



研究課題名 kHz から GHz 周波数帯の音響メタマテリアルデバイスの開発と定量的解釈

オリバ ビー ライト
北海道大学・大学院工学研究院・教授 Oliver B. Wright

研究課題番号： 19H05619 研究者番号：90281790

キーワード： 音、メタマテリアル、フォノン、電磁波、プラズモン、マイクロ、メタサーフェス

【研究の背景・目的】

波の波長よりも小さな局所共鳴人工構造を持つ自然界には見られない媒質であるメタマテリアルは、物理学、材料科学および技術に新しい可能性をもたらす。例えば電磁メタマテリアルは、負の透磁率をもたらすスプリットリングや、負の誘電率をもたらすIの字型の電線からなる媒質によって作られる。音響メタマテリアルは、しばしば負の体積弾性率や負の密度を示す。本研究では、シングルネガティブ音響メタマテリアル（1つの負の有効パラメータを持つ状態）で波が減衰する現象を、振動を閉じ込める応用に利用する。また、ダブルネガティブ音響メタマテリアルによって回折限界以下の小さな領域に音響波を収束させる。音響透過率の増幅を、波長以下のサイズの小さな開口を共鳴させる異常透過現象や、音響インピーダンスが大きく違う媒質間の中にインピーダンス整合のための小さなメタアトムを入れる方法によって達成する。kHz から GHz 帯の周波数の音響メタマテリアルや、phoxonic（同時に photonic 光学的かつ phononic 音響的な）メタマテリアルデバイスの開発とその定量的な解釈する。

【研究の方法】

本研究では、空気中の音響メタマテリアルの異常透過現象に基づく走査型音響顕微鏡や、音響インピーダンスが合わない媒質間、特に空気と水の間に音波を効果的に透過させるメタサーフェスを作製する。また、単一の素材に空洞や溝を掘って構成される単純で軽い、広い周波数帯ですべての振動モードを通さない音響メタマテリアルに基づく柱や梁、もしくはダブルネガティブの振る舞いをする板の曲げ振動音響メタマテリアルの開発をする（図1）。さらに、我々はシリコンや金属誘電体からなる phoxonic メタマテリアルを作製し（図2）、光学および音響的な分光によってそれらの振る舞いの性質を測定する。

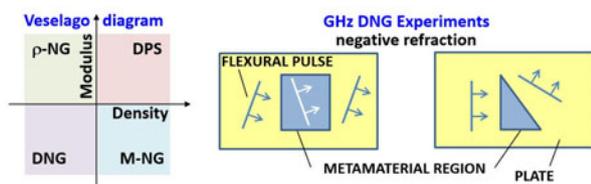


図1 ヴェセラゴダイアグラム（弾性率 M と密度 ρ の関係）（左）と、GHz ダブルネガティブメタマテリアルの実験計画（右）。 ρ -NG: 負の密度、M-NG: 負の弾性率、DPS: ダブルポジティブ。

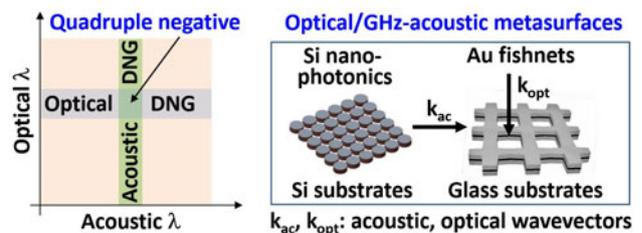


図2 光と GHz 音響メタマテリアルのバンドギャップを持つ Phoxonic メタサーフェスとクアドラプルネガティブ（quadruple negative）メタマテリアル。

【期待される成果と意義】

メタマテリアルの走査型音響顕微鏡は波長よりもはるかに小さい分解能で織物や皮膚イメージングを可能にするため、産業や医療分野での幅広い応用が期待される。新しいメタサーフェスは幅広い帯域において効果的に音波を伝達する応用が期待される。また、多数の共振周波数を利用して kHz から数 Hz の周波数帯において完全に振動を通さない音響メタピラーや音響メタビーム、ダブルネガティブの振る舞いをする音響メタプレートの開発は応用に直結するであろう。さらに、phoxonic メタマテリアルによって、音響光学変調や光と音響波の両方の回折限界を超えた光と音響波の一点への収束を可能にする革新的な4重のネガティブメタマテリアルが実現される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Q. Xie, S. Mezil, P. H. Otsuka, M. Tomoda, J. Laurent, O. Matsuda, Z. Shen and O. B. Wright, 'Imaging GHz zero-group-velocity Lamb waves', Nat. Comm. **10**, 2228, 2019.
- E. Bok, J. J. Park, H. Choi, C. K. Han, O. B. Wright and S. H. Lee, 'Metasurface for Water-to-Air Sound Transmission', Phys. Rev. Lett. **120**, 044302, 2018.

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和3年度
107,700 千円

【ホームページ等】

<http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/j-index.html>
olly@eng.hokudai.ac.jp



研究課題名 デュアルフェーズエンジニアリングによるIoT社会に貢献する広帯域電波吸収体の創製

東北大学・大学院工学研究科・教授 **すぎもと さとし**
杉本 諭

研究課題番号：19H05620 研究者番号：10171175

キーワード：電磁波吸収体、微粒子、複合、反射損失、透磁率

【研究の背景・目的】

世界中の様々なモノがインターネットにつながるIoT時代が到来し、情報通信（ICT）デバイスの数の急激な増大が見込まれている。これに伴い、多くの情報を高速で通信するために、周波数も現在のUHF帯から、Early 5Gと呼ばれる0.7~6GHzを中心としたSHF帯へと高周波側への移行が決定されている。一方で機器からのノイズが増加し、この周波数帯まで及ぶ危険性も高まっており、その安全性にとっては発生ノイズの軽減が大きな課題となっている。

この対策としてノイズを吸収できる電磁波吸収体が知られているが、現有のスピネル型フェライトやFe系磁心材料などのソフト磁性材料の電磁波吸収体では、6GHz帯域まで磁化損失を示す比透磁率の虚部 μ_r'' を保つことができず、良好な電磁波吸収体とはならない。また、増加する多種多様なデバイスからは、多くの異なる周波数ノイズが出ることから、利用周波数域において広帯域で対応できる電磁波吸収体が切望されている。

そこで本研究では、高い透磁率が見込まれるソフト磁性相と高い異方性磁界から高周波帯での機能が可能となるハード磁性相のデュアルフェーズから構成されるモディファイド粉末を作製し、磁氣的相互作用と組織形態を制御してEarly 5G帯域で機能できる広帯域電磁波吸収体の開発を目的とする。

【研究の方法】

本研究では、表1に示すようなコンセプト、すなわち、ハードフェライトの水素還元などの熱処理技術、メカノフュージョンなどの混合技術、アークプラズマデポジション法などのコーティング技術などにより、共鳴周波数が異なるソフト磁性相とハード磁性相が共存し、両相間の相互作用なども考慮したモディファイド磁性微粒子を作製する。さらに、

表1 本研究における材料作製のコンセプト

作製法	ハード磁性微粒子	ソフト磁性微粒子	モディファイド(ハイブリッド)微粒子
混合法	共沈法 ○	水素還元(全還元) 水素プラズマ反応法(HPMR)	メカノフュージョン反応 ○
コーティング法	-	水素還元(全還元) 水素プラズマ反応法(HPMR)	有機金属分解法 ○
	共沈法 ○	-	アークプラズマ蒸着法(APD) ○
熱処理	共沈法 ○	-	水素還元(部分還元) ○

電磁波吸収を広い周波数帯域で起こすには、比透磁率の実部 μ_r' と磁化損失を示す比透磁率の虚部 μ_r'' の値がある一定の範囲（整合領域）内になければならない。本研究では、分布形態や体積分率などの二相組織を制御するデュアルフェーズエンジニアリングによって、図1の太線のように μ_r' 、 μ_r'' を整合領域に入れ、広GHz帯域対応の電磁波吸収体設計する。

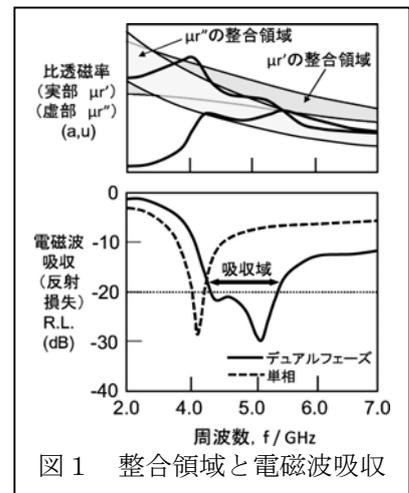


図1 整合領域と電磁波吸収

【期待される成果と意義】

本研究は、ソフト磁性材料のみだった電磁波吸収体分野に、ハード磁性材料と複合したデュアルフェーズからなるモディファイド粉末を利用し、磁性粉末の新規作製方法ならびに電磁波吸収体材料の新たな設計指針を提案するものである。得られた成果は、ICTデバイスだけでなく、IoT社会の元で今後急成長する「自動車」、「ロボット・産業用途」、「医療」などの分野を通じ、安全・安心で豊かな社会の構築に貢献すると判断される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- S. Sugimoto, S. Kondo, K. Okayama, et al., “M-type ferrite composite as a microwave absorber with wide bandwidth in the GHz range”, *IEEE. Trans. Magn.*, **35**(5), 3154-3156, (1999).
- T. Maeda, S. Sugimoto, T. Kagotani, et al., “Effect of the soft/hard exchange interaction on natural resonance frequency and electromagnetic wave absorption of the rare earth-iron-boron compounds”, *J. Magn. Mater.*, **281**, 195-205, (2004).

【研究期間と研究経費】

令和元年度—令和5年度
122,600千円

【ホームページ等】

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~jisei/index.html>
sugimots@material.tohoku.ac.jp



研究課題名 量子情報処理に向けた時間と原子空間分解能を持つ
スピニコヒーレンス顕微鏡の開発

こめだ ただひろ
東北大学・多元物質科学研究所・教授 米田 忠弘

研究課題番号：19H05621 研究者番号：30312234

キーワード：ナノ顕微鏡技術、スピントロニクス、薄膜エレクトロニクス、量子情報処理

【研究の背景・目的】

量子コンピューターは次世代の情報処理の中心を担うと考えられ、信頼性のあるハードウェア開発は喫緊の課題である。情報の単位は量子ビット(qubit)とよばれ現行のビットと異なりその量子的重ね合わせが計算の根幹であるため、量子ビット間の相互作用の精密な制御が求められ、それがハードウェア構築の技術的困難となっている。分子のスピンを量子ビットとして用いる手法は、量子コンピューター開発の初期から注目され Shor アルゴリズムの実証など大きな成果を収めたが、そこには分子の均一性を利用した分子集団の利用、および精密測定が可能な ESR や NMR といった測定手段が利用可能であったことが大きな理由である。しかしながら、開発が求められるナノスケールデバイスにおいては ESR/NMR では感度不足で用いることができない。単一分子単位でのスピンの検出手法や量子ビットとしての特性を見極める分析手法の確立が急務である。

【研究の方法】

本研究の主眼は量子コンピューター開発における量子ビットの効率的な構築に資する、原子空間分解能を持つスピン検出と、スピン操作によるスピン動的過程解析を可能とする顕微鏡の開発である。検出の対象として特に分子に注目する。最近、核スピンの多重性を利用することで、必要な qubit の個数を減少させハードウェア構成を簡素化する研究が進んでおり、ランタノイド原子を中心金属とする錯体分子を用いることでこの技術が実現可能である。特に、フタロシアンニン (Pc) を配位子とした多層型

ランタノイド錯体 (TbPc₂, DyPc₂ 等) は、大きな磁気異方性を持ち単一分子でも磁石の性質を持ちうる磁性分子であり、本研究に最適である。

原子分解能をもつスピン検出にはトンネル電流を用いその磁気抵抗効果を利用した手法を用いる (図1)。ランタノイド原子の 4f 電子のスピント、トンネル電子スピンの平行・反平行の関係からトンネル電流が増減する現象を利用し、さらに核スピンの検出にはその微細構造を用いる。また周辺にマイクロコイルを配置しパルス磁場を発生させることでスピンの操作を行い、コヒーレンスについて検証する。

【期待される成果と意義】

本プロジェクトで開発される技術を組み合わせることによって、単一原子・スピンを対象に、スピンのダイナミクスやコヒーレンス測定が可能となり、現在 ESR や NMR を用いて分子の集合体に行われている精度のスピン測定を単原子・単分子単位で可能とする。さらにその装置を用いることにより、単一分子を対象にした量子コンピューターの基本動作検証が可能となり、qubit あるいは qudit の評価装置として発展させ、量子コンピューターのハードウェア発展に貢献できる。同時に、原子レベルの空間分解能を持ったスピン顕微鏡開発の波及効果として、生物学や医療の分野で酵素活性や化学反応の可視化などに用いられる予想される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Observation and electric current control of a local spin in a single-molecule magnet, T. Komeda, H. Isshiki, J. Liu, Y.-F. Zhang, N. S. Lorente, K. Katoh, B. K. Breedlove, M. Yamashita: Nat. Comm. 2, (2011) 217.
- Spatially Resolved Magnetic Anisotropy of Cobalt Nanostructures on the Au(111) Surface, P. Mishra, Z. K. Qi, H. Oka, K. Nakamura, T. Komeda: Nano Lett. 17, (2017) 5843-5847.

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和5年度
147,100 千円

【ホームページ等】

<http://db.tagen.tohoku.ac.jp/php/forweb/outline.php?lang=ja&no=1020>

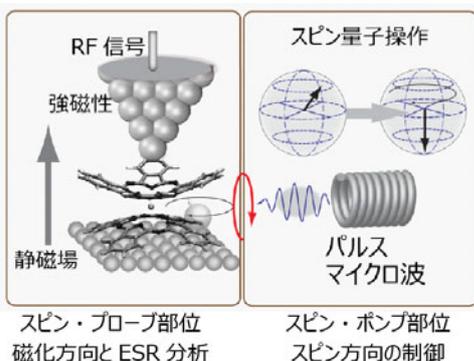


図1 開発するスピン顕微鏡の構成。左に示したスピン検出部分と、右のスピン操作部を組み合わせることで原子分解能を持ったスピン分析を可能とする。



研究課題名 ノンコリニアスピントロニクス

東北大学・電気通信研究所・准教授 深見 俊輔 (ふかみ しゅんすけ)

研究課題番号：19H05622 研究者番号：60704492

キーワード：スピントロニクス、ノンコリニア磁気構造

【研究の背景・目的】

電子の持つ二つの性質 — 電気的性質(電荷)と磁氣的性質(スピン) — を同時利用するスピントロニクスにより、磁性体の集団的磁気秩序の電気的な制御が可能となる。これはここ約20年のスピントロニクス研究の中心的課題であり、古典磁気工学(主には磁場で磁化を制御)では実現できない様々な可能性が見出されてきた。1999年にスピン移行トルク(STT)によって磁化方向を電流で直接制御できることが示され、約20年経った現在ではこの技術を利用した不揮発性磁気メモリ(STT-MRAM)が実用化されている。2011年には新たな磁化反転の駆動力としてスピン軌道トルク(SOT)が加わり、STTでは実現が難しいような超高速での磁化反転などが実証されている。また2016年にはスピン軌道トルクを用いることで、これまでは工学的な利用価値はないと考えられていたコリニア反強磁性体のネールベクトルも電気的に制御できることが示された。反強磁性体は強磁性と比べて外部磁場に対する頑健性に優れ、またダイナミクスの周波数も数桁高いことから、反強磁性体の電気的な制御は近年非常に注目されている。このように新たな磁気秩序、新たな駆動力の出現により新たな局面が切り開かれてきたと言えることができる。

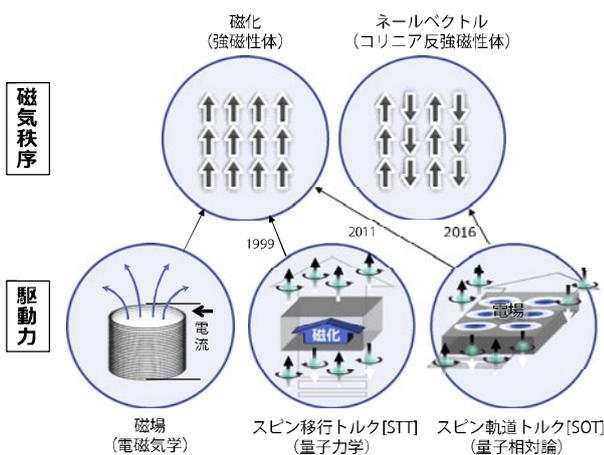


図1 集団的磁気秩序の電気的制御の変遷

以上を俯瞰的に示したのが図1である。本研究課題はこの磁性体の集団的磁気秩序の電気的制御の構図に新たな展開をもたらすことを目的とし、これまでこの技術領域において未開拓であるノンコリニア磁気構造に着目するものである。

【研究の方法】

これまで磁性体の磁気秩序の電気的制御においては、共線的(コリニア)な磁気秩序が主な研究対象として扱われてきた。本研究課題は、この『コリニアスピントロニクス』の外側に位置する新たなパラダイムとして、『ノンコリニアスピントロニクス』を開拓する。ここ数年、多様な磁氣的相互作用のフラストレーションの帰結として現れる多様なノンコリニア磁気構造が発現する新奇物理現象が数々報告されており、非常に注目を集めている。本研究では、高度な積層薄膜堆積技術や微細加工技術、及び計測技術を駆使した実験的な研究と、解析モデルの構築と数値計算を並行して進め、ノンコリニア磁気構造が発現する新奇物理現象の、磁気秩序の電気的制御における利用価値、及び利用方法を明らかにする。

【期待される成果と意義】

磁気秩序の電気的制御は、不揮発性磁気メモリ技術の根幹的な技術であることに加え、新たな情報処理の枠組みとして注目されている脳型情報処理の要素技術としても期待されている。本研究課題で磁気秩序の電気的制御の新たな可能性として開拓される『ノンコリニアスピントロニクス』は、スピントロニクス研究のフロンティアを形成すると同時に、集積回路や情報処理端末の新たな基盤となり得るものと期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- S. Fukami *et al.*, “Magnetization switching by spin-orbit torque in an antiferromagnet-ferromagnet bilayer system,” *Nature Materials*, vol. 15, pp. 535-541 (2016).
- S. Fukami *et al.*, “A spin-orbit torque switching scheme with collinear magnetic easy axis and current configuration,” *Nature Nanotechnology*, vol. 11, pp. 621-625 (2016).

【研究期間と研究経費】

令和元年度—令和5年度
155,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.spin.riec.tohoku.ac.jp/>



研究課題名 チタンの革新的アップグレード・リサイクル技術の開発

東京大学・生産技術研究所・教授 おかべ とおる
岡部 徹

研究課題番号：19H05623 研究者番号：00280884

キーワード：チタン、リサイクル、脱酸、希土類元素、乾式プロセス

【研究の背景・目的】

チタン (Ti) は、資源としては無尽蔵の埋蔵量を有し、金属材料の中では抜群の比強度、耐食性を有する夢の未来材料である。しかし、低コストで鉱石から直接金属 Ti を製造する技術が存在しない。さらに、Ti は高温で活性であるため加工が難しく、製品製造に際しては切削等によって多量のスクラップが発生している (図 1)。これらの理由から Ti 製品は製造コストが高く、広く一般には普及していない。

Ti 製品の製造過程で発生する Ti スクラップは、バージン材 (スポンジ Ti) に比べて酸素を多く含有するが、価格は 10 分の 1 から 2 分の 1 程度である。本研究では、Ti スクラップ中の酸素を直接除去する新技術を開発し、安価な Ti スクラップを用いて高純度のインゴットに再生する“アップグレード・リサイクル”を可能にする革新的なリサイクルスキームの構築を目指す。これにより、低コストの Ti 製品の製造を実現する。

一次チタン原料(スポンジチタン) (~500 ppmO)

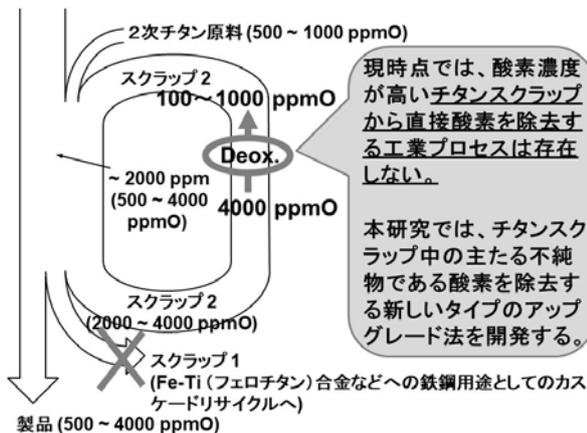


図 1 チタンスクラップのマテリアルフローとスクラップ中の不純物酸素濃度の関係。

【研究の方法】

マグネシウム (Mg) を脱酸剤として塩化マグネシウム (MgCl₂) 中で Ti を脱酸することができれば、現行の Ti 製造プロセス (クロール法) に利用されている Mg や MgCl₂ の真空除去法や、Mg の電解再生プロセスを利用できる。しかしながら、Ti は高い酸素親和性を有し、また Mg は脱酸能力が低いため、Mg 脱酸を利用し MgO を生成する反応 ($O_{in Ti} + Mg \rightarrow MgO$) によって Ti 中の固溶酸素を除去することは不可能であると考えられてきた。最近、我々は、各種熱力学的な考察により、例えば、マグネシウムハラ

イド (MgX₂, X: F, Cl) 内に希土類ハライド (REX₃) が存在すると、希土類オキシハライド (REOX) 生成を伴って脱酸反応が進行し ($O_{in Ti} + Mg + REX_3 \rightarrow REOX + MgX_2$)、MgO の反応系内における見かけの活量が低下し、原理的には、チタン中の酸素濃度を 100 ppm O 以下まで低減可能であることを見出した (関連の深い論文参照)。

しかしながら、希土類化合物の熱力学データには誤差要因が多く、信頼性の高いデータが存在しないのが現状である。したがって、本研究では、実験的な実証を通じて、熱力学データの誤差評価を行うとともに、希土類オキシハライド生成が脱酸反応に与える影響について詳細に検証する。さらに、反応生成物であるオキシハライドの再生・循環利用技術を確立することで、希土類元素の消費のないプロセス開発に取り組む。また、鉄などの他の不純物濃度の低減技術の開発にも取り組む。

【期待される成果と意義】

安価な Ti スクラップを、低コストで脱酸しアップグレードするプロセスが開発できれば、莫大なエネルギーを投入して鉱石から金属を製造する従来法 (クロール法) によって製造される高価なスポンジ Ti との競争が生じ、Ti スクラップのマテリアルフローが大きく変わると期待される。また、海外から安価な Ti スクラップを輸入して、アップグレード後、高付加価値製品として輸出することが可能となれば、世界の金属チタン製造業界のパラダイムシフトに繋がると期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. H. Okabe, C. Zheng, and Y. Taninouchi: 'Thermodynamic Considerations of Direct Oxygen Removal from Titanium by Utilizing the Deoxidation Capability of Rare-Earth Metals', Metall. Mater. Trans. B, vol. 49, no. 3, (2018) pp.1056-1066. (DOI: 10.1007/s11663-018-1172-4)
- T. H. Okabe, Y. Taninouchi, and C. Zheng: 'Thermodynamic Analysis of Deoxidation of Titanium Through the Formation of Rare-Earth Oxyfluorides', Metall. Mater. Trans. B, vol. 49, no. 6, (2018) pp. 3107-3117. (DOI: 10.1007/s11663-018-1386-5)

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和 5 年度
155,300 千円

【ホームページ等】

<https://www.okabe.iis.u-tokyo.ac.jp/>
okabe@iis.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 次世代型デジタルバイオアッセイのための動的フェムトリアクタ技術

東京大学・大学院工学系研究科・教授 **のじ ひろゆき**
野地 博行

研究課題番号：19H05624 研究者番号：00343111

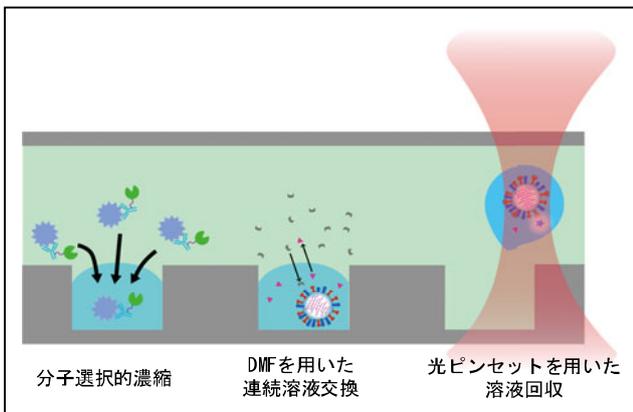
キーワード：1分子デジタル計測、動的ナノリアクタ技術

【研究の背景・目的】

我々は、フェムトリットルサイズの超微小溶液リアクタアレイ(fLリアクタ)技術を開発し、これを利用した1分子デジタルバイオ分析法の研究を世界的に牽引してきた。しかし、これまでのfLリアクタは受動的に溶液を収納するだけであり、その応用範囲には制限があった。本プロジェクトでは、これまでの「静的」なリアクタから、「動的」なリアクタへと基盤技術を一新し、応用範囲の拡大を目指す。具体的には、能動的な分子取り込み機構、リアクタ内部溶液の組成制御機構、リアクタ内部溶液の個別取り出し機構などを開発し、これらの機構を1つのデバイスに統合する。そして、現状ではデバイス外で行っている試料の溶液交換や濃縮などのプロセスもon-chipに搭載することにより、統合型デジタルバイオ分析を実現し、オンサイト1分子診断にイノベーションをもたらす。加えて、多次元デジタル計測技術を開発し、酵素・ウイルスが示す分子・粒子個性を定量解析し、その発現メカニズムを明らかとする。

【研究の方法】

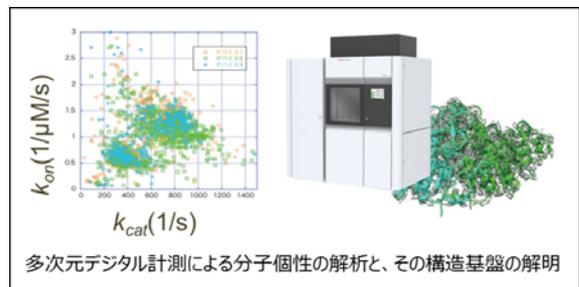
まず、外部からの操作に応じて内容物の出し入れが可能で、形状や体積が変化する「動的」なナノリアクタ技術を開発する。この技術開発にあたっては、Dielectricphoresis (DEP) やデジタルマイクロ流体(DMF)などの基本技術に、排除体積効果などの特殊溶液現象を独自の視点で融合する。



次に、この技術に立脚して、新しい1分子デジタル計測の方法論を確立し、試料処理プロセスを1デバイスで完結できるon-chip統合型デジタルバイオ分析技術(主にELISA法)を開発する。また、個々の分子に注目しながら異なる溶液条件でその1分子活性を定量計測する多次元デジタル計測技術を開発し、酵素

分子・ウイルス粒子の活性多型性を定量的に解析する。活性計測と合わせて構造・遺伝型解析を実施することで、活性多型性の発現原理も探る。

【期待される成果と意義】



デジタルELISA法は、次世代臨床診断の本命と位置付けられているが、現状では大型の試薬分注ロボットが必要となっている。on-chip統合型デジタルELISA法が確立されれば、システムが大幅に小型化され、自宅などにおけるオンサイト1分子診断が可能となり、パーソナル医療を実現する技術的一助となる。また、多次元デジタル分析と構造・遺伝型解析を組み合わせた研究は、「分子個性」の発現メカニズムの理解に加え、その進化および環境適応の戦略に関しても重要な示唆を与えることが期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Tabata KV, et al., Antibody-free digital influenza virus counting based on neuraminidase activity, *Sci Rep.* 31;9 (1):1067 (2019)
- Zhang Y and Noji H, Digital Bioassays: Theory, Applications, and Perspectives, *Anal Chem.*, 89, 92-101 (2017)
- Rondelez Y, et al., Microfabricated arrays of femtoliter chambers allow single molecule enzymology, *Nature Biotechnology*, 23, 361-365 (2005)

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和5年度
138,800 千円

【ホームページ等】

<http://www.nojilab.t.u-tokyo.ac.jp/>
office@nojilab.t.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 革新的負熱膨張材料を用いた熱膨張制御

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

あずま まさき
東 正樹

研究課題番号：19H05625 研究者番号：40273510

キーワード：負熱膨張、相転移、局所構造解析、複合材料、トポロジー最適化

【研究の背景・目的】

原子振動の増大に起因する熱膨張は、固体、液体、気体の別を問わない物質共通の性質であるが、構造材料に対して、1. 位置決めはずれ、2. 熱応力による変形・破壊・形状精度の劣化・剥離、という深刻な問題を起こす。例えば純鉄の線熱膨張係数は $\alpha = 11.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であるから、10cmの鉄の棒は、 1°C の昇温で $1.16\mu\text{m}$ 膨張する。この値は最近のLSIのゲート幅である10nmの100倍以上である。このため、半導体製造や光通信などの精密な位置決めが必要とされる場面では、熱膨張抑制のための高度空調に膨大なエネルギーが浪費されている。また、金属、セラミックス、樹脂などの熱膨張係数の違いは、異種接合界面の剥離や断線といった深刻な障害につながる。この問題は、パワー半導体や3次元集積回路素子といった先端電子デバイスや、熱電変換、燃料電池といったエネルギー・環境技術において、喫緊の課題と認識されており、技術革新には熱膨張制御が不可欠である。東、竹中は、樹脂に添加することで熱膨張係数を任意の値に制御できると期待される、新世代の負熱膨張材料を開発してきた。産業化を目指して更なる新材料を開発すると共に、巨大負熱膨張材料を用いた熱膨張制御技術を確認するのが、本研究の目的である。

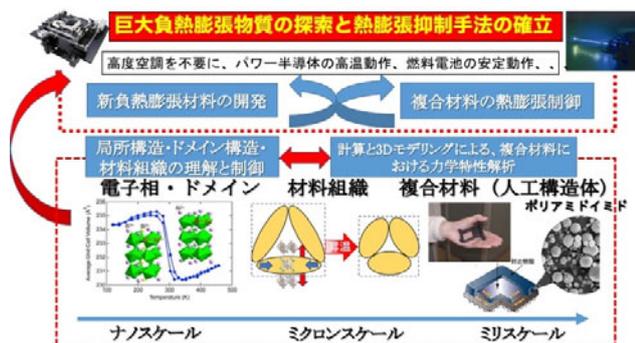


図1 研究の概念

【研究の方法】

ナノスケールの局所構造、ミクロンスケールのドメイン構造や材料組織、3Dプリンティングで造形したミリスケールの人工構造体の構造・力学特性を、先進的量子ビームを用いた構造解析と、弾性力学理論にもとづく数値計算で明らかにする。さらに、第一原理計算を駆使して、負熱膨張の起源となる相転移力学を、解明する。これらの結果を材料設計へとフィードバックすることで、効率的な材料開発を行う。また、こう

して開発した負膨張材料を、3Dプリンティングを用い、数値計算で最適化した濃度・配置で樹脂中に分散させることで、強い力学特性を持つゼロ熱膨張コンポジット（複合材料）を実現する。

【期待される成果と意義】

第一に、負熱膨張特性を左右する相転移挙動の理解が進み、効率的な材料探索手法を確立出来ると期待される。これにより、 300°C の温度範囲に渡り $-100 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の負熱膨張が続き、かつ現実的な価格で供給可能な負熱膨張材料を実現する。また、正の熱膨張を持つ構造材料と負熱膨張材料を、任意の比で混合した複合材料の熱膨張率を予測する手法を構築する。さらには、3Dプリンティングで負熱膨張材料の配置を最適化することで、高い機械的強度と任意の熱膨張率を持つ構造材料を実現する。

これらにより、負熱膨張材料とその使用法の学理を構築すると共に、社会的要請の大きい熱膨張問題を解決し、精密加工やエネルギー・環境技術の更なる発展に貢献する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- H. Yamamoto, T. Imai, Y. Sakai, and M. Azuma, “Colossal Negative Thermal Expansion in Electron-Doped PbVO_3 Perovskites”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **57**, 8170 (2018).
- K. Takenaka, Y. Okamoto, T. Shinoda, N. Katayama, and Y. Sakai, “Colossal negative thermal expansion in reduced layered ruthenate”, *Nature Commun.*, **8**, 14102/1–7 (2017).
- M. Azuma, W-T Chen, H. Seki, M. Czapsli, S. Olga, K. Oka, M. Mizumaki, T. Watanuki, N. Ishimatsu, N. Kawamura, S. Ishiwata, M. G. Tucker, Y. Shimakawa, and J. P. Attfield, “Colossal negative thermal expansion in BiNiO_3 induced by intermetallic charge transfer”, *Nature Commun.*, **2**, 347/1–5 (2011).

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和5年度
155,000 千円

【ホームページ等】

<http://www.msl.titech.ac.jp/~azumalab/>



研究課題名 モデルベース設計を基盤とした指向性進化による
高効率細胞プロセス創製の確立と展開

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授 **しみず ひろし**
清水 浩

研究課題番号： 19H05626 研究者番号：00226250

キーワード： 代謝工学、バイオプロセス

【研究の背景・目的】

持続可能な社会の形成を目指して、微生物の代謝変換による化成品・燃料の製造が注目されている。細胞は複雑に相互作用する数千の代謝反応を有するため、目的物質生産にとって最適な代謝状態になるように細胞を改変するのは容易ではない。細胞全体を見渡したアプローチとして代謝物質の物質収支の概念に立脚して統一的に代謝を取り扱えるプラットフォームを構築し、代謝改変を合理的に行う手法の開発が重要である。このような手法における問題点として、代謝経路のどの反応が律速点となり、この障壁をどのようにすれば乗り越えることができるのか、という問いがいまだ解明されていないことが挙げられる。本研究では、増殖と連動して目的物質を生産する代謝デザインと指向性進化を組み合わせることで、代謝反応を駆動する際の障壁となる制御機構を網羅的に抽出・解消し、代謝状態を自在に誘導する手法を確立することを目的とする。

【研究の方法】

本研究では、微生物代謝を統一的に理解し、合理的にデザインできる代謝工学を確立する。有用物質生産の宿主微生物である大腸菌について、代謝経路の異なる箇所から取り込まれる炭素源、異なる前駆体から合成される目的物質を設定することで、代謝経路の律速点を網羅的に抽出するための研究を行う。

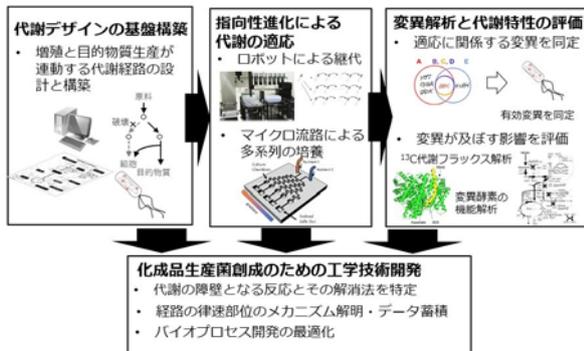


図1 モデルベース設計と指向性進化による高効率細胞創製

中枢代謝の主要な経路のフラックスを増加させるための原理を抽出し、代謝を自在に操る手法を確立する。具体的には、1)ゲノムスケールモデルを用いた細胞増殖と目的物質の生産が連動する代謝経路のデザイン、2)ロボットを用いた継代培養による律速点解消進化株の取得、3)マイクロ流路を用いた多系列連続培養系の開発と微生物の進化プロセスの多次元化、4)得られた進化株のゲノム解析や代謝解析による代謝遷移の解明を行う。得られた知見を統合し、5)代謝を自在に変化させ有用物質生産株を構築する手法を確立する(図1)。

【期待される成果と意義】

本研究では、シミュレーションによって代謝経路をデザインし、ロボット工学とマイクロ流路工学に基づく指向性進化によって、代謝を高度化する方法を確立することを目的としている。得られた進化株を解析することで、代謝経路の律速点を網羅的に抽出し、中枢代謝フラックスを自在に調整するための汎用的な知見を提供することが可能になる。これらの研究を通して微生物の代謝遷移に関する理解と高効率細胞プロセス創製の新しい学理の構築が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Tokuyama, K, Toya, Y, Horinouchi, T, Furusawa, C, Matsuda, F, Shimizu, H. Application of adaptive laboratory evolution to overcome a flux limitation in an *Escherichia coli* production strain, *Biotechnol Bioeng*, **115**, 1542-1551 (2018)
- Toya, Y, Shimizu, H. Flux analysis and metabolomics for systematic metabolic engineering of microorganisms, *Biotechnol Adv*, **31**, 818-826 (2013)

【研究期間と研究経費】

令和元年度ー令和5年度
144,200 千円

【ホームページ等】

<http://www-shimizu.ist.osaka-u.ac.jp/hp/index.html>
shimizu@ist.osaka-u.ac.jp

【基盤研究(S)】 大区分D



研究課題名 局在プラズモンシートによる細胞接着ナノ界面の 超解像度ライブセルイメージング

九州大学・先導物質化学研究所・教授 たまだ かおる
玉田 薫

研究課題番号：19H05627 研究者番号：80357483

キーワード：局在プラズモン共鳴、自己組織化、ライブセルイメージング、超解像度

【研究の背景・目的】

AIを使った画像解析技術の飛躍的進歩は医療診断分野にパラダイムシフトを起こしつつある。大量の画像を高速で処置できるようになった今、次に必要とされるのは、高度情報処理技術に見合った高品質の新たな画像情報である。我々の独自技術である金属微粒子自己組織化により作製した「局在プラズモンシート」は、局在プラズモンの光閉じ込めおよび蛍光増強効果により、埋もれたナノ界面における分子ダイナミクスを超解像度で高速イメージングできる世界唯一の技術である。本研究では、この局在プラズモンシートを用いて、生細胞接着界面における複雑な分子レベルでの反応を、超解像度イメージングにより明らかにする。そしてこれにより幹細胞の分化・初期化やがん化などの重要な課題に対して新たな情報を提供する。

【研究の方法】

これまでの検討で、球状ナノ粒子からなる局在プラズモンシートを蛍光観察基板として用いると、光閉じ込め効果により Z 軸方向に世界最薄の超解像度のイメージングが可能であることが明らかになった(図1、図2) [1,2]。基盤研究(S)では、超解像度高速ライブイメージングの実現に向けて、さらに安定で且つ強力な光電場形成を目指し、様々な異形ナノ粒子の自己組織化に着手する。そして得られた高分解能の大量の画像情報を高速で処理し、生細胞接着底面での分子レベルでの微細な動きをリアルタイムで追跡・解析できるシステムを構築する。さらに細胞のダイナミクスを故意に誘発する生化学的、物理的な刺激法を考案し、細胞特性の短時間識別法を開発する。柔らかなゲル上で生じる「食い込む」「浮く」などの接着斑の Z 方向の変位の輝度変化による高感度検出も試みる。

【期待される成果と意義】

学術面では、この独自技術により細胞を取り巻く生命科学分野において常識を覆す新たな発見をすることを目指す。さらに、この局在プラズモンシートによるイメージング法を世界の標準技術として完成させること、「ハイスループット細胞活動診断システム」を通じて、腫瘍等の低侵襲・早期診断法として社会に資することを目指す。

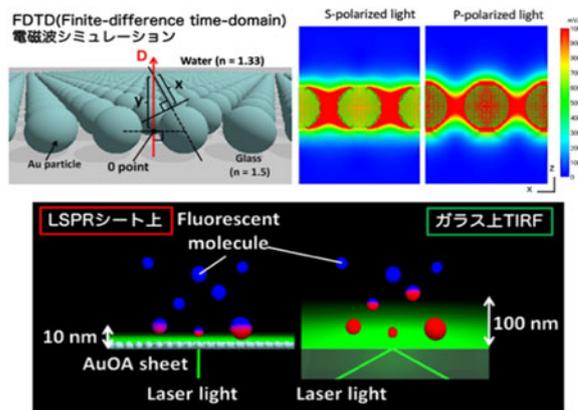


図1 球状粒子局在プラズモンシートの電場特性

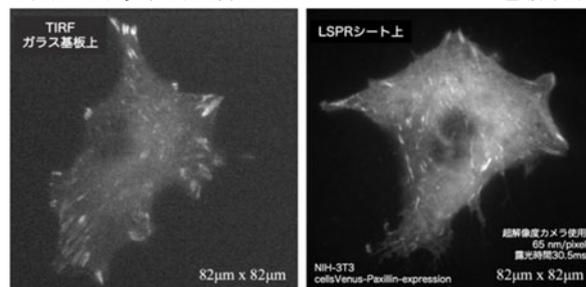


図2 局在プラズモンシート上での固定化細胞の蛍光像のTIRF顕微鏡像との比較

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Masuda, S.; Yanase, Y.; Usukura, E.; Ryuzaki, S.; Wang P.; Okamoto, K.; Kuboki, T.; Kudoaki, S.; Tamada, K.*, High-resolution imaging of a cell-attached nanointerface using a gold-nanoparticle two dimensional sheet, **Sci. Rep.** 7, 3720 (2017).
- Usukura, E.; Yanase, Y.; Ishijima, A.; Kunoki, T.; Kidoaki, S.; Okamoto, K.; Tamada, K.*, LSPR mediated high axial-resolution fluorescence imaging on a silver nanoparticle sheet, **PLoS ONE**, 12, e0189708 (2017).

【研究期間と研究経費】

令和元年度—令和5年度
149,100 千円

【ホームページ等】

<http://www.cm.kyushu-u.ac.jp/ktamada/tamada@ms.ifoc.kyushu-u.ac.jp>



研究課題名 サブ keV 領域のアト秒科学

理化学研究所・光量子工学研究センター・センター長

みどりかわ かつみ
緑川 克美

研究課題番号： 19H05628 研究者番号： 40166070

キーワード： 量子エレクトロニクス、アト秒科学、非線形光学、レーザー工学、超高速光科学

【研究の背景・目的】

物質中の電子の動きを捉えることができるアト秒パルスレーザーは、物理学、化学、生物・医科学等の基礎科学分野のみならず、超高速電子デバイスならびに高性能触媒や人工光合成等の化学・材料等の産業分野においても必須のツールとなるとも期待されている。2001年にアト秒パルスおよびパルス列の発生が観測されて以来、その発生・計測法ならびに利用は、急速に発展してきたが、未だに利用できる波長域は、光子エネルギーにして100eV以下の極端紫外(XUV)領域に制限されており、今、その波長域の拡大が切望されている。

本課題では、独自に開発した高エネルギー中赤外レーザー光源とルーズフォーカス法を用いることにより、その波長域をサブ keV 領域にまで拡張するとともに偏光制御を含めた新たな利用法を開拓し、アト秒科学の新たな展開を図る。

【研究の方法】

(1) 高エネルギー3 μ m光のパルス圧縮フェムト Ti:S レーザーを励起光とした OPA で発生した 2.5 μ m 帯のアイドラー光を希ガスセルに導き、その自己位相変調を利用してスペクトルを 1.8~4.0 μ m にまで拡張し、DC-OPA のシード光とする。さらに、第1増幅器の前に設置した AOPDF によりこのシード光のチャープとパルス幅を調整することにより、増幅中の狭帯域化を改善する。増幅後のパルスは、石英ブロックとチャープミラーを組み合わせた圧縮器で約2サイクルにまで圧縮する。

(2) サブ keV 領域のアト秒高次高調波の発生

(1) で生成した 3.3 μ m パルスを励起光として希ガスセルに集光し、1 keV 近傍までの軟 X 線連続光の発生を行う。励起波長の長波長化とともに1原子あたりの発生効率は、急速に小さくなるが、希ガス自体による吸収がほとんど無視できるので高圧力で位相整合を満たすような条件を設定することにより10⁻⁷程度の変換効率が期待できる。

(3) X 線過渡吸収分光によるサブフェムト秒構造ダイナミクスの観測

厚さ100nmのAl薄膜上に堆積された厚さ約50nmのグラファイト薄膜に、波長800nm、パルス幅25fsのTi:Sパルスを様々強度で照射し、炭素のK吸収端から700eVまでにわたる連続高次高調波による時間分

解吸収分光を行い、観測されるスペクトルの変化から炭素原子配置の変化を解析する。

(4) 新しい円偏光高次高調波の発生法の開発
高調次数(波長)に依存せず、同軸方向の励起が可能な円偏光高次高調波の発生法を開発する。具体的には、直交する直線偏光の高次高調波発生を2段階で行い、一段目と二段目の時間遅延をアト秒精度で制御することにより、任意の偏光状態を作り出す。

【期待される成果と意義】

我々が1.6 μ m光を用いて“水の窓”領域の高次高調波発生に成功して以来、アト秒パルスの励起光源は、それまでのTi:Sの800nm光からOPAをベースとした中赤外光に移行している。我々が考案したDC-OPAと名付けられた中赤外光の新しい増幅法を用いることにより、これまで放射光による構造解析が中心であったXAFS等にサブフェムト秒の時間分解能がもたらされ、物質・材料科学研究が大きく前進するものと期待される。また、サブ keV 領域での円偏光高次高調波の発生は、磁気円二色性法にもサブフェムト秒の時間分解能をもたらし、分子化学や固体物性の研究の進展に大きく貢献するものである。一方、中赤外域のフェムト秒高エネルギー光源の出現は、アト秒科学のみならず広く高強度レーザー物理の研究に新たな局面をもたらす可能性を秘めている。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Fu, K. Midorikawa, and E. J. Takahashi, “Towards a petawatt-class few cycle infrared laser system via dual-chirped optical parametric amplification,” *Sci. Reports*, 8, 7629 (2018).
- E. J. Takahashi, T. Kanai, K. L. Ishikawa, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, “Coherent water window x-ray by phase-matched high-order harmonics,” *Phys. Rev. Lett.* 101, 253901 (2008).

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和5年度
152,400千円

【ホームページ等】

<https://rap.riken.jp/labs/eprg/asrt/>

【基盤研究(S)】

大区分D



研究課題名 コヒーレント磁気弾性強結合状態に基づく高効率 スピン流生成手法の開拓

理化学研究所・創発性科学研究センター・チームリーダー

おおたに よしちか
大谷 義近

研究課題番号： 19H05629 研究者番号： 60245610

キーワード： 磁気弾性結合、スピン流、エデルシュタイン効果、強結合

【研究の背景・目的】

磁性体に磁場を印加すると歪が生じる磁歪現象や逆に歪を加えることで磁化が変化する磁気弾性効果は、今から 150 年以上前に発見され、よく知られた物理現象である。近年、この磁気弾性効果によるスピン流生成やマイクロ波の非相反性が実験的に観測され、再度注目を集めている。本研究では、ブラッグミラーで構成されたキャビティ構造にマグノンとフォノンを閉じ込め、それらの強結合状態を誘起する。マグノン・フォノン結合状態の物性の詳細を明らかにするとともに、既存技術よりも効率的なスピン流の生成を実現する。

【研究の方法】

すだれ状電極 (IDT) に交流電圧を印加すると、IDT の双方向に表面弾性波が発生する。本研究では、より効率的にフォノンを閉じ込めるため、図 1 のようなキャビティ構造を作製する。このキャビティ構造は、金ナノ細線を平行に並べた金属細線列からなる一対のブラッグ反射鏡で構成されている。これらの微細構造を、電子線描画・真空蒸着およびリフトオフ法を用いて、圧電基板上に作り込む。二つの反射鏡に挟まれた空間は、表面弾性波 (フォノン) の閉じ込め空間となる。この空間に IDT を配置し、発生させた表面弾性波の減衰過程を実験と数値計算の両面から性能指数を算出し、フィードバックをかけながらキャビティ構造の最適化を図る。

最適化されたキャビティ構造の閉じ込め空間に、強磁性体薄膜微細構造を形成することで、マグノン・フォノンの結合強度を測定するための素子を作製する。素子の特性評価には、ベクトルネットワークアナライザやブリルアン光散乱測定を用いたマグノンとフォノンの分散関係の決定を行い、結合強度の評価を行う。

また、マグノン・フォノン結合を用いて、スピン流を効率的に生成するためには、上述したキャビティ構造の最適化に加え、励起するフォノンの周波数を強磁性体の共鳴周波数である GHz 帯域に合わせる必要がある。そのため、ナノメートルサイズの IDT を用意し、効率的なスピン流生成の検証実験を行う。生成されたスピン流は、非磁性体における逆スピンホール効果や、物質界面における逆エデルシュタイン効果を利用して電流へ変換し定量評価を行う。

さらに、最適化を行ったキャビティ構造を有する試料を、室温から数 K 程度の低温にすることで、コヒーレントなマグノン・フォノンの強結合状態の検証実験をめざす。

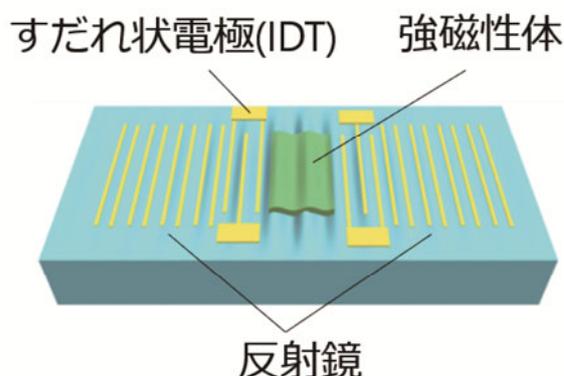


図 1 マグノンとフォノンを閉じ込める
キャビティ構造

【期待される成果と意義】

本研究では、キャビティ構造を用いることで、エネルギー損失を抑制し、マグノン・フォノン結合状態の最大化を行う。それにより、既存技術よりも高効率なスピン流の生成が期待される。

さらに、これらの試料を、低温測定システムに持ち込むことで、コヒーレントな強結合状態の実現や位相情報の転送・マグノン-フォノン準粒子の量子性を検証するための理想的なテストプラットフォームを提供する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- M. Xu, J. Puebla, F. Auvray, B. Rana, K. Kondou, and Y. Otani, Inverse Edelstein effect induced by magnon-phonon coupling, *Phys. Rev. B* **97**, 180301(R) (2018).
- Y. Otani, M. Shiraiishi, A. Oiwa, E. Saitoh, and S. Murakami, Spin conversion on the nanoscale, *Nat. Phys.* **13**, 829 (2017)

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和 5 年度
137,200 千円

【ホームページ等】

<http://www2.riken.jp/lab-www/nanomag/>