

走査ダイヤモンドNV中心顕微鏡を用いた電子スピン二重共鳴による 交流磁場と温度の同時イメージングの原理実証

Keio University

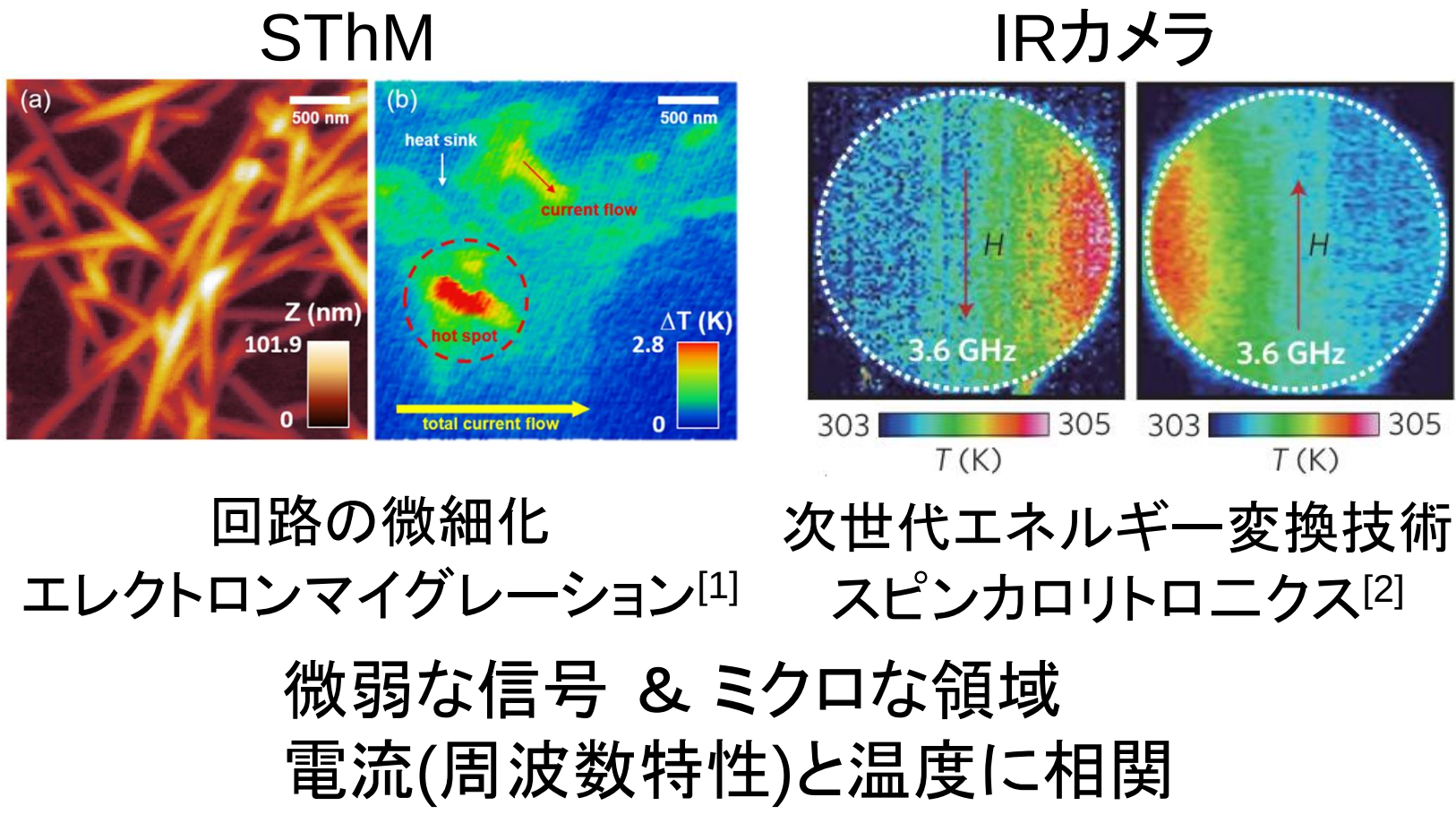


○小室俊太郎^{1,2}, 大倉和真^{1,2}, 林都隆³, 安東秀³, 早瀬潤子^{1,2}

慶大理工¹, 慶大CSR², 北陸先端大³

1. 研究背景

ナノスケール同時イメージングのニーズ



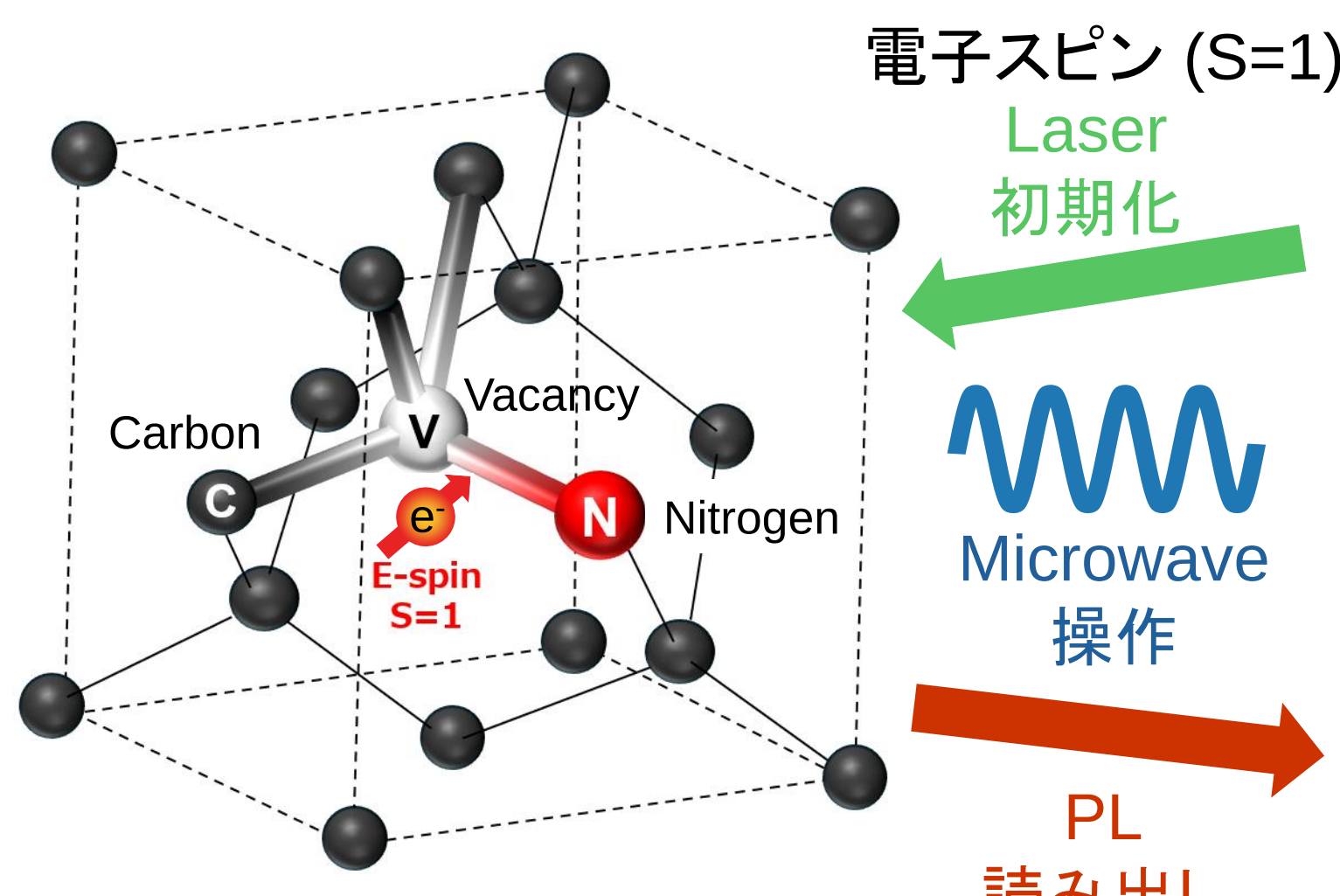
回路の微細化
エレクトロニクス技術
微弱な信号 & ミクロな領域
電流(周波数特性)と温度に相関

複数量の空間分布を同時測定できる
高空間分解能($\sim$ nm)なセンサが必要

物性評価 デバイス解析への応用可能

[1] S. Koo, et al., J. Phys. Chem. C. **125**, 6306 (2024).
[2] T. An, et al., Nat. Mater. **12**, 549 (2013).

ダイヤモンド中窒素空孔中心(NV中心)



- 室温・大気圧下で動作
- 長いコヒーレンス時間のため高感度
- 複数量を測定可能
- 原子サイズのため高空間分解能
- ⇒ センササイズ・測定対象との距離が重要

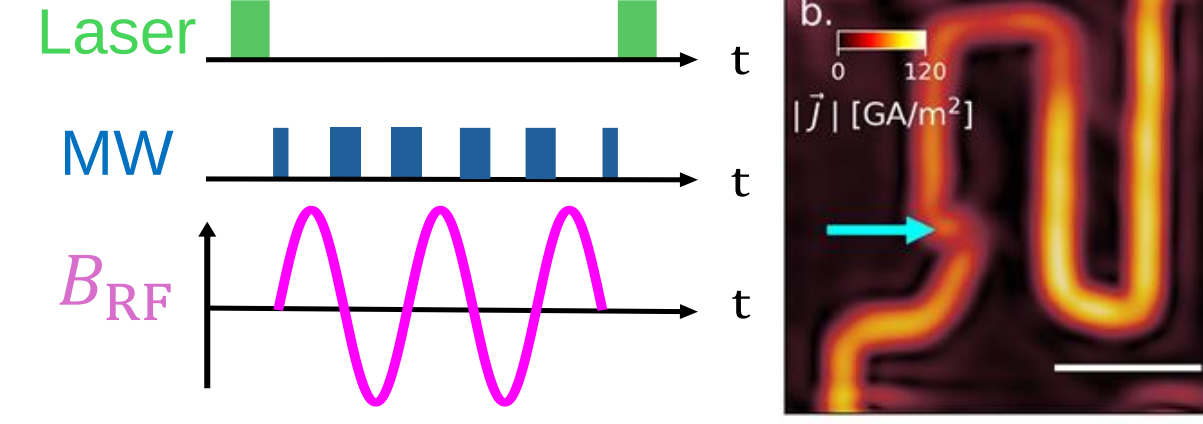
走査ダイヤモンドNV中心顕微鏡(SNVM)

ダイヤモンドNV中心を原子間力顕微鏡(AFM)で走査・距離制御

○ 光の回折限界を超えた空間分解能で物理量イメージング ▲ 高価な装置

MHz帯磁場イメージング^[3,4]

ダイナミカルデカップリング



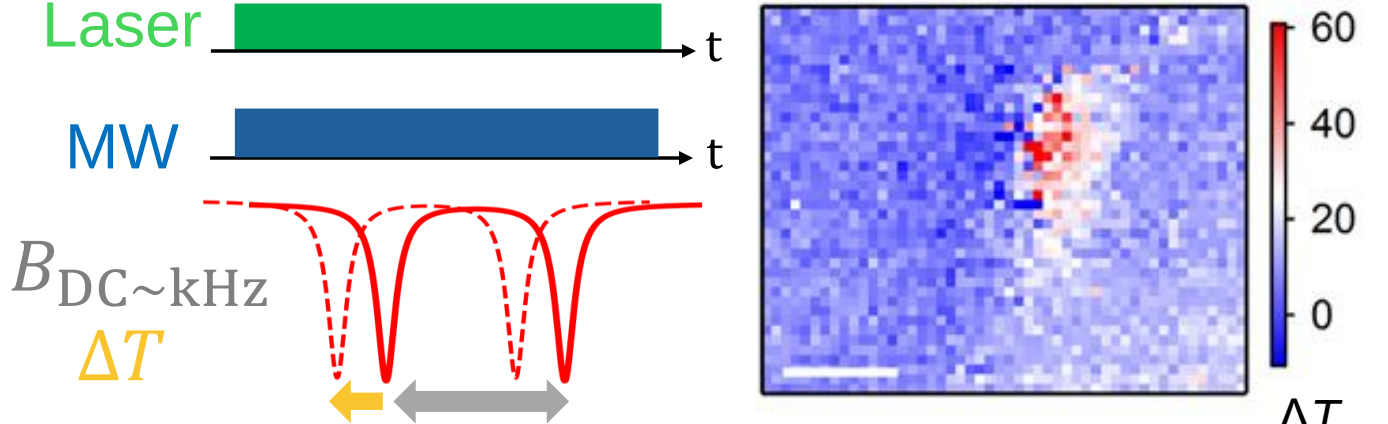
- 高感度
- ▲ nsオーダーのパルス制御
- ▲ 温度との同時測定困難

SNVMによる交流磁場と温度の同時イメージング未実証

[3] M. L. Palm, et al., Phys. Rev. Appl. **17**, 054008 (2022).
[4] G. P. Hellmann, et al., IEEE IRPS, 1-6 (2024).

DC ~ kHz帯磁場・温度イメージング^[5,6]

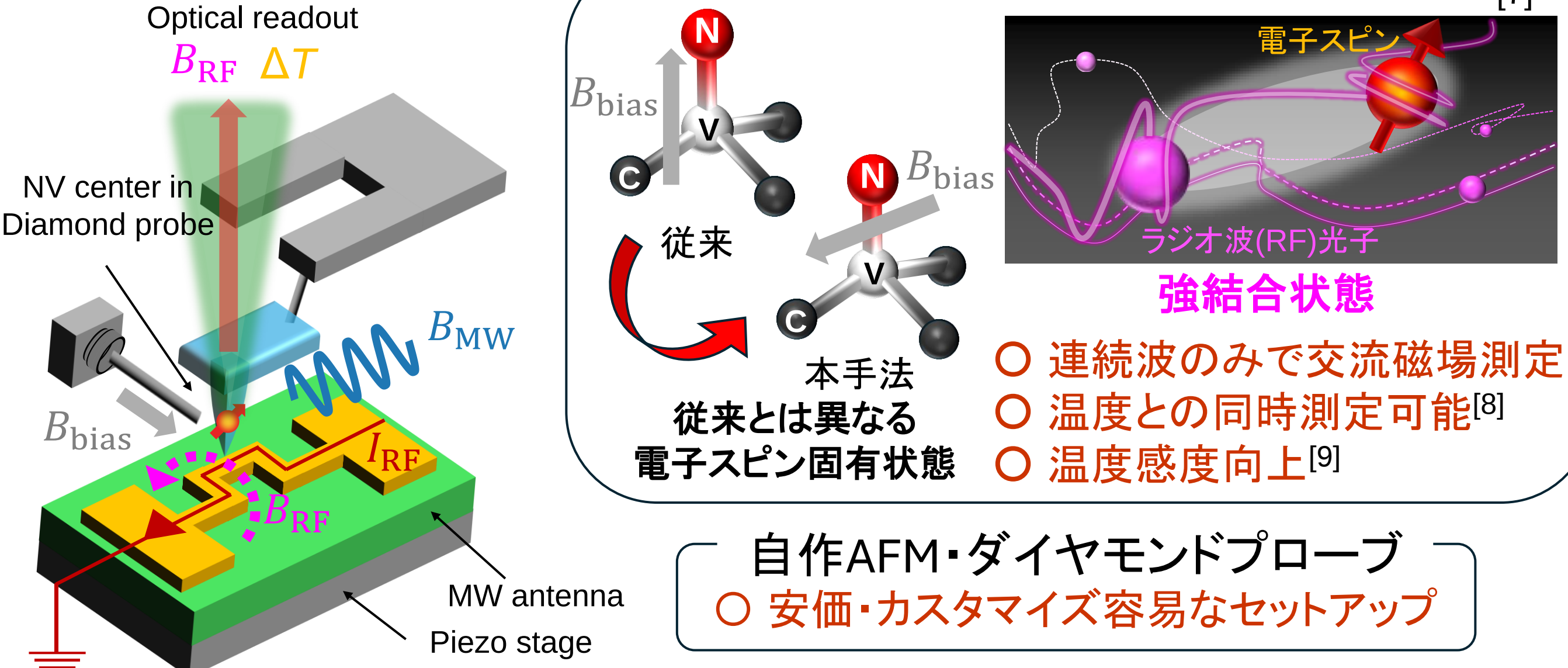
連続波光検出磁気共鳴(CW-ODMR)



- ▲ 低感度
- 精密な時間制御不要
- 磁場と温度の同時測定
- ▲ 高周波交流磁場の測定困難

2. 研究目的

電子スピン二重共鳴を用いたCW-ODMR^[7]



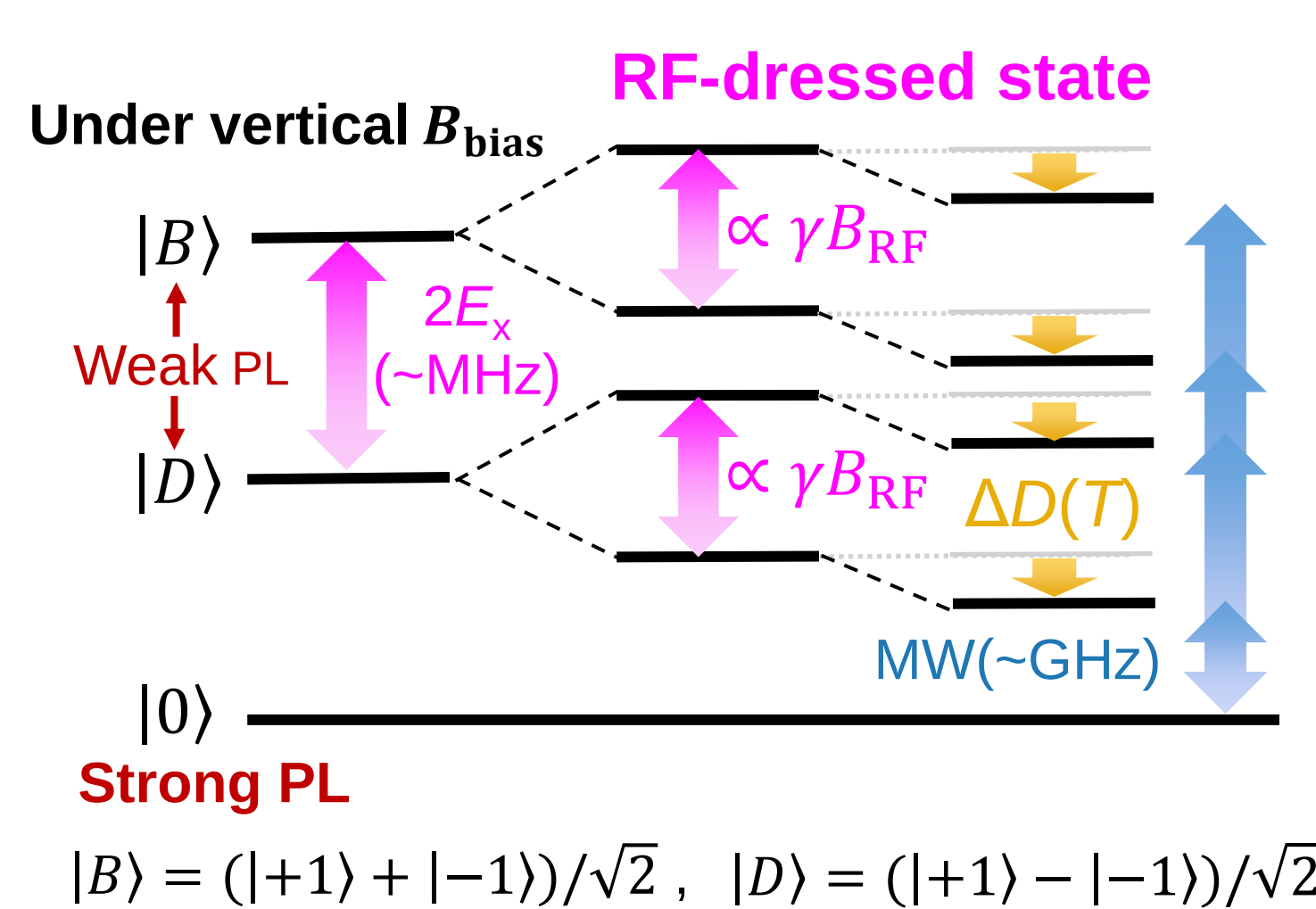
電子スピン二重共鳴現象を自作SNVMに適用し
交流磁場と温度の同時測定の原理実証を行う

[7] S. Saijo, et al., Appl. Phys. Lett. **113**, 082405 (2018).
[8] H. Tabuchi, et al., J. Appl. Phys. **133**, 24401 (2023).

[9] Y. Itabashi, et al., IEEE ICDCM (2024).

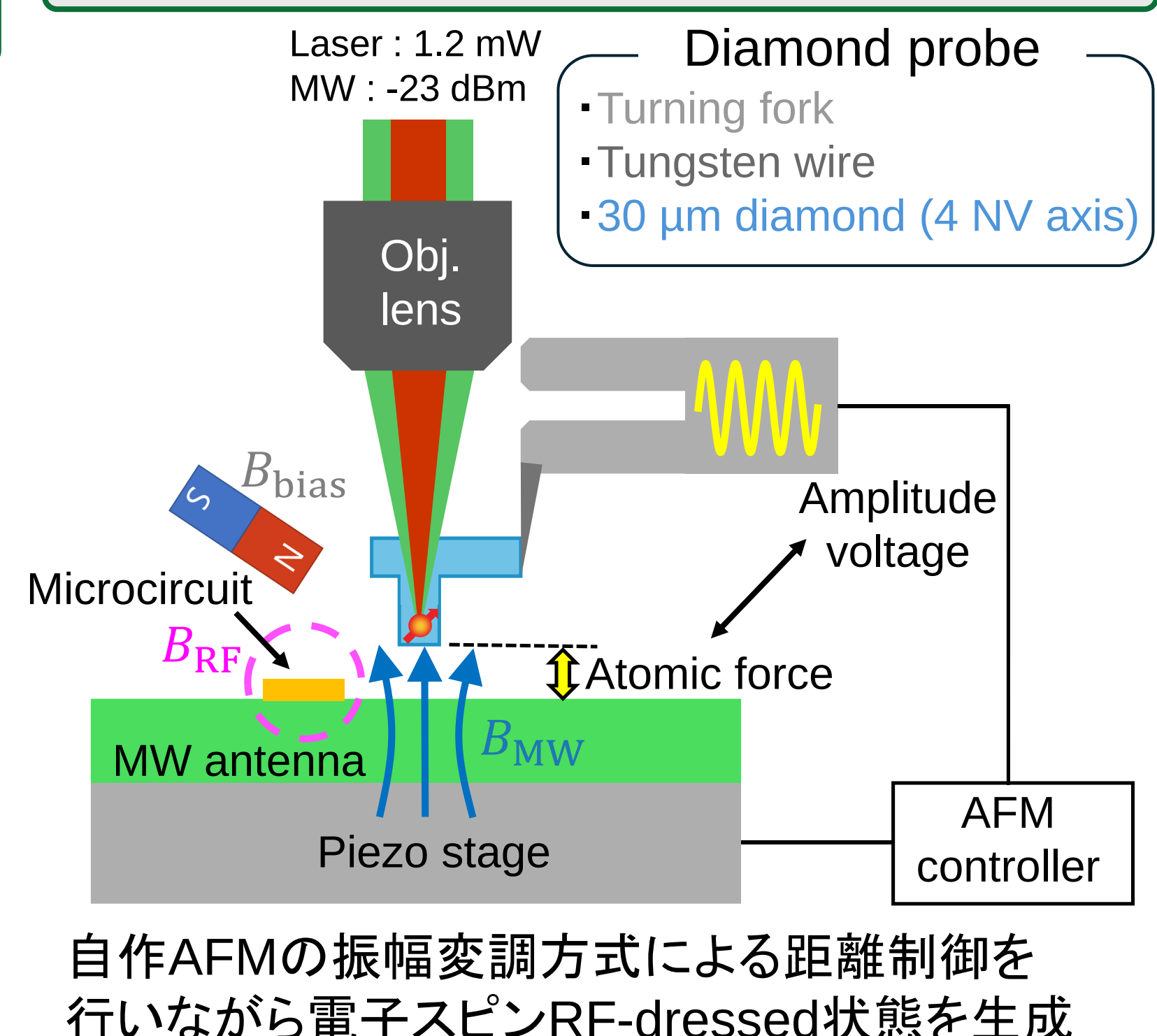
3. 研究背景

電子スピンRF-dressed状態のエネルギー準位



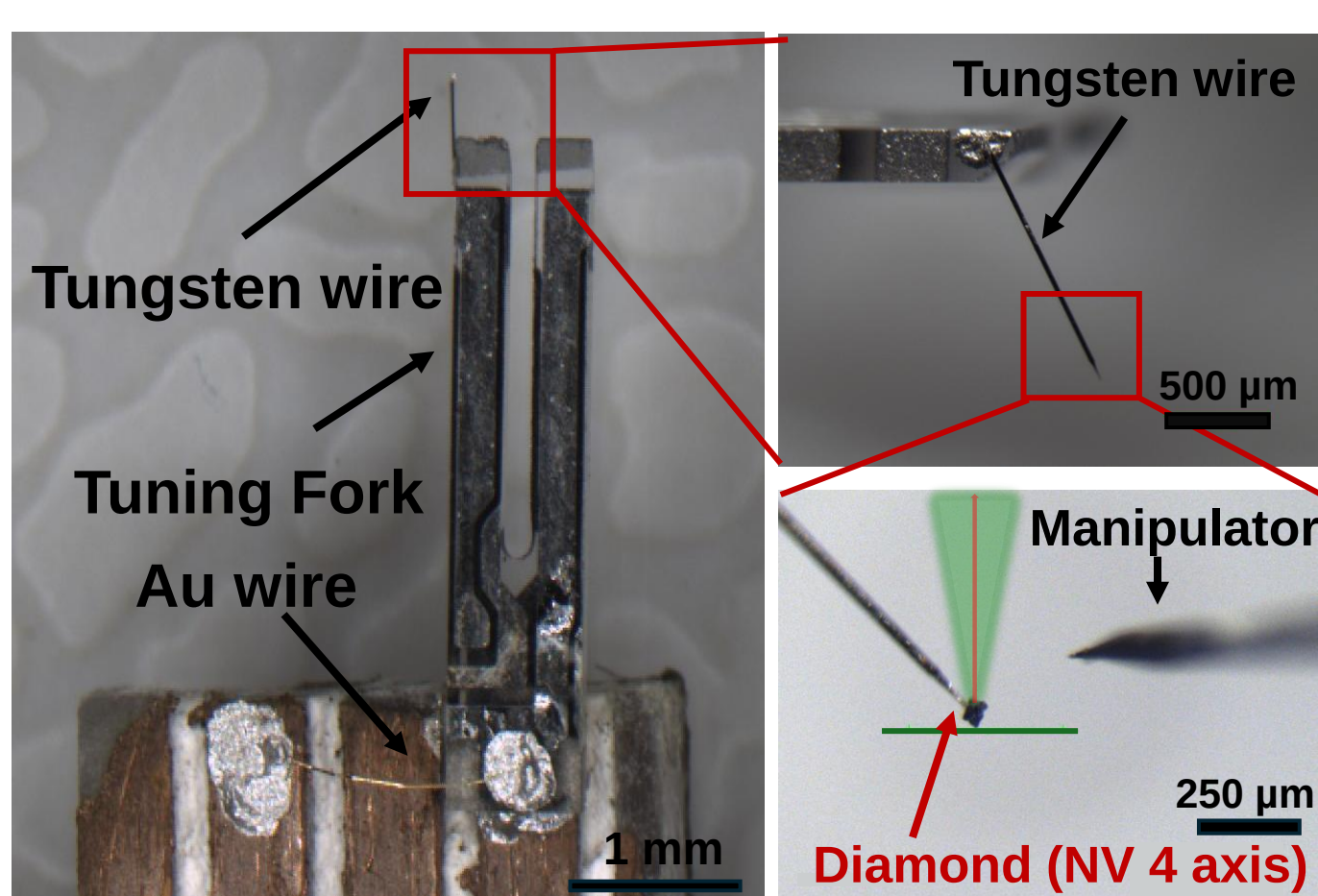
交流磁場振幅 B_{RF} に比例したラビ分裂
温度変化に比例してゼロ磁場分裂 D がシフト
同時測定可能 & 線幅減少による感度の向上

セットアップ



4. ダイヤモンドプローブの作製・評価

ダイヤモンドプローブ(DP)の作製



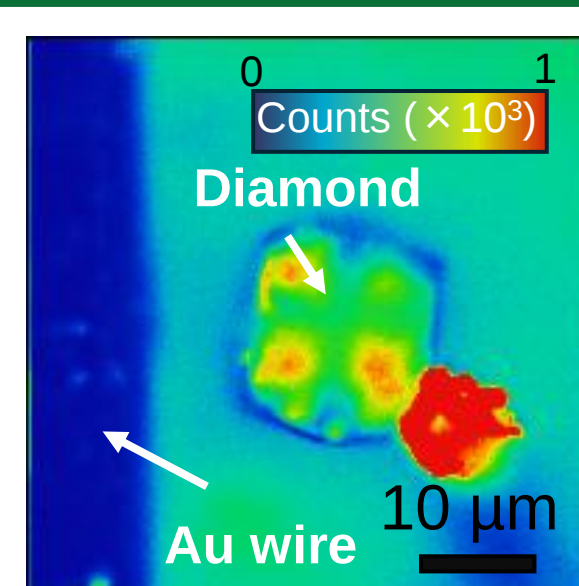
作製方法

- 電極と水晶振動子を接着
- 金ワイヤ(25 μ m)を配線・導通
- タングステンワイヤ(30 μ m)をケミカルエッチング(CE)
- タングステンワイヤの接着
- ダイヤモンド(30 μ m)の取り付け

測定対象 $\leftrightarrow$ ダイヤモンド (AFM)
ダイヤモンド $\leftrightarrow$ タングステンワイヤ (CE)
→熱拡散の抑制が期待

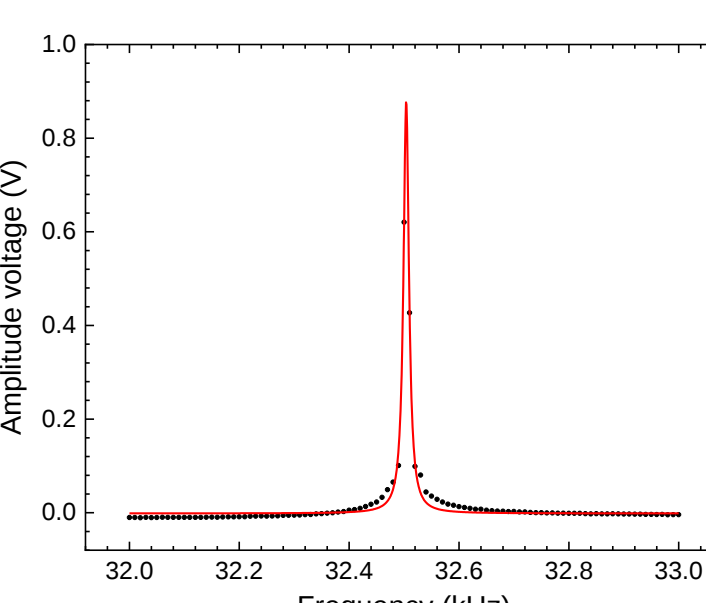
熱硬化性銀ペーストによる接着
マイクロマニピュレータによる操作

DPの評価



ガルバノミラーによる
PL mapping

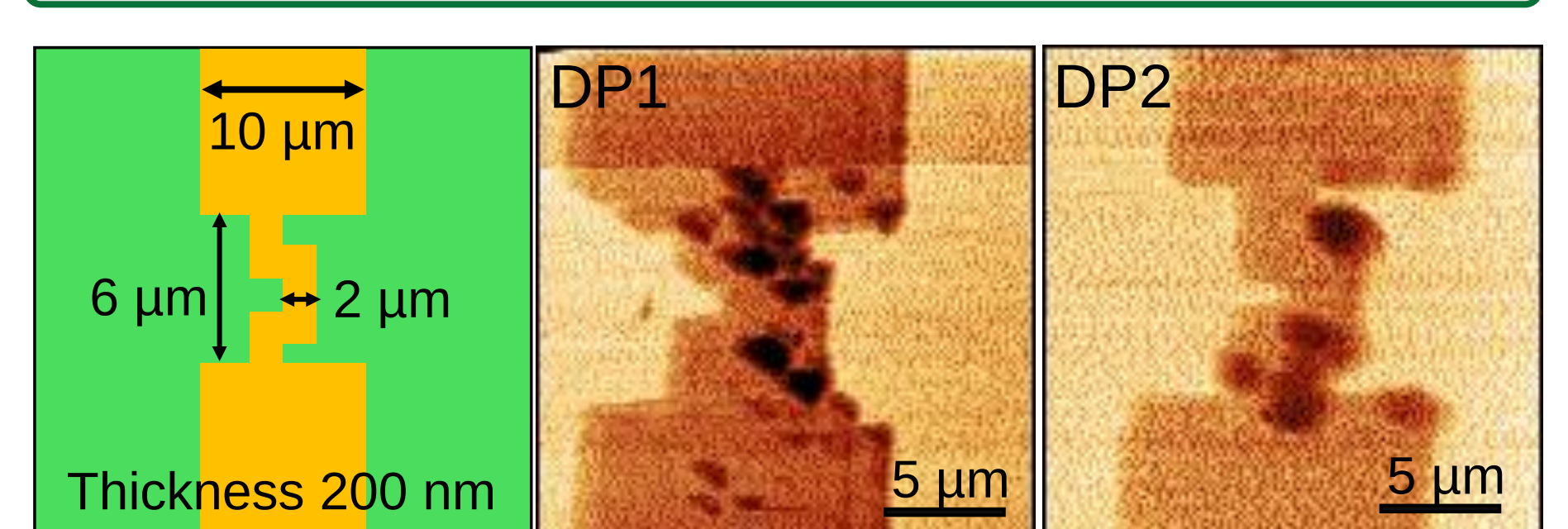
レーザーを照射できる位置
にダイヤモンドを配置



共振周波数 f_0 測定

$f_0 = 32.5$ kHz
 $Q = 2719$
励振可能かつ高Q値な
プローブを作製

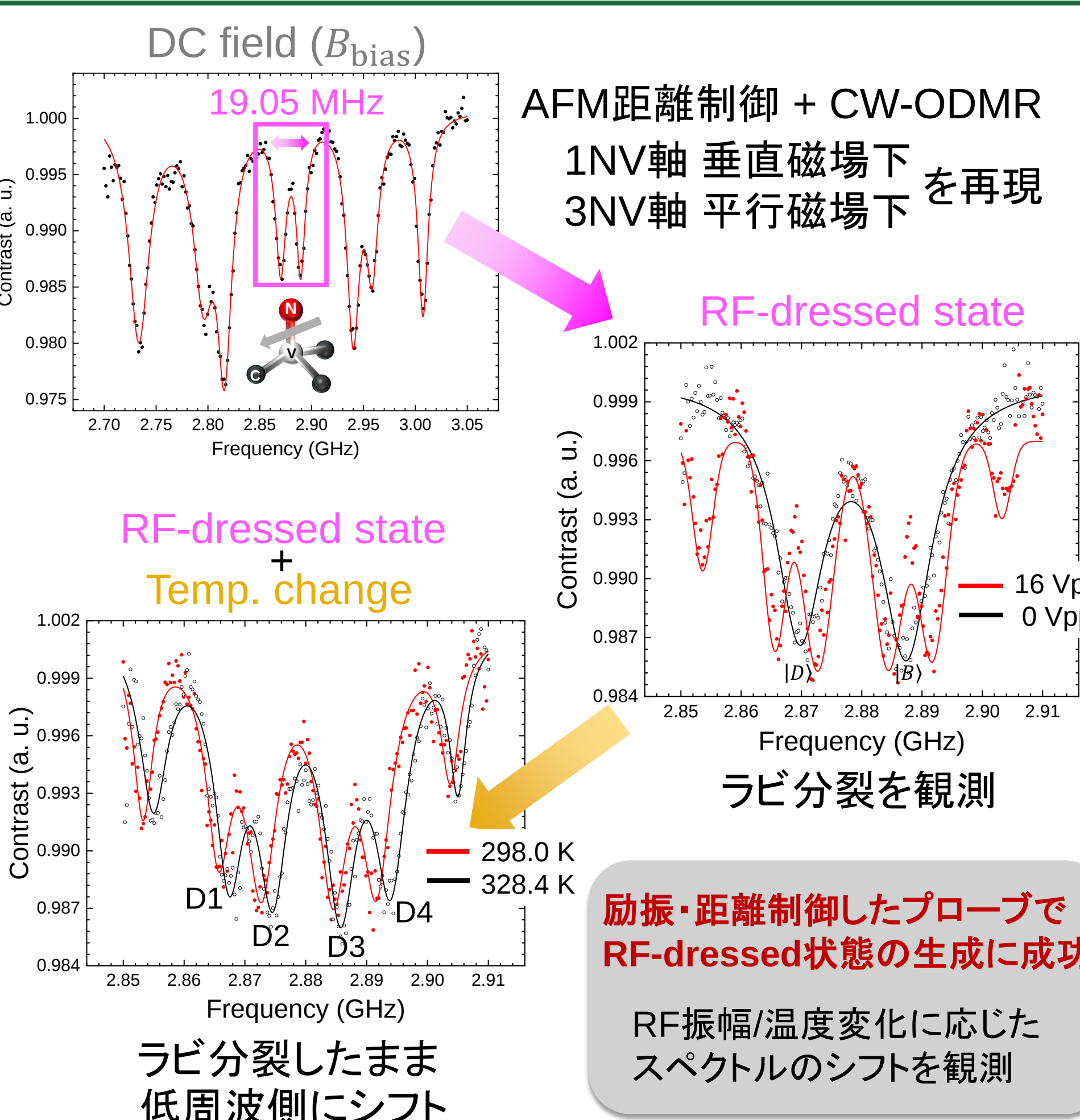
微細回路のAFM像



- DP1 ○ AFMによる適切な距離制御
× 観察像にゴースト ⇒ マルチチップ
- DP2 ○ AFMによる適切な距離制御
○ 先端が先鋭化

5. SNVMによる交流磁場と温度の同時測定

電子スピンRF-dressed状態の生成



AFM距離制御 + CW-ODMR

1NV軸 垂直磁場下

3NV軸 平行磁場下

を再現

RF-dressed state

Temp. change

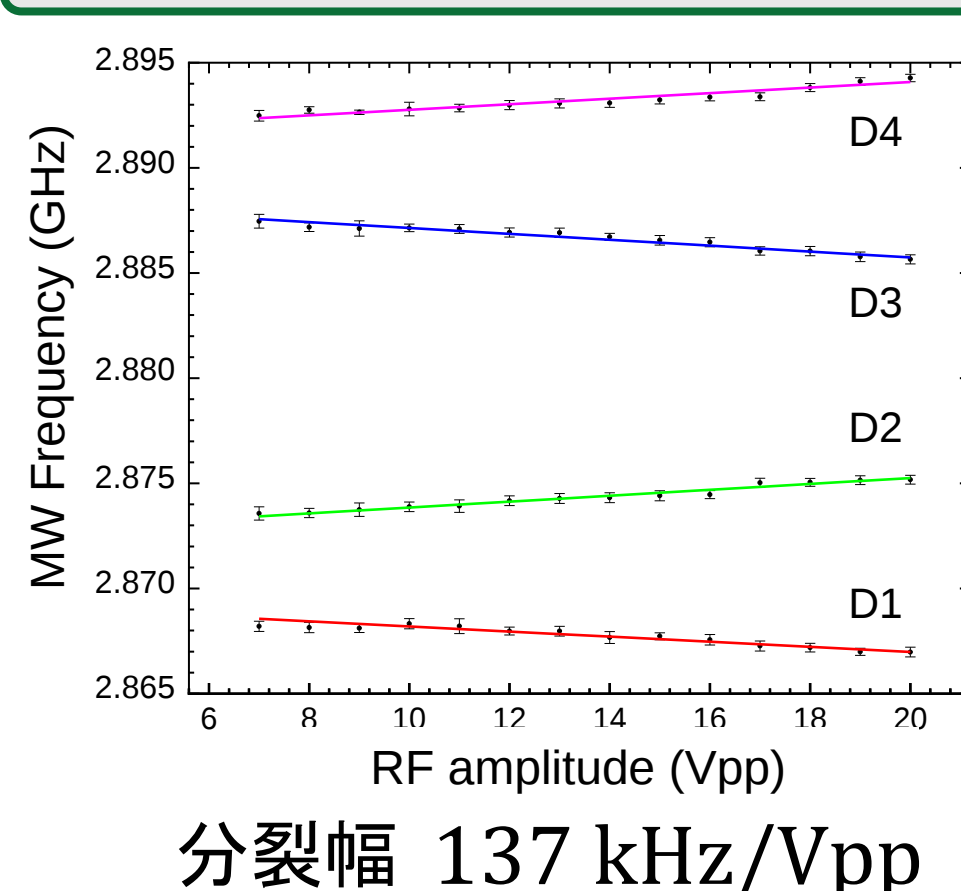
ラビ分裂を観測

励振・距離制御したプローブで
RF-dressed状態の生成に成功

RF振幅/温度変化に応じた
スペクトルのシフトを観測

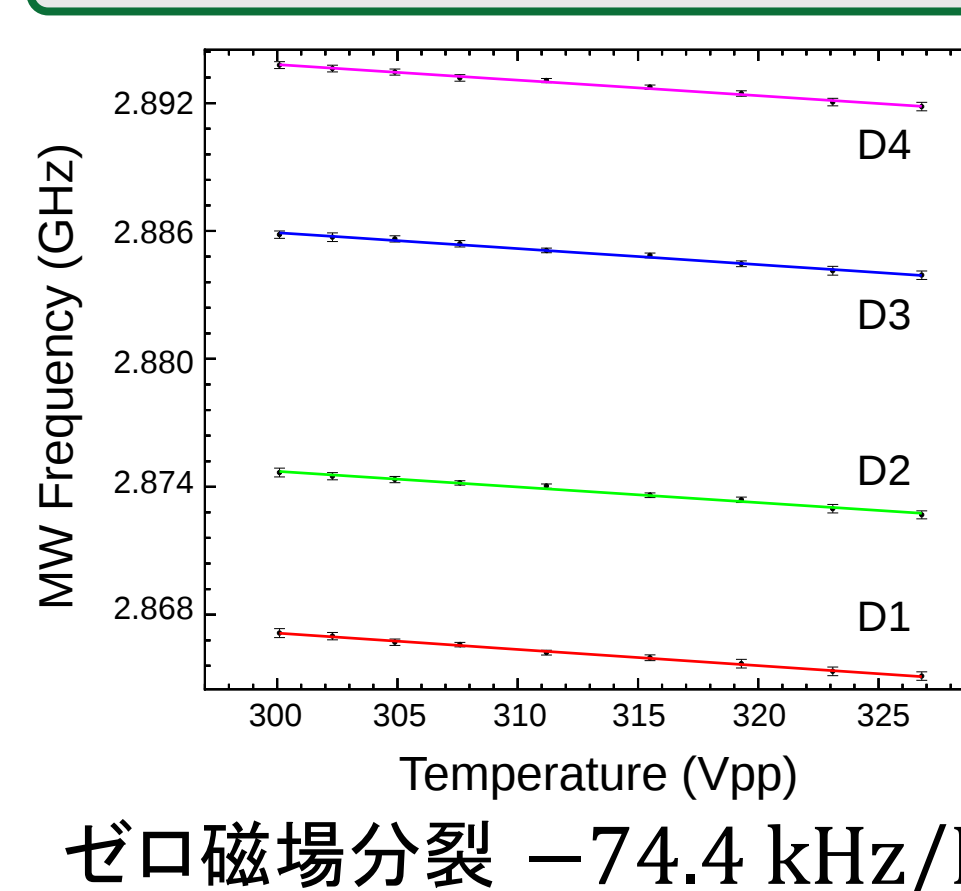
ラビ分裂したまま
低周波側にシフト

交流磁場振幅依存性



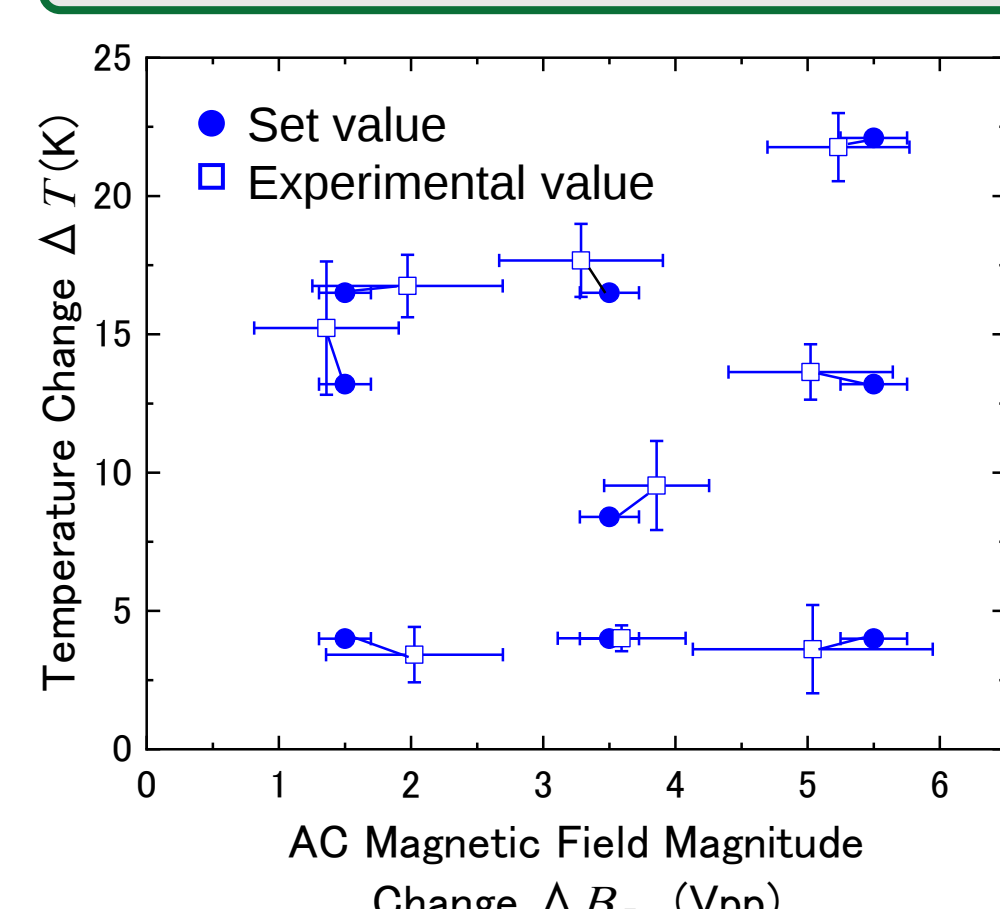
分裂幅 137 kHz/Vpp

温度依存性



ゼロ磁場分裂 -74.4 kHz/K

SNVMを用いた交流磁場と温度の同時測定



RF振幅と温度を同時に変化させた
ときの設定値と実験値の比較

RF磁場振幅精度 1.8 Vpp

温度精度 4.8 K

同時測定の原理実証に成功

⇒バルクダイヤモンドにピラー状に加工した
プローブを用いることでより高空間分解能
かつ高感度な同時測定が可能に

6. 結論

結論

- 自作のSNVMでAFM測定を可能に
- 励振・距離制御したダイヤモンドプローブで
電子スピン二重共鳴現象の生成に成功
- SNVMによる交流磁場と温度の同時測定の
原理実証に成功
(RF磁場振幅精度 1.8 Vpp 温度精度 4.8 K)

展望

- 走査測定を組み合わせ交流磁場と温度の
同時イメージングを実証
- バルクダイヤモンドを加工したプローブにより
高感度化・高空間分解能化

謝辞

本研究の一部は、科研費 (No. JP22H01558, JP23K22828),
文科省Q-LEAP (No. JPMXS0118067395), JST CREST
(No. JPMJCR24A5), 慶大次世代研究プロジェクト推進プログラム,
慶大 CSRの支援を受けて行われた