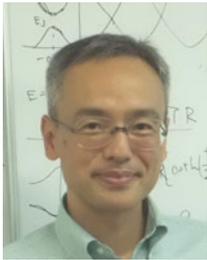


【基盤研究(S)】

理工系（総合理工）



研究課題名 対称性の破れを伴う固体中の集団励起モードを用いた量子ハイブリッドシステム

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

なかむら やすのぶ
中村 泰信

研究課題番号：26220601 研究者番号：90524083

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：量子情報

【研究の背景・目的】

対称性の破れに伴って生じる固体中の巨視的集団励起モードを、単一量子レベルでコヒーレントに制御する手法の確立を目指す。超伝導・強磁性・結晶秩序などは自発的対称性の破れの典型例である。申請者がこれまでに確立してきた超伝導回路上の量子状態制御技術をツールとして、異種量子系の量子状態制御を実現する量子ハイブリッド系を構築する。強磁性体中の集団スピン励起であるマグノンモードや、ナノメカニカル素子の集団原子運動であるフォノンモードなどの量子状態を操作し、スクイーズド状態・粒子数 (Fock) 状態・量子もつれ状態など非古典的状态を自在に生成し観測する手法を開発する。

【研究の方法】

様々な固体中の巨視的集団励起モードからなる量子ハイブリッド系を構築する。超伝導量子回路と異種量子系の間でコヒーレント制御を行い、またマイクロ波のみならず光とのコヒーレントな相互作用も可能にするために、本研究では以下の研究項目を計画している。

1. 超伝導量子回路におけるマイクロ波非古典量子状態の生成と観測
2. 強磁性体単結晶中の単一マグノン量子状態制御
3. オプトエレクトロナノメカニクスにおける機械振動子の基底状態実現と単一フォノン量子状態制御

図1に計画全体の概念図を示す。項目2、3に関してはマイクロ波と光の両面からのアプローチを行う。電磁波の自由度を介して異なる量子系の間でコヒーレントに量子情報を受け渡すための方法を確立する。

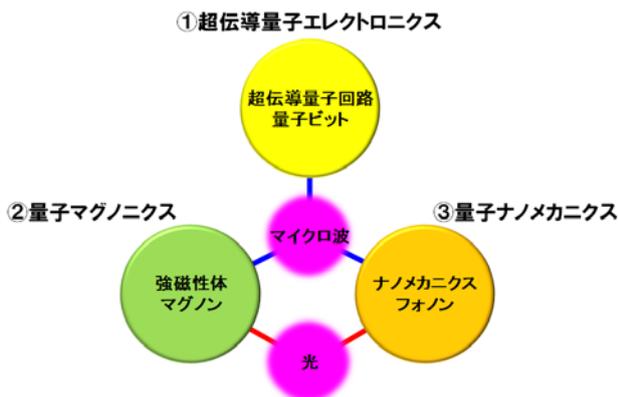


図1 量子ハイブリッド系の概念図

【期待される成果と意義】

量子状態制御の概念を微視的自由度から巨視的な集団励起モードの自由度に拡張し、量子力学あるいは量子工学の適用範囲を拡大する。巨視的な系で量子力学的効果を発現させ観測することは、量子力学の誕生以来大きな関心のもとにある。量子と古典の世界の境界にアプローチする研究であるとも言え、量子状態が環境との相互作用との結果どのようにコヒーレンスを失っていくかということの研究する。

集団励起モードは、空間的に巨視的な広がりを持つため、電磁波との強い相互作用を実現することが可能である。微視的な系では到達が困難であるような強度で、マイクロ波や光とコヒーレントな相互作用をすることが可能であり、そこに新しい物理を見出すチャンスがある。実際、超伝導量子回路上では、人工原子としての超伝導量子ビットとマイクロ波光子の間で多くの効果が見られている。

超伝導回路中の自由度をエネルギーの高い光とコヒーレントに直接相互作用させることは困難であるが、強磁性体マグノンや結晶中のフォノンの自由度はマイクロ波とも光とも相互作用し、両者間で量子状態の受け渡しをすることも可能にする。量子ハイブリッド系のひとつの応用として、量子インターフェースの実現が期待され、量子情報ネットワークなどへの応用が待たれる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・“Breakthroughs in microwave quantum photonics in superconducting circuits,” Y. Nakamura and T. Yamamoto, *IEEE Photonics Journal* **5**, 0701406-1-6 (2013).
- ・“Quantum Computing,” T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, and J. L. O’Brien, *Nature* **464**, 45-53 (2010).
- ・“Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box,” Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai, *Nature* **398**, 786-788 (1999).

【研究期間と研究経費】

平成26年度－30年度
150,100千円

【ホームページ等】

<http://www.qc.rcast.u-tokyo.ac.jp>
info@qc.rcast.u-tokyo.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系（総合理工）

研究課題名 ダイヤモンド量子センシング



慶應義塾大学・理工学部・教授

いとう こうへい
伊藤 公平

研究課題番号：26220602 研究者番号：30276414

研究分野：量子情報、固体物理学、計測技術

キーワード：量子センサー、ナノテクノロジー、磁気共鳴

【研究の背景・目的】

材料・ナノテク技術の劇的な進歩により、固体中で単一の量子状態（人工原子状態）を創製することが可能になり、それを量子計算のビット（量子ビット）として応用する研究が世界中で実施されている。有用な量子計算の実現には大規模な量子ビット集積化が必要なため、量子計算の概念実証（proof of concept）が様々な固体系で実施された現在は、高集積化につなげる工学的工夫に重心が移行している。一方、数個と数百万個のギャップを埋めるべく、一個または数個の量子ビットの応用が摸索され、その結果として確立されたのが量子センサーという新概念である。

そこで本研究では、ダイヤモンド中の個々の量子ビットをセンサーとして、単一の分子や細胞の核磁気共鳴(NMR)イメージング測定や電位分布測定を室温で実現する実験手法を確立する。同位体ダイヤモンド表面近傍(数 nm)に 100 マイクロ秒以上の量子コヒーレンス時間を有する窒素-空孔(NV)ペアを配置し、個々の NV ペアに束縛された電子スピンを制御する手法を開発し、単一 NV 電子スピンをセンサーとしてダイヤモンド外部に置かれた単一原子の核磁気共鳴(NMR)検知を目指す。また 2 次元 NV アレイを用いて空間分解能 50nm での磁場・電位・温度分布イメージングを実現することも目指す。並行してニューロン等の単一細胞への刺激に対する電位分布の時間発展バイオセンシングを NV アレイを用いて実現する。最終的には、量子センサーとしての最大の利点（古典限界を破る高感度）を保ちながら、空間分解能を 10nm 以下の実現を目標とし、単一分子・細胞の磁場・電場・温度イメージングを目指す。

【研究の方法】

図 1 にダイヤモンド表面付近の単一の NV 電子スピン(矢印) をセンサーとして、その上に置かれた分子中の個々の原子の核磁気共鳴を測定し（化学種の同定）、空間分布を決定するチップの例を示す。また図 2 にダイヤモンド表面付近に配置された NV 電子スピンアレイ中の個々の NV (矢印) をセンサーピクセルとして、

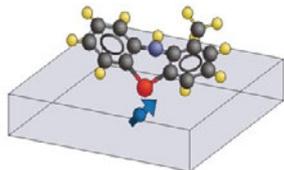


図 1

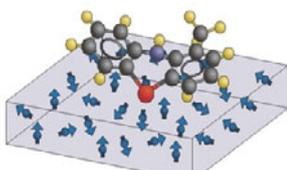


図 2

その上に置かれた分子中の原子の核磁気共鳴・電位・温度の空間分布を決定するチップの例を示す。個々の NV センサーのスピンの状態は光学顕微鏡下におかれたチップに緑色の励起光を照射し、スピン状態に応じて得られる赤色の発光を検知することで容易に実施する。すべての測定は室温で行う。

【期待される成果と意義】

ダイヤモンド中の NV を用いた量子センシングでは、ダイヤモンド中の単一電子スピンとダイヤモンド外の核スピンをエンタングルさせる。ここで必要となるのは、センサーと測定対象の間の相互作用の詳細を明らかにするという基礎研究である。すなわち、様々な量子操作（磁気共鳴）技術を駆使して感度を向上させることは、固体物理学・量子物理学・原子物理学の分野に対する横断的かつ先駆的な研究であり、固体中の量子および光物性に対する最先端の知見が得られ、その成果をインパクトの強い論文として世界に送り出せる。

応用面においては、本研究の成果に基づき、例えば Lab on Chip（マイクロ TAS）といったガラス基板上のマイクロチップ工場においても局所的な NMR 分析が実現できるようになることが期待される。本研究の出口の一つがデスクトップ型の単一（または少数）分子 NMR 装置開発であり、グリーンや創薬といった重点分野を含む産業の発展を担う計測技術基盤に発展させたい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Ohashi, T. Rosskopf, H. Watanabe, M. Loretz, Y. Tao, R. Hauert, S. Tomizawa, T. Ishikawa, J. Ishi-Hayase, S. Shikata, C. L. Degen, and K. M. Itoh, "Negatively Charged Nitrogen-Vacancy Centers in a 5 nm Thin ^{12}C Diamond Films," Nano Letters, vol. 13, 4733-4738 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度－30 年度
165,200 千円

【ホームページ等】

http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/jp/kitoh@appi.keio.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系（総理工工）



研究課題名 トンネル電流による1分子シーケンシング法

大阪大学・産業科学研究所・教授 谷口 正輝
たにぐち まさてる

研究課題番号：26220603 研究者番号：40362628

研究分野：分子デバイス、1分子科学

キーワード：1分子シーケンシング、ペプチド、トンネル電流、ナノギャップ電極

【研究の背景・目的】

トンネル電流は、1分子の微細な電子状態の違いを読み出す量子的な電流であり、DNAの塩基配列を決定するシーケンシング法の究極の原理と考えられている。我々は、これまで、微細加工技術で作るナノデバイスを用いて、トンネル電流によりDNAの塩基配列決定に成功している。

本研究では、遺伝情報がDNA→RNA→タンパク質の順で伝達されるセントラルドグマに関わる生体分子の1分子シーケンシング法と、その学理を確立する。特に、既存のDNAシーケンシング法では検出できないが、疾病マーカーや機能の発現制御に重要な修飾DNA、修飾RNA、およびアミノ酸修飾を1分子レベルで識別する方法と学理を構築する。

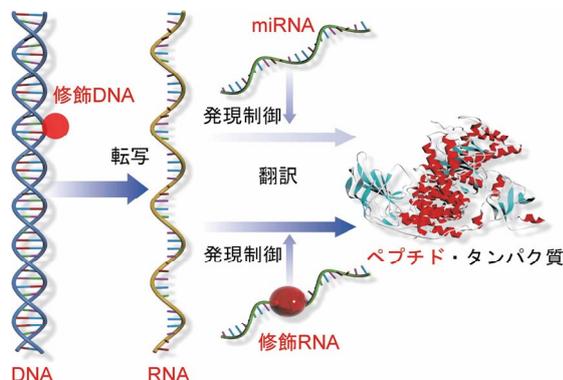


図1 DNA・RNAの塩基配列決定、修飾DNA・修飾RNAの識別、およびペプチドのアミノ酸配列決定を行う1分子シーケンシング法。

【研究の方法】

1分子DNA・RNAの塩基分子と、1分子ペプチドのアミノ酸分子を全て正確に読み出すため、1分子の大きさの隙間を持つナノ電極対を集積したマルチナノ電極を、機械的破断接合と微細加工技術を用いて作製する。それぞれのナノ電極から読取られる塩基分子とアミノ酸分子の部分配列を情報処理で組み合わせ、全配列を決定する方法を開発する。孤立1分子の電気伝導度と、DNA・RNA・ペプチド中における1塩基分子・アミノ酸分子の電気伝導度の相関を分子間相互作用の観点から解明し、トンネル電流による1分子識別の学理を確立する。

塩基配列・アミノ酸配列の読取回数の増加により読取精度を向上させるため、マルチナノ電極構造とナノ流路構造が集積したナノデバイスを作製する。

この集積デバイスを用いて、同じ1分子をナノ電極間で往復運動させる1分子流動制御技術の開発とその学理を確立する。特に、1分子の流動速度の計測とともに、流体力学、電磁気学、イオン輸送が融合したマルチフィジックスモデルを用いた理論解析により、電気泳動で制御される1分子の往復運動を解明する。

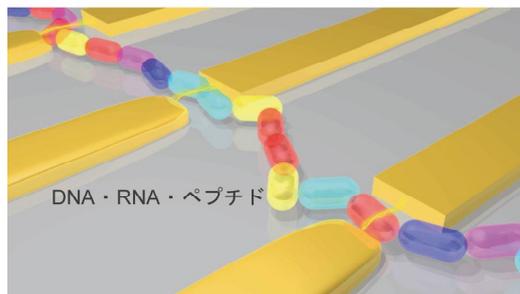


図2 マルチナノ電極構造による1分子シーケンシングの概念図。

【期待される成果と意義】

1分子ペプチドシーケンシング法は、微量のサンプル、かつ短時間計測で、アミノ酸配列をトンネル電流で直接決定することを可能とする。さらに、1分子レベルの修飾DNA・修飾RNA・ペプチド修飾の検出は、修飾と生命機能現象の関係を明らかにするとともに、修飾と疾患の関係を明らかにし、新規治療法開発への貢献が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ M. Tsutsui, M. Taniguchi, K. Yokota, T. Kawai, Identifying single nucleotides by tunneling current, *Nat. Nanotechnol.*, **5**, 286-290, 2010.
- ・ T. Ohshiro, K. Matsubara, M. Tsutsui, M. Furuhashi, M. Taniguchi, T. Kawai, Single-molecule electrical random resequencing of DNA and RNA, *Sci. Rep.*, **2**, 00501, 2012.

【研究期間と研究経費】

平成26年度～30年度
136,700千円

【ホームページ等】

<http://www.bionano.sanken.osaka-u.ac.jp>
taniguti@sanken.osaka-u.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系（総合理工）

研究課題名 スピンホールナノエレクトロニクス



慶應義塾大学・理工学部・専任講師

あんど かずや
安藤 和也

研究課題番号：26220604 研究者番号：30579610

研究分野：応用物性

キーワード：スピントロニクス

【研究の背景・目的】

ナノ領域における電子物性にはスピン自由度が顕著に表れ、電子のスピン・電荷が素励起と共に織り成す多彩な物理現象が発現する。物質中で電子スピンの誘起するこのような現象を自在に制御することで、電荷自由度をベースとする現代のエレクトロニクス機能を遙かに凌駕する次世代電子技術への道が拓ける。本研究は、物質中の相対論的効果によって現れるスピン流-電流変換「スピンホール効果」を基軸とする電子物理・技術の開拓により、新時代の電子技術の基盤創出を目指す。

スピントロニクス黎明期以来の系統的実験解析によって完成度の高い物理描像が構築されているバンド伝導系のスピン流に対し、この対極にあるホッピング伝導系に関してはこれまで汎用的スピン注入手法が存在せず、未だ体系的理解が得られていない。最近になり、磁性/非磁性ヘテロ界面におけるスピン角運動量の動的な交換現象を利用することで、広範囲の物質群・環境中にスピン流を創り出す動的スピン流生成手法が確立された。これによりあらゆる物質中のスピン物性を定量的かつ定量的に調べることが初めて可能となり、新現象の発見とスピン物性の解明が実現されている。本研究は、この一連の研究を更に発展させ、動的スピン流生成手法とスピンホール効果によるスピン流-電流相互変換を併用することで、バンド伝導系のみならずホッピング伝導系まで含めたあらゆる物質系を包括する体系的スピン流伝導・変換の物理を構築し、次世代電子技術の物理基盤を切り拓く。

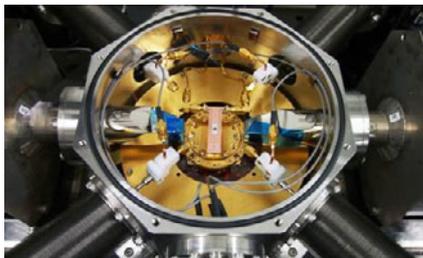


図1 スピン流測定系

【研究の方法】

スピン軌道相互作用によりスピン流-電流相互変換を実現するスピンホール効果を用いることで、ス

ピン流の電氣的生成と検出が可能となる。本研究ではスピンヘテロ界面におけるスピンホール効果を用い、動的スピン交換と組み合わせることで、バンド・ホッピング伝導系を包括するスピン伝導及びスピン-電荷変換の物理を構築する。更に空間反転対称性の破れと非一様スピンドYNAMIXが生み出すヘテロ界面におけるスピン交換の物理を明らかにし、絶縁体/金属界面において発現するマグノンから伝導電子へのスピンキャリア変換を利用することで、格子系からスピン系への角運動量移行を利用した非線形スピントロニクス効果を開拓する。

【期待される成果と意義】

スピンホール効果を基軸としたスピン流物性開拓により、これまでのスピントロニクスの延長線上では到達困難であった体系的スピン流物理の構築が可能となる。特にスピン流伝導・変換はあらゆるスピンベースの電子物理技術の基盤であり、本研究により新原理の電子技術「スピンホールナノエレクトロニクス」を開拓し、次世代省エネルギー電子技術に貢献する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, C. H. W. Barnes, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Electrically tunable spin injector free from the impedance mismatch problem," *Nature Materials* 10, 655 (2011).
- K. Ando, S. Watanabe, S. Mooser, E. Saitoh, and H. Siringhaus, "Solution-processed organic spin-charge converter," *Nature Materials* 12, 622 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
150,000千円

【ホームページ等】

<http://www.ando.appi.keio.ac.jp>
ando@appi.keio.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系（総合理工）



研究課題名 多機能融合・省電力エレクトロニクスのための Sn 系 IV 族半導体の工学基盤構築

名古屋大学・大学院工学研究科・教授 ざいま しげあき
財満 鎮明

研究課題番号：26220605 研究者番号：70158947

研究分野：薄膜・表面界面物性

キーワード：半導体物性、結晶工学、表面・界面物性、ゲルマニウム錫、エネルギーバンド

【研究の背景・目的】

シリコン (Si) 系半導体集積回路の応用分野の更なる広がりに伴って、益々の省電力化、高速化、多機能化が希求されている。本研究においては、新世代素子として注目されるトンネル電界効果トランジスタ (トンネル FET) や光電融合多機能デバイスのための、ゲルマニウム錫 (GeSn) や GeSiSn などの Sn 系 IV 族混晶薄膜の結晶成長技術および電子物性制御技術を開発する。また、デバイス作製に資する IV 族混晶の材料物性、IV 族混晶と絶縁膜または金属膜との界面物性の解明および制御を目指す。我々が世界に先駆けて研究開発してきた GeSn 結晶成長技術やプロセス技術を更に発展させ、GeSiSn 等の多元系 IV 族混晶薄膜におけるエネルギーバンド構造、結晶歪、欠陥構造、キャリア物性、光電相互作用などを包括的に解明し、物性制御の基盤技術を構築する。さらに、トンネル FET や光学デバイスの作製を試み、その電氣的・光学的特性の解明に基づいて、Sn 系 IV 族半導体材料による Si 系ナノエレクトロニクスの飛躍的發展を目指す。

【研究の方法】

Sn 系 IV 族半導体材料のナノエレクトロニクス応用に向けて、以下の項目に示す研究を推進する。

(1) 結晶成長技術の構築：分子線エピタキシー、化学気相成長法等による結晶成長技術を駆使して、高 Sn 組成と低キャリア密度を両立する高品質混晶形成技術を確認する。

(2) 結晶欠陥および歪構造解明：電子デバイス応用に向けて GeSn、GeSiSn、GeSnC などの混晶層および各種界面の結晶欠陥および歪構造の制御技術を構築する。結晶層の局所歪構造マッピング、欠陥構造同定を進める。絶縁膜/半導体、金属/半導体界面遷移領域のナノ界面物性と各種構造やプロセス条

シリコンナノエレクトロニクス分野の
新しいテクノロジートレンドに貢献



図1 Sn系IV族半導体技術が貢献する多機能・省電力デバイスの概念図。

件との相関を明確化する。

(3) 電子・光物性の解明：直接遷移化を実現する高 Sn 組成混晶層を作製し、GeSn および GeSiSn 層などのキャリア物性、光吸収特性、発光特性等の解明により、Sn 系混晶薄膜のエネルギーバンド構造を明確化する。

(4) デバイス構築のためのプロセス技術開発：電子、光電子デバイスの実現に資するドーピング制御、金属あるいは絶縁物/半導体構造の形成と界面制御技術を構築する。さらに、Sn 系混晶層上への高誘電率金属酸化物膜や金属電極形成を検証し、界面反応、電子物性および電気伝導特性の解明を進める。

(5) デバイス試作と動作特性評価：トンネル FET や光電融合デバイスのためのプロセス技術の構築とデバイス試作、および動作検証を進める。

【期待される成果と意義】

本研究によって、現代の情報化社会を支えている Si 系高移動度 CMOS 技術に新しい IV 族混晶材料である GeSn や GeSiSn などの融合が可能となり、IV 族半導体集積回路のさらなる省電力化、高速化、多機能化に向けた工学基盤を構築できる。さらに、これらの技術から、トンネル FET、直接遷移型 IV 族半導体光デバイス、光-電子機能融合デバイスなどの新しいナノエレクトロニクス技術の開拓を目指し、わが国の半導体工学分野やエレクトロニクス関連産業に貢献する。また、学術的観点からは、従来、IV 族半導体では不可能であった直接遷移型半導体の創成とエネルギーバンドエンジニアリングという、新しい興味深い材料科学の進展が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ S. Zaima, "Technology Evolution for Silicon Nanoelectronics: Postscaling Technology", Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 030001 (12 pages) (2013).
- ・ O. Nakatsuka, Y. Shimura, W. Takeuchi, N. Taoka, and S. Zaima, "Development of epitaxial growth technology for Ge_{1-x}Sn_x alloy and study of its properties for Ge nanoelectronics", Solid-State Electron. **83**, pp. 82-86 (2013).

【研究期間と研究経費】

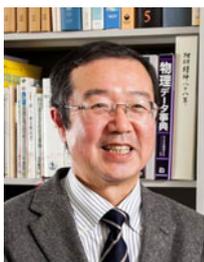
平成 26 年度 - 30 年度
138,600 千円

【ホームページ等】

<http://alice.xtal.nagoya-u.ac.jp/groupiv/zaima@alice.xtal.nagoya-u.ac.jp>

【基盤研究(S)】

理工系(総合理工)



研究課題名 単一アト秒パルスの高出力化によるアト秒電子ダイナミクス計測の確立

理化学研究所・緑川レーザー物理工学研究室・主任研究員

みどりかわ かつみ
緑川 克美

研究課題番号: 26220606 研究者番号: 40166070

研究分野: 応用物理学、光量子科学

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

【研究の背景・目的】

物質中の電子の動きを捉えることができるアト秒パルスレーザーは、物理学や化学のみならず生物・医学等分野においても今後必須のツールとなると考えられる。2001年にアト秒パルスおよびパルス列の発生が観測されて以来、その発生・計測法ならびに利用は、急速に発展してきたが、未だに波長域、エネルギー、平均出力等は十分ではなくその応用範囲を制限している。特に、単一アト秒パルスに関しては、その強度および繰り返し速度は、目標となる計測に必要なとされるレベルには達していない。本研究では、我々がこれまで開発してきた2波長励起による高強度の単一アト秒パルスの発生法をさらに高度化し、その波長域をサブ keV 領域にまで拡張するとともに、リング型共振器を用いた新しい超高繰り返しアト秒パルス光源を開発し、アト秒科学の先端を切り開くことを目的とする。

【研究の方法】

(1) 高出力単一アト秒パルスの波長域の拡大
これまでに理研で開発された赤外2波長励起法を拡張し、高出力単一アト秒パルスの短波長化と短パルスを行う。具体的には、非線形媒質を Ar、Ne とイオン化ポテンシャルの大きな媒質を用いることにより、各々20nm, 11nm 領域で高出力の単一アト秒パルスを得る。さらに、ショット毎の単一アト秒パルスのエネルギーを安定化させるために、10Hz 動作の増幅器システムでも Carrier-Envelope Phase (CEP) を安定化させる手法を開発し、2波長励起レーザーシステムによる高出力で安定な単一アト秒パルスの発生法を確立する。

(2) MHz 級超高繰り返しアト秒パルスの発生
固体表面や吸着分子等のアト秒電子ダイナミクスの計測においては、空間電荷による制限からアト秒パルスの強度よりも MHz 級の超高繰り返しが要求されている。これに対応するために、理研で開発してきた共振器内高次高調波発生法と2波長励起法を組み合わせることにより、MHz 級の超高繰り返しアト秒パルス光源を実現する。

(3) アト秒ポンプ-プローブ法によるアト秒電子ダイナミクスの計測

同時に複数の電子が励起状態にある多電子励起状態の関与する過程や二重イオン化過程は、電子同士の超

高速相互作用に支配されるため放射光を用いた従来の周波数領域での分光法では、そのダイナミクスを明らかにすることはできなかった。単一アト秒パルスによる時間領域での直接計測は、これを解明する強力な手法としてその実現が強く望まれてきた。本課題では、開発する安定で強力な単一アト秒光源を利用して、これら過程のポンプ-プローブ計測を行うとともに MHz 級高繰り返しアト秒光源技術と合わせてアト秒電子ダイナミクス計測の技術地盤を確立する。

【期待される成果と意義】

アト秒電子ダイナミクス計測の大きな目標の一つが、単一アト秒パルスを用いたポンプ-プローブ法による多電子相互作用(電子相関)の解明であるが、これを実現するには、 10^{14} W/cm² 以上の高強度単一アト秒パルスが必要とされる。本課題では、赤外2波長励起法という新しい単一アト秒パルスの発生法により安定で高出力単一アト秒パルス光源が実現され、2電子励起状態のダイナミクス等の実時間計測が可能となる。また、MHz 級の超高繰り返しアト秒パルス光源は、固体表面や吸着分子における電子ダイナミクスの解明を可能とする。これら我々が世界をリードしている二つのアト秒パルス発生技術は、アト秒科学に新たな展開をもたらすものと確信している。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- E. J. Takahashi, P. Lan, O. D. Mücke, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, "Attosecond nonlinear optics using gigawatt-scale isolated attosecond pulses", Nat. Commun. 4, 2691 (2013).
- E. J. Takahashi, P. Lan, O. D. Mücke, Y. Nabekawa, and K. Midorikawa, "Infrared two-color multicycle laser field synthesis for generating intense attosecond pulse", Phys. Rev. Lett. 104, 233901 (2010).

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
134,400 千円

【ホームページ等】

http://www.riken.jp/research/labs/chief/laser_tech/

【基盤研究(S)】

理工系(総合理工)



研究課題名 極低温静電型イオン蓄積リングが拓く極限科学:宇宙化学から放射線生物学までの展開

理化学研究所・東原子分子物理研究室・主任研究員

あずま としゆき
東 俊行

研究課題番号: 26220607 研究者番号: 70212529

研究分野: 量子ビーム科学

キーワード: イオンビーム

【研究の背景・目的】

イオン蓄積リングは、高エネルギー物理や核物理の実験においてイオンビームの強度や品質を向上させるために開発された加速器科学における大型装置である。ところが、磁場を使わずにすべてを静電的に制御することによって、周回蓄積イオンの質量と無関係に同一条件下で運転できる静電型イオン蓄積リングが近年登場した。これにより、イオン蓄積リングでは全く取り扱われたことのなかったはるかに重いイオン、すなわち多原子分子イオン、クラスターイオン、さらには生体分子イオンまでが周回蓄積可能となった。

我々は、装置の大きさを基本的に磁場の場合より遥かに小型化できる利点を活かして、装置全体を極低温(5K)、極高真空(10^{-15} Torr) 環境下に設置し、大きさや質量数に制限されない冷却原子分子イオンを長時間周回させることができるテーブルトップサイズの静電型イオン蓄積リングを最近開発した。



図1 極低温静電型イオン蓄積リング内部の電極群

本装置の特徴は、多彩な原子分子イオンを極低温という環境下で、振動回転状態を制御しながら数時間という長い時間スケールで真空中に孤立させて用意できること、10-20keVという一定のエネルギーを保持して周回しているため、リング内で蓄積イオンが衝突や反応を起こした時に生成する粒子を高効率かつ容易に検出できること、さらに分子の個性が明確に現れるエネルギー差が小さい低速衝突ダイナミクスの研究に最適であり、衝突相手の粒子ビームを合流させ相互の速度差を変化させることによりエネルギーの関数としての反応確率すなわちエネルギー微分断面積の測定が可能であることが挙げられる。

本研究では、本装置を基盤としてこれらの特徴を最大限に活用し加速器技術、光技術を原子分子物理

実験に適用することにより、宇宙・化学・生物分野への新しいビーム科学の展開を目指す。

【研究の方法】

周回する対象のイオンを生成するため様々なタイプのイオン源を導入するが、特にエレクトロスプレーイオン源(ESI)によって生成した大型分子イオンは、リングに導入する前に用意する極低温 RF型プリオントラップで予め冷却し、かつ個数を増大させた後パルス状に加速してリングに導入する。リング周囲軌道の途中には直線部分を設け、波長可変 OPO レーザー及や色素レーザーを駆使した分光や中性粒子ビームとの合流衝突実験を行う。前者では大型分子の準安定状態や脱励起過程を追跡するのみならず、極低温下で振動冷却したイオンの分光を行う。また後者では中性粒子ビームを負イオン源とレーザーによる電子脱離を利用して生成し、宇宙における分子化学進化で重要な役割を果たすイオン・中性衝突反応を観測する。

【期待される成果と意義】

極低温・低エネルギー領域のイオン・中性衝突反応は、宇宙における分子化学進化に関する地上実験として重要であるばかりでなく、低エネルギー領域で反応断面積が大きく増大するという基礎科学的にも興味ある反応であり、その詳細が明らかにされると期待される。本研究によって得られる生体関連の大型分子イオンに対する衝突反応のエネルギー微分断面積は、実験上の困難から今まで殆ど得られていなかったものであり、放射線生物学的にも新しい情報をもたらすと期待される。その他、黒体放射が無視できる環境における孤立多原子分子イオンの脱励起過程を長時間にわたって追跡するなど様々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】

- "Cooling dynamics of photo-excited C_6^- and C_6H^- ", G. Ito, T. Furukawa, H. Tanuma, J. Matsumoto, H. Shiromaru, T. Majima, M. Goto, T. Azuma, and K. Hansen, Phys. Rev. Lett. 112, 183001 (2014).
- "Direct observation of internal energy distributions of C_5^- ", M. Goto, A.E.K. Sundén, H. Shiromaru, J. Matsumoto, H. Tanuma, T. Azuma, and K. Hansen, J. Chem. Phys. 139, 054306 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
147,000 千円

【ホームページ等】

<http://www.riken.jp/amo/toshiyuki-azuma@riken.jp>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 統計と計算を戦略とする可換代数と凸多面体論の 現代的潮流の誕生

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

ひび たかゆき
日比 孝之

研究課題番号: 26220701 研究者番号: 80181113

研究分野: 数学

キーワード: グレブナー基底、二項式イデアル、凸多面体

【研究の背景・目的】

科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業の数学領域の研究課題「現代の産業社会とグレブナー基底の調和」(通称、日比プロジェクト)を踏襲し、本基盤研究は、若手研究者育成事業を継続するとともに、日比プロジェクトの代数、統計、計算の盤石な研究組織を堅持し、日比プロジェクトにおける純粋数学の独創的な着想を深遠な理論に昇華させる。

第1に、可換代数と組合せ論の連携から、40余年前、単項式イデアルの可換代数が誕生したが、その歴史的経緯を踏まえ、統計数学、特に、統計モデルと実験計画から、二項式イデアルの秘宝を発掘し、二項式イデアルの可換代数を展開する。

第2に、0次元パフィアン系の計算と言う視点から、凸多面体論、A超幾何系と統計分布論の奏でる三重奏(いわゆる Gelfand の思想)を展開し、凸多面体論から、統計分布の革新的なモデルを提唱する。

【研究の方法】

(戦略 a) 可換代数における determinantal ideals の研究の歴史は古く、不変式論、表現論、組合せ論などとの関連を持ちながら発展してきた。昨今、分割表の代数統計の展開と相俟って、幾つかの二次小行列式から成る任意の集合が生成する二項式イデアルの研究が徐々に活性化されている。主な問題は、そのようなイデアルが、素イデアルであるか否か、根基イデアルであるか否か、素イデアルであれば、その剰余環であるトーリック環は、正規環(あるいは Cohen-Macaulay 環)であるか否か、二次二項式から成るグレブナー基底を持つか否か、等である。

(戦略 b) 実験計画のデータ検定に必須なマルコフ基底は、実験計画に付随するトーリックイデアルの生成系に対応する。研究代表者らは、レギュラーな2水準一部実施計画と切断イデアルの相互関係の探究から、1/2 実施計画、1/4 実施計画の主効果モデルが二次のマルコフ基底を持つことを証明した。その成果を踏まえ、一般の2水準一部実施計画のトーリックイデアルの代数的理論を構築し、更に、多水準一部実施計画のマルコフ基底の計算の可能性を探る。

(戦略 c) 順序凸多面体は、有限分配束のトーリックイデアルを定義する著名な凸多面体である。順序凸多面体に付随するA超幾何系には、そのパフィアン系の階数が多項式的に増加する無限系列が存在する。そのような無限系列を導く凸多面体の斬新な類を探究するとともに、凸多面体論の観点から、計算可能なA超幾何分布のモデルを提唱し、統計モデ

ルの豊富なデータベースを構築する。

(戦略 d) Segre-Veronese 配置の一般化である入れ子配置の理論は、統計学の具体的なモデルから代数学へのフィードバックとしての着想である。入れ子配置、中心対称配置などに付随する凸多面体とトーリックイデアルの具象的研究を展開し、その統計学的な解釈を議論する。

【期待される成果と意義】

本基盤研究は、黎明期である、二項式イデアルの可換代数の劇的な展開を齎し、可換代数の新天地を開拓するとともに、代数的側面から計算代数統計の発展に貢献する。加えて、統計と計算を礎とする、従来とは全く異なる枠組から、伝統的な凸多面体論を大胆に再編成し、凸多面体の代数的組合せ論の研究に斬新な潮流を誘う。

日比プロジェクトと本基盤研究の10年を越える継続的な研究から、代数、統計、計算の深遠なる連携が現代数学に深く浸透し、その潮流は、次世代の永続的な展開へと踏襲される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Hibi, Ed., "Gröbner Bases: Statistics and Software Systems," Springer, 2013.
- S. Aoki, T. Hibi and H. Ohsugi, Markov chain Monte Carlo methods for regular two-level fractional factorial designs and cut ideals, *J. Statist. Plann. Infer.* **143** (2013), 1791--1806.
- V. Ene, J. Herzog, T. Hibi and F. Mohammadi, Determinantal facet ideals, *Michigan Math. J.* **62** (2013), 39--57.
- J. Herzog and T. Hibi, "Monomial Ideals," GTM 260, Springer, 2011.
- S. Aoki, T. Hibi, H. Ohsugi and A. Takemura, Gröbner bases of nested configurations, *J. Algebra* **320** (2008), 2583--2593.

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
137,700千円

【ホームページ等】

<http://www.math.sci.osaka-u.ac.jp/~hibi/>
hibi@math.sci.osaka-u.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 特異構造が支配する非線形現象の高度形態変動解析

東京大学・大学院数理科学研究科・教授 **ぎが よしかず**
儀我 美一

研究課題番号: 26220702 研究者番号: 70144110

研究分野: 数物系科学、数学、数学解析

キーワード: 非線形解析(含 変分解析・非線形現象)

【研究の背景・目的】

形状の変動を数学的に解明するには、いわゆる「特異構造」がどのようにして形成されていくかを把握することが重要な鍵になります。特異構造の例として、ちぎれる液滴や、結晶表面に現れる衝突する渦、また結晶の強い異方性を反映したファセットと呼ばれる平らな面などが挙げられます。それらがどのように形成され変化し消滅するかを、現象を記述する非線形偏微分方程式を考察することにより解明していくことが、本研究の形態変動解析の目的です。

特異構造を含む場合、接線や曲率を古典的な意味で定義できないことが多いので、偏微分方程式の古典解だけを用いるのでは不十分です。このため解概念の拡張が必要になります。

幸い、この30年間の非線形解析学の進展により、必ずしも滑らかでない図形の変動を、偏微分方程式の解と捉える方法による成功例が蓄積されてきました。例えば、平均曲率流方程式に対して、等高面法を構築することで、動く曲面がちぎれて特異点が発生した後も、その追跡が可能になりました。また、変分法的な捉え方も明らかになってきました。これらは我々の典型的な成功例の一つです。

本研究では、特異構造が支配する非線形性の強い拡散型方程式に対して、微分可能とは限らない解「弱解」の概念を導入し、問題の数学的適切性や、解の特性を調べ、形態の変動を解析します。方程式自体に特異点があるような全変動流方程式や、クリスタライン平均曲率流方程式までも研究対象とします。また高次元や高階方程式の問題にも取り組みます。諸モデル間の関係を明らかにするとともに、結晶成長分野、画像処理分野、流体力学分野等への応用を目指します。このために、最先端の粘性解析、変分解析、関数解析、漸近解析、実解析をさらに深化させます。

【研究の方法】

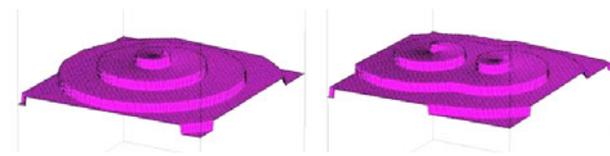
個人研究と、国内外共同研究者との共同研究を行います。さらに関連した数学分野でテーマを絞った国際ワークショップを開催いたします。また、諸科学に潜む問題を発掘するための学際的国際会議およびチュートリアルセミナーを開催いたします。

【期待される成果と意義】

数学的側面: 形態変動の解析学という広い視点で諸手法を融合・拡張させるので、難問の解決および新手法の提案が期待されます。特に高次元での問題

や、高階の問題について新たな展開が予想されます。例えば、変分解析と粘性解析の両方の手法を駆使することにより、クリスタライン平均曲率流に対する等高面法を曲面の場合に拡張することが可能になり、20年来の未解決問題解決への道が開けます。こうして変分解析や粘性解析等を深めながら、非線形偏微分方程式論の発展に寄与することが予想されます。

応用面: 形態変動解析の問題は、流体力学や結晶成長学のような物理分野にとどまらず、画像処理のような情報分野や、微分ゲーム等を通じて社会学にも関連します。本研究により、当該分野の基礎理論の刷新が期待されます。例えば結晶表面に現れる渦の衝突の数学解析により、成長速度についての従来の理論が一新される可能性があります。また、方程式の基本的性質の解明により、異なる分野への応用が期待されます。



等高面法による渦巻成長の数値計算
[Ohtsuka, Giga, Tsai (2014)]

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Giga, Surface evolution equations: A level set approach. Monographs in Mathematics, 99. Birkhäuser Verlag, Basel (2006), xii+264 pp.
- M.-H. Giga, Y. Giga and J. Saal, Nonlinear partial differential equations: Asymptotic behavior of solutions and self-similar solutions. Progress in Nonlinear Differential Equations and their Applications, 79. Birkhäuser Verlag, Boston (2010), xviii+294 pp.

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
119,800千円

【ホームページ等】

<http://www.ms.u-tokyo.ac.jp/~labgiga/>

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 広視野X線分光観測による宇宙大規模プラズマの研究

首都大学東京・理工学研究科・教授

おおし たかや
大橋 隆哉

研究課題番号: 26220703 研究者番号: 70183027

研究分野: 数物系科学、天文学、天文

キーワード: X線 γ 線天文学

【研究の背景・目的】

現在の宇宙では、陽子や中性子からなる通常物質(バリオン)の半分以上が未検出で残されていて、ダークバリオンと呼ばれている。これらは温度が約100万度で低密度の銀河間物質として宇宙の大構造に沿って分布すると考えられるが、観測的にほとんど未解明の状態にある。ダークバリオンの放射を捉えるほぼ唯一の方法が、赤方偏移した輝線スペクトルを高いエネルギー分解能で検出することである。本研究は、小型衛星DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor: 図1)を開発し2020年に打ち上げることを目的とする。観測装置はTESカロリメータアレイ、無冷媒冷却系、4回反射望遠鏡からなり、2 keV以下での視野 \times 面積(広がった放射への感度)は14年後に打ち上げられる大型X線天文台に匹敵する。DIOSが実現する広視野の高分解能分光観測によって、ダークバリオンの探査に加えて、地球近傍から銀河団まで、宇宙にあるさまざまな大規模プラズマのダイナミクスが一举に解明されると期待される。

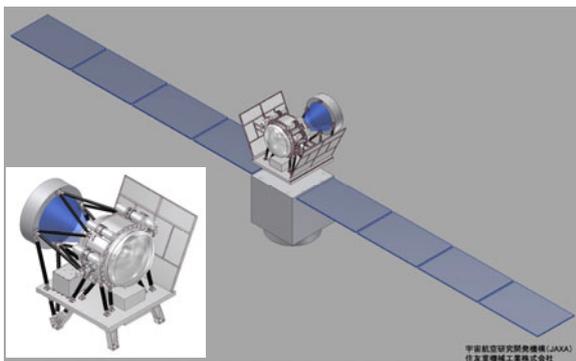


図1: 本研究で開発する小型衛星DIOSの予想図。太陽電池バドルの差し渡しは約10 m、衛星重量は約700 kgで2020年の打ち上げを目指す。左下は観測装置部分の拡大図。

【研究の方法】

DIOS衛星を2020年に打ち上げるために、首都大、名古屋大、JAXA宇宙研の力を結集し、米欧の国際協力の実績があるグループとも協力しながら期間内にフライトモデルの製作を終了させる。

1年目には各機器の性能実証、2年目には詳細設計と小型衛星への選定というステップを経て、3年目から5年目まででペイロードフライトモデルの製作を行う。6年目の総合試験と打ち上げ運用は別予

算へ引き継ぐが、検出器および望遠鏡の主要部分の製作を本研究で行う。

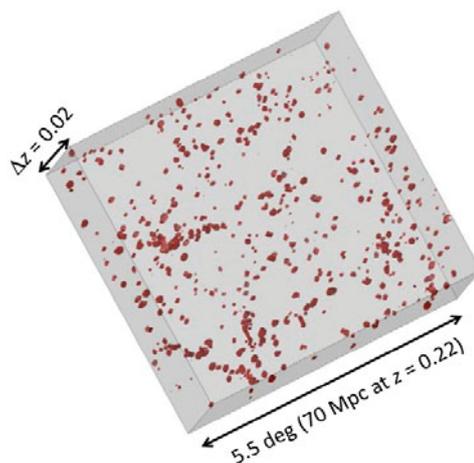


図2: DIOSによる宇宙の大構造観測のシミュレーション。5.5度 \times 5.5度の領域を約2年間観測することでフィラメント構造が見えてくる。

【期待される成果と意義】

DIOSが実現されれば、約2年の観測からダークバリオンが作る宇宙の大構造を明らかにでき(図2)、バリオンの総量の半分近くを検出できる。また1度近くにも広がる超新星残骸や銀河団のガスダイナミクスを、輝線の広がりやドップラーシフトをもとに一举に明らかにできると期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Ohashi et al. "Status of the Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (DIOS)", SPIE, **8443**, article id. 844319 (2012)
- T. Ohashi et al. "X-ray study of cluster edge and beyond", *Astronomische Nachrichten*, **334**, 325 (2013)

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
158,500千円

【ホームページ等】

<http://www-x.phys.se.tmu.ac.jp/home/wp/>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 すばる望遠鏡及び TMT 望遠鏡を用いたハビタブルゾーン内に存在する太陽系外惑星の直接撮像

自然科学研究機構・国立天文台・RCUH 職員 **ギュヨン オリビエ**
Guyon Olivier

研究課題番号: 26220704 研究者番号: 90399288

研究分野: 天文学

キーワード: 太陽系外惑星、高コントラスト装置

【研究の背景・目的】

現在、多数の太陽系外惑星が発見されており、ここ最近では統計的研究ができるほど数が増えてきている。しかし、これまでに最も成功している探査法は視線速度法やトランジット法といった間接的手法が主である。今後惑星の表面や大気組成といった重要な情報を知るためには「直接的な撮像観測」が必ず必要となる。特に研究代表者の太陽系外の生命活動の証拠を発見するといった長期的目標のためにも、直接撮像観測は欠かせない。本基盤研究は、この系外惑星を直接撮像法で検出できるような強力な探査装置の開発を主としており、世界で最初に巨大惑星表面からの反射光を捕らえることを目標としている。

【研究の方法】

この10年以内に開発された以下の2つの革新的な技術を組み合わせて太陽系外惑星の直接撮像に挑む。1つ目は現在も使用中の極限補償光学装置(SCEXAO: スケックスエーオー)の改良である。この装置は現在既にすばる望遠鏡に搭載されており、本研究にてさらに改良を加えることでハビタブルゾーン(生命居住可能領域)内の巨大系外惑星の撮像し、その特徴を探ることを目指す。

Activity plan

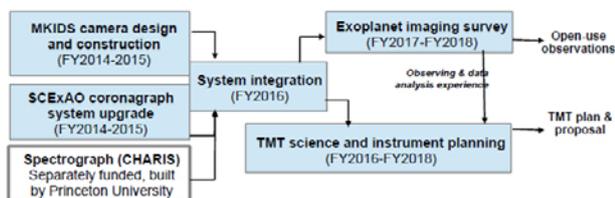


図1 研究計画

2つ目が2022年から本格運用となる30m望遠鏡(TMT)に向けた装置開発の準備である。これはカリフォルニア大学サンタバーバラ校にて、本年度か2015年にかけて行う高速・高感度検出器(MKIDS)の開発がメインである。この2つの技術開発と並行して、現行のコロナグラフシステムの改良や、光学的なノイズを減らす制御系の改善も進め、将来TMTで狙うハビタブルゾーン内の惑星の反射光を直接撮像を可能にする高コントラスト技術、及び高速動作の実証に挑む。

【期待される成果と意義】

本研究期間の作業を経て、現行のSCEXAOシステムは世界で初めて巨大惑星からの反射光を直接検出できるほどの大幅な改善が見込まれる。この結果、すばる望遠鏡の装置の中で最も高解像度となり、世界の中で最も強力な、そして世界中の誰もが使用することのできる惑星探査装置となるだろう。システムの構成は太陽系外惑星の直接撮像に精通したエキスパートと、M型のスペクトルタイプを持つ恒星周囲に存在するハビタブルゾーン内の惑星の性質をよく研究しているチームによって開発を進めていく予定である。そして、この研究開発とすばる望遠鏡による観測の結果は、将来の30mTMT望遠鏡でのサイエンス検討にも繋がる。TMTと補償光学が完成して2年以内にハビタブルゾーン内の惑星に取り掛かれるような装置の準備を念頭に置いている。

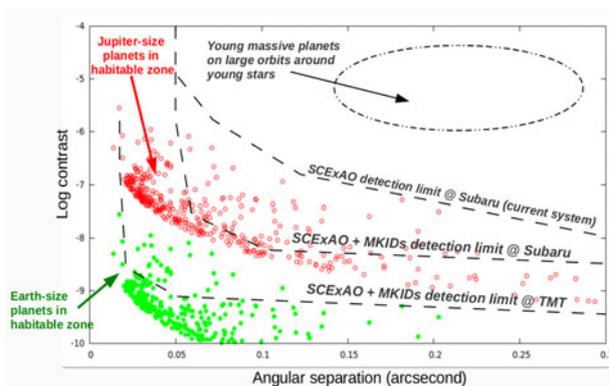


図2 狙う系外惑星の種類と、本基盤研究で目指すコントラストと角距離の対応図

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Guyon, O., et al. 2014, ApJ, 780, 2, 171
- Martinache, F., et al. 2012, PASP, 124, 922, 1288
- Mazin, B.A., et al. 2013, PASP, 123, 933

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
117,200千円

【ホームページ等】

<http://www.naoj.org/Projects/SCEXAO/>
guyon@naoj.org

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 光格子によるレーザー冷却放射性元素の次世代電気双極子能率探索

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・
教授

さけみ やすひろ
酒見 泰寛

研究課題番号: 26220705 研究者番号: 90251602

研究分野: 素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード: 原子核(実験)、素粒子実験、電気双極子能率、レーザー冷却、光格子、基本対称性

【研究の背景・目的】

物質優勢の宇宙はどのようにして生じたのか、本研究では、レーザー冷却放射性元素を用いて、物質・反物質対称性(CP対称性)破れの機構解明を目指す。これまで素粒子標準模型が着実に検証されながらも、反物質の消失を十分に説明するためにさらに根源的な枠組みが必要となっている。この反物質消失や階層問題の解決、ゲージ結合定数の統一、暗黒物質等を解決する候補として考えられる超対称性理論(SUSY)では、標準模型に登場する素粒子に対してパートナーとなるSUSY粒子の存在が予測され、大型加速器実験により探索が進んでいる。

これら大規模実験と相補的な役割を果たすのが、素粒子の電気双極子能率(EDM)探索による超精密低エネルギー実験である。SUSY等では、SUSY粒子の伝搬による電荷分布が素粒子に生じ、CP対称性を破るEDMが自然に出現する。EDMはSUSY粒子の質量やCP位相と相関を持っており、光格子による冷却放射性元素を用いたEDM測定により、SUSY粒子の質量階層構造に踏み込み、反物質消失機構の理解を深める事が本研究の目的である。

【研究の方法】

電子のEDMは、原子量最大のアルカリ原子・放射性元素でもあるフランシウム(^{210}Fr)において、相対論効果により、およそ1000倍程度と、最大に増幅される。このFrを電場・磁場中に閉じ込め、SUSY粒子の効果が発現する原子スピン歳差周期を精密測定してEDMを検出する。本研究では、測定精度向上限界の要因である短い相互作用時間(スピン歳差時間)を打ち破るために、「光格子」を用いた次世代EDM測定技術を世界に先駆けて確立し、現在の上限値を2桁超える測定 $\sim 10^{-29}\text{e}\cdot\text{cm}$ に着手する。



図1 レーザー冷却光格子EDM測定装置

光の定在波中で、光強度に比例した周期的ポテンシャル中に原子を格子状に配置し(光格子)、隣接する原子間の衝突・相互作用を抑え、相互作用時間を格段に伸ばす。光格子Frは世界初であり、レーザー冷却Fr生成工場の開発を進めて来た本研究グループの蓄積技術を発揮する。サイクロトロンからの ^{18}O ビームと、高い引出し効率を実現した融解標的型表面電離イオン源に配置した ^{197}Au 標的との融合反応により大強度 $^{210}\text{Fr}^+$ ビームを生成する。レーザー冷却を用いて磁気光学トラップ(MOT)中に高強度冷却Fr源を実現した後、光格子に移行し、そのスピン歳差周期を精密に測定してEDMを検出する。

【期待される成果と意義】

電子EDMは、標準理論の寄与が極めて小さく新現象に敏感であり、大型加速器実験では直接観測が困難な未知粒子の質量領域を探索できる点が特色である。SUSY粒子の質量によっては既にEDMが検出される領域にさしかかる一方で、LHCやレプトンフレーバー破れの実験等からSUSYは大きなインパクトを受けている。この混沌とした状況を解明するため、標準理論が予測するEDM($\sim 10^{-37}\text{e}\cdot\text{cm}$)に至る10桁の広大な領域の段階的探索が重要である。光格子によるFrEDM探索実験により、カラー電荷を持たないSUSY粒子に関して、加速器実験で直接探索が困難な質量領域 $> 10\text{TeV}$ に踏み込み、SUSY粒子の質量階層構造やCP位相を精密探索し、反物質消失機構の理解を深める。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom
Y. Sakemi, K. Harada, H. Kawamura et al.
J.Phys.Conf.Ser. 302 (2011) 012051
- Laser-cooled radioactive francium factory at CYRIC
H. Kawamura, T. Inoue, Y.Sakemi et al.
Nucl.Instrum.Meth. B317 (2013) 582-585

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
149,700千円

【ホームページ等】

<http://cycgw1.cyric.tohoku.ac.jp/index-j.html>
sakemi@cyric.tohoku.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 タウレプトンをプローブとする新物理探索

名古屋大学・現象解析研究センター・教授 **いいじま とおる**
飯嶋 徹

研究課題番号: 26220706 研究者番号: 80270396

研究分野: 素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード: 素粒子(実験)、加速器、粒子測定技術、タウレプトン

【研究の背景・目的】

LHC 実験においてヒッグス粒子候補が発見され、素粒子物理学は新たな段階を迎えた。唯一未発見であったヒッグス粒子が発見されたことで、標準理論が完成したと見ることもできるが、階層問題や、暗黒物質、宇宙の物質優勢、フレーバーの起源などの諸問題を説明するために、標準理論を超える新しい物理(BSM)の存在が不可欠と考えられる。

タウレプトンは、質量が最も大きな第3世代の荷電レプトンであり、新物理に高い感度を有する。我々は、Bファクトリー実験において、タウ・レプトンに注目した独自性の高い研究を展開し、レプトン・フレーバーを破るタウLFV崩壊の世界最高感度探索や、終状態にタウ・レプトンを有するB中間子崩壊(タウオニク B崩壊)の測定により荷電ヒッグス粒子の存在可能領域に強い制限を与える成果を得ている。

本研究では、これまでのKEKB/Belle実験の40倍の輝度増強によるSuperKEKB/Belle II実験において、タウ・レプトンに注目した独自研究を更に発展させることを目的とする。タウLFV崩壊を、現在の10-100倍の感度となる崩壊分岐比(Br) $<10^{-9} \sim 10^{-10}$ の領域まで探索し、超対称性などの新物理が予想する領域に迫る。また、タウニク B崩壊(B $\rightarrow\tau\nu$ 崩壊やB $\rightarrow D\tau\nu$ 崩壊)の高精度分岐比測定によって、TeV領域の新物理探索を目指す。

【研究の方法】

タウ・レプトンが関与する反応の測定は難しく、Belle II 実験においては、加速器性能の向上とともに、測定器性能を最大限に引き出して、高輝度環境下においても、よりバックグラウンドの少ない測定を行なうとともに、大量のデータ解析やシミュレーション事象の生成が可能な計算機システムの構築が必要となる。

本研究では、その研究期間の前半(H26-27年度)においては、申請者たちが独自に開発し建設を進めてきたTOP(Time-Of-Propagation)カウンターの確立を目指す。特に検出器解析ソフトウェアの構築や、検出器の較正手法を確立し、検出器性能を最大限に引き出す。

また、H28年から始まる物理データの取得を前に、名古屋大学のGRID計算機環境を整備して、処理能力を大幅に引き上げ(CPU30倍、Disk容量15倍)、大量のデータ解析を瞬時にこなせる環境を構築する。そして、シミュレーション事象によ

って、イベント解析の最適化や背景事象の理解を進め、実験開始後に、いち早く結果を得ることができる体制を整える。

【期待される成果と意義】

科学的成果の代表例として、タウLFV崩壊の探索では、多くの新物理模型が予想する分岐比 10^{-8} から 10^{-9} の感度まで探索領域を広げる。また、タウオニク B崩壊を10%程度の精度で測定し、荷電ヒッグスの探索範囲をTeV領域まで広げる。その他にも、 10^{-19} オーダーでのタウ電気双極子能率の探索や、タウ崩壊におけるCPの破れの探索、タウ崩壊の精密測定、電子-陽電子反応断面積の精密データ、ハドロン分光学に関する結果などの豊富な成果が期待される。

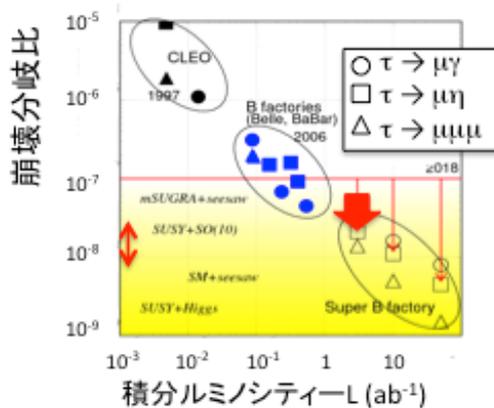


図1 期待されるタウLFV崩壊探索感度

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- "New Search for $\tau \rightarrow \mu \gamma$ and $\tau \rightarrow e \gamma$ decays at Belle", K. Hayasaka, K. Inami, et al. Phys.Lett. B666 (2008) 16-22.
- "Evidence for B $\rightarrow \tau \nu$ with a Hadronic Tagging Method Using the Full Data sample of Belle", K. Hara, Y. Horii, T. Iijima et al. Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 13, 131801.

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
149,600千円

【ホームページ等】

<http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/~ijijima.nagoya>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 クォーク物性を解き明かす ALICE 実験フォトン物理の 展開

広島大学・大学院理学研究科・教授 すぎたて とおる
杉立 徹

研究課題番号: 26220707 研究者番号: 80144806

研究分野: 素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード: クォーク物質、フォトン物理、ALICE 実験、クォークグルーオンプラズマ、QGP

【研究の背景・目的】

高エネルギーに加速した重い原子核を正面衝突させ、極微少な空間に膨大なエネルギーを注ぎ込む。空間は一気に加熱され沸騰し、真空から対生成した大量のクォークとグルーオンが渾然一体となった塊を創る。小さなビッグバンの再現であり、極初期宇宙空間は約 10 マイクロ秒後に起きた QCD 相転移まで、このクォーク物質で満ちていた。この物質の非摂動的な QCD 相互作用が生み出す性質は、量子色力学が確立した現在でも予想することは難しい。私たちの米国 RHIC 加速器実験に於ける完全流体的性質の発見は理論的な予想を超えるものであった。

2009 年始動した欧州最新鋭 LHC 加速器に於いて、私たちはその全容解明に向けた挑戦を継続する。これまでの成果から、全くの異分野と捉えてきた極低温原子凝縮物性との関連性も垣間見え、AdS/CFT 理論の展開と併せて大きな注目を集めている。本研究は LHC 加速器が最高性能を発揮する第 2 期衝突実験全期間を包括し、わが国の大学研究組織が特色を培って推進してきた ALICE 実験フォトン物理を展開する。

【研究の方法】

私たちのアイデアと技術を活かして欧州 CERN 研究所 ALICE 国際共同実験(図 1)に建設導入した高性能フォトン検出器 PHOS 及びジェット対電磁カロリメータ DCAL を主要測定器とし、未踏エネルギー領域のクォーク物性を追求する。先行研究で策定した PHOS 検出器高度化案を本実施計画に繰り込む。PHOS 検出素子からの出力信号を数値化する初段回路(FEE)からデータ集積装置へデータ転送する方式を大幅に改良し、2015 年初めに予定する第 2 期衝

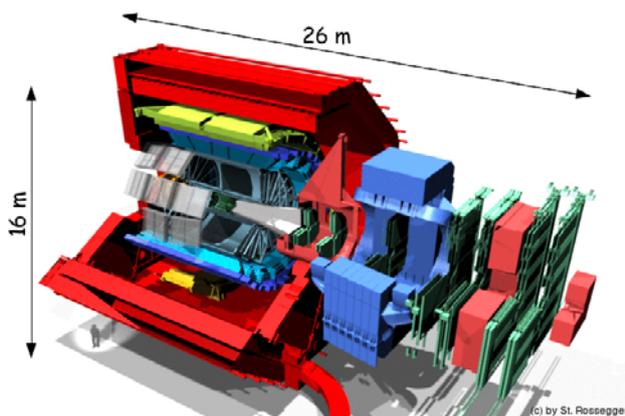


図 1 ALICE 実験装置

突実験開始までに読み出し速度を現行の約 50 倍高速化し、高輝度衝突に対応すると同時に高統計データ収集を担保する。

DCAL と対向する大型電磁カロリメータ EMCAL との間でジェット対相関測定を初めて行い、クォーク物質の強大な阻止能の結果失われたパートンエネルギー散逸量と方向を充分低い閾値まで正確に測定し、ジェット抑制機構を解き明かす。PHOS はエネルギー分解能及び 2 粒子分離分解能とも圧倒的に優れ、他実験を寄せ付けない精密な GeV 領域フォトン検出器である。この特徴を活かして単光子エネルギー分布を測定し、熱輻射光子成分からクォーク物質の熱統計力学状態を初めて特定し全容解明に迫る。

【期待される成果と意義】

LHC 加速器第 2 期衝突実験を完遂し、ジェット対相関によるジェット抑制機構解明、及び熱輻射光子測定によるプラズマ構成量子特定に焦点をあてた独創的な研究成果を輩出する。第 3 期衝突実験に向けた超前方フォトン検出器 FOCAL の実証機開発研究を進め、Bjorken- $x < 10^{-3}$ という未開領域のパートン分布関数に迫る新たなフォトン物理を切り拓く。

本研究の意義は非摂動的 QCD 現象を理解するに留まらず、より理想的なクォーク量子多体系の物性を極め、基礎理論の深化発展とともに新たな学問分野を切り拓く先駆性にある。近い将来、普遍的な拡がりをもつ新たな学術分野「強く相互作用する量子多体系」が開花することを期待する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- 杉立徹, 「LHC 原子核衝突実験; クォーク物質を探る」, パリティ 27 巻 1 号 47-49 頁, 2012 年
- ALICE collaboration, “The ALICE experiment at the CERN LHC”, Journal of Instrumentation 3, S08002 (2008).
- ALICE collaboration, “Neutral pion and eta meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV and $\sqrt{s} = 7$ TeV”, Physics Letters B717, 162-172 (2012).

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
141,200 千円

【ホームページ等】

<http://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 高精度直接観測で探る高エネルギー宇宙線の加速と伝播

早稲田大学・理工学術院・教授

とりい しょうじ
鳥居 祥二

研究課題番号: 26220708 研究者番号: 90167536

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】

宇宙線の研究は、粒子の生成・消滅という素粒子・原子核物理学と、粒子の加速・伝播という宇宙物理学の2つの側面を持っており、観測される宇宙線の組成やスペクトルは両者が複雑にからみあった現象である。そのため、宇宙線の正確な理解のためには、組成やスペクトルの高精度な観測により各々の側面を正確に切り分ける必要があり、地球に降り注ぐ宇宙線を大気の希薄な高い高度で直接捉えることが不可欠である。このような飛行体を用いた宇宙線の直接観測は、これまでに国内外で様々な装置が考案されて実施されて来た。

最近の観測からは、従来の粒子加速・伝播機構モデルだけでは理解できない、(1) 陽電子・電子比率の“異常”と電子+陽電子流束の“過剰”、(2) 陽子・ヘリウムにおけるエネルギースペクトルの“硬化”、が報告されている。これらは、宇宙・素粒子における最大の謎である暗黒物質、又は(及び)未発見の近傍加速源や未知の伝播過程の存在を示唆しているが、観測データ間の相違や高エネルギー領域での観測量の不足のため確定的な結果を得るに至っていない。我々は、国際宇宙ステーション(ISS)における高精度直接観測により、暗黒物質・近傍加速源の解明を含む高エネルギー宇宙線の加速・伝播機構研究の展開を目指す。

【研究の方法】

ISS 日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォーム(JEM-EF)に搭載する高エネルギー宇宙線観測装置(CALET: Calorimetric Electron Telescope)により、まだ観測が乏しいテラ電子ボルト(TeV)領域の電子(+陽電子)と“ニー”領域($\sim 3 \times 10^{15}$ eV)に迫る陽子・原子核成分の世界最高レベルの観測を実施する。CALETは図1に示す通り、電荷測定器(CHD: CHarge Detector)、イメージング・カロリメータ(IMC: IMaging Calorimeter)、及び全吸収型カロリメータ(TASC: Total Absorption Calorimeter)により構成されている。宇宙線やガンマ線が入射すると粒子の種類に応じてシャワー粒子が発生する。その際に各検出器で得られる独立な情報により、電子、ガンマ線又は陽子・原子核といった粒子種別や到来方向・エネルギーの測定を行う。

CALETは「こうのとりのり」5号機により打上げ5年間の観測を実施する予定であるが、軌道上データはつくば宇宙センター経由で早稲田大学のCALET運用センター(WCOC)にほぼリアルタイムで転送さ

れる。本研究計画では、WCOCでのミッション運用とデータ解析により、研究目的を達成する。

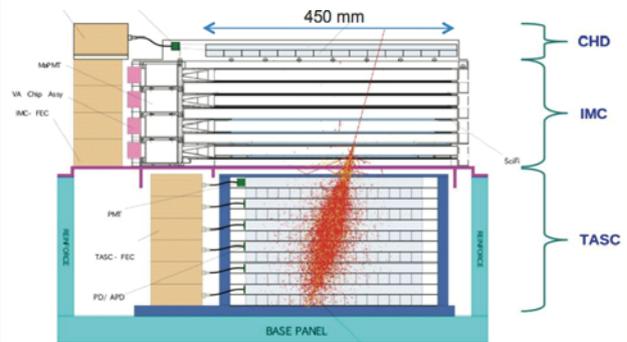


図1 カロリメータの側面からみた概念図と1TeV電子が入射した場合のシミュレーション例。

【期待される成果と意義】

現在、電子・陽電子観測に用いられているマグネットスペクトロメータ(PAMELA、AMS)は、電荷の正負を判別できるものの観測領域がTeV以下に限られる。これまでのカロリメータ方式の装置(ATIC、Fermi-LAT)も、電子観測に最適化された装置ではないため、高エネルギー領域での電子選別等が正確ではない。それに対してCALETは電子観測に最適化されており、分厚い(30 r.l.)カロリメータを備えることによりTeV領域での直接観測が実現できる唯一の装置である。その結果、世界で始めて荷電粒子による近傍加速源の検出や、質量がTeVを越える暗黒物質の探査が可能である。加えて、陽子・原子核の10 GeV-1000 TeVでのエネルギースペクトルの精密観測と数TeVに至るB/C比の測定により、宇宙線の生成・伝播機構の高精度な解明を達成する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・鳥居祥二,「宇宙線を直接捉える」,日本物理学会誌, Vol.67, No.12, pp. 821-827 (2012)
- ・S.Torii, “Calorimetric Electron Telescope mission: Search for dark matter and nearby sources”, NIM, A630, pp.55-57 (2011),

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
130,000千円

【ホームページ等】

<http://www.crlab.wise.sci.waseda.ac.jp>

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測装置 POLARBEAR-2 で探る宇宙創生の物理学

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

はずみ まさし
羽澄 昌史

研究課題番号：26220709 研究者番号：20263197

研究分野：素粒子宇宙物理学

キーワード：宇宙マイクロ波背景放射、CMB、インフレーション宇宙仮説、電波望遠鏡

【研究の背景・目的】

宇宙誕生の瞬間とは？宇宙・時空をつかさどる究極の物理法則とは？これらは人類にとって根源的な問いであり、その解明は科学のグランドチャレンジの一つである。通常、「火の玉」状態のビッグバンが宇宙の始まりと説明されるが、研究の最先端は、いまやそれ以前の宇宙に科学の目で迫ろうとしている。熱いビッグバン以前を記述する最も有力な仮説がインフレーション宇宙仮説である。インフレーション宇宙仮説が予言する原始重力波を検出すれば、科学史上最大の発見になる。現在これを可能にする唯一の手段が、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background、以下 CMB と略す) の偏光観測である。

2014年3月に米国の観測チームが BICEP2 望遠鏡によりこの原始重力波を観測したと発表したが、宇宙の塵などの影響が当初の予想より大きかった可能性があり、決着はついていない。本計画は、現在世界最高レベルを達成している POLARBEAR (ポーラーベア) 検出器より感度が6倍高い POLARBEAR-2 を開発し、新たに観測を実施して、原始重力波の発見をめざす。原始重力波の信号が大きかった場合には、精密測定によるインフレーションモデルの絞り込みを目指す。さらに、重力レンズ効果に起因する CMB 偏光を観測し、ニュートリノの質量をこれまでに達成された感度を超えて測定する。本計画代表者が領域代表をつとめた科研費・新学術領域研究「背景放射で拓く宇宙創生の物理—インフレーションからダークエイジまで—」(平成21年度—25年度、領域番号2110)の成果をベースに、それを格段に発展させる計画である。

【研究の方法】

直径3.5メートルの主鏡を持つ望遠鏡(図1左)をチリ・アタカマ高地に配備し、そこに現在開発中の POLARBEAR-2 検出器(図1右)を搭載し、観測を実施する。POLARBEAR-2 の大きな特長は、世界初の二波長(95 GHz と 150 GHz)同時読み出し TES ボロメータを7,588個搭載した CMB 観測史上最大の検出器アレイを搭載することである。平成27年にはチリ・アタカマに検出器を移設し、米国グループが用意する新しい望遠鏡に搭載する。試験観測を経て平成28年度から平成30年度の3年間で本観測を行う。

米国の研究協力者が担当する220GHzの観測と合わせて、観測最終結果を平成30年度に発表する。これまでに実績のある国際コラボレーションと超伝導

転移端ボロメータ (TES) 検出器技術により、従を上回る感度で観測をおこなう。国際共同実験の中で、KEKはPOLARBEAR-2検出器の開発・試験・観測に全責任を負う。



図1 現在 POLARBEAR プロジェクトで使用中の電波望遠鏡(左)および、開発中の POLARBEAR-2 検出器システム(右)。

【期待される成果と意義】

原始重力波の検出に成功すれば、科学史に残る大発見となる。原始重力波の強度に関するこれまでよりよい上限が得られた場合も、有力なインフレーションモデルの多くが棄却されるため、宇宙論・素粒子物理のどちらにも重要な結果となる。ニュートリノ質量和についても現在の制限を改善できる。誤差の低減に成功し、有限値を測定すれば、素粒子物理学上の重要な発見となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ "Evidence for Gravitational Lensing of the Cosmic Microwave Background Polarization from Cross-correlation with the Cosmic Infrared Background", POLARBEAR Collaboration (76 authors including Y. Chinone, M. Hasegawa, K. Hattori, M. Hazumi, Y. Hori, Y. Inoue, T. Matsumura, H. Nishino, S. Takakura, T. Tomaru), Phys. Rev. Lett. 112, 131302 (2014).

【研究期間と研究経費】

平成26年度—30年度
158,300千円

【ホームページ等】

<http://cmb.kek.jp/>

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 量子対の空間制御による新規固体電子物性の研究

東京大学・大学院工学系研究科・教授

たるちや せいご
樽茶 清悟

研究課題番号：26220710 研究者番号：40302799

研究分野：物理、物性 I

キーワード：スピン物性 (半導体)

【研究の背景・目的】

ナノ構造中の電子を厳密に制御する技術を用いて、量子ドット・細線などの相関電子系、異種の量子からなる複合系などの研究が可能になり、また、量子情報処理への応用が進められている。代表者らは早くから当該研究に参入し、結合ドットの電子相関、スピン操作、光子からスピンへの量子変換の研究に集中してきた。その中で、電子対、光子-スピン対などの対相関に空間の自由度を導入し、加えて量子情報の技術を活用することができれば、量子制御の研究分野は格段に広がり、量子電子物性の新しい研究分野・手法が開拓できることを着想した。その中核となる研究項目として、①多重ドット列の電子相関、②スピン対の量子電子光学、③超伝導-量子ドット (細線) 接合の非局所電子対、④光子-スピン対の相関を取り上げる。

【研究の方法】

上記4つの項目の研究方法を以下に示す (図1)。
①現有の微小磁石法による新型電子スピン量子ビット技術を拡張して、3-5個のドットから成る交換結合型量子ドット列を作り、その基底・励起電子状態の磁氣的性質を解明する。また、3-5量子ビットを用いて量子計算の基本アルゴリズムを実証する。
②単一量子ドット中の電子対の基底状態は量子もつれ (一重項) である。代表者らが開発した、表面弾性波による単一電子のドット間移送を発展させて、表面弾性波中のスピン対を分岐伝送路で分離し、片方の伝送路の電子スピンをスピン軌道相互作用を利用して制御する。これを基盤として、非局所量子もつれのベル測定による検証と電圧制御を行う。
③独自に開発した並列2重ドットを含むジョセフソン接合を改良して、両ドットへのクーパ対分離の高効率化と、それによる超伝導電流の増大を確認する。これにより固体系で初となる、分離量子もつれの検証を達成する。また、理論予測されているマヨラナ粒子について、従来の実験の不明点を、接合の高品質化と位相測定、細線の一次元性の制御により解消し、その真偽を確認する。

④量子ドットのスピン操作を利用して、まず単一光子から単一スピンへの情報転写を、次に、パラメトリック下方変換を用いたもつれ光子対を導入して、一つの光子から生成したスピンと残りの光子の空間分離状態を生成し、その間の相関を検証する。その結果をもとに、当該対相関を原理とする量子中継の有用性を議論する。

【期待される成果と意義】

多重ドット列の項目では、スピン操作を用いて電子配列のスピン状態を自在に形成することにより、ハイゼンベルグ電子格子の物理に迫る。スピン対の量子電子光学の項目では、単一電子、電子対の発生源、ビーム分配器などを実現することにより、固体電子系に量子光学の概念と手法を本格的に導入できる。さらに、スピン対の分離と制御を組み合わせた実験ができれば、固体系量子電子光学の新分野として発展し得る。超伝導/ドット (細線) 接合の項目では、固体系で初となる、分離量子もつれの検証に成功する可能性が高い。また、マヨラナ粒子の検証ができれば、上記検証と併せて学術的意義は極めて大きい。光子-スピン対の項目は量子中継の技術と物理に関係する。代表者らは既に単一光子の角運動量転写の実験に成功しており、スピン回転操作による位相項の検出、もつれ光子対実験への移行が研究の成否の鍵を握る。技術的難易度は高いが、学術、応用の両面で波及効果は大きい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- R. Brunner, Y.-S. Shin, T. Obata, Y. Tokura, M. Pioro-Ladrière, T. Kubo, T. Taniyama, and S. Tarucha: Two-qubit gate of combined single spin rotation and interdot spin exchange in a double quantum dot, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 146801-146804 (2011).
- M. Yamamoto, S. Takada, C. Bäuerle, K. Watanabe, A. D. Wieck and S. Tarucha: Electrical control of a solid-state flying qubit, *Nature Nanotechnology* **7**, 247-251 (2012).

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
150,000千円

【ホームページ等】

<http://www.meso.t.u-tokyo.ac.jp>

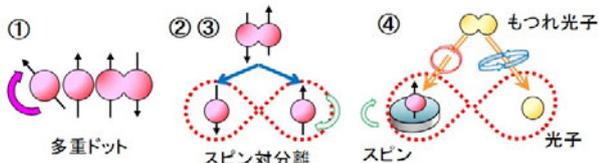


図1 ①-④に対応する量子対の空間制御

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 メゾスコピック系における非平衡スピン輸送の 微視的理解とその制御

大阪大学・大学院理学研究科・教授 こばやし けんすけ
小林 研介

研究課題番号: 26220711 研究者番号: 10302803

研究分野: 量子物性

キーワード: メゾスコピック系、近藤効果、スピントロニクス、非平衡、ゆらぎ

【研究の背景・目的】

わたしたちの身の回りの物質は、磁石になるものや、電気を通すもの、超伝導を示すものなど、様々な特色ある性質を持っています。現代の科学技術は、このような色々な性質を持つ物質を巧みに組み合わせさせて生み出されてきました。

ところで、ほとんどの場合、物質の性質は、その内部にあるたくさんの電子の振る舞いによって決定されます。物性物理学とは、このような数多くの電子が生み出す多彩な現象を扱う学問です。なかでも、電子の持つ二つの自由度、すなわち、電荷(電流を運ぶものです)とスピン(磁石を生み出すものとなるものです)という自由度の結びつきを理解することが、物性物理学の究極の目標であると言っても言いすぎではありません。特に、日本の近藤淳博士によって1964年に解明の糸口が開かれた「近藤効果」や、ハードディスクにも応用されている「巨大磁気抵抗効果」に代表される、スピンの方向に依存して電流が流れる現象(スピン依存伝導)の研究が物性物理学において果たしてきた役割は、極めて大きいものがあります。

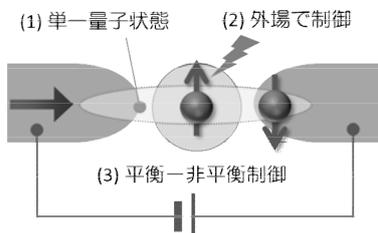
これまで、スピン依存伝導の研究は、主に、たくさんのスピンを含む巨視的な物質を調べることによって行われてきました。しかし、近年、ナノテクノロジーの発展により、微小な固体量子素子(メゾスコピック系)を用いる新しい研究手法が可能となってきました。

本研究は、メゾスコピック系を用いて、近藤効果をはじめとするスピン依存伝導を、その非平衡状態も含めて完全に解明することを目的とします。

【研究の方法】

私たちが用いるメゾスコピック系では、図に示すように、単一の電荷やスピンの状態などを様々な制御することができます。そのため、従来の研究手法では不可能であったような、電子が伝導する最も基礎的な過程を観測し制御することが可能です。

さらに、本研究は、高精度の電流ゆらぎ測定を行う点に大きな特色を持ちます。電流ゆらぎ測定とは、電流の平均値の周りのゆらぎ(分散)を測定するもので、時間平均された伝導度



測定では分からない、非平衡状態にある系のダイナミクスを定量的に知ることができます。私たちは、過去数年来にわたって独自に開発してきた世界最高精度を持つ電流ゆらぎ測定を用いて、スピン依存伝導の研究を行います。

【期待される成果と意義】

本研究の最大の特色は、メゾスコピック系におけるスピン依存伝導の研究に、電流ゆらぎ測定を適用することにあります。私たちは、現在までに、様々なメゾスコピック系にこの測定手法を適用し、研究実績を上げてきました。量子素子における電流ゆらぎは、微細加工技術が発達し、高度なエレクトロニクス機器が手に入る現代だからこそ可能となった先端的かつ独創的な研究テーマです。

ゆらぎに注目する本研究によって、近藤効果をはじめとする多彩なスピン依存伝導のメカニズムの詳細が明らかになります。これは、物性物理学における新しい研究ステージを開くことでしょう。また、現在、スピンを利用する新しいエレクトロニクス(スピントロニクス)が注目されていますが、本研究は、その要となる非平衡スピン依存伝導の理解と制御にも貢献します。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Y. Yamauchi, K. Sekiguchi, D. Chida, T. Arakawa, S. Nakamura, K. Kobayashi, T. Ono, T. Fujii, R. Sakano, "Evolution of the Kondo effect in a quantum dot probed by shot noise", *Physical Review Letters* **106**, 176601-1-176601-4 (2011).
- ・ T. Arakawa, Y. Nishihara, M. Maeda, S. Norimoto, K. Kobayashi, "Cryogenic amplifier for shot noise measurement at 20 mK", *Applied Physics Letters* **103**, 172104-1172104-4 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
149,600千円

【ホームページ等】

<http://meso.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>
kensuke@phys.sci.osaka-u.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）

研究課題名 光量子回路を用いた大規模量子もつれ状態の実現と応用



京都大学・大学院工学研究科・教授 たけうち しげき
竹内 繁樹

研究課題番号：26220712 研究者番号：80321959

研究分野：量子光学、量子情報科学

キーワード：量子コンピュータ、ナノフォトニクス、光導波路、光子

【研究の背景・目的】

量子情報技術とは、量子力学の基本的な性質を、情報通信や情報処理に応用する試みである。特に光子は、光ファイバ等で長距離伝送が可能であるなど、有力な情報担体である。本研究では、10光子程度の、多数の光子をもつれ合わせることの可能な光量子回路の実現を目指す。そして、現在のスーパーコンピュータの計算能力を凌駕する、大規模な多光子量子干渉「ボソンサンプリング」の実証や、得られた多光子量子もつれ状態の、超高感度光量子計測への応用を試みる。

【研究の方法】

光子の大規模量子もつれ状態の実現に向けて、まず、余剰光子を抑制した単一光子源を、既存光学部品を組み合わせる光学定盤上（デスクトップ）で実現する。さらにその小型化に向け、窒化シリコン光導波路によるオンチップ光子源やナノ光ファイバ単一光子源の研究を進める。京大竹内グループ（光量子回路）、九大横山グループ（光導波路）、広大ホフマングループ（理論）が連携して実施する。具体的には、次の項目に関して研究を行う。

（1）デスクトップ光量子回路

余剰光子発生を抑制された、パラメトリック下方変換を用いた伝令付き単一光子源を、光学定盤上で構築する。そして、その単一光子源からの光子列を利用した多光子量子干渉を実施、ボソンサンプリングや、得られた多光子量子もつれ合い状態の計測への応用について研究を行う。

（2）オンチップ光量子回路

小型・高集積化された光量子回路の実現を目標に、窒化シリコン光導波路と有機光非線形材料を組み合わせたハイブリッド素子によるオンチップ単一光子源の研究を進める。

（3）ナノ光ファイバ光子源

ナノ光ファイバとは、単一モード光ファイバの一部を、直径が数百ナノメートルになるまで引き延ばしたデバイスである。これまでに我々は、半導体量子ドットやダイヤモンドナノ結晶と、ナノ光ファイバを組み合わせる単一光子源を実現している（図1）。本研究では、その高効率化について研究を進める。

（4）理論・解析

実験データ解析などを通じ、多光子量子もつれ状態の、物理学的な理解をより深化させるとともに、得られた多光子量子もつれ状態を用いた新しい情報処理や計測について研究を行う。

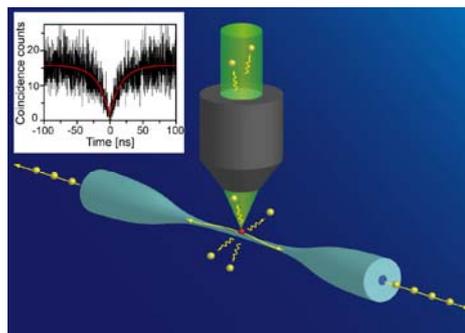


図1 ナノ光ファブを用いた単一光子源

【期待される成果と意義】

多数光子による大規模量子もつれ状態の実現は、制御された量子システムが、初めて古典的な計算限界に到達することを意味し、量子情報科学・計算機科学に重大な意義を与えうる。応用面でも、オンチップ量子もつれ光源と計測への応用は、光計測、ライフサイエンス、材料科学などへも波及・貢献が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Ono, R. Okamoto and S. Takeuchi, “An Entanglement-enhanced Microscope”, **Nature Communications**, Vol. 4, 3426 (2013).
- M. Fujiwara, K. Tobaru, T. Noda, H. Q. Zhao and S. Takeuchi, “Highly Efficient Coupling of Photons from Nanoemitters into Single-Mode Optical Fibers”, **Nano Letters**, Vol. 11, 4362-4365 (2011).
- R. Okamoto, J. L. O'Brien, H. F. Hofmann, T. Nagata, K. Sasaki and S. Takeuchi, “An Entanglement Filter”, **Science**, Vol. 323, 483-485 (2009).

【研究期間と研究経費】

平成26年度－30年度
146,300千円

【ホームページ等】

<http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)

研究課題名 初期地球進化解読



東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

こみや つよし
小宮 剛

研究課題番号: 26220713 研究者番号: 30361786

研究分野: 地質学、地球化学、地球史

キーワード: 初期地球、冥王代、地球・表層環境進化、消滅核種同位体比進化

【研究の背景・目的】

地球は約 45.4 億年の長い歴史をもつ、複雑・多様に進化した惑星である。しかし、その誕生を示す 45.4 億年という数字を地球の物質から得ることはできない。現在、地球最古の岩石や地質体の年代は 40.3 億年前であり、最初の 5 億年の情報は地球上にはほとんど残されていない。地球誕生から最古の岩石の年代までの時代は冥王代と呼ばれ、その知識は文字通りいまだ冥い。本研究の目的は、物質学的研究を通じて、この昏冥の時代の固体地球と表層環境の進化を解読することである。私たちは地質試料がなく物質学的研究が困難な時代の研究を、七つの戦略からあえて物質学的研究にこだわり挑む。黎明期の進化が、地球進化を決定付けたことを考えると本研究で得られる初期地球解読の成果は地球型惑星の進化の解明に重要な貢献をすることが期待される。

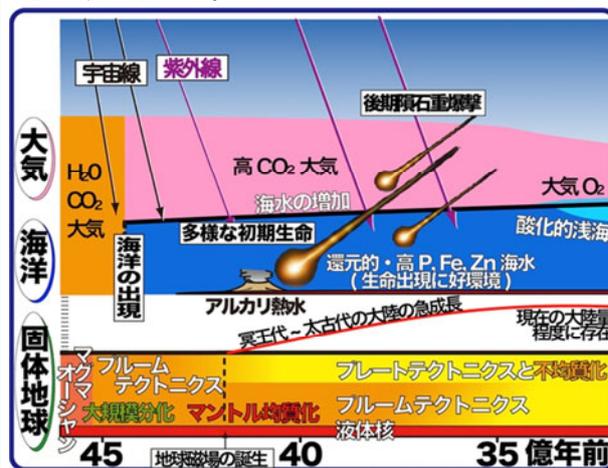
【研究の方法】

初期地球における 10 の問題点の解明に向け、地質学、岩石・鉱物学と地球化学をシームレスに融合し、以下の 7 つの手順で研究計画を遂行する。①初期地球の重要地質体(西グリーンランド、カナダアカスタ、ハドソン湾東岸、ラブラドル、南アなど)の重点調査に基づくプレートテクトニクスの証拠の探索と試料採取。②採取した岩石試料(各地域 1000 試料)の顕微鏡観察と微量元素組成を基に、初生情報を残すベスト試料の選別。③ベスト試料の $\epsilon^{142}\text{Nd}$, $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ や白金族元素濃度から初期地球のマンテル進化を推定。特に消滅核種 ($\epsilon^{142}\text{Nd}$, $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$) を用いた冥王代の物質分化の定量化の新規開発。④冥王代の隕石衝突ジルコンの年代分布から隕石後期重爆撃を実証。冥王代ジルコンの包有物の分析から冥王代の固体地球と海洋進化解読。⑤最古の堆積岩(縞状鉄鉱層や炭酸塩岩)の微量元素組成から初期地球の熱水・海水組成を推定。⑥太古代の超塩基性岩や塩基性岩をホストとする海洋底変成作用の研究から熱水組成を推定し、初期生命の生息環境を復元。⑦最古の炭質物の同位体組成や微量元素組成から生命の証拠を探索し、その生命種を同定。

【期待される成果と意義】

冥王代は地質・岩石記録が残されておらず、昏冥な時代とされるが、マグマオーシャンと地球大規模分化、海洋の誕生とその進化、プレートテクトニクスの開始と大陸形成・成長、後期重爆撃とマンテル中の白金族元素の存在量や生命物質の化学進化、生命の誕生などその後の地球を特徴付けたイベントが起きたと時代とされる。しかし、そのようなイベン

トは計算科学や他の天体や隕石の研究から推測されたもので、本当に地球で起きたのかは未だ明らかにされていない。そして、それを実証するには地球の岩石試料の物質学的研究が必要不可欠である。先に挙げた研究を基に、初期地球イベントを実証し、初期地球での固体地球、表層環境と生命の共進化モデルを構築する(図1)。その成果は地球型惑星の内部進化と生命・環境進化の解読に重要な貢献をすることが期待される。



1図: 初期地球(45.4~35億年前)進化モデル

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Komiya et al., 1999. Plate tectonics at 3.8-3.7 Ga: Field evidence from the Isua accretionary complex, southern West Greenland. *Journal of Geology*, 107, 515-554.
- Komiya, 2007. Material circulation through time -Chemical differentiation within the mantle and secular variation of temperature and composition of the mantle-. In: Yuen, D.A. et al., (Eds.), *Superplumes: Beyond Plate Tectonics*. Springer, New York, 2007, pp. 187-234.
- Iizuka et al., 2007. Geology and zircon geochronology of the Acasta Gneiss Complex, northwestern Canada: new constraints on its tectonothermal history. *Precambrian Research*, 153, 179-208.

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度-30 年度
149,800 千円

【ホームページ等】

<http://ea.c.u-tokyo.ac.jp/earth/Members/komiya.html>



研究課題名 機能性ナノ構造体の界面配位合成と化学素子の創製

東京大学・大学院理学系研究科・教授
にしはら ひろし
西原 寛

研究課題番号：26220801 研究者番号：70156090

研究分野：無機化学

キーワード：分子ワイヤ、二次元錯体、バイオ共役マテリアル

【研究の背景・目的】

光・電子・電気化学デバイスの技術革新における次なる目標は半導体や無機固体に加えて様々な機能をもつ分子材料を利用する技術の確立であり、分子材料を用いてナノサイズ物質を設計通りに組み上げるボトムアップ方法論の確立が求められている。

本研究では、「界面配位プログラミング法」を用いて、ユニークな特性を有する分子ネットワークを創製するとともに、独創的で高性能の化学素子を開発することを目的とする。対象物質系の一つは、界面に縦方向に分子ユニットを連結して組み上げる π 共役金属錯体ワイヤであり、レドックス活性、導電性に加えて、光、温度、圧力刺激に応答して構造や物性が変換する機能や光電変換機能を組み込んだ錯体分子ワイヤを構築し、インテリジェントな化学素子を開発する。また生体コンポーネント PSI, PSII と分子ワイヤのハイブリッドシステムを構築する。もう一つの対象物質系は界面に横方向に分子ユニットを連結して組み上げる π 共役金属錯体ナノシート(図1)であり、二相界面合成法を用いて多層および単層の導電性及びレドックス活性な錯体 π ナノシートを作製し、エレクトロクロミズム、トポロジカル絶縁性の発現とそれらを応用した先駆的な素子の開発を行う。

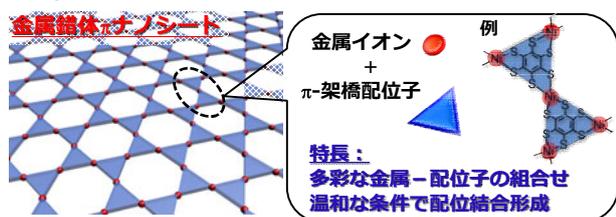


図1. 研究対象の金属錯体 π ナノシート.

【研究の方法】

様々な金属と配位子の組み合わせを用いて、1) インテリジェント錯体分子ワイヤと 2) 錯体 π ナノシートを創製し、それらの構造解析・物性測定・素子開発を行う。1) については、分子ネットワーク中の電子輸送特性の普遍的要素を導出するとともに、より高速電子移動能および外部信号応答機能を持つ分子ワイヤを創出する。さらにそれらのインテリジェント分子ワイヤを用いてウェット系、ドライ系分子素子を作製する。2) については種々の金属と配位子の組合せで物質群を探索し、液液界面での多層シート (μm 厚)、気液界面での単層および数層のシート (nm 厚) の合成法と色々な基板への転写法を確立し、

構造決定と物性測定を行う。さらに、エレクトロクロミック素子、高性能 FET やスピントルク素子を作製する。またワイヤシート共役系の創成も行い、高次機能材料開発へ展開する。

【期待される成果と意義】

単一分子デバイスに適する物質は、導電性やレドックス特性を自在に制御でき、光などの外場応答性を有する分子ワイヤである。配位プログラミング法で合成できる π 共役レドックス錯体ポリマーワイヤは、金やシリコン基板上でポテンシャル傾斜構造や分岐構造を精密かつ自在に設計でき、超長距離電子輸送能や多重レドックス活性をもつ。本研究で、外部信号に応答する分子スイッチ部位を組み込むことによって新しい化学素子へ展開できる。

一方、有機電子デバイスの物質の主役として、有機半導体、金属・半導体ナノ粒子が研究されてきたが、最近グラフェン(二次元炭素)に大きな注目が集まっている。その理由は、グラフェンが優れた物性を示すことに加えて、二次元シート状構造が、そのまま従来の半導体技術、表面加工技術を適用できるからである。本研究の対象である金属錯体 π ナノシートは、物質のバリエーション、合成の簡便さ、低コスト、物性チューニングの容易さ等の利点を持つ独創的な物質であり、導電性やレドックス特性も付与できる。トポロジカル絶縁性が見出されれば、それを活かした STT 素子などへの応用は、新たな分子素子開拓へつながる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- π -Conjugated Nickel Bisdithiolene Complex Nanosheet, T. Kambe, R. Sakamoto, K. Hoshiko, K. Takada, J. Ryu, S. Sasaki, J. Kim, K. Nakazato, M. Takata, H. Nishihara, *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 2462-2465.
- Coordination Programming-A Concept for the Creation of Multifunctional Molecular Systems, H. Nishihara, *Chem. Lett.* **2014**, *43*, 388-395. (Highlight Review)

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度-30 年度
150,100 千円

【ホームページ等】

<http://www.chem.s.u-tokyo.ac.jp/users/inorg/nishihara@chem.s.u-tokyo.ac.jp>

【基盤研究(S)】

理工系(化学)



研究課題名 ハーフサンドイッチ型錯体構造を基盤とする新反応場の構築

理化学研究所・侯有機金属化学研究室・主任研究員 侯 召 民

研究課題番号: 26220802 研究者番号: 10261158

研究分野: 基礎化学

キーワード: 有機金属化学、錯体化学、触媒、高分子合成、有機合成

【研究の背景・目的】

新しい触媒の開発は、従来困難とされた新しい分子変換反応の実現や新機能性材料の創出など、様々な波及効果をもたらす極めて重要な研究課題である。現在の有機合成や高分子合成などの物質創製化学は一定の成功を収めつつも、期待されるレベルの高さからみればまだ極めて不満足な状態にある。さらなる進歩を実現するためには、様々な金属の特徴を生かした斬新な分子設計に基づく新規触媒の開発が重要な鍵を握る。希土類金属を含む前周期遷移金属錯体触媒の開発においては、これまでシクロペンタジエニル基(Cp)支持配位子を二個持つ、 Cp_2MR_n のようなメタロセン型の錯体を中心に研究が進められていた。しかしこのようなサンドイッチ型構造を持つメタロセン錯体は安定性には優れるものの、配位子の立体障害などのため反応性に制限があり、その応用範囲はかなり限られていた。一方、より高い反応性が期待できる、補助配位子を一個しか持たない錯体(特に希土類錯体)は、配位子の再配列が起こりやすく合成が困難であり、その研究があまり進んでいなかった。本提案者らはこれまで、様々な配位子について検討した結果、 $C_5Me_4SiMe_3$ のような多置換 Cp 配位子を一個しか持たない一連のハーフサンドイッチ型希土類ジアルキル錯体の合成に成功し、これらの錯体が多彩な反応性を示すことを明らかにしてきた。本研究では、提案者らの独自の知見に基づき、補助配位子を一個しか持たないハーフサンドイッチ型金属活性種を基に、新しい構造を有する様々な遷移金属アルキル錯体やヒドリド錯体などを設計合成し、それらを基盤として、特異な反応性を有する革新的触媒の開発を目指す。具体的には、窒素などの不活性小分子の活性化、芳香族化合物の炭素-炭素結合の切断や不斉水素化、さらにポリオレフィンの高機能化など、従来の手段では達成困難な新規物質変換反応を実現すべく、触媒の設計・合成から、新反応・新機能性材料の開発まで一貫して系統的に研究を進める。

【研究の方法】

まず、様々な置換シクロペンタジエニル配位子(光学活性配位子を含む)をもつハーフサンドイッチ型希土類ジアルキル錯体を合成し、それらの錯体から対応するカチオン性アルキル活性種を発生させ、それを用いて連鎖移動によるポリオレフィンの官能基化やC-H結合の不斉アルキル化などについて詳細に検討し、付加価値の高い高分子材料やファインケミ

カルの創製を目指す。また希土類以外の遷移金属マルチアルキル錯体も同様に合成し、これらを水素と反応させ対応するポリヒドリド錯体を合成し、その構造を明らかにしたうえで、窒素分子などの不活性小分子の活性化や、芳香族化合物の水素化(不斉水素化を含む)、さらに炭素-炭素結合の切断など、これまで困難とされた新しい物質変換反応の開発を行う。

【期待される成果と意義】

本研究で目指す、カチオン性ハーフサンドイッチ型希土類触媒によるポリオレフィンの高性能化やC-H結合の不斉アルキル化、多金属ヒドリドによる窒素分子の活性化や芳香族化合物の不斉水素化、さらに炭素-炭素結合の切断などの化学変換反応は、いずれも従来の触媒では実現困難であり、本提案者のこれまでの研究成果と独自の知見に基づいて立案したものである。本研究の成果は、有機金属化学や触媒化学、有機合成化学、材料科学などの基礎科学の新たな発展に大きく貢献できるだけでなく、本研究により生み出される新触媒、新反応及び新規有用物質は、新たな知的財産を形成し、新産業の創出にもつながることが期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Shima, S. Hu, G. Luo, X. Kang, Y. Luo, and Z. Hou, "Dinitrogen Cleavage and Hydrogenation by a Trinuclear Titanium Polyhydride Complex", *Science*, **2013**, *340*, 1549-1552.
- M. Nishiura and Z. Hou, "Novel Polymerization Catalysts and Hydride Clusters from Rare-Earth Metal Dialkyls", *Nature Chem.*, **2010**, *2*, 257-268.

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
149,900千円

【ホームページ等】

<http://www.riken.jp/lab-www/organometallic/index.html>



研究課題名 次世代型有機分子触媒の創製と実践的精密有機合成への
応用

京都大学・大学院理学研究科・教授 まるおか けいじ
丸岡 啓二

研究課題番号: 26220803 研究者番号: 20135304

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】

天然資源の乏しい我が国の将来にとって、高付加価値の新機能性材料や医薬品の創製に不可欠な知識集約型科学技術の発展とその産業の育成が重要であり、その基盤となるものは「有機合成化学」である。本研究では、各種の次世代型有機塩基触媒、有機プレンステッド酸触媒や有機多官能性触媒のデザインと触媒機能の創出に努めたい。特にラジカル化学分野の発展は全般的に遅れているため、次世代型有機ラジカル触媒の創製と機能創出研究を強力に押し進めたい。それによって、現在、世界中で急速に発展しつつある「脱金属触媒」としての有機分子触媒化学分野を本質的な意味で短期間にダイナミックに展開させ、世界の有機分子触媒分野で国際的なリーダーシップを取ることで、有機分子触媒研究の国際的トップ拠点を築きたい。

【研究の方法】

有機分子触媒の種類に応じて、「次世代型有機ラジカル触媒」、「次世代型有機塩基触媒」、「次世代型有機酸触媒」、「次世代型有機多官能性触媒」という四つの研究項目に分けて、次世代型有機分子触媒の合理的な設計と創製を目指すとともに、これらの過程で見出された次世代型有機分子触媒を駆使して、実践的な精密有機合成反応を開拓する。取り扱う研究範囲が広いこと、現在、世界中で急速に発展しつつある分野のため、研究のスピードがきわめて重要であることを勘案して、本研究の研究体制を四つのグループに分けた。それぞれの小グループが知恵を出し合い、緊密な情報交換体制を取ることで、欧米型の一教授体制に比べ、日本の小グループ体制のメリットを最大限に活用したい。基礎研究と実用化研究の双方を目指すことにより、次世代型有機分子触媒プロジェクトを強力に推し進め、実りある多くの成果を生み出したい。

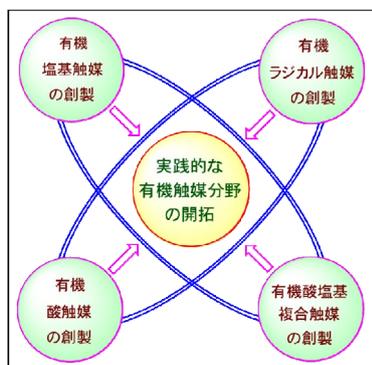


図1 次世代型有機触媒プロジェクト

【期待される成果と意義】

「有機分子触媒」は、従来の「生体触媒」や「金属触媒」に加え、第三の触媒として、その化学安定性ゆえに近年、注目を集めている。この有機分子触媒分野において、「次世代型有機分子触媒」を創製できれば、従来の「生体触媒」や「金属触媒」では及びもつかないような反応性や選択性の獲得が可能になるであろう。それによって種々の新しい精密有機合成反応を開拓でき、従来、合成が難しいと考えられていた新規有機化合物の創製へとつながり、産業界における関連研究の諸分野の発展に大きな波及効果をもたらすと考えられる。

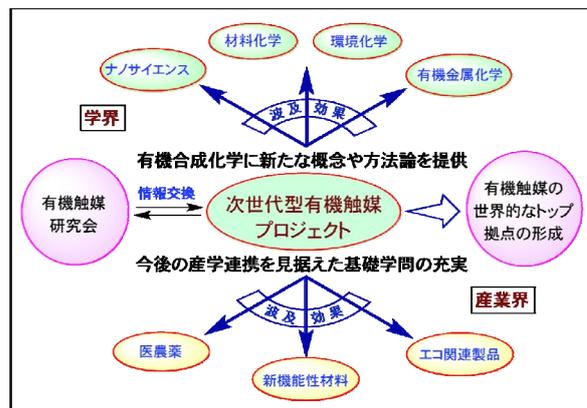


図2 次世代型有機触媒プロジェクトの成果と波及効果

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Enantioselective Base-Free Phase-Transfer Reaction in Water-Rich Solvent. R. He, S. Shirakawa, and K. Maruoka, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 16620-16621 (2009).
- Recent Developments in Asymmetric Phase-Transfer Reactions, S. Shirakawa and K. Maruoka, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **52**, 4312-4348 (2013). [Review Article]

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
150,000 千円

【ホームページ等】

<http://kuchem.kyoto-u.ac.jp/yugo/index.html>
maruoka@kuchem.kyoto-u.ac.jp



研究課題名 フラッシュケミストリーの深化と新展開

京都大学・大学院工学研究科・教授 よしだ じゅんいち
吉田 潤一

研究課題番号：26220804 研究者番号：30127170

研究分野：合成化学

キーワード：ファインケミカルズ、フローマイクロリアクター、機活性種

【研究の背景・目的】

有機合成化学は生物活性物質や機能性材料などの合成を通じ広範な分野に大きく貢献してきたが、依然として合成法が発展上の律速となっている場合が多いことも否めない。現在利用されている合成反応の多くはフラスコを用いて開発されたものである。しかし、フラスコは分子レベルやマクロなレベルから見ても必ずしも最適な反応環境とは限らない。合成化学をさらに発展させ時代の要請に即応させるためには、今までに蓄積された莫大な知識に立脚し再構築するとともに、新しい視点や斬新な手法を導入し、新たな高みへと飛躍する必要がある。

本研究の目的は、フローマイクロリアクターの特性を生かして短寿命活性種を制御し、高い選択性で反応時間秒～ミリ秒オーダーの超高速合成反応を行うフラッシュケミストリーを深化させるとともに進化させ、従来とは異なる新しい合成化学の分野を開くことである。具体的には、フローマイクロリアクター中で合成条件下での速度解析を行い、得られた定量的なデータによる速度論に基づいた合理的反応設計によりフラスコでは実現困難な新規分子変換法を開拓するとともに、さらに一般的かつ実践的な合成法へと広く展開する。

【研究の方法】

本研究では、フラッシュケミストリーの深化と体系化をめざす。その目的のために、各種有機活性種(有機アニオン種、有機カチオン種、ベンザイン、カルベノイドなど)について、生成と分解の速度論的解析を行い、得られた速度や活性化エネルギー等の定量的データに基づいた合理的反応設計により新反応開発(有機金属反応、光反応、気液反応、電解反応)へと展開するとともに、有用な高次機能性化合物の実践的合成へと成熟させる。



図1. 研究計画・方法の概要

具体的には、高性能低温フーリエ赤外分光装置(FT-IR)など備えたフローマイクロリアクター装置を開発し、短寿命活性種の直接観測を行うことによ

り、活性種の構造や安定性に関する知見を得る。

活性種生成方法として、通常の実験装置を用いるフローマイクロリアクターだけでなく、フロー型電解装置および光化学反応装置も開発する。

また、フローマイクロリアクターを用い温度-滞留時間マッピングを行うことにより、有機活性種の生成速度と分解速度の定量的な解析を行う。特に、寿命が非常に短い不安定有機活性種の生成と分解の定量化を実現するためには、数ミリ秒以下の高速混合や数ミリ秒オーダーの滞留時間制御、さらには超精密温度制御(デバイスの材質の検討)を可能とする次世代型のマイクロデバイスの開発が不可欠である。

そして、速度解析で得られた定量的なデータに基づき、有機活性種の高次制御を基軸とする一般性の高い新反応開発法を確立する。

【期待される成果と意義】

今までのフラスコ化学では、不安定活性種を扱うためには、温度を下げて寿命を長くするという方法が用いられてきた。それに対してフラッシュケミストリーでは、温度を下げるのではなく時間を短くしかも精密に秒～ミリ秒単位で制御することにより、不安定な活性種の利用を可能にする点が学術的な特色であり独創的である。また、合成条件下での反応速度解析を行い、反応開発に定量性を導入することが大きな特色であり独創的な点である。本研究によって、反応開発のスピードと信頼性を飛躍的に向上させることができ、有機合成化学全体から見ても大きな学術的意義がある。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Flash Chemistry. Fast Organic Synthesis in Microsystems, Yoshida, J. Wiley, 2008.
- ・ Flash chemistry: flow chemistry that cannot be done in batch. Yoshida, J.; Takahashi, Y.; Nagaki, A. *Chem. Commun.* 2013, 49, 9896.

【研究期間と研究経費】

平成26年度～30年度
147,700千円

【ホームページ等】

<http://www.sbchem.kyoto-u.ac.jp/yoshida-lab/yoshida@sbchem.kyoto-u.ac.jp>



研究課題名 分子イメージングを基軸とする生細胞内分子計測・光操作法の開発

東京大学・大学院理学系研究科・教授 おざわ 小澤 たけあき 岳昌

研究課題番号: 26220805 研究者番号: 40302806

研究分野: 化学

キーワード: バイオ分析、イメージング

【研究の背景・目的】

生細胞内の分子の素過程をネットワークとして理解するために、生体分子を可視化および操作するための新たな分析方法を確立する。次の3つの研究課題を遂行する。1) 生細胞内における小数生体分子の可視化・定量法の開発。2) 光によるリン酸化酵素活性化制御法の開発。3) G タンパク質共役受容体(GPCR) 活性を制御する光操作技術の開発。マルチ蛍光イメージングおよび蛍光・ラマンハイブリッドイメージングによる多次元情報取得、および特定のタンパク質の活性を光で操作し生体分子を可視化する、新たな細胞内分子ネットワーク解析技術を創出する(図1)。開発する方法は、基礎生命化学研究の基盤技術になるとともに、創薬や阻害剤評価の革新的技術となることが期待できる。

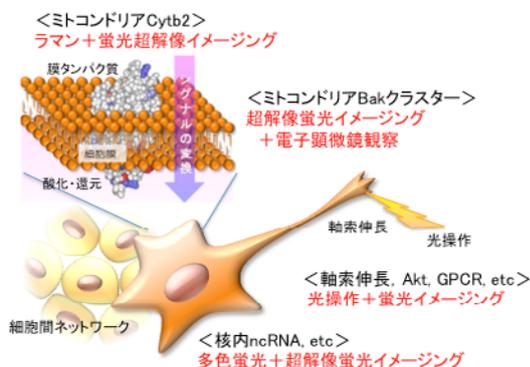


図1. 生体分子・内細胞シグナルの多次元情報解析法の開発

【研究の方法】

課題1) 生細胞内ではたらく小数分子の可視化・定量法を開発する。細胞内在性のテロメア RNA を1分子レベルで可視化し、その数を計測する新たな技術を開発する。開発する蛍光プローブを生細胞内に発現させ、全反射蛍光顕微鏡で細胞核内のテロメア RNA 局在を観察する。1細胞内のテロメア RNA の数を産出する。さらに1分子レベルでテロメア RNA とヒストンメチル化をライブイメージングする技術を確認し、テロメア RNA とエピジェネティックなシグナルを同時観測する技術を確認する。同様の原理により、ミトコンドリア膜上の凝集体 Bak タンパク質数計測技術を開発する。

課題2) 細胞内キナーゼ(Akt) 活性光操作法を開発する。Akt の局在変化を光制御するために、植物由来光感受性タンパク質を利用する。光強度、照射時

間を変え、基質タンパク質の1つである NO 合成酵素(eNOS)のリン酸化や、Akt の下流で制御されている Atrogin 遺伝子の発現等が、光照射により変動することを実証する。光刺激による Akt の活性化を数理モデルとして構築する。さらに、マウス個体で Akt を光制御できることを実証する。同様の光活性化原理を用いて、神経軸索誘導に必要な DCC リセプターのリン酸化能を光制御する技術を開発する。課題3) GPCR 活性を制御する光操作技術を開発する。GPCR の二量体形成を蛍光検出するスクリーニング系を樹立する。GPCR のC末端に、コメツキムシ由来のルシフェラーゼ(ELuc)の2分割フラグメントを連結する。プローブを安定発現するスクリーニング用細胞を樹立する。ケミカルライブラリーを用いて、GPCR 阻害剤探索を実践し、新たな GPCR 光制御分子を開発する。阻害剤に光応答官能基を連結して、GPCR 活性を光制御できることを実証する。

【期待される成果と意義】

本申請研究は、個々の分子反応の素過程を追究する分子科学と、要素還元的に現象の解明を試みる生命科学との中核に位置し、分野横断的な研究領域を開拓する新規分析法の創案、開発である。即ち、蛍光・ラマンハイブリッドイメージングによる多次元情報取得、および特定のタンパク質の活性を光で操作し摂動を加えその応答を可視化する技術は、生命の本質であるネットワークを理解する基盤技術となるため、その開発意義は極めて大きい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Advances in fluorescence and bioluminescence imaging. T. Ozawa, H. Yoshimura and S.B. Kim, *Anal. Chem.*, **85**, 590-609 (2013).
- Methods of split-reporter reconstitution for the analysis of biomolecules. H. Yoshimura and T. Ozawa, *Chem. Record*, in press.

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
150,200 千円

【ホームページ等】

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



研究課題名 真空紫外フェムト秒レーザーイオン化質量分析の研究

九州大学・大学院工学研究院・教授 いまさか とうたろう
今坂 藤太郎

研究課題番号：26220806 研究者番号：30127980
研究分野：分析化学
キーワード：レーザー分光

【研究の背景・目的】

質量分析法は、有機化合物の有力な分析方法の一つである。とくにガスクロマトグラフ法とレーザーイオン化質量分析法を組み合わせる方法を用いると、数1000種類の成分を一斉に、かつサブフェムトグラムまで分析できる。しかし、爆発物、神経ガス、農薬等の幾つかは、このようなレーザーイオン化法を用いても分子イオンが観測されず、高感度分析が困難な場合が少なくない。

そこで、本研究では過酸化アセトン等の爆発物、サリン等の神経ガスの合成副産物・代謝物、農薬等について、分子イオンを検出し、かつ高感度に測定できる真空紫外～深紫外(VUV-DUV)フェムト秒レーザーイオン化質量分析法を開発する。このような研究を通して、質量分析におけるイオン化過程の本質を明らかにすると共に、爆発物を用いるテロ活動や神経ガスを用いる大量殺戮に対抗するための新しい計測技術を開発する。

【研究の方法】

フェムト秒チタンサファイアレーザー(800 nm)とこれを励起光源とする光パラメトリック発振光(1200 nm)を同時に水素に集光し、そこに紫外超短パルス光を導入することにより、分子位相変調により多数のVUV-DUVレーザー光を発生させる。下記は、すでに得られたレーザー光の分光写真の一例である。本研究では、その効率をさらに増強すると共に、その発振線の一つ、あるいは複数を取り出してレーザーイオン化する質量分析装置を開発する。

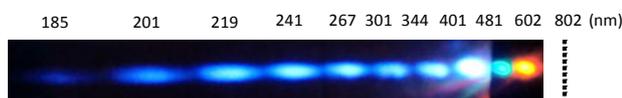


図1 真空紫外～紫外超短パルスレーザー

この装置を用いて、過酸化アセトン、トリニトロトルエン(芳香族化合物)、ニトロ化合物(鎖状化合物)等の爆発物について、共鳴2光子イオン化、非共鳴2光子イオン化、共鳴2色2光子イオン化、あるいは近赤外レーザーを用いる多光子イオン化法を用いることにより、分子イオンを増強し、かつ感度よく測定できる方法について検討する。とくに爆発物についてはDUV領域、神経ガス関連物質についてはVUV領域に吸収帯があるので、前述の超短パルスレーザーを用いて研究する。

【期待される成果と意義】

神経ガス(SRN)、爆発物(TATP, RDX)、農薬(CTPS)等は、図2に示すように芳香環を持たず、P=O、P=S、O-O、C-Cl、あるいは解離し易いニトロ基を多数持つ。このため分子イオンが得られず、分析感度が低いと考えられる。そこで、本研究では、VUV-DUV領域の超短パルスレーザーを用いることにより、このような問題点を克服することを目指す。

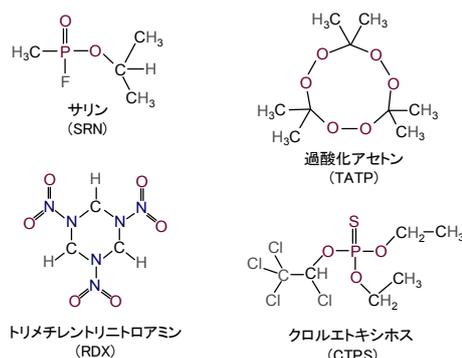


図2 分析対象物の構造式

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Y. -C. Chang, T. Imasaka, Simple Pretreatment Procedure Combined with Gas Chromatography/Multiphoton Ionization/Mass Spectrometry for the Analysis of Dioxins in Soil Samples Obtained after the Tōhoku Earthquake, *Anal. Chem.* 85, 349-354 (2013).
- ・ T. Imasaka, Gas Chromatography/Multiphoton Ionization/Time-of-Flight Mass Spectrometry Using a Femtosecond Laser, *Anal. Bioanal. Chem.*, 405, 6907-6912 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成26年度～30年度
150,100千円

【ホームページ等】

<http://imasaka.cstf.kyushu-u.ac.jp/>

研究課題名 一酸化窒素の生体内動態の分子科学



理化学研究所・城生体金属科学研究室・主任研究員

しろ よしつぐ
城 宜嗣

研究課題番号: 26220807 研究者番号: 70183051

研究分野: 生体関連化学、生物無機化学

キーワード: 一酸化窒素、酵素反応、呼吸酵素、分子進化、膜タンパク質、環境科学、亜酸化窒素

【研究の背景・目的】

一酸化窒素 NO は、高等動物細胞においてはシグナル分子として重要な機能を果たしている。一方、NO はラジカル分子であり、タンパク質や核酸などの生体分子と容易に反応し、細胞損傷を引き起こす。本研究では、「脱窒」をモデル系として、生体中での NO の産生・伝搬・消去の機能メカニズムを、分子・原子のレベルから細胞レベルに渡って解明する事を目的としている。

脱窒は微生物の嫌気呼吸の一種であり、硝酸塩 (NO₃⁻)、亜硝酸塩 (NO₂⁻) を基質として、窒素 (N₂) まで逐次還元するシステムであり、地球上の窒素循環において重要な機能を果たしている。この過程において、亜硝酸還元酵素 NiR は、NO₂⁻ を一電子還元し NO を産生するが (NO₂⁻ + 2H⁺ + e⁻ → NO + H₂O)、この NO は一酸化窒素還元酵素 NOR により速やかに亜酸化窒素 N₂O に還元される (2NO + 2H⁺ + 2e⁻ → N₂O + H₂O)。本研究では、NiR と NOR を研究対象として上記目的を達成する。

【研究の方法】

1. NOR による NO 消去機構の解明: NOR の分子構造を基盤にその触媒反応機構を明らかにする。この解明のポイントは、酵素反応中に現れる短寿命 (1 ミリ秒) な反応中間体である NO 結合型酵素の構造・電子状態である。低温トラップ結晶構造解析法、時分割可視・赤外分光法、時分割結晶構造解析法などを駆使して、この課題に挑戦する。

2. NiR から NOR への NO 伝搬機構の解明: NO 産生酵素 (NiR) と NO 消去酵素 (NOR) との相互作用を明らかにする。精製酵素同士の複合体形成とその間での NO 伝搬の機構を、結晶構造解析を中心とした様々な手法で明らかにする。さらに、蛍光顕微鏡等を用いて、細胞内での複合体形成と NO を拡散させない NO 伝搬機構を証明する。加えて、

NiR-NOR 複合体にさらに電子供与体 (アズリン) を加えた三者複合体の解析から、NO₂⁻ から N₂O への

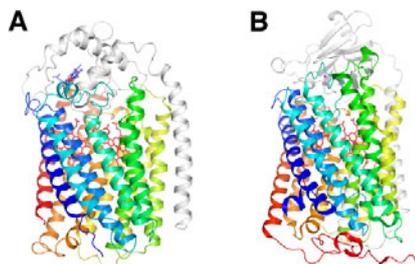


図1 A. 一酸化窒素還元酵素と B. チトクロム酸化酵素の結晶構造

変換の生体内連続反応場の形成を確認し、さらに薬剤等によるその制御をめざす。

3. 呼吸酵素の実験室分子進化: NOR は好気呼吸酵素チトクロム酸化酵素の分子進化上の祖先と考えられている (図1)。部位特異的変異により NOR の NO 還元活性を酸素 O₂ 還元活性へと変換する。さらに、酵素反応に利用されるプロトンの伝達経路を制御する。これらにより、嫌気呼吸から好気呼吸への呼吸酵素の分子進化を実験室レベルで再現する事に挑戦する。

【期待される成果と意義】

細胞内での NO 動態を分子・原子のレベルで理解可能となり、細胞内での物質移動・代謝という側面から生物化学の新しい分野が開拓できる。また、呼吸酵素の分子進化、特にプロトンポンプに関する新しい知見が期待できる。NOR は病原菌の生存にも必須である。NO 還元生成物の N₂O は、温室効果ガスでありオゾン層破壊ガスとしても知られており、地球上の N₂O 産生の約7割は NOR 反応による。これらのことから、その NOR 反応の分子機構解明と阻害剤検索は、医科学および環境科学分野にも貢献する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Hino, Y. Matsumoto, S. Nagano, H. Sugimoto, Y. Fukumori, T. Murata, S. Iwata, Y. Shiro: "Structural Basis of Biological N₂O Generation by Bacterial Nitric Oxide Reductase" *Science* **330**, 1666-1670 (2010)
- Y. Matsumoto, T. Tosha, A. V. Pislakov, T. Hino, H. Sugimoto, S. Nagano, Y. Sugita, Y. Shiro: "Crystal Structure of Quinol-Dependent Nitric Oxide Reductase from *Geobacillus Stearothermophilus*" *Nat. Strl. Mol. Biol.* **19**, 238-245 (2012)

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
150,100 千円

【ホームページ等】

<http://www.riken.jp/biometal/index.htm>
yshiro@riken.jp

【基盤研究(S)】

理工系(工学)



研究課題名 金属ナノ薄膜の強度に及ぼす寸法効果の本質的理解

大阪大学・大学院工学研究科・教授

みのしま こうじ
箕島 弘二

研究課題番号: 26220901 研究者番号: 50174107

研究分野: 機械工学、機械材料・材料力学

キーワード: マイクロ材料力学、材料強度学、破壊、疲労、クリープ、金属薄膜

【研究の背景・目的】

厚さが 10 nm から 1,000 nm オーダーの金属多結晶薄膜(金属ナノ薄膜)の機械的特性や強度は膜厚に強く依存する。これは膜厚が薄くなると結晶粒微細化による転位運動の拘束、体積の縮小による転位源の枯渇に加え、変形・破壊に対する表面の影響が異なることに因る。しかも、これらの薄膜構造による効果に加え、大気環境下では薄膜表面の自然酸化層が特性に影響を与えることが考えられる。しかし、ナノ薄膜の強度に及ぼす自然酸化層の影響は未解明であり、強度に及ぼす寸法効果の本質は不明である。

本研究では、結晶粒寸法等の内部組織を調整した金属ナノ薄膜(Cu、Al、Au)を用いて、変形・破壊に及ぼす表面自然酸化層と変形・破壊を生じる時の新生面の酸化・酸化層の影響を明らかにし、これにより純粋な表面効果を分離・抽出することにより、金属ナノ薄膜の機械的特性・強度に及ぼす寸法(膜厚)効果の本質を解明することを目的とする。

【研究の方法】

研究代表者らが開発した厚さが 10 nm から 1,000 nm であるにも関わらず、長さや幅が mm オーダーの大面积自立金属ナノ薄膜作製技術(図 1)、および金属ナノ薄膜に対する引張・破壊じん性・クリープ・疲労強度試験技術(図 2)を基礎として、① 環境(酸素ガス分圧)制御下での高倍率その場観察(ナノスケール損傷・破壊機構解明)、② 薄膜表面の酸化層除去・制御、および③ 変形・破壊現象(単純破壊、クリープ、疲労)に応じたその場観察強度実験を実現するための実験システムを開発する。本システムを用いて体系的な強度実験を実施して、ナノ薄膜の変形・破壊特性と破壊機構に及ぼす「表面酸化層の影響」を分離・抽出して、寸法(膜厚)効果の本質を明らかにする。

【期待される成果と意義】

薄膜材料が用いられる微小機械は最先端の加工・製造技術で作られているにも関わらず、合理的な力学的基準による強度・信頼性設計が行われていない。これはナノ薄膜の強度に及ぼす寸法効果や環境効果が不明で支配法則が未解明のためである。

本研究は、ナノ薄膜の強度の寸法効果の本質を体系的に解明するものであり、実環境下におけるマイクロ・ナノデバイスの強度設計に合理的な基準を提供する。さらに、表面酸化皮膜の制御・表面改質によるナノ薄膜の高強度化など、デバイスの高信頼性

化に大きく貢献する。

さらに、本研究で開発する環境を制御した条件下の変形・破壊のその場観察技術は、ナノ薄膜にとどまらず、構造材料で問題となる大気中の水などで生じる水素脆化などの環境誘起破壊、大気中での変形・破壊機構解明に应用展開可能な基盤研究技術として極めて広い波及性を有している。

Freestanding nano-film specimen

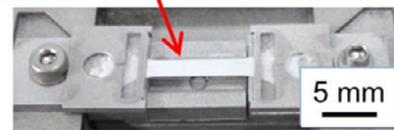


図1 大面积自立Alナノ薄膜強度試験片

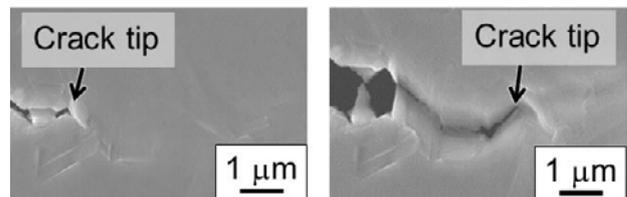


図2 Cuナノ薄膜のその場観察破壊じん性試験

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- H. Hirakata, N. Fukuhara, S. Ajioka, A. Yonezu, M. Sakihara, and K. Minoshima, The Effect of Thickness on The Steady-State Creep Properties of Freestanding Aluminum Nano-Films, Acta Materialia, Vol.60, 2012, pp. 4438 - 4447.
- T. Kondo, T. Imaoka, H. Hirakata, M. Sakihara, and K. Minoshima, Effects of Stress Ratio on Fatigue Crack Propagation Properties of Submicron-Thick Freestanding Copper Films, Acta Materialia, Vol.61, 2013, pp.6310-6327.

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
149,900 千円

【ホームページ等】

<http://www-micro.mech.eng.osaka-u.ac.jp/home.html>

【基盤研究(S)】

理工系(工学)



研究課題名 ナノスケールで構造を制御した人工磁気格子とその工学的応用

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

いとうえ みつてる
井上 光輝

研究課題番号: 26220902 研究者番号: 90159997

研究分野: 工学、電子・電気材料工学

キーワード: 磁性体、誘電体、光学、人工磁気格子

【研究の背景・目的】

数 nm から数百 nm のスケールで人為的構造を導入した磁性体は、構造に起因する新規の磁性と機能を示すことから、これを工学的に利用する研究が重要な技術分野を形成しつつある。特に、最近の情報通信テクノロジーの飛躍的な進展に伴い、重要な情報キャリアである光やスピン波、あるいは高周波電磁界とナノ構造との相互作用が注目されるようになった。最もよい例は、光波長オーダーで周期構造体を形成したフォトリソニック結晶で、フォトリソニック・バンド構造や光局在現象を利用した多彩なフォトン輸送制御が試みられている。

これらフォトリソニック結晶に関する一連の研究とは別に、透明強磁性体にナノスケール構造を導入することで、巨大な磁気光学効果が発現することを見出し、磁性体のスピンで制御可能な新しい光学媒体の実現可能性を示した。この光とナノ構造スピンシステムとが結合したフォトリソニック結晶(磁性フォトリソニック結晶)は、光波の位相干渉を利用したものであるが、光ではなくても、波動として存在するものであれば同様の機能が発現する。我々はこの観点から上述の研究成果を進展させ、磁化の位相波であるスピン波の周期構造スピンシステムの性質を調べ、磁気媒体上に金属周期構造を形成することで、マグノニック・バンドギャップを発現し、特定周波数ではスピン波の伝搬(マグノンの存在)が阻止されることを実験的に示した。

これらは、いずれも情報キャリアの波長程度の人為的な磁気周期構造、即ち「人工磁気格子」を導入して見かけの材料特性を操作し、機能を発現させるもので、物理のみならず工学的にも極めて魅力的な手法であると言える。

本研究は、この「人工磁気格子」を一つの材料と見なし、光やスピン波、あるいは磁気弾性波といった異なる磁気情報キャリアの性質を踏まえながら、その基礎特性と設計指針とを解明することで、国内外を通じて例のない新たな材料分野の形成を行うものである。

【研究の方法】

このために、我々のグループで比較的良好に調べられてきた磁性フォトリソニック結晶中のフォトンの振る舞いに習い、マグノニック結晶を用いてナノスケール波長のスピン波(マグノンフロー)の高次元制御を行うと同時に、脳科学や生体医療分野で熱望されている新規の情報デバイス・システムへ応用する。

人工磁気格子に関する研究で、ナノスケール波長のスピン波制御を行うマグノニック結晶は、構成材料の開発を含め基礎的研究課題が山積している。そこで、本研究では、まず、①ナノ波長スピン波制御のマグノニック結晶の形成方法の確立を目指し、世界的に例のない極薄単結晶ガーネット膜の形成とマグノニック結晶への展開を行う。この研究に並行して、②ナノ波長マグノニック結晶を用いた超高感度マイクロ磁界センサの構築と、③磁性フォトリソニック結晶を用いた高感度3次元ホログラムディスプレイ及び3次元構造データメモリの構築を目指す。

【期待される成果と意義】

本研究は、磁性フォトリソニック結晶やマグノニック結晶に関する研究代表者自らの研究成果を「人工磁気格子」としてまとめ、国内外に例のない新たな分野形成につなげようとするものである。また、「人工磁気格子」を用いて脳科学や生体医療などで必須の情報デバイス・システムを実現しようとするものである。本研究の予想される成果と意義は以下のとおりである。

①人工磁気格子という新規の機能性材料分野を世界に先駆けて形成し、我が国を起点とするオリジナルな学術の発展に資するものである。

②人工磁気格子を用いた新規の情報デバイス・システムを構築することで、脳科学・医療分野との融合を通じて我が国のライフ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., "Magnetophotonic crystals," J. Phys. D: Appl. Phys. **39**, R151-R161 (2006).
- M. Inoue, A. V. Baryshev, and M. Levy, "Magnetophotonics" (Springer, New York, 2013).

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
147,000 千円

【ホームページ等】

<http://www.spin.ee.tut.ac.jp/>



研究課題名 **ダイヤモンド表面キャリアによる電子スピン制御とその生体分子核スピン観測への応用**

早稲田大学・理工学術院・教授 **かわらだ ひろし**
川原田 洋

研究課題番号: 26220903 研究者番号: 90161380

研究分野: 工学、電気電子工学

キーワード: 薄膜、量子構造

【研究の背景・目的】

ダイヤモンド中の窒素と空孔により形成される NV センターの電子スピンと、他の電子スピンや核スピンの相互作用の応用として、量子コンピューター用キュービット、表面吸着分子の局所核磁気共鳴(NMR)検出等の研究が世界的に非常に盛んである。図1に示すように、負に帯電した NV センター(NV⁻)の2個の電子スピン(S=1)が、磁場なしで2準位(M_s=0 と M_s=±1)に分裂し、室温でスピン偏極し、マイクロ波(2.88GHz)でスピン共鳴吸収する。NV⁻の電子スピンの M_s=0 と M_s=-1 の重ね合わせが、スピン共鳴と単一光子源としての NV⁻の赤色蛍光(638nm)により、高感度検出できる。この M_s=0 と M_s=-1 の重ね合わせのエンタングルメント状態で、単一核スピンの検出される。既にダイヤモンド中の ¹³C (論文1) や表面上のオイルやPMMAの¹HのNMR観測がドイツ、米国から報告され、緊急性が高いテーマである。しかし、まだ感度、安定性が低く、これを克服し、単一NVセンターによる生体分子の局所NMR観測を本研究で行う。

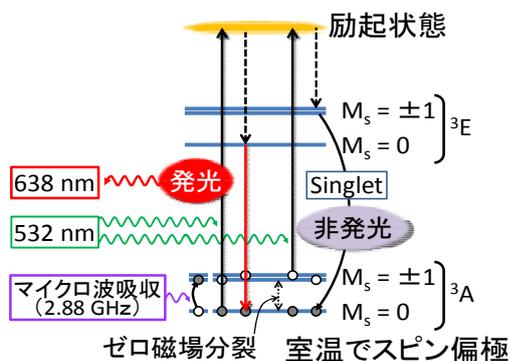


図1 NV⁻での M_s=0 と M_s=±1 のゼロ磁場分裂、室温でのスピン分極、マイクロ波の共鳴吸収、M_s=0 と M_s=±1 からの励起、発光と非発光。

【研究の方法】

1. 表面近傍での長いコヒーレンス時間を有する NV⁻の作製: NV⁻を他の核スピンと相互作用しやすい表面近傍に形成し、しかも、バルクなみの長いコヒーレンス時間(1msec)を得る技術を開発する。これには超高純度かつ 99.99%¹²C 濃縮ダイヤモンドを準備する。そして、表面不対電子の末端をフッ素で行う(図2)。この理由は、ダイヤモンド表面での電子のトラップにフッ素末端の大きな正の電子親和力が必要だから

である。これより、コヒーレンス時間上昇と、NMR 検出感度の向上が期待される。
2. NV⁻の電子スピンによる生体分子の核スピンの NMR 観測: ダイヤモンド上の生体分子の NMR 観測では、NV⁻の電子スピン状態 M_s=0 と M_s=-1 を重ね合わせ、180° パルス照射を繰り返す。この周期を生体分子核スピンの NMR 周波数に一致させ、電子スピンと核スピンの間でエンタングルメント状態を作る。一般に、核スピンから見ると、電子スピンの向きがパルス照射で頻繁に変化し、電子スピンからの磁場が平均化されてゼロとなる。しかし、エンタングルメント状態では電子スピンからの磁場は打ち消されず、NV⁻電子スピンも生体分子核スピンからの影響を受ける。これにより、高感度で生体分子の単一核スピンの NMR 信号が検出される。

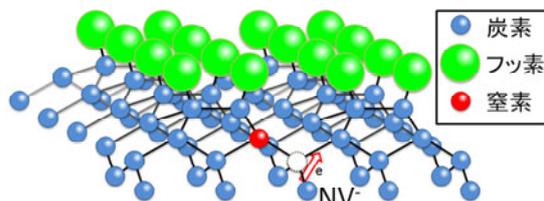


図2 フッ素終端 ダイヤモンド(001)2×1 表面。フッ素原子は表面の不対電子を 100%被覆可能である。

【期待される成果と意義】

近年、10-20 塩基(3-8nm)の短い DNA や RNA の挙動が注目され、メッセンジャーRNA との結合による RNA 干渉を利用した医薬品や DNA/RNA センサ(論文2)等に利用されている。これらの短い DNA や RNA の2次構造変化、つまりコンフォメーション変化、例えばタンパク質とカップルする際の構造の動的変化は、分子生物学の重要テーマである。通常の NMR は集団的な生体分子の挙動で、個々分子の2次構造変化の測定手段はない。本研究の局所的な NMR 観測が可能となれば、分子生物学における貢献は計り知れない。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. H.Fedder, J. Isoya (共同研究者) et al. Nature Nanotech. **7**, 657 (2012).
2. A. Ruslinda, H.Kawarada (研究代表者) et al. Biosens. & Bioelectronics. **40**, 277 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度-30 年度
146,300 千円

【ホームページ等】

<http://www.kawarada-lab.com/>



研究課題名 熱力学的極限に挑む断熱モード磁束量子プロセッサの研究

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 よしかわ のぶゆき
吉川 信行

研究課題番号: 26220904 研究者番号: 70202398
研究分野: 電子デバイス、電子機器
キーワード: 電子デバイス、集積回路

【研究の背景・目的】

将来のエクサスケールの高性能コンピュータの実現のためには、演算におけるエネルギー効率が今より格段に高い論理回路が必要不可欠である。一方で、論理回路の1ビット当たりの消費エネルギーに下限値が存在するかどうかは未解決の問題である。情報機器の低消費エネルギー化を進めるためには、この問題の本質的な理解が極めて重要である。

本研究は、Josephson 接合の超伝導位相をゆっくりと断熱的に変化させることで、高速性が特徴の磁束量子回路において、熱力学的極限に迫る究極的な低消費エネルギー化を図る。図1に半導体 CMOS 回路、従来の単一磁束量子(SFQ)回路、ならびに本提案の断熱モード磁束量子(AQFP)回路のビットエネルギーとクロック周期の関係を示す。AQFP 回路は CMOS に対して6桁以上のエネルギー低減化が可能であり、冷却を考慮しても十分な優位性を持つ。本研究では AQFP 回路を中核とし、それを情報処理システムとして実用化するために不可欠なメモリと3次元集積回路プロセスを開発する。プロジェクトの最終目標として、3次元集積化された16b AQFP プロセッサの5GHzでの高速動作実証を目指す。

【研究の方法】

断熱モード回路とは、回路を断熱的にゆっくりと動作させることで演算エネルギーを低減する方法である。AQFP 回路では、図2の様に回路のポテンシャルをシングルウェルからダブルウェルに断熱的に変

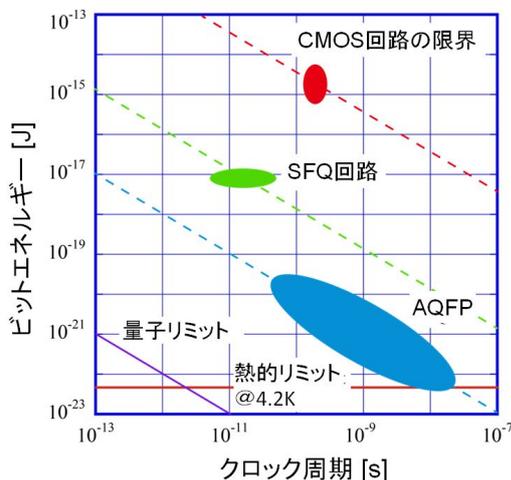


図1 各種論理回路のビットエネルギーとクロック周期の関係

化させる。これにより回路の抵抗成分に生じる電圧を抑制し、演算における消費エネルギーを極限まで小さくする。信号のエネルギーは断熱モード回路では、消費されることなく全て電源に回収され、再利用される。超伝導回路は本質的に無損失であり、断熱モード動作における低エネルギー性能を極限まで発揮できる。

【期待される成果と意義】

本研究の成果は、論理回路の消費エネルギーの熱力学的限界を明らかにするという意味で学術的に大きな意味を持つばかりでなく、冷凍機の電力を見込んでもハイエンド情報機器の消費電力を圧倒的に小さくできる。更に本技術による極限的な低消費電力回路は、量子ビットシステムや超伝導検出器など、多くの分野への波及効果が期待できる。

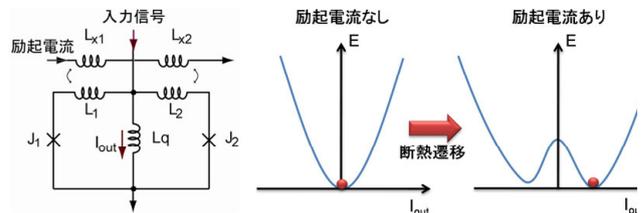


図2 AQFP 論理ゲートとそのポテンシャル変化

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- N. Takeuchi, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa, "Measurement of 10 zJ energy dissipation of adiabatic quantum-flux-parametron logic using a superconducting resonator," Appl. Phys. Lett., 102, 052602 (2013).
- N. Takeuchi, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa, "Simulation of sub- $k_B T$ bit-energy operation of adiabatic quantum-flux parametron logic with low bit-error-rate," Appl. Phys. Lett., 103, 062602 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
150,300千円

【ホームページ等】

<http://www.yoshilab.dnj.ynu.ac.jp/jpn/nyoshi@ynu.ac.jp>



研究課題名 データセントリック新世代光ネットワークの研究

名古屋大学・大学院工学研究科・教授 さとう けんいち
佐藤 健一

研究課題番号: 26220905 研究者番号: 00377805

研究分野: 工学

キーワード: フォトニックネットワーク

【研究の背景・目的】

近年のハイパージャイアントコンテンツホルダ (Google, Facebook, Akamai 等) の出現によるインターネットトラフィック交流状況の大きな変化、並びに SDN (Software Defined Network) の進展による光レイヤを含むネットワークのフレキシビリティの拡大要求に対応可能な、超大容量・低消費電力フォトニックネットワークを開発する。本研究では、デジタル信号処理技術の進展により実用化が可能となったコヒーレント光通信技術、これまでの固定グリッドに代わり、2012 年に勧告化 (ITU-T) されたフレキシブル光周波数グリッド技術、革新的な超大容量光ノード構成技術、空間多重技術を有機的に統合し、周波数軸上の利用効率並びにフレキシビリティを最大化する新しいパラダイムのフォトニックネットワークを創出する。

本研究では従来ネットワークの課題を解決し、上記ネットワーク利用状況の変化に対応できる新たなネットワークの構築を目指し、(1) フォトニック技術の進展 (コヒーレント技術、フレキシブルグリッドを用いたエラスティック光パス) を最大限に活かせるフレキシブル大容量光ネットワークアーキテクチャ、(2) 光のままの多段ノードの転送並びに将来的にマルチコアファイバの利用を可能とする新たな光ノード/光部品構成、(3) それに適した高効率コヒーレント光伝達技術を開発する。

【研究の方法】

下記の研究開発により、従来技術と比べ性能指数を大幅に向上できるフォトニックネットワークを開発する。

(1) フレキシブル超大容量光ノード構成技術

a. 多ノード経路における光フィルタ機構による伝達特性劣化を最小化する新しい転送方式とノード構成を研究開発し、メトロ領域を含む最大 20-40 段の超高密度トランスペアレントな光ノード転送を実現。
b. 収容光ファイバ数 100 以上に拡大可能で、フレキシブルな add/drop を実現できる光ノードに必要なキーとなる各種光部品の研究開発を行なう。

(2) フレキシブルコヒーレント光伝送技術

a. コヒーレント光受信器を用いることにより、光フィルタを用いることなく、波長チャンネルを分離することができる。このような受信器の波長分離機能を用いた場合における、光スイッチングの新しい構成について検討する。
b. コヒーレント変復調方式における、大規模光波長

スイッチにおけるクロストークの影響に関して、定量的な評価を行なう。

c. フレキシブルグリッドに送信用レーザ、局発用レーザの波長を固定する手法の研究を行い、周波数利用効率を極限まで向上させる。

(3) エラスティック光パスネットワーク技術

多様な光チャンネルを、自在に光周波数軸上に収容するエラスティック光ネットワークにおいて、光パスの物理的収容条件に応じて、転送距離と周波数利用効率を最適化するネットワーク方式を開拓する。また、光周波数軸に加え、時間軸、空間軸などの多次元の自由度を駆使したハイパーチャンネル等の新しいコンセプトに基づく光ネットワークアーキテクチャと実現技術を考案し、有効性を検証する。

【期待される成果と意義】

従来の電氣的なルーティング手段と比べ、大幅なコスト削減と低消費電力化が達成され、通信ネットワークの将来に渡る継続的な発展が可能となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・佐藤 健一, “フォトニックネットワーク技術の展望,” 電子情報通信学会論文誌 Vol. J96-B, No. 03, pp. 220-232, March 2013.

・K. Sato, “Challenges and opportunities of photonic networking technologies,” The 18th OptoElectronics and Communications Conference/Photonics in Switching 2013, PS/OECC 2013, WQ1-1, Kyoto, June, 2013.

・菊池 和朗, “デジタルコヒーレント光受信器における適応等化技術,” 電子情報通信学会論文誌 (B), vol. J96-B, no. 3, pp. 212-219 (2013 年 3 月).

・M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, et al., “Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies,” IEEE Commun. Mag., 47, I66-73 (2009).

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
154,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/satolab/index2.html>



研究課題名 移動体観測に基づく交通ネットワークの動的リスクマネジメント

東北大学・大学院情報科学研究科・教授 くわはら まさお
桑原 雅夫

研究課題番号：26220906 研究者番号：50183322
研究分野：工学
キーワード：交通工学

【研究の背景・目的】

本研究の目的は、①移動体観測技術による交通システム利用者の行動モニタリング手法を高度化し、②時空間解像度の高い行動データを用いた動的ネットワーク交通流解析モデルを開発するとともに、③突発事象や災害によりシステム障害が発生した交通ネットワークの信頼性を回復させるための動的なリスクマネジメント手法を構築することにある。さらに、新たな行動調査・分析手法、ネットワーク解析手法およびリスクマネジメント手法を一体化して実際の都市空間に適用することによって方法論の有用性を検証し、移動体観測に基づく交通ネットワークの動的リスクマネジメントシステムを確立する。

【研究の方法】

サブテーマごとに3つのグループ(①交通行動データ収集・解析手法の高度化、②創発型交通ネットワークフローモデルの開発、③動的ネットワーク運用方策の構築)を組織するとともに、海外の主要研究者の Advisory Board を設置する。初年度は既存研究を体系的に整理し、2年目にかけて基礎理論・方法論を構築する。併せて実際の都市空間で行動調査を実施する。3年目は、ネットワーク上の交通行動の可視化と解析を行い、動的交通流シミュレータとリスクマネジメントモデルを開発する。4年目には観測データを用いて、行動モデル、交通流シミュレータ、動的運用モデルを検証する。最終5年目には信頼性回復に向けた動的リスクマネジメントの視点から方法論全体を一体的に検証し、国際シンポジウムの開催を通じた研究成果のとりまとめと発信を行う。

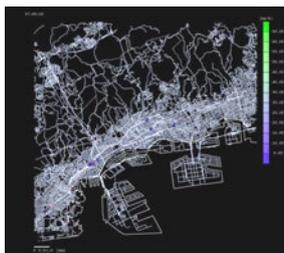


図1 プローブ解析

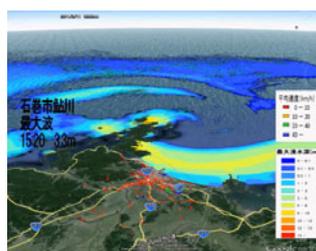


図2 災害時交通モニタリング

【期待される成果と意義】

交通システム工学の基礎理論と整合する形で、交通行動分析、動的ネットワーク解析、信頼性・リスク評価が「三位一体」となった方法論開発を行う。本研究課題を実施することは、平常時の計画への適用を中心的課題としてきた交通工学の基礎理論を社会的要請の強い災害時を含むシステム障害時のネットワーク運用にも展開するという意味で、学術的な価値だけではなく交通計画分野での実務的意義も高い。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・Mehran, B., Kuwahara, M. and Naznin, F. (2012) Implementing kinematic wave theory to reconstruct vehicle trajectories from fixed and probe sensor data. *Transportation Research Part C*, 20, 144-163.
・Asakura, Y. and Hato, E. (2004) Tracking survey for individual travel behaviour using mobile communication instruments. *Transportation Research Part C*, 12 (3/4), 273-291.

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
150,000千円

【ホームページ等】

<http://www.plan.civil.tohoku.ac.jp/kuwahara/>



研究課題名 形状可変材料のドメインホモ界面ダイナミクスの
学理究明と高機能化原理の確立

東京工業大学・精密工学研究所・教授 ほそだ ひでき
細田 秀樹

研究課題番号: 26220907 研究者番号: 10251620

研究分野: 材料工学

キーワード: 構造・機能材料、形状可変材料、ドメインホモ界面

【研究の背景・目的】

形状可変材料とは、図1に示すように、各ドメイン量を磁場、電場、応力場などの外場で可逆的に制御、あるいはその逆にチューニングできる材料であり、形状記憶合金、磁性形状記憶合金、圧電材料が挙げられる。これらの材料の特性の向上には、外場に有利なドメインの素早い成長・発達が必要であり、これにはドメイン間に形成されるホモ界面が、外場にスムーズに反応する必要がある。この機構をドメインホモ界面のダイナミクスと呼び、本研究では形状可変材料のドメインホモ界面ダイナミクスの学理の追究を主目的とする。次に、使用寿命を決める主原因となる界面移動に伴う摩擦について、我々が見いだした界面のねじれという視点から、このドメインホモ界面ダイナミクスについて、実験、理論、計算を行い、界面易動度が、相安定性と格子軟化挙動に依存することを実験的および計算的に解明し、革新的形状可変材料の開発のための指導原理の確立と実際の開発まで行うことを目的とする。



図1 形状可変材料の物性変換機能

【研究の方法】

ドメインホモ界面の構造とダイナミクスを本質的に解明し、高機能化のための指導原理を確立するために、図2の要素を仮定し、以下の項目を研究する。

1. ホモ界面の幾何学
立方晶→斜方晶等の相変態に対してドメイン結合の幾何学的解析から、ホモ界面の形態に関する幾何学的条件を明らかにする。
2. 相安定性とホモ界面
相境界近傍における計算と実験から相安定性とフォノンモードや格子変調モードを定量的に評価する。
3. ホモ界面・ドメイン構造
透過型電子顕微鏡観察などからドメインホモ界面構造の原子配列やねじれを解析する。

4. ドメインホモ界面のダイナミクス

力学特性、圧電特性とホモ界面・ドメイン構造との関係を明らかにし、特にホモ界面移動と欠陥累積のダイナミクスの学理を構築する。

5. 高機能化指導原理

高機能化指導原理の確立に向け、実際の材料開発を行う。

ドメインホモ界面構造

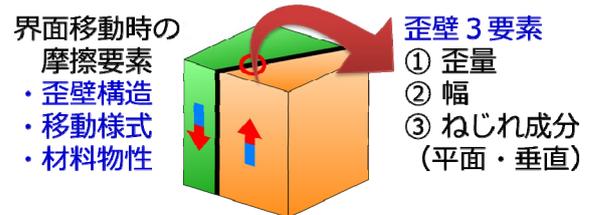


図2 ドメインホモ界面に関わる要素

【期待される成果と意義】

ドメインホモ界面の易動度が相安定性/格子軟化と結び付くという着想の基にダイナミクスを理解することで、ドメインホモ界面に関する新しい学理の構築ができる。材料面では、本課題解決によりエネルギー・医用材料の開発がさらに進み、革新的デバイスの開発により、国際競争力の向上に貢献する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T. Inamura, H. Hosoda and S. Miyazaki: Incompatibility and preferred morphology in the self-accommodation microstructure of β -titanium shape memory alloy, *Phil. Mag.*, 93 (2013) pp.618-634.
- ・ T. Inamura and H. Hosoda: Crystallography of Martensite in TiAu Shape Memory Alloy”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42A (2011) pp.111-120.

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
140,000千円

【ホームページ等】

<http://www.mater.pi.titech.ac.jp>



研究課題名 セルロースナノペーパーを用いた不揮発性メモリの創製

大阪大学・産業科学研究所・准教授 のぎ まさや
能木 雅也

研究課題番号: 26220908 研究者番号: 80379031

研究分野: 材料工学

キーワード: 機能性高分子材料、セルロースナノファイバー

【研究の背景・目的】

現在、あらゆる研究分野において、低消費エネルギー・クリーン低炭素社会の実現に向けた技術革新が求められている。研究代表者の能木らは、セルロースナノペーパーを基板とした折り畳める電子デバイス: ペーパーデバイスを世界に先駆け提案してきた。

「ペーパーデバイス」とは、ナノペーパーへ電子部材を印刷実装した電子機器である。ナノペーパーの原料は樹木であり、印刷実装技術は低消費エネルギープロセスであるため、ペーパーデバイスは、低消費エネルギー・クリーン低炭素社会の実現に大きく貢献する技術である。

情報電子デバイスは、電力供給(発電・導線)・情報の入出力(ディスプレイ)・情報の送受信(アンテナ)・情報の記憶・演算(メモリ)という4つの部品から構成される。これまで申請者は、発電する太陽電池、導電性配線、情報入出力するディスプレイ部品(透明導電膜・ペーパートランジスタ)、情報送受信するアンテナという3つの部品を開発した。すなわち、ペーパーデバイスの実現に必要な部品はあと一つ、メモリだけである(図1)。

そこで本研究課題において、電気抵抗変化現象を利用した記憶現象(ReRAM)素子作製・評価分野の世界的な第一人者である柳田グループと共同で、フィラメント成長メカニズムを明らかにしつつ、ペーパーメモリの開発研究に取り組む。このReRAM現象を利用したペーパーメモリは、原料からプロセスまで低環境負荷技術を取りそろえ、さらに、消費電力も少ないといった特徴をもつため、低消費エネルギー・クリーン低炭素社会の実現を加速する革新的技術となりうる。

折り紙エレクトロニクスの提案



図1 これまでの研究成果と本研究課題

【研究の方法】

本研究課題では、ナノペーパーの内部構造制御による絶縁層でのナノフィラメント成長メカニズムの解明を中心に、電気抵抗変化現象を利用したナノペーパーメモリを開発する。そこで、研究代表者 能木(阪大産研)・研究分担者 柳田・古賀・長島(阪大産研)らが以下4つの課題に取り組む。

1. 絶縁層における導電性フィラメント成長メカニズムの解明
2. ナノペーパーReRAMにおける要素技術開発(支持基板・上下電極・絶縁層)
3. ナノペーパーReRAMの試作に向けた各要素の実装搭載技術の開発
4. 上記知見を統合し、高性能ナノペーパーReRAMの開発

【期待される成果と意義】

古くから人類は、情報を記録した紙を持ち運び、いつでもどこでも情報へアクセスしていた。しかし、20世紀にコンピュータが登場すると、人類は電子デバイスの前に座って情報へアクセスするようになった。そして21世紀、スマートフォンなどを使って、人類は再び情報を持ち運ぼうとしている。本研究課題によってペーパーReRAMが誕生すると、「再び、紙へ情報を記録する」というパラダイムシフトが引き起こされ、低消費エネルギー・クリーン低炭素社会の実現を加速させる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- H. Koga, M. Nogi *et al.*, NPG Asia Materials, 6 (2014) e93 doi:10.1038/am.2014.9
- Y. Fujisaki *et al.* Adv. Fun. Mater. 24 (2014) 1657-1663, DOI: 10.1002/adfm.20130302
- M. Nogi *et al.* Nanoscale 5 (2013) 4395-4399, DOI: 10.1039/c3nr00231d
- M. Hsieh *et al.*, Nanoscale, 5 (2013) 9289-9295, DOI:10.1039/C3NR01951A
- M. Nogi *et al.*, Adv. Mater. 21(2009)1595-1598, DOI: 10.1002/adma.200803174

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
135,400千円

【ホームページ等】

<http://www.nogimasaya.com/>
nogi@eco.sanken.osaka-u.ac.jp

【基盤研究(S)】
理工系(工学)



研究課題名 高圧アマトロピーを利用した新組織制御法の確立

九州大学・大学院工学研究院・主幹教授

ほりた ぜんじ
堀田 善治

研究課題番号: 26220909 研究者番号: 20173643

研究分野: 工学

キーワード: 巨大ひずみ加工、同素変態

【研究の背景・目的】

Ti や Zr は室温で最密六方晶 (hcp) 構造をとり、高圧を印加することで hcp 構造 (α 相) から六方晶系構造 (ω 相) へ同素変態する[1,2]。この ω 相は硬くて脆いが、 α 相中に微細かつ均一に分散させることができれば、強化相として利用できることになる。稀少で高価な合金元素(V, Nb, Mo など)をあえて添加しなくても純元素のみで高強度の Ti や Zr が作製できることになる。

Si, Ge, GaAs も高圧を印加することで同素変態し、いずれも金属的結晶構造を示す [3,4]。室温常圧では塑性変形が不可能なこれらの半導体は、高圧で金属状態に変態することで塑性変形が可能となり、加工を利用した組織制御が期待できることになる。

本研究は高圧印加とひずみ導入の組み合わせで新たな組織制御技術(高圧アマトロピー制御)を構築し、添加元素不要の高強度材や高機能半導体材料を開発することを目的とする。

【研究の方法】

本研究では、図 1(左)に示す高圧印加と巨大ひずみの導入が同時に実現できる高圧ねじり変形(HPT: High-Pressure Torsion)装置を改良し、電気抵抗測定が図 2(右)に示すようにその場でできるようにする。昇圧・減圧中およびひずみ導入中に電気抵抗測定を行い、高圧印加のもとにひずみ導入中の動的な場合や、高圧印加したままひずみ導入を行わない静的な条件での電気抵抗をその場で計測し、高圧印加と変態量との関係やひずみ導入が変態量に及ぼす影響について調べる。

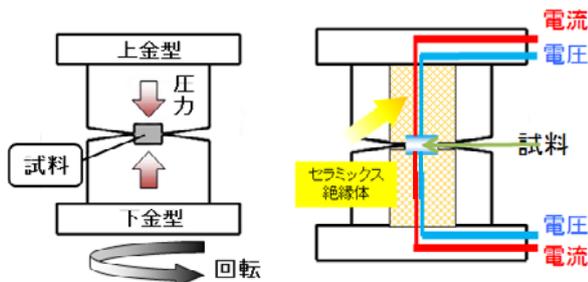


図 1 HPT の概略図 (左)従来型、(右)改良型(電気抵抗測定用)

本研究では、さらに同素変態の有効性を第一原理計算を使って評価し、同素変態組織を図 2 に示すような Rotation DFI 法[5]を利用して解析する。

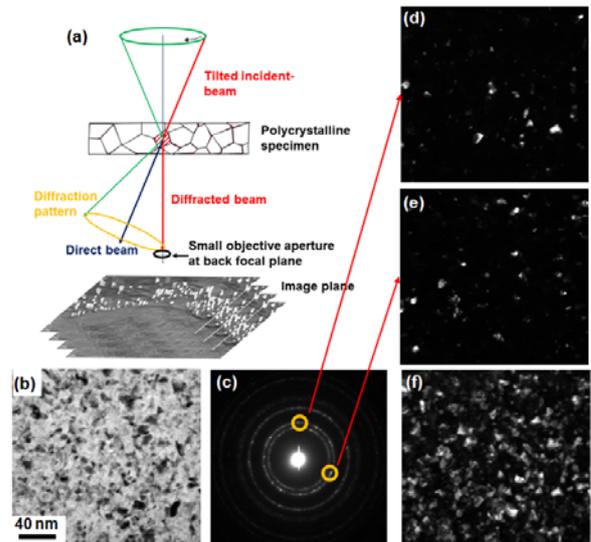


図 2 (a) Rodation DFI の原理[5], (b) 明視野象、(c) 制限視野回折パターン、(d)-(f) Rotation DFI で撮影した暗視野象。

【期待される成果と意義】

本研究で構築する組織制御技術は、Ti や Zr の純金属にあつては稀少で高価な V, Nb, Mo などの合金元素を添加せずとも純金属のみで高強度化できる新たな組織制御技術となる。Si, Ge, GaAs の半導体にあつては高圧下で存在する金属的構造を利用して塑性変形させナノ結晶粒組織を作りだし、発光特性機能を高めようとする試みとなる。Ti, Zr は医療用のインプラント材料として、また Si, Ge, GaAs は太陽電池の高効率化に繋がる基礎研究として重要となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] G. Gu *et al.*, *Scripta Metall. Mater.* **31**, 167, (1994).
- [2] M.T. Pe' rez-Prado *et al.*, *Scripta Mater.*, **58**, 219, (2008).
- [3] A.Mujica *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 863 (2003).
- [4] B. D. Malone *et al*, *Phys. Rev. B.* **86**, 054101 (2012).
- [5] M. Watanabe, *et al.*, *Microscopy and Miroanalysis*, **17**, Suppl. 2, 1104 (2011).

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度-30 年度
140,000 千円

【ホームページ等】

<http://zaiko6.zaiko.kyushu-u.ac.jp/>

【基盤研究(S)】
理工系(工学)

研究課題名 環境調和型の貴金属・レアメタルのリサイクル技術の開発



東京大学・生産技術研究所・教授 おかべ とおる
岡部 徹

研究課題番号：26220910 研究者番号：00280884
研究分野：金属・資源生産工学
キーワード：リサイクル、貴金属、レアメタル

【研究の背景・目的】

レアメタルは、省エネ・ハイテク製品の製造に欠かすことができない。近年、世界的にレアメタルの資源争奪戦が激しさを増している。天然資源が乏しく、かつ環境規制の厳しい日本では、高効率かつ環境負荷が小さいレアメタルのリサイクル技術の開発が重要な課題となっている。

白金やロジウムをはじめとする貴金属は、レアメタルの中でも特に希少性の高い金属である。また、これらの金属は自動車の排ガス浄化触媒などに使用されており、今後、需要とリサイクル量の増加が見込まれている。

貴金属のリサイクルにおいては水溶液中への溶解が必要である。しかし、貴金属が化学的に極めて安定なため、現在のところ塩素ガスや王水などの強力な酸化剤を含む酸によって長時間の処理が必要であり、有害な廃液や排ガスが多量に発生する。そこで本研究では、有害な廃棄物を出さずことなくスクラップ中の貴金属を高速溶解する新プロセス技術の開発を行う。また、得られた環境調和型技術を、産業的に重要性の高い他のレアメタルへと応用展開する。

【研究の方法】

これまでの一連の研究により、白金などの貴金属を、溶解処理の前に活性金属や塩化物の蒸気と高温で反応させて予め複合塩化物に変換すると、塩酸だけで貴金属が効率良く溶解できることが分かった。

本研究では、様々な貴金属の複合塩化物について、合成方法を確立するとともに、その化学状態と塩酸や塩水などへの溶解挙動の解明・体系化を行う。また、得られた知見に基づいて、図1に示すようなスクラップの環境調和型のリサイクルプロセスを開発する。

H28年度以降には、貴金属に関して開発した新しいリサイクル技術をネオジムやジスプロシウムなどのレアアース、およびレニウムやタングステンなどへと応用し、新規なリサイクルプロセスを創出する。

【期待される成果と意義】

貴金属の複合塩化物の物性が学術的に体系化される。また、プロセス技術の開発が進めば、究極的にはスクラップ中のレアメタルを酸化剤や酸を含まない塩水で溶解して効率良くリサイクルすることが可能となるため、リサイクル産業の革新と持続可能な社会の実現につながる。

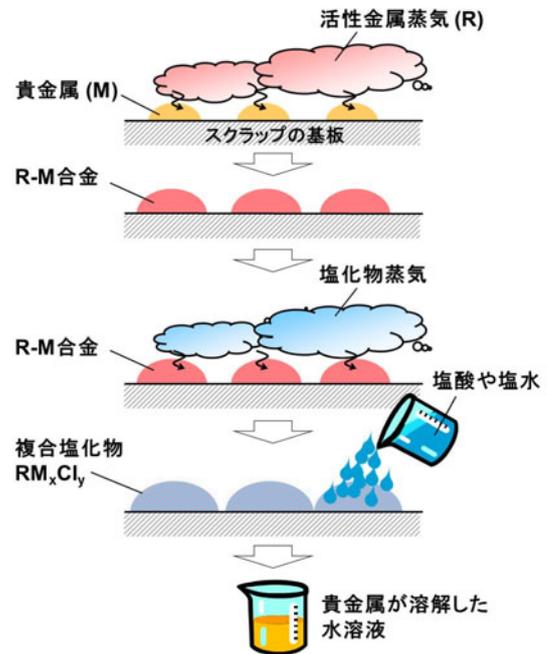


図1 新しい溶解技術によって実現される、有害廃棄物の発生量の少ない貴金属の環境調和型のリサイクルプロセス

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- C. Horike, K. Morita, and T. H. Okabe: "Effective Dissolution of Platinum by Using Chloride Salts in Recovery Process", *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol.43B (2012) pp.1300-1307.
- T. H. Okabe, Y. Kayanuma, S. Yamamoto, and M. Maeda: "Platinum Recovery Treatment Using Calcium Vapor Treatment", *Materials Transactions*, vol.44 (7) (2003) pp.1386-1393.

【研究期間と研究経費】

平成26年度～30年度
147,900千円

【ホームページ等】

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



研究課題名 ナノ空間を利用したシングルサイト光触媒の設計と応用

大阪大学・大学院工学研究科・教授 やました ひろみ
山下 弘巳

研究課題番号: 26220911 研究者番号: 40200688

研究分野: 工学、触媒・資源化学プロセス

キーワード: 触媒調製化学、光触媒、シングルサイト、ナノ多孔体、金属ナノ触媒、表面プラズモン

【研究の背景・目的】

ゼオライトやメソポーラスシリカなどシリカ基盤のナノ多孔体に少量の Ti, V, Cr, Mo, W などの金属種を添加すると、これら金属原子は高分散孤立状態で多孔体の骨格や細孔内に組み込まれる。我々は、これら孤立状態で担持され、半導体光触媒と全く異なる光励起状態と反応特性を示す光触媒活性種を、「シングルサイト光触媒」と命名し、その調製・構造解析・光触媒特性の評価を行っている。特に、ナノ多孔体に組込んだ孤立酸化チタン種や光機能性金属錯体などの「シングルサイト光触媒」が特異な局所構造と光触媒特性を示すことを見出してきた。

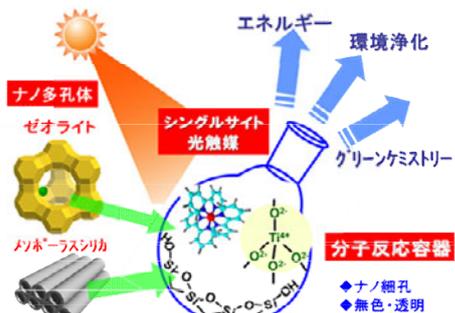


図1 シングルサイト光触媒（孤立酸化物種、光機能性金属錯体）の設計と高機能化

本研究では、ゼオライト・メソポーラスシリカ・金属有機構造体 (MOF) などのナノ多孔体を利用して、細孔空間や骨格内に調製したシングルサイト光触媒（孤立酸化物種、光機能性金属錯体）の機能・特性の評価、およびナノ多孔体の構造・形態制御、表面修飾や他の機能性材料との複合化を通して、シングルサイト光触媒を利用する環境調和型高機能材料の開発と応用を行う。

【研究の方法】

ゼオライトやメソポーラスシリカなどのナノ多孔体は規定マイクロ環境場を提供し、光を透過する透明な分子反応容器として利用できる。ナノ多孔体とシングルサイト光触媒の特徴を融合することで、以下の研究により高機能性材料の開発を目指す。

1) シングルサイト光触媒の特異反応性の評価と可視光応答性の付与、2) シングルサイト光触媒を組み込んだ三次元ナノ細孔構造とコア・シェル構造の設計、3) 疎水性多孔体の創製による光触媒の高効率化、4) シングルサイト光触媒を利用する金属

ナノ触媒の調製、5) コア・シェル構造触媒設計による高効率ワンポット触媒反応系の設計、6) シングルサイト光触媒を組み込んだ超親水性・超撥水性多孔透明薄膜の調製、7) ナノ細孔空間で機能する金属錯体シングルサイト光触媒の設計。

【期待される成果と意義】

ナノ多孔体とシングルサイト光触媒の特徴を融合利用することで、高選択性光触媒、可視光応答型光触媒、光機能性金属錯体、ナノ磁石包接光触媒、金属ナノ触媒、プラスモニック触媒、ワンポット反応触媒、超親水性超撥水性薄膜など、従来の性能を大きく上回る特性を示す高機能性材料の開発が期待できる。現在でも、多様な新しいナノ多孔体（ゼオライト、メソポーラスシリカ、金属有機構造体 (MOF)）が開発されており、本課題で開発した技法を適用することで多種多様な応用展開が期待できる。

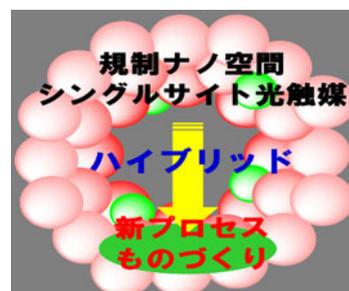


図2 ナノ空間とシングルサイト光触媒の融合による新プロセス・ものづくりの創製

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Fuku, K. Mori, H. Yamashita, et al., "The Synthesis of Silver Nanoparticles by Using Microwave Heating and their Enhanced Catalytic Activity by LSPR", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 52, 7446-7450 (2013).
- ・ Y. Kuwahara, H. Yamashita, C. Jones, et al., "Dramatic Enhancement of CO₂ Uptake by Poly(ethyleneimine) Using Zirconosilicate", *J. Am. Chem. Soc.*, 134, 10757-10760 (2012).

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
110,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp1/MSP1-HomeJ.htm>
E-mail: yamashita@mat.eng.osaka-u.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系(工学)



研究課題名 光ファイバライフサイクルモニタリング援用革新複合材構造の知的ものづくり科学の構築

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

たけだ のぶお
武田 展雄

研究課題番号: 26220912 研究者番号: 10171646

研究分野: 航空宇宙工学、複合材料・物性

キーワード: 複合材料、光ファイバセンサ、成形プロセス、モニタリング

【研究の背景・目的】

航空機構造の軽量化を図るため、主要一次構造部材にもCFRP(炭素繊維強化プラスチック)が適用されてきているが、成形・組立などの製造上の問題および損傷後強度保証の難しさが、従来金属製航空機と比較して製造コストが高くまた十分な軽量化にも至っていない。次世代航空宇宙機構造においてもCFRPが使用されていくためには低コストと高機能性をマッチングさせる革新的技術が要求されている。

そのための新規材料・製造プロセスの有力な技術として、熱可塑CFRPおよび低圧成形CFRPに注目が集まっている。しかし、これら新規製造プロセスは従来熱硬化性CFRP製造プロセスと比較してより複雑なものであり、航空機のような大型構造へ適用した際の品質のばらつきが実用化への最大の障害である。損傷部位を検知する非破壊検査手法のみでは製品の強度保証に不十分であり、製造プロセス中の情報に基づいた新たな品質保証技術が求められている。

この状況を打破するためには、これまで主に試行錯誤により進められてきたCFRP製造プロセスに、最先端計測技術とマルチスケール・マルチフィジックスに基づく計算科学を融合した、学問的に十分な裏付けを持った「複合材構造の知的ものづくり科学」を構築することが不可欠であると考えられる。

本研究では、次世代航空宇宙機複合材構造への適用を目指して、熱可塑・低圧成形複合材料および接着接合技術の低コスト・高機能性と光ファイバライフサイクルモニタリングによる高信頼化技術を融合させる「複合材構造の知的ものづくり科学」を構築することにより初めて実現可能となる、革新知的複合材構造コンセプトを世界に先駆けて提案・実証する(図1)。

【研究の方法】

これまで構築してきた光ファイバ温度・ひずみ同時計測技術を新規成形プロセスに適用可能なレベルまで向上させ、各製造プロセスにおける材料内挙動を詳細に評価する。光ファイバを考慮した複合材料モデルによる新規成形プロセスシミュレーションおよび損傷発生・進展解析を行い、実際の試験から得られる光ファイバ応答と照らし合わせることでCFRPの品質・健全性を評価する手法を確立する。最終的に補強板構造の部分構造供試体を用いて模擬実用環境下でのライフサイクルモニタリング実証を

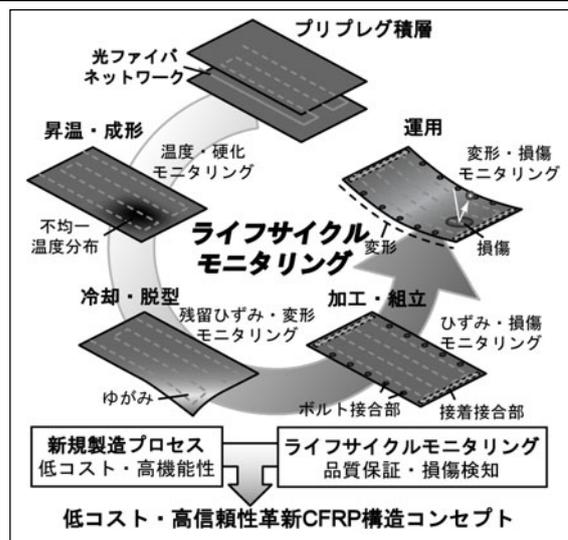


図1 研究目的

行う。その際、マルチスケール・マルチフィジックスに基づく計算科学を最大限に利用した、ライフサイクルに渡るシミュレーション技術を構築する。

【期待される成果と意義】

今後多くの需要が見込まれる150席クラスの小型航空機の新規開発において重要になる、CFRP低コスト・ハイサイクル製造において高い国際競争力を有する構造コンセプト提案と実証を目指しており、今後の日本の航空機用CFRPの材料開発および部材製造の、更なる国際的競争力強化に資することにもなる強固な基礎・基盤研究である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ S. Minakuchi et al., "Life Cycle Monitoring and Advanced Quality Assurance of L-Shaped Composite Corner Part Using Embedded Fiber-Optic Sensor", Composites Part A, Vol. 48, 2013, pp. 153-161.

【研究期間と研究経費】

平成26年度-30年度
117,800千円

【ホームページ等】

<http://www.smart.k.u-tokyo.ac.jp>
takeda@smart.k.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 革新的核融合炉実現へ向けた分割型高温超伝導マグネットの実証と普遍的接合法の創成

はしづめ ひでとし
橋爪 秀利
東北大学・大学院工学研究科・教授

研究課題番号：26220913 研究者番号：80198663

研究分野：核融合学

キーワード：高温超伝導、電磁・マグネット

【研究の背景・目的】

ITER計画が進むなど、次世代エネルギー源として期待されている核融合炉の開発は着実に進展している。一方で、莫大な建設コストの低減、保守・点検の合理的なシナリオの構築が工学的課題として残っている状況にある。そこで核融合炉の重要な構成機器の1つである超伝導マグネットを高温超伝導体で製作し、かつ分割化することにより、1) 高コストな超伝導マグネットの製作・保守の合理化、2) 超伝導マグネットよりも内側に位置する炉内構造物へのアクセス性向上、を同時に図る分割型高温超伝導マグネット(図1)を提案している。この方式ではマグネットの接合部での抵抗発熱は不可避であるため、従来の低温超伝導体ではなく高温超伝導体を用いることこそがこの方式を実現させるための解となり、建設コストの劇的な低減と容易な保守・点検ができると我々は考えている。

本研究は、これまでの研究で得られた世界最高性能の高温超伝導体の機械的接合技術(100kA 導体・抵抗値 2 nΩ)と液体窒素による除熱技術(金属多孔質体の使用により 0.4 MW/m²の除熱性能)を基に、1) 接合部極限性能予測手法の開発、2) 超伝導物理に基づく機能分割構造導体の設計、3) 多孔質体を利用した冷却システムの性能予測と分割流路設計、4) 100kA級のモックアップマグネット製作による分割型高温超伝導マグネット総合設計と実証、を行ない、学術的視点に基づいた分割型高温超伝導マグネットの飛躍的性能向上により核融合炉実現に向けた工学的ブレイクスルーを確立することを目的とする。

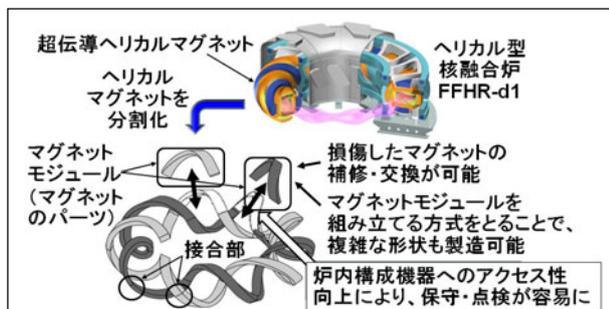


図1 分割型高温超伝導マグネット

【研究の方法】

超伝導マグネットは極低温、強場環境下で使用されるが、このような環境でのマグネット接合部の性能向上を図ることに加えて、接合部施工時(冷却前)に接合性能を予測できることが重要となる。そこで、

「1) 接合部極限性能予測手法の開発」として、接合性能を予測することが可能となる非破壊検査手法の確立を目指す。続いて、第二種超伝導体の電流輸送モデル(超伝導体の物理モデル)を用いて「2) 超伝導物理に基づく機能分割構造導体の設計」を行い、マグネットを構成する導体の性能向上を図る。さらにマグネット接合部の冷却システムの最適化のために「3) 多孔質体を利用した冷却システムの性能予測と分割流路設計」を実施する。これらの成果をもとに「4) 100kA級のモックアップマグネット製作」を行い、分割型高温超伝導マグネット総合設計とその実証をする計画となっている。

【期待される成果と意義】

本研究の成果は、経済性・信頼性のある魅力的な核融合炉を成立させるためのブレイクスルーとなりうる。さらに、低温超伝導体を単に高温超伝導体に置換えるのではなく高温超伝導体を必ず用いる必然性があり、核融合炉研究が中心となって高温超伝導の研究・開発を牽引して行く可能性も秘めている。同時に、高温超伝導線材の最大長さがマグネットの周長程度のものを多数製作すればマグネットを完成させることができるなど、現在の km オーダーでの高温超伝導線材の品質保証が不要となり、高性能な高温超伝導線材を使用することにより、マグネットの性能自体も飛躍的に向上させることができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- S. Ito, H. Hashizume, et. al., Bridge-Type Mechanical Lap Joint of a 100 kA-Class HTS Conductor having Stacks of GdBCO Tapes, Plasma and Fusion Research, vol. 9, p. 3405086 (2014).
- H. Hashizume, S. Ito, Design prospect of remountable high-temperature superconducting magnet, Fusion Engineering and Design, in press.

【研究期間と研究経費】

平成 26 年度 - 30 年度
144,400 千円

【ホームページ等】

<http://afre.qse.tohoku.ac.jp/>
hidetoshi.hashizume@qse.tohoku.ac.jp