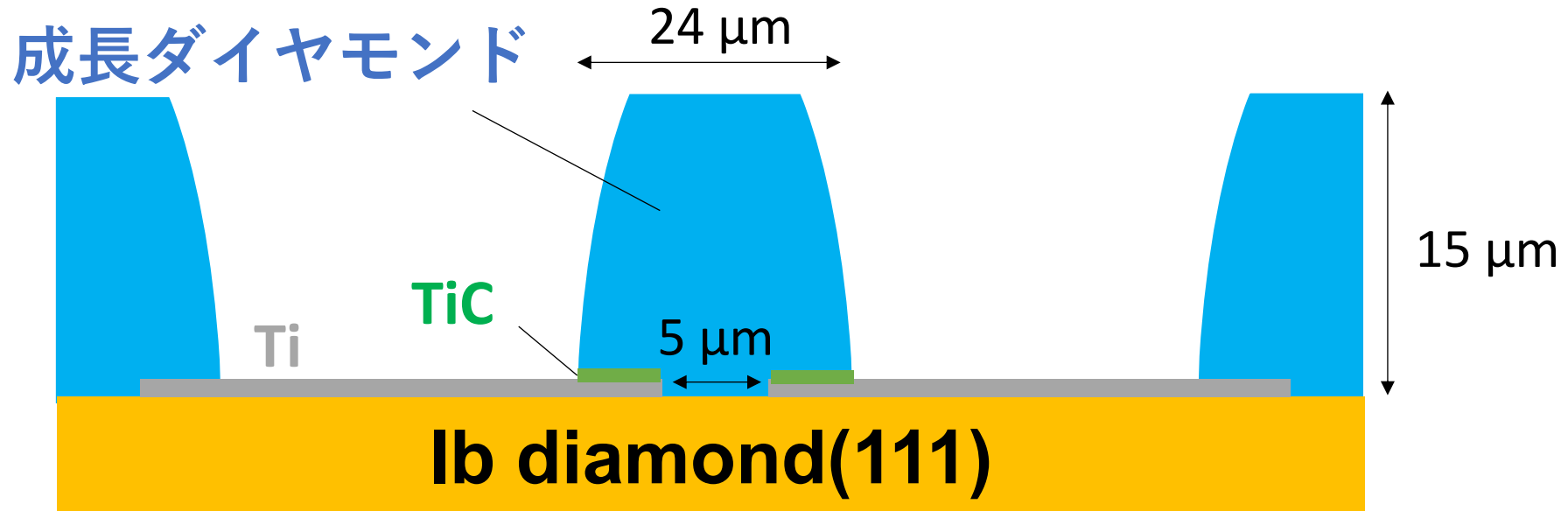
## ・ CVD成長(Ti除去後)



Tiパターン間からダイヤモンドが成長

# 成長模式図

## 断面模式図

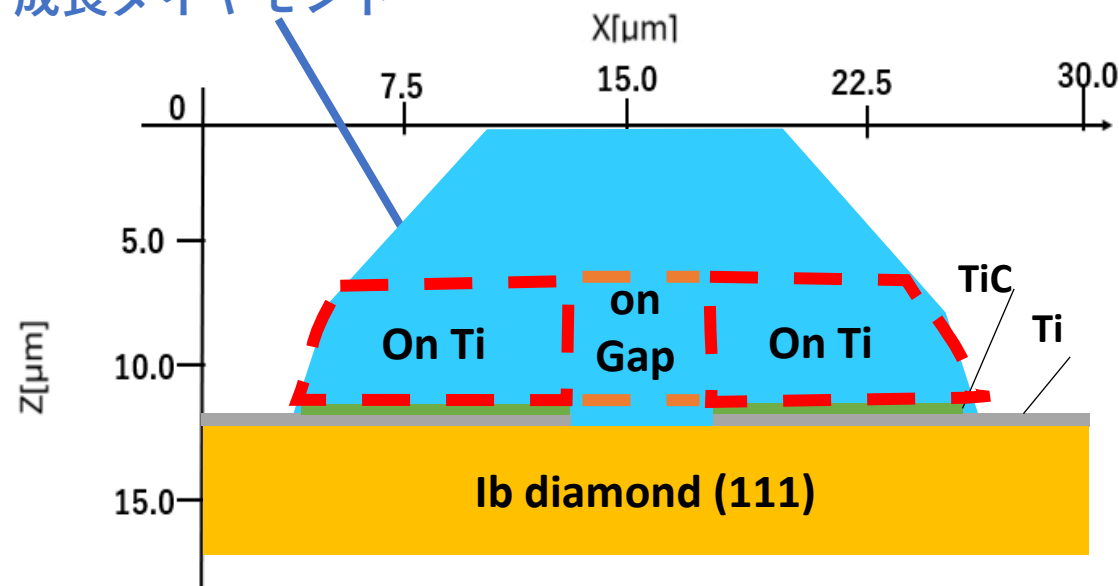


Tiパターン間からTi上を覆うように成長  
→Ti上でNV蛍光が増大していると期待

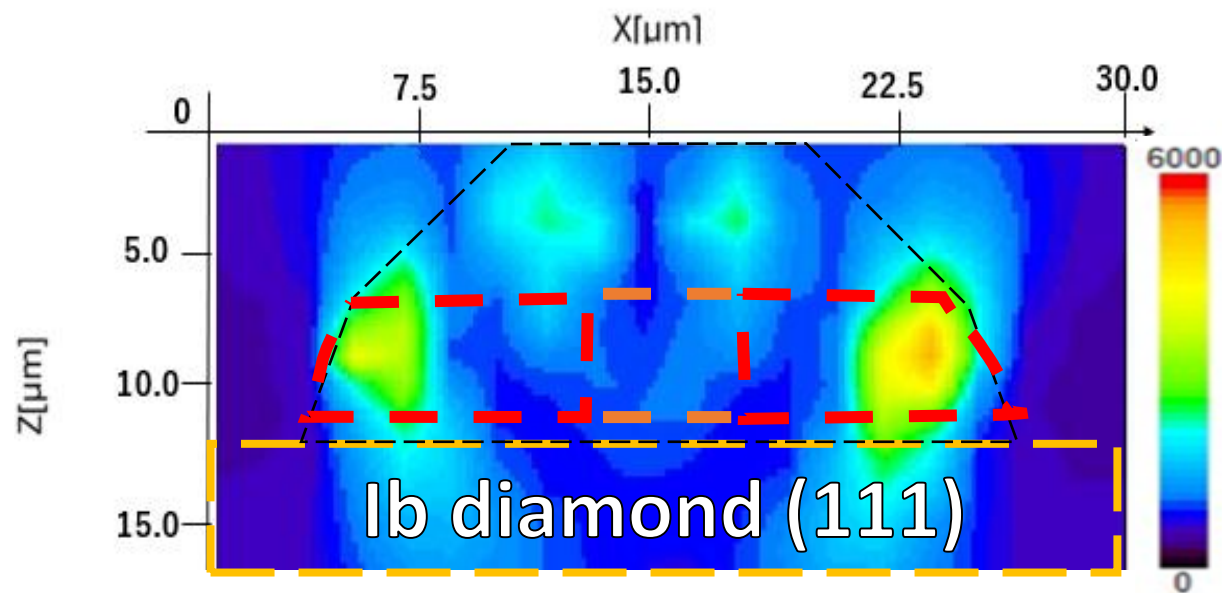
# NVセンター蛍光マップ(637 nm)

## 模式図

成長ダイヤモンド

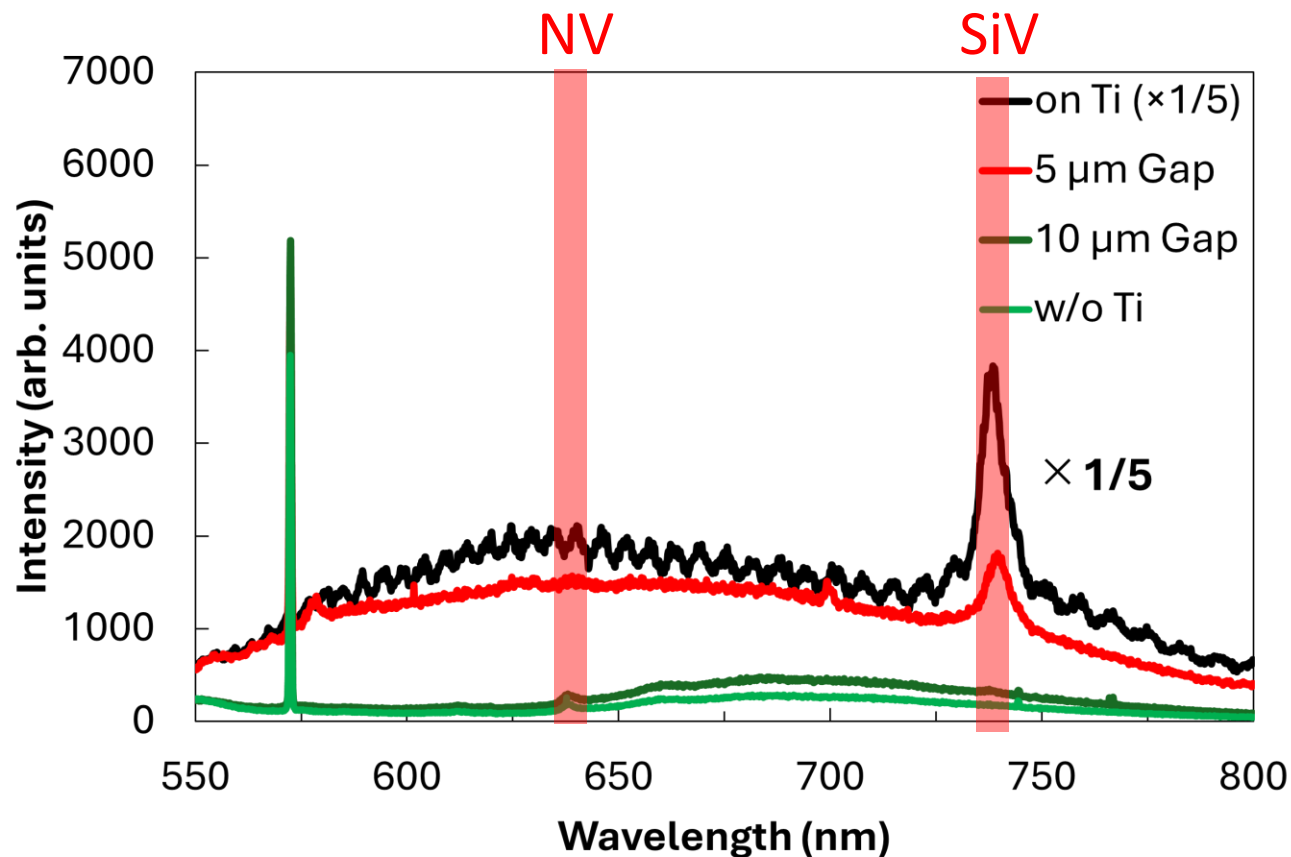


## 蛍光マップ



Ti上(On Ti)、とTiパターン間(Gap)両方で  
蛍光増大を確認

# フォトルミネッセンス結果



蛍光強度(/(w/o Ti))

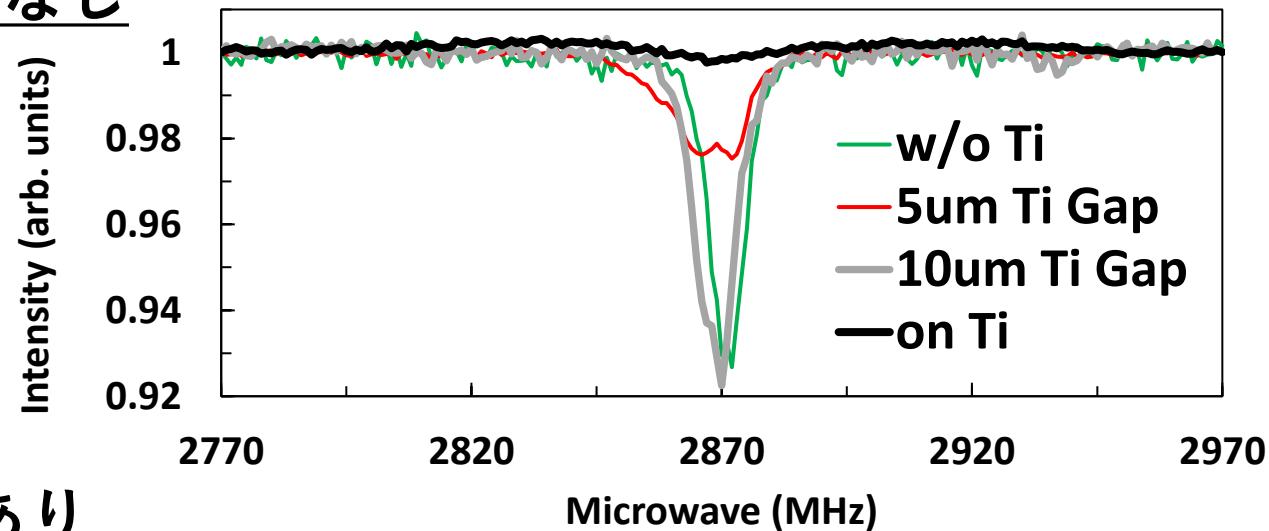
	637 nm (NV-ZPL)	738 nm (SiV)
On Ti	40	100.9
5um Ti Gap	5.6	10.1
10um Ti Gap	1.3	1.9

**NVセンターだけでなく、SiVセンターの蛍光も増大  
→空孔欠陥導入がされたと推察**

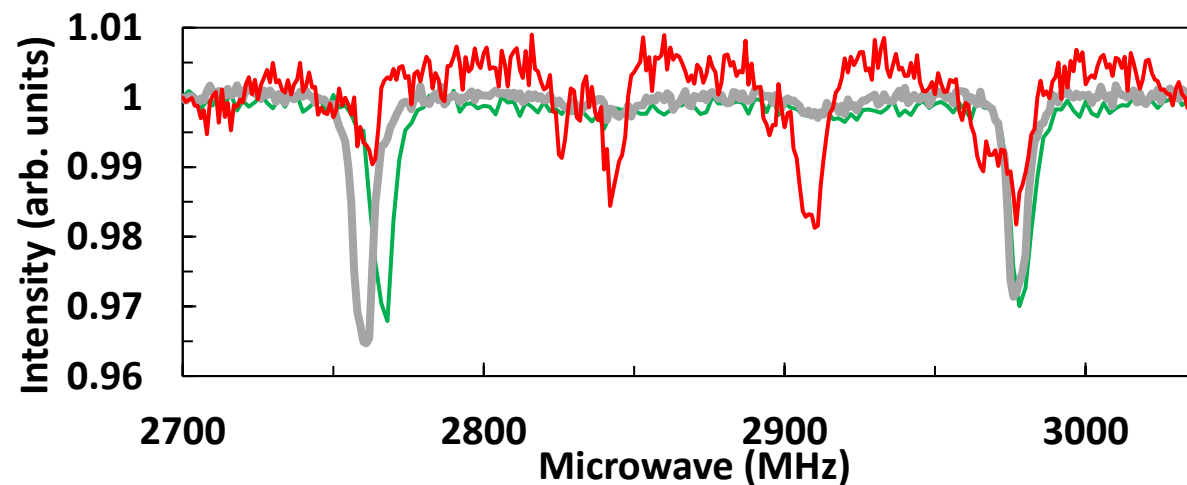
On Tiのスペクトルを見るとNVセンターが不安定な可能性がある。。。

# ODMR測定

## 静磁場なし



## 静磁場あり

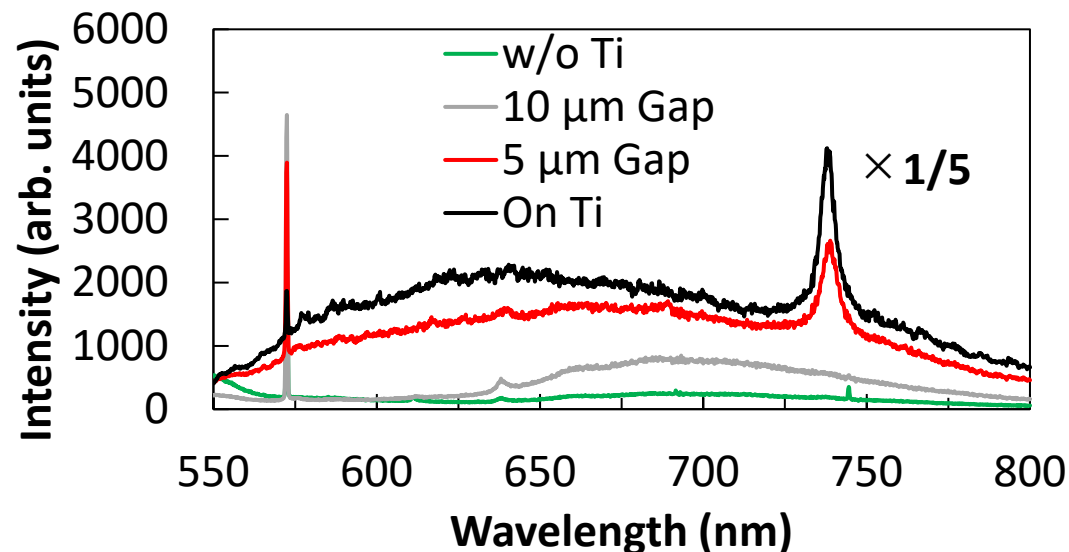


On TiではNVセンサーが不安定, 5  $\mu\text{m}$  Gap上ではODMR線幅が広い  
→歪み? or 空孔過多?



# 1200°Cアニール処理後

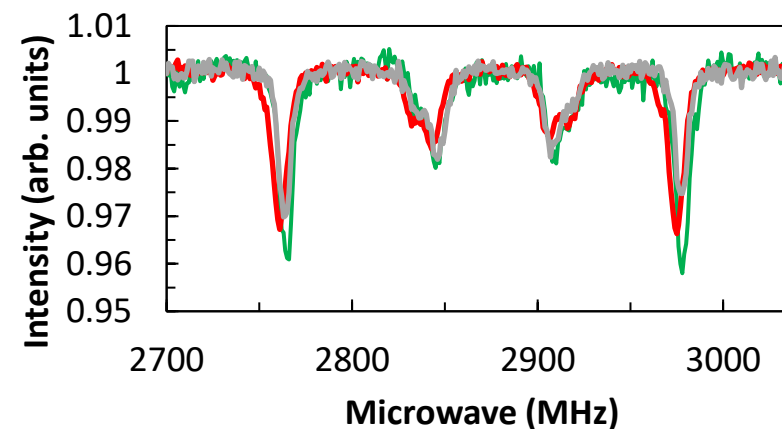
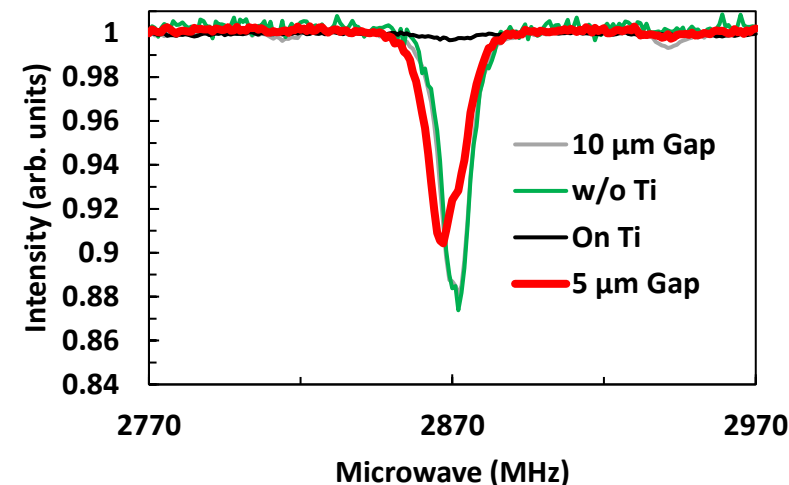
## PL



蛍光強度(/(w/o Ti))

	637 nm (NV-ZPL)	738 nm (SiV)
On Ti	62.5	107
5μm Ti Gap	9.0	13.4
10μm Ti Gap	2.7	3

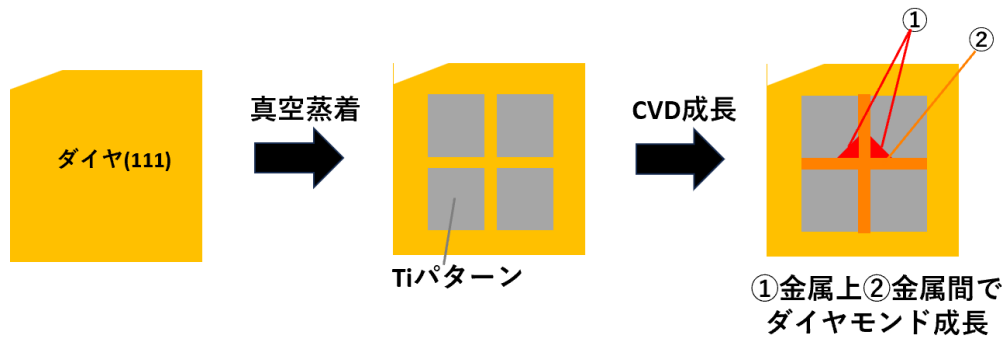
## ODMR



5μmGapのODMRが他と遜色のない強度に改善

## 本発表の新技術

Tiを用いたダイヤモンドへの空孔導入

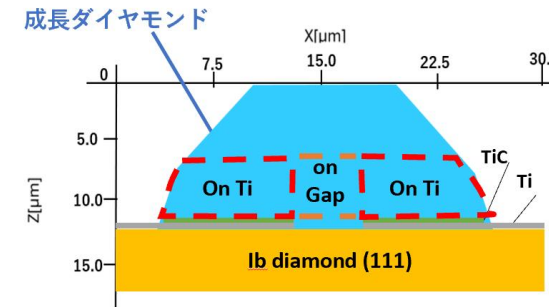


先行研究：金属上のみ空孔導入 & 量子センサ濃度増大(1のみ)

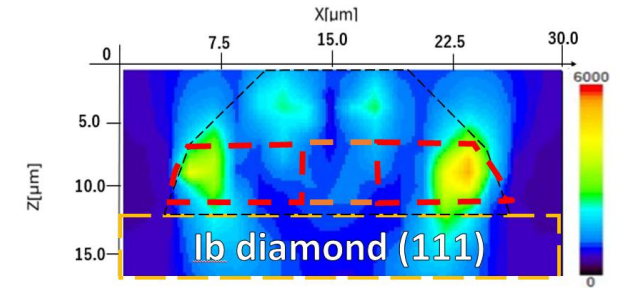
本技術:①だけでなく金属間(②)も蛍光増大

## 主な結果

模式図



蛍光マップ



Ti上(On Ti)、とTiパターン間(Gap)両方で  
蛍光増大を確認

	637 nm (NV-ZPL)	738 nm (SiV)	ODMR 強度
On Ti	62.5	107	1/20
5um Ti Gap	9.0	13.4	0.8
10um Ti Gap	2.7	3	~1

Tiを使う事でTi上だけでなくTi間も量子センサ蛍光増大  
高感度量子センサ製法として期待

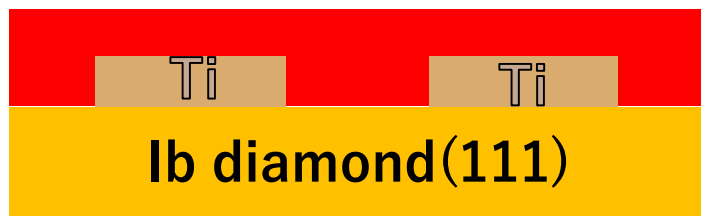
# 想定される用途

本研究のメリット：Ti上だけでなくTi間のCVDダイヤモンドの蛍光が増大



NVセンタ濃度の高い、高感度ダイヤモンド薄膜合成の可能性

高濃度NV層



## 応用例

- ・ 高感度磁気イメージング  
岩石, 車載用バッテリー, etc
- ・ ダイヤモンド表面上の有機分子NMR

# 実用化に向けた課題

## 1. On Ti上でのNVセンター不安定(ODMRより)

原因

空孔過多と推察



解決法

- ・更なる高温アニール
- ・窒素添加

## 2. Ti上を完ぺきにOvergrowthする技術開発

現状

Ti間上方向の成長が優位



解決法

- ・ CVD条件の精査  
(横方向成長が優位になるように)

現在解決に向けて研究開発中

# 企業への期待

- 未解決課題：本学CVDダイヤモンド技術により解決見込み

NV含有薄膜ダイヤモンドを用いた  
量子センサ技術の導入を検討する  
企業との共同研究を希望

- 発明の名称 : 量子スピン欠陥含有ダイヤモンドの製造方法
- 出願番号 : 特願2025-126258
- 出願人 : 金沢大学
- 発明者 : 林 寛、徳田 規夫、山崎 聡、猪熊 孝夫、  
松本 翼、市川 公善、新実 秀汰

# お問い合わせ先

金沢大学ティ・エル・オー

T E L      076-264-6115

e-mail      [info@kutlo.co.jp](mailto:info@kutlo.co.jp)