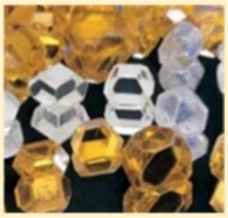
ダイヤモンドNVセンタによる量子磁気障害探知センサモジュールの研究（1/4）

防衛装備庁 陸上装備研究所 機動技術研究部 脅威探知・対処研究室

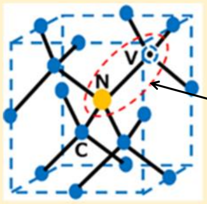
研究の目的

従来の磁気センサでは探知が困難な、金属含有量が少ない樹脂製地雷が増加する中、民生で応用研究段階に入りつつあるダイヤモンドNVセンタ（以下「NVセンタ」という。）による量子磁気センサ技術を使い、地雷探知性能の向上を図る。実現には、小型軽量かつ高い感度を有する量子磁気センサ技術の確立が課題である。

NVセンタとは



人工ダイヤ結晶



窒素(N)と空孔(Vacancy)

ダイヤ結晶中の一部の炭素原子が窒素(N)に置換され、隣接する位置に空孔(V)ができる格子欠陥の一種

NVセンタはスピンと呼ばれる磁気的な性質を有する。

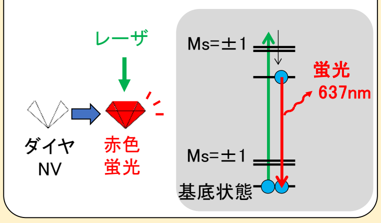
光検出磁気共鳴（ODMR）により、常温でも超高感度な磁気センサとして利用可能

（ODMR：Optically Detected Magnetic Resonance）

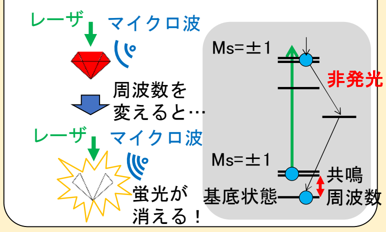
NVセンタ量子磁気センサの基本原理

光とマイクロ波で磁場強度を検知（ODMR）

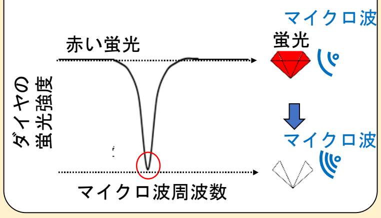
①NVセンタを含むダイヤにレーザを当てると赤く光る。



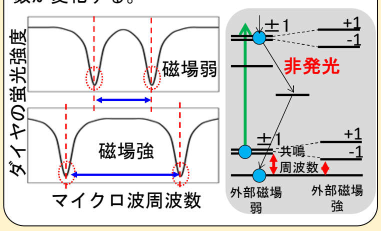
②共鳴周波数のマイクロ波を印加すると光らなくなる。



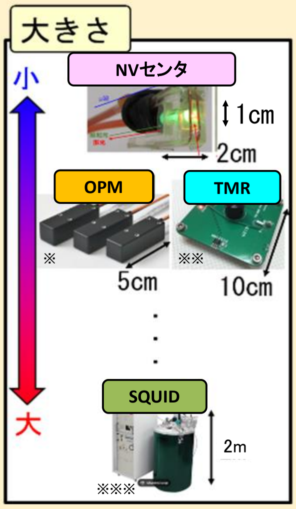
③マイクロ波周波数とダイヤの蛍光強度は以下のように変化する。



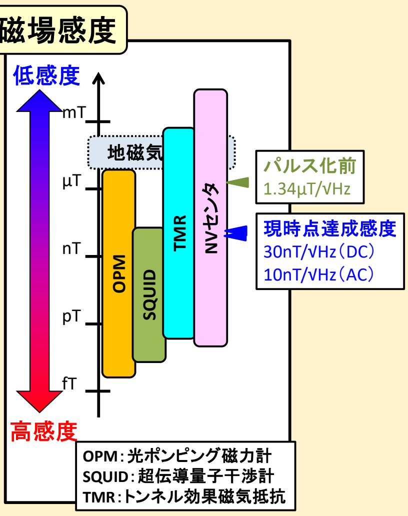
④外部磁場が変化すると原子のエネルギー準位が変化し（ゼーマン分裂）、共鳴周波数が変化する。



NVセンタ量子磁気センサの利点



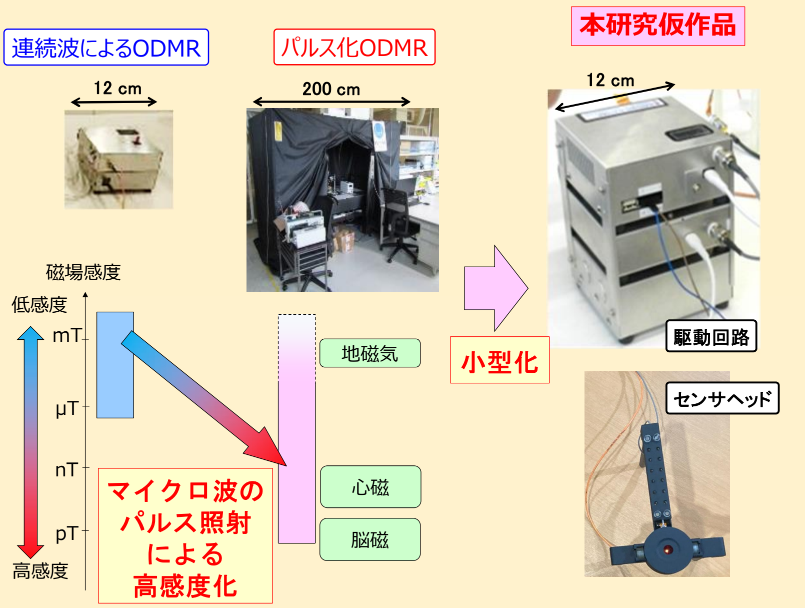
センサヘッドが小さく、任意の場所に取り付け可能



高感度かつ広いダイナミックレンジで、地磁気のような強い環境磁場の下でも、樹脂製地雷の微少磁場を検出可能

※浜松ホトニクスNews　Release（2022年2月24日）
※※グローバル電子㈱ TMRスイッチセンサラインナップ
※※※CRYOGENIC S700X SQUID Magnetometer

研究の経緯と方向性



ダイヤモンドNVセンタによる
量子磁気障害探知センサモジュールの研究（2/4）

防衛装備庁 陸上装備研究所 機動技術研究部 脅威探知・対処研究室

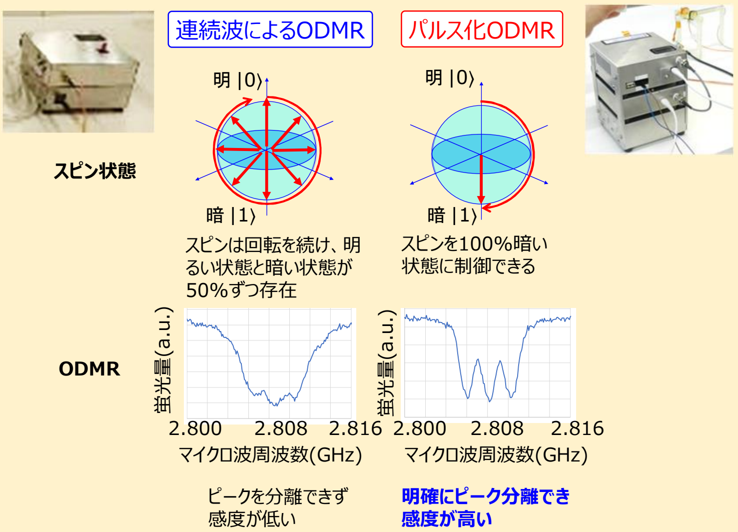
高感度化のアプローチ

マイクロ波を連続波ではなく、パルス照射し、NVセンタの量子的性質（重ね合わせ）を利用することで、磁場感度を大きく改善する。

パルス化により、高感度 η を得るには、コントラスト比C及びコヒーレント時間T_2*（Hahn Echo法を使う場合はT_2）を、大きくすることが必要となる。

$$\eta \propto \frac{1}{C\sqrt{T_{2^*}}}\ [\mathrm{T}/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$$

感度向上のため、**①ダイヤモンド、②光、③マイクロ波、④駆動回路** の4つの技術要素について、それぞれ検討を行った。

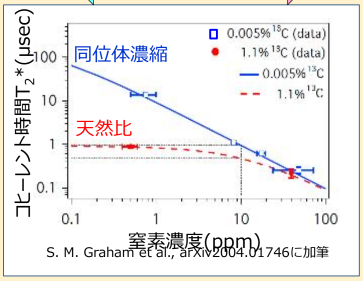


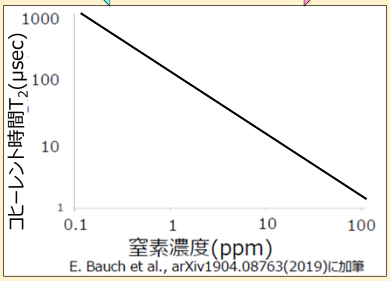
①ダイヤモンド：同位体濃縮及びNV密度調整

コヒーレント時間T_2*の延伸には、ダイヤモンド結晶からの同位体^{13}Cの除去及び窒素濃度制御が必要である。

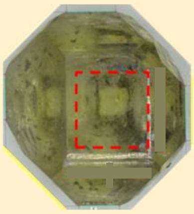
コヒーレント時間とは、スピンが量子的性質を発揮できる時間であり、以下の3種類がある。Ramsey法によるDC磁場検知ではT_2*、Hahn Echo法によるAC磁場の検知ではT_2がそれぞれ重要である。

T_2*の緩和時間		T_2の緩和時間		T_1の緩和時間
スピン-スピンと外部磁場の相互作用	≦	スピン-スピン相互作用	≦	スピン-外部磁場との相互作用





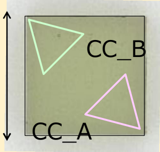
ダイヤモンドNV素材生成の流れ



約8 mm

合成したNVセンタ結晶

矩形切り出し



3 mm

窒素濃度は結晶の成長セクター毎に大きく異なるため、窒素濃度分布精査後、適切な部位を選定

コーナーキューブ切り出し

CC_A

1 mm

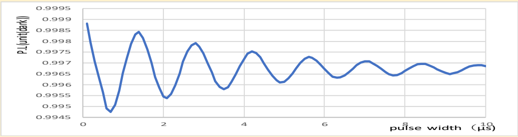
高窒素濃度

CC_B

低窒素濃度

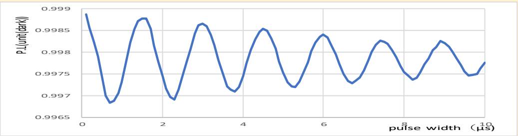
Rabi振動

CC_A



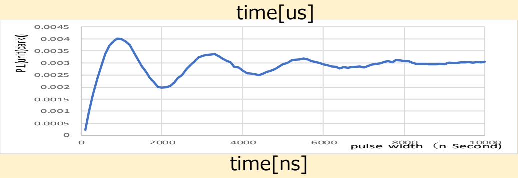
time[us]

CC_B



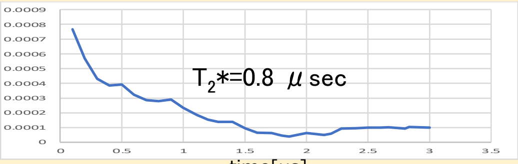
time[us]

天然比平板（参考）

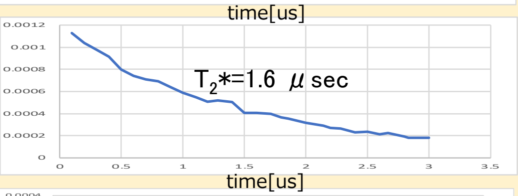


time[ns]

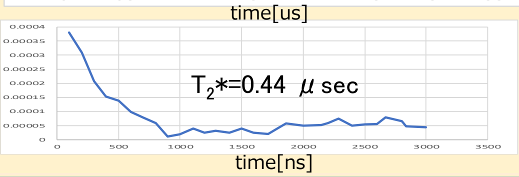
Ramsey法



time[us]



time[us]



time[ns]

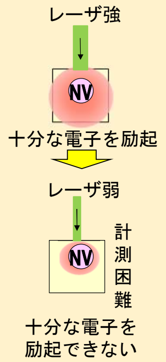
ダイヤモンドの不純物を制御し、長コヒーレント時間を実現

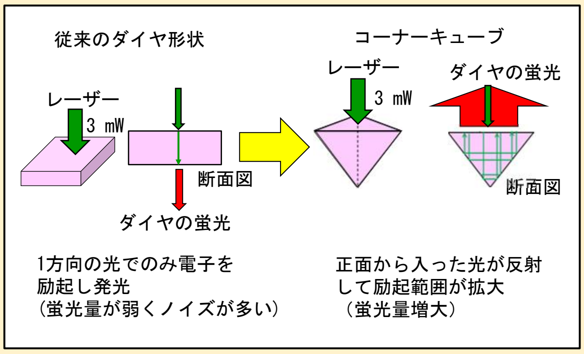
ダイヤモンドNVセンタによる 量子磁気障害探知センサモジュールの研究（3/4）

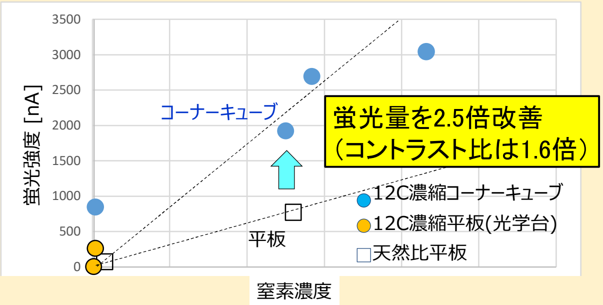
防衛装備庁 陸上装備研究所 機動技術研究部 脅威探知・対処研究室

②光：励起光・蛍光収集効率の改善

コヒーレント時間を延伸するために、NVセンタの密度を低下させたことにより、蛍光強度が低下してしまう。ダイヤモンドの形状を工夫することで、励起光・蛍光の収集効率の改善を図った。

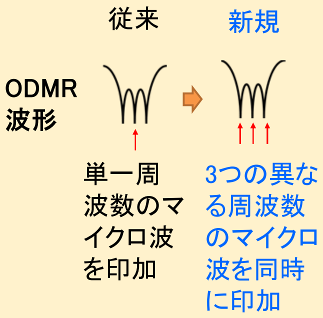


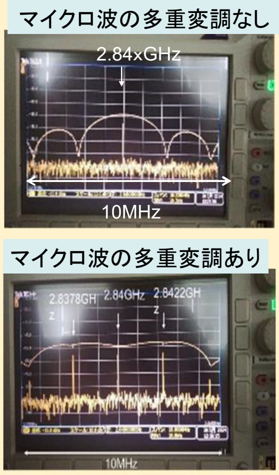




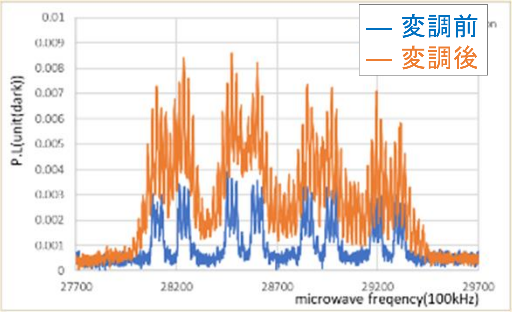
③マイクロ波：共鳴周波数の多重化

コントラスト比を改善するために、3つの周波数を重畳し、^{14}Nにより3つに分離した磁気共鳴（超微細構造）を同時におこす。





- ^{14}Nによる超微細構造のスピンの1つを操作
- マイクロ波を±2.2MHzでAM変調
- ^{14}Nによる超微細構造の3つを同時に操作



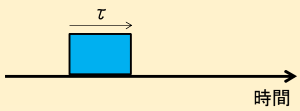
CW-ODMRへの適用例
コントラスト比は2～3倍向上
（超微細構造の数が増える副作用もある）

④駆動回路：パルスシーケンスによるスピン操作

パルス長及び位相を調整されたマイクロ波をNVセンタに印加することで、スピンの量子状態を操作し、低周波外部磁場のキャンセル、特定周波数磁場の選択、磁場感度の向上といった改善が可能である。

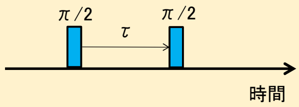
基本パルスシーケンス

Rabi振動



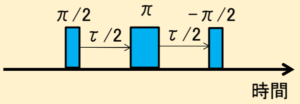
NVのスピン回転速度を計測
⇒πパルスの長さを決定

Ramsey法



DC～低周波数外部磁場を計測

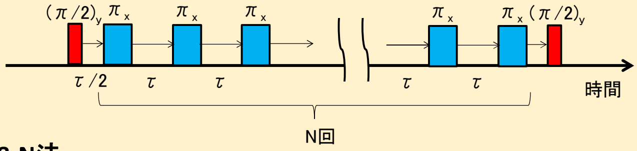
Hahn-Echo法



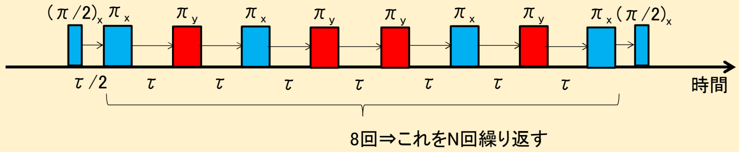
DC～低周波数の外部磁場をキャンセルする測定法

拡張パルスシーケンス

CPMG法 スピンエコー（πパルスでスピン位相を揃え直す））を繰り返すことで、低周波ノイズの低減が可能



XY8-N法 周波数選択が可能であり、AC磁場の計測に最適



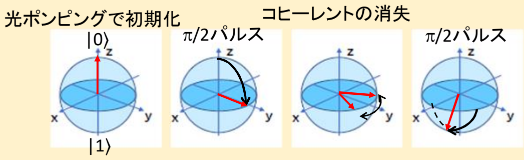
ダイヤモンドNVセンタによる
量子磁気障害探知センサモジュールの研究（4/4）

防衛装備庁 陸上装備研究所 機動技術研究部 脅威探知・対処研究室

スピン操作による量子状態変化

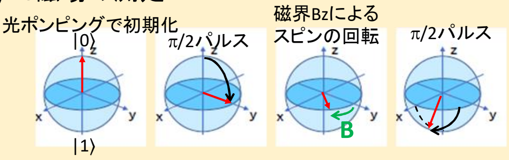
Ramsey法

(1)コヒーレント時間T_2*の測定



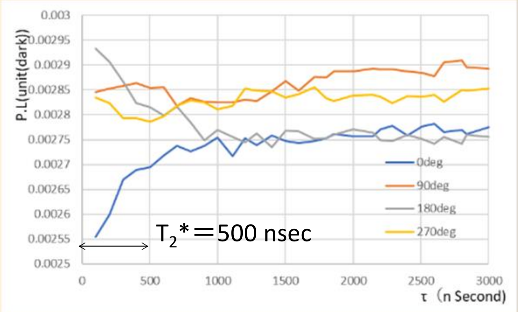
スピンが|1⟩からズレた分、蛍光強度が増加

(2)DC磁場の測定



外部磁場でスピンが回転し、|1⟩からずれた分、蛍光強度が増加

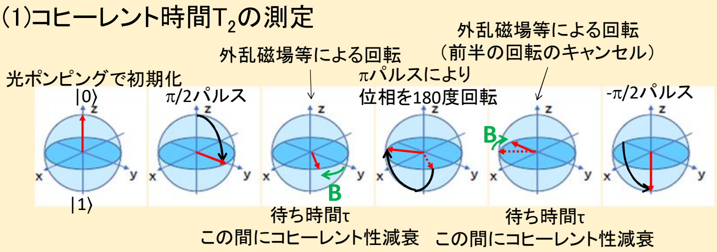
※シーケンスはコヒーレント時間T_2*の間に行う必要がある。



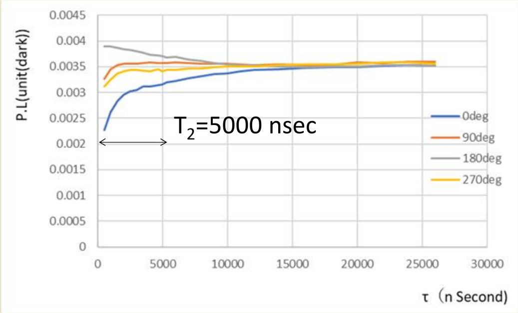
Ramsey法によるT_2*の計測例

Hahn-Echo法

(1)コヒーレント時間T_2の測定

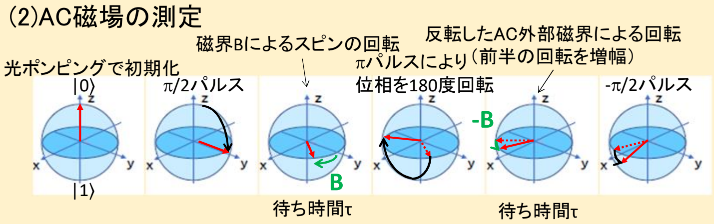


外乱環境に影響されずスピン減衰の情報だけ残留。

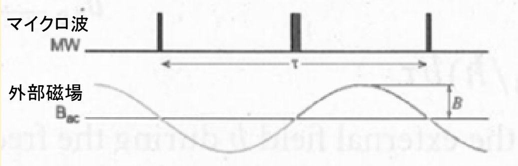


Hahn-Echo法によるT_2の計測例

(2)AC磁場の測定

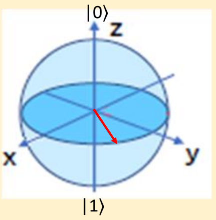


待ち時間τを調整し、AC磁場と同期して測定することで、特定のAC磁場を選択的に検知可能



Hahn-Echo法によるAC磁場のタイミングチャート

※ただし、コヒーレント時間T_2までの測定完了が必要。仮にT_2が100μ秒の場合、測定周波数は5 kHz以上となる。



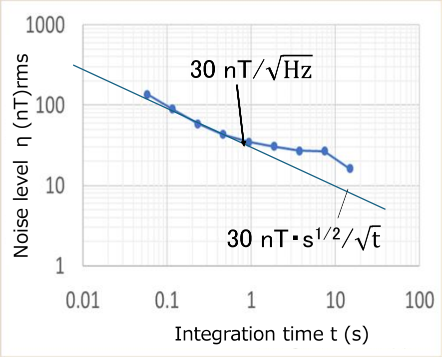
（ブロッホ球）
スピンの量子状態を3次元空間で表すのに使用される。
Z軸：|0>（Ms=0の状態、蛍光有）と|1>（Ms=-1の状態、蛍光無）のどちらに近いかを示す。
X軸：|0>と|1>の重ね合わせを示す（X= |0> + exp(-iωt)|1>、ωは共鳴周波数 ）。
Y軸：|0>と|1>の位相が90°ずれた重ね合わせを示す（Y= |0> +i exp(-iωt)|1> ωは共鳴周波数 ）。

達成感度

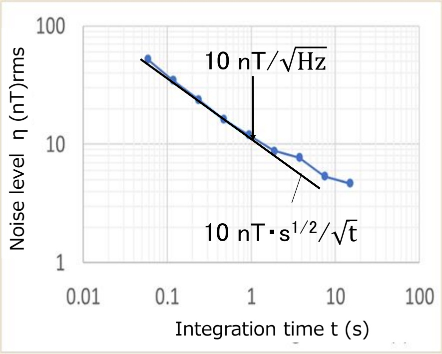
4つの技術要素に対する検討を経て、DC磁場感度で30 nT/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$、AC磁場感度で10 nT/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$の達成を確認した。

今後の予定

ダイヤモンドの窒素濃度最適化及び拡張パルスシーケンスの活用による更なる感度の向上、電磁誘導の周波数特性を活用した誤警報低減手法の検討、アレイ化による探知範囲の拡大といった、地雷探知に適したセンサモジュールの実現に向けた検討を進める。



DC磁場の感度推定結果



AC磁場の感度推定結果