

資料6

「量子センシングの産業化に向けて」

NTT先端技術総合研究所

***内閣府SIP3/BRIDGE 量子技術 プログラムディレクター**

****Q-STAR 量子マテリアル・デバイス・センシング部会長**

そうがわ てつおみ

寒川 哲臣

量子研究の代表的テーマと特長

量子の性質を利用した様々な研究テーマ、領域が存在

量子コンピューティング

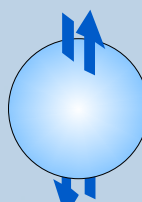
超高速

ビットとして
計算に使う

遠くまで
安全に運ぶ

量子通信・
量子暗号

絶対安全



量子

量子センシング

超高感度

外部によって
変化させる

発現する環境
を作る/量子の
機能を活かす

量子マテリアル
量子デバイス

新現象

量子力学の原理に基づいて、“量子情報分野”
に留まらず、従来技術の限界を打破する。

量子センシングとは

物理量を測定するために、なんらかの量子系を用い、量子準位、二重性、量子重ね合わせ、量子もつれ状態を利用して、古典で到達可能な範囲を超えて、測定の感度や精度を向上させていること。

● 極限計測

- ・高精度姿勢/位置情報センサ
(無人機による地下/海底鉱脈の資源探査)
- ・300億年で1秒しかずれない時計

● 地球

- ・地殻変動/地磁気計測による災害予測

● 生活

- ・超微量センシング
(食品異物検知/犯罪捜査/テロ防止)
- ・高精度磁気センサー
(自動運転/自動配送の安全性向上)

● 医療・創薬

- ・超高感度MRI (薬効の高速判定)
- ・バイオマーカーの高感度検出 (超早期診断)



(出典：JAMSTEC)

量子慣性センサー

原子干渉計：

レーザー干渉計より10桁
高感度 (理論値)

ユースケース展開例：量子スピンセンサー

東北大 大兼教授資料より抜粋

量子トンネルリング
1nm

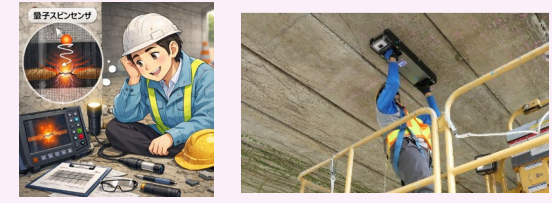
量子スピンセンサーの断面TEM像

シリコンウェハ上に集積したセンサチップ

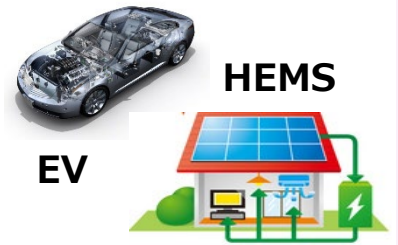
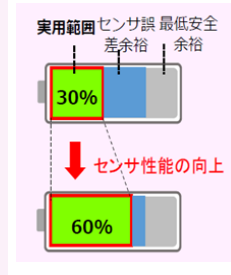
量子スピンセンサーによる極微弱磁気計測

Stack layers (from top to bottom):
 Pinned layer: Ru (20 nm), Ta (5), Ir₂₂Mn₇₈ (6), Co₇₅Fe₂₅ (5), Ru (0.9)
 Insulator: Co₄₀Fe₄₀B₂₀ (3), MgO (d_{MgO})
 Free layer: Co₄₀Fe₄₀B₂₀ (3), Ru (0.4), CoFeSiB (70), Ta (5), Ru (10), Ta (5), Ru (10), Ta (5)
 Substrate: SiO₂, Si Subs.

社会インフラ応用



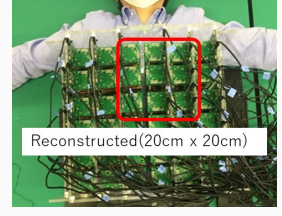
省人カ・低コストでの
インフラの非破壊検査
(800億円市場@2030年)



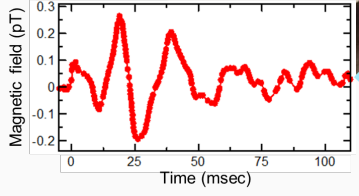
EVのバッテリー管理や
スマートグリッドの高度化
(3,200億円市場@2030年)

スタートアップ° 設立 (2026年度予定) による早期社会実装を計画

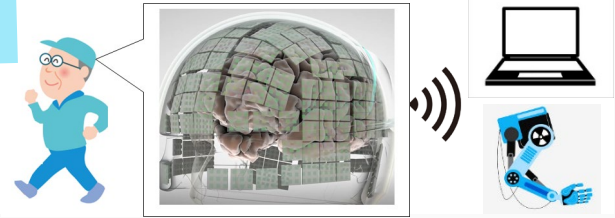
医療・ヘルスケア・ブレインテック応用



高度医療機器を室温動作で実現

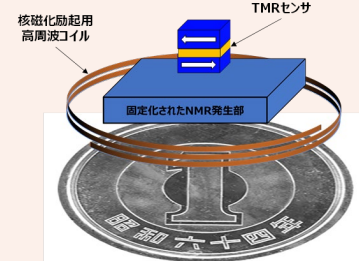


量子スピン脳磁計
→BMI・BCI応用



脳情報を端末やロボットに接続 (数兆円規模の巨大市場)

モビリティ応用



ドローン・
飛行体実装型
(2030年代前半)

小型化・軽量化

コンタクト
レンズ型
(2040年頃)
渡り鳥の目
(未踏市場)

小型核磁気共鳴型センサー (精度: 0.1°)
→次世代ナビゲーション・自動運転

海中・宇宙応用



宇宙・海中環境での
移動体検知・資源探査
・風力発電施設検査
(高い温度耐性・
放射線耐性)

2032年頃の火星打ち上げロケットへのセンサ搭載を計画

量子センシング分野（マテリアル・デバイス含）まとめ

●量子情報以外の産業分野への貢献

AI、半導体、通信、ロボット、PNT、医療、エネルギー

- ・材料（原子層物質、トポロジカル、量子ドット、TFLN、..）
- ・デバイス構造（SOI技術（光電融合）の活用）

●産業界向けテストベッド（センサー・部品評価） のさらなる拡充と継続的運営

●炭素同位体精製の国内事業化

^{13}C ：超偏極MRIの医療応用（参考1）

^{12}C ：高精度・広ダイナミックレンジ磁気センサー
超高感度バイオマーカー検出（参考2）

●世界No.1技術によるグローバルリーダーシップの確立

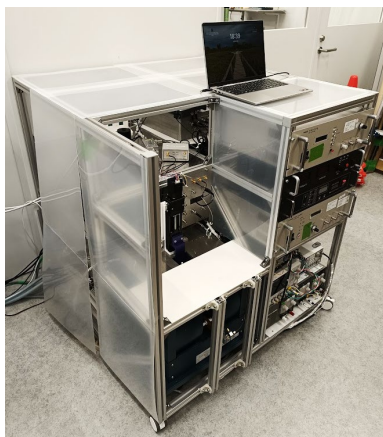
光格子時計ネットワークによる時空間インフラ（参考3）

参考1：MRIの超高感度化と医療応用

阪大・QST 根来教授資料より抜粋

超偏極装置開発 + 診断薬剤開発 = がん治療効果判定を1ヶ月から1日程度に短縮

従来低温を用いる代わりに
光励起による量子力学的過程
を用いた超偏極手法・装置の
開発を日本が先導



量子技術によって
高温動作化
省スペース化 } を可能に

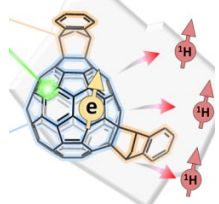
世界初、室温でNMR信号を1万倍以上に増大
NMR分光やMRIの高感度化への応用、基礎物理学への貢献に期待

2014-5-13

https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2014/20140513_1

※全てMRIアクティブな同位体(^{13}C 等)制御が必要

① 偏極源分子

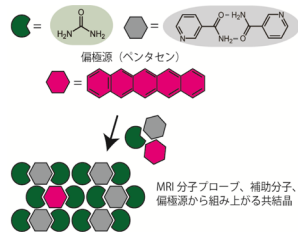


従来のペンタセンより高偏極率な同位体制御分子を開発

フラレン誘導体が光誘起超核偏極に有用であることを発見
～高感度化MRIへの応用に必要な実用化レベルの高偏極率を達成～

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20251204/index.html>

② 添加剤分子



診断薬分子へ偏極移動させる同位体制御添加剤を開発

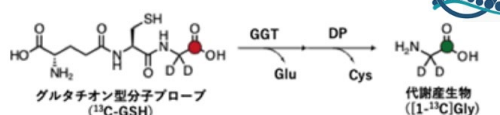
室温でスピンの向きを揃えられる分子の種類を増やす共結晶化技術の開発に成功

量子技術を用いた超高感度MRIによる精密がん診断や治療効果判定に向けて大きく前進

https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2024/20240517_1

③ 診断薬分子

多様な診断を可能にする同位体制御分子を開発



二段階の代謝反応によって、検出可能な代謝産物を与える。

量子センシング技術を活用した生体内における代謝反応の直接計測—急性腎障害のモデルマウスにおける腎臓での代謝反応の可視化に成功—

掲載日：2024年10月17日更新

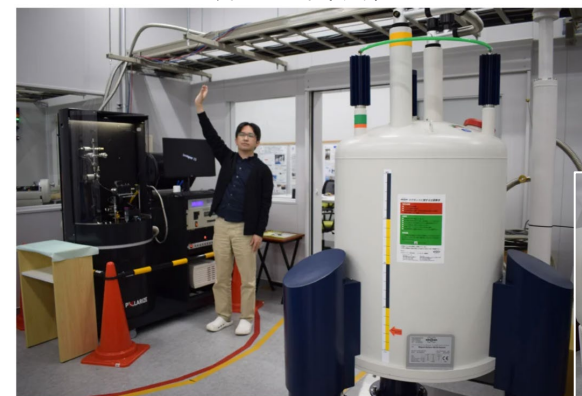
印刷用ページを表示

超偏極された(スピンの向きを揃えた)診断薬分子を体内に注入し、代謝される様子をMRIで高感度に測定。
がん治療による代謝の変化を直接検出可能に

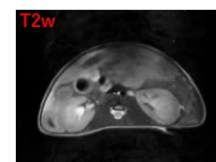
「超偏極MRI」という、すごそうな名前の画像診断技術

2023/06/14 10:00

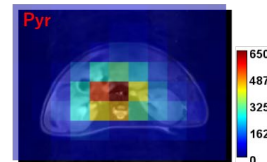
読売新聞 オンライン



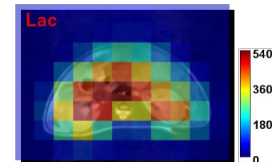
1H anatomical



13C pyruvate



13C lactate

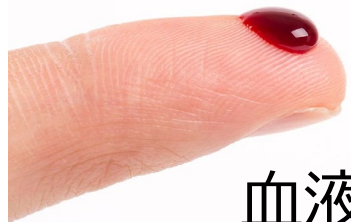


従来低温装置で診断法の検証を進めながら
新規診断手法を研究

参考 2 :

ナノNVダイヤモンドを用いた **Liquid biopsy**

QST 五十嵐さま資料より抜粋



血液



唾液
涙液

体液からバイオマーカー分子を検出

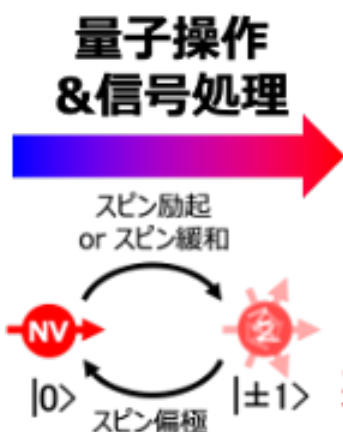
低侵襲・安価・簡便の診断

マススクリーニングで疾患を早期発見

量子操作に基づく超高感度の分子検出技術



蛍光イメージング
夾雑物の影響 大

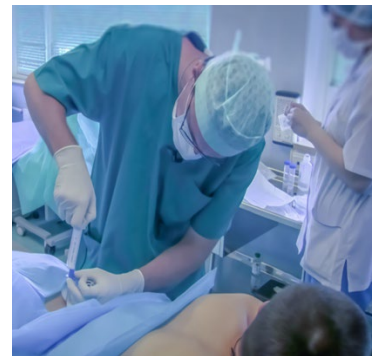


開発技術
夾雑物の影響を除去

Igarashi et al., Nano Lett. 2012, Yanagi et al., ACS Nano 2021

従来技術は低感度

バイオマーカーの濃度 (例：アルツハイマー病)



直接採取 (髄液)
nM~pM
(100億分子/1滴)

従来技術
ELISA
の壁



血液
pM~fM
(100万分子/1滴)

夾雑物背景光が感度制限の大きな要因

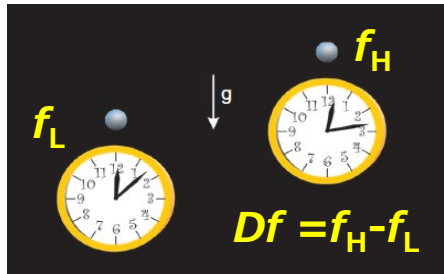
リキッドバイオプシーに応用することで
バイオマーカー分子を超高感度検出
(従来技術よりも1000倍~10万倍高感度)

アルツハイマー病、がん等の先制医療、
新興・再興感染症の迅速検査に貢献を目指す

参考3：光格子時計センシングネットワーク

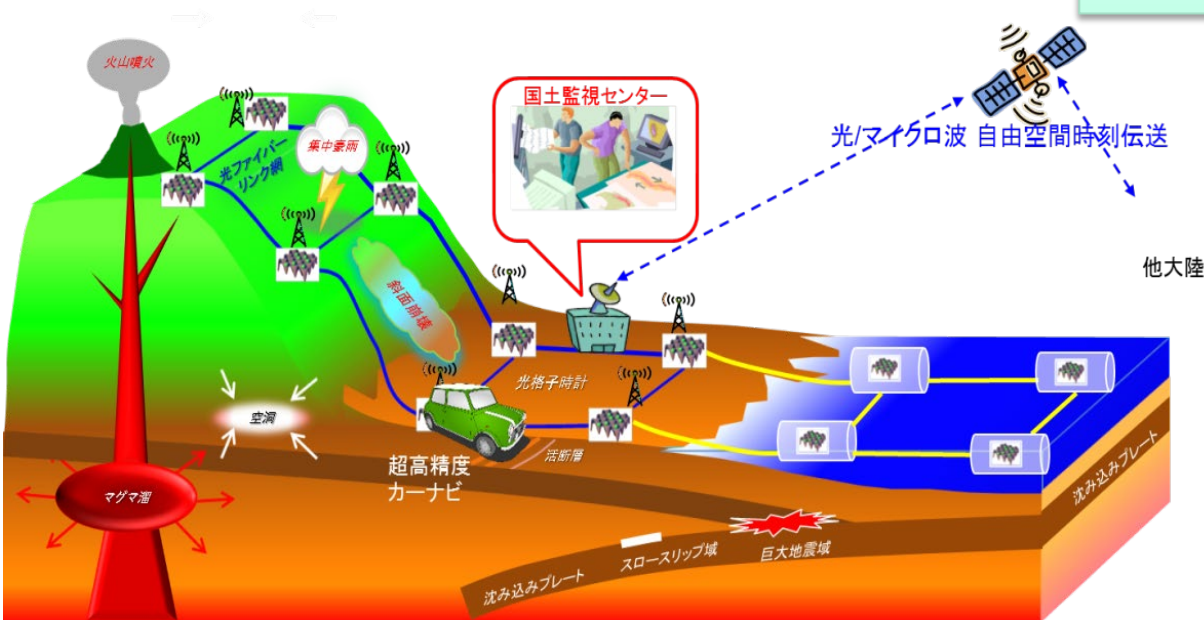


光格子時計（東大香取教授発明）を商用光ファイバにより遠隔接続することで、
 超高精度（ 1×10^{-18} の精度）のセンシングネットワークの実現が期待
 測地学・地震学・火山学等への応用による、安心・安全な生活環境の実現



広範な応用

- ・ 周波数・時間基準配信
- ・ 測地学(量子水準点)・地震学、火山学(国土監視NW)
- ・ 資源探査・物理定数の恒常性・ダークマター
- ・ **GPS応用タイムビジネスの高度化 (GNSSを補完or無力化)**



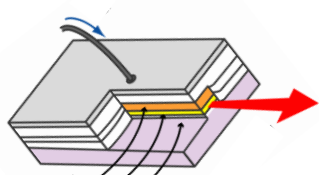
- ・ リピーターシステム一式 (19インチラック1つサイズ)
- ・ 別ネットで遠隔操作可能

NTT東の厚木-本郷間ファイバ網と、既存の和光-本郷ファイバ網を接続し、遠隔運用可能な150km級ファイバリンクを構築

NTT, 東京大学, NTT東の共同研究による報道発表 (2020/3/18)

波動関数制御を利用した高機能半導体デバイスは、産業競争力の向上に大きく貢献

量子井戸レーザー、半導体光変調器（1990ごろ）

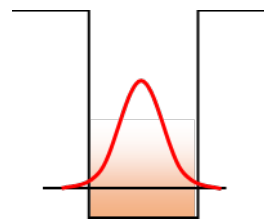


レーザーダイオード

NTTホームページより

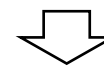


変調器組み込み通信
モジュール



電子波動関数の
閉じ込め

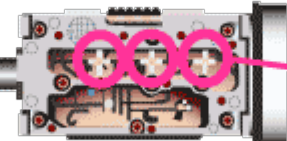
半導体薄膜（～10nm）に電子を閉じ込め、波動の性質を利用



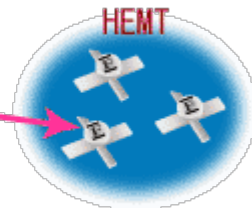
光デバイスの効率を向上させ、
光通信を高度化

高電子移動度トランジスタ(HEMT)（1985ごろ）

パラボラアンテナの中の HEMT



受信モジュール



HEMT



電子波動関数の
局在化

半導体界面に電子を蓄積し、
高移動度を実現



デバイス的高速化・低雑音化を
向上させ、衛星通信を普及

富士通ホームページより