

【基盤研究(S)】 大区分D



研究課題名 非平衡過程の実空間観察手法の転換：TEM による溶液からの核生成過程の解明

北海道大学・低温科学研究所・准教授
きむら ゆうき
木村 勇気

研究課題番号： 20H05657 研究者番号：50449542

キーワード： 核生成、ナノ粒子、透過型電子顕微鏡、その場観察、結晶成長

【研究の背景・目的】

核生成は、原子や分子などが集合して粒子を形成するプロセスで、生成粒子のサイズや数密度、晶癖(形)、結晶構造などを決めるため、そのメカニズムの理解は物質形成において決定的に重要である。例えば、我々が取り扱うテーマだけでも、様々な工業利用における微粒子の合成、貝殻やサンゴなどの生体鉱物の制御機構、宇宙に存在するダストと呼ばれるナノ粒子の生成過程と物質進化、経口投与による薬が溶け残らないようにするための結晶多形制御、気候に関わる雲核の生成などが挙げられる。しかしながら、核生成の物理、化学過程の理解は未だに乏しく、そのために核生成理論も発展途上である。本研究では、「安定核の生成までに何が起きているのか?」、「安定核の生成ルートはどのように決まるのか?」を明らかにするために、溶液中の核生成に影響を与える要因の寄与の程度と物質依存性を解明し、核生成ルートを決めるキーファクターを見つけることを目的とする。

【研究の方法】

水溶液からの核生成の透過型電子顕微鏡“その場”観察実験を軸に、水和層の役割を理解するために、水和層の無いイオン液体溶液と気相からの核生成実験を対照実験として実施する。

水溶液からの核生成の透過型電子顕微鏡“その場”観察実験では、これまでに進めてきた溶液試料を観察できる3つの手法(窓板ホルダー(図1)、溶

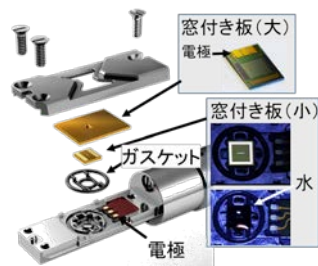


図1 透過型電子顕微鏡に水溶液を導入する3つの手法のうちの一つ。窓付き板2枚の間に溶液を封入する加熱機構付きの窓板ホルダー。中央の切欠き位置にある30nm厚の非晶質窒化シリコン膜が窓であり、電子線はこの窓を透過して溶液を観察できる。100°Cまでの加熱や観察中に2液を混合できる。

液セル、グラフェン膜)を駆使して、核生成のその場観察実験を行う。透過型電子顕微鏡観察では、結晶の成長速度、形、集合、配列、サイズなどを直接観察でき、加えて電子回折パターンで相同定も同時に行えるため、飛躍的な成果が見込める。ここに、本研究課題で機械学習を用いた新規の非平衡過程の動的観察手法を確立することで、透過型電子顕微鏡を用いた“その場”観察により、溶液から前駆体を経て結晶ができるまでの核生成過程の一部始終を可視化する。

【期待される成果と意義】

本課題では、単に個々の物質や形成条件における成果に留まらず、ナノ粒子の物性の決定や水和層の役割の理解(物質と水の界面エネルギーや界面構造の決定)、粘性の効果、ダイマーの形成といった核生成を支配するキーファクターを理解する点において革新的な基礎科学研究となる。これにより、核生成の理論モデルが構築可能となり、原子や分子から材料を作るボトムアップによるナノ粒子や結晶の生成過程をデザインできる世界の到来が期待される。超新星などで生成する宇宙に存在するナノ粒子の生成プロセスも正しく理解できたり、約半数が難溶性の結晶である薬を溶けやすくするために準安定相を析出させる条件を導出可能になったりと、分野を超えた波及効果が見込まれる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T. Yamazaki, Y. Kimura, P. G. Vekilov, E. Furukawa, M. Shirai, H. Matsumoto, A. E. S. Van Driessche, K. Tsukamoto, Two types of amorphous protein particles facilitate crystal nucleation, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114 (2017) 2154-2159.
- ・ Y. Kimura, K. K. Tanaka, T. Nozawa, S. Takeuchi, Y. Inatomi, Pure iron grains are rare in the universe, Science Advances, 3 (2017) e1601992.

【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 154,900千円

【ホームページ等】

<http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/ykimura/index.html>
ykimura@lowtem.hokudai.ac.jp

【基盤研究(S)】
大区分D



研究課題名 地球環境変動・資源生成の真に革新的な統合理論の創成

東京大学・大学院工学系研究科・教授
かとう やすひろ
加藤 泰浩

研究課題番号： 20H05658 研究者番号：40221882
キーワード： 海底鉱物資源、資源探査、グローバル物質循環

【研究の背景・目的】

資源研究のフィールドは、陸から海へと移行しつつある。しかし、海底資源研究は、依然として個別・断片的な成因解明に終始しており、地球システムと資源生成の統合的な描像を描けてはいない。海洋での資源生成およびそれとリンクする環境変動は、様々な元素・物質の全地球スケールでの循環の一側面とみなせる。「なぜ資源がそこにできたのか」という問いに対する答えは、マントルから火山・熱水活動を通じた海洋への元素のインプットと、海洋から海底への元素の沈殿・堆積とその後の海溝への沈み込みによるマントルへのアウトプットを含む「グローバル物質循環」を定量的に解明することで初めて得られる。我々はこれまでの研究により、海洋の70%を占める遠洋域で堆積する「遠洋性粘土」こそが、このグローバル物質循環を解明するキーマテリアルであることを見出した。

そこで本研究では、様々な海域で採取された遠洋性粘土に対して、新たに開発した「化学層序プローブ」を適用することにより、遠洋性粘土に記録された時系列情報をグローバルスケールでマッピングし、地球規模の物質循環のダイナミクスの全容を一気に解明することを目的とする(図1)。

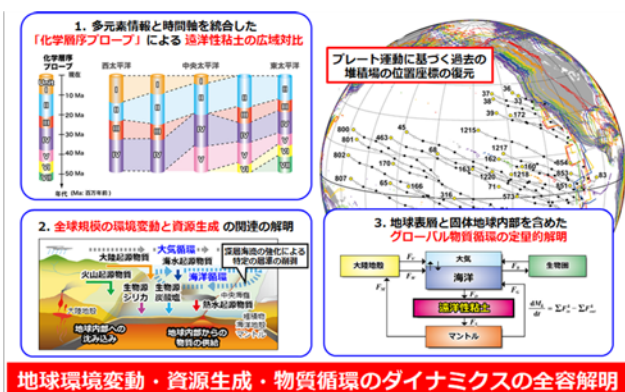


図1 本研究の手法と目的

【研究の方法】

本研究では、多元素情報と年代情報を統合した「化学層序プローブ」により、遠洋性粘土の広域対比・解析を行う。まず、国際深海科学掘削計画(IODP)コアを対象として高精度化学分析を実施し、遠洋性粘土の大規模・高次元地球化学データセットを構築する。次に、Os同位体比とイクチオリス層序を組み合わせることで、遠洋性粘土コアに高精度の時間軸を入れ

る。さらに、様々な海域の遠洋性粘土が持つ全元素情報を対象として、独立成分分析等を用いた高次元データ解析を実施する。これにより、遠洋性粘土の化学組成の時間変化とその原因、さらには堆積層の削剥の記録などを網羅的に把握することができる。

また、得られた遠洋性粘土の全元素情報とその時間変化を組み込んだグローバル物質循環モデルを構築し、大気-海洋系と固体地球の間の物質収支およびそのフラックス変動を定量的に把握する。その一環として有用元素の循環に着目することで、海洋における資源生成メカニズムの全体像を明らかにする。

【期待される成果と意義】

地球表層における様々な元素の収支とそれを支配する因子・プロセスを定量的に明らかにすることで、環境変動と資源生成(有用元素の濃集)の成因的関連の全容が初めて統合的に理解可能となる。これにより、有望な新資源の真に有効な探査指針が得られると期待される。さらに、本研究の対象である遠洋性粘土は、大気-海洋系と固体地球の最も重要なインターフェースでもある。本研究は、このインターフェースの精緻な描像を初めて取得することにより、グローバル物質循環という真に俯瞰的なスコープで、気候変動から火山・マントル活動を含む地球上の諸現象を統合的に説明する理論の創成を目指す。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Kato, Y. et al. "Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements." *Nature Geoscience* **4**, 535-539 (2011).
- Takaya, Y. et al. "The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements." *Scientific Reports* **8**, 5763 (2018).
- Ohta, J. et al. "Fish proliferation and rare-earth deposition by topographically induced upwelling at the late Eocene cooling event." *Scientific Reports* **10**, 9896 (2020).

【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 156,900千円

【ホームページ等】

http://egeol.geosys.t.u-tokyo.ac.jp/kato_ykato@sys.t.u-tokyo.ac.jp

【基盤研究(S)】 大区分D



研究課題名 原子スケール局所磁場直接観察手法の開発と磁性材料 界面研究への応用

東京大学・大学院工学系研究科・教授
しばた なおや
柴田 直哉

研究課題番号： 20H05659 研究者番号：10376501

キーワード： 走査型透過電子顕微鏡、電磁場、界面、磁性材料、鉄鋼材料

【研究の背景・目的】

本研究では、研究代表者らが世界で初めて開発に成功した原子分解能磁場フリー電子顕微鏡法をベースとして、磁性材料の局所構造（界面、粒界、表面、転位、点欠陥等）における原子・電子構造と局所電磁場分布の実空間同時観察を実現する新たな原子分解能電子顕微鏡手法を開発する。更に、この手法を磁石材料、スピンドバイス、鉄鋼材料、トポロジカル材料、セラミック材料などの局所界面構造解析に応用することで、原子レベルの局所構造と磁性との相互作用を本質的に明らかにすることを目指す。これにより、局所構造による機能発現メカニズムを本質的に解明し、これまでにない新しい磁性材料設計指針を構築することを目指す。更に、これまで電子顕微鏡による観察が不可能とされてきた原子磁気モーメント、界面磁気構造、電気分極などの直接観察を実現し、最先端計測から磁性材料研究の進展とデバイス応用を強力に牽引し、広く社会・産業界に貢献することを最終的な目的とする。

【研究の方法】

本研究では、研究代表者らが独自開発してきた原子分解能磁場フリー電子顕微鏡を、微分位相コントラスト(DPC) STEM法と高度に融合することにより、超高分解能電磁場定量観察手法の開発を行う。具体的には、多分割型検出器及びピクセル型検出器を用いた電子回折図形の重心定量検出による電磁場定量観察手法開発及び電場・磁場の切り分け手法開発を行うとともに、マルチスライス計算に基づく電磁場

観察理論計算手法を確立し、DPC STEM像から局所電場・磁場を定量的に評価するための基盤技術を確立する。更に、開発した手法を様々な磁性材料界面（希土類磁石、フェライト系磁石、電磁鋼板、スピンドバイス、磁気スキルミオン、酸化物ヘテロ界面等）に応用展開し、局所界面構造による磁性発現メカニズムを解明する。このような研究を通じて、高性能磁性材料開発のための新たな界面設計制御指針の構築を行う。

【期待される成果と意義】

磁性材料における機能特性発現メカニズムを本質的に解明するためには、材料内部の局所構造により誘起された局所電場・磁場構造の解明が不可欠である。これまでの電子顕微鏡による局所構造解析手法では、局所電磁場の原子スケール直接観察は世界的に未踏領域であった。そこで本研究では、原子レベルの局所構造とそれによって誘起された局所電場・磁場の両方の同時計測を可能にする新たな顕微鏡手法を世界に先駆けて開発する。特に、原子スケールの磁場観察は全くの未踏領域であり、顕微鏡学の新たなステージを切り開くことが期待される。更に、本研究では単なる装置・手法開発に留まることなく、一貫通貫に磁性材料界面研究に本開発手法を応用することで、粒界、異相界面、転位、表面等における局所原子構造とその磁性との相関性を本質的に解明し、幅広い磁性材料分野に多大な波及効果をもたらすことを目指す。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ N. Shibata, T. Seki *et al.*, “Atomic resolution electron microscopy in a magnetic field free environment,” *Nature Comm.*, **10**, 2380 (2019).
- ・ N. Shibata, T. Seki *et al.*, “Direct Visualization of Local Electromagnetic Field Structures by Scanning Transmission Electron Microscopy,” *Acc. Chem. Res.*, **50**, 1502-1512 (2017).

【研究期間と研究経費】

令和2年度－6年度 148,300千円

【ホームページ等】

<https://www.saaf.t.u-tokyo.ac.jp/>
shibata@sigma.t.u-tokyo.ac.jp

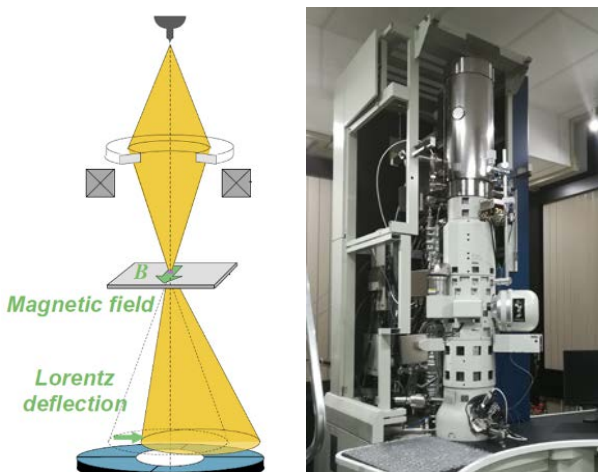


図1 DPC STEM法による磁場観察の模式図
と原子分解能磁場フリー電子顕微鏡

【基盤研究(S)】
大区分D



研究課題名 単一分子トランジスタのテラヘルツダイナミクスと量子情報処理技術への展開

東京大学・生産技術研究所・教授
ひらかわ かずひこ
平川 一彦

研究課題番号： 20H05660 研究者番号：10183097

キーワード： 単一分子トランジスタ、テラヘルツ電磁波、量子情報技術

【研究の背景・目的】

近年、単一分子は分子機能をエレクトロニクスに応用できるデバイスとして注目されるとともに、分子振動が量子力学的な機械振動子としての性質を持っており、新しい量子情報処理の媒体となる可能性が検討されている。このような原子スケールの微細なナノ構造中の量子準位や分子振動などの素励起のエネルギーは、おおよそテラヘルツ (THz) 電磁波の光子エネルギーに対応するため、THz 電磁波を用いることにより、ナノ量子構造の物理に関する非常に有用な情報が得られると期待されている。

最近、我々は原子スケールのギャップを有する電極を単一分子に形成し、それらを THz アンテナとして用いることにより、単一分子に THz 電磁波を集光し、単一分子内の励起に由来する極微弱な THz 信号が測定できるようになってきた。ちょうど今、THz 電磁波と極微ナノ構造の相互作用の研究は新しいフェーズに入ったと言えよう。このタイミングを逃さず、極微ナノ構造を舞台として起きる物理を掘り下げるとともに、それらを上手く量子情報処理技術などに応用できないかを検討すべきである。

上記のような背景の下、現在立ち上がりつつある原子スケールの「テラヘルツナノサイエンス」という新しい分野をさらに推進・深化させ、応用への展開可能性を探ることを本研究の目的とする。

【研究の方法】

1) 単一分子のテラヘルツ分光および分子振動と伝導電子の相互作用の解明：分子振動と伝導電子は強く結合しており (Franck-Condon 効果)、THz パルスで分子振動をコヒーレントに制御することにより、電子伝導に量子的な制御を行う基礎を確立するとともに、新しい量子情報処理技術への応用の可能性を探る。

2) 単一分子の核磁気共鳴 (NMR) の抵抗検出と量子情報処理への応用：単一水分子を内包している $\text{H}_2\text{O}@\text{C}_{60}$ 分子を代表例として、フラーレン中に内包された分子や原子の核磁気共鳴を、ナノギャップ電極を用いた抵抗検出で測定し、新しい量子情報を担う媒体としての可能性を探索する。

3) ナノギャップ電極間に生成される超強テラヘルツ電界と電子の相互作用：原子スケールのナノギャップ電極による電場増強効果により「nm 領域・GV/cm オーダーの交流電界」という今までに無い超強電界領域に入ることができ、その中で起きる新規な電子伝導現象を解明する。

4) ナノメカニカルな構造を用いた新規ナノ領域物性検出法の開発：MEMS/NEMS 技術を用いてナノ領域の伝導や THz 分光を高感度に行う新しい技術を開拓する。

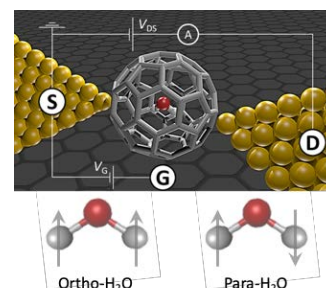


図1 単一分子トランジスタ構造の模式図と単一水分子を内包するフラーレン分子 ($\text{H}_2\text{O}@\text{C}_{60}$)

【期待される成果と意義】

nm オーダーの極微領域の物理と応用は、ちょうど急激に立ち上がろうというフェーズであり、本研究が新しい学問分野が立ち上がる大きな布石となるであろう。さらに、CMOS に代表されるシリコンテクノロジーは、その微細化が限界に近づきつつあり、CMOS を越える新しい素子原理を探索することが急務となっている。

本研究は、電極と分子の持つユニークな物性を合体して、量子情報処理機能など新しい機能を付加したナノデバイスを創出しようという大きな流れの学問的基礎を与えるものである。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ S. Du, K. Yoshida, Y. Zhang, I. Hamada, and K. Hirakawa: "Terahertz dynamics of electron-vibron coupling in single molecules with tunable electrostatic potential", *Nature Photonics*, vol.12, pp. 608-612 (2018).
- ・ K. Yoshida, K. Shibata, and K. Hirakawa: "Terahertz field enhancement and photon-assisted tunneling in single-molecule transistors", *Physical Review Letters*, vol. 115, pp. 138302-1~5 (2015).

【研究期間と研究経費】

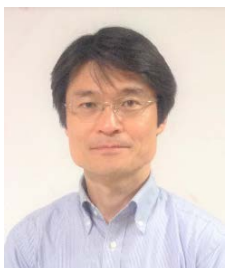
令和2年度-6年度 146,800千円

【ホームページ等】

<http://thz.iis.u-tokyo.ac.jp>
hirakawa@iis.u-tokyo.ac.jp

【基盤研究(S)】

大区分D



研究課題名 ダイヤモンド量子ストレージにおける万能量子メディア変換技術の研究

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

こさか ひでお

小坂 英男

研究課題番号： 20H05661 研究者番号：20361199

キーワード： 量子情報物理、スピントロニクス

【研究の背景・目的】

近年、超伝導量子ビットによる量子コンピュータの開発競争が世界的に本格化しているが、一方で物理的に安全性の保証された暗号通信を可能とする量子インターネットの開発も始まっている。さらに、DNA バンク、ビットコインなどの普及により絶対に漏洩の許されない個人情報への安全な保存に向けた量子ストレージの必要性も急速に高まっている。これらを組み合わせた量子コンピュータネットワークの構築により、分散処理により高速化された分散量子計算、秘匿な入出力が可能な秘匿量子計算、地球規模の重力場望遠鏡、精密地震予測などが可能となる(図1)。その実現には量子コンピュータの心臓部となる超伝導量子ビットとの整合性が高く、長時間量子状態を保持できる大規模な量子ストレージとその量子インターフェース開発が不可欠である。

本研究では、ダイヤモンド窒素空孔中心(NV)の周囲にクラウド状に分布する炭素同位体集団で構成される量子ストレージにおける万能な量子メディア変換技術の確立を目的とする。超伝導量子ビットとの整合性が高く、無磁場下で動作する1Mビット規模の量子ストレージの開発により、量子インターネットで接続された量子コンピュータネットワークによる分散型量子計算や秘匿量子計算などに道を拓き、高度情報化社会に飛躍的進化をもたらす。

【研究の方法】

これまでの研究で、NV近傍の表層炭素を無磁場下で動作する量子メモリーとし、幾何学的量子操作と量子テレポーテーション原理によって光子の量子状態を表層炭素に量子メディア変換する技術を開発した。これに対して本研究では、NV遠方の深層炭素集団を量子ストレージとし、幾何学的デカップリングによる深層炭素の個別量子もつれ生成、単一光子から単一深層炭素への選択的な量子メディア変換、任

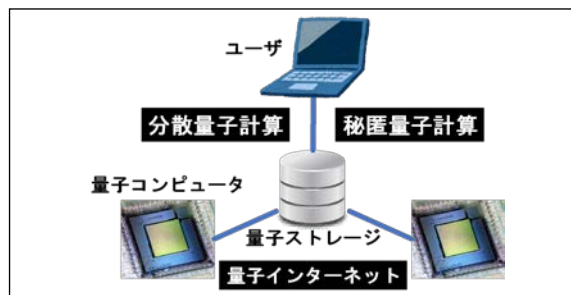


図1 量子ストレージによって量子接続された量子コンピュータネットワークの概念図。

意の深層炭素間の量子もつれ測定、量子符号化によるフォールトトレラント化、NVアンサンブルへの拡張による大規模量子ストレージ化を実現する。

NV中心には欠陥に捕獲された電子とこれに隣接した窒素があり、さらにその周辺に炭素同位体(^{13}C)が電子からの距離に応じて2種類が層状に分布する。これらを量子プロセッサー、量子バッファ、量子メモリー、量子ストレージとして利用し、さらにアンサンブルの利用で大規模化するのが本研究の特徴である(図2)。

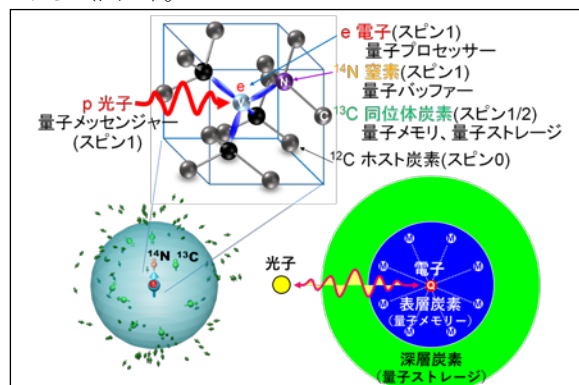


図2 ダイヤモンド中の一つの窒素空孔(NV)中心に付随する電子—表層炭素—深層炭素の階層構造。ハミルトニアン機械学習により、任意の量子操作を可能とする万能な量子メディア変換を行う。

【期待される成果と意義】

完全無磁場下で動作する量子ストレージは超伝導量子ビットとの整合性が高く、量子インターネットで接続された量子コンピュータネットワークによる分散型量子計算や秘匿量子計算などに道を拓く。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Kodai Nagata, Hideo Kosaka*, et.al., "Universal holonomic quantum gates over geometric spin qubits with polarised microwaves", Nature Communications, 9, 3227 (2018).
- ・ Kazuya Tsurumoto, Hideo Kosaka*, et.al., "Quantum teleportation-based state transfer of photon polarization into a carbon spin in diamond", Communications Physics (Nature publishing), 2, 74 (2019).

【研究期間と研究経費】

令和2年度—6年度 150,800千円

【ホームページ等】

<http://kosaka-lab.ynu.ac.jp/>

【基盤研究(S)】

大区分D



研究課題名 位相制御近接場によるハイブリッド極限時空間分光の開拓

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

たけだ じゅん

武田 淳

研究課題番号： 20H05662 研究者番号：60202165

キーワード： テラヘルツ、近接場分光、STM 発光、中赤外パルス

【研究の背景・目的】

極限的な時空間で電子状態や帯電状態を精密制御し、物質の構造や機能を実空間・実時間で自在に操作することは、ナノ科学、材料科学分野にとって最重要課題の1つである。高速化の観点においては、近年、近赤外光パルスのキャリアエンベロープ位相（光電場の位相）を変調することにより、アト秒領域での電子制御が達成された。しかしながら、この手法は、アト秒パルスによる操作や精密に造り込んだナノ構造体によって行われており、現実の多様な物質への適用は難しい。

一方、走査プローブ顕微鏡（SPM）は、物質の多様な現象や機能を高い空間分解能で明らかにする優れた分析ツールとして発展してきた。しかしながら、従来の SPM は時間分解能が低く、エネルギー変換過程などを決定している量子性は見過ごされている。

本研究では、研究代表者等が独自に開発した位相制御テラヘルツ走査トンネル顕微鏡（THz-STM）と STM 発光分光技術を巧みに組み合わせ、原子分解能とフェムト秒の時間分解能でトンネル電流及び発光を検出できる THz-STM 発光分光技術（THz-STL）を構築する。同時に、機能性分子・生体系分子の振動状態をも制御できる中赤外（MIR）近接場を用いた MIR-STM を開発する。そしてこれらを統合し、THz～MIR の周波数帯域において物質の多様な物性を極限の時空間で操作できる“ハイブリッド極限時空間分光技術”を開拓する（図1）。

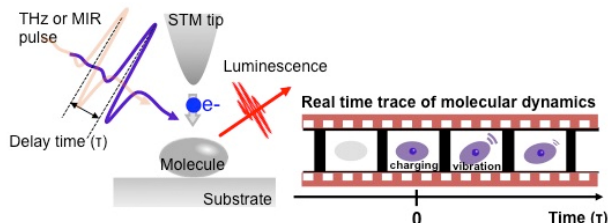


図1 ハイブリッド極限時空間分光の概念図

【研究の方法】

STM 発光分光とは、STM 探針から分子への電荷注入により励起状態を形成し、励起状態からの緩和により得られる微弱発光を検出する分光手法である。位相制御した THz パルスにより電荷注入を超高速に操作することで、超高速時間分解発光測定が可能となり、単一分子の励起状態ダイナミクスが追跡できる。THz 波は強誘電体プリズムと回折格子を用いた

パルス面傾斜法によって発生させ、代表者オリジナルの THz 位相シフタにより任意の位相を付与して THz 波形を制御する。一方、レーザーからの出力を中空光ファイバや非線形結晶を用いて広帯域化し、チャープミラーによりパルス圧縮して 10 フェムト秒程度の超短パルスを発生させる。それを薄い非線形結晶に入射し、差周波発生により位相安定な単一サイクル MIR の発生を行う。これらを統合しハイブリッド化した上で、単一分子の発光寿命計測、生体機能にとって重要な水素結合ネットワークの局所的構造ダイナミクスを追跡し制御する。

【期待される成果と意義】

本研究は、位相制御 THz-STM 発光分光技術を構築し、原子スケールかつフェムト秒の極限時空間で電子輸送及び光学特性を分析・制御できるツールを開発するものである。併せて、MIR 電場駆動の STM を開発し、単分子・単層膜の振動状態ダイナミクスをも追跡・制御できる分光技術に昇華させる。これらは世界に現存しないナノ科学・材料科学・生体科学全般に波及する究極のナノ計測技術となる。

また学術的には、物質科学分野の至上命題である“どこまで微細かつ高速に電子や分子振動を操作して物質の持つ諸物性を量子制御できるのか”の学術的問いへ挑戦するものである。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Minami, M. Kitajima, S. Yoshida, H. Shigekawa, and J. Takeda, "Real-space coherent manipulation of electrons in a single tunnel junction by single-cycle terahertz electric fields", *Nature Photon.* **10**, pp. 762-765 (2016).
- ・ K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Arashida, A. Ban, Y. Kawada, K. Konishi, H. Takahashi, and J. Takeda, "Tailoring single-cycle near-field in a tunnel junction with carrier-envelope phase-controlled terahertz electric fields", *Nano Lett.* **18**, pp. 5198-5204 (2018).
- ・ H. Mashiko, Y. Chisuga, K. Oguri, H. Masuda, I. Katayama, J. Takeda and H. Gotoh, "Multi-petahertz electron interference in Cr:Al₂O₃ solid-state material", *Nature Commun.* **9**, 1468 (2018).

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 146,600千円

【ホームページ等】

<http://www.ultrafast.ynu.ac.jp/jun@ynu.ac.jp>



研究課題名 超濃厚電解液の解析・設計構築とその革新的電析技術への応用

京都大学・大学院工学研究科・教授

むらせ くにあき

呂瀬 邦明

研究課題番号： 20H05663 研究者番号：30283633

キーワード： 電析、濃厚電解液、溶液化学、金属錯体、金属組織

【研究の背景・目的】

電解液中の金属イオン種を電気化学的に還元して金属や化合物を得る「電析」は、ものづくりの様々な場面に貢献する要素技術である。研究代表者らは、非常に濃い電解質濃度をもつ電解液を活用する新しい電析技術を提案し、環境調和型3価クロムめっき、新しい電池に向けたアルミニウム析出、太陽電池向けのCu₂O酸化半導体製膜などで成果を挙げてきた。

超濃厚電解液は、自由な状態の溶媒分子が少ない環境にあり、こういった特殊な環境でのみ安定に生成する金属錯体種が電析挙動や電析物の特性を支配していると考えられるが、詳細が解明されないまま現象論が先行しているのが現状である。

本研究では、金属錯体種の溶液化学的解析や、電析した金属・合金・化合物の組織学的解析や物性解析を通し、電析プロセス全体(図1)を横断的に理解するための基礎知見を得る。電解液中の化学種の平衡関係や、化学種と電析物の相関関係を解明し、実用面で完成度の高い電析物を得るための浴設計に活用するなど、超濃厚電解液のメリットを活かした電析の高度化のために結果を役立てる。

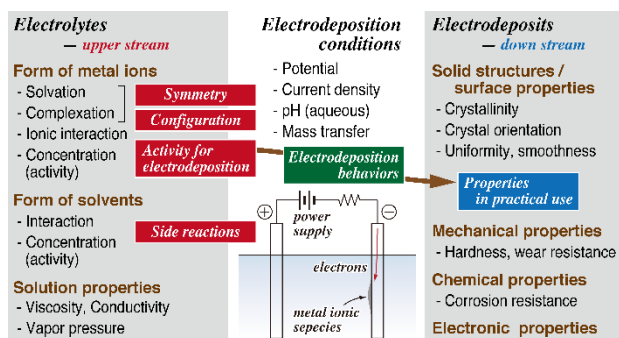


図1 電解液、電析条件、電析物の相関を決める因子

【研究の方法】

研究は、① 水和物融体を用いる環境調和型電析、② グライム系DES(深共晶溶媒)を用いるAl電析、③ 濃厚 α -ヒドロキシ酸水溶液を用いるCu₂O薄膜電析を軸に、溶液化学を専門とする梅林泰宏教授(新潟大学)、ならびに電析金属の組織解析を専門とする中野博昭教授(九州大学)と共同で進める。

溶液中の金属イオン種や溶媒化学種の解析には、振動分光(Raman, FT-IR)、紫外-可視-近赤外分光、核磁気共鳴、質量分析を用いる。スペクトルの多変量解析に加え、分子軌道計算や分子動力学シミュレーションなど、計算化学的手法も併用し、配位環境

や平衡関係を解明する。電析物の組織や形態解析には各種電子顕微鏡法(SEM, TEM, EBSD)を駆使し、同時に皮膜の各種物性も明らかにする。

【期待される成果と意義】

超濃厚溶液は、広く研究されてきた一般的な電解質水溶液ともイオン液体とも異なる新しい溶液系とみなすことができる。電解液、電析条件、電析物のつながりを解明することで、金属析出に適した配位子設計(図2)や、所望する物性をもつ皮膜電析のための浴設計などが可能となる。得られる学理は、次世代の電気めっきや電池といった、社会へ還元できる創造性もち、材料工学の学術の発展に広く貢献する。

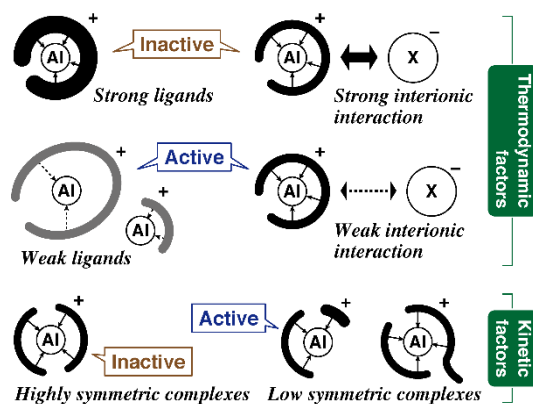


図2 Al電析で想定されるAl錯体と電析性の相関

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Adachi, A. Kitada, K. Fukami, K. Murase, Crystalline Chromium Electroplating with High Current Efficiency Using Chloride Hydrate Melt-based Trivalent Chromium Baths, *Electrochim. Acta*, **338**, 135873/1-8 (2020).
- ・ A. Kitada, K. Nakamura, K. Fukami, K. Murase, Electrochemically Active Species in Aluminum Electrodeposition Baths of AlCl₃/Glyme Solutions, *Electrochim. Acta*, **211**, 561-567 (2016).

【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 153,000千円

【ホームページ等】

<http://www.echem.mtl.kyoto-u.ac.jp>

【基盤研究(S)】

大区分D



研究課題名 原子層人工ヘテロ構造におけるバレースピ量子光学の開拓と応用

京都大学・エネルギー理工学研究所・教授

まつだ かずなり

松田 一成

研究課題番号： 20H05664 研究者番号：40311435

キーワード： 原子層物質、量子光学、フォトニクス

【研究の背景・目的】

本研究では、原子層物質科学と量子光学の接点において、光量子情報デバイスに繋がる新たな学術領域である「バレースピ量子光学」を創出することを目指す。近年、急速に研究が進展した単層遷移金属ダイカルコゲナイド (MX_2 ; $M=Mo, W, X=S, Se, Te$) などの新たな原子層物質では、クラマース縮重の破れに起因して、運動量空間でのバレーと電子のスピが結合したバレースピという新たな物理自由度が生じる。これまでの我々の研究によって、バレースピの応用技術であるバレートロンクスにおいて重要な、バレースピ緩和の詳細な物理メカニズム解明とバレースピの外部制御に成功している。これら一連の研究の進展により、バレースピという物理自由度を一つの量子状態として見做して制御する新たな道筋を見出し、その量子状態制御を基礎とした「バレースピ量子光学」という新しい研究への視野が拓けた。

そこで本研究では、これを契機として究極の量子ドットを原子層ヘテロ構造で実現し、光科学・物質科学の接点にある従来の量子光学の枠組みを超えた「バレースピ量子光学」の学理を構築する。更に、それを応用へと橋渡しした「バレースピ量子フォトニクス」という新しい研究へと昇華させることを目的としている。

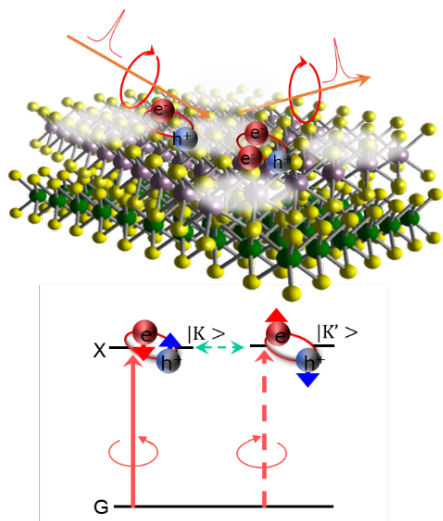


図1 原子層人工ヘテロ構造とそのバレースピ量子システム

【研究の方法】

わずか原子数層からなる原子層物質を積み重ねたヘテロ構造において、モアレなどの新しい形での量子閉じ込めポテンシャルを導入することで、真のゼロ次元（量子二準位系）半導体量子ドットを実現することがわかりつつある。そこで、本研究で提案するバレースピ量子光学の実現に向け、必要とされる要素技術の研究を進める。具体的なアプローチとして、1) 原子層人工ヘテロ量子ドットおよびデバイス作製技術の確立、2) 原子層ヘテロ量子ドットの量子光学現象の開拓、3) バレースピ量子光学に向けた原子層量子ドットの量子制御、4) バレースピ制御を利用した量子情報処理デバイスへの応用、などである。

【期待される成果と意義】

本研究を通してバレースピ自由度のコヒーレンスを長時間維持し、自在な量子制御が可能となれば、量子制御の際の外部との情報インターフェースを有し、また、量子ビット間の相互作用を自在に制御することが可能な、他にはない新しい量子システムを実現しうる。これは、量子演算・暗号通信などの量子デバイス（量子ビット・単一光子源）としての応用への新たな道が拓かれることを意味する。これらバレースピ量子光学を機軸とした研究を通して、学術・応用両面においても新たな研究展開が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Miyauchi, S. Konabe, F. Wang, W. Zhang, A. Hwang, Y. Hasegawa, L. Zhou, S. Mouri, M. Toh, G. Eda, and K. Matsuda: Evidence for line width and carrier screening effects on excitonic valley relaxation in 2D semiconductors, Nat. Commun. **9**, (2018) 2598.
- K. Shinokita, X. Wang, Y. Miyauchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, and K. Matsuda: Continuous control and enhancement of excitonic valley polarization in monolayer WSe₂ by electrostatic doping, Adv. Func. Mater. **29**, (2019) 1900260.

【研究期間と研究経費】

令和2年度－6年度 151,000千円

【ホームページ等】

<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/conv/matsuda@iae.kyoto-u.jp>

【基盤研究(S)】
大区分D



研究課題名 フェリ磁性スピントロニクス of 学理構築とデバイス展開

京都大学・化学研究所・教授

おの てるお
小野 輝男

研究課題番号： 20H05665 研究者番号：90296749

キーワード： スピントロニクス

【研究の背景・目的】

スピンと電荷の2つの自由度を利用するスピントロニクスは、巨大磁気抵抗効果がハードディスクの読み取りヘッドに利用され、トンネル磁気抵抗効果を利用した不揮発性磁気メモリが開発されるなど、基礎現象の発見がイノベーションに直結する魅力的な研究分野である。

これまでスピントロニクスは強磁性体の磁化を制御することで発展してきたが、強磁性体の2つの特徴である漏れ磁場とギガヘルツ程度の共鳴周波数がスピントロニクスのさらなる発展の障害となっている。漏れ磁場による相互作用は磁気メモリ等の高密度化の障害となり、ギガヘルツの共鳴周波数のためにデバイス動作速度はナノ秒程度に限定されてしまう。このボトルネックを解決するために、漏れ磁場がなく共鳴周波数がテラヘルツ領域にある反強磁性体が注目されている。しかし、反強磁性体は磁場への応答が極めて小さく、研究手段と応用が限定されてしまう。

フェリ磁性体は、2種類の磁気モーメントが反強磁性的に結合しながらも正味の磁化を有する物質である。磁化の大きさは組成や温度で調整可能で、2種類の磁気モーメントが完全に打ち消し合い反強磁性体のように磁化がゼロとなる状況も実現可能である。

研究代表者は、フェリ磁性 GdFeCo 合金が「磁化を持つ反強磁性体として振る舞う」ことを最近見いだした。本研究では、フェリ磁性体の「磁化を持つ反強磁性体」としての振る舞いの普遍性と多様性を明らかにすることで、「フェリ磁性スピントロニクス」という新しい学理を構築し、デバイス応用へ展開することを目的とする。

【研究の方法】

本研究課題の核心をなす学術的「問い」は、フェリ磁性体の新しい側面「磁化を持つ反強磁性体としての振る舞い」は「普遍的なものか?」、そして「革新的デバイス応用へつながるか?」である。

上述の学術的「問い」に答えるために、本研究では、(1)フェリ磁性体の磁化を持つ反強磁性体としての振る舞いの普遍性と多様性を明らかにするとともに、(1)その特徴を活かしたデバイス応用への展開を図ることで、フェリ磁性スピントロニクスの基盤を構築する。具体的には、以下の研究実施項目を設定し遂行する。

(1)フェリ磁性体の磁化を持つ反強磁性体として振る舞いの普遍性と多様性の解明

- (1-1) 角運動量補償温度での磁壁移動速度増大の確認
- (1-2) 角運動量補償温度、磁化補償温度、キュリー温度の関係の普遍性
- (1-3) フェリ磁性体のスピندانピング
- (1-4) 組成変調によるジャロシンスキー守谷相互作用誘起
- (2) 磁化を持つ反強磁性体の特徴を活かしたデバイス応用への展開
 - (2-1) スキルミオンデバイスへの展開
 - (2-2) テラヘルツスピントロニクスへの展開
 - (2-3) 反強磁性スピン波の偏光制御とスピン波磁壁移動

【期待される成果と意義】

フェリ磁性体特有のスピンドYNAMICS (強磁性体のように磁場で誘起できるが、その周波数は反強磁性体と同様のテラヘルツ領域) の普遍性と多様性が明らかとなる。さらに、その特徴を活かしたフェリ磁性スピントロニクスデバイスの基盤技術が構築される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Takaya Okuno et al., “Spin-transfer torques for domain wall motion in antiferromagnetically coupled ferrimagnets”, Nature Electronics 2, 389 (2019).
- ・ Duck-Ho Kim et al., “Bulk Dzyaloshinskii–Moriya interaction in amorphous ferrimagnetic alloys”, Nature Materials 18, 685 (2019).
- ・ Yuushou Hirata et al., “Vanishing skyrmion Hall effect at the angular momentum compensation temperature of a ferrimagnet”, Nature Nanotechnology 14, 232 (2019).
- ・ K.-J. Kim et al., “Fast Domain Wall Motion in the Vicinity of the Angular Momentum Compensation Temperature of Ferrimagnets”, Nature Materials 16, 1187 (2017).

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 153,200千円

【ホームページ等】

<https://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~onoweb/>

【基盤研究(S)】
大区分D



研究課題名 情報熱力学的スピントロニクス of 創成

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
すずき よししげ
鈴木 義茂

研究課題番号： 20H05666 研究者番号：50344437
キーワード： 磁気スキルミオン、情報熱力学、スピントロニクス

【研究の背景・目的】

これまで、「スピン流」の生成と制御・変換に注力してきたスピントロニクス分野に「情報流(正確には移動エントロピーと呼ばれる)」の概念を導入し、スピントロニクスで扱う電子スピン系(主に強磁性体)における情報熱力学の学理を構築するとともに、より省エネルギーで知的な情報デバイス・システムを構築する基礎を確立する(図1参照)。

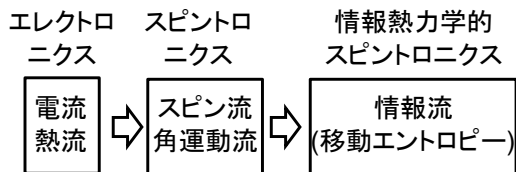


図1 スピン流から情報流(移動エントロピー)を扱うスピントロニクスへのパラダイムシフト。

【研究の方法】

具体的には磁気スキルミオンの熱運動(図2参照)を利用した情報熱機関を実現し、情報熱力学的に見たスピントロニクス素子の性能を明確化するとともに情報熱機関に必要な低消費エネルギーで高感度なセンシング技術を追求する。さらに、これらの応用として超低消費エネルギースピントロニクス計算機の動作を実証する。(図3参照)

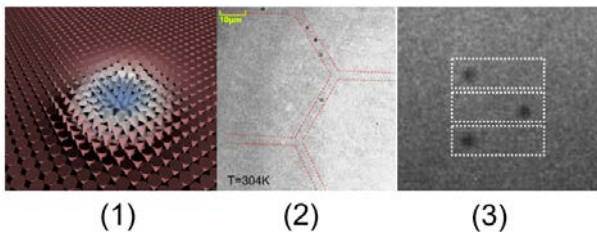


図2 (1) 磁気スキルミオンの磁気構造の模式図。小さな円錐形の頂点は薄膜中の磁化の向き(N極の向き)を示している。(2)局所的なポテンシャル制御を用いて作ったスキルミオンチャネル。スキルミオンはトラップされることなくスムーズに三叉路をブラウン運動により通り抜ける。(3)長方形の井戸に入ったスキルミオン間の相互作用。スキルミオンは等価なエネルギー状態間を熱的に振動する。

【期待される成果と意義】

スピントロニクスの学理と技術を拡張・発展させることによって生物系が行っているのと同程度のエネルギー効率をもち、かつ、ヒトの脳と同程度の情報処理を行うことができるIT機器を実現することが原理的に可能であるかとの「問い」に答えることが本研究の成果となる。

本研究では単に情報熱力学をスピントロニクスに適用するのではなく、情報熱力学を指導原理として、熱力学的限界に迫る素子とシステムを作り出す点に工学的な意義がある。

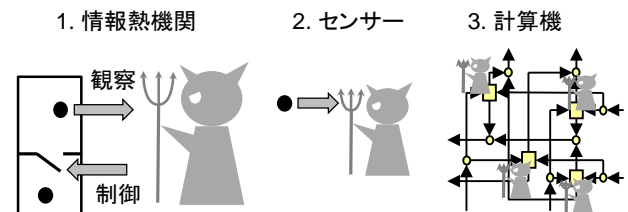


図3 情報熱力学的スピントロニクスの3つの研究開発要素。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] “Skyrmion Brownian circuit implemented in continuous ferromagnetic thin film”, Yuma Jibiki, Minori Goto, Eiiti Tamura, Jaehun Cho, Soma Miki, Ryo Ishikawa, Hikaru Nomura, Titiksha Srivastava, Willy Lim, Stephane Auffret, Claire Baraduc, Helene Bea, and Yoshishige Suzuki, Applied Physics Letters, 117, 082402 (2020).
- [2] “Theory of Skyrmionic Diffusion: Hidden Diffusion Coefficients and Breathing Diffusion”, E. Tamura, Y. Suzuki, arXiv : 1907.06926.

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 147,400千円

【ホームページ等】

<http://suzukilab.jp.org/>

【基盤研究(S)】
大区分D



研究課題名 ポジトロン断層法の物理限界を克服する全ガンマ線イメージング法の開発

量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所・グループリーダー

やまや たいが
山谷 泰賀

研究課題番号： 20H05667 研究者番号：40392245

キーワード： ポジトロン断層法、PET、コンプトンカメラ、SPECT、核医学、シンチレータ

【研究の背景・目的】

微弱な放射性核種で目印した検査薬を投与して行うポジトロン断層法 (PET) は、糖代謝をはじめ機能画像診断法のゴールドスタンダードとなっているが (図 1)、実はごく一部の放射線だけしか活用できていない。そこで本研究では、計測可能なすべての放射線を診断に使う「全ガンマ線イメージング」へのパラダイムシフトを目指す。具体的には、独自法 whole gamma imaging (WGI) を具現化し、多発性骨髄腫への応用について研究する。

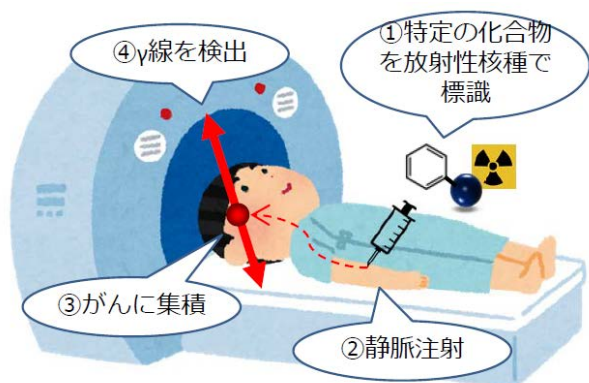


図 1 ポジトロン断層法 (PET) の概要

【研究の方法】

PET に「コンプトンカメラ」機能を追加するのが WGI の基本コンセプトである。具体的には、PET 検出器リングの内側に別の検出器リングを挿入し、内側の検出器リングで散乱 (コンプトン散乱) し、外側の検出器リングで止まったγ線を計測する。散乱時に失ったγ線エネルギー情報から逆算して、円錐の表面上に検査薬の位置を特定することができる。これにより、従来 PET の放射線検出 (511 keV 放射線ペアの同時計数) と同時に、他のあらゆるγ線も検出できるようになる。本研究のポイントは以下の通り (図 2)。

- ・ 核種：従来の ^{18}F から、909 keV γ線も出す新しい PET 核種 ^{89}Zr ヘシフト。
- ・ 撮像原理：同時計数+コンプトンのハイブリッドイメージング法の開発
- ・ 診断原理：従来の糖代謝から、がん特異性に優れた抗原抗体反応に変革。 ^{89}Zr の約 3 日間の長い半減期が抗原抗体反応の時間スケールに合致。

コンプトンカメラは PET の物理限界の制約を受けないため、理屈上は PET を超える解像度が実現可能であるが、まだ誰もそれを実証できていない。

【期待される成果と意義】

1. PET を超える解像度の 909 keV γ線コンプトンカメラ画像化技術の確立。そのためには、エネルギー分解能に優れた新しいシンチレータ (放射線を感じる蛍光体) の開発が必要であり、材料科学研究の進展に寄与。
2. PET データとコンプトンデータを融合した新し画像再構成手法の開発。医用画像工学研究の進展に寄与。
3. 多発性骨髄腫の早期診断法の開発を医学出口とし、WGI 試作装置によるモデル動物撮像により、提案手法を実証する。

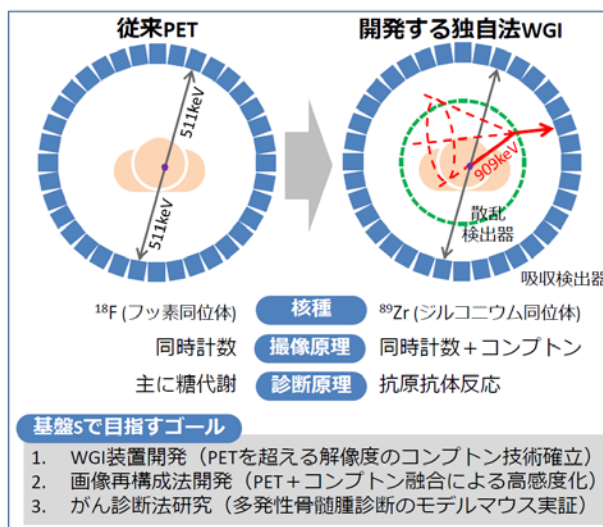


図 2 提案する whole gamma imaging (WGI)法の概要

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T. Yamaya, E. Yoshida, H. Tashima, et al., "Whole gamma imaging (WGI) concept: simulation study of triple-gamma imaging," J. Nucl. Med., vol. 58, no. supplement 1, 152, 2017.
- ・ E. Yoshida, H. Tashima, K. Nagatsu, et al., "Whole gamma imaging: a new concept of PET combined with Compton imaging," Phys. Med. Biol., 65, 125013, 2020.

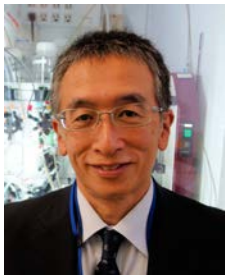
【研究期間と研究経費】

令和2年度ー6年度 151,900千円

【ホームページ等】

nirs.qst.go.jp/usr/medical-imaging/ja/study/main.html
yamaya.taiga@qst.go.jp

【基盤研究(S)】
大区分D



研究課題名 完全構造カーボンナノチューブの創製と応用

産業技術総合研究所・材料・化学領域・招聘研究員
かたうら ひろみち
片浦 弘道

研究課題番号： 20H05668 研究者番号：30194757

キーワード： カーボンナノチューブ、構造分離、欠陥修復

【研究の背景・目的】

カーボンナノチューブ (CNT) は、1991 年に多層 CNT が、1993 年には単層 CNT がいずれも日本で発見された。特に単層 CNT は、炭素のみの一原子層からできた直径 1 ナノメートル程度の筒状物質であり、優れた物理的・電気的特性が理論的に予測され、電子デバイスをはじめ様々な分野での応用が期待されている。これを実現するため、多様な構造の混合物として合成される CNT を、精密に構造分離する研究が進められ、現在我々は、20 種類以上の半導体型 CNT を自動で精密分離する事が可能になっている。大量 CNT 合成法と組み合わせることで、構造が制御された単層 CNT を容易に得ることが可能となったが、まだ実用化に至る十分な性能が得られていない。その原因の一つが「欠陥」であることが近年明らかになった。単層 CNT は、炭素原子が共有結合で結びついたネットワーク (網目) で構成されており、すべての原子が表面に位置する構造を持つ。このネットワークを完璧に構築するのは容易でなく、現在得られる単層 CNT には多数の欠陥が含まれている。本研究課題では、「欠陥」を含まない CNT を創出し、CNT 本来の優れた物性を引き出す事を目的とする。

【研究の方法】

本研究では、カラムに注ぐだけで低欠陥の CNT を分離できる新技術を活用する (図 1 参照)。



図 1 低欠陥 CNT 分離と構造分離

この技術により、低欠陥の CNT を分取する事が可能になるとともに、原料 CNT の欠陥密度分布を定量的に調べる事が可能である。原料 CNT に対して熱的・化学的な処理を行う事で、欠陥修復がどの程度進化したか精密に調べる事が可能になる。この高感度欠陥検出手法を利用し、これまでは困難であった CNT の欠陥修復に挑戦する。さらにその中から低欠陥のものを選別することにより、完全な構造を持った CNT の実現を目指す。

【期待される成果と意義】

これまで得られた CNT の研究成果は実は欠陥を多く含む CNT に対してのものであった。欠陥を解消する事により、CNT 本来の驚くべき物性を引き出す事が可能になると考えられ、電子デバイスをはじめとした急速な応用展開が期待される。特に、生体透過性が高い近赤外域の高発光効率蛍光材料として、生体造影による病理研究などの応用も期待できる。

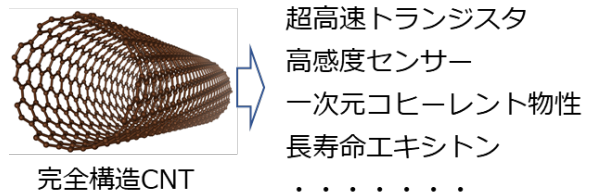


図 2 完全構造 CNT による研究・応用展開

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Y. Yomogida *et al.* “Industrial-scale separation of high-purity single-chirality single-wall carbon nanotubes for biological imaging”, *Nat. Commun.* **7**, 12056 (2016).
- ・ X. Wei *et al.* “Experimental determination of excitonic band structures of single-walled carbon nanotubes using circular dichroism spectra”, *Nat. Commun.* **7**, 12899 (2016).
- ・ H. Liu *et al.* “Large-scale single-chirality separation of single-wall carbon nanotubes by simple gel chromatography”, *Nat. Commun.* **2**, 309 (2011).

【研究期間と研究経費】

令和 2 年度～6 年度 151,300 千円

【ホームページ等】

<https://staff.aist.go.jp/h-kataura/Kiban-S-2020.html>
h-kataura@aist.go.jp

【基盤研究(S)】
大区分D

研究課題名 ニューロフォトニクス創成による脳機能の創発原理の探究



自然科学研究機構・生命創成探究センター・教授

ねもと ともみ
根本 知己

研究課題番号: 20H05669 研究者番号: 50291084

キーワード: バイオイメージング、脳神経科学、高機能レーザー

【研究の背景・目的】

「我々の精神活動がどのような神経細胞集団的な活動により実現されているか」を理解したいという問いは、多くの人々を魅了して止まない。即ち、脳の機能の創発原理・作動原理の理解のためには、生きたままの状態 (*in vivo*) で、局所的な神経回路機能とその実体である神経活動の細胞間の伝搬や同期状態を明らかにすることが重要となる。しかし分子・細胞レベルにおいては神経シナプスにおける情報伝達は確率的に生じる一方で、局所神経回路の機能にはネットワーク的な同期性をもった集団活動が不可欠であるとも考えられている。この乖離を越えて真に脳の機能の創発原理・作動原理を理解するためには、神経細胞集団の活動を直接的に可視化し、伝達過程をありのままに定量的に解析することが不可欠である。

【研究の方法】

研究代表者が世界的に牽引し、生体脳・神経系の機能計測に使用している *in vivo* 2光子励起顕微鏡を基盤とし、さらに、波長可変な高出力小型レーザー光源や、補償光学、第2次高調波発生などの光学技術を活用し、生体組織深部で非侵襲的な生体分子の検出や細胞の微細形態の観察を実現する世界初の高速度超解像光イメージングを実現する。

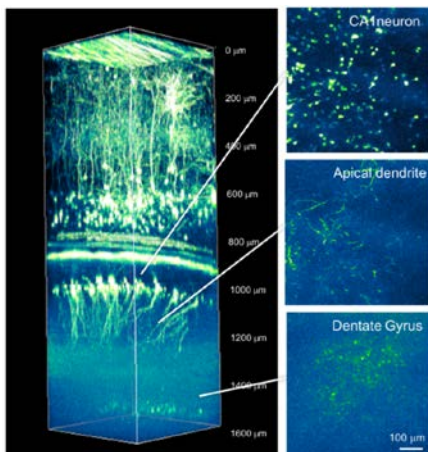


図1 マウス生体脳 *in vivo* 可視化

この革新的な顕微鏡を用いて、マウス生体脳の深部において「ありのまま」の状態での、同期的な神経細胞の集団活動や神経伝達物質の開口放出を高精度で可視解析する。さらに、3次元的な神経細胞の微細形態の変化や開口放出の動態をリアルタイムで追跡し、神経細胞・グリア細胞の相互作用による情報伝達機構や脳機能の創発原理の理解へとつなげていく。

【期待される成果と意義】

研究開発する斬新な顕微鏡法により得られる多元

的な神経細胞の応答や同期的な集団活動の変化の解析から、脳内の情報伝達の本質を理解していく。特に、生きた臓器深部での生体分子動態の超解像イメージングが可能とし、神経伝達の本質—シナプス前終末での開口放出関連分子の集積や神経伝達物質自体の放出の検出、シナプス後部での応答を、生きた脳内の神経回路を損なうことなく可視化し解析することが実現できる。加えて、光活性化や薬剤の局所投与を併用することにより精神疾患や糖尿病等の分泌疾患解明、治療にむけた方途を開拓する。

以上のように、本研究課題の推進する新規「ニュー

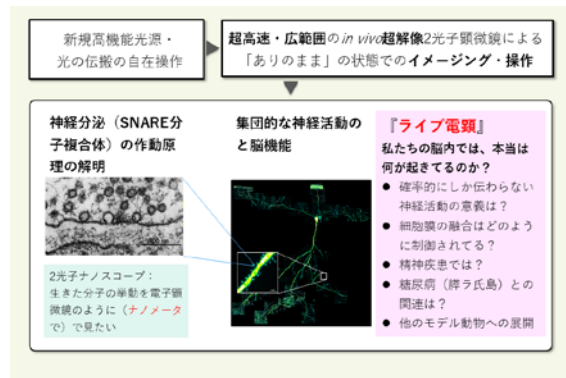


図2 ニューロフォトニクスの目指す内容

「ニューロフォトニクス」は、生体深部イメージングの高度化により、光による生理機能の制御や光細胞治療などのライフサイエンスのイノベーションに資するものである。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ M. Inoue, *et al.*, “Rational engineering of XCaMPs, a multicolor GECI suite for *in vivo* imaging of complex brain circuit dynamics”, *Cell*, **177**:1346-1360.e24 (2019)
- ・ K. Yamaguchi, *et al.*, “*In vivo* two-photon microscopic observation and ablation in deeper brain regions realized by modifications of excitation beam diameter and immersion liquid”, *PLoS ONE*, (2020)

【研究期間と研究経費】

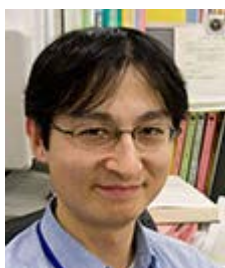
令和2年度—6年度 153,800千円

【ホームページ等】

<https://www.nips.ac.jp/bp/>

【基盤研究(S)】

大区分D



研究課題名 極限単一アト秒パルス分光法で拓くペタヘルツスケール光物性

NTT物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主幹研究員

おぐり かつや
小栗 克弥

研究課題番号： 20H05670 研究者番号：10374068

キーワード： ペタヘルツエレクトロニクス、アト秒科学、光波駆動現象、層状二次元結晶

【研究の背景・目的】

21世紀初頭に発明されたアト秒光源技術、光格子時計技術、そして光位相安定化技術という3つの革新的光技術は、光を、時間領域において 10^{-18} 秒スケールで計測すると共に、周波数領域において 10^{-18} 精度で制御可能な振動電界として取り扱うことを可能にした。光は、もはやエネルギーの塊ではなく、1ペタヘルツ(PHz: 10^{15} Hz)に迫る極めて高い周波数を有し、精密にエン지니어リングが可能な電磁波、すなわち“ペタヘルツ(PHz)波”として再定義できる。この光のパラダイム転換を積極的に活用し、従来の光技術・光科学において、あまりに高い振動数のため無視されてきた光の“電界振動”と固体電子系の“応答”に着目して、新しい物性現象と光-電子機能を創出することが本研究の狙いである。

そのために、本研究では、PHz波の1周期に相当する $100\text{ as} \sim 10\text{ fs}$ 程度の時間スケール(PHzスケール)において、分極、スピン、パレーといった固体電子系の基本自由度が光波電界と相互作用することに由来するアト秒領域における非平衡電子系のコヒーレント応答とその最初期緩和ダイナミクスを明らかにする。その方法論を実験・理論の両面から開拓し、“PHzスケール光物性”という新しい学問領域を切り拓くことを目指す。

【研究の方法】

本研究では、(i)極限単一アト秒分光プラットフォームの開発と物性計測、(ii)高品質二次元結晶など材料作製・評価・プロセス、(iii)第一原理計算・実時間量子シミュレーション、の3要素技術を組み合わせることにより、特異なバンド構造、スピン物性、バンドトポロジーが発現する半導体・磁性体・トポロジカル

絶縁体における光波電界-固体電子系相互作用ダイナミクスを明らかにし、PHzスケールの固体物性を開拓する(図1)。そのために、我々がこれまで開発してきたアト秒時間分解吸収分光・反射分光・角度分解光電子分光(ARPES)技術をベースに、MHz級高繰返し化、高計測感度化、波数空間マッピング、スピン計測といったこれまでにない独自のアト秒時間分解分光技術を開発する。新規分光技術の開発と並行して、グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイトからトポロジカル絶縁体まで広くカバーする二次元結晶・異種材料ヘテロ構造作製の高品質化・大面積化を追求し、材料の多様性に由来する新奇PHzスケール物性を探索する。そして、固体からの高次高調波発生過程など実験を良く再現する結果が得られている時間依存密度行列法(TD-DM)法のスピン自由度記述への拡張など、光波電界-固体電子系相互作用における第一原理計算・実時間量子シミュレーション技法を発展させる。以上のように、計測、材料、理論の3方向からアプローチし、PHzスケール光物性の枠組みを創出する。

【期待される成果と意義】

本研究により、従来の固体光物性で仮定されている包絡線近似や回転波近似といった光波の振幅のみを取り扱う近似の枠組みを超え、振動電界を直接取り扱う、すなわち、振幅と位相の両方を制御ノブとするPHzスケール光物性の学理を、多様な物質群において構築する。これにより、PHz波の極限高速電子操作に基づく新しい光機能の基本原理へと展開し、既存デバイスの応答限界を超えた抜本的高速化へのブレークスルーに繋げる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Oguri, H. Mashiko, T. Ogawa, Y. Hanada, H. Nakano, and H. Gotoh, “Sub-50-as isolated extreme ultraviolet continua generated by 1.6-cycle near-infrared pulse combined with double optical gating scheme,” Appl. Phys. Lett. 112, 181105 (2018).
- ・ H. Mashiko, K. Oguri, T. Yamaguchi, A. Suda, and H. Gotoh “Petahertz optical drive with wide-bandgap semiconductor,” Nature Physics 12, 741 (2016).

【研究期間と研究経費】

令和2年度-6年度 154,900千円

【ホームページ等】

http://www.brl.ntt.co.jp/J/group_010/group_010.html

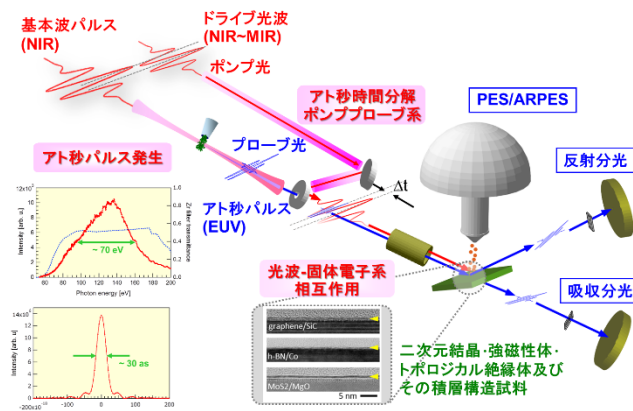


図1 極限単一アト秒分光プラットフォーム