

【基盤研究(S)】

理工系 (総合理工)



研究課題名 核生成

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：15H05731 研究者番号：50449542

研究分野：ナノ領域科学

キーワード：ナノ、透過電子顕微鏡、結晶成長、その場観察、水和層

【研究の背景・目的】

“核生成”は原子や分子が集合して粒子を形成する過程であり、生成粒子のサイズや数密度、形、結晶構造などの特徴を決めるため、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。しかし、19世紀にGibbs(1876)が熱力学的考察を元に古典的モデルを提唱した後、21世紀の今も核生成の物理、化学過程に関する詳細は理解されていない。最近では実験を元に、pre-nucleation cluster と呼ばれる前駆体や、非晶質相からの相転移、液-液分離経路などの新しい核生成モデルが提案され始め、より複雑化している。

本研究では、溶液セルを用いた透過電子顕微鏡(TEM)による“その場”観察で、核生成と前駆体のかかわりを直接的に示すことを目的とする。核生成の理解にはナノ領域の物性と水和層がカギとされている。そこで、気相からの核生成実験と分子動力学計算でナノ粒子の物理定数(表面自由エネルギーと付着確率)を決定し、水和層を作る水と作らないイオン液体中での核生成の比較から水和層の役割を説明して、ナノ領域の物性と水和層を考慮した核生成モデルを構築する。

【研究の方法】

TEM 中では高真空が必要なので、溶液を用いた研究は従来不可能であった。我々が最近確立した溶液セルを用いた TEM 中“その場”観察の手法は、メゾ領域の核生成過程の可視化に最も強力で、我々は、世界でも数少ないグループグループを形成している。これにより、溶液中で形成する個々のナノ粒子を相同定まで含めて直接観察する。ここで、ガスから核生成を経てナノ粒子に至る際の温度場と濃度場の計測を多波長干渉計(図1)で、結晶構造を赤外スペクトル“その場”測定法で決め、核生成温度(過飽和度)等から構造を特定したナノ粒子の物理定数を決定する。大規模分子動力学計算による核生成の再現や反応経路自動探索による安定クラスター構造から導出した値と比較検証することで、新しい核生成モデルの構築を目指す。

【期待される成果と意義】

光学顕微鏡によるマイクロメートル領域での観察がナノ領域になる点に大きな意義がある。TEM 観察では、結晶の成長速度、形、集合、配列、サイズなどが直接観察できるだけでなく、電子回折パターンにより相同定もその場で同時に行える点において、飛躍的な成果が見込める。

イオン液体を溶液成長に用いて、TEM に導入する実験は、世界でも我々だけが行っている。また、TEM による溶液成長の“その場”観察実験により、結晶が生成する最初期の核生成過程を可視化でき、バイオミネラリゼーションの解明や生体適合材料の作製などに波及効果があると期待できる。

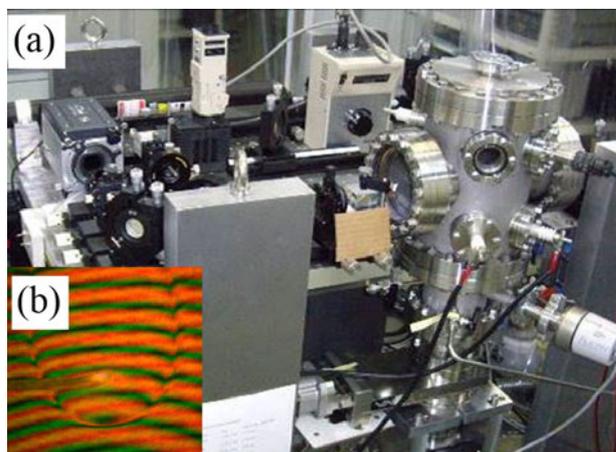


図1 (a) 二波長のレーザーを持つマッハツェンダー干渉計を備えたナノ粒子生成装置と(b)気相からの核生成を捉えた例。核生成により、屈折率が 10^{-5} 増加した結果、縞が変位している。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Kimura, H. Niinomi, K. Tsukamoto, J., M. García-Ruiz, *Journal of the American Chemical Society*, 136 (2014) 1762-1765.
- Y. Kimura, K. K. Tanaka, H. Miura, K. Tsukamoto, *Crystal Growth & Design*, 12 (2012) 3278-3284.

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度-31 年度
134,100 千円

【ホームページ等】

<http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/>

【基盤研究(S)】

理工系（総合理工）



研究課題名 窒化物ナノ局在系の物性制御によるテーラーメイド光源の実現

京大大学・大学院工学研究科・教授 かわかみ よういち
川上 養一

研究課題番号： 15H05732 研究者番号： 30214604

研究分野： 工学

キーワード： 新機能性発光デバイス

【研究の背景・目的】

近年の窒化物半導体の研究進展はめざましく、InGa_N 量子井戸を活性層とする発光ダイオード(LED)が開発され、極めて高い効率の青色LEDが実用化されている。しかしながら、高電流注入で発光効率の低下する「Droop」現象、活性層のIn組成を増加させた緑色LEDの効率低下といった「Green-gap」問題、さらには、紫外の短波長領域での効率低下といった「UV-threshold」問題は未解決であり、LED固体照明の発展のための重要な課題となっている。

本研究の発想は、これまで精力的に行ってきた発光ナノ中心へのキャリア局在化に関する基礎光物性の研究に端を発している。本研究プロジェクトは、このキャリア局在化の制御によって発光スペクトル合成を実現しようという発想、すなわち理解から制御に向けて、発展的転回を図ろうとするものである。このことにより、(Al,Ga,In)N系半導体におけるナノ・マイクロ構造中から任意の波長の光を高効率で発光させるための技術確立し、テーラーメイド照明光源を実現することを目的としている。

【研究の方法】

本研究の特色は、図1に示すようなInGa_Nマルチファセットからなる3次元構造に代表される新しい発光素子の設計概念の確立と物性制御を通して、所望の物体色を実現できる次世代照明工学に貢献しようというアプローチにある。具体的には、

- (1) 半極性基板上へのホモエピ成長やマルチファセット3次元構造などの活用などを通じて、有機金属気相成長による高品質In (Al)リッチ

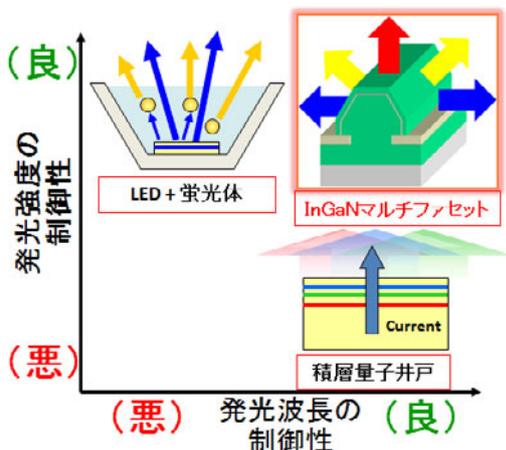


図1 各方式からなる白色LEDの優劣比較

- InGa_N (AlGa_N)マイクロ・ナノ構造を作製する。
- (2) 近接場光学による分光計測において、高い空間分解能と時間分解能を両立させて、発光スペクトル（輻射再結合過程）と熱スペクトル（非輻射再結合過程）を同時に検出する。このことにより、InGa_N (AlGa_N) ナノ構造中の局在発光（非発光）中心を詳細に評価する。
 - (3) (2)を(1)に適用することで、最適な成長条件やデバイス構造に関する指針を得て、ポジティブにフィードバックする。とりわけ、混晶組成比制御、内部分極制御、プラズモニクス効果によって、目的とする多波長発光制御と高効率化を目指し、次世代照明光源を実現する。

【期待される成果と意義】

「Droop」現象の解明と制御は、高出力LEDによるパワー照明の高効率化に寄与する。また、Green gapの解決によって超小型ディスプレイや高品位照明が実現し、UV thresholdの解決によって殺菌・加工・光触媒のような新しい応用が開拓される。

テーラーメイド照明が実現すれば、高演色・省エネルギー照明に大きく貢献するとともに、医療・バイオ応用や光情報処理などに革新をもたらすものと期待される。

さらに、新しい発光素子の設計概念や新光評価手法の確立を通して光材料科学の発展にも寄与する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・ M. Funato, T. Kondou, K. Hayashi, S. Nishiura, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, “Monolithic Polychromatic Light-Emitting Diodes Based on InGa_N Microfacet Quantum Wells toward Tailor-Made Solid-State Lighting”, *Applied Physics Express*, **1**, 011106 (2008).

・ T. Oto, R. G. Banal, K. Kataoka, M. Funato and Y. Kawakami, “100 mW deep ultraviolet emission from aluminum nitride based quantum wells pumped by an electron beam”, *Nature Photonics*, **4**, pp.767-771 (2010).

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
146,300千円

【ホームページ等】

<http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/kawakami@kuee.kyoto-u.ac.jp>



研究課題名 窒化物半導体を用いた未開拓波長量子カスケードレーザの研究

理化学研究所・平山量子光素子研究室・主任研究員

ひらやま ひでき
平山 秀樹

研究課題番号： 15H05733 研究者番号： 70270593
研究分野： 総合理工
キーワード： ヘテロ構造

【研究の背景・目的】

これまでの量子カスケードレーザ(QCL)は、5~12 THz(テラヘルツ)帯、及び 3μm 以下の波長の動作は難しい。本研究では、窒化物半導体を用いることにより、これまで不可能だった周波数帯の QCL を実現することを目的とする。窒化物半導体の LO フォノン吸収エネルギーは GaAs の約 3 倍大きく、未踏周波数 5~12 THz を含む 3~20 THz の動作が可能となる。また、伝導帯のバンド不連続値は最大で 1.9eV と大きいため 1~8μm 帯の QCL が可能となり、QCL の動作範囲を大幅に拡大することができる。未踏の THz-QCL の室温発振も期待できる。我々は、世界唯一の試みとして GaN 系 QCL の作製に着手し、最近、世界で初めてのレーザ発振に成功した。本研究では、これまで培ってきた窒化物の高品質成長技術を進化させ、また、独自に見出した「純粋 3 準位量子構造」と「間接注入機構」を融合させた革新的量子設計を取り入れることにより、上記未開拓領域を含む幅広い範囲の QCL 動作を実現することを目標とする。

【研究の方法】

窒化物半導体 QCL に適合する新しい量子構造を導入し、未開拓周波数の QCL を実現する。

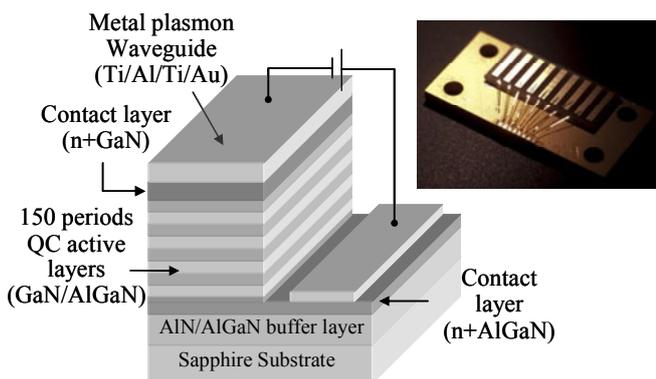


図 1 GaN 系 THz-QCL の構造図

窒化物半導体 QCL では、 piezoelectric field のために縮退が解かれた準位間で発光が起こり、安定した動作が得られない。この問題を解決するために、THz-QCL の量子構造として、無駄な準位を排除した「純粋 3 準位」機構を導入する (図 1、2 参照)。純粋 3 準位機構を用いた GaN/AlGaN 系 THz-QCL を実現し、動作周波数を 3~20 THz 領域へと拡大する。また、室温動作も実現する計画である。さらに、高 Al 組成 AlGaIn 系超格子構造を導入し、大きなバンド不連続を用いて、波長が 1~8μm 帯の赤外 QCL の実現を試

みる。窒化物半導体の高精密結晶成長は、これまで培ってきた、分子線エピタキシー (MBE) ならびに有機金属気相成長法 (MOCVD) による結晶成長技術を駆使して行う。

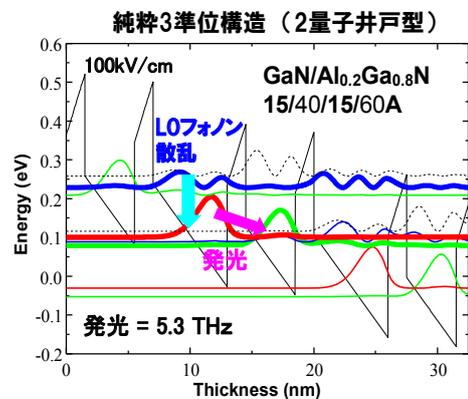


図 2 GaN 系 THz-QCL で用いる純粋 3 準位量子構造

【期待される成果と意義】

窒化物半導体を用いれば、未踏周波数を含む 3~20 THz のテラヘルツ帯ならびに、中赤外の 1~8μm 帯の QCL の実現が期待される。テラヘルツ光は、各種透視・非破壊検査用の光源として注目され、その応用範囲は、各種セキュリティ検査、火傷診断や癌細胞選別などの医療、電子産業、農業、各種工業、食品検査などと幅広い。また近赤外-中赤外光は、光通信や環境計測を中心に応用範囲が広い。未開拓周波数の QCL が実現すれば、上記の応用分野が飛躍的に拡大することが期待され、我が国の経済発展への寄与が大きい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ H. Hirayama et al, "Recent progress and future prospects of THz quantum-cascade lasers", Novel In-Plane Semiconductor Lasers XIV, Proc. of SPIE, 9382-41 (2015).
- ・ W. Terashima and H. Hirayama, "Development of terahertz quantum cascade laser based on III-nitride semiconductors", The Review of Laser Engineering, vol. 39, no. 10, pp. 769-774 (2011).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度-31 年度
154,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.riken.jp/lab/THz-device/>

【基盤研究(S)】

理工系 (総合理工)



研究課題名 フェムト秒時間分解 STM による光誘起ダイナミックスのナノスケール分光

筑波大学・数理物質系・教授

しげかわ ひでみ
重川 秀実

研究課題番号： 15H05734 研究者番号：20134489

研究分野： 総合理工

キーワード： 走査プローブ顕微鏡、トンネル分光、超短パルスレーザー、超高速分光、ナノ物性

【研究の背景・目的】

ナノスケールの科学技術を更に展開し、新たな機能を開拓・創成していくには、局所的な原子や分子構造、また電子状態を確認しながら、その場の電荷移動や遷移、伝導等を含む光誘起キャリアの局所量子ダイナミックスを評価することが重要な鍵となる。しかし、ナノスケールの量子ダイナミックスを定量的に解析した結果を基盤とする議論、科学としての展開はまだ端緒についたばかりである。

我々は、原子レベルの空間分解能を持つ走査トンネル顕微鏡 (STM) と量子光学の技術を融合することにより、STM (原子レベル) の空間分解能で局所構造や電子状態を確認しながら、フェムト秒の時間分解能で、スピンまで含めた光誘起キャリアダイナミックスを計測することが可能な新しい顕微鏡技術の開発に世界に先駆け成功した (文献参照)。

本研究では、同顕微鏡技術を更に推し進め、時間・空間領域で平均化されてしまう情報を得る手法では明らかにすることができなかった相転移や量子輸送の局所ダイナミックスの素過程を顕わにし、物理現象のより深い理解を得ると共に、新たな物性 (機能) の創出の為の基盤技術として確立することを目指す。併せて新たな科学領域の開拓を試みる。

【研究の方法】

図1はこれまで開発してきた時間分解STMの模式図、及び同手法を用いて得られた、(1)Mn原子/GaAs構造における、単一Mn原子によるギャップ内準位でのホール捕獲レートの測定結果と、(2)GaAs中の局所スピン歳差運動を実空間でSTM観察した、他には無い初めての結果の例である。しかし、励起系等

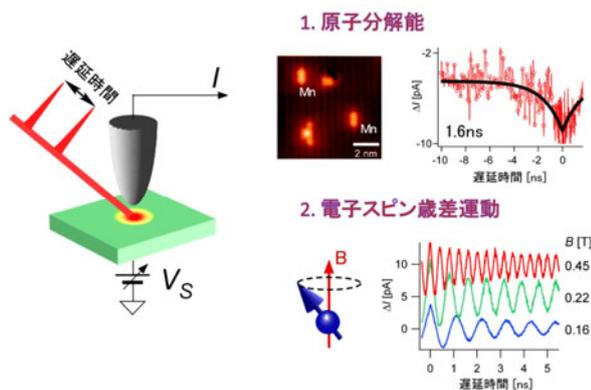


図1 時間分解 STM の模式図と測定結果の例

の制約から、対象は特定の試料に限られていた。本研究では、まず、こうした測定を多様な系に適用可能とする為の開発を行う。例えば、高出力・波長可変レーザーを導入するが、ダイナミックスの時間領域に応じた新しい変調方式を開発し、併せて整備する STM に組合せる事で、多様な量子過程を対象として時間分解測定を行うシステムを構築する。開発の進行に合わせて試料を準備して実験を行い成果は逐次、論文、講演、メディア等を通じて発表する。

【期待される成果と意義】

本研究により、フェムト秒時間分解 STM 技術を発展させ、様々な系に対し適用することが可能になる。そして、これまでの時間・空間領域で平均化されてしまう情報を得る手法では隠されてしまい明らかにすることができなかった局所量子ダイナミックスの素過程を顕わにする事を可能にする。ナノスケールの量子ダイナミックスの理解と制御は、新たな学問領域を構築する意義を持つと共に次世代素子開発への貢献が期待され、社会へのインパクトは大きい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Terada, S. Yoshida, O. Takeuchi, and H. Shigeoka: Real space imaging of transient carrier dynamics by nanoscale optical pump-probe microscopy. *Nature Photonics*, 4, 12, 869-874 (2010).
- S. Yoshida, M. Yokota, O. Takeuchi, H. Oigawa, and H. Shigeoka: Single-atomic-level probe of transient carrier dynamics by laser-combined STM, *APEX* 6, 032401 (2013).
- S. Yoshida, Y. Aizawa, Z. Wang, R. Oshima, Y. Mera, E. Matsuyama, H. Oigawa, O. Takeuchi, and H. Shigeoka: Probing ultrafast spin dynamics with optical pump-probe scanning tunneling microscopy, *Nature Nanotechnology* 9, 588-593 (2014).

【研究期間と研究経費】

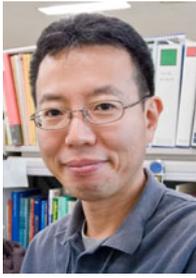
平成 27 年度 - 31 年度
154,600 千円

【ホームページ等】

<http://dora.bk.tsukuba.ac.jp/>
hidemi@ims.tsukuba.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系（総合理工）



研究課題名 ナノマテリアル・ナノフォトニクス融合による新しい光集積技術の創製

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・ナノフォトニクスセンタ長

のうとみ まさや
納富 雅也

研究課題番号：15H05735 研究者番号：50393799

研究分野：応用物理学、光工学、光量子科学、ナノフォトニクス

キーワード：フォトニック結晶、ナノワイヤ、プラズモニクス、グラフェン

【研究の背景・目的】

近年、直径が数 10nm 以下のナノワイヤや単原子層厚しかないグラフェンに代表されるナノフィルムが様々な材料系で次々と実現され、様々な新奇な物性が見つかっている。一方、これらナノ材料を光デバイスに応用する試みも行われているが、その大きさが光の波長よりも圧倒的に小さいため、光をナノ材料の中に閉じ込めることができず、光と十分な相互作用がとれないという問題が生じている。

本研究では、次に説明する特殊なナノフォトニクス構造とナノ材料を結合させることにより、光とナノ材料の相互作用を飛躍的に増強し、光回路の中にナノ材料を組み込む新たなプラットフォームを提案する。

【研究の方法】

(1) ナノワイヤ・フォトニック結晶結合系

このテーマでは「フォトニック結晶」と呼ばれるナノ構造をナノワイヤと組み合わせる。フォトニック結晶とは、屈折率が数百 nm 周期で変調された人工構造で、自然界には存在しない光の絶縁体を実現できることで知られている。我々は最近図 1 のようにフォトニック結晶上の 100nm 幅程度の溝の中にナノプローブを用いてナノワイヤを置くだけで、ナノワイヤ位置に強く光が局在した閉込めモード（高い Q 値を持った共鳴モード）が形成されることを発見した。フォトニック結晶中では、光の閉込めモードを自在に導波路や光回路に接続できるため、前述の問題点を解決する可能性を持つ。

そこで本研究では、多様なナノ材料とフォトニック結晶の組み合わせによって、導波路と接続した光閉じ込めモードを形成する技術を追究し、光とナノ材料の強い結合の実現を狙う。この手法はナノフィルムにも適用可能である。

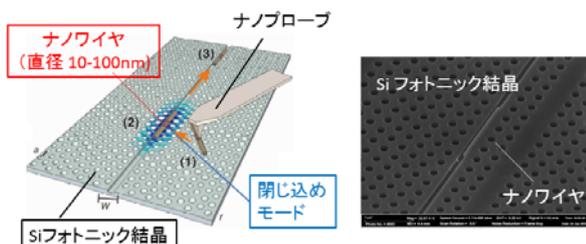


図1 ナノワイヤ・フォトニック結晶結合系の概念図(左)と電子顕微鏡写真(右)

(2) ナノワイヤ・プラズモニクス導波路結合系

もう一つのテーマとして、プラズモニクス導波路と呼ばれるナノ構造を用いる。この構造は、金属中の集団電子の応答を用いて金属に挟まれた数 10nm 幅のギャップ中に強く光を閉込めることができる。この手法では高い Q 値の共振器は形成できないが、より狭い領域に光を閉込めることができる。この性質はギャップにナノ材料を置いても保たれるため、ナノ材料と光の強い結合が実現可能となる。本手法もナノフィルムに適用できる。

本研究では、このプラズモニクス導波路の特異な性質を利用して、数 10nm のギャップに、(1)よりもさらに小さいナノ材料を配置して、導波路光とナノワイヤを強く結合することを目指す。

(3) ナノマニピュレーション技術の研究

(1)(2)を実現するため、ナノ材料を任意の場所に配置するナノマニピュレーション技術を研究する。

【期待される成果と意義】

我々の手法は、特定のナノワイヤやナノフィルムに限定されず、様々なナノ材料を強く光と相互作用させるプラットフォームになると期待される。本研究は、劇的に進展しつつあるナノ材料研究とシンクロしながら、ナノ材料の光デバイス応用への新しいルートを提示すると共に、ナノ材料と光の強い相互作用を実現する新しいプラットフォームとしての役割も果たすと期待している。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- M. D. Birowosuto et al., "Movable high-Q nano resonators realized by semiconductor nanowires on a Si photonic crystal platform", Nature Materials 13, pp. 279-285 (2014).
- M. Notomi, "Manipulating light with strongly modulated photonic crystals", Reports on Progress in Physics 73, 096501 (2010).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 - 31 年度
142,600 千円

【ホームページ等】

<http://www.brl.ntt.co.jp/group/ryouna-g/index-j.html>
notomi@nttbl.jp



研究課題名 多階層シミュレーションによる新規多様材料プラズマプロセスの量子論的理解

大阪大学・大学院工学研究科・教授 はまぐち さとし
 濱口 智志

研究課題番号： 15H05736 研究者番号： 60301826

研究分野： プラズマエレクトロニクス

キーワード： 数値シミュレーション プラズマ物質相互作用 プラズマプロセス

【研究の背景・目的】

近年、プラズマを用いた表面改質は、半導体デバイス製造プロセスから、バイオ材料プロセスまで、産業界で幅広く活用されている。これらの最先端の応用プロセスでは、低い入射エネルギーや紫外光の影響下での非熱平衡化学反応が、様々な新規基板材料に対して利用され、これまでのプラズマ表面相互作用の学術体系では、理解不能な様々な現象が確認されている。こうしたデリケートな非熱平衡表面化学反応を理解するためには、量子論的解析が必要不可欠である。本研究では、量子シミュレーションを最大限に活用した、多階層シミュレーションを用いて、低エネルギーイオン照射による原子層プラズマプロセスの物理機構を理解するための学術基盤を確立することを目的とする。これにより、ラジカルや活性酸素（ROS）による化学反応が主体となる最先端半導体プロセスやプラズマバイオプロセスの新しい学術体系の創生が可能となると期待される。

【研究の方法】

本研究では、プラズマ照射下の半導体デバイス新規材料・バイオ材料等表面に対し、量子コードにより、その表面反応を解析し、表面反応の物理機構を明らかにする。また、これらのデータに基づいて、古典的MDシミュレーションの原子間ポテンシャルを新規に開発し、更に、古典MDコードを、プラズマコードと量子コードと連成する多階層シミュレーションシステムを構築する。一方、シミュレーション結果は、プラズマ実験・ビーム実験・バイオ実験の結果と比較し、シミュレーションの精度を向上させる。（図1）

【期待される成果と意義】

本研究では、量子論的シミュレーションコード・第一原理MDコード・気相プラズマコードを連成する多階層シミュレーションシステムを開発して、新規材料に対する新規プロセスを解析する。特に、新規半導体材料やバイオ材料に関するプラズマ照射効果を明らかにする。本研究により、低エネルギー領域におけるプラズマ表面相互作用の新しい学術が創成されると同時に、新規材料 RIE 解析用の多階層シミュレーションシステムが、世界ではじめて構築され、その意義は、極めて大きい。

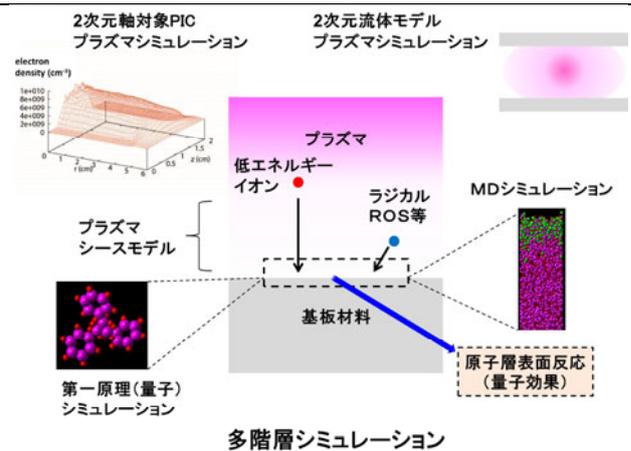


図1 本研究で構築する多階層シミュレーションシステム概念図。流体モデル以外、図中のシミュレーションコードは、全て、代表者のグループが開発した。本研究で、これらのコードを、低エネルギー表面反応プロセス用に発展させ、連成（多階層）シミュレーションを可能とする。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- K. Mizotani, *et al.*, “Molecular dynamics simulation of silicon oxidation enhanced by energetic hydrogen ion irradiation,” *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**(15) (2015) 152002 (5pp)
- H. Li, *et al.*, “Suboxide/subnitride formation on Ta masks during magnetic material etching by reactive plasmas,” *J. Vac. Sci. Tech. A* **33**(04) (2015) 040602 (5pp) ..
- K. Karahashi and S. Hamaguchi, “Ion beam experiments for the study on plasma-surface interactions,” *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**(22) (2014) 224008-1~224008-15.

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度－31 年度
 116,900 千円

【ホームページ等】

<http://www.camt.eng.osaka-u.ac.jp/hamaguchi/hamaguch@ppl.eng.osaka-u.ac.jp>



研究課題名 X線レーザー回折による生細胞ダイナミクス

北海道大学・電子科学研究所・教授 にしの よしのり
西野 吉則

研究課題番号: 15H05737 研究者番号: 40392063

研究分野: 量子ビーム科学、X線

キーワード: X線自由電子レーザー、パルス状コヒーレントX線溶液散乱、細胞ダイナミクス

【研究の背景・目的】

X線自由電子レーザー (XFEL) は、フェムト秒という極めて短いパルス幅をもつ、強力な質の高いコヒーレントX線である。この優れた特徴を利用すると、試料が放射線損傷を受ける前の、一瞬の姿を捕らえることができる。

コヒーレントなXFELは、また、対物レンズのないコヒーレント回折イメージング (CDI) を可能にする。研究代表者の西野らは、X線にとって透明な無染色の生物試料に対し、CDIによる高コントラストなナノイメージングを実証してきた。

本研究課題メンバーらは、さらに、パルス状コヒーレントX線溶液散乱 (PCXSS) 法と名付けた、XFELを利用した試料環境を制御したCDIを構築し、SACLAを用いて、生きた細胞のナノイメージングに世界で初めて成功した。本研究課題では、これまでの研究をさらに発展させ、生きた細胞のナノレベルダイナミクスの観察を目指す。

【研究の方法】

XFEL測定では、シングルショットで試料は破壊されてしまうため、一つの細胞を時系列でイメージングすることはできない。そこで本研究課題では、いくつかのアプローチにより細胞の状態を同期させ、異なる状態の細胞を、XFELを用いてイメージングすることにより、生きた細胞のナノレベルダイナミクスの観察を目指す。細胞を同期させる手法として、ケージド化合物を利用したフラッシュ・フォトリシスや細胞の同調培養を検討している。細胞ダイナミクスの事前評価には、北大の蛍光顕微鏡などを

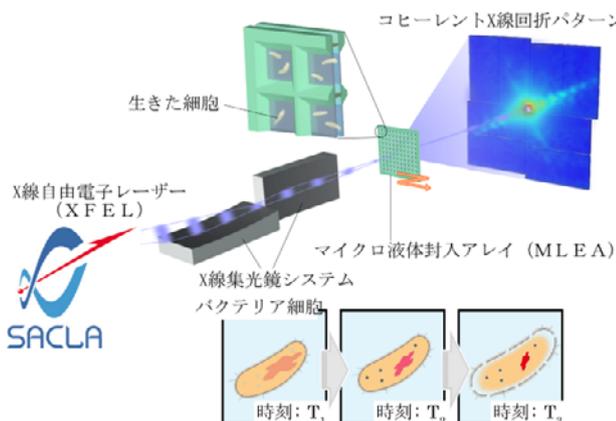


図1 XFELを用いた同期した異なる状態の細胞のイメージング

活用する。

XFELによるイメージングは、独自に構築したPCXSS法を用いて、SACLAにおいて行う(図1)。試料の細胞は、マイクロ液体封入アレイ (MLEA) に封じ込め、真空容器内に設置する。MLEAに封入した生きた細胞に、集光したXFELのシングルパルスを次々に照射して、コヒーレントX線回折 (CXD) パターンを計測する。計測したCXDパターンに反復的位相回復法を適用し、試料像を再構成する。

【期待される成果と意義】

PCXSS法は、細胞を生きたままナノイメージングできるという点において、クライオ電子顕微鏡にはない特徴がある。本研究課題の細胞ダイナミクスのナノイメージングは、XFELの優れた特徴を生かした独創的な研究であり、将来的に細胞生物学に大きく貢献する技術に発展すると期待する。

極限環境生物の理解は、極限環境でも安定に機能する酵素の開発など、産業応用上も重要なテーマである。また、サブミクロンサイズの極小細菌のダイナミクスを観察する事により、極めて少ない生体分子で構成されているこれらの生物が、いかに生命を維持しているかという疑問にアプローチする。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Kimura, Y. Joti, A. Shibuya, C. Song, S. Kim, K. Tono, M. Yabashi, M. Tamakoshi, T. Moriya, T. Oshima, T. Ishikawa, Y. Bessho and Y. Nishino, "Imaging live cell in micro-liquid enclosure by X-ray laser diffraction", Nat. Commun. **5**, 3052 (2014).
- J. Pérez and Y. Nishino, "Advances in X-ray scattering: from solution SAXS to achievements with coherent beams", Curr. Opin. Struct. Biol. **22**, 670-678 (2012).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 - 31 年度
153,900 千円

【ホームページ等】

<http://cxo-www.es.hokudai.ac.jp/>
yoshinori.nishino@es.hokudai.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 格子、保型形式とモジュライ空間の総合的研究

名古屋大学・大学院多元数理科学研究科・教授

こんどう しげゆき
金銅 誠之

研究課題番号： 15H05738 研究者番号： 50186847

研究分野： 数物系科学、数学、代数学

キーワード： 代数幾何

【研究の背景・目的】

いくつかの方程式の共通零点の集まりとして定まる図形(代数多様体)の構造や対称性および図形のある種の分類(モジュライ空間)を行うことが代数幾何の大きな問題である。代数多様体の中で最も美しいものの一つに楕円曲線と呼ばれるものがある。楕円曲線は19世紀に見いだされた現代数学の雛形の一つと言え、代数・幾何・解析が見事に調和した世界を形作っているが、暗号理論への思わぬ応用など、現在でも重要な研究対象である。楕円曲線の2次元版としてK3曲面と呼ばれる代数多様体が19世紀に発見された。その名は、3人の数学者 Kummer, Kähler, 小平邦彦の頭文字 K および、その神秘性から当時は未踏峰であったカラコルムの山名 K2 に由来する。K3 曲面はミラー対称性予想を通して数理物理学でも興味を持たれており、数年前には K3 曲面の楕円種数と散在型有限単純群の一つマッシュー群との関係を示唆する神秘的な現象 “マッシュー・ムーンシャイン” が発見された。楕円曲線の周期理論の類似も成り立ち、1990年代に Borchers によって見いだされた新しい保型形式論(ある種の不変性を持った関数論)が K3 曲面のモジュライ空間の研究にも有用であることも徐々に分かってきた。さらに K3 曲面と関係の深いエンリケス曲面の自己同型とモジュライ空間の研究も任意標数で関心を持たれている。

本研究課題の目的は、K3 曲面、エンリケス曲面、高次元版のカラビ・ヤウ多様体などの対称性(自己同型群)やモジュライ空間を、上で述べた代数幾何にとどまらない広い視点から研究することである。

【研究の方法】

上に述べた K3 曲面、エンリケス曲面、散在型有限単純群論、Borchers の保型形式論は、格子理論(座標平面の整数点の集合の一般化)を通して結びついている。この観点に立ち研究を進めるのが大きな特色である。K3 曲面の位相不変量であるオイラー数は 24 であるが、一方、24 次元の格子はリーチ格子と呼ばれる格子の存在など、特別に良いクラスをなしており、この点に着目して研究を進める。また K3 曲面やエンリケス曲面の周期領域は IV 型有界対称領域と呼ばれるものであり、Borchers の保型形式論はこの領域上展開される理論である。楕円曲線の場合、古典的な保型関数・保型形式がモジュライ空間の研究に有効であったが、K3 曲面・エンリケス曲面の場合に Borchers の保型形式論を用いてモジュライ空間の幾何学を研究する。

数学においては研究者の研究交流が最も大切である。研究者の派遣・招聘や国際研究集会の開催を行い広い視点からの研究を進めていく予定である。

【期待される成果と意義】

これまで代数曲線のモジュライの研究はそのヤビ多様体を通して、アーベル多様体の観点から研究されてきた。本研究においては、種数が小さい曲線に限るが、そのモジュライ空間の研究をアーベル多様体の代わりに K3 曲面とその自己同型の組の周期を用いる点が新しい発想である。またアーベル多様体の場合、テータ関数を用いた研究は古い歴史があるが、Borchers の IV 型領域上の保型形式を用いたモジュライ空間の研究は新しい理論の展開を促す可能性がある。K3 曲面のオイラー数が 24 であることを起点として、有限単純群論や保型形式論を取り込んだ研究を進めて行くことで、代数幾何学・数理物理学・有限単純群などが、K3 曲面を要とした新しい理論の雛形に発展す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】

- Shigeyuki Kondo, Ichiro Shimada, On a certain duality of Neron-Severi lattices of supersingular K3 surfaces, Algebraic Geometry 1 (2014), 311—333.
- Igor Dolgachev, Shigeyuki Kondo, The rationality of the moduli spaces of Coble surfaces and of nodal Enriques surfaces, Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Matematicheskaya 77 (2013), 77—92.

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度—31 年度
68,400 千円

【ホームページ等】

<http://www.math.nagoya-u.ac.jp/~kondo/>

【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）



研究課題名 幾何学的群論の深化と展開

京都大学・大学院理学研究科・教授

ふじわら こうじ
藤原 耕二

研究課題番号：15H05739 研究者番号：60229078

研究分野：幾何学

キーワード：双曲幾何、離散群論、リーマン幾何学、曲面、3次元多様体、写像類群

【研究の背景・目的】

群論は数学において長い研究の歴史がありますが、幾何学においても、対称性を記述する道具として本質的な役割を果たしています。群論には多くの応用があります。例えばリー群の理論はそのひとつで、物理学においても欠かせない道具です。

本研究は群論の中でも非可換な無限離散群を研究の対象とします。この分野の先駆者の1人はデーで、今から100年ほど前に、その後の無限離散群の研究の指針となるような研究をしました。デーの仕事の画期的な点の一つは、群論の研究に幾何学を使うことです。

1980年代にグロモフは、無限離散群の研究に双曲幾何を使うことを提唱し、双曲群の理論を確立しました。この分野はその後大きな発展をとげ、今では幾何学的群論と呼ばれています。

本研究では、双曲群の研究で確立したテクニックを、双曲群とは限らない群に応用し、画期的な成果を出すことを目的とします。たとえば、曲面の写像類群や自由群の外部自己同型群を研究します。

【研究の方法】

代表者を中心とする少人数の研究グループを形成し研究を進めます。大規模な国際研究集会や国際研究プログラムを開催・運営して、成果発表と研究討論の場を作り出します。

無限離散群の研究にコンピュータを援用する手法にも、若手研究者を雇用して取り組みます。

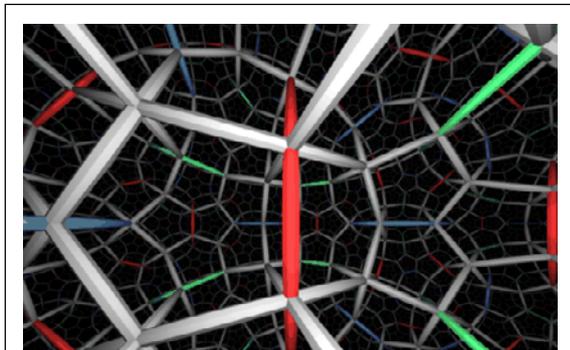


図1 三次元双曲空間
(Geometry center)

【期待される成果と意義】

代表者 Bestvina-Bromberg との共同研究で、Projection complex という概念を導入し、大きな成果を収めました。この手法は今後の幾何学的群論の

研究で中心的な役割を果たすと期待され、多くの成果が見込まれます。

最近、Agol-Wise らは、3次元双曲幾何・クライン群論において画期的な成果を得ましたが、そこで中心的な役割を果たしたのが CAT(0) Cube 複体の理論です。本研究は、Cat(0) Cube 複体の幾何と群論にも成果が期待されます。

京都大学は幾何学的群論の世界的な研究拠点として既に確立していますが、本研究を通じて、より卓越した拠点になることが見込まれます。外国から多くの研究者が訪問し、数学の研究環境が向上し、若手に大きな刺激となります。

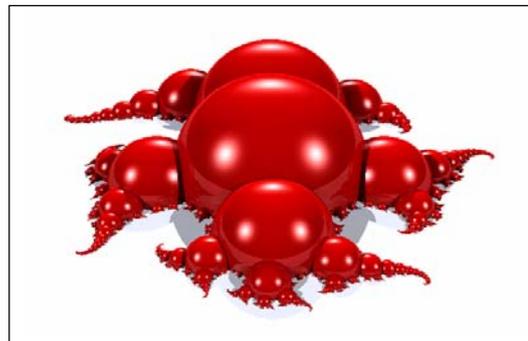


図2 クライン群
(MSRI)

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ [1] Mladen Bestvina, Kenneth Bromberg, Koji Fujiwara. Constructing group actions on quasi-trees and applications to mapping class groups. *Publ. IHES*, published online, 2014
- ・ [2] Mladen Bestvina, Koji Fujiwara, Bounded cohomology of subgroups of mapping class groups. *Geometry and Topology*, Volume 6 (2002) 69-89.

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
60,800千円

【ホームページ等】

<https://www.math.kyoto-u.ac.jp/~kfujiwara/>

【基盤研究 (S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 偏微分方程式の係数決定逆問題の革新的解決と応用

東京大学・大学院数理科学研究科・教授

やまもと まさひろ
山本 昌宏

研究課題番号：15H05740 研究者番号：50182647

研究分野：数物系科学

キーワード：境界値逆問題、リーマン計量決定、非ニュートン流体、非整数階微分方程式

【研究の背景・目的】

偏微分方程式の係数を、境界や部分領域における解のデータから決定するという係数決定逆問題の数学解析と応用の研究を実施する。本課題の係数決定逆問題は医用診断の問題や環境汚染の長期予測など公共の福祉に密接に関連している。理論面と応用面の重要性を考慮して、次の4つのタイプの逆問題を研究対象とする。(A)境界値逆問題、(B)リーマン計量決定逆問題、(C)非ニュートン流体の逆問題、(D)特異拡散の逆問題。

(A)は人体などの内部の伝導率を境界上の入力・出力関係で決定する逆問題で、(B)はリーマン多様体内の距離を境界の2点を結ぶ最短距離で決定する逆問題であり、ともに観測反復型の逆問題である。

(C)は人体や多くの材料に現れる粘弾性のような性質を示す非ニュートン流体の物性係数の決定であり、(D)は汚染物質の特異拡散などのモデル式である非整数階偏微分方程式に関する逆問題で、1回の事象に対する境界データによる定式化である。これら4つの課題は多様な逆問題を代表するものであり、本研究を通じて応用分野に現れる多様な逆問題の数学解析と数値解析の革新的な解決を目指す。

【研究の方法】

逆問題の革新的解決を目指す研究体制



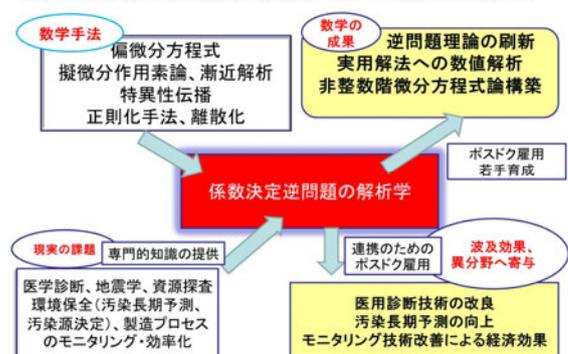
研究体制は上図で、上記の4つの課題ごとに、与えられたデータが係数を一通りに決定できるのかという一意性ならびにデータの誤差が求めるべき係数に大きな影響を与えないかという安定性などの数学解析を遂行し、それを踏まえて、実用化を視野に入れた数値解法の開発を目指す。逆問題は現実の問題を背景にしているため、諸科学分野の研究者と連携を保ち、製造プロセスのモニタリング技術の向上など産業応用も行っていく。代表者らが構築・維持している逆問題と関連分野において著名な研究者のネットワークを駆使して、課題ごとに国内外から専門家を研究チームに加えて、機動的なチーム編成によ

り、研究の各ステップで想定される困難を突破していく。

【期待される成果と意義】

- 1.多様な係数決定逆問題に対して、方法論を統合して、包括的な解決をはかること。
- 2.数学解析の結果に基づく逆問題の数値解析の開発。
- 3.課題(D)と関連して、古典的偏微分方程式論を包含する非整数階偏微分方程式論の創設。
- 4.医学診断や汚染の長期予測の向上、産業現場でのイノベーションなどに結びつくことへの期待。
- 5.非整数階偏微分方程式論の創設などを通して、数学を現場の問題に応用することにより、数学的な理論自体も豊かになるという本研究の成果が、理論・応用双方向の発展的な成功事例となる。

総括:逆問題の革新的な数学解析と異分野への波及を目指します



【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] K. Sakamoto and M. Yamamoto: Initial value/boundary value problems for fractional diffusion-wave equations and applications to some inverse problems, *J. Math. Anal. Appl.*, **382** (2011), 426-447.
- [2] O.Y. Imanuvilov, G. Uhlmann and M. Yamamoto: The Calderón problem with partial data in two dimensions, *J. Amer. Math. Soc.*, **23** (2010), 655-691.

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
140,000千円

【ホームページ等】

http://www.ms.u-tokyo.ac.jp/~myama/kiban_S/index.html

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 広エネルギー領域の精密測定で探る超高エネルギー宇宙線源の進化

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授 おぎお しょういち
荻尾 彰一

研究課題番号： 15H05741 研究者番号： 20242258
研究分野： 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理
キーワード： 宇宙線(実験)

【研究の背景・目的】

宇宙を飛び交う高エネルギー素粒子＝「宇宙線」の中でも、最もエネルギーの高い「超高エネルギー宇宙線」の観測を2008年から継続しているテレスコープアレイ実験(TA実験)は 10^{16}eV から4桁を超える範囲のエネルギースペクトルを描き出し、そこに多様な構造があることを示した(図1)。

特に、銀河系内起源宇宙線と銀河系外宇宙線のせめぎ合う $10^{16}\text{eV}\sim 10^{18}\text{eV}$ のエネルギー領域のスペクトルに現れる構造は、系内起源での粒子加速の限界、銀河磁場による閉じ込め・遮断、そして系外起源の宇宙論的進化といった豊富な物理を反映していると考えられている。

本研究では、TA実験と合わせて、TALEハイブリッド検出器を完成し、 10^{16}eV から $10^{20.5}\text{eV}$ にわたる広いエネルギー領域で、宇宙線のフラックスとその到来方向異方性、そして化学組成を測定する。これにより、低エネルギー側の銀河系内起源の重い宇宙線(鉄核など)と、高いエネルギー側で卓越する銀河系外起源の軽い宇宙線(陽子)の寄与を分離して、それぞれのエネルギースペクトルを明らかにし、宇宙線源と宇宙線伝播の物理に迫る。

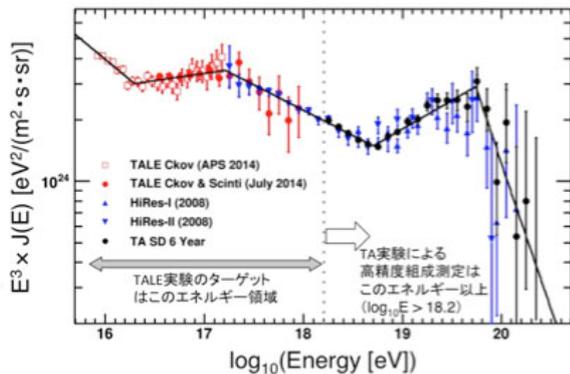


図1 TA実験等による宇宙線エネルギースペクトル

【研究の方法】

米国ユタ州に展開されているテレスコープアレイ実験に隣接して、TALE実験用大気蛍光望遠鏡(TALE-FD)10台がすでに設置され、運用されている。これに対して地表粒子検出器(SD)をTALE-FDの視野内に設置して103台のSDからなる検出面積 67km^2 の空気シャワーアレイを建設し、TALEハイブリッド検出器を完成する。これによって 10^{17}eV 以上で検出効率100%、観測duty95%以上を達成し、同時に化学組成決定の指標であるシャワー最大発達

深さの測定精度を $20\text{g}/\text{cm}^2$ へと劇的に向上させ、その後2年間の観測から 10^{16}eV 以上の系外成分・系内成分それぞれのスペクトルと4桁を超える広いエネルギー領域での宇宙線到来方向異方性とそのエネルギー依存性を明らかにする。

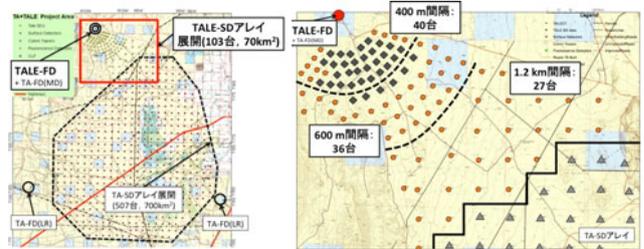


図2 TA実験の装置配置(左)とTALE実験(右)

【期待される成果と意義】

宇宙物理学的な意義として、(1)銀河系外宇宙線源天体とその進化の解明、(2)銀河間磁場の強さと構造に対する示唆、(3)宇宙線の遮蔽・閉じ込めの解明から、宇宙線・銀河磁場・銀河ハローを含めた多体系としての銀河系の物理、(4)銀河系内宇宙線源の加速エネルギー限界の精密測定と粒子加速理論への寄与などを挙げることができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- “Indications of intermediate-scale anisotropy of cosmic rays with energy greater than 57 EeV in the northern sky measured with the surface detector of the Telescope Array experiment”, R. U. Abbasi, et al., Ap. J., 790, L21, 2014
- “The energy spectrum of ultra-high-energy cosmic rays measured by the Telescope Array FADC fluorescence detectors in monocular mode”, T. Abu-Zayyad, et al., Astropart. Phys., 48, p.16, 2013

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
124,900千円

【ホームページ等】

<http://www.telescopearray.org>
sogio@sci.osaka-cu.ac.jp



研究課題名 ミュオン異常磁気能率の精密測定による
新物理法則の探索

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

さいとう なおひと
齊藤 直人

研究課題番号： 15H05742 研究者番号：20321763

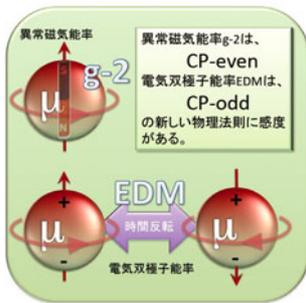
研究分野： 素粒子・原子核物理学

キーワード： 素粒子実験、基礎物理学実験、精密測定、対称性

【研究の背景・目的】

ヒッグス粒子の発見で素粒子標準模型は完成に近づく中、その枠組みでは説明出来ない重要課題がある事も事実である。特に、粒子/反粒子の対称性 (CP 対称性) の破れの本質的起源など、標準模型は答えてくれない。さらに根源的な宇宙物質像を獲得するには、標準模型を超えた物理法則 (BSM) の発見が必要である。

ミュオンは、BSM の存在を示唆する結果が報告されている数少ない例である。その異常磁気能率 ($g-2$) は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) で 0.54 ppm の精度で測定され、標準模型に比べ3 標準偏差以上大きな値が報告されている。この差を説明しうるのが超対称性などの BSM である。一方で、実験で直接測定されたのは、実は $g-2$ と電気双極子能率 (EDM) の効果の合算であり、実験値と標準模型の差の、少なくとも一部を有限な EDM に依るものと考えられる事もできる。静磁場におけるスピンの歳差周波数ベクトルは以下の式で表される。



$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[\left(\frac{g_{\mu} - 2}{2} \right) \vec{B} + \left(\frac{\mu \text{EDM}}{2} \right) \vec{\beta} \times \vec{B} \right] = \vec{\omega}_{g-2} + \vec{\omega}_{\text{EDM}} \quad (1)$$

つまり、ミュオンを静磁場による周回軌道に導入すると、 $g-2$ は軌道平面内の歳差運動を生み、EDM は面内から立ち上がろうとする回転を生み出す。BNL の実験では ω 全体が測定され、EDM の効果を見逃さず $g-2$ を抽出し、それが標準模型からずれていると主張している。我々は、 $g-2$ と EDM を同時測定する新手法を提案し、この実験で実現する。

【研究の方法】

本研究では右図のように、極冷ミュオンビームを 300 MeV/c まで加速し、3T の超精密磁場に入射、スピン歳差を測る。また、前段階ではシリコン検出器を使用して正ミュオンと電子の束縛状態であるミュオニウム (Mu) の超微細分裂 (HFS) を測定する。

極冷ミュオンビームは、実験室に引き出した表面ミュオンビームを一旦物質に止めてミュオニウム (Mu) を生成し、真空中に熱拡散してきた Mu をレーザーでイオン化し、残った μ^+ を加速することで得ら

れる。「停止」と「熱拡散」を用いることで、圧倒的に冷えたミュオン源を実現している。我々は、本研究の準備研究において、従来の 10 倍の Mu 収量を得る手法の開発に成功している。この実験の遂行には、大強度の表面ミュオンビームが不可欠である。世界でも有数の大強度加速器施設を用いた研究であるので他の追随を許さないという意味でユニークである。

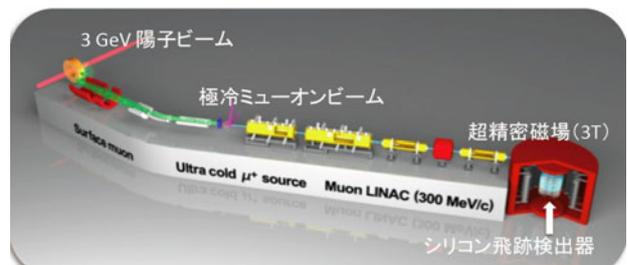


図 本実験の概念図

【期待される成果と意義】

$g-2$ および EDM は、既に BSM を考える上で強力な制限を与えている。今後の結果が「未発見」となっても更に強い制限となることは疑いの余地がない。発見があった場合は、 $g-2$ 、(CP-even)、EDM (CP-odd) どちらに発見が現れたかにより、BSM を構築する際の強力な指針を与えることとなる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- "A novel precision measurement of muon $g-2$ and EDM at J-PARC", N. Saito for J-PARC $g-2$ /EDM Collaboration; AIP Conf.Proc. 1467 (2012) 45-56
- "Enhancement of muonium emission rate from silica aerogel with a laser ablated surface" G.A. Beer, et al; PTEP 2014 (2014) 091C01
- 「ミュオン粒子に表れた矛盾」日経サイエンス 2014 年 4 月号; 中島林彦 (編集部) 協力 齊藤直人、森俊則

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 - 31 年度
155,700 千円

【ホームページ等】

<http://g-2.kek.jp/gakusai/>

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 大角度スケール CMB 偏光パターンの地上観測実験によるインフレーション宇宙の解明

理化学研究所・光量子工学研究領域・チームリーダー おおたに ちこう 大谷 知行

研究課題番号： 15H05743 研究者番号： 50281663
研究分野： 数物系科学
キーワード： 宇宙物理 (実験)

【研究の背景・目的】

宇宙初期のビッグバン (高温・高密度状態) は、インフレーションとよばれる時空の加速膨張を源にするという説 (インフレーション宇宙論) が有力であるが、その存在はまだ立証されていない。このインフレーション宇宙論は、宇宙の平坦性問題、モノポール問題、地平線問題といった現代宇宙論に残された課題を一挙に解決する仮説であり、その最も重要な予言が原始重力波の存在である。この原始重力波を測定する最も有力な方法は、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光に現れる特定のパターン (原始重力波 B モード) の検出である [1]。

原始重力波の探索は世界の様々なグループで試みられてきており、2014 年 3 月には米国の BICEP2 実験が信号の兆候の発見を報告した [2]。しかし、その後、Planck 衛星の観測により銀河系内の星間塵 (ダスト) の影響が大きいことが明らかとなり、発見の是非は依然として未決着のままである [3]。

そこで本研究では、従来の 25 倍に広い天空領域 (図 1) を網羅する地上実験 GroundBIRD を実施し、これまでにない広い空間周波数領域での空間スペクトル測定を行って、世界初の原始重力波 B モード信号の検出を目指す。

全天の50%の観測領域を実現

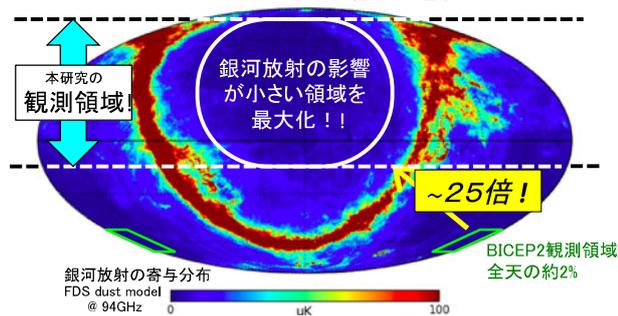


図 1. 本研究でカバーする観測領域

【研究の方法】

現在、世界中の様々な実験が B モードの精密観測をめざして競争しているが、広い領域の観測は困難であった。その理由は、 $1/f$ ゆらぎと呼ばれる出力信号のベースラインゆらぎ対策、装置の系統誤差対策、銀河のダスト放射の影響の理解が不十分だからである。これに対し、本研究では (1) 望遠鏡の高速回転、(2) 2 周波数帯 (145, 220 GHz) の同時観測によるダスト成分の正確な除去、(3) 光学系冷却と最先端検出器 MKIDs の活用、(4) ワイヤグリッドを用いた偏光

の高精度較正による系統誤差の最小化、といったアイデアによりこれらの困難を打破する。

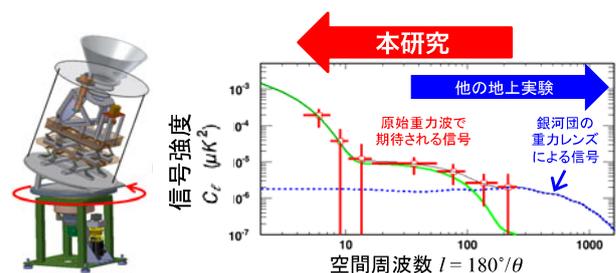


図 2. GroundBIRD 望遠鏡と 3 年間の観測で期待される空間スペクトル

【期待される成果と意義】

本研究では、以下の 4 つの目標の達成を目指す。

- ・ 国産 CMB 偏光望遠鏡 GroundBIRD を完成し、地上実験において史上最大領域の観測を実現
- ・ 2 周波数帯による CMB とダスト放射の観測と系統誤差コントロール (0.1% レベル) を達成
- ・ B モード空間スペクトルを幅広い範囲にわたり測定し、インフレーション理論を精査
- ・ BICEP2 実験や他の地上実験と異なる天域を観測し、原始重力波 B モード信号を検証

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] L. M. Krauss, S. Dodelson, S. Meyer, Science, 328, 989-992 (2010).
- [2] P. A. R. Ade et al. (BICEP2 Collaboration), PRL 112, 241101 (2014).
- [3] P. A. R. Ade et al. (BICEP2/Keck and Planck Collaborations), PRL 114, 101301 (2015).

【研究期間と研究経費】

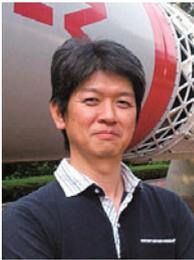
平成 27 年度 - 31 年度
153,200 千円

【ホームページ等】

HP 作成準備中
otani@riken.jp

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 宇宙赤外線背景放射のロケット観測でさぐる銀河ダークハロー・浮遊星と宇宙再電離

関西学院大学・理工学部・教授

まつうら しゅうじ
松浦 周二

研究課題番号：15H05744 研究者番号：10321572

研究分野：数物系科学

キーワード：宇宙物理(実験)、光赤外線天文学

【研究の背景・目的】

本研究は、宇宙再電離をおこした初期の天体の残光や系外銀河ハローに浮遊する星々の光を、近赤外線の銀河系外背景放射として捉え、その背景にあるダークマター宇宙の構造形成の物理を観測的に解明することである。

近年の研究によれば、ビッグバンによる灼熱の電離状態から始まった宇宙は、宇宙創成後 38 万年にいったん中性化した。約 5 億年後に再び電離され、現在まで完全電離状態が続いている。この「宇宙再電離」の原因天体として原始銀河の探査が熱心に行なわれたが、宇宙全体を電離するのに十分な数の銀河は見つかっていない。つまり、個別の銀河探査で見つからないほど小さな天体—例えば、銀河より前に誕生した星(初代星)とその残骸ブラックホールが宇宙再電離を起こした可能性がある。

申請者らのグループは、再電離期に満ちていた電離紫外線を、宇宙膨張のドップラー効果により波長が伸びた近赤外線(波長 1–5 μm)の宇宙背景放射として捉えることを試みた。その結果、既知の光源である系外銀河では説明がつかない余分な背景放射成分が見つかった。それは初代星の残光の可能性はあるが、宇宙初期起源としてはあまりにも信号が強いため、近傍宇宙に原因を求めた結果、系外銀河を取り巻くダークマター・ハローに浮遊する星々の光(Intra-Halo Light; IHL)でかなり説明できる可能性が出てきた。初代星と IHL の仮説を検証するには、より高い精度の実験が必要であり、本研究はそれに応えるものである。

【研究の方法】

観測ロケットを用いた宇宙背景放射実験 CIBER-2 (Cosmic Infrared Background Experiment)により、申請者らが発見した近赤外線の宇宙背景放射の異常な明るさの原因を明らかにする。特に、初代星や IHL による仮説を検証するため、過去の CIBER 実験よりも 10 倍高い感度で測定する(図 1)。初期天体はダークマター分布に良く従うことが期待され、背景放射の空間的ゆらぎのパターンから通常銀河から区別できる。また、初代星は水素の電離エネルギーに相当する紫外域(現在は近赤外域)にライマンブレークと呼ばれる急峻なスペクトル段差を生じる一方、ハロー浮遊星はなだらかなスペクトルをもつため、これらを多波長バンドでのゆらぎ測定から判別する。

実験は日米韓台の国際共同研究として、NASA の観測ロケットを用いて行なう。打上げは、米国ニュ

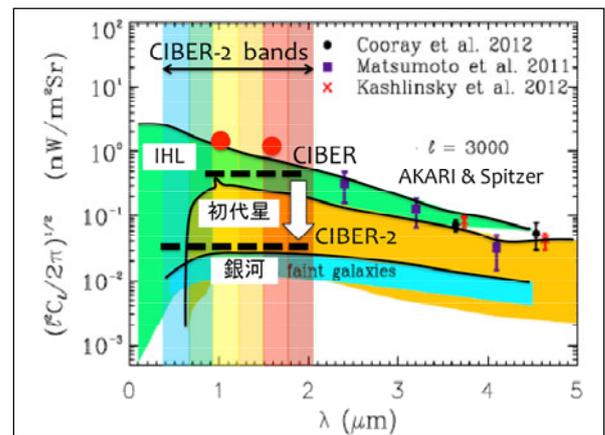


図 1 放射スペクトル

ーメキシコ州ホワイトサンズ実験場にて 2016 年以降の本研究期間内に 2 回行なう。日本は、望遠鏡や光学系の開発を担当しつつ観測成果をあげる。

【期待される成果と意義】

第一に、謎の近赤外線背景放射の成因を解明する。分離抽出された宇宙初期成分については、宇宙論の重要課題である再電離の直接的証拠が初めて得られる。また、IHL 成分の研究では、ダークマター構造形成論の検証やミッシングバリオンなどの長年の未解決問題の解決につながる。さらに、活動銀河からの超高エネルギーガンマ線と背景放射光子との対生成による銀河間吸収過程に関して、宇宙線・素粒子物理の分野にも広く影響を与える。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・"On the origin of near-Infrared extragalactic background light anisotropy", M. Zemcov, *et al.*, *Science*, 346, 732-735 (2014).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度–31 年度
100,000 千円

【ホームページ等】

http://www.ir.isas.jaxa.jp/~matsuura/darkage/index_da.html
http://sci-tech.ksc.kwansei.ac.jp/d_phys/research/infrared-astronomy.html
matsuura.shuji@kwansei.ac.jp



研究課題名 ウラン系重い電子物質の超伝導解明と 新奇超伝導状態の探索

京都大学・大学院理学研究科・教授 いしだ けんじ
石田 憲二

研究課題番号：15H05745 研究者番号：90243196

研究分野：物性物理

キーワード：強磁性超伝導体、強相関電子系、重い電子系、ウラン化合物

【研究の背景・目的】

銅酸化物超伝導体の発見以降、様々な物質群で「非従来型の超伝導」が発見されている。これらの超伝導体の特徴として、反強磁性秩序近傍で見られること、従来のS波対称性とは異なる超伝導対関数を持つことが挙げられる。しかし、非従来型超伝導体の発現機構については、従来の電子-格子相互作用とは異なることについてはコンセンサスは得られているが、スピン、電荷、軌道のゆらぎなどの候補が挙げられているものの未だ同定に到っていない。

このような状況の中、ウラン化合物で発見された「強磁性超伝導体」は新たな潮流を形成しつつある。2000年に強磁性体 UGe_2 において加圧下で超伝導が発見されて以降、ウラン化合物で類似の性質を示す超伝導体の探索が続けられた。その結果 $URhGe$ と $UCoGe$ において強磁性状態のもと常圧で超伝導転移することが発見された。これら強磁性超伝導体の特徴として、超伝導上部臨界磁場の異方性が非常に大きいこと、超伝導が磁場に対して強められたり、一度磁場で消えた超伝導が磁場を上げると再度現れるというという振舞い(リエントラント超伝導)が報告された(図1)。これは従来の超伝導のみならず反強磁性と共存する超伝導体でも見られなかった特異な振舞いである。

我々の研究の目的は、これらウラン化合物の強磁性超伝導体の超伝導特性を実験・理論の両面から明らかにし、超伝導発現機構を解明することである。特に強磁性超伝導体で実現しているであろう「スピン三重項超伝導状態」の理解につとめる。

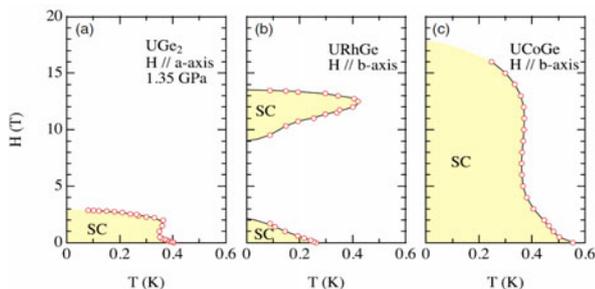


図1 ウラン化合物強磁性超伝導体の上部臨界磁場
D. Aoki and J. Flouquet, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 061011 (2014) より参照

【研究の方法】

我々は、これらウラン化合物の強磁性超伝導体では、化合物の持つ強磁性ゆらぎと超伝導が密接に関係していると考えている。3種類の強磁性超伝導体に

おいて調べ、共通の振舞いについて探る。核磁気共鳴(NMR)実験は、低エネルギーの強磁性ゆらぎの磁場依存性を、希釈冷凍機温度域まで精度よく捉えることのできる数少ない実験手法であり、本研究課題では特にNMR実験に重きを置く。良質な単結晶を用いた実験を行い、理論と比較することから超伝導発現機構を理解する。さらにウラン化合物の中には、超伝導状態で多重相の振舞いを示すものも知られている。これらの超伝導状態もNMR実験を基に調べる。

【期待される成果と意義】

今までのところ、電子-格子相互作用以外で同定された超伝導発現機構はない。本研究期間内でウラン化合物強磁性超伝導体を実験・理論の両面から詳細に研究し、非フォノンによる超伝導の発現機構を確実なものとする。これは他の非従来型超伝導の理解にも大きな影響を与えると期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- “Coexistence of superconductivity and ferromagnetism in $URhGe$ ”, D. Aoki, A. Huxley, E. Ressouche, D. Braithwaite, J. Flouquet, J.-P. Brison, E. Lhotel and C. Paulsen, *Nature* **413**, 613-616, (2001).
- “Superconductivity Induced by Longitudinal Ferromagnetic Fluctuations in $UCoGe$ ”, T. Hattori, Y. Ihara, Y. Nakai, K. Ishida, Y. Tada, S. Fujimoto, N. Kawakami, E. Osaki, K. Deguchi, N. K. Sato, and I. Satoh, *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 066403-1-5, (2012).
- “Reentrant Superconductivity Driven by Quantum Tricritical Fluctuations in $URhGe$: Evidence from ^{59}Co NMR in $URh_{0.9}Co_{0.1}Ge$ ”, Y. Tokunaga, D. Aoki, H. Mayaffre, S. Krämer, M.-H. Julien, C. Berthier, M. Horvatić, H. Sakai, S. Kambe, and S. Araki, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 216401 1-5, (2015).

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
153,800千円

【ホームページ等】

<http://www.ss.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.html>
kishida@scphys.kyoto-u.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 細胞の可塑性とロバストネスの状態論

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

かねこ くにひこ
金子 邦彦

研究課題番号： 15H05746 研究者番号： 30177513

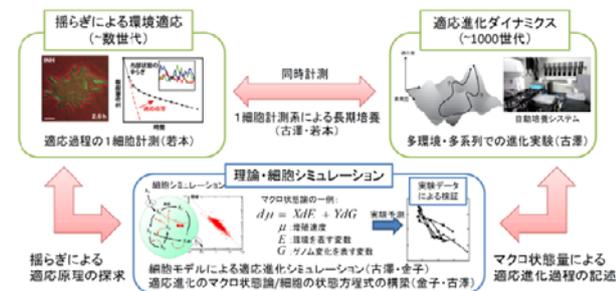
研究分野： 数物系科学

キーワード： 生命現象の物理、進化、マクロ状態論、1細胞計測、ゆらぎ

【研究の背景・目的】

分子生物学は生命の各要素過程の詳細を明らかにした一方で、それら膨大な要素からなる複雑な動的ネットワークから、いかにして安定して柔軟な生命システムが形成されるかは未だ大きな謎である。実際、生命システムは揺らぎの影響下で安定して機能し(ロバストネス)、また環境変化に対しその状態(表現型)を変化させて適応する(可塑性)。しかし、可塑性やロバストネスは1つ(ないし少数)の遺伝子の振る舞いで決められるものではないため、分子生物学の俎上には乗りにくく、むしろ揺らぎを含む多成分の系が全体として維持、適応、成長するという「複雑系生命科学」の立場で考えるべき問題である。

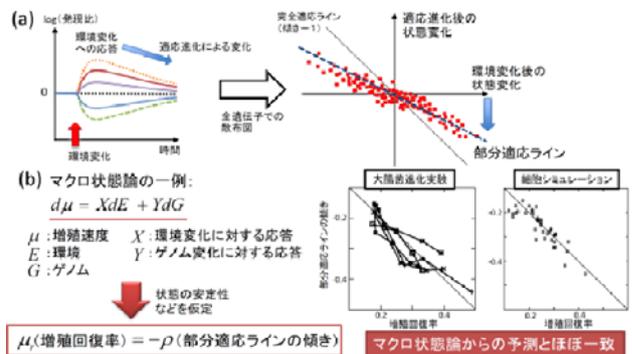
そこで、本プロジェクトでは適応と進化の実験と理論により、生命システムが普遍的に持つ可塑性と頑強性(ロバストネス)を表現する状態論を構築する。環境変化への適応・進化の過程において、細胞の内部状態(遺伝子発現量・ゲノム配列など)の動態と揺らぎを定量し、細胞の可塑性とロバストネスを表現するマクロ量を抽出する。一方で、細胞の適応と進化の力学系・確率過程シミュレーションを行い、増殖する細胞システムにおける普遍的性質を抽出する。多階層の網羅的実験データと理論解析を統合することにより、適応と進化といった様々な時間スケールでの細胞状態変化において、可塑性とロバストネスを記述する系の詳細に依らないマクロ状態論を構築する。



【研究の方法】

マクロ量を用いた細胞状態論を構築するために、以下の研究課題を遂行する。①:大腸菌の1細胞計測系を用いて増殖速度と遺伝子発現量の揺らぎを定量し、揺らぎを利用した環境適応のメカニズムを明らかにする。②:様々なストレス環境下での大腸菌進化実験を行い、表現型と遺伝子型の変化を網羅的に定量することにより、適応進化過程を記述する少数のマクロ状態量を抽出する。③:細胞シミュレーションと理論解析を用いて、適応進化過程を記述する

マクロ状態論を構築する。④:1000世代といった長期にわたる大腸菌1細胞計測を行い、表現型の揺らぎからゲノム配列の変化まで、複数の時間スケールにわたる状態変化を定量し解析する。⑤:これらの実験解析と理論解析を統合し、マクロ量による細胞状態の遷移理論を完成させる。



【期待される成果と意義】

生物の大自由度ネットワークがどのように可塑性とロバストネスを持つか、遺伝子やタンパク質などミクロレベルの情報のみでは限界がある。それに対し、ミクロレベルの高精度かつ網羅的解析を用いつつ、個別情報に依らないマクロ状態論を構築するアプローチは前例が無い独自のものである。マクロ量での細胞状態の記述とその予測が可能となれば、適応、進化の定量的法則が抽出され、細胞の状態をコントロールする新たな手法の開発が期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

K. Kaneko, Life: An Introduction to Complex Systems Biology, Springer, 2006: 日本語版「生命とは何か: 複雑系生命科学へ」東京大学出版会
K.Kaneko, C.Furusawa, T.Yomo, Phys.Rev.X(2015) 5, 011014
S.Suzuki, T.Horinouchi, C. Furusawa, Nat. Comm (2014)5, 5792
Y.Wakamoto, et al., (2013) Science. 339(6115): 91-95.

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 - 31 年度
140,400 千円

【ホームページ等】

http://chaos.c.u-tokyo.ac.jp/index_j.html
kaneko@complex.c.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 極限時間分解能観測による
オーロラ最高速変動現象の解明

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授 ふじい りょういち
藤井 良一

研究課題番号: 15H05747 研究者番号: 00132712

研究分野: 超高層物理学

キーワード: 脈動オーロラ、高速変調、衛星-地上同時観測

【研究の背景・目的】

本研究は、脈動オーロラ (図1) と呼ばれる数ミリ秒から数100ミリ秒の時間変動を内在しつつ、数秒から数十秒で準周期的に明滅するオーロラ現象の生成機構を理解することを目的とする。この目的のために、地上からの光学・レーダー観測、極域におけるロケット実験、および2016年度に打ち上げ予定の科学衛星 ERG の観測のすべてにおいて、高速時間分解能の観測を実現し、シミュレーションとの融合研究を実施する。具体的には、変動の基本要素である数ミリ秒の降下電子変動とコーラス波動の両者について、地上と飛行体との高時間分解計測にもとづく初の同時観測を実現し、コーラス波動と脈動オーロラの時間変動特性の関係を、数秒から数十ミリ秒の時間階層の中で特徴づけることを行う。これにより、脈動オーロラの起源を解明するとともに、宇宙空間で普遍的に生起するプラズマ波動と粒子との相互作用、特にその階層的発展過程を明らかにする。



図1 国際宇宙ステーションから撮影された脈動オーロラの広域構造 (中央より下部分) (出典: NASA)

【研究の方法】

本研究計画は、a)地上観測チーム、b)シミュレーションチーム、c)衛星観測チーム、d)ロケット観測チームの4つから構成されている (図2)。地上観測チームは、EMCCDカメラによるオーロラの高速撮像を北欧および北米で実施し、脈動オーロラの主脈動および内部変調の特性を明らかにする。衛星観測チームは、2016年に打ち上げ予定のERG衛星による、コーラス波動の波形観測および波動粒子相互作用観測によって、コーラスの生起および電子の散乱について磁気圏側で観測を行う。ロケット観測チームは、極域において観測ロケット実験を実施し、脈動オーロラを引き起こす降下電子の高時間分解能観測を行う。そして、シミュレーションチームは、ERG衛星が

観測したシミュレーションを入力とし、電離圏高度に降り込んでくる電子変動を計算し、ロケット実験および地上光学観測との比較から、主脈動および高速変調メカニズムを特定する。

【期待される成果と意義】

本研究は、脈動オーロラの生成源である内部磁気圏と発光が起きる電離圏領域の双方において科学衛星とロケットによる直接観測を行い、現象の全容を捉える事ができる地上からの光学観測と総合的な比較を行うというユニークな計画である。観測とシミュレーションを組み合わせることで、原因と結果の因果関係の解明にせまることができる。本研究によって、長い間謎に包まれていた脈動オーロラの変調の仕組みが明らかになるとともに、宇宙で普遍的に生起しているプラズマ波動と粒子の相互作用の素過程の理解が大きく進むことが期待される。

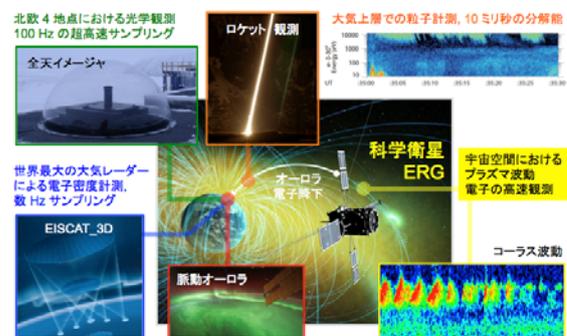


図2 脈動オーロラ明滅機構の実証的研究の概念図

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Fujii et al., Conjugacies of pulsating auroras by all-sky TV observations, Geophys. Res. Lett., 14, 1987.
- Miyoshi, Oyama, Saito et al., Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probes observations, J. Geophys. Res., 120, 2015.

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
152,600千円

【ホームページ等】

<http://www.psa-research.org>
rfujii@stelab.nagoya-u.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 地球核の最適モデルの創出

東北大学・大学院理学研究科・教授

おおたに えいじ
大谷 栄治

研究課題番号：15H05748 研究者番号：60136306

研究分野：数物系科学

キーワード：地球核、高温高压、X線非弾性散乱、放射光メスバウア法、音速

【研究の背景・目的】

本研究は、地球核物質に関する最先端の高温高压研究にもとづいて、地球物理学的観測データを説明する地球核の最適モデルを創出することを目的とする。具体的には、地球核の条件において、核を構成する鉄合金の固相と液相の相関係と軽元素の分配の実験的研究、放射光X線非弾性散乱法・超音波法等を用いた金属鉄軽元素合金の固体および液体の音速（縦波、横波）の測定、放射光メスバウア分光とX線回折法による金属鉄軽元素合金の磁性・電子状態の解明と状態方程式の決定などの物性測定を総合し、地球物理学的観測データを満足する地球核の内部構造の最適なモデルを創出する。

【研究の方法】

両面レーザー加熱ダイヤモンドアンビル高压装置（図1）を用いて、高温高压下での金属鉄の固体・液体、ケイ酸塩液体・金属鉄液体のNiおよびSi、S、C、O、Hなどの軽元素の分配実験を行い核の分離および内核の成長に伴う軽元素の分配を明らかにする。

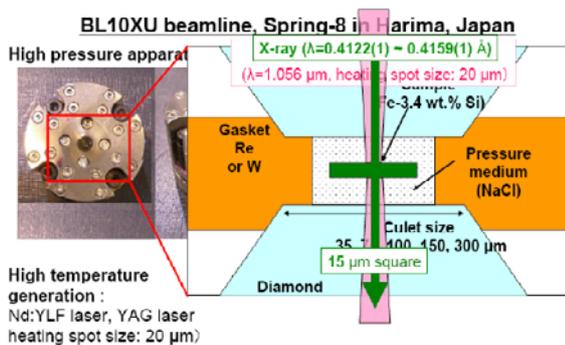


図1. 本実験に用いる両面レーザー加熱ダイヤモンドアンビル高压装置

Fe, Fe-Ni, Fe-Si, Fe₃S, Fe₃C, FeO, FeHなどの鉄・軽元素系物質について、両面レーザー加熱ダイヤモンドアンビル高压装置を用いた高温高压のもとで(1)放射光を用いたX線非弾性散乱法による音速測定、(2)放射光メスバウア分光を用いた電子状態と磁性の解明、(3)X線粉末回折実験による状態方程式の決定を行う。

【期待される成果と意義】

図2にhcp-Feの非弾性散乱測定の実験結果を例示する。同様の測定を金属鉄軽元素系合金および鉄化合物について行うことによって、それらの音速、密

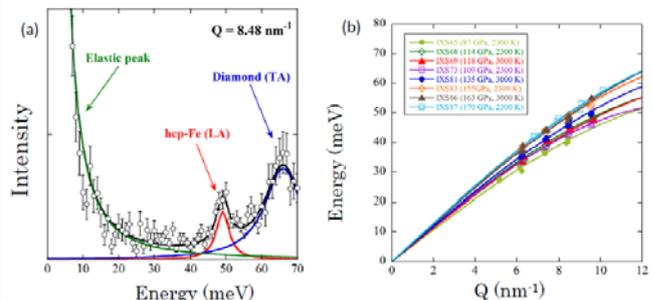


図2. (a) 164 GPa, 3000 Kにおけるhcp-Feの放射光X線非弾性散乱スペクトルの例、(b) 高温高压下におけるhcp-Feの非弾性散乱測定から得られる分散曲線。この分散曲線から縦波速度V_pを決定できる。

度の関係を、世界最高の温度・圧力下で系統的に決定することができる。これによって、外核および内核に含まれる軽元素の種類と量を推定することが可能になり、それにもとづいて、地球核の形成条件を解明することができる。また、地震学的観測データを説明する最適な核の組成と構造のモデルを創出し、地震波異方性、東西半球の不均質性、外核の表層および底部の速度異常、内核と外核の組成の違いなど地球核の未解明問題を解決することができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Sakai T, Takahashi S, Nishitani N, Mashino I, Ohtani E, Hirao N, Equation of state of pure iron and Fe_{0.9}Ni_{0.1} alloy up to 3Mbar. Phys. Earth Planet. Inter., 228, 114-126, 2014.
- Ohtani E, Shibazaki Y, Sakai T, Mibe K, Fukui H, Kamada S, Sakamaki T, Seto U, Tsutsui S, Baron Q. R. A., Sound velocity of hexagonal close-packed iron up to core pressures. Geophys. Res. Lett., 40, 5089-5094, 2013.
- Ohtani, E, Chemical and Physical Properties and Thermal State of the Core. Physics and Chemistry of the Deep Earth, First Edition. Chapter 8, Edited by Shun-ichiro Karato. John Wiley & Sons, Ltd. Published 2013 by John Wiley & Sons, Ltd., 244-270, 2013.

【研究期間と研究経費】

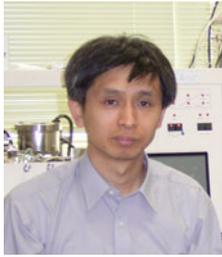
平成 27 年度 - 31 年度
149,700 千円

【ホームページ等】

http://epms.es.tohoku.ac.jp/minphys/j_publications.html
ohtani@m.tohoku.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 新世代の超微量惑星有機化合物研究：感度・分離と質量・空間分解の超高度化

九州大学・大学院理学研究院・教授 ならおか ひろし
奈良岡 浩

研究課題番号：15H05749 研究者番号：20198386

研究分野：地球惑星科学、地球宇宙化学

キーワード：惑星物質、微量有機化合物、高感度、高分解能

【研究の背景・目的】

有機化合物は宇宙地球環境に広く存在し、炭素(C)を骨格として、水素(H)・窒素(N)・酸素(O)・イオウ(S)を結合することにより、多種多様な化学構造をとることが大きな特徴である。近年の研究によれば、始原的な炭素質隕石には十万以上の CHNOS からなるイオン質量が検出され、複数の同位体からの寄与を考へても、構造異性体や立体異性体を含めて、数十万種以上の有機化合物が存在すると考えられる。今まで地球外物質に同定された化合物は全体の1%程度に過ぎない。また、小惑星リターン物質や深海掘削岩石の試料量は極めて限られており、惑星物質から有機化合物に関する多くの情報を引き出すためには分析の感度や分離、質量分解を超高度化することが必須である。さらに、惑星物質では有機物が鉱物と強く相互作用している。そこに含まれる有機化合物を従来のイオンビームやレーザーでイオン化し、その場局所分析することは難しく、新しい分析法の開発が必要である。一方で、最近の技術進歩は著しく、分析の超高度化を実現できる状況にある。

本研究の目的は、惑星物質中に存在する数万に及ぶ有機化合物を今まで到達し得なかった超高度感度・超高分離・超高質量分解能・空間分布で研究する新世代の研究手法を確立し、構造の多様性と反応過程を明らかにするとともに、微小惑星物質の有機化合物分析を成功させることである。

【研究の方法】

最新の分析技術を駆使または開発して、1)有機化合物の検出感度において、現在のフェムトモル(10^{-15} mol)からアットモル(10^{-18} mol)まで高度化し、zeptoモル(10^{-21} mol)をも視野に入れる。そのためには、2)化合物のイオン化などの効率の上昇だけではなく、

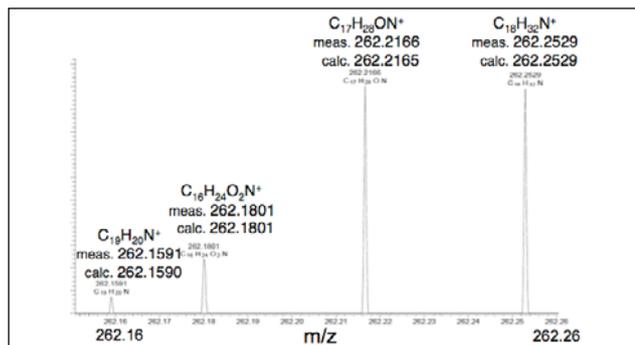


図1 超高分解能質量分析

分析バックグラウンドを極低減化する必要がある。そのために有機化合物専用のクリーンルームを設置し、汚染防止技術も確立する。3)質量分析における分解能を高度化(質量分解能数十万)し、測定イオンの精密質量を用いて組成式決定を行う(図1)。多段階イオン化質量分析も行って化学構造を推定する。4)分離をシリカモノリスカラムやナノ液体クロマトグラフィーなどを用いて高分離を通常化する。複数のカラムを用いて分離を多次元化し、構造異性体や光学異性体も決定する。さらに、5)惑星試料表面の有機化合物をイオン化溶媒の吹付と加熱を組み合わせ、マイクロメートルスケールでその場局所分析する手法を開発する。

【期待される成果と意義】

本研究によって、非常に多様な混合物である惑星有機物について、これまでの5~10倍の化合物を同定定量することができ、起源と反応過程の解明に大きな成果が期待できる。また、今までミリグラム単位の試料が必要だった研究をマイクログラム単位の試料量で遂行できる。2020年に帰還予定の「はやぶさ2」やその数年後のNASA・OSIRIS-RExなどのサンプルリターン計画でもたらされる微小惑星物質の有機物研究を成功させる技術の確立が期待できる。

さらに、惑星試料のみならず、環境や生体などの様々な試料中に存在する極超微量有機化合物研究にも新たな展開をもたらすことは確実である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Yamashita and H. Naraoka (2014) Two homologous series of alkylpyridines in the Murchison meteorite. *Geochem. J.*, **48**, 519-525.
- H. Naraoka, et al. (2012) Preliminary organic compound analysis of microparticles returned from Asteroid 25143 Itokawa by the Hayabusa mission. *Geochem. J.*, **46**, 61-72.

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
154,800千円

【ホームページ等】

<http://orge.geo.kyushu-u.ac.jp/HN/Japanese.html>
naraoka@geo.kyushu-u.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 2次元画像比較を駆使した 超高磁場リコネクションの巨大加熱・加速 の解明と応用開拓

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授 **おの やしひ**
小野 靖

研究課題番号： 15H05750 研究者番号： 30214191

研究分野： プラズマ科学

キーワード： 磁気リコネクション、高磁場プラズマ合体、イオン加速・加熱、電子加速・加熱、2次元画像比較

【研究の背景・目的】

短時間に巨大な加熱・加速を生む磁気リコネクション現象。その謎の多いエネルギー変換機構を、1) ダウンサイズと電源強化によって再結合磁場を高磁場化したトカマク合体実験、即ちリコネクション加速・加熱が十分大きく、損失を無視できるクリアな実験によって解明する。2) イオン温度、電子温度・密度、磁場、電場の2次元高精細画像計測を開発し、3) 初めて粒子シミュレーション、太陽・磁気圏観測と実験を直接2次元画像で比較する。独自成果に基づく高磁場化と独自の2次元計測に加え、実験・観測・計算の緊密連携で世界をリードする。エネルギー変換の有力候補：アウトフロー加速、ショック加熱、負電位井戸への静電加速等のイオン加速・加熱、オーム加熱、波乗り加速等の電子加速・加熱を解明し、実験・観測のスケール差を超えた統一理解を得ると共にリコネクション加熱の応用を開拓する。

【研究の方法】

移設・新設で容量アップした電源を小サイズの高磁場コイルに適用し、小サイズだが高磁場のトカマク合体を実現し、加熱に対し損失が無視できるクリアなリコネクション加熱実験を実現する。リコネクション加熱の再結合磁場依存性について3桁程度の比例則へ延長し、2次元ドップラー型イオン温度・流速画像、2次元トムソン散乱の電子温度・密度画像、プローブによる2次元磁場・電場の画像計測を完成する。多数の視線に沿ったライン光の積分値を各波長で特殊な逆変換を行い、局所のスペクトルに直して2次元イオン温度・流速を算出し、2次元トムソン散乱は、2次元平面内でレーザを往

復反射させて、時間遅れのある各点の信号を1次元分の分光器で計測する独創的なものである。10を超える加速・加熱機構を検証し、A) MHD的解釈、B) 運動論的解釈、C) 非熱的粒子加速の相互関係と全体像を明らかにする。実験室で得た2次元画像を、粒子シミュレーション、太陽コロナ・彩層の観測画像と直接比較し、共通する謎：A) 磁気エネルギーの2割に匹敵する巨大加熱、B) 局部的にイオンや電子に偏った加熱、C) 熱平衡を外れた高エネルギー粒子発生を解明し、分野間のスケールギャップをできるだけ埋めた一貫性ある学理を求め、最後に巨大で急速な加熱・加速の応用を図る。

【期待される成果と意義】

更なるテストが行われる再結合磁場の2乗に比例するリコネクション加熱比例則によって、1) 装置を高磁場化すれば高温・低損失を実現でき、損失項が影響しないクリアカットなリコネクション加熱実験がはじめて実現できる。2) 加熱物理パラメータを初めて全て2次元画像計測し、提案された多くの加熱・加速機構を検証できる。3) 室内実験の2次元計測画像を直接、太陽衛星観測や粒子シミュレーションとはじめて2次元画像比較することで、共通する謎：巨大イオン加熱、局所電子加熱、高エネルギー粒子生成を解明できよう。4) 異分野間の画像比較は、スケール差があっても広範囲で一貫性のあるリコネクション加熱物理を導き、世界をリードする独創的実験研究を打立てる意義がある。5) スケール融合された一貫性のあるリコネクション加熱・加速物理を目指す点も独創的であり、6) 応用開拓も、まず核融合プラズマの急速加熱等が期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Y. Ono et al., Plasma Phys. Controlled Fusion 54, 124039 (2012)
- ・ Y. Ono et al., Physical Review Letters 107, 185001 (2011),
- ・ 小野靖：パリティ 28, pp.14-15, (2013).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 - 31 年度
153,900 千円

【ホームページ等】

<http://tanuki.t.u-tokyo.ac.jp/kibanS/ono@k.u-tokyo.ac.jp>

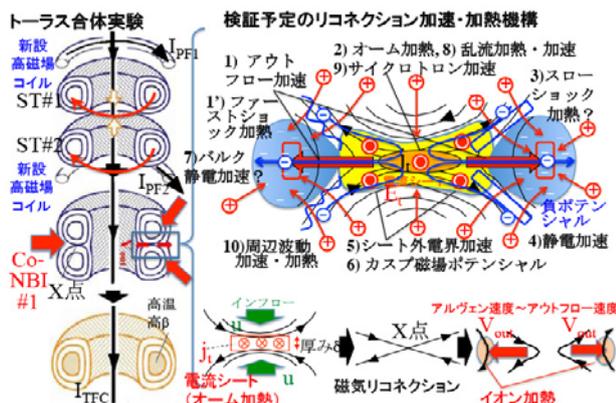
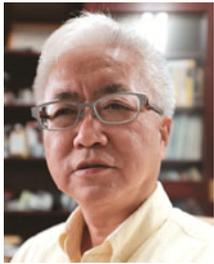


図1 トーラスプラズマ合体実験(左)とそれを用いて検証予定の磁気リコネクションの粒子加速・加熱機構(右)



研究課題名 Super-penetration を用いた高速点火の加熱検証

大阪大学・大学院工学研究科・教授 たなか かずお
田中 和夫

研究課題番号: 15H05751 研究者番号: 70171741
研究分野: プラズマ科学
キーワード: 高速点火、レーザー自己集束、高速電子

【研究の背景・目的】

レーザー核融合研究では、高速点火方式の検証は、現在米国で進められている中心点火方式に対する重要なオプションとして位置づけられている。我々はスーパーペネトレーション(以下 SP と略)と呼ぶレーザー自己集束現象を発見し、この 10 年間基礎実験でこの SP 手法を高速点火へ応用するメリットを示してきた。SP とは、レーザー光が相対論効果と光圧力効果を伴い臨界密度を超える高密度プラズマの中を自己集束し、穿孔する現象である。高速点火への SP の有効性を最終的に示すには、高密度に爆縮された燃料プラズマに SP により超高強度レーザーを注入し、プラズマ加熱を実証する必要がある。本研究で

- 【1】点火級の大規模プラズマスケール長を持つ平面プラズマにおいて SP 観測に必要な計測手法を開発しつつ、SP の特性評価を行い、更に
- 【2】点火級の重水素燃料を伴う高密度爆縮実験において高速点火の加熱を実証 (加熱実験) する。

【研究の方法】

[初年度] 高密度プラズマ中での SP が伝搬する様子を観測する計測手法を開発する。電子スペクトロメータ、イオンエネルギーアナライザ、X線コントラストイメージング技法などを含む。

[二年度] SP の最適化を行う。レーザーは、基本仕様として、単パルスを用いる。プラズマには、平面形状のものを用いる。

コロナプラズマ中をレーザー自己集束で進入する加熱レーザー(強度 $>10^{19}$ W/cm²)

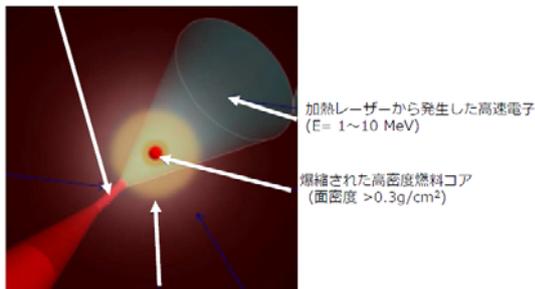


図1 スーパーペネトレーション手法による高速点火加熱実験レイアウト

[三年目] SP の最適化を行う。レーザーは、基本仕様として、ダブルパルスを用いる。プラズマには、平面形状のものを用いる。

[四年目] 最適を行った条件で、プラスチックシェルターゲットを使った高密度コアへ SP による加熱を試みる。

[五年目] 最適を化行った条件で、重水素・三重水素シェルターゲットを使った高密度コアへ SP による加熱を試みる。

【期待される成果と意義】

SP 手法を使い、点火条件である爆縮面密度 0.3g/cm^2 の重水素燃料コアに対して加熱を検証する。この爆縮コアは、ロチェスター大学の実験で既に達成されており本申請で加熱対象とすることが可能である。成果は高速点火方式が実際に機能する証明となり点火条件を確立することが出来る。研究過程での相対論電子のエネルギー輸送などの成果は、プラズマ非線形物理、粒子加速、実験室宇宙物理、状態方程式、極限物質創成など複数のプラズマ科学分野へ新規の知見と理解を与え、大きく貢献することが可能となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

Efficient propagation of ultra-intense laser beam in dense plasma, H Habara, S Ivancic, K Anderson, D Haberberger, T Iwawaki, C Stoeckl, KA Tanaka, Y Uematsu, and W Theobald, Plasma Phys. Contr. Fus., 57, 064005 (2015).
Collimated fast electron beam generation in critical density plasma, T Iwawaki, H Habara, S Baton K Morita, J Fuchs, S Chen, M Nakatsusumi, C Rosseaux, F Flippi, W Nazarov and KA Tanaka, Phys. Plasmas 21, (2014).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 - 31 年度
145,000 千円

【ホームページ等】

<http://www.eie.eng.osaka-u.ac.jp/le/en/>

【基盤研究(S)】

理工系 (化学)



研究課題名 電荷分離, プロトン移動, 電子伝達, 巨大電子状態 揺らぎの非断熱電子化学

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

たかつか かずお
高塚 和夫

研究課題番号: 15H05752 研究者番号: 70154797

研究分野: 理論化学、励起状態の物理化学、化学動力学

キーワード: 非断熱電子動力学、電荷分離、電子移動、プロトン移動

【研究の背景・目的】

「超ボロン・オッペンハイマー (BO) 化学」を、BO近似からかけ離れているために、新しい現象や法則が出現する化学領域と定義する。従って、BO近似に依拠する現代の量子化学では扱うことができない現象群を研究対象とする。これはBO近似の精度を高めるという意味ではなく、質的に新しい現象に化学の可能性を展開していくということである。特に、(1) 電子の一般時間依存非断熱動力学と特に、プロトン移動と電子移動の結合、(2) 密集する擬縮重電子状態において、非断熱相互作用が生み出す巨大電子状態揺らぎ、(3) 超高速・高強度のレーザー場と電子動力学との相互作用、を見掛け上様々な形で表れる化学的諸現象に通底する事象と認識し、それらの基本的解明と科学的制御の方法を、以下の具体的テーマに沿って展開する: (A) 原子クラスターの励起状態における超巨大電子状態揺らぎの解明と応用、(B) 原子クラスターと電解質間の電子授受のメカニズムの非断熱電子動力学による解明と制御、(C) 光合成の初期過程や水分子の光分解などにおける電荷分離と、それに引き続くプロトンリレーと電子伝達の動的メカニズムの解明、(D) 生体膜を越えて一方向に輸送されるプロトンポンプの動的機構の解明を目的として、タンパク質の中のプロトン・電子同時移動反応の超BO理論の展開 (山下雄史氏と共同研究)、(E) レーザー場と非断熱相互作用による新たな現象の探索と分子電子状態制御の方法論の開拓、(F) 非断熱電子動力学理論の基礎となる原子核運動の非BO軌道の多体量子化の展開 (高橋聡氏と共同研究)、等

【研究の方法】

我々は、BO近似の枠組みを超える非断熱電子動力学の方法論を構築してきた。具体的には、原子核と kinematic に結合して運動する電子波束と、分岐しながら電子波動を運ぶ原子核の運動の理論 (path branching representation の理論) であり、現在まで大発展を続けてきた電子状態理論の資産を活かしつつ、電子波束の ab initio 計算ができるようにプログラム化し応用してきた。これらは、すべて超短パルス・高強度場のレーザー中で運動する電子ダイナミクスへと拡張されている。本課題では、高並列化と密度汎関数理論 (DFT) の改変的応用を含めて、励起状態の原子クラスターの構造転移と電子動力学、超高擬縮重系が作り出す反応場、光合成の反応中心の研究、へと拡張する。また、関連するタンパク質

のプロトン移動や電子伝達のタンパク動力学について、超BO法を分子動力学法と結合し、さらに汎用性の高い方法論へと展開する。

【期待される成果と意義】

本研究では、統合的な超BO化学の研究領域の基本を完成させるとともに、新たな理論化学の領域を拓く。上に述べた個別の目標は、普遍的な学理の観点から記述したが、応用研究を通じた諸学術分野との連携研究として以下のものを想定し、実験研究者と広くインタープレイを行う: (1) 電荷分離、電子伝達、プロトン移動の量子動力学的メカニズムの解明に関して、生化学と生体内エネルギー代謝の研究、(2) 超高擬縮重電子状態の電子揺らぎに関して、多ラジカル化学反応論、反応場の化学、クラスター科学、(3) クラスター電極などにおける大きな揺らぎを持つ多体電子動力学 (電解質との電子の授受と化学反応) の速度過程とその制御法の解明に関して、分子エネルギー工学、電気化学、クラスター化学、物性科学、(4) 励起状態の非断熱電子動力学や光誘起酸化還元反応に関して、励起状態化学、光化学、(5) レーザー場と非断熱電子状態との相互作用に関して、アト秒レーザー科学を始めとする超高速反応動力学と制御の実験研究、などである。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

“Fundamental Approaches to Nonadiabaticity: Towards a Chemical Theory beyond the Born-Oppenheimer Paradigm”, T. Yonehara, K. Hanasaki, K. Takatsuka, *Chem. Rev.* **112**, 499-542 (2012).

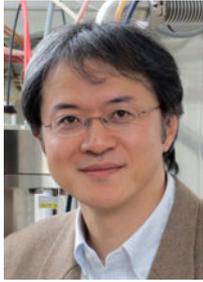
“Chemical Theory beyond the Born-Oppenheimer Paradigm: Nonadiabatic Electronic and Nuclear Dynamics in Chemical Reactions”, K. Takatsuka, T. Yonehara, K. Hanasaki, and Y. Arasaki (World Scientific, Singapore, 2014)

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 - 31 年度
126,800 千円

【ホームページ等】

<http://mns2.c.u-tokyo.ac.jp>
kaztak@mns2.c.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 液体の超高速光電子分光による溶液化学反応の研究

京都大学・大学院理学研究科・教授 **すずき としのり**
鈴木 俊法

研究課題番号： 15H05753 研究者番号：10192618

研究分野： 基礎化学

キーワード： 溶液化学、非断熱反応、超高速光電子分光、真空紫外光

【研究の背景・目的】

20世紀初頭の量子力学の建設以来、量子力学や統計力学などの物理学理論が分子の諸問題に応用され、分子の構造・反応・物性の微視的な理解は深まったが、disorderの激しい溶液の研究は多くの難問に阻まれている。とりわけ挑戦的な問題は水溶液化学の解明である。水は自然界では最も重要な溶媒であると同時に、水素結合に基づく特異な物性を持つ難解な溶媒でもある。分子が水和する（水に溶ける）と、極性分子である水との間に静電的相互作用が発生し電子状態が大きく変化すると共に、溶質-水分子間の水素結合によって溶質原子の運動も大きく変わる。さらに、水は電子移動反応やプロトン移動反応に供与体や受容体として積極的に参加もする。生命は、このような水溶液化学の特質を巧みに利用しているに違いないが、その詳細は解明されていない。多数の分子を含む水溶液に対して厳密な量子力学的シミュレーションを行うことは、現時点では不可能である。

本研究は、水溶液化学反応を電子や原子の運動状態のレベルで詳細に解明するために、溶質と水和殻が一体となったダイナミクスを超高速光電子分光法でリアルタイムに追跡する。これまで液体の超高速光電子分光は実現した例は無かった。我々は開発研究を10年以上粘り強く継続し、2010年に世界で初めて実現することに成功した。以来4年間に、液体流の制御方法や角度異方性測定法の開発を着実に進め方法論の確立を行った。本研究では、9 eV以上の光子エネルギーを持つ真空紫外フェムト秒パルスを観測光として導入し、三重項状態への項間交差や基底電子状態への内部転換、それに伴う異性化反応など光化学・光物理過程の全貌を観測することを可能にする。また、光エネルギー変換に重要な光触媒微粒子の光物性や酸化還元反応を明らかにし、当該分野の研究を飛躍的に発展させる。

【研究の方法】

加圧した常温の水溶液を内径20ミクロン程度のキャピラリーノズルから真空中に層流として射出する。ノズル下流1mm以下の地点で、液体流にフェムト秒可視・紫外光パルスを照射し、水溶液中の溶質分子に光化学反応を起こさせる。遅延時間をおいたフェムト秒真空紫外光パルスを照射し、光化学反応途上の分子から電子を放出させる。電子を細孔を通して飛行時間型エネルギー分析器に導入しエネルギー分布を測定する。真空紫外光の遅延時間を変化させながら、光電子エネルギー分布を測定することで、電

子状態変化や化学反応を明らかにする。同一の反応を軽水(H_2O)や重水(D_2O)中で研究することで、反応に対する溶媒の動力学的効果を明らかにすることができる。真空紫外光発生には、我々が開発したフィラメンテーション四光波混合を用いる。すなわちチタンサファイアレーザーの基本波と二倍波を希ガス(ネオン)中に緩やかに集光して非縮退四光波混合を起こし、260から133nmの紫外光や真空紫外光を20フェムト秒以下の極短パルスとして同時発生する。

【期待される成果と意義】

化学者は何世紀にもわたり化学反応に対する溶媒効果を物質合成の制御に利用してきたが、その本質は明らかで無い。水は生命現象にも不可欠であり、水溶液反応における水の積極的な反応への関わりを理解することは極めて重要な科学的課題である。本研究は、光励起直後のFranck-Condon状態から最終生成物に至るまで、水溶液中の分子がどのような電子状態の変遷を経て反応に至るか、化学反応経路がどのように分岐し、そこに水がどのように積極的な役割を果たしているかという基礎化学的な問題を解明する。光エネルギー変換の基礎的な物理・化学過程の解明は幅広い応用に資する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- "Time- and angle-resolved photoemission spectroscopy of hydrated electrons near a liquid water surface", Y. Yamamoto, Y. Suzuki, G. Tomasello, T. Horio, S. Karashima, R. Mitrić, and T. Suzuki, *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 187603 (2014).
- "Direct measurement of vertical binding energy of hydrated electron", Ying Tang, Huan Shen, Kentaro Sekiguchi, Naoya Kurahashi, Yoshi-Ichi Suzuki, and Toshinori Suzuki, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **12**, 3653-3655 (2010)

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
146,500千円

【ホームページ等】

[http:// kuchem.kyoto-u.ac.jp/bukka/](http://kuchem.kyoto-u.ac.jp/bukka/)

【基盤研究(S)】

理工系 (化学)



研究課題名 活性炭素クラスター集積体の階層的次元制御と機能発現

東京大学・大学院理学系研究科・教授

なかむら えいいち
中村 栄一

研究課題番号：15H05754 研究者番号：00134809

研究分野：有機化学

キーワード：物理有機化学、自己組織化

【研究の背景・目的】

分子構造の分析と設計・合成は有機化学研究の古典的パラダイムである。しかし、有機化学研究の領域が大きく広がった今日、分子設計・合成だけでは充分ではなく、原子や分子の集合体とその時空間展開の制御が必須となった。

本研究では、生物活性や物性発現を司る有機分子の設計・合成と機能発現を目指して、液相及び固相における時間軸を含んだ有機分子の階層的次元制御を目的に研究を行う。これまで代表者が核酸デリバリーや有機太陽電池開発を念頭に置いて研究実績を積み重ねてきた。 π 共役分子やフラーレンのような沢山の炭素原子からなる炭素クラスター化合物群の持つ多彩な機能に着目し、分子集積体の挙動の時空間次元制御に関する理解を深め、かつ、医学及び産業応用への道を探る。

【研究の方法】

フラーレン、ポルフィリン、架橋共役系などの活性炭素クラスター化合物群は、自身の構造変化に伴うエントロピー変化が少なく安定な会合体を形成する π - π 相互作用に基づく強い会合体、高い対称性ゆえに次元制御が容易である一方で、化学、物理、生物学的活性に富む興味深い化合物であるため、本研究課題の題材として最適である。これらの化合物の液体及び固体中での1-3次元組織体の構築を行い、ミセルやベシクル形成、ナノ粒子の可溶化を行い、ここでの分子集積機構を解明する。この知見を基に、

ドラッグデリバリー機能及びイメージング機能など生物学的応用や、有機レーザーや光センサーなど有機デバイスへの応用を行う。

分子設計と合成(0次元)という有機化学の基盤に、

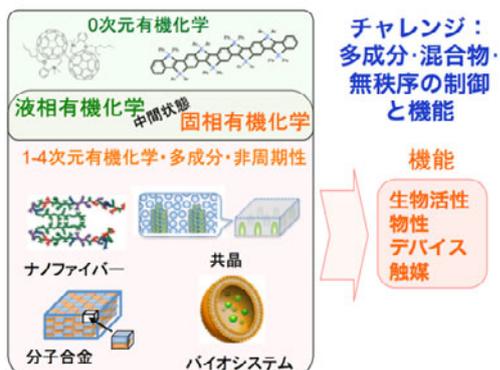


図1 有機化学を基盤とした新しいパラダイム

液相、固相、中間相での単一または複数種類の分子や粒子の1-3次元集積体の構造とその時間展開(4次元)の化学という新しいパラダイムを取り込み、以って生物活性、物性・デバイス機能で新展開を図る。

【期待される成果と意義】

生物活性や光電子物性発現を司る、有機分子の設計・合成と分子集積体の階層的次元制御は、実社会の課題とも直結する一方で、これまでの有機化学研究の枠組みを超えた新しい学術的課題であり、本研究の成果は、基礎科学のみならず、医学及び電気電子産業の未来を切り拓く基盤を提供するものである。

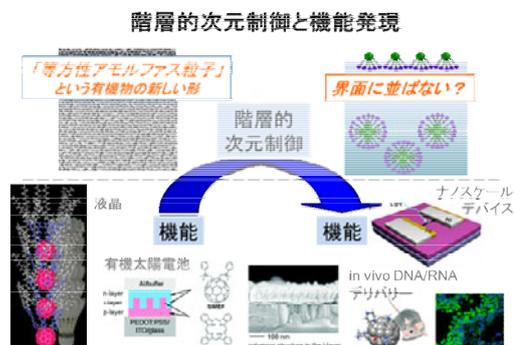


図2 階層的次元制御と機能発現

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- siRNA Delivery Targeting to the Lung via Agglutination-Induced Accumulation and Clearance of Cationic Tetraamino Fullerene, K. Minami, K. Okamoto, K. Doi, K. Harano, E. Noiri, E. Nakamura, *Sci. Rep.*, **4**, 4916 (2014).
- Electron Transfer Through Rigid Organic Molecular Wires Enhanced By Electronic and Electron-Vibration Coupling, J. Sukegawa, C. Schubert, X. Zhu, H. Tsuji, D. M. Guldi, E. Nakamura, *Nat. Chem.*, **6**, 899-905 (2014).

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
126,600千円

【ホームページ等】

<http://www.chem.s.u-tokyo.ac.jp/users/common/NakamuraLab.html>



研究課題名 高機能酸塩基複合ナノ触媒の開発

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

いしはら かずあき
石原 一彰

研究課題番号： 15H05755 研究者番号： 40221759

研究分野： 有機化学

キーワード： 有機合成化学

【研究の背景・目的】

数万から数10万の分子量を誇る酵素は、精巧な鍵穴を有し、穏やかな反応条件下、基質特異的かつ立体特異的に反応を促進させることができる。一方、数百の分子量サイズで人工設計された合成容易な単一分子触媒は、基質一般性に優れるものの選択性では酵素に及ばない。本研究課題では、酸塩基複合化学の概念を用い、予め分子設計した小分子の酸と塩基から自己組織化によって *in situ* で数千の分子量サイズの超分子構造を組み上げ、従来の単一分子触媒と同程度の合成労力で、酵素に匹敵あるいは凌駕する高次選択性を有するナノサイズの触媒(数 nm ~ 10 nm)の創製を目指す。言い換えれば、酵素や単一分子触媒で達成困難な高次選択的反応を制御するための鍵穴と触媒活性点を有するテラーメイド型超分子触媒の開発を研究目的とする。

【研究の方法】

酸塩基複合化学を基盤に、非共有結合性相互作用(水素結合、ハロゲン結合、イオン結合、*n*-カチオン、 π -カチオン、 π - π 、疎水性、親水性、フルオラス性等)、共鳴効果、誘起効果、動的平衡を活かしたナノサイズの超分子触媒を設計し、従来法では実現困難な高難度な選択性と高い触媒活性を発現する高機能触媒を開発する(図1)。高機能発現には触媒活性中心近傍のナノ空間制御が最重要課題となる。以下、具体的な研究計画を示す。

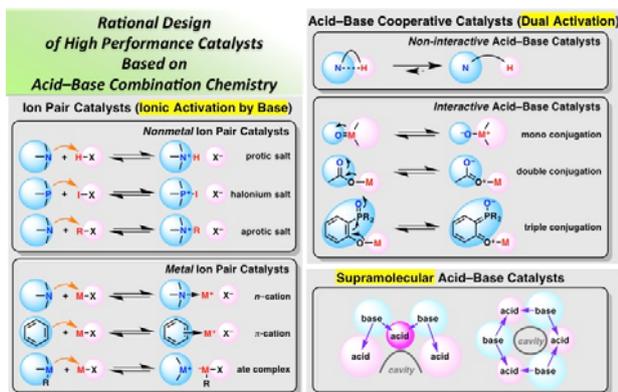


図1 酸塩基複合化学を基盤とする触媒設計

- (1) 酸複合型塩基触媒を用いる高次選択的ポリエン環化反応の開発
- (2) 塩基複合型酸触媒を用いる高次選択的環化付加反応の開発

(3) イオン対型酸化触媒を用いる高次選択的脱水素カップリング反応の開発

【期待される成果と意義】

酵素のような高度な選択性の発現には、配座柔軟性に富んだ精密触媒の設計が必要不可欠である。触媒の鍵穴は基質を選択的に取り込み、反応遷移状態を活性化し、生成物を吐き出す必要がある。そのような動的変化(誘導適合)に鍵穴は対応する必要があり、ある程度の配座柔軟性と非共有結合性の微弱な相互作用によって鍵穴の動的変化を制御しなくてはならない。本研究を通して酵素を凌駕するテラーメイド触媒の設計法を開拓し、医薬・有機材料の新規開発・製造プロセスの革新に繋げたい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- “Enantioselective halocyclization of polyprenoids induced by nucleophilic phosphoramidites,” Sakakura, A.; Ukai, A.; Ishihara, K. *Nature* **2007**, *455*, 900–903.
- “Enantioselective Diels-Alder reactions with anomalous endo/exo selectivities using conformationally flexible chiral supramolecular catalysts,” Hatano, M.; Mizuno, T.; Izumiseki, A.; Usami, R.; Asai, T.; Akakura, M.; Ishihara, K. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 12189–12192.
- “High-turnover hypiodite catalysis for asymmetric synthesis of tocopherols,” Uyanik, M.; Hayashi, H.; Ishihara, K. *Science* **2014**, *345*, 291–294.

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 – 31 年度
153,800 千円

【ホームページ等】

[Website] <http://www.ishihara-lab.net>
 [Facebook Page] <https://www.facebook.com/kishiharalab>
 [Twitter] <https://twitter.com/PIodide>
 [E-mail] ishihara@cc.nagoya-u.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系 (化学)



研究課題名 光と金属を用いる直截的分子変換手法の開発

京都大学・大学院工学研究科・教授 村上 正浩

むらかみ まさひろ

村上 正浩

研究課題番号：15H05756 研究者番号：20174279

研究分野：合成化学

キーワード：分子変換、光、触媒

【研究の背景・目的】

有機合成化学には、医薬品や高機能材料に至るまで、社会が必要とする様々な有機化合物を合成するためのより良い手法を提供することが求められている。社会がゆゆしきエネルギー問題や資源問題に直面している現在、多段階の官能基変換を経て目的化合物に至る従来型の合成経路を刷新することが緊喫の課題となっている。このような要請に応えるべく、本研究ではより直截的に分子を変換する手法を開拓する。すなわち、できる限り入手の容易な化合物から出発して、できる限り少ない工程と単離操作を経て目的化合物のみを選択的に得ることを可能にする新しい合成手法を開発することを目指す。

【研究の方法】

本研究では光と金属触媒がもつ特性に着目して入手容易な分子を直截的に変換する手法を開拓する。とくに(1)非極性 σ 結合の活性化を経る直截的分子変換、(2)アルキンを起点とする直截的ワンポット多官能基化の二つの重点目標を設定して多角的に研究を推進する。

(1) 非極性 σ 結合の活性化を経る直截的分子変換

炭素-炭素結合や炭素-水素結合などの非極性 σ 結合はほとんどすべての有機化合物に普遍的に存在する。一般に熱力学的に安定である上に、速度論的にも触媒・反応剤と相互作用しづらく、選択的に変換することは極めて難しい。しかし、逆にこれらを自在に反応させることができるようになれば、従来の多段階の官能基変換を経る合成経路を刷新できると期待される。本研究では、光と遷移金属触媒を併せて用いる独自のアプローチで、炭素-炭素単結合や炭素-水素結合を直截変換する反応を開発する。求エルゴニックな光反応による高エネルギー化合物の生成と遷移金属触媒による高エネルギー化合物の反応をそれぞれ検討するとともに、この両者が協同的に機能して初めて進行する斬新な触媒反応の開発も目指す。

(2) アルキンを起点とする直截的ワンポット多官能基化

アルキンは多様な誘導体が市販されているほか、様々な合成法が確立されており、最も入手容易な原料の一つである。そこでアルキンから出発して、炭素-炭素結合の生成や官能基の導入など複数の分子変換をワンポット(1つのフラスコ内)で連続的に行い、分子の複雑さ(molecular complexity)を一挙に増す変換手法を開発する。例えば、末端アルキンより簡便に調整されるトリアゾールに内在する未開

拓の反応性を有機合成化学の観点から明らかにすることで、アルキンからトリアゾールの生成、トリアゾールからカルベン錯体の生成、カルベン錯体と求核的な分子との反応、生成物のさらなる化学変換を一つのフラスコ内で連続的に行う分子変換を実現する。これによって、実用的な観点から強く求められている合成経路の短工程化と単離操作回数の削減を図る。

【期待される成果と意義】

従来の有機合成化学は、炭素-ハロゲン結合や炭素-金属結合などの活性な結合の反応を駆使して行われてきた。このため、しばしば保護・脱保護などの多段階の官能基変換を必要としていた。これに対して本研究では、入手容易な化合物を原料として、多段階の変換を必要としない、直截的な分子変換を実現する。有機合成に格段の効率化をもたらし、環境負荷の低減、医薬品・機能性材料の開発研究の高速化に資す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】

- Naoki Ishida, Shota Sawano, Masahiro Murakami, Stereospecific ring expansion from orthocyclophanes with central chirality to metacyclophanes with planar chirality, *Nature Commun.* **2014**, *5*, 3111.
- Tomoya Miura, Takayuki Nakamuro, Chia-Jung Liang, Masahiro Murakami, Synthesis of *trans*-Cycloalkenes via Enantioselective Cyclopropanation and Skeletal Rearrangement, *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 15905.

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度-31 年度
154,600 千円

【ホームページ等】

<http://www.sbchem.kyoto-u.ac.jp/murakami-lab/index.html>

【基盤研究(S)】

理工系 (化学)



研究課題名 精密無機合成を基盤とする超原子の創成と機能解明

東京工業大学・資源化学研究所・教授 やまもと きみひさ
山元 公寿

研究課題番号： 15H05757 研究者番号： 80220458
研究分野： 高分子錯体科学、機能材料化学
キーワード： デンドリマー、クラスター、超原子

【研究の背景・目的】

種類豊富な 90 種類近くの金属元素を原料に、元素を原子単位で自在に操る精密金属合成プロセスは、次世代ナノ材料の飛躍的な拡張と進化をもたらすが、未だ実現されていない。

本研究は研究代表者が独自に開発した精密金属集積反応法を駆使し、未開拓物質である多元素物性を発現するサブナノサイズの合金微粒子を先駆け創製し、その機能の実証から新しい物質群を開拓するものである。

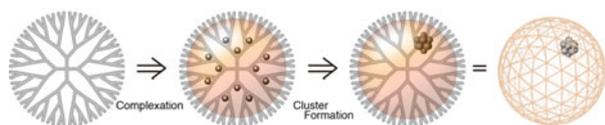
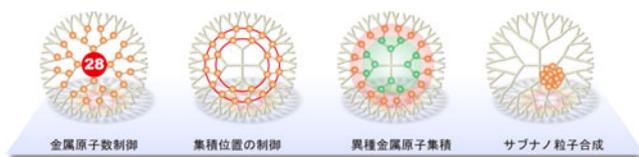


図 金属集積とサブナノ粒子合成

【研究の方法】

本研究は、①精密無機合成プロセス「精密金属集積合成法」の確立、②サブナノサイズの金属粒子の創製、③サブナノ金属粒子の機能解明の 3 項目により新しい無機ナノ材料を提案する。

1. 精密金属集積合成法の確立：金属集積のバリエーションを拡張するため、新しいデンドリマーテンプレートを設計し合成する。
2. サブナノサイズの金属粒子の合成：サブナノサイズの金属粒子および酸化物微粒子の合成を確立し、構造の詳細な解明と酸化還元電位、配位数、原子価数、電子スペクトルなどの基礎物性を明らかにする。特に、構成元素と大きく特性が異なるサブナノ粒子、すなわち、超原子を探索する。
3. サブナノ粒子の機能の解明：精密サブナノ粒子の発光、磁性、触媒などの機能を解明し、有用性を実証したい。

【期待される成果と意義】

90 種類近く存在する豊富な金属元素は無数の組み合わせがあり、原子単位で金属元素をハイブリッドさせる精密無機金属合成化学は無尽蔵のナノ材料を誕生させることができる。

超原子の発見は元素の特性を他の元素で置き換える事ができるわけで、新しい物質群となり得る。

現在のナノサイズの粒子の応用範囲の広さから考えれば、サブナノサイズの金属粒子も現在の科学技術に幅広く波及すると考えられる。例えば、環境触媒、常温作動燃料電池、高密度メモリー、自然光薄膜太陽電池などの緊急課題にも密接に関連しており、次世代を支える新技術に役立つことを期待している。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- "Magic Number Pt₁₃ and Misshapen Pt₁₂ Clusters: Which One is the Better Catalyst?" T. Imaoka, H. Kitazawa, W.-J. Chun, S. Omura, K. Albrecht, K. Yamamoto, *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, 135, 13089 -13095.
- "Formation of a Pt₁₂ Cluster by Single-Atom Control That Leads to Enhanced Reactivity: Hydrogenation of Unreactive Olefins" M. Takahashi, T. Imaoka, Y. Hongo, K. Yamamoto *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, 52, 7419-7421.
- "Size-specific catalytic activity of platinum clusters enhances oxygen reduction reactions" K. Yamamoto, T. Imaoka, W. Chun, O. Enoki, H. Katoh, M. Takenaga, A. Sono, *Nature Chem.* **2009**, 1, 397-402.
- "Quantum size effect in TiO₂ nanoparticles prepared by finely controlled metal assembly on dendrimer templates." N. Satoh, T. Nakashima, K. Kamikura, K. Yamamoto, *Nature Nanotechnol.* **2008**, 3, 106-111.

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 - 31 年度
154,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.res.titech.ac.jp/~inorg/yamamoto/>

【基盤研究(S)】

理工系 (化学)



研究課題名 ソフトマテリアルの自律性を支配するイオン液体の役割

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

わたなべ まさよし
渡邊 正義

研究課題番号：15H05758 研究者番号：60158657

研究分野：有機材料化学

キーワード：ゲル、イオン液体、ソフトマテリアル、自律性、自己集合

【研究の背景・目的】

高分子ゲル・コロイドなどのソフトマテリアルは、その構成成分のほとんどが液体である場合が多い。このことが物質内の大きな内部自由度を生み、外部刺激の微細な変化にตอบสนองして的確に機能するスマートマテリアルとしての期待も大きい。しかし、これまでの研究は、概して高分子に視点が集中していて、主構成成分である液体の構造、あるいは高分子に誘起される液体構造変化に着目した研究は少ない。

これらソフトマテリアルの自律的な構造形成・揺ぎ・転移（これらを総称して**自律性**と呼ぶ）は液体の構造形成性にその根源があるとの視点が本研究の原点である。具体的には、構造形成性液体としてイオン液体を選択し、これを用いたソフトマテリアルの自律性に及ぼす液体の構造形成性・階層性の影響を明らかにすることを目的とする。

【研究の方法】

イオン液体を用いたソフトマテリアルの自律性を、構成液体の構造形成性に相関づけようとする研究は未踏領域であり、研究代表者が世界に先駆けて実施する研究である。本研究では以下の項目を検討、精査し、知見を集積する。

(1) 高分子のイオン液体中への溶解現象の理解

高分子のイオン液体中への溶解性を理解する上で欠かせない視点は、カチオンまたはアニオンと高分子の相互作用に、イオン間相互作用が競合する点である。これは分子性液体には見られない特徴である。溶解性を支配するイオンと高分子との相互作用を、クーロン力、水素結合、カチオン- π 相互作用、van der Waals 力などに分類し、イオン間相互作用との競合という視点で溶解現象の理解を図る。

(2) 温度によるソフトマテリアルの自律性発現

研究代表者らが見出したイオン液体中で上限臨界溶液温度(UCST)型さらに下限臨界溶液温度(LCST)型相分離を示す高分子の相分離現象を、イオン液体の構造形成性、高分子に誘起される液体構造変化という観点から精査する。特に LCST 相分離には構造形成性溶媒和が不可欠であることから力点を置く。この現象を利用した、イオン液体/高分子系の体積相転移、ゾルーゲル転移、ミセル-ユニマー転移を実現・理解する。

(3) 光によるソフトマテリアルの自律性発現

温度により自律性発現する高分子系にフォトクロミック化合物を導入することにより、光によるイオン液体/高分子系の集合状態の転移を実現する。さ

らにこの現象を利用した光治癒材料の実現を図る。

(4) 化学反応によるソフトマテリアルの自律性発現

研究分担者である吉田らにより、イオン液体中での Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応が見出されている。この発見をソフトマテリアルの自律性発現に結び付ける研究を展開し、世界に類を見ないソフトマテリアルを実現する。



図1 ソフトマテリアルのイノベーション。

【期待される成果と意義】

本研究の遂行により、イオン液体を溶媒に用いたソフトマテリアルという新しい物質系の基礎が確立され応用の萌芽が生まれると期待され、その意義は極めて大きい。特に液体の構造形成性に着目してその自律性を整理することは、従来多くの研究が蓄積されて来た、水系ソフトマテリアルに対しても大きな影響を与えると予想する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・ T. Ueki, M. Watanabe, *Macromolecules in Ionic Liquids: Progress, Challenges and Opportunities*, *Macromolecules*, **41**, 3739-3749 (2008).

・ T. Ueki, Y. Nakamura, R. Usui, Y. Kitazawa, S. So, T. P. Lodge, M. Watanabe, *Photoreversible Gelation of a Triblock Copolymer in an Ionic Liquid*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **54**, 3018-3022 (2015).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 - 平成 31 年度
155,300 千円

【ホームページ等】

<http://mwatalab.xsrv.jp/>
mwatanab@ynu.ac.jp



研究課題名 超高精度光ナノグリッド基準と光絶対スケールコム
創出が拓く精密光計測フロンティア

東北大学・大学院工学研究科・教授 **こう い 高 偉**

研究課題番号： 15H05759 研究者番号： 70270816
研究分野： 生産工学・加工学
キーワード： 精密位置決め・加工計測、超精密計測

【研究の背景・目的】

レーザ干渉計などに代表される光計測技術の進歩により、現在ではナノ域精度が実現されている。その一方で、ビックサイエンス、スペーステクノロジーなどの分野では、ナノ域からピコ域へと、より一層の高精度化への要求が高まってきている。更に、半導体製造装置などの産業用先端機器においては、機能の複合化に伴う計測の多軸化が進んでいる。

その一方で、従来の計測システムでは、基準となるレーザ波長の揺らぎ等の影響でナノ域の安定性が限界となっている。また、多軸計測の実現には単軸計測センサを複数組み合わせる必要があるが、それに伴い累積する誤差が無視できない。そのため、新しい高安定基準に立脚した多軸精密光計測学によるピコ域高安定計測の実現が課題となっている。

申請者らは、グリッド基準を用いた多軸光センサと自律校正法を基盤とした精密ナノ計測学を構築してきた。本研究では、ピコ域の超高安定性を有する超高精度大面積光ナノグリッド基準と多軸光絶対スケールコムを創出し(図 1)、次世代のピコ域精度を実現する精密光計測のフロンティアを切り拓く。

【研究の方法】

1. 大面積高安定光ナノグリッド基準の創出

高精度干渉グリッド定在波をフォトレジスト層に露光する波面分割型 2 軸干渉光学系を構築して、大面積フォトレジストナノグリッドを高精度一括露光する。さらに、それをマスクにしてガラス基板をエッチング加工することで、従来の軟質金属より高安定なガラス製光ナノグリッド基準を実現する。

2. 光ナノグリッド基準の一括自律校正法の提案

レーザ干渉形状測定機を用いて、ナノグリッドピッチ誤差と平面度を評価する手法を確立する。測定機の参照平面誤差を一括で求められる誤差分離型自律校正法の導入により、外部基準に制限されずに、干渉形状測定機の安定性限界の精度での 3 次元ナノグリッド構造全面評価を実現する。

3. 超高精度光絶対スケールコムの提案

光ナノグリッド基準と光周波数コムの融合により、光絶対周波数コムを 10 pm 級多軸光絶対スケールコムに変換するユニークな新学理を確立する。光周波数コムの超高安定性を生かした、超高安定な多軸光絶対スケールコムの創出により、ナノ計測からピコ計測へのパラダイムシフトを実現する。なお、本研

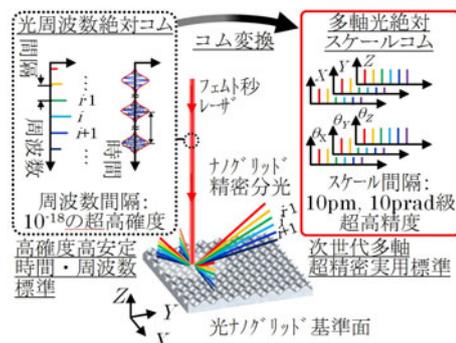


図 1 多軸光絶対スケールコム

究では GPS 同期による光絶対スケールコムの更なる高精度化も模索する予定である。

【期待される成果と意義】

本研究が実現すれば、ノーベル物理学賞を受賞した光周波数コムに基づく光絶対スケールコムを基盤とする、次世代超精密光計測学を切り拓くことができ、その学術的意義が極めて高い。光絶対スケールコムは、各種生産加工現場を国家標準とダイレクトにリンクさせることができる。また、多軸変位角度の新しい国家標準の確立への寄与など、産業的科学的波及効果が期待される。これにより、Industry4.0 に代表される、新しい産業形態へのパラダイムシフトに必要な標準・基盤技術の提供が実現する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- X. Li, W. Gao, et al., A two-axis Lloyd's mirror interferometer for fabrication of two-dimensional diffraction gratings, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 63, (2014) 461-464.
- W. Gao, Precision nanometrology: sensors and measuring systems for nonmanufacturing. London: Springer (2010).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度～31 年度
77,700 千円

【ホームページ等】

<http://www.nano.mech.tohoku.ac.jp/gaowei@nano.mech.tohoku.ac.jp>

【基盤研究(S)】

理工系 (工学)



研究課題名 高機能化ナノカーボン創成と革新的エネルギーデバイス開発

東京大学・大学院工学系研究科・教授 丸山 茂夫 (まるやま しげお)

研究課題番号: 15H05760 研究者番号: 90209700

研究分野: 工学

キーワード: カーボンナノチューブ、ナノカーボン材料、太陽電池、エネルギーデバイス

【研究の背景・目的】

昨今のエネルギー問題を鑑み、高効率かつ低コストのエネルギーデバイスの必要性が非常に高まっている。さらにナノテクノロジーの発展に伴い、ナノ材料をユニット材料としたナノスケールからのボトムアップ的デバイス構築技術の研究が盛んに進められている。本研究課題において、単層カーボンナノチューブ (SWNT)、グラフェンおよびフラーレンなどのナノカーボン物質 (図 1) を高機能化するとともに有機的に集積し、新たなエネルギーデバイスを開発することを目的とする。ナノカーボン物質の高度な構造制御合成技術および多様な物性・構造等を修飾・付加する機能化技術を開発する。この機能化ナノカーボン物質をユニット材料として、様々な形態の太陽電池等へ応用し、その物性や性能評価を進めると同時に、希少元素利用の削減と低コスト化を実現する。さらに、機能化ナノカーボン物質をユニット材料とする新たなナノスケールからのボトムアップ的デバイス開発のアプローチを提案する。ナノカーボン物質の実用化を進めるとともに、機械分子工学の新たな展開を目指していく。

【研究の方法】

SWNT やグラフェン、フラーレンなどナノカーボン物質の構造制御技術および、それらに対する表面修飾や化学修飾による高機能化技術の開発を行う (図 2) SWNT およびグラフェンに対しては、CVD 法における合成段階で高度な構造制御を行い、一方、フラーレンに対しては化学反応による誘導体作製によって機能化を行う。様々なナノからマイクロスケールでの構造制御や新たな物性 (電気伝導性、光透過性、電荷分離特性など) を付加することで機能化したナノカーボン物質をユニット材料として用い、有機薄膜型、ヘテロ接合型、ペロブスカイト型など様々な太陽電池へ応用し、ナノカーボン物質の特

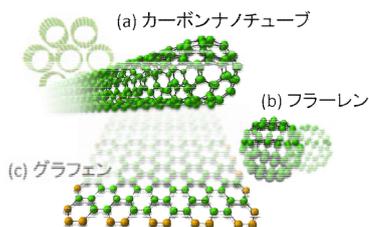


図 1 ナノカーボン材料. (a) SWNT, (b)フラーレンおよび(c)グラフェン.

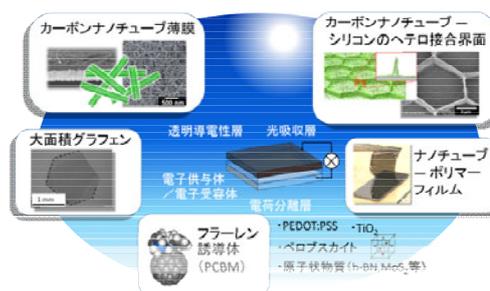


図 2 ナノカーボン エネルギーデバイス.

性・機能を分析することで、高効率化を目指す。インジウム等希少元素を用いないことでの低コスト化を進めると同時に、新規エネルギーデバイスを提案する。

【期待される成果と意義】

本研究課題を通じ、SWNT やグラフェンの合成技術、分析手法等の発展など学術的なナノテクノロジーの発展への寄与だけでなく、ナノ・マイクロスケールでの様々な現象の解明・理解が期待される。さらに、高機能化ナノカーボン材料を用い、革新的エネルギーデバイスの実現による社会への貢献も目指していく。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] K. Otsuka, T. Inoue, S. Chiashi[†], S. Maruyama[†], *Nanoscale*, **6**, 8831 (2014).
- [2] K. Cui, T. Chiba, S. Omiya, T. Thurakitserree, P. Zhao, S. Fujii, H. Kataura, E. Einarsson, S. Chiashi, S. Maruyama[†], *J. Phys. Chem. Lett.*, **4**, 2571 (2013).
- [3] Y. Santo, I. Jeon, K. S. Yeo, T. Nakagawa, Y. Matsuo[†], *Appl. Phys. Lett.* **103** (2013) 073306.
- [4] H. Yanagihara, K. Yamashita, A. Endo, H. Daiguji[†], *J. Phys. Chem. C*, **117**, 21795 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度 - 31 年度
154,100 千円

【ホームページ等】

<http://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>
maruyama@photon.t.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 Cell Exercise における力学とバイオの統合

大阪大学・大学院工学研究科・教授 **かねこ まこと**
金子 真

研究課題番号: 15H05761 研究者番号: 70224607

研究分野: 知能機械学・機械システム

キーワード: メカトロニクス、細胞組織力学、Cell Exercise

【研究の背景・目的】

これまでに申請者は細胞より直径の小さい狭窄部を有するマイクロ流路内で細胞を往復運動させ、細胞が変形能を完全に失うまでの往復回数で細胞の変形能限界を評価する“細胞ストレス試験”という概念を提案してきた。

一方、ストレスレベルを下げていくと細胞にとって“ストレス”モードではなく“鍛錬(Exercise)”モードになり、特に筋肉系細胞では弾性特性の優れた組織構築ができるのでは、という発想に至った。予備実験で周期的圧力印加による“Cell Exercise”を行うと、大気圧環境下より格段に大きな細胞組織が短時間で構築できること、さらに細胞組織内の筋線維生成に関与する遺伝子数が大気圧下で培養するよりも格段に増加することを発見した。この結果を踏まえた、本研究では、“Cell Exercise”中に培養器内の細胞同士がどのような力学的性質を見せながら細胞組織へと成長していくのか、可視化により内在する力学メカニズムを視覚的に捉えるとともに、成長過程の細胞組織の力学特性、遺伝子発現を実測しつつ、“Cell Exercise”の最適条件を力学・バイオの両面から総合的に明らかにすることを目的とする。

【研究の方法】

細胞組織の力学メカニズムの可視化機能、圧力印加パターン可変機能を搭載した多機能インキュベータを研究開発し、周期的圧力印加中に細胞が組織化していく過程を記録し、圧力を時間的に変化した場合と大気圧下での成長過程の違いを明らかにする。特に細胞が培養器底面に付着後、仮足が生えて細胞間の力学的干渉がはじまり、綱引き運動に起因した細胞群内の空洞の大きさ、また細胞組織化した状態で培養器から離脱する際の細胞(細胞群)の動きと“Cell Exercise”時の圧力パラメータとの関係をビジョンにより視覚的に観察する。さらに“Cell Exercise”時の細胞組織の力学特性及び遺伝子発現量を、硬さ計測装置及びPCRを用いて計測し、最も弾力性の高い細胞組織構築に向け最適圧力パラメータを明らかにする。

【期待される成果と意義】

当該申請者が提案する“Cell Exercise”は、これまでの細胞組織構築法にも適用でき、しかも細胞組織構築の時間短縮、力学特性の向上といった付加的効果が期待できる可能性を秘めている。力学的パラメータの調整だけで細胞構築を目指し

ているため、ヒトの身体に優しい再生医療に繋がる点を強調しておきたい。

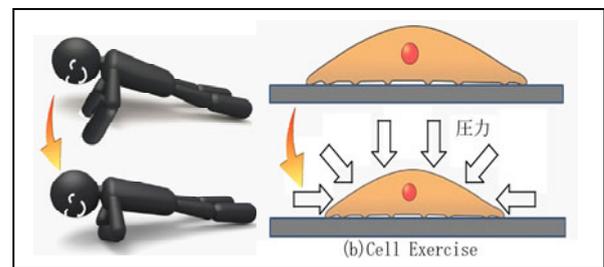


図1 Cell Exercise の概念図

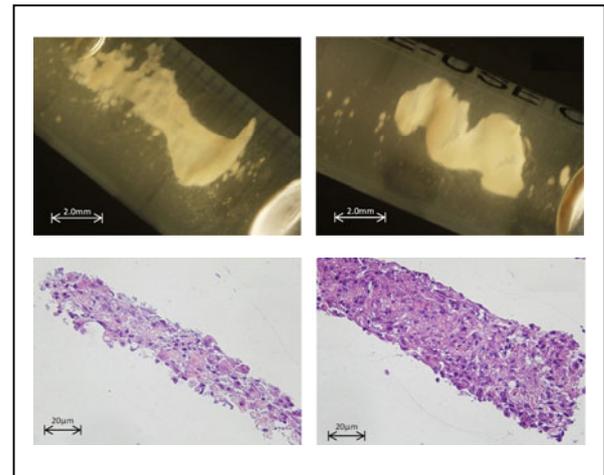


図2 大気圧下(左)とCell Exercise下(右)

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・ S. Sakuma, K. Kuroda, C. Tsai, W. Fukui, F. Arai and M. Kaneko, Red Blood Cell Fatigue Evaluation Based on the Close-encountering Point between Extensibility and Recoverability, Lab on a Chip, vol.14, nn.6, 1135-1141, 2014.

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度—平成 30 年度
114,100 千円

【ホームページ等】

<http://www-hh.mech.eng.osaka-u.ac.jp/~mk/Ind-ex-j.html.jp>

【基盤研究(S)】

理工系 (工学)



研究課題名 Si-Ge 系スーパーアトム構造のセルフアライン集積による光・電子物性制御

名古屋大学・大学院工学研究科・教授 みやざき せいいち
宮崎 誠一

研究課題番号： 15H05762 研究者番号： 70190759

研究分野： 電子・電気材料工学

キーワード： 薄膜・量子構造

【研究の背景・目的】

Si-Ge系スーパーアトム(コア/シェル量子ドット)において発光強度を飛躍的に高めるための価電子制御手法を確立し、これを高密度・規則配列した三次元自己整合集積構造を形成することで、電流注入型レーザへ応用可能な高濃度キャリア注入と高効率キャリア再結合を実現できるSi系エレクトロルミネセンス材料を創成することを目的とする。具体的には、歪、不純物元素を導入したコア/シェル量子ドットにおいて、電子状態、キャリア再結合ダイナミクスを精査し、直接遷移型への価電子状態変調による高輝度発光への指針を得る。さらに、極薄シリコン酸化膜上に二次元規則配列したドット上に自己整合的にドットを積層(縦積み)させて3次元自己集積構造を形成することで、ドットサイズの均一化とドット間トンネル結合の強化を行い、キャリア注入効率の増加と発光波長の狭帯化を実現し、高効率発光素子の開発を目指す。

【研究の方法】

本研究では、申請者らのSi系量子ドットの自己組織化形成に関する実績・経験を踏まえて、コア/シェル構造、歪、不純物元素を導入することで直接遷移型に価電子制御したSi-Ge系スーパーアトムを自己整合的に高密度・規則配列した三次元集積構造を形成する(図1)。

間接遷移型半導体であるSiやGeでは、ナノ構造化することで擬似直接遷移型となるので発光効率を大幅に向上させることができる。特に間接バンドギャップと直接バンドギャップのエネルギー差が小さく、その差が伸張歪によりさらに縮小するGeでは、直接遷移型への価電子変調が期待されることから、本研究ではGe量子ドットにおいて発光再結合効率の飛躍的な向上を目指す。しかし、これらの材料が直接SiO₂に埋め込まれた量子ドットでは、ドット/SiO₂界面に非発光再結合中心となる欠陥の生成が懸念されるので、SiO₂との界面制御技術が確立されたSiを殻(シェル)とするコア/シェル量子ドット構造を形成する。本研究で提案するSi-Ge系スーパーアトム(コア/シェル量子ドット)の自己整合集積構造においては、発光波長スペクトルが狭くなり、特定波長の発光強度が増大することで、誘導放射・光増幅に有利になると期待できる。また、ドットが基板垂直方向に自己整合的に積層しているためランダムに積層した場合と比べドット間のキャリアトンネル確率が増大する。さらに、シェルまたはコアに不純物(PまたはB)をデルタドーピングすることにより

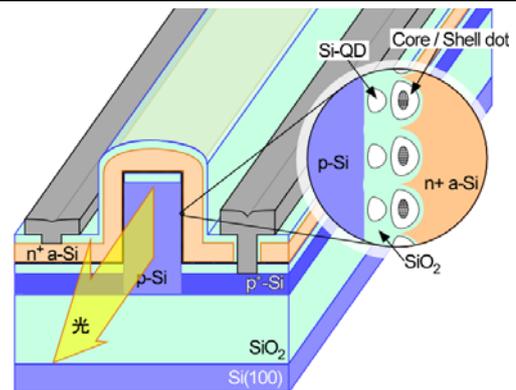


図1 一次元連結Si系ドット構造を活用した高効率エレクトロルミネセンスデバイスの構造図

キャリア注入効率を向上させることができる。

【期待される成果と意義】

本研究は、価電子制御によりキャリア発光再結合効率を向上させたコア/シェル量子ドットを三次元規則配列するとともに、電流注入方向に自己整合的に積層したドットへデルタドーピングすることでキャリア注入の高効率化と再結合速度の増大を両立させて、高効率・高輝度で発光するシリコン系EL材料を新たに創出する。本研究の推進によって得られる成果は、シリコンULSIプロセスとの整合性が高く、シリコン・フォトニクスにおいて実現が極めて困難であると考えられていた電流注入型シリコン系レーザの開発に繋がると期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・K. Makihara, K. Kondo, M. Ikeda, A. Ohta and S. Miyazaki, Photoluminescence Study of Si Quantum Dots with Ge Core, ECS Trans., Vol. 64, No. 6, 2014, pp. 365-370.
- ・K. Makihara, H. Deki, M. Ikeda and S. Miyazaki, Electroluminescence from One-dimensionally Self-Aligned Si-based Quantum Dots with High Areal Dot Density, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 4, 2012, 04DG08 (5 pages).

【研究期間と研究経費】

平成27年度-30年度

152,300千円

【ホームページ等】

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/miyazakilab/>

【基盤研究(S)】

理工系(工学)



研究課題名 オンチップ光配線のための超低消費電力半導体薄膜光回路の構築

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

あらい しげひさ
荒井 滋久

研究課題番号：15H05763 研究者番号：30151137

研究分野：工学、電気電子工学

キーワード：光デバイス・光回路

【研究の背景・目的】

スーパーコンピュータの性能ランキングであるTOP500 (www.top500.org)などをみると性能上位に占めるコンピュータの内、ほとんどがラック間、ボード間での光通信技術を取り入れており、シリコンフォトンクス技術を中心としてチップ間通信への光技術の適応も検討されている。さらに、チップ内のコア数の増加、微細化によるトランジスタ数の増加より、この次の段階としてオンチップ光通信が重要になってくると考えられる。

オンチップ光通信においては、10-100 fJ/bit 以下という極低エネルギーコストでの高効率データ伝送、小型化が特に必要である。われわれは半導体活性層およびその周辺のみを薄膜(メンブレン)として残り、上下を誘電体や空気によって挟み込むメンブレン構造により、通常の半導体レーザの約3倍の活性層への光閉じ込め効果を利用するメンブレンレーザを提案し、シリコン基板上に世界最小しきい値電流のDFBレーザ、InP細線導波路、10 Gbps動作メンブレン光検出器などを形成する要素技術を実現してきた。

本研究では、図1に示すように、これらの素子を集積した半導体薄膜光回路を構築することを目的としている。

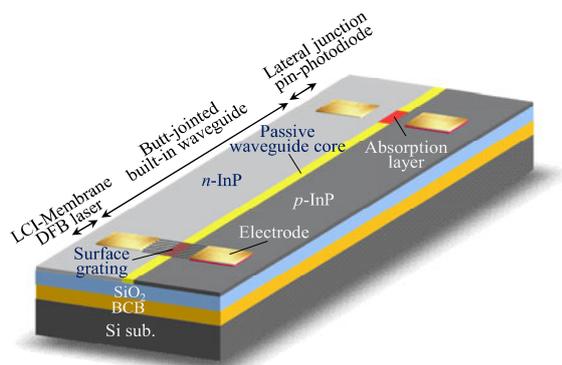


図1 半導体薄膜(メンブレン)光回路の基本構造

【研究の方法】

前述した目的を達成するため4年間で主に4つの分類に分け、研究を推進する。

- ① **要素デバイス探究**：将来的な集積化を念頭に置き、光源、導波路、光検出器の各要素に要求される特性の明確化とそれを実現するための構造設計および素子実現を行う。
- ② **集積加工技術の確立**：特に常温表面活性化技術の

光集積回路への適応可能性を明らかにする。

- ③ **シリコン基板上集積**：半導体レーザの高効率化と光検出器特性の改善を合わせ最終的に10 Gbps以上で30 fJ/bitのエネルギーコストの実現を目指す。
- ④ **CMOS基板上集積**：CMOS回路への光集積回路積層技術、特に電気的接続方法などを確立し、そのCMOS基板上光集積回路動作を実証する。

【期待される成果と意義】

本研究申請者らは、既に超低電流動作可能な半導体レーザを実証しているが、オンチップ光通信を現実的なものとするためには、送信光源の高効率化および低電力動作可能な光検出器の実現が必須となる。

本研究により、低消費電力・小型光伝送構成を実現できれば、オンチップ光配線の現実性が大きく高まり、当該分野の研究開発の活性化が期待され、将来的な高性能LSIの実現に近づく。また、学術的観点からは、低消費電力伝送を実現するためのレーザおよび光検出器の理想構造について明らかにできる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ D. Inoue et al., Appl. Phys. Express, vol. 7, no. 7, pp. 072701-1-4, July 2014.
- ・ S. Matsuo, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 19, no. 4, p. 4900311, July/Aug. 2013.
- ・ K. Takeda et al., Nature Photonics, vol. 7, no. 7, pp. 569 – 575, May 2013.
- ・ S. Arai et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 17, no. 5, pp. 1381-1389, Sep. 2011.

【研究期間と研究経費】

平成27年度-30年度
153,200千円

【ホームページ等】

<http://www.pe.titech.ac.jp/AraiLab/index.html>
arai@pe.titech.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系(工学)



研究課題名 磁気マーカーを用いた磁氣的バイオ検査法の深化と 先端バイオセンシングシステムの開発

九州大学・超伝導システム科学研究センター・教授

えんぶく けいじ
圓福 敬二

研究課題番号：15H05764 研究者番号：20150493

研究分野：計測工学

キーワード：バイオセンシング、磁気マーカー

【研究の背景・目的】

ナノメータサイズの磁気微粒子を高分子で被覆し、その表面に検査抗体や薬剤を結合したものは磁気マーカー抗体と呼ばれており、バイオ・医療分野で広く用いられている。この磁気マーカー抗体と高感度な磁気センサを組み合わせた磁氣的なバイオ検査法が近年注目されている。本検査法は、従来の検査手法には無い新機能や高感度性を有しており、次世代の診断・解析機器として期待されている。本研究では磁氣的検査法に必要な種々の要素技術を深化するとともに、これらを統合した免疫検査や磁気粒子イメージング等の先端バイオセンシングシステムを開発する。また、磁氣的手法による検査実験を通して本手法の有効性を実証し、先端医療機器開発のための基盤を確立する。

【研究の方法】

本研究では、図1に示す様に、磁氣的検査法に必要な磁気マーカー、磁気センサ、及びバイオ検査法などの要素技術を深化するとともに、これらを統合した先端バイオセンシングシステムを開発する。このため、本研究では以下の研究項目を計画している。

1. バイオ応用に用いられる磁気マーカーの動的な磁気特性（高調波スペクトル、ヒステリシス、磁気緩和等）の特性解析手法を確立し、高性能化の指針を示す。
2. 極微量な磁気マーカーを高感度に検出するためのセンサシステムと計測手法を開発する。磁気マーカーの特性に応じた計測システムの最適化法を明らかにし、システムの高感度化を達成する。
3. 磁気マーカーを用いた先端バイオセンシングシステムを開発する。すなわち、疾患由来の蛋白質や病原菌などの迅速・高感度検査を可能にする。

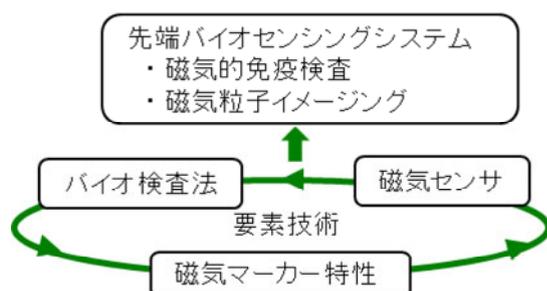


図1. 磁氣的バイオセンシング

る磁氣的な免疫検査法を開発する。また、体内診断への応用を目指して、体内に集積させた磁気粒子の位置と量を高精度に検出するための磁気粒子イメージングシステムを開発する。

【期待される成果と意義】

本研究により、磁気マーカーの磁気特性の定量的な解析法を確立することが出来る。この成果を基に、応用に応じた磁気マーカーの高性能化や検出法の最適化が可能となる。これにより、磁気マーカーのバイオ応用への基盤を確立することが出来る。

また、高感度検査に必要な、微弱磁界の検出のためのセンサシステムと検出法を開発する事が可能となる。これにより、磁気マーカーを用いた超高感度なバイオ検査システムの開発のための基盤を確立することが出来る。

さらに、磁氣的手法による検査実験を通して、従来の検査機器にはない高感度性と検査機能を実証し、本手法による先端医療機器開発のための基盤を確立することが出来る。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T. Yoshida et al, "Characterization of magnetically fractionated nanoparticles for magnetic particle imaging", J. Appl. Phys. vol. 114, 173908 (2013).
- ・ S. Uchida et al, "Highly sensitive liquid-phase detection of biological targets with magnetic markers and high Tc SQUID", IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 24, 1600105 (2014).
- ・ S. Bai et al, "Magnetic particle imaging utilizing orthogonal gradient field and third-harmonic signal detection", IEEE Trans. Magn., vol. 50, 5101304 (2014).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度～31 年度
131,200 千円

【ホームページ等】

<http://www.sc.kyushu-u.ac.jp/~enlab/>

【基盤研究(S)】

理工系(工学)



研究課題名 ストームジェネシスを捉えるための先端フィールド観測と豪雨災害軽減に向けた総合研究

京都大学・防災研究所・教授

なかきた えいいち
中北 英一

研究課題番号：15H05765 研究者番号：70183506

研究分野：理工系・工学・土木工学・水工学、水文気象学、レーダ気象学、レーダ水文学

キーワード：マルチ観測、レーダ、ビデオゾンデ、大気モデル、降水量推定、降水予測、ゲリラ豪雨

【研究の背景・目的】

昨今、ゲリラ豪雨、そして梅雨前線・台風等による集中豪雨・大規模豪雨による鉄砲水・斜面崩壊、内水・越水氾濫による災害が生じ、以前にも増して社会の注意が払われるようになってきている。このような頻発化する夏期熱雷(群)によるゲリラ豪雨や梅雨期線状対流系集中豪雨に焦点を当て、

- 1) その生成過程と発達過程
 - a) 気象レーダを含めたマルチリモートセンサとビデオゾンデによる同期フィールド基礎観測を発展的に実施(沖縄、神戸-大阪-京都市)
 - b) 高詳細数値モデル実験によって飛躍的に理解を深化
 - c) 開発してきた早期探知・渦による危険性予測システムの定量化とさらなる早期探知化
- 2) 公助・共助・自助の為の早期警戒・避難に結びつく予防的応用手法を開発

することを目的とする。

特に、ゲリラ豪雨や線状対流系豪雨の初期積乱雲が頻繁に発生する神戸六甲山域等での観測を進展させ、フェーズアレイや境界層レーダによる地表から上空までの高詳細観測を新導入し、街区レベルの熱的上昇流を表現するLESモデルと雲物理モデルの結合に新挑戦することにより、メカニズム理解の深化、さらなる早期探知化と定量化、予防手法の拡大を図る。

【研究の方法】

- 1) 豪雨のタマゴの生成過程(大気境界層内の上昇流～タマゴ渦生成)の観測手段・プロトタイプモデルの開発による解明:
 - a) MP気象レーダ、フェーズドアレイレーダ、雲レーダ、ドップラーライダ、境界層レーダ、パッシブレーダ、GPS、陸面観測による降水、雲、大気流れ・水蒸気観測と生成過程の解明
 - b) LESと陸面過程・メソ大気モデル改良と結合
 - c) 早期探知のより早期探知化
- 2) 豪雨の発達過程(タマゴ渦～発達過程)精緻化と最大降雨強度の定量化:
 - a) MP気象レーダ、フェーズドアレイレーダ、雲レーダ、ビデオゾンデ・ハイビスによる降水、大気流れの観測とメカニズム解明
 - b) ゲリラ豪雨のタマゴの早期探知と渦による危険性予測への最大降雨強度推測手法の導入
- 3) 水災害予防への応用:◎早期探知・危険性予測手法と河川公園サイレン灯と結合した早期避難情報システム等の構築

- a) スマートフォンを活用した身近な降雨情報提供手法開発
- b) 都市域の出水予測・水位上昇予測・土砂災害危険情報の高度化

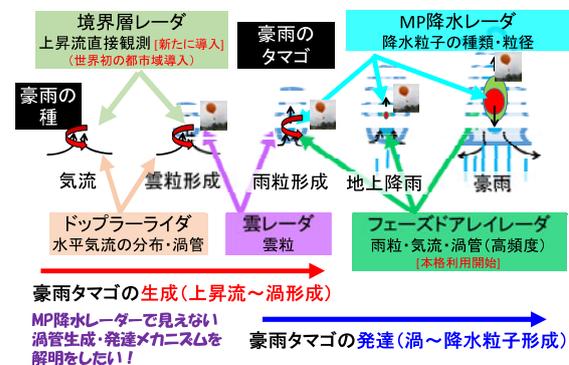


図1 マルチレーダー観測による豪雨タマゴの生成・発達過程の解明

【期待される成果と意義】

- 1) ゲリラ豪雨や梅雨期線状対流系集中豪雨の生成過程と発達過程の解明と理解の深化
- 2) 将来のマルチレーダ現業観測のプロトタイプ
- 3) ゲリラ豪雨や梅雨期線状対流系集中豪雨の早期探知・予測精度の向上
- 4) 早期避難情報創出による豪雨災害の軽減(安全・安心)

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠：ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究，土木学会論文集，B1(水工学)，第57巻，pp.325-330，2013.
- ・Suzuki, Kenji, Midori Matsuo, Eri Nakano, Shunsuke Shigeto, Kosei Yamaguchi, Eiichi Nakakita, Graupel in the different developing stages of Baiu monsoon clouds observed by videosondes, Atmospheric Research, pp.11, Available online 7 October 2013.

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
159,500千円

【ホームページ等】

<http://hmd.dpri.kyoto-u.ac.jp/nakakita/nakakita.html>

研究課題名 構造用鉄系超弾性合金 —形状記憶材料の新展開—



東北大学・大学院工学研究科・教授

かいぬま りょうすけ
貝沼 亮介

研究課題番号: 15H05766 研究者番号: 20202004

研究分野: 工学

キーワード: マルテンサイト変態、整合析出、異常粒成長

【研究の背景・目的】

NiTi を始めとした既存形状記憶(超弾性)合金は、典型的な機能性材料として広く利用されている。一方、鉄系構造材料としては、極最近 FeMnSi 基形状記憶合金がビル用制震ダンパーとして実用されたが超弾性の報告は無い。近年、申請者らは、FeNiCoAlTaB および FeMnAlNi 合金系において、Fe 系で初めて優れた超弾性を見出した。(図1) 注目すべきは、これらが共に規則析出物を微細に整合析出させることで超弾性特性を得ていること、また、母相とマルテンサイト(M)相の結晶構造の関係が全く逆であるという点である。しかし、これら両合金系とも、異相の粒界析出による粒界脆化が容易に起こるので薄肉板材でしか良好な特性が得られず、殆ど実用化が進んでいないのが実情である。

そこで本研究では、超弾性合金を柔軟性や制震性の要求される新しい構造用材料として利用する道を開拓するため、FeNiCoAl 基系および FeMnAl 基系合金の持つ材料学的な問題点や不明点を明確にしつつ克服し、高性能で大型かつ低廉な超弾性部材の材料開発を目的とする。

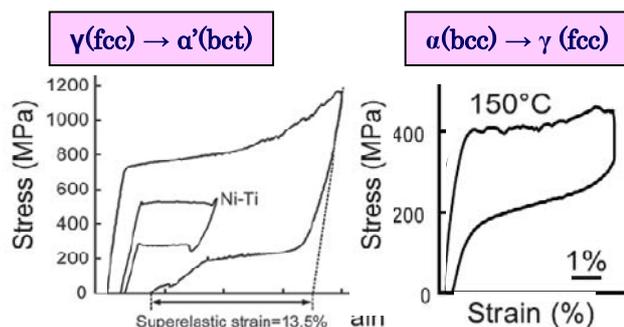


図1 FeNiCoAlTaB および FeMnAlNi 合金の超弾性特性

【研究の方法】

- 1) 粒界析出の抑制: 粒界析出を抑制するため、計算状態図を整備・利用することで粒界析出相の安定性が低い合金組成を探索する。
- 2) 整合析出制御: 規則析出物と母相との整合性やミスフィット量が、超弾性特性にどのような影響を示すか系統的に調査することで、繰り返し特性の向上を図る。
- 3) 結晶粒径および集合組織制御: 異常粒成長法や集合組織制御を利用して、大型部材でも良好な超弾性特性を示す超粗大結晶粒組織を実現する。

- 4) 建築・機械部材への適用可能性評価: 建築・土木および機械・自動車部材への応用に必要な特性を調査し、用途を検討する。

【期待される成果と意義】

学術面: 本鉄合金はいずれも既存超弾性合金に見られる規則構造型ではなく、部分規則構造(整合析出)型である。本型による室温超弾性は他に例が無く、析出組織と超弾性特性の関係は全くの未知である。特に、整合析出物はマトリックスのマルテンサイト(M)変態により20%もの弾性歪を受けながらも整合性を保つ点が興味深い。(図2)

実用面: 現在、5%以上の“弾性”を持つ構造用部材は存在しない。実現すれば、接合部ファスナーから橋梁に至る柔軟構造部材、温度変化の激しい自動車用制振部材など、本材料の特性を生かした構造材料としての新しい用途が見込める。

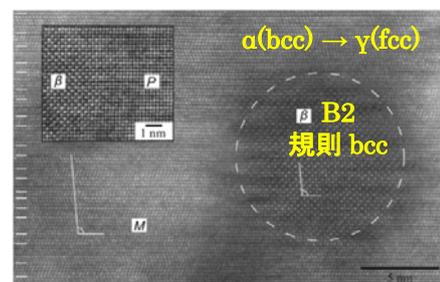


図2 FeMnAlNi 系M相中で変形する規則析出相

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Tanaka et al., Ferrous Polycrystalline Shape-Memory Alloy Showing Huge Superelasticity, **Science** 327 (2010) 1488
- Omori et al., Superelastic Effect in Polycrystalline Ferrous Alloys, **Science** 333 (2011) 68

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
154,100千円

【ホームページ等】

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~seigo/lab.html>
kainuma@material.tohoku.ac.jp



研究課題名 **バルクナノメタルが示す特異な力学特性の
統一的理解とそれに基づく材料設計**

京都大学・大学院工学研究科・教授 **つじ のぶひろ
辻 伸泰**

研究課題番号：15H05767 研究者番号：30263213

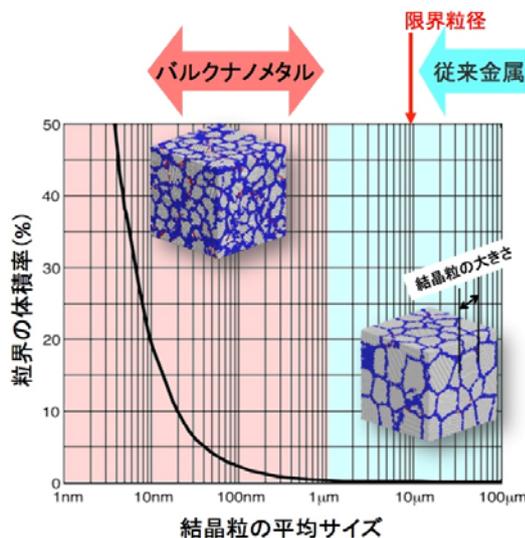
研究分野：構造・機能材料

キーワード：構造用金属材料、超微細粒、強度、延性、粒界

【研究の背景・目的】

本領域の目的は、バルクナノメタルが示す種々の特異な力学特性を統一的に理解することです。「バルクナノメタル」とは、それを構成する結晶粒や相が1μm以下のサイズを有する、均一なバルク状金属系材料です。我々がこれまで用いてきた金属材料は多数の結晶粒が集合した多結晶体ですが、従来金属では個々の結晶粒の大きさを10μm以下にすることはできませんでした。しかし結晶粒・構成相をナノメートルの桁まで微細化することにより、図1に示すように材料は「粒界(結晶粒の境界)だらけ」になります。粒界だらけのバルクナノメタルは、これまでの金属材料科学の常識を覆す種々の興味深い特性を示すようになります。これまでに我々が見出したバルクナノメタルの特異な力学特性とは、(1)金属・合金の種類によらず普遍的に現れる降伏点降下現象、(2)Hall-Petch 関係における extra-hardening、(3)加工軟化と焼鈍硬化、(4)室温におけるひずみ速度依存変形、(5)巨大なバウシinger効果、(6)六方晶における不活性すべり系の活性化、(7)変形双晶および変形誘起マルテンサイト変態の安定性の顕著な変化、です。これらはいずれも、従来の材料学の常識からは理解できない興味深い現象です。

図1 粒界(結晶粒間の境界)領域の体積率と結晶粒サイズの関係。従来金属における粒界領域はきわめて少なく、一方バルクナノメタルは粒界だらけの材料である。



【研究の方法】

研究代表者がこれまでに開発してきた種々の加工熱処理手法を駆使し、特異な力学特性を示すバルクナノメタルを、種々の合金系において粒径も変化させながら系統的に作製します。粒径100nmオーダーのバルクナノメタルの塑性変形は、主に転位のすべり運動によりもたらされることが明らかになっていすから、転位運動の特異性に着目し、特に粒界の役割に重点を置いて、材料組織と変形挙動の関係を詳細に調べます。粒界は、従来考えられている転位運動の障害物としてだけでなく、転位の核生成場所、さらには転位の消滅場所としても働いている可能性があります。最先端のナノスケール材料解析手法に加え、デジタル画像相関法(DIC)や変形挙動のその場測定手法などを駆使します。特に、J-PARCおよびSPring-8と密接に連携し、中性子および放射光によるその場解析手法を積極的に活用します。

【期待される成果と意義】

バルクナノメタルは、同じ種類の従来金属・合金の4倍にも達する強度を示すなど、常識を覆す優れた力学特性を示します。またこうした力学特性が、合金元素の添加なしに単純な化学組成で達成できるため、希少資源の有効利用やリサイクルの観点からも、バルクナノメタルは魅力的です。構造用金属材料は、我々が暮らす社会の安全を担保する極めて重要な材料です。本研究の成果により、力学特性を制御した革新的構造材料としてのバルクナノメタル新材料創製の基礎が確立されることが期待できます。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ "Hardening by Annealing and Softening by Deformation in Nanostructured Metals", X.Huang, N.Hansen and N.Tsui: Science, Vol.312, No.5771 (2006), pp.249-251.
- ・ N.Tsui: Chapters 2 and 22 in "Nanostructured Metals and Alloy", edited by S.H.Whang, Woodhead Publishing Ltd. (2011)

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
154,700千円

【ホームページ等】

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



研究課題名 鉄鋼材料の結晶粒微細化強化に関する学術基盤の体系化

九州大学・大学院工学研究院・教授 高木 節雄

研究課題番号： 15H05768 研究者番号： 90150490
 研究分野： 工学、材料工学、無機材料・物性
 キーワード： 結晶構造・組織制御

【研究の背景・目的】

鉄鋼材料では明確な降伏点が発現することが特徴であり、CやNによる転位の固着がその原因と考えられてきた(Cottrell固着説)。その根拠として、鉄の純度を上げると降伏強度が低下することが挙げられているが、申請者らは、60ppm以下の極微量の固溶炭素の有無によって結晶粒微細化強化係数(k_y)が大きく変化し、同じ粒経でも高純化によって降伏強度が低下することを見出した。これは、鉄鋼材料の分野ではこれまでの定説を覆す新たな発見である。また、鉄鋼材料の k_y に及ぼす合金元素の影響については、100ppm以下の炭素や窒素は不純物として取り扱われ、その影響は無視されてきた。しかし、実際には極微量の炭素や窒素が k_y の値に影響を及ぼしている可能性もある。たとえば、図1に示すように、鉄の k_y 値は銅やアルミに比べて極端に大きいとされてきたが、申請者が固溶炭素や窒素を全く含まないIF鋼で k_y を実測した結果、剛性率に対応した妥当な値になることが分かった。

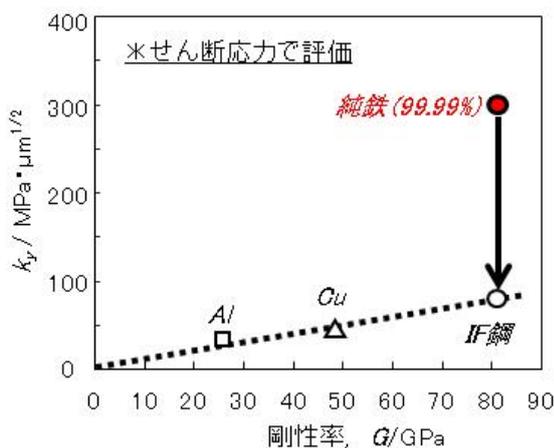


図1 各種金属の剛性率と結晶粒微細化強化係数 k_y の関係

本研究では、多結晶フェライト鋼の降伏挙動に及ぼす炭素や窒素の影響を解明するとともに、固溶強化や k_y に及ぼす各種合金元素の影響を系統的に調査して、鉄鋼材料の強度設計に関するデータベースを再構築することを目的とする。

【研究の方法】

1) フェライト鋼の降伏機構の解明：
 三次元アトムプローブを用いて粒界に偏析したCやNの直接観察を試み、両者の粒界偏析と k_y の関係を定量的に評価する。さらに、その場引張り観察が可能な走査型電子顕微鏡を用いて、降伏前後の結晶粒界近傍の組織変化を調査することによって、マクロな降伏挙動との関係を明らかにする。結晶粒界と粒界の相互作用についてはナノインデントを用いて調査し、粒界に偏析したCやNの影響を明らかにする。また、分子動力学法を用いて粒界と転位の相互作用を解析し、粒界に偏析したCやNの影響を検証する。

2) 鉄鋼材料の結晶粒微細化強化係数に及ぼす置換型合金元素の影響：

Mn, Si, Cr, Ni, S, Cu, Alの7種類の置換型合金元素をそれぞれ単独で適量添加したIF合金鋼を作製し、各種元素が結晶粒微細化強化係数に及ぼす影響を系統的に調査する。結晶粒径は、室温で90%冷間圧延した試料を適切な条件で再結晶させることによって、10~200 μm の範囲で調整する。各種の合金についてHall-Petchの関係を調査し、切片の値から固溶強化の影響、直線の傾きから k_y 値を求め、それぞれの添加元素の影響を定量的に評価する。

【期待される成果と意義】

本研究は、鉄鋼材料におけるHall-Petch則に関するデータベースを構築することによって、鉄鋼材料の強度設計の発展ならびに結晶粒微細化強化に関する学術基盤の体系化に寄与す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】

- ・ K. Takeda, N. Nakada, T. Tsuchiyama, S. Takaki: *ISIJ Inter.*, 48 (2008), 1122-1125.
- ・ D. Akama, N. Nakada, T. Tsuchiyama, S. Takaki, A. Hironaka: *Scripta Mater.*, 82(2014), 13-16.

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
121,600千円

【ホームページ等】

<http://www.kyushu-u.ac.jp>
takaki@zaiko.kyushu-u.ac.jp



研究課題名 デジタルバイオ分子デバイスの創成と展開

大阪大学・大学院工学研究科・教授 **たみや えいいち**
民谷 栄一

研究課題番号：15H05769 研究者番号：60179893

研究分野：生物機能・バイオプロセス

キーワード：バイオセンサー、ナノバイオデバイス、BioMEMS

【研究の背景・目的】

生体では、特定の1分子の結合や反応がトリガーとなり、情報伝達のために分子信号の爆発的増幅が誘起されるが、細胞内の限定された局所空間で1分子レベルから起こるもので、最近では微細加工技術を用いた微小空間流体デバイスを用いて1分子のデジタル測定へと展開されている。本申請では、生体の有する優れた分子認識や分子信号増幅機能に着目し、1分子レベルの解析を実現し、これを基礎としたデジタル情報としてバイオ分子計測を行うシステムの創成とその応用を推進する。具体的に1分子を配置できる極微小流体デバイス、特定の1分子情報を認識、増幅する分子認識増幅素子、高感度及びラベルフリー計測できる電気化学発光や局在プラズモン共鳴デバイスなどのセンシングデバイスの要素から構成される。これらを基礎としたバイオ分子のデジタル解析を可能とするデバイスの設計指針を明らかにし、関連する学術分野の体系化を図るとともに医療診断分野などへの応用展開を推進する。

【研究の方法】

本申請課題の“デジタルバイオ分子デバイス”では、研究要素として「極微量流体デバイス」、「センシングデバイス」、「分子認識増幅素子」が必須であり、これらの統合により1分子計測を基礎としたバイオ分子のデジタル解析を可能とするデバイスの設計指針を明らかにし、関連する学術分野の体系化を図る(図1)。極微量チャンバーでは、容易に1分子を調製できるが、この1分子センシングを実現するには、測定対象1分子に対して信号増幅を行う分子素子との連携が不可欠である。たとえば、酵素のなかには1分子で100万分子/sec ターンオーバー数を有する。またPCRに用いられるDNA増幅酵素は100万倍の分子増幅を実現する。こうした分子増幅反応系を極微小チャンバー内で誘起すれば、1分子といえどもきわめて大きな分子信号へと増幅ができ容易に捉えられる。このようなチャンバーの1分子の有無が分子認識増幅信号の有無となり、チャンバーアレイの数に対応したデジタル数値として表現される。これが“デジタルバイオ分子デバイス”である。極微量チャンバーの集合体とこれら全体の容積を有する一つのリアクターと比較した場合チャンバーの数だけの濃縮効果をもたらすため、感度向上をもたらすし、超高感度測定が可能となる。さらに、濃度範囲によりポアソン分布に基づき、より精密で超広範囲なダイナミックレンジの測定が可能となる。また、極微小領域の分子拡散を考慮するとミリ秒オーダーで

短時間計測やリアルタイム計測法としての優位性もある。本申請では、申請者が実績を有している電気化学・発光や局在プラズモン共鳴デバイスを活用してデジタルバイオ分子デバイスに関する基盤研究を推進し、当該分野の専門家との連携により医療診断、創薬ツールなどとして応用展開を図る。



図1 デジタルバイオ分子デバイス研究の要素技術と応用展開

【期待される成果と意義】

極微小領域で分子認識および分子増幅反応とを連動させ、これを同一の空間内に配置されたセンシングデバイスにより、超高感度かつ超広範囲なダイナミックレンジを有するバイオセンシングの手法を創案、実現するところに本研究の特色があり、超集積化された極微小領域に測定対象分子の分布状況をデジタルデータとして捉える『デジタルバイオ分子デバイス』は、健康医療、食の安全、環境汚染防止などの各種バイオセンシング現場での画期的な研究成果が予想され、当該関連分野へ与える波及効果は計りしれない。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ E.Tamiya et.al.(ed.) Nanobiosensors and Nanobioanalyses, Springer, (2015)
- ・ 民谷栄一 デジタルバイオデバイス、分析化学 64, 397-411 (2015)

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
129,700千円

【ホームページ等】

<http://dolphin.ap.eng.osaka-u.ac.jp/nanobio/>



研究課題名 高エネルギー電磁ビームに誘起される放電とその工学的応用

東京大学・大学院工学系研究科・教授

こむらさき きみや
小紫 きみや
公也

研究課題番号：15H05770 研究者番号：90242825

研究分野：総合工学

キーワード：航空宇宙工学、エネルギー全般、プラズマ、放電、レーザー

【研究の背景・目的】

高エネルギー電磁ビームにより大気中に誘起される放電は爆轟波を駆動し、その過程で電磁エネルギーが効率的に圧力に変換される。これは工学的にも有用な現象である。図1に研究代表者が撮影したレーザー放電およびミリ波放電の先端構造を示す。ビーム波源に向かって超音速で伝播する電離波面のマクロな構造は相似であるが、ミリ波放電にはプラズマの微細な構造がみられ、長時間露光写真ではフィラメント状の放電痕が認められる。また電離波面伝播速度とビーム電力密度の比は、それぞれ1~2桁ほど異なり、従来の燃焼デトネーション理論では説明がつかない。

本研究では、高エネルギーのレーザーやミリ波ビームにより誘起される爆轟波を工夫された実験系により純粋な1次元現象に帰し、その計測結果の解析によってレーザーとミリ波の双方の放電・爆轟現象に内在する普遍的な物理モデルを構築することを目的とする。さらに得られた知見を将来の大電力伝送で想定される実スケールの現象に適用可能な3次元計算コードの開発につなげる。

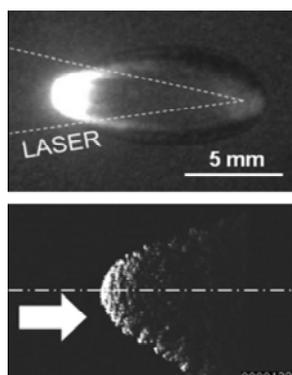


図1 レーザー放電(上)とミリ波放電(下)の高速度カメラ画像

【研究の方法】

1次元伝播実験系を構築し、発振周波数やガス種などを変えつつ実験を行う。ミリ波放電についてはその微細構造、特にフィラメント構造のピッチなど幾何学的特徴を定量的に、レーザー放電については、プラズマパラメータの空間分布を様々な手法を用いて計測する。次に、実験結果に基づきモデル化を行い、数値シミュレーションで再現を試みる。電磁波エネルギーが集中するフィラメント先端の局所的なパワー密度に注目しており、ミリ波フィラメントの

伸展とレーザー放電の伸展を同じ輸送方程式や電離モデルで表現する可能性を追求する。構築した物理モデルおよび開発した3次元計算コードを使い、ミリ波・レーザー放電を利用した様々な工学的応用の提案について、その装置設計および性能評価を行う。

【期待される成果と意義】

高エネルギーミリ波・レーザーの大気放電の研究はこれまで散発的な実験しか行われておらず、特にミリ波の数0.1MW/cm²以上の電力密度領域の放電は理解されていない領域で、大電力ジャイロトロンが開発されたことによって初めて実験が可能となった。レーザー支持爆轟波やストリーマ放電との類似点・相違点を勘案しつつ、体系的な研究によって、この電力密度領域におけるプラズマ・放電物理モデルを構築・創出する。

また応用面からは、航空宇宙分野の例として、ミリ波ビームで遠隔に駆動されるロケットや、メガワットからギガワットの電力の空間無線送電・電力変換装置、放電デトネーション風洞など、将来の宇宙インフラ整備や先進的な宇宙プロジェクトの展開を担う基幹技術につながるものと期待する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- 1) Replacement of Chemical Rocket Launchers by Beamed Energy Propulsion, M. Fukunari, K. Komurasaki, A. Arnault, T. Yamaguchi, *Applied Optics*, Vol. 53, No. 31, pp. I16-I22, 2014.
- 2) Precursor ionization and propagation velocity of a laser-absorption wave in 1.053 and 10.6 μm wavelengths laser radiation, K. Shimamura, K. Komurasaki, J. A. Ofori, and H. Koizumi, *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, Vol.42, No.10, pp.3121-3128, 2014.

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
154,500千円

【ホームページ等】

<http://www.al.t.u-tokyo.ac.jp/mwp/ja/komurasaki@al.t.u-tokyo.ac.jp>



研究課題名 海の鉱物資源の科学と工学の新展開

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：15H05771 研究者番号：40221882
研究分野：地球・資源システム工学
キーワード：資源探査、海底鉱物資源

【研究の背景・目的】

現世の海底には、コバルトリッチクラスト、マンガング塊、レアアース泥(研究代表者らが発見した新資源)、熱水性硫化物など多様な鉱物資源が分布している。これらは、過去約1億年にわたる海洋の様々なプロセスにより生成されてきたものである。また、それ以前の海底で生成された、より古い時代の鉱物資源は、海洋プレートの移動に伴い島弧や大陸縁辺に付加され、その一部は日本列島などの陸上付加体中に露出し、鉱床として開発されてきた。現在および過去の海底で生成した鉱物資源(両者を合わせて『海の鉱物資源』と呼ぶ)は、生成時の海洋環境やグローバル物質循環の変動の産物として、相互に密接な関連を持つと考えられる。しかしながら、従来の研究では、鉱床のタイプによって個別の成因論が構築されてきたに過ぎず、上述の多様な鉱物資源の成因を包括的に取り扱う枠組みは存在しなかった。

そこで本研究では、地球表面積の3分の1を占める最大の海洋である太平洋で、過去4億年にわたり生成された『海の鉱物資源』をグローバルな環境・物質循環変動をはじめとする地球システム進化の中に位置づけることで、従来にない包括的かつ統一的な資源成因論を構築することを目的とする。本研究により『海の鉱物資源』の分布を支配する因子の全容が解明されれば、海底鉱物資源と陸上鉱床の双方を俯瞰する、日本の資源戦略の新たなグランドデザインを提示することが可能となる。

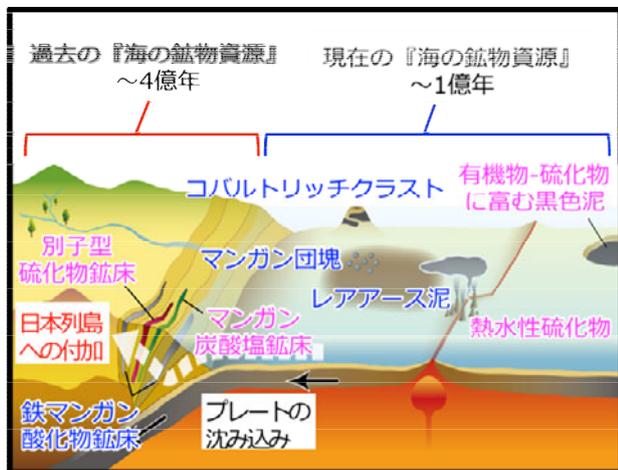


図1 現在および過去の『海の鉱物資源』

【研究の方法】

『海の鉱物資源』の成因とその相互関連性を明らかにするためには、各資源を結びつける高解像度の時間軸を入れるとともに、元素濃集を引き起こしたメカニズムを解明する必要がある。そのために、(1) 現世海底および日本列島付加体からの系統的な試料の採取・記載・全岩化学分析、(2) Os(オスミウム)同位体比、Re(レニウム)-Os放射年代および微化石・古地磁気層序による高解像度年代決定、(3) 化学組成データセットの独立成分分析に基づく鉱物資源の起源物質・元素濃集プロセスの抽出、の3項目を実施する。

【期待される成果と意義】

本研究によって、従来個別のかつ断片的にしか理解されていなかった海底鉱物資源の成因が、相互に有機的に結びついた統一的な描像として捉えられ、革新的な鉱物資源論が確立されるはずである。また、より直接的な成果として、本研究で得られる高精度かつ大規模な地球科学データセットにより、具体性の高い資源ポテンシャル評価が可能になるとともに、未発見の有望鉱床の探査指針が得られることが期待される。さらに、選鉱・精錬に活用可能な品位、構成鉱物、物性などの鉱物学的・物質科学的情報も取得できる。これらの情報は、海底鉱物資源と陸上鉱床の双方を含めた我が国の資源戦略に重要な指針を与えるであろう。

【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).
- ・ Nozaki, T., Kato, Y. and Suzuki, K. "Late Jurassic ocean anoxic event: evidence from voluminous sulphide deposition and preservation in the Panthalassa." *Scientific Reports* 3, 1889; doi:10.1038/srep01889 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成27年度-31年度
154,500千円

【ホームページ等】

<http://egeol.geosys.t.u-tokyo.ac.jp/kato/ykato@sys.t.u-tokyo.ac.jp>