



研究課題名 ナノスケールラボラトリーの創製と深化

京都大学・化学研究所・教授

むらた やすじろう
村田 靖次郎

研究課題番号：17H06119 研究者番号：40314273

研究分野：有機化学

キーワード：ナノカーボン

【研究の背景・目的】

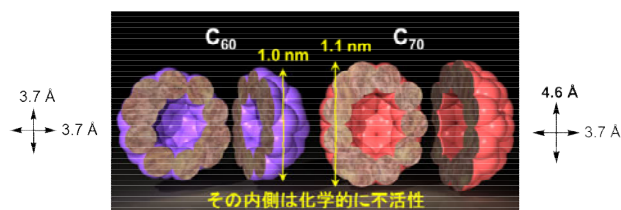
通常有機化学反応は、ガラスや金属製の容器中、液体の溶媒に基質と試薬を混合することによって行われることが多い。このようなフラスコ中には、アボドガロ数程度の数の複数種類の分子が混在しており、例えば基質分子は、溶媒分子や試薬分子、ならびに基質分子同士と頻りに衝突し、お互いに相互作用を受けている。このような複雑な状況の下、狙った化学反応を選択的に進行させることが、有機化学の目的の一つである。

しかし、一つの分子と別の分子の相互作用は必ずしも明らかとはなっていない。なぜなら、これまでの実験研究では、主に溶媒分子の存在下、多数の分子の平均的な挙動を観測しているのに留まっているからである。単分子の挙動を研究するためには高真空条件がしばしば用いられるが、この条件下 (10^{-10} Torr, 22.4 mL) でさえ、6億個の気体分子が存在しており、分子間の相互作用を完全に排除することは困難である。

このような状況の下、本研究では、ナノメートルサイズのフラスコを自在に合成し、その中に1つあるいは2つの化学種を閉じ込めることによって、これまで知られていなかった分子科学における学理を明らかにすることを目的としている。外界から完全に孤立された単分子を実現させ、その性質や反応性を室温・溶液中で解明する。そのためには、適切な内部空間をもち、内側は化学的に不活性であり、かつ外部とのアクセスを完全に遮断できるナノスケールラボラトリーを創製する必要がある。

【研究の方法】

図1に示すように、炭素原子が球状に結合したクラスターであるフラーレンは、その内部に中空空間を有しており、これは小分子が存在するのに最適な大きさである。これまで、金属イオンや希ガス原子

図1 フラーレン C₆₀ と C₇₀ の分子構造

がフラーレン内部に導入された化合物の合成法がいくつか知られているものの、閉じ込められる化学種の種類やフラーレン骨格の大きさに関して、高選択性と高効率を両立させる手法は無かった。本研究では、有機合成によりフラーレン骨格に開口部を構築し、そこから内部に小分子を導入し、その後、開口部を元通りに修復するという「分子手術」を行い、多彩な化学種を内包したフラーレンを自在に合成する手法を開発する。

閉じ込められる化学種としては、分子間相互作用を持たない単分子、電気双極子や磁気双極子を有する小分子、高反応性化学種、金属原子、ならびにこれらの組み合わせによる複数化学種を検討する。それぞれの化学種の内包に最適な開口部（大きさと官能基の種類、さらに閉じやすさ）を設計し、高効率な合成経路を確立させ、多彩なナノスケールラボラトリーを創製する。

【期待される成果と意義】

外界から完全に隔離された環境を利用することによって、これまで知られていなかった化学種を発生させ、溶液中室温条件下でその性質を明らかにすることが可能となる。よく知られたバルクの性質とは全く異なることが予想される孤立化学種の性質が解明され、分子間の弱い相互作用に関する研究も可能となる。このように、物質科学の新しい学理構築に大きな貢献を果たすことができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ナノカーボンの科学—セレンディビティーから始まった大発見の物語 (ブルーバックス)、篠原久典、講談社 (2007年)
- ・フラーレンとナノチューブの科学、篠原久典・齋藤弥八、名古屋大学出版会 (2011年)

【研究期間と研究経費】

平成29年度—33年度
160,100千円

【ホームページ等】

<http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~kouzou/>



研究課題名 電気制御量子ドットを使った光子—電子スピン
相互量子状態変換の研究

大阪大学・産業科学研究所・教授 おおいわ あきら
大岩 顕

研究課題番号： 17H06120 研究者番号：10321902

研究分野： 半導体量子物性

キーワード： 電子スピン、光子、量子状態変換、量子ドット、面内 p-n 接合

【研究の背景・目的】

量子情報通信は安全な次世代通信方式として重要視されている。特に量子中継は、長距離化に不可欠な技術で、様々な量子系において活発な研究がなされている。本研究では、電気制御 GaAs 量子ドット中の単一電子スピンと情報伝送を担う単一光子の偏光状態との間で量子状態を相互に変換する研究を行う。単一光子から単一電子スピンへの量子状態変換と光子対から離れた電子スピン対へのもつれ変換の実現を目指す。さらに平面 p-n 接合と電気制御量子ドットを融合した新しい単一光子発光素子を開発し、電子スピンから光子への量子状態変換を実現する。また量子中継における量子メモリとして期待される IV 族半導体素子での光スピン変換を研究する。

【研究の方法】

上述の目的を達成するために具体的に以下の研究課題を設定して遂行する。

1. 電気制御量子ドットを使った単一光子から単一電子スピンへの量子状態変換

光生成単一電子スピンの観測基底回転操作を達成し、単一光子から単一電子スピンへの量子状態変換の実証を目指す。またもつれ光子対源を導入し、光子対から電子スピン対へのもつれ変換を目指す。変換効率の評価とその向上も重要な課題である。

加えて、スピンバルブ効果を光生成スピン検出に利用して、Ge 量子構造における偏光と電子スピン間の変換の素過程と間接遷移の影響を解明する。

2. 平面 p-n 接合と融合した量子ドットを使った単一電子スピンから単一光子への量子状態変換
- 平面 p-n 接合を作製し、エレクトロルミネッセンス

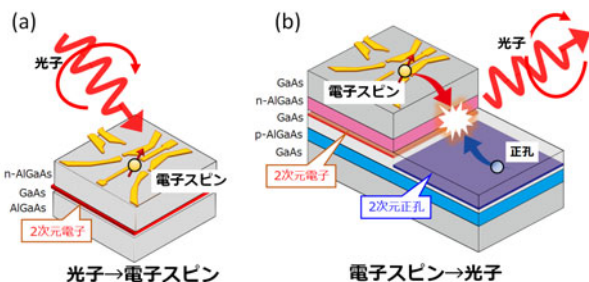


図1 (a)光子から電子スピンへ、(b)電子スピンから光子への量子状態変換の概念図

(EL)を観測する。その平面 p-n 接合に電気制御量子ドットを形成する。そして、量子ドットから単一電子を発光領域へ注入し、その単一光子発光の観測を目指す。次のステップでは、量子ドット中の電子スピンと発光された光子円偏光の対応を調べ、電子スピンから光子への角運動量変換をまず実証する。次に量子状態変換が可能となるように平面 p-n 接合中の光学遷移を設計し、光子偏光と電子スピン相関測定法の開発を進め、量子状態変換の実証を目指す。

【期待される成果と意義】

本研究により、光子から電気制御量子ドット中の電子スピンへの量子状態変換や、光子対から遠隔電子スピン対へのもつれ変換、さらに IV 族半導体量子構造における光子から電子スピンへの変換の成果が期待される。これらは量子中継実現に革新的な基盤技術をもたらすと同時に固体における非局所もつれ制御にかかわる新しい研究を開拓する。また面内 p-n 素子と電気制御量子ドットを融合したスピン状態発光素子が達成できると、電子スピン状態から偏光状態を発生する新しいオンデマンド量子光源として、新しい量子通信のプロトコルや量子情報処理技術の創成が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Conversion from single photon to single electron spin using electrically controllable quantum dots, A. Oiwa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 011008 (2017).
- Non-destructive Measurement of Single Photo-electrons by Inter-dot Tunneling in a Double Quantum Dot, T. Fujita *et al.*, Phys. Rev. Lett. 110, 226803 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度—33 年度
166,100 千円

【ホームページ等】

[http:// www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qse/oiswa@sanken.osaka-u.ac.jp](http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qse/oiswa@sanken.osaka-u.ac.jp)



研究課題名 極めて柔らかい膜環境にあるタンパク質分子の ナノ動態イメージングの実現

金沢大学・バイオ AFM 先端研究センター・特任教授

あんどう としお
安藤 敏夫

研究課題番号：17H06121 研究者番号：50184320

研究分野：ナノバイオサイエンス

キーワード：1分子イメージング・ナノ計測

【研究の背景・目的】

代表者が世界に先駆けて開発した高速原子間力顕微鏡（以下、高速 AFM）により、タンパク質分子が機能しているときの姿・動作を光学プローブを介さずに直接動画観察することが可能になった。この顕微鏡は製品化され、世界普及が進行している。その結果、我々が行った開拓的イメージング研究に続き、タンパク質分子の動的プロセスが国内外で高速 AFM 撮影され、従来技術では困難であった発見が続いている。しかし、極めて柔らかい膜環境下で働くイオンチャネルやポリペプチドの膜透過輸送を担うトランスロコンといった膜タンパク質の生理的イオン環境下での動的プロセスの高速 AFM 観察は未だ実現されていない。その原因は、膜が極めて柔らかいため、AFM 探針との接触で大きく変形し、そこに存在する膜タンパク質分子を高解像で捉えることはできないからである。膜断片を基板に直接載せてこの問題を回避することは可能だが、膜表裏の間にイオンなどの濃度勾配を形成できず、また、ポリペプチドの膜透過が阻害されてしまう。

そこで本研究では、極めて柔らかい膜環境中で起こる膜タンパク質の動的プロセスの高速高解像イメージングを実現するための技術開発を実施する。

【研究の方法】

代表者が高速 AFM の開発と応用研究で長く培ってきた技術をベースに、①膜タンパク質を含む脂質平面二重層膜の小さい面を宙に張り、膜表裏の間にイオン・分子の濃度勾配を形成できる技術を開発する。②これまで進めてきた非接触イメージング可能な走査型イオン伝導顕微鏡（以下、SICM）の高速化・低ノイズ化の研究を更に発展させるとともに、高い空間分解能を有する高速 SICM を実現する。

SICM は電解質を含むガラスピペットをプローブとして使い、ピペット内の電極と外液の電極の間を流れるイオン電流を計測する（図 1）。ピペット先端が試料表面に接近するとイオン電流が減少することを利用して、試料表面の高さを見積もる。それ故、非接触イメージングが可能である。だが、空間分解能は AFM には

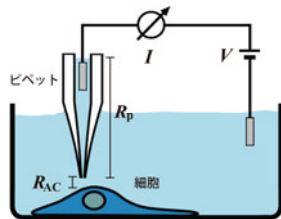


図 1. SICM の模式図

及ばない。空間分解能を上げるには、小さい開口径をもつピペット先端を開口径程度の距離まで近づける必要がある。だが、開口の周りのガラス壁は厚いため、イオン電流はその壁直下にある試料を敏感に検出できない。それ故、ピペット先端は試料に接触して試料を破壊する。そこで、開口の周りの壁を薄くする加工技術を開発するとともに、カーボンナノチューブ（CNT）をプローブとして利用するための技術を開発する。これらの技術の有効性を、精製したタンパク質系、ミトコンドリアの外膜・内膜に組み込まれた膜タンパク質などの動態観察により実証する。

【期待される成果と意義】

高速・高解像・非接触の三条件を満たすプローブ顕微鏡が実現される。その結果、これまで不可能であった極めて柔らかい膜環境下にある膜タンパク質の動態をサブ分子分解能で観察することが可能になる。また、宙に浮いたタンパク質分子などの動態観察も可能になるため、例えば、脱膜した筋原線維のような高次構造体中存在するタンパク質分子の動態観察さえ可能になる。高速・高解像 SICM は将来更に進化して細胞内の様々な構造やダイナミクスの可視化を実現する可能性を秘めている。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・高速 AFM のバイオ応用に関する総説：T. Ando, T. Uchihashi, and S. Scheuring, Filming biomolecular processes by high-speed atomic force microscopy (2014) *Chem. Rev.* **114**, 3120-3188.
- ・SICM の総説：C.-C. Chen, Y. Zhou, and L. A. Baker, Scanning ion conductance microscopy (2012) *Annu. Rev. Anal. Chem.* **5**, 207-228.
- ・CNT が脂質二重層膜に自動的に挿入され、CNT の中をイオンが流れることを実証した論文：J. Geng *et al.*, Stochastic transport through carbon nanotubes in lipid bilayers and live cell membranes (2014) *Nature* **514**, 612-615.

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度－33 年度
126,400 千円

【ホームページ等】

http://biophys.w3.kanazawa-u.ac.jp/index_J.htm

【基盤研究(S)】

理工系 (総合理工)



研究課題名 高分解能原子間力顕微鏡・分光法による生体分子間認識・相互作用力の直接可視化

京都大学・大学院工学研究科・教授

やまだ ひろふみ
山田 啓文

研究課題番号：17H06122 研究者番号：40283626

研究分野：ナノ・マイクロ科学、ナノバイオサイエンス

キーワード：単一分子フォース分光法、原子間力顕微鏡

【研究の背景・目的】

周波数変調原子間力顕微鏡(FM-AFM)をベースとする3次元フォースマップ法は、水和構造や電荷分布を直接可視化する強力な手法ではあるが、その主な計測範囲は探針が試料と部分的に接触してから非接触に至るまでの領域となる。一方、分子間相互作用力検出のためには、相互作用が強くはたらく領域(特異結合領域)での測定が必要となるが、その有効作用時間は極めて短く、検出確率が著しく低くなることから、測定法の本質的な改善が求められていた。

本研究課題では、高感度・高分解能FM-AFMを動作基盤とする3次元フォースマップ技術をさらに高度化し、AFM探針の精密運動制御法を新たに開発するとともに、応答信号の実時間運動解析を取り入れることで、複雑な立体構造をもつ生体分子に対しても安定なフォースマップ測定を実現する。これにより、生体分子の極近傍領域の水和構造力・電荷密度・揺らぎ分布の可視化、さらには単一分子レベルでの生体分子間認識・相互作用計測を可能とし(図1参照)、固液界面物性という物理的視点に立脚した、新たな分子機能イメージング法を確立するとともに、細胞生理機能における微視的役割を解明する。

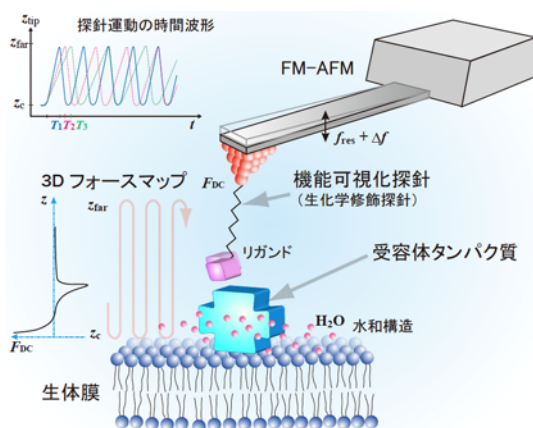


図1. AFMによる分子間相互作用力マッピング

【研究の方法】

(1) 3次元フォースマップ法の高度化

本研究で新たに開発を目指すフォースマップ法では、探針が試料の表面近傍領域に滞在する時間を制御し、この相互作用時間を測定パラメータとして変化させることで、特異結合力の応答時間・空間マッ

プを取得し、測定対象分子の空間分布およびその結合定数を求める。一方、FM-AFMが与えうる相互作用力測定への影響を排除するため、探針振動の極微小振幅化を図り、熱雑音励振による探針-カンチレバーの周波数特性変化の解析も進める。

(2) 生体分子間認識・相互作用の可視化

抗体分子の特異結合：IgG抗体分子の多量体形成の抗体種依存性および形成機構を明らかにするとともに、抗原結合過程の詳細を解析する。また、抗がん剤に応用される、光応答性分子をもつIgG1の光照射による活性化機構を分子レベルで解明する。

DNA-タンパク質複合体：真核生物DNAの複製開始地点決定の際に形成されるDNA-タンパク質複合体を可視化し、一連の複製初期過程を明らかにする。

(3) 生体分子周囲の水和構造可視化

複雑な立体構造をもつ生体分子の極近傍における3次元水和殻可視化を精密な探針制御により実現し、イオンチャネルや各種タンパク質分子系の水和構造と生体機能の関係を明らかにする。

【期待される成果と意義】

本研究は、生体膜上での多様な生体機能を分子レベルで直接解明しようとするものであり、最先端の分子医療の確立に大きく寄与すると期待される。また工学的にも、生体適合性材料やバイオセンサーなどのバイオマテリアル開発に直接応用されうることから、産業的・社会的にその重要性・波及効果は大きく、極めて意義深い。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・S. Ido *et al.* "Immunoactive two-dimensional self-assembly of monoclonal antibodies in aqueous solution revealed by atomic force microscopy", *Nature Materials*, **13**, 264-270 (2014).

・K. Umeda *et al.* "Molecular-scale quantitative charge density measurement of biological molecule by frequency modulation atomic force microscopy in aqueous solutions", *Nanotechnology*, **26**, 285103 (2015).

【研究期間と研究経費】

平成29年度～33年度
141,900千円

【ホームページ等】

<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp/>
h-yamada@kuee.kyoto-u.ac.jp



研究課題名 単結晶有機半導体中電子伝導の巨大応力歪効果とフレキシブルメカノエレクトロニクス

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

たけや じゅんいち
竹谷 純一

研究課題番号：17H06123 研究者番号：20371289

研究分野：総合理工

キーワード：有機・分子エレクトロニクス

【研究の背景・目的】

有機半導体は低コストのプラスチックフィルム上にセンサデバイスを構成できるため、来るべき IoT 社会で大量に必要とされる次世代半導体の有望材料として注目されている。すでに、IoT センサ用の印刷できるアナログ及びデジタル集積回路に関する技術開発が、我々の開発した高移動度有機単結晶半導体トランジスタをベースとした産学協同の実用化プロジェクトにより精力的に進められている。

その様な中、我々は高移動度の単結晶有機超薄膜半導体が、分子間距離などの分子配置に大きく依存する電子伝導物性と、小さな外力が大きな歪を引き起こす力学特性とを有し、両者が非常に強く結合していることを見出した。実際、単結晶有機超薄膜で作成されたトランジスタは、指でわずかな力を加えることにより移動度が $10\text{cm}^2/\text{Vs}$ から 70% 上昇する巨大歪効果を示している。

巨大応答のメカニズムについては未解明であり、ミクロな機構の理解とさらに優れた材料設計技術開発が緊急に求められている。本研究は、歪が電子移動と電子散乱に寄与する効果を精緻な物性研究により明らかにし、フレキシブルな有機半導体における巨大なメカノエレクトロニクス応答機構を解明することを目的とする。

【研究の方法】

フレキシブル単結晶有機半導体結晶の巨大歪応答現象の全貌を解明するために、「分子層単結晶有機半導体・高分子複合物質の開発」ならびに「構造物性の解明と歪効果の電子物性研究」に取り組み、以下に示す研究を展開する。

また、これら技術をベースとして、センサ、振動発電素子とプリンテッド LSI を組み合わせたメカノエレクトロニクスを創成する。

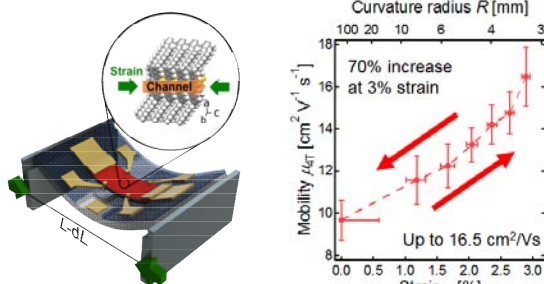


図 1 歪印加有機半導体と歪／移動度特性

- ①様々な高分子材料と超薄膜分子層結晶の複合材料の作製プロセスと物性を確立する。
- ②歪下での構造を透過 X 線などの方法によって温度因子も含めて解明する。
- ③ラマン散乱、ホール効果、4 端子伝導度の温度変化などの電子物性と理論研究を融合し、フォノンと伝導度のミクロな結合メカニズムを解明する。
- ④バンド幅への変化による歪誘起電荷移動現象の解明を行う。

【期待される成果と意義】

本研究は、“デバイス構築を見据えた実用的な構造の解明”を目指し、これによりこれまでにない超高感度歪センサ素子や高効率振動発電素子の実現が期待できる。この超高感度センサは新しい構造物劣化診断技術や新自動生産技術を生み、また、高効率発電素子は振動発電によるエネルギーハーベストに結びつく。これらの素子とプリンテッド LSI を組み合わせたデバイスはメカノエレクトロニクスの産業基盤を創成し、IoT 社会を大きく進展させると共に、自律的ネットワーク社会構築による社会変革を促し、高度情報社会のイノベーションの礎となるインパクトを有する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Takayoshi Kubo, Roger Häusermann, Junto Tsurumi, Junshi Soeda, Yugo Okada, Yu Yamashita, Norihisa Akamatsu, Atsushi Shishido, Chikahiko Mitsui, Toshihiro Okamoto, Susumu Yanagisawa, Hiroyuki Matsui & Jun Takeya, “Suppressing molecular vibrations in organic semiconductors by inducing strain” Nature Communications 7, 11156 (2016).
- ・ K. Sakai, Y. Okada, S. Kitaoka, J. Tsurumi, Y. Ohishi, A. Fujiwara, K. Takimiya, and J. Takeya, “Anomalous pressure effect in heteroacene organic field-effect transistors”, Phys. Rev. Lett. 110, 096603 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度－33 年度
163,300 千円

【ホームページ等】

<http://www.organicel.k.u-tokyo.ac.jp/>

【基盤研究(S)】

理工系 (総合理工)



研究課題名 テラヘルツ高強度場物理を基盤とした非線形フォトエレクトロニクスの新展開

京都大学・大学院理学研究科・教授 田中 耕一郎 (たなか こういちろう)

研究課題番号：17H06124 研究者番号：90212034

研究分野：光工学・光量子科学

キーワード：非線形光学、高強度場光科学、高次高調波発生、テラヘルツ光

【研究の背景・目的】

300 GHz を超えるような高周波帯域（以下ではテラヘルツ領域と呼ぶ）のフォトエレクトロニクスは、次世代の高速通信や非破壊検査、セキュリティなどへの応用展開が期待される先端領域である。光源や検出器の根幹を支える新規な技術やそれを支える新しい物理の開拓が強く望まれている。

テラヘルツ領域におけるフォトエレクトロニクスを飛躍的に進展させるために、低次元電子材料系を用いて、中赤外領域からテラヘルツ領域の非線形光学効果の研究を行う。特に、グラフェンなどのディラック電子系を持つ材料と MoS_2 などの単層2次元材料の高品質薄膜に対して高次高調波発生を行い、その励起波長依存性と偏光依存性、温度依存性から物理的な起源を明らかにする。バンド分散が異なる材料系での結果を比較し、非線形光学応答がバンド内過程とバンド間過程の協調と競合で説明可能か検討すると共に、高強度場物理の観点からも物理機構の解明を進める。

【研究の方法】

目的達成のため、以下の3つの研究の軸を立てる。

① 非線形光学効果の物理メカニズム解明による励起条件の最適化

テラヘルツ領域から赤外領域の広い周波数領域にわたって、高調波発生の偏光依存性、結晶角依存性などの実験を系統的におこない、非線形光学効果のメカニズムを解明する。これにより、非線形光学デバイスに有効な設計指針を明らかにする

② テラヘルツ帯の非線形光学に適した低次元材料・デバイスの開発

グラフェンや金属カーボンナノチューブ、及びそのデバイス構造において、欠陥密度やフェルミ面の制御をおこない、テラヘルツ領域の非線形光学に適した物質系の最適化を行う。

③ 金属構造・金属ポイントコンタクトの利用によるテラヘルツ電磁場の最適化

低電場強度のテラヘルツ光に対しても非線形光学効果を有効に発現させるために、金属構造を用いて非線形光学材料内の空間電磁場分布を最適化する。また、光誘起STMのシステムを金属ポイントコンタクトによる非線形光学素子として考え、非線形なトンネル電流を用いた非線形光学現象を探索する。

【期待される成果と意義】

本研究の最大の特徴は、高強度テラヘルツ電場と物質との相互作用に起因した非線形光学現象の学理を追求することにある。物質系をこれまで探索されてこなかったような高電場を印可することによって極端非平衡状態におき、そこでの光学特性を明らかにする。これにより、既存の非線形光学では現れないような、高速・コヒーレントに誘起される Zener トンネル効果やフロッケ・ブロッホ状態のような新たな量子効果や量子状態の出現が期待される。また、ナノメートル以下の厚さしかない固体物質や金属ポイントコンタクトでのテラヘルツ帯での非線形光学応答を探索する点も新しい。本研究では、周波数依存性や偏光依存性といった基本的な非線形光学特性に立脚して、高強度場物理の観点から研究を進める点が独自である。

最終的に構築される学理は、将来のテラヘルツフォトニクスの発展に直結しており、我が国の科学技術の優位性を確保する観点からも重要である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- N. Yoshikawa, T. Tamaya, and K. Tanaka, "High-harmonic generation in graphene enhanced by elliptically polarized light excitation", *Science* 356, 736-738 (2017).
- T. Tamaya, A. Ishikawa, T. Ogawa, and K. Tanaka, "Diabatic Mechanisms of Higher-Order Harmonic Generation in Solid-State Materials under High-Intensity Electric Fields", *Phys. Rev. Lett.* 116, 016601 (2016).
- T. Kampfrath, K. Tanaka and K. A. Nelson, "Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients", *Nature Photonics* 7,680-690 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度 - 33 年度
162,300 千円

【ホームページ等】

<http://www.hikari.scphys.kyoto-u.ac.jp/jp/kochan@scphys.kyoto-u.ac.jp>



研究課題名 近接場熱輻射の帯域制御手法の確立と熱光発電への展開

京都大学・大学院工学研究科・教授 **の だ すすむ**
野 田 進

研究課題番号：17H06125 研究者番号：10208358

研究分野：光工学、光量子科学

キーワード：フォトニック結晶

【研究の背景・目的】

一般に、物体を高温に加熱したときに自由空間に取り出される熱輻射は、極めて広帯域なスペクトルを示し、輻射強度の上限は同温度の黒体輻射強度で制限される。本研究では、上記の課題を解決すべく、研究代表者独自のフォトニック結晶効果に加え近接場効果の活用により、高温物体からの熱輻射を、黒体限界を超えて引き出すための体系的な理論構築と実験的実証を行うことを目指す。これにより、所望の帯域のみで黒体輻射限界を超えて熱輻射を得るための理論および技術が確立され、高出力・高効率な熱光発電への展開の基礎が築かれると期待される。

【研究の方法】

これまで研究代表者等は、物質内の光状態密度の制御（フォトニック結晶効果の活用）と物質の吸収係数の制御（量子井戸のサブバンド間遷移あるいは半導体のバンド間遷移の活用）により、特定の帯域のみに熱輻射を集約するという独自の概念を提唱し、自由空間へ放射される熱輻射の高効率・狭帯域化に成功している。本研究では、この概念を深化・発展させ、フォトニック結晶効果に加え、新たに近接場効果を活用することで、所望の帯域のみで黒体限界を超える狭帯域な近接場熱輻射を得ることを目指す。以下に、具体的な研究項目を記す。

(I) フォトニック結晶と近接場効果を活用した熱輻射制御の体系的理論構築：揺動散逸定理と厳密結合波解析を組み合わせた近接場熱輻射の新しい解析手法を確立し、フォトニック結晶が有する特異な分散関係（フォトニックバンドギャップ、バンドの折り返し、低群速度バンド等）が、近接場熱輻射スペクトルに与える影響を明らかにするとともに、所望の狭い帯域のみで黒体限界を超える熱輻射伝達を実現可能な構造（具体的には図1に示す熱輻射光源・中間透明基板・受光素子からなる構造）の設計を行う。

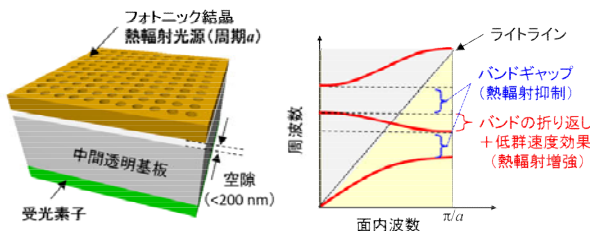


図1 フォトニック結晶と近接場効果による熱輻射制御

(II) 光源・受光素子対の近接場結合法の確立：半導体のナノ加工・融着・薄膜化技術を駆使して、図1の構造（フォトニック結晶熱輻射光源・中間透明基板・受光素子）の作製手法と、それらを200 nm以下の距離に精密に近接させる手法を確立する。

(III) 近赤外狭帯域熱輻射伝達の実証および熱光発電への展開：(II)で開発した構造体を用いた熱輻射伝達実験を行い、試料の近接による熱輻射増強効果や、フォトニック結晶・中間透明基板の導入による近接場熱輻射の狭帯域化の効果、実験的に明らかにする。さらに、光源の加熱パワーに対する受光素子の出力パワーの割合を定量的に評価し、熱光発電試験を行うことで、熱エネルギーから近赤外熱輻射への高効率な変換の実証を目指していく。

【期待される成果と意義】

本研究の推進により、フォトニック結晶等の人工構造物質と近接場熱輻射効果の相乗効果で、熱輻射の狭帯域化と黒体限界を超える増強を同時に実現するための理論体系が構築されることが期待される。また、実験的にも近赤外域のみで黒体限界を超える高強度な熱輻射を引き出すための高度な技術が確立され、熱輻射を利用した発電システム（熱光発電システム）の大幅な高出力化・高効率化に資すると期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Asano, M. Suemitsu, K. Hashimoto, M. D. Zoysa, T. Shibahara, T. Tsutsumi, and S. Noda, "Near-infrared-to-visible highly selective thermal emitters based on an intrinsic semiconductor," **Science Advances**, vol. 2, e1600499 (2016).
- T. Inoue, T. Asano, and S. Noda, "Near-field thermal radiation transfer between semiconductors based on thickness control and introduction of photonic crystals," **Physical Review B**, vol. 95, 125307 (2017).

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度－33 年度
154,900 千円

【ホームページ等】

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp>
snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp



研究課題名 高輝度ミュオンマイクロビームによる透過型ミュオン顕微鏡イメージング

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授 みやけ やすひろ
三宅 康博

研究課題番号： 17H06126 研究者番号： 80209882

研究分野： 量子ビーム科学

キーワード： ミュオン、超低速ミュオン、レーザー、顕微鏡、量子可干渉性、波動性

【研究の背景・目的】

表面ミュオン(4 MeV)を、タングステン箔(シリカエアロゲル)に入射すると、真空中に熱化したミュオンウム(正ミュオンと電子が結合した軽い水素状原子, Mu)を発生させるができる。このとき、4 MeVから0.2 eV(0.03eV)までの7-8桁の冷却が行われるにも拘わらず、その収率が4%(7%)と極めて高いことが重要である。真空中に漂い出てくるMuをレーザー共鳴イオン化法(1s-2p-unbound)により電子を剥ぎ取り、加速・収束することにより、波の性質を持つ超低速ミュオンが得られる。これまでミュオンは、スピンを持った粒子として、生成・崩壊時の空間反転非対称性を利用する研究に、その用途が限られてきた。本研究の本質は、超冷却・再加速により、時間・空間コヒーレンスに優れた高輝度ミュオンマイクロビームを創成しミュオンの粒子性と波動性の2面性を実証するとともに、これを駆使した新しい顕微鏡法を確立する事にある。

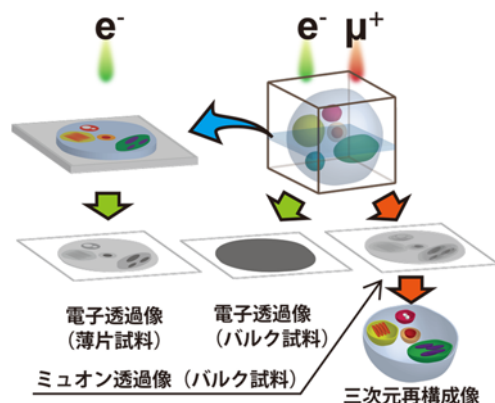


図1. 透過型ミュオン顕微鏡が目指す、10 μm 厚試料の3Dイメージング vs. 電子顕微鏡。

【研究の方法】

超低速ミュオンを300 keVまで再加速して得られるパルスミュオンマイクロビーム更に10 MeVまで再加速し、最終的に透過型ミュオン顕微鏡法を確立する。以下の3研究大項目を有機的に融合させることにより数 μm を越える厚みのある試料のイメージングを実現する。

- (A) ミュオン再加速：誘導加速により300 keVまで加速し、ミュオンが波であることを実証し、更に、これをマイクロトロンに改良し10 MeVのミュオン

マイクロビームを実現する。

- (B) 超伝導対物レンズ：電子より200倍重いミュオンを収束する超伝導対物レンズの開発。
(C) 透過イメージング：常伝導収束・投影レンズ及びミュオン画像検出器の開発。

【期待される成果と意義】

- (1) 第2世代以降の粒子の量子可干渉性の直接証明
単結晶金薄膜試料を用い、ミュオン回折像を取得する。再加速したミュオンが波であることを示す実証実験である。金格子(408 pm)の回折角は、100,300 keVの加速で0.66,0.38 mradである。1 mの距離で回折パターンを識別するために、真空対応の2次元イメージセンサSOI検出器(分解能14 μm)を用いる。これは標準模型の第2世代以降の粒子の量子可干渉性の初の直接証明となる歴史的成果となる。
- (2) 実用材料の顕微イメージング
再加速システムと顕微鏡レンズ系を接続し、透過型電子顕微鏡を組み上げる。透過型ミュオン顕微鏡の持つ高い試料透過能力と、高い電位分布検出感度を用いて、厚みのある試料を観察する。イメージングには、重金属染色などを用いて試料のミュオン吸収の分布を観察するミュオン吸収イメージング法と、カーボン薄膜で作成したミュオン用位相板を用いて試料内部の電磁場分布を可視化する(アハラノフ=ボーム効果)ミュオン位相差イメージング法の双方を用いる。解像度256 x 256ピクセルの像をダイナミックレンジ8 bitで取得するのに必要なミュオン数は256³個であり、U-Lineにおいて想定される1枚の像取得に必要な時間は数十分から数時間程度である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- "Ultra Slow Muon Project at J-PARC MUSE", Y. Miyake et al., JPS Conf. Proc. 2, (2014)010101
- "Ultra Slow Muon Microscopy by Laser Resonant Ionization at J-PARC, MUSE", Y. Miyake, et al., Hyperfine Interactions 216 (2013) 79-83

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
159,300千円

【ホームページ等】

<http://slowmuon.kek.jp/MuonMicroscopy.html>



研究課題名 代数幾何と可積分系の融合 - 理論の深化と数学・
数理解物理学における新展開-

神戸大学・大学院理学研究科・教授

さいとう まさひこ
齋藤 政彦

研究課題番号：17H06127 研究者番号：80183044

研究分野：数物系科学、数学、代数学

キーワード：代数幾何、可積分系、微分幾何、モジュライ理論、ミラー対称性

【研究の背景・目的】

代数曲線上の確定特異点をもつ安定放物接続のモジュライ空間の代数幾何学的構成と、リーマン・ヒルベルト対応の詳細な解析により、接続のモノドロミー保存変形から得られる非線形微分方程式の幾何学的パルヴェ性を明確かつ厳密に示すことが出来た。不確定特異点を許す場合、漸近展開やStokes現象の解析、モジュライ空間の構成が進展している。また、望月による混合ツイスターD加群の理論の整備も進展している。数理解物理学と関連する種々の代数多様体の不変量や、ミラー対称性予想の数学的基礎の構築、近年WKB漸近解析やEynard-Orantinによる位相的漸化式の急速な進展があり、可積分系における漸近展開の理論と種々の量子不変量との関係を明確に定式化する事が望まれている。森理論にはじまる代数幾何学の高次元双有理幾何においても、極小モデルプログラムの研究が近年進展しているが、接続やHiggs場のモジュライ空間、そしてそれらのコンパクト化の良いモデルや、見かけ特異点理論によるモジュライ空間の座標の理論、ラグランジアンファイブレーションなどの詳しい構造に関心が集まっている。我々はこの観点から、次の三つを研究目的とする。

1. モノドロミー保存変形の幾何学（不確定特異点とストークス現象）
2. 高次元双有理幾何学とその可積分系への応用（幾何学的ラングランズ予想の研究）
3. 量子不変量とモジュライ空間、ミラー対称性の数学的理解

【研究の方法】

神戸大学の研究分担者を中心に、国内の微分方程式、可積分系、高次元双有理幾何学、モジュライ理論、シンプレクテック幾何、微分幾何、ミラー対称性、幾何学的表現論、導来圏の幾何学、数理解物理学等を専門とする研究分担者、連携研究者と連携して研究を進める。各研究目的に従って、研究メンバーはそれぞれ個々の研究を進め、また共同研究を発展させる。解決すべき問題や新たに得られた結果を共有するために、適宜、ワークショップや研究集会を開催する。海外の関係する研究者（米国、台湾、フ

ランス、ハンガリー等）との交流も密にして、研究交流を活性化し、共同研究等を行う。また、関係する研究を専門とする若手のPDを研究員として雇用し、研究の進展と人材育成を図る。この分野の国際研究拠点の構築を目指す。研究課題のホームページの整備を通じて、研究情報を発信する。

【期待される成果と意義】

不確定特異点を持つ接続のリーマン・ヒルベルト対応やモノドロミー保存変形の幾何学を確立し、可積分系および相空間を幾何学的に精密に記述できる。その事により可積分系の対称性や漸近展開の理論の統一的な理解が進められる。また、接続やヒッグス束のモジュライ空間の詳しい構造の解析により、幾何学的ラングランズ予想の部分的な解決が期待される。これらにより、可積分系と代数幾何学が融合し、超弦理論やミラー対称性等の数学的理解を深める基礎理論の構築が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ① F. Loray, M.-H. Saito, “Lagrangian fibrations in duality on moduli spaces of rank 2 logarithmic connections over the projective line”, IMRN, no. 4, 995–1043, (2015).
- ② M.-a. Inaba, M.-H. Saito, “Moduli of unramified irregular singular parabolic connections on a smooth projective curve”. Kyoto J. Math., 53, no. 2, 433–482, (2013).
- ③ New developments in algebraic geometry, integrable systems and mirror symmetry (RIMS, Kyoto, 2008), Edited by M.-H. Saito, S. Hosono, K. Yoshioka, Advanced Studies in Pure Mathematics, 59, MSJ, (2010).

【研究期間と研究経費】

平成29年度－33年度
92,000千円

【ホームページ等】

<http://www2.kobe-u.ac.jp/~mhsaito/ftop.html>

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 幾何的トポロジーと写像の特異点論の革新的研究

九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・教授

さえき おさむ
佐伯 修

研究課題番号：17H06128 研究者番号：30201510

研究分野：微分位相幾何

キーワード：特異点、低次元トポロジー

【研究の背景・目的】

トポロジーでは、図形や空間を連続的に変形しても変わらない性質、つまりその本質的形状を理解することが目的である。たとえば高次元空間を観るため、2次元や3次元への写像を用いることができるが、その際、特異点を調べることが本質的に重要である。

20世紀半ばに生まれた微分トポロジーは、ミルナーによる異種微分構造の発見で数学界にショックを与えたが、その仕事では関数の特異点が重要な役割を果たした。その後トムは特異点論に基づくカタストロフィー理論を提唱して、種々の現象解析への応用を世に示した。一方1980年代にはトポロジーに、強力な解析的手法が導入されたが、これは残念ながらあまり構成的ではない。解析的手法の発展が一段落した近年、具体的かつ構成的なアイデアに基づく幾何的トポロジーの重要性が再認識されつつある。

こうした流れの中、本研究では、そうした具体的かつ構成的な幾何的アイデアや、低次元トポロジー固有の豊かな理論を写像の特異点論の世界に持ち込むことで、既存の概念・定式化・手法を革新し、特異点論の飛躍的發展を図る。そして逆に、幾何的トポロジーに特異点論から新しい道を切り開き、重要な問題の解決を図る。さらには新研究領域、いわば次世代カタストロフィー理論を創成し、諸科学分野や産業界への応用を通して、トポロジーに新たな展開をもたらすことも目的とする。

【研究の方法】

代表者佐伯が創始した特異ファイバー論、最近注目されている特異幾何構造、分担者遠藤が世界を牽引している写像類群とモノドロミーを駆使してゆく。分担者鎌田が考案した、ブレイド群や写像類群を可視化するチャートを用い、あまり幾何的に理解されていない量子不変量等を統一的に扱う。分担者大本の特異性類理論と分担者岩瀬の高度なホモトピー論を用い、特異点消去の研究も組織的に行う。

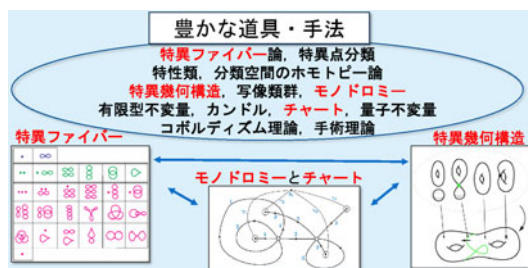


図1 研究手法

さらに、分担者石川の実特異点技法を用いて、4次元可微分ポアンカレ予想への貢献も目指す。こうした手法を基に、代表者、分担者、連携研究者、研究協力者の間で密に連絡を取りながら、個人研究、共同研究を推進してゆく。また、そのために国際研究集会やセミナーを開催し、当該分野の活性化を図る。

【期待される成果と意義】

微分トポロジーの重要な未解決課題への新たな貢献が得られるほか、具体的で構成的なアイデアを用いることで、特異点論の諸科学分野への応用の道も拓かれて、トポロジー分野を越えるような新研究領域、いわば次世代カタストロフィー理論が創られる。特異点論のこれまでにない形での進展により、数学の関連分野の発展が促される。ここは特異点論の汎用性が大いに貢献できるところである。さらに、カタストロフィー理論の活性化により、産業界の課題を解決し、諸科学分野に新手法を提案することで、他分野へその成果を広く波及させてゆく。

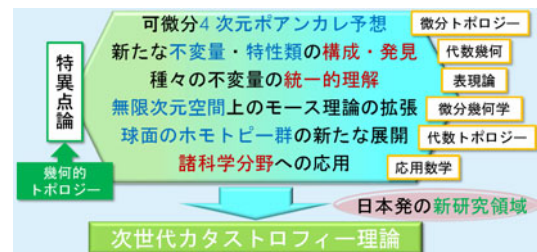


図2 期待される成果

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ R.A. dos Santos, M.A.B. Hohlenwerger, O. Saeki and T.O. Souza, New examples of Neuwirth-Stallings pairs and non-trivial real Milnor fibrations, Ann. Inst. Fourier (Grenoble) 66 (2016), 83-104.
- ・ O. Saeki, Topology of singular fibers of differentiable maps, Lecture Notes in Math., Vol.1854, Springer-Verlag, 2004.

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
62,800千円

【ホームページ等】

<http://imi.kyushu-u.ac.jp/~saeki/>



研究課題名 すばる望遠鏡トモグラフィー補償光学で明かす 銀河骨格の確立過程

東北大学・大学院理学研究科・教授

あきやま まさゆき
秋山 正幸

研究課題番号：17H06129 研究者番号：50425401

研究分野：天文学

キーワード：光学赤外線天文学、応用光学

【研究の背景・目的】

現在の銀河系に見られるバルジと薄い円盤からなる形態はどのように確立したのか？遠方宇宙の銀河の最新の観測は、誕生した時期の銀河は、速度分散が大きく乱流が支配的なガス円盤や、星の密度が現在の銀河に比べて3ケタも高く密集した中心部という、我々の住む現在の銀河系とは全く異なる構造を持つことを明らかにした。本研究は、現在の銀河に見られる形態が確立してきた時期の銀河について、銀河の重力場構造を反映する星の空間分布や速度構造を高空間解像度で観測することで、銀河の形態が確立してきた物理過程を解明することが目的であり、すばる望遠鏡のレーザートモグラフィー補償光学によって可視光から近赤外線に渡る広い波長域での高解像度の観測を実現することが鍵である。

【研究の方法】

遠方の銀河の中の星の空間分布を明らかにする上で必要となるのは、近赤外線での高空間解像度の撮像観測である。近赤外線の高空間解像度は、すばる望遠鏡の既存の188素子補償光学に、新しく開発されたファイバーレーザー光源を実装し、レーザー光源の明るさをこれまでより10倍明るくすることで実現する。高解像度の撮像観測は近赤外線撮像分光装置IRCSを用いて行う。

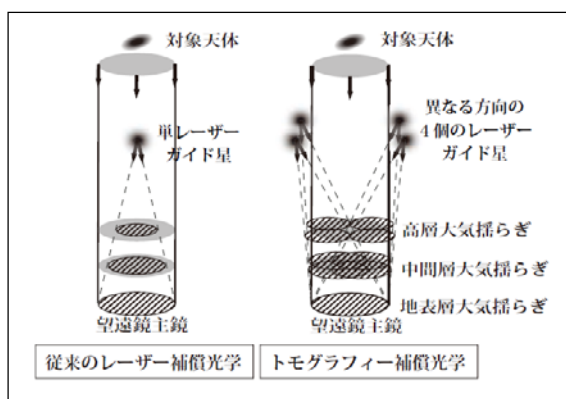


図1：補償光学概念図

一方、星の速度構造を明らかにするために、可視光に赤方偏移した銀河の吸収線を高空間解像度で面分光観測する。可視光でのレーザー補償光学によって、高空間解像度を実現するためには、従来の単レーザー光源での補償光学の性能を制約している要因の一

つである円錐効果を無くす必要がある。図1に示すように円錐効果はレーザー光源が有限の高さにあるため円錐状の領域を通してやってくることで生じる。我々は4個のレーザー光源を用意し、その光源を4台の波面センサーで測定することで、天体の光路である円筒状の領域での波面の測定を行い、円錐効果を低減する。この場合には4方向の測定結果から天体の光路での波面揺らぎをトモグラフィーの手法で推定することで補償を行う。このトモグラフィー補償光学により、波長が短く、補償が困難であった可視光でもレーザー補償光学が有効となる。高解像度の面分光観測は既存の可視面分光装置3DIIを用いて行う。

【期待される成果と意義】

可視光から近赤外線での広波長域に渡る高空間解像度の観測は、銀河の中の星の空間分布や速度構造を明らかにする上で重要な情報をもたらす、銀河の形態が確立した過程を解き明かす鍵となる。

本研究で実現を目指す可視光でのレーザートモグラフィー補償光学は世界的に見てもまだ実現しておらず、すばる望遠鏡で世界に先駆けて実現することは可視光での新しい観測手法の開拓につながる。また次世代超大型望遠鏡ではレーザートモグラフィー補償光学は必須の技術であり、すばる望遠鏡で確立した技術は次世代超大型望遠鏡での高解像度観測装置の開発にもつながる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・"Multi time-step wavefront reconstruction for tomographic adaptive-optics systems", Ono, Y., Akiyama, M., Oya, S., et al., Journal of Optical Society of America, A., 2016, 33, 726
- ・"次世代超大型望遠鏡TMTのための広視野多天体補償光学", 秋山正幸, 大野良人, 光学, 2015, 44, 396

【研究期間と研究経費】

平成29年度～33年度
161,300千円

【ホームページ等】

http://www.astr.tohoku.ac.jp/~akiyama/index_Res_TMTinst.html
akiyama@astr.tohoku.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 ミリ波サブミリ波帯輝線銀河の無バイアス探索に基づく隠された宇宙星形成史の研究

東京大学・大学院理学系研究科・教授

このの こうたろう
河野 孝太郎

研究課題番号： 17H06130 研究者番号： 80321587

研究分野： 天文学

キーワード： ミリ波サブミリ波、宇宙星形成史、輝線銀河、超伝導

【研究の背景・目的】

宇宙における星形成活動が、時代(赤方偏移)と共にいかに変遷してきたか、そして、その変遷を司る物理過程は何か、を理解することは、現在の天文学における最も重要な課題の一つである。ALMA が本格的に稼働し、ダストに隠された初期宇宙の星形成銀河を高い解像度で精緻に描き出しはじめているが、一方で、星形成活動の指標である「星形成率密度」の測定は、異なる手法による結果の食い違いが顕在化してきた。また、星形成活動の変遷を理解する上で鍵となる「分子ガス量密度」の測定も、観測の難しさから、まだ限定的なものにとどまっている。

本研究では、ミリ波サブミリ波帯において、スペクトル線を示す「輝線銀河」の大規模探索により、これらの未解明課題の解決を目指す。すなわち、(1) 遠赤外線域で最も明るい炭素イオンからの[CII] 158 μm 輝線に着目し、赤方偏移が4から8の時代における星形成銀河を、ダスト減光の影響を受けない手法で、ALMA より格段に広い共動体積内を無バイアスに探索し、この時代における[CII]輝線光度関数、ひいては星形成率密度を測定する。(2) 分子ガスのトレーサーである回転量子数の比較的小さいCO 輝線に着目して無バイアス探索を行うことにより、赤方偏移が0から2に至る時代でのCO 輝線光度関数に制限を与え、分子ガス質量密度の変遷をとらえる。

【研究の方法】

この目標を達成するため、210GHz から 360GHz という幅広い周波数範囲を一挙に分光できるミリ波サブミリ波帯分光撮像装置 DESHIMA (ALMA が1回の観測で分光できる周波数範囲と比較して約13倍広い)を、最先端の超伝導検出器技術を駆使して開発する。この DESHIMA を空間方向に数10画素規模で配置することにより、超広帯域分光をALMAと同等以上の視野にわたり行うことが可能となる。これを世界最大のミリ波単一鏡望遠鏡 LMT50m 鏡に搭載して、重点的な輝線銀河探索観測を行う。

【期待される成果と意義】

本研究により、一挙に150GHz幅を分光できる DESHIMA を使った初めての天文学観測が実現されることになる。日本人研究者が世界に先駆けて提唱した独創的な新技術(オンチップ型超伝導分光器)を実証することができる。

[CII] 158 μm 輝線銀河の探索を通して星形成率密度を求める手法は、従来の、ダスト連続波放射の探

査から出発する手法と比較して、赤方偏移の不定性がない上に、近年注目されている、ダスト放射は弱い強い輝線を示すという新しいタイプの星形成銀河を系統的に調査できるという意義がある。CO 輝線銀河についても、ALMA を使った探索とは異なるパラメーター・スペースでの調査となり、赤方偏移が0から2に至る時代のCO 輝線の光度関数について、新たな制限を与えることができると期待される。ここで発見された興味深い輝線銀河は、ALMA による追求観測の格好のターゲットとなり、我が国におけるALMA を使った成果の更なる拡大にも資する。

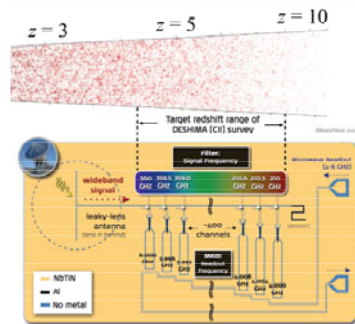


図1 オンチップ型超伝導フィルターバンク分光器 DESHIMA。赤方偏移4から8にある[CII]輝線を一挙に観測することができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Yamaguchi, Y., Tamura, Y., Kohno, K., et al., "SXDF-ALMA 2 arcmin² deep survey: Resolving and characterizing the infrared extragalactic background light down to 0.5 mJy", Publ. Astron. Soc. Japan, 68, id. 82, 15 pp. (2016)
- Endo, A., et al., "Design of an Integrated Filterbank for DESHIMA: A submillimeter Imaging Spectrograph Based on Superconducting Resonators", J. Low Temp. Phys., 167, 341-346 (2012)

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
163,700千円

【ホームページ等】

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kkohno/>

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 CTA 大口径望遠鏡アレイによる極限宇宙の研究

東京大学・宇宙線研究所・教授

てしま まさひろ
手嶋 政廣

研究課題番号：17H06131 研究者番号：40197778

研究分野：宇宙線物理、高エネルギー宇宙物理

キーワード：宇宙線、ガンマ線、ブラックホール、超新星残骸、暗黒物質

【研究の背景・目的】

高エネルギーガンマ線による宇宙の研究は、過去10年にわたり、現在稼働中のチェレンコフ望遠鏡により大きく進展してきた。さらに、次世代の高性能チェレンコフ望遠鏡 CTA により飛躍的な発展が期待される。我々日本グループは、CTA 北サイトであるスペイン・ラバルマに、23m 口径 CTA 大口径望遠鏡 4 基を特別推進研究（完了）、概算要求施設整備費（2016-2018 年度）で建設を進めている。本研究計画では、CTA 建設・コミッショニング段階（2017-2021）の初期段階から、運用されるこれら 4 基の大口径望遠鏡アレイを利用し、可能な限り多くのサイエンスを生み出す。研究目的は 1) 地上からの高統計なガンマ線バーストの初観測、2) 超大質量ブラックホール周辺の高エネルギー現象解明、3) 矮小楕円銀河、銀河中心に暗黒物質の高感度な探索（発見）である。

【研究の方法】

近年、地上でチェレンコフ望遠鏡を使い TeV 領域ガンマ線を観測する技術が確立し、新たな天文学の一分野となった。多種多様な高エネルギーガンマ線源が銀河系内、銀河系外に約 200 天体発見され、宇宙線の起源、宇宙での比熱的過程、ブラックホールの相対論的ジェット、銀河間空間を満たす可視・赤外線領域背景放射等の問題が徐々に解明されつつある。

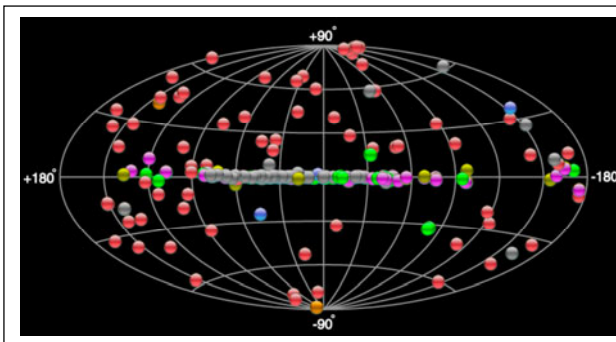


図1 >100GeV ガンマ線源。図中央が銀河中心領域で、銀河面に沿って多数の天体が存在する。高銀緯の赤い点は活動銀河核である。

現在、日本グループは CTA 23m 大口径チェレンコフ望遠鏡 4 基を欧州グループと共同で建設中である。順次稼働を開始し、2018 年度、2019 年度にはアレイとして本格稼働を開始する。この大口径望遠鏡アレイは高エネルギーガンマ線による観測領域を宇宙

初期($z < 4$)まで及び、活動銀河核（巨大ブラックホール）、ガンマ線バースト（宇宙で一番明るい電磁波爆発）等のより多くの高エネルギー天体を広いエネルギー帯域で観測し、これら天体で起こる高エネルギー物理過程を解明する。また、今までにない最高感度で矮小楕円銀河、銀河中心に暗黒物質探索を行う。



図2 CTA 大口径チェレンコフ望遠鏡完成想像図。2017 年度から 2019 年度間に建設完了し、順次運用が開始される。

【期待される成果と意義】

CTA 国際共同研究により、高エネルギーガンマ線天文学を飛躍的に進展させる。日本グループの強いリーダーシップで、CTA 初期段階のサイエンス成果をあげることができ、日本の若手研究者をグローバルリーダーとして育成する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Introducing the CTA Concept, CTA Consortium, *Astropart. Phys.* 43 (2013) 3-18.
- Black hole lightning due to particle acceleration at subhorizon scales, MAGIC Collaboration, *Science*, 346 (2014) 1080-1084.
- Detection of very high energy gamma-ray emission from the gravitationally-lensed blazar QSO B0218+357, MAGIC Collaboration, *Astron. Astrophys.* 595 (2016) A68.

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度 - 33 年度
157,100 千円

【ホームページ等】

<http://www.cta-observatory.jp>



研究課題名 気球搭載型エマルジョン望遠鏡による宇宙ガンマ線未解決課題の解明

神戸大学・大学院人間発達環境学研究科・教授

あおき しげき
青木 茂樹

研究課題番号：17H06132 研究者番号：80211689
研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理
キーワード：ガンマ線、原子核乾板、エマルジョン

【研究の背景・目的】

光（電磁波）の中で最もエネルギーの高いガンマ線は宇宙での高エネルギー現象に直結する情報をもたらすが、X線以下のエネルギーの電磁波とは異なり反射・屈折・干渉を利用した結像ができず、望遠鏡の実現が困難であった。2008年に打ち上げられたNASAのFermi衛星に搭載されたLAT検出器は、物質中でガンマ線が対生成する電子・陽電子の飛跡を半導体検出器で捉え、その進行方向から親ガンマ線の天球上の到来方向を求めるという手法により宇宙からのガンマ線を「撮像」して3000個を超える天体を検出し、ガンマ線天文学に飛躍的な進展をもたらした。他方で、空間構造を他波長での観測結果と比較するには解像度が不十分である、発生メカニズムの議論に有用な偏光に関する情報を得ることが困難である、などの課題も浮上している。

本研究では、銀塩写真と同じ原理のエマルジョン（原子核乾板）フィルムを用いて電子・陽電子の飛跡を高精細に測定することで、ガンマ線を高解像度で捉えた上で偏光に関する情報も得られるエマルジョンガンマ線望遠鏡を実現し、上記の技術的課題の解決を通じて質的に新たな観測を開始する。

【研究の方法】

空間分解能に優れたエマルジョンフィルムを用い、角度分解能をFermi-LAT検出器に較べて投影角で1桁（立体角で2桁）改善する大面積かつ広角（±45°以上）の10MeV～100GeV帯域のガンマ線望遠鏡を実現して科学観測気球に搭載し、大気トップ（残留大気圧1000分の5気圧相当）で飛行させ、宇宙から飛来するガンマ線を観測する

エマルジョンフィルム内でガンマ線が電子陽電子対生成を起こすと、図1のような飛跡を残す。このエマルジョンフィルムを積層し対生成した飛跡を捉えてガンマ線の入射角度を測定するコンバーター部、入射時刻を得るためのタイムスタンプ部、さらに入射時の観測器の天球に対する姿勢をモニターするスターカメラにより望遠鏡を構成する。

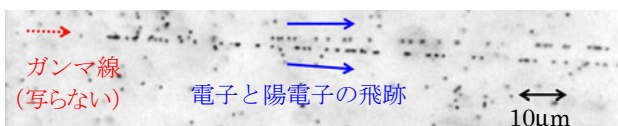


図1 エマルジョンフィルムで捉えた電子・陽電子対生成

超高速飛跡自動読取装置 (HTS、図2左) により、現像後のエマルジョンフィルムに記録されているすべての飛跡を読み出す。読み出した飛跡情報を分析

してコンバーター部内で積層されていたフィルム相互の位置関係を再現し、ガンマ線事象を再構成する。

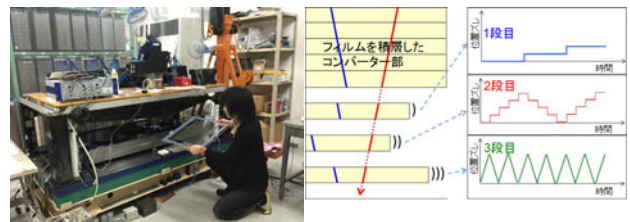


図2 (左) 超高速飛跡自動読取装置 (0.5 m²/h) (右) 多段シフターによるタイムスタンプ法

フィルム内の飛跡が製造後から現像までのどのタイミングに記録されたかは基本的にはわからない。天球が回転したり観測器の姿勢が変化したりするため、天球上のガンマ線の方向決定には入射時刻の再現が不可欠である。このため、観測器の下側の複数枚のフィルムを観測中にそれぞれ異なる周期で往復させ、解析の際にその位置ズレの組み合わせを再現して各飛跡に対して記録時刻を得る多段シフターによるタイムスタンプ法を考案し、装置を製作・実装してエマルジョン望遠鏡を実現した。(図2右)

【期待される成果と意義】

研究課題期間中に開口面積10m²(世界最大)のガンマ線望遠鏡を実現し本格的科学観測を開始する。Fermi-LATで検出された3000個の天体のうち約3割は他波長との対応がいない。また、観測結果を既知の発生源の重ね合わせで説明しようとしても銀河中心方向に未知の余剰成分が有意に残ってしまうなどの課題も残されている。高解像度かつ大面積での観測により、これらの未解決課題に挑む。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・"GRAINE 2015, a balloon-borne emulsion γ -ray telescope experiment in Australia", S. Takahashi et al., PTEP, Vol.2016, 073F01
- ・「原子核乾板ガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE」高橋覚,青木茂樹, 日本写真学会誌, 第78巻, 第4号, pp.228-234

【研究期間と研究経費】

平成29年度～33年度
153,900千円

【ホームページ等】

<http://newweb.h.kobe-u.ac.jp/labo/aoki/aoki@kobe-u.ac.jp>



研究課題名 重力波観測時代に臨む較正標準化とデータ解析高精度化

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授 **かんだ のぶゆき**
神田 展行

研究課題番号：17H06133 研究者番号：50251484

研究分野：数物系科学

キーワード：重力波観測、相対性理論、データ解析、レーザー干渉計、宇宙物理学

【研究の背景・目的】

2015年に米国の観測実験であるLIGOによってついに人類初の重力波検出が達成された。その源は太陽質量の30倍程度のブラックホール連星の合体と推定され、物理学、天体物理学、天文学の上で大きな関心を集めている。LIGOと欧州Virgoの感度更新計画や日本のKAGRA検出器を想定すると、今後はさらに高い頻度で事象が観測される"重力波観測時代"が始まる。

しかし現在の重力波観測では重力波の大きさに数~10%程度の系統誤差がある。較正に用いるレーザー標準が国際的に2~5%の違いがあることや、ダイナミックレンジの大きな重力波信号の計算の難しさ等に起因する。また、より高精度な解析が強く望まれる。

そこで本研究は、重力波観測のハードウェアとデータ解析を連携させ、(1)較正(キャリブレーション)の世界標準化、(2)時系列の重力波信号 $h(t)$ の忠実性の高い再現、(3)データ解析の高精度化および高精度な解析で可能な物理の研究を行う。そして、精密科学としての重力波研究の礎を作る。

【研究の方法】

重力波検出器の較正標準化、重力波信号 $h(t)$ の再現、観測データ解析の高精度化が本研究の柱となる。

フォトンキャリブレーターは、レーザー光の輻射圧で鏡の変位を励起する較正方法である。すでにLIGOでは導入されており、KAGRAでも製作中であるが、本研究では励起源となるレーザー強度を正確に測定するための積分球を導入、LIGO,KAGRAそれぞれで測定し、相互参照を可能とする。それによって国際観測網の較正標準化を行い、系統誤差1%以下を目指す。

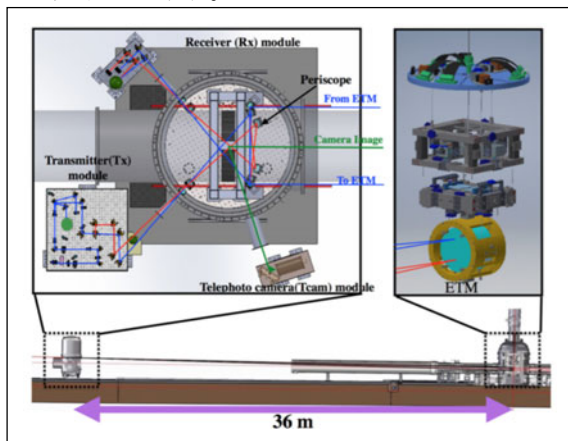


図1 KAGRAのフォトンキャリブレーター

複雑な演算をダイナミックレンジの広い干渉計信号に適用し、元の重力波信号を忠実に再現できるように、 $h(t)$ 再構成のソフトウェアを追求する。

観測データにおける重力波事象の解析において、波形精度(絶対値、位相)の向上を利用して、より高精度な解析(例:距離推定、方向推定)を評価する。また逆に、較正精度の向上により新しいサイエンスが見込めるか、たとえば大質量ブラックホールの準固有振動の解析における波形精度の要求値などを、精度の高い解析手法の開発とともに明らかにする。

【期待される成果と意義】

例えば、ブラックホール連星合体や中性子星連星合体の存在率推定には、重力波による距離の決定が重要である。現状の振幅5%程度の誤差は存在率にして15%程度の誤差を生じるが、本研究で振幅誤差1%に抑えれば存在率の誤差は3%程度に抑えられる。これはブラックホール連星の起源や中性子星連星の形成過程の議論に役立つ。また、観測時代には多数のブラックホール連星合体を用いた解析ができるが、波形と解析の誤差を1%程度に抑えることで、観測装置の系統誤差の影響を数100事象程度での統計誤差以下に抑えられるし、ブラックホールの物理や重力理論の検証が高精度で可能となる。

本研究の後半には、KAGRAも低温鏡での観測運転が予定されており、KAGRAの較正やデータ解析高精度化に本研究を反映する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・「初観測された重力波が開いた宇宙への新しい窓」, 神田展行、雑誌パリティ, Vol. 31, No. 10, 14-18, (2016)
- ・"The detection rate of inspiral and quasi-normal modes of Population III binary black holes which can confirm or refute the general relativity in the strong gravity region", Tomoya Kinugawa, Akinobu Miyamoto, Nobuyuki Kanda, Takashi Nakamura, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 456 (2016) no.1, 1093-1114

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
139,600千円

【ホームページ等】

<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/>
kanda@sci.osaka-cu.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 史上最大のCMB望遠鏡群で観るビッグバン宇宙の種火とニュートリノ質量の絶対値

京大大学・大学院理学研究科・准教授 **たじま おさむ**
田島 治

研究課題番号：17H06134 研究者番号：80391704

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：宇宙物理(実験)、宇宙背景放射

【研究の背景・目的】

インフレーション宇宙論は、宇宙初期のビッグバン(高温・高密度状態)が時空の加速度的膨張を源として生み出されたと記述する宇宙創成の物理学である。近年、その正当性を示唆する観測結果が揃いはじめている。そして、それを実証するラストピース「宇宙創成時の量子ゆらぎに由来する原始重力波」の検出が待望されている。図1に示すように、原始重力波はビッグバン熱放射の残光「宇宙マイクロ波背景放射(CMB)」の偏光成分に数度角スケールの奇パリティ・パターン「Bモード」を刻印する。このBモードの測定こそが、宇宙創成の物理に対する最良の観測プローブとなる。

一方、小角度スケール $\theta(0.1^\circ)$ のCMB偏光Bモードは、銀河団の重力レンズの強度を測るプローブにもなっており、その精密観測はニュートリノ質量和の有望な計測手法でもある(図1および図2)。

本研究では、史上最大のCMB望遠鏡群 Simons Observatory (S0)によって、これらの研究を追究する。S0はこれまで日本が貢献してきた複数の有力実験が融合した次世代プロジェクトであり、日本が培ってきた技術・知見を進化させる。

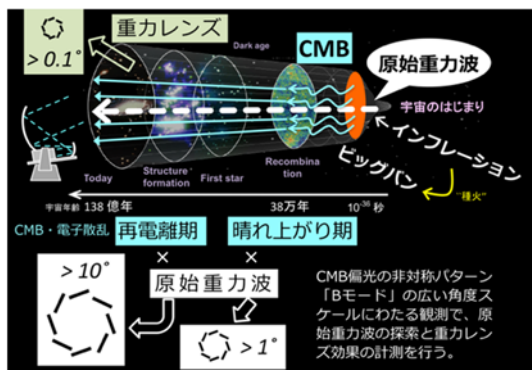


図1 CMB偏光Bモードの精密観測がもたらす知見

【研究の方法】

大角度スケールのCMB偏光観測を達成するためには、広視野、大気ゆらぎの影響抑制、高感度かつ高統計といった要素を同時に満たす必要がある。これらを申請者らの特許発明技術と日米それぞれの得意技術を融合した超伝導計測で実現する。

平成29年度はS0の望遠鏡仕様を確定し、極低温受信器と読み出し系の開発研究を行い、統合試験を見据えた開発を行う。平成30年度から焦点面の開発と共に読み出し系の量産をはじめ、翌年度には検出

器や望遠鏡構造体も含めた統合開発を行う。観測開始目標は平成32年度であり、初期データに基づいた望遠鏡性能評価と偏光観測を行う。海外研究協力者と深く連携した研究チームでこれに挑む。

【期待される成果と意義】

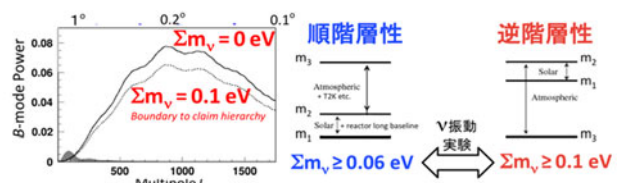


図2 Bモードによるニュートリノ質量和の計測は、その質量階層性を解明する手段のひとつである。

史上最大規模のCMB望遠鏡群プロジェクトを遂行するので、世界一の精度で観測したCMB偏光のデータが取得できる。研究対象であるインフレーション宇宙論は、なぜ宇宙が10万分の1もの精度で一樣なのか(平坦性問題)、なぜ素粒子大統一理論が予言するモノポール等が観測されていないのか(モノポール問題)、さらに、なぜこれらの問題が因果関係の存在するはずのない領域にまで渡っているか(地平線問題)、というビッグバン宇宙論に残された課題を一挙に解決する。そして、Bモードを通じた原始重力波の検出は、インフレーションのポテンシャルエネルギーが大統一理論スケール(10^{16} GeV)に一致することを意味し、また重力が量子化されていた証拠となる。特に後者は、基礎物理学最大の問題とも言える量子重力論に重大な示唆を与える。

また、重力レンズ効果の観測によるニュートリノ質量和の計測は、ニュートリノ質量の階層性に対する知見も与える(図2)。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・QUIET Collaboration, *Astrophys. J.* **760**, 145, 1 – 10 (2013).
- ・POLARBEAR Collaboration, *Astrophys. J.* **794**, 2, 171 – 191 (2014).

【研究期間と研究経費】

平成29年度–33年度
161,100千円

【ホームページ等】

<https://simonsobservatory.org/>



研究課題名 大強度パルスミュオンビームで解き明かす荷電レプトン間のフレーバー混合

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

みはら さとし
三原 智

研究課題番号：17H06135 研究者番号：80292837

研究分野：物理学

キーワード：素粒子実験、量子ビーム

【研究の背景・目的】

素粒子の荷電レプトンにおいてフレーバー数の保存を破る過程 (Charged Lepton flavor Violation, cLFV 過程) はニュートリノ振動を考慮に入れたとしても標準模型内では厳しく制限される。しかしながら標準模型を超える TeV スケール物理が実存するならば、実験室でも十分観測に係る頻度で生じ得る。このため、cLFV 探索は広範囲のエネルギーに渡って新物理を探る可能性を有し、その到達範囲は LHC 実験のそれをも凌駕すると考えられている (図 1)。

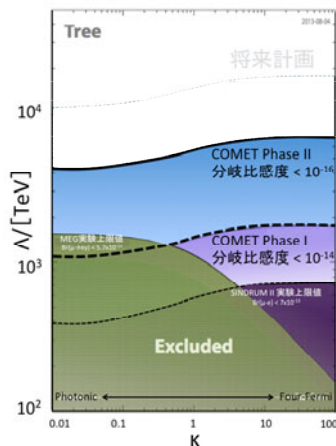


図 1 COMET 実験で到達可能なエネルギー (縦軸)。横軸は反応に寄与する素過程の割合を示すパラメータ

現在、世界最高感度の cLFV 探索である $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験 (MEG 実験) に続き、国内外で多くの cLFV 探索実験の準備が進められている。このような状況のもと、本研究では $\mu \rightarrow e$ 転換過程を 10^{-16} の分岐比感度で探索する COMET 実験の早期実現のため、必要な大強度パルスミュオンビームを最適化し、ミュオンフレーバー物理を大きく進展させて、国内で世界トップレベルの国際共同実験を実現する。

【研究の方法】

本研究は COMET 実験において、その目標感度 (Phase I : 10^{-14} 、Phase II : 10^{-16}) 実現に不可欠なパルスミュオンビームを開発する。このため現在製作中の運動量計測用ストロー飛跡検出器に加えて、エネルギー計測用の LYSO カロリメータ検出器を新規に製作し、必要なエレクトロニクスも整備してビーム診断が可能な検出器群 (StrEcal 検出器 図 2

左) を立ち上げる。これにより大強度ミュオンビームの診断を実施し、ビーム中の粒子種別とその割合の計測、位相空間分布の決定を行う (図 2 右)。また、この結果を基に最適なコリメータシステムを設計し COMET 実験の実験感度を最大化するとともに、最終的なミュオン収量を向上するための陽子標的の検討も進める。

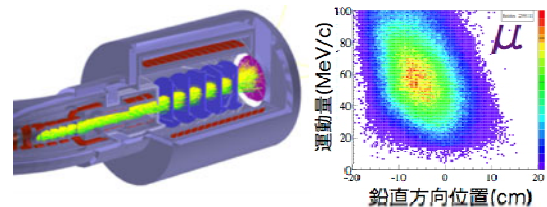


図 2 本研究で開発を行う StrEcal 検出器 (左) とシミュレーションで予想されるビーム位相空間分布 (右)

【期待される成果と意義】

$\mu \rightarrow e$ 探索実験の実験感度を決める主要因はミュオンビームにある。現存するミュオンビームは、その殆どが運動量分布が数%以下であるが、COMET 実験で使用するミュオンビームは大強度化のため、数 10MeV に渡る広い運動量分布を持ち空間的な広がりも大きい。このようなビームを最適化するには専用のビーム計測用測定器が不可欠である。本研究では、実験グループとビームを供給する J-PARC ファシリティとの間に立って、独自に開発した検出器を使用してミュオンビームの最適化を施すことにより、最速で世界最高感度 cLFV 探索実験の実現を目指すものである。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・「荷電レプトンで探る新物理」、三原智、日本物理学会誌 70 巻 10 号現代物理のキーワード
- ・ S. Mihara et al., Annual Review of Nuclear and Particle Science, 63:1 (2013) 531-552.

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度 - 33 年度
152,000 千円

【ホームページ等】

<http://comet.kek.jp/kiban-s>



研究課題名 直流電場・電流：強相関電子系の新しい制御パラメータ

京都大学・大学院理学研究科・教授 **まえの よしてる**
前野 悦輝

研究課題番号：17H06136 研究者番号：80181600

研究分野：数物系科学

キーワード：強相関系

【研究の背景・目的】

強相関電子系特有のモット絶縁相を金属化させる制御パラメータとして、これまで元素置換や圧力印加が広く用いられ、高温超伝導・超巨大磁気抵抗・スピン三重項超伝導など新奇な現象を生んできた。

本研究の目的は、強相関多体効果の本質を顕在化させる新しい制御パラメータとして直流電場・電流の有効性を確立するため、主に定常電流下の非平衡状態が創り出す新現象を明らかにするとともに、その機構の理解を進めることにある。

研究対象の中心はモット絶縁体 Ca_2RuO_4 で、我々が最近発見した直流電流の下で創発する特異な磁性や金属状態など、平衡状態では実現しない電子状態の理解を深める。また、他のモット絶縁相酸化物で同様の非平衡・非線形現象を探索することで、これらの新現象の特質と一般性を明らかにする。

本研究を通じ、強相関物質の非平衡定常状態で生まれる創発現象の研究展開の世界的先駆けを目指す。

【研究の方法】

第一に、主対象の 4d 電子系ルテニウム酸化物 Ca_2RuO_4 について、電場誘起の絶縁体・金属転移、そして電流誘起の特異な磁性の詳細とメカニズムを明らかにする。絶縁体・金属転移については、フォノンや構造不安定性の役割を明らかにする。特異な磁気状態については、岡らの理論の適用を吟味する実験事実を得るため、電流や磁場の方向依存性（異方性）を含めて、電流を制御パラメータとする物性相図を構築する。また、類縁の $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ での電流誘起磁性についても、その詳細を明らかにする。

第二に、3d・5d 電子系の酸化物の中で、エネルギーギャップが比較的小さなモット絶縁体を選び、直流電場・電流の効果を実証することで、我が国での発見からの新たな分野創造につながるという大きな意義が期待できる。

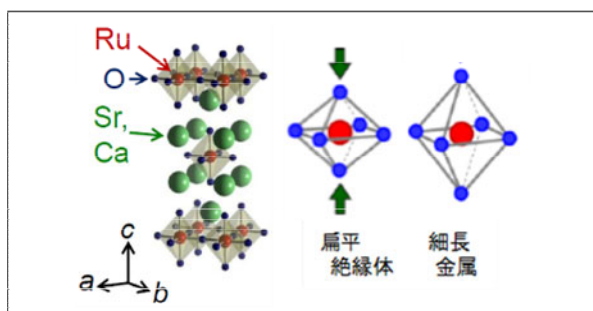


図1 Ca_2RuO_4 のモット絶縁相と金属相の結晶構造

電流下での光電子分光も含む実験データ集積と理論構築と同時に、国内外の共同研究により、フォノン不安定性解明、走査型プローブによる局所ダイナミックスの研究に加え、ポンプ・プローブ分光による高速緩和過程と本研究の主題である直流効果の比較も進める。

【期待される成果と意義】

定常電流のオン・オフによって物質の導電性や磁性を顕著に制御できることは、電子間の相互作用の強い強相関電子系の本性を利用した画期的な非平衡現象である。従来の制御パラメータでは誘起出来なかった電子状態を誘起できる可能性がある。特異な磁性や超伝導をはじめとする新奇電子相が期待でき、様々な物質への波及効果も見込める。直流電流印加という最も身近な非平衡状態を利用して、モット絶縁体から新奇な性質を引き出せることは、物性科学の基礎にとってはもちろん、デバイス応用にとってもインパクトの大きい示唆的な方向性といえる。

これまで用いられてきた組成制御や圧力印加に加え、「直流電場・電流」という新しい物性制御パラメータの有効性を実証することで、我が国での発見からの新たな分野創造につながるという大きな意義が期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- “Electric-field-induced metal maintained by current of the Mott insulator Ca_2RuO_4 ”, F. Nakamura, M. Sakaki, Y. Yamanaka, S. Tamaru, T. Suzuki, Y. Maeno, *Sci. Rep.* **3**, 2536 (1-6) (2013).
- “Current-induced strong diamagnetism in the Mott insulator Ca_2RuO_4 ”, C. Sow, S. Yonezawa, S. Kitamura, T. Oka, K. Kuroki, F. Nakamura, Y. Maeno, arXiv: 1610.02222 (2016).

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度－33 年度
159,000 千円

【ホームページ等】

http://www.ss.scphys.kyoto-u.ac.jp/kibanS_h29-33/index.html

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 フラストレーションが創るスピントクスチャ

大阪大学・大学院理学研究科・教授 かわむら ひかる
川村 光

研究課題番号： 17H06137 研究者番号： 30153018

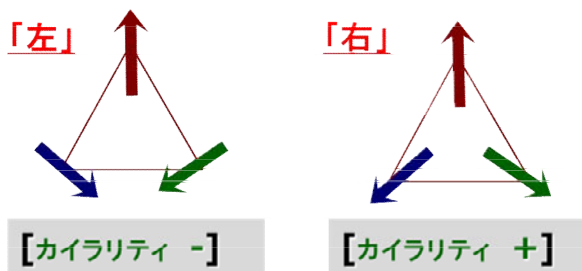
研究分野： 数物系科学

キーワード： 磁性、フラストレーション、スピントクスチャ、 Z_2 渦、スカーミオン

【研究の背景・目的】

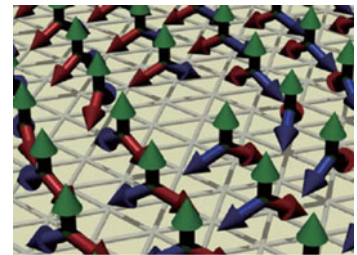
「フラストレーション」という語は、物理学分野では、様々な最適化条件が互いに競合し系がそれらを同時に満たすことが出来ないような状況を指して使われる。フラストレート系は自明な安定状態を取りにくいので、大きな揺らぎを発現したり、非フラストレート系では見られない新しいタイプの秩序や熱力学相、巨大応答を示す。

本研究では、磁性体をターゲットとする。磁性体をミクロに見ると、原子分子レベルの小さな磁石「スピン」が莫大な数集まって出来ている。通常なら、低温ではスピンは互いに同じ向きを向くか(強磁性体)、あるいは互いに逆向きを向く(反強磁性体)。しかし、3角形の頂点に反強磁性的なスピンの位置する場合には、スピンが互いに逆向きに向うとしても不可能である。このような「フラストレート磁性体」では、しばしば、スピンは平行でも反平行でもなく、互いに傾いた、いわば「曲がった」構造を取る。このようなフラストレーション誘起の曲がったスピン構造の特徴として、スピン配置に「右回り」か「左回りか」の区別が生じるという点があり(図)、このような右・左の自由度は、「カイラリティ」と呼ばれる。フラストレート磁性体では、このような「右」と「左」の状態が、お互い同じエネルギーを持っている。



フラストレーションが創る「曲がった」スピン構造には、実は多彩なバラエティがある。本基盤S研究では、このうち、「 Z_2 渦」と「スカーミオン」と呼ばれる2つのスピン構造体を取り上げる。どちらもトポロジカル安定なナノスケールの「スピントクスチャ」で、カイラリティ自由度を内包している。図に示した Z_2 渦は今から30年以上前に研究代表者らの理論研究によってフラストレート磁性体においてその存在が指摘されたものである。スカーミオンは近年極めて活発な研究が展開されているが、これら従

来型のものは右・左がエネルギー的に非等価な「反対称的スカーミオン」である。本研究で着目する「対称的スカーミオン」は、従来型とは異なった性質を持つと期待される。



本基盤S研究では、フラストレート磁性体を舞台に、カイラリティ自由度に伴う豊富な自由度を持つフラストレーション誘起のスピントクスチャの織り成す新奇な相構造やダイナミクス、輸送現象を、理論と実験の密接な連携によって明らかにする。

【研究の方法】

研究代表者らの理論予想をベースに、零磁場下および高磁場下の弾性・非弾性中性子散乱とX線散乱測定を行う。局在スピン系に対するスピンダイナミクス・シミュレーションの結果やバルク測定結果と比較検討しつつ、一連の3角格子絶縁体物質等を対象に Z_2 渦や対称的スカーミオンの存在を確立する。合わせて、金属物質も含めた新物質探索と合成を行い、輸送測定や電磁応答測定等も併用して、フラストレーション誘起のスピントクスチャが織りなす新奇物性の全貌を明らかにする。

【期待される成果と意義】

統計物理、物性物理における基盤的な学理を発展・深化させるとともに、将来のスピントロニクスにおける要素技術を導く可能性も探る。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・川村光著：「スピンと磁性 — 現代物理学のエッセンス」サイエンス社，2016.
- ・T. Okubo, S. Chung and H. Kawamura, Phys. Rev. Letters, **108**, 017206-(1-5) (2012).

【研究期間と研究経費】

平成29年度—33年度
165,300千円

【ホームページ等】

<http://thmat8.ess.sci.osaka-u.ac.jp/fstex/>

【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）



研究課題名 トポロジカル相でのバルク・エッジ対応の 多様性と普遍性：固体物理を越えて分野横断へ

筑波大学・数理物質系物理学域・教授

はつがい やすひろ
初貝 安弘

研究課題番号：17H06138 研究者番号：80218495

研究分野：数物系科学

キーワード：バルク・エッジ対応、トポロジカル相、冷却原子、放射光 ARPES、フォトニック結晶

【研究の背景・目的】

トポロジカル相の多くは直接のバルクの観測量をもたず、非自明な特徴は境界や不純物等近傍に局在する広義のエッジ状態として観測される。これが近年、固体物理を越えて多様な系において有効性が広く確認されつつある「バルク・エッジ対応」とよばれる新概念である。本研究では、トポロジカル絶縁体と冷却原子系に関する専門性の高い実験家と理論家との連携を一段と発展させ、「バルク・エッジ対応」の多様性と普遍性を追求するとともに分野をフォトニック結晶や古典力学系等にまで拡張し、より多様な対象の中に普遍的に存在する特性としての「バルク・エッジ対応」の概念の確立を目的とする。

更に「バルク・エッジ対応」を共通の興味とする工学者、数学者とも広く連携することで固体物理学、物性物理学を越えて工学や数学等既存分野にとらわれない分野横断の学理構築を長期的目標とする。

バルク・エッジ対応とは 新しい視点、新概念

理論（トポロジー）と実験事実を結びつける鍵

「端をみて中身を考える」「切らずに切った後を予言する」

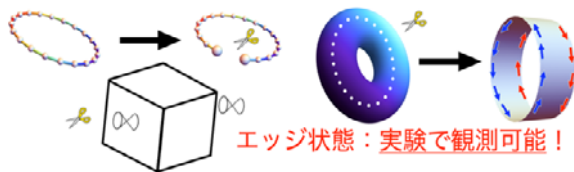


図1 バルクエッジ対応とは

【研究の方法】

「バルク・エッジ対応」を共通の言語としてそれぞれの実験家、理論家がお互いに連携しつつ交流しブレーンストーミングによる新しいブレークスルーを模索する。各分野での研究を進展させその成果の上に他分野での一段の展開を試みる。

そのために代表ならびに分担研究者は、各グループでの独創性ある研究を遂行し、その最先端の成果を持ち寄り連携研究者、関連の学生、若手研究者を含む密接な交流を目的としたインフォーマルな研究集会を定期的で開催する。このサイクルを繰り返すことで分野を越えた「バルク・エッジ対応」の多様性と普遍性の確立を目指す。

また、研究成果の公表ならびに最先端の情報収集と国際的な研究交流、更には国際性ある若手研究者の養成を目的として国際研究集会を複数回開催し、国際性ある研究活動と人材育成を行う。

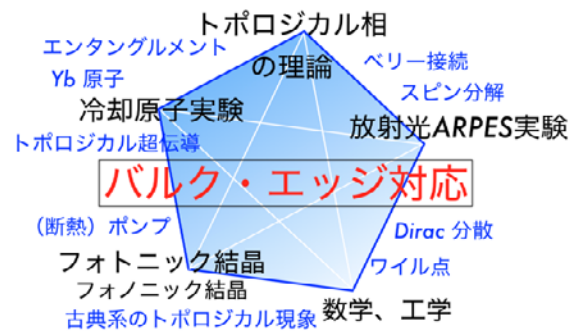


図2 研究の構想

【期待される成果と意義】

物理学における異分野交流の重要性は歴史の示すところであるが、本基盤研究でも固体物理の理論家、実験家から冷却原子実験の専門家、フォトニクスの専門家、更には数学者までが「バルク・エッジ対応」をキーワードに広く理学、工学の分野を越えて異分野交流を行うことで、各分野での個別の成果を得るのみならず分野をまたぐブレークスルーも期待でき、その意義は大きい。各領域で十分な実績をもつ専門家が「バルク・エッジ対応」という特定の概念を共通の関心として異分野交流することは、着実な進展が見込まれる一方で、お互いの相互作用により必ずしも当初からは予想できない重要な成果が得られることも十分に期待できる。それは「バルク・エッジ対応」の多様性の上に普遍性を確立するだけでなく分野を越えた学理構築の一步となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y.Hatsugai, "Chern number and edge states in the integer quantum Hall effect", Phys. Rev. Lett. **71**, 3697 (1993)
- Y.Hatsugai, "Edge states in the integer quantum Hall effect and the Riemann surface of the Bloch function", Phys. Rev. B **48**, 11851 (1993)

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度－平成 33 年度
157,800 千円

【ホームページ等】

<http://rhodia.ph.tsukuba.ac.jp/kaken-s-j.html>
hatsugai@rhodia.ph.tsukuba.ac.jp



研究課題名 次世代型アクティブセンサ搭載衛星の複合解析による
雲微物理特性・鉛直流研究

九州大学・応用力学研究所・教授 **おかもと はじめ**
岡本 創

研究課題番号：17H06139 研究者番号：10333783

研究分野：大気物理学

キーワード：気象学、地球観測、リモートセンシング、気候変動

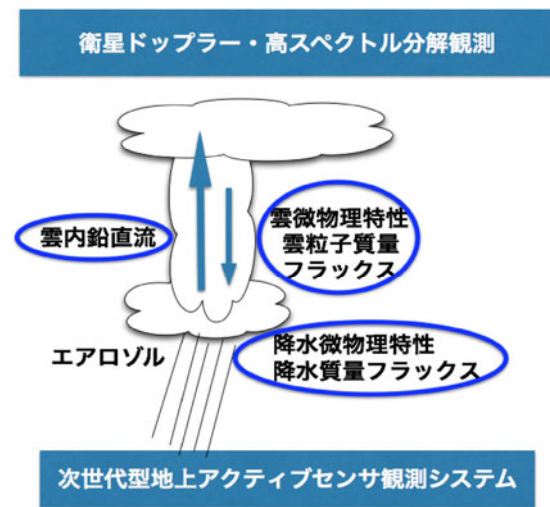
【研究の背景・目的】

雲の物理特性は、地球放射収支や水循環と密接な関係があるが、大循環モデル(GCM)を用いた雲微物理特性の再現性はモデル間で10倍以上の開きがある。また気候変動予測の不確定性の70%程度は雲が要因であるとされる。

2006年に雲レーダ搭載CloudSat衛星とライダー搭載のCALIPSO衛星による雲とエアロゾル観測が開始された。2018年以降には高スペクトル分解機能を持つドップラーライダーを搭載するADM-Aeolus衛星、ドップラー雲レーダと高分解ライダーを搭載するEarthCARE衛星の打ち上げがそれぞれ予定されている。EarthCARE衛星からは雲内部の鉛直流、雲微物理特性、雲・降水粒子の質量フラックスの抽出が、ADM-Aeolus衛星からは水平風速の鉛直分布の抽出が期待されているが、それらの抽出手法は確立していない。本課題では雲微物理・質量フラックス・鉛直流の全球分布と、水平風鉛直シア相互作用の解明を目指す。そのため、衛星観測を包含する次世代型地上観測システムの構築を行う。

【研究の方法】

本研究では、従来の地上ライダーの限界を大きく超え雲レーダとの同時検出可能な雲領域を拡大し、偏光機能を世界で初めて実現した多視野角・多重散乱偏光ライダーをベースに、新たにドップラー観測機能を持つ多重散乱・ドップラーライダーと、多重散乱型の多波長高スペクトル分解ライダーを開発する。前者では波長355nmのドップラーライダーを多重散乱化することで、雲レーダとの2波長での雲同時ドップラー観測が実現する事になる。後者の波長355nm, 532nm, 1064nmの多波長高スペクトル分解ライダーの多重散乱化からは、光学的に厚い雲域の詳細な雲粒子タイプ識別が可能となる。これら多視野角・多重散乱ライダー、多重散乱・ドップラーライダー、多重散乱・多波長高スペクトル分解ライダーとドップラー雲レーダの同時観測を実施する。高分解能で詳細な雲粒子タイプの抽出、雲とエアロゾルの微物理特性と雲内鉛直流を解析する。この次世代型地上観測によってEarthCARE衛星とADM-Aeolus衛星の観測条件を模擬し、衛星解析アルゴリズムの検証と開発を行う。さらにEarthCARE衛星解析から、水平10km以下のスケールで雲微物理特性、雲・降水粒子の質量フラックス、そして雲内鉛直流の全球解析を実施する。ADM-Aeolus衛星解析から、水平風鉛直シア、雲とエアロゾルの微物理特性の全球分布を解析する。



【期待される成果と意義】

地上と衛星ライダーに存在するスケールギャップを埋め、衛星解析技術の向上を狙う研究はこれまで例のない独自のものである。雲レーダと多重散乱・ドップラーライダーという異なる2波長で光学的に厚い雲のドップラー速度を観測可能なシステムを構築し、雲微物理特性、粒子の落下速度と大気鉛直流の同時解析を可能とする。地上と衛星解析から得られる物理量から雲パラメタリゼーションの検証と高度化を狙う。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ H. Okamoto, K. Sato, Y. Hagihara, Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: incorporation of specular reflection in lidar signals, J. Geophys. Res., 115, D22209 1-20, 2010.
- ・ H. Okamoto, K. Sato, T. Nishizawa, N. Sugimoto et al., Development of a multiple-field-of-view multiple-scattering polarization lidar: comparison with cloud radar, Opt. Express, 24, 26, 30053-30067, 2016.

【研究期間と研究経費】

平成29年度－33年度
147,900千円

【ホームページ等】

<http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/gfd/okamoto.html>
okamoto@riam.kyushu-u.ac.jp



研究課題名 宇宙プラズマ中の電磁サイクロトロン波による
電子加速散乱機構の実証的研究

京都大学・生存圏研究所・教授

おおむら よしはる
大村 善治

研究課題番号：17H06140 研究者番号：50177002

研究分野：地球惑星科学

キーワード：宇宙プラズマ・プラズマ波動、地球惑星磁気圏

【研究の背景・目的】

宇宙空間は、プラズマという電離気体で満たされており、その中には様々な電磁波動が存在している。その中でも電磁サイクロトロン波は、図1に示すように横波の電磁界が磁力線の周りに回転する螺旋構造をもっており、高エネルギーの電子とサイクロトロン共鳴することができる。磁気嵐等の磁場の擾乱を受けて地球の内部磁気圏に磁気圏尾部から数10keVの電子が注入されると図1(c)のような周波数が大きく変化するコーラス波動と呼ばれる電磁サイクロトロン波が励起されて、それが共鳴電子を極めて効率良く数MeVの相対論的エネルギーにまで加速し、地球の周りの放射線帯に供給していると考えられている。理論・シミュレーションから予測される電磁サイクロトロン波の特性と電子加速散乱機構を、複数衛星による波動と粒子の観測データから実証すると同時に、その物理の普遍性を宇宙空間の異なる領域において検証する。そこから得られる新しい物理的知見を活かして、多点同時観測を実現する次世代小型プラズマ波動粒子計測器の基礎開発も行う。

【研究の方法】

1. ジオスペース探査衛星「あらせ」の波動データを用いて、非線形成長理論に基づいて周波数変動を伴うコーラス波動のモデルを作成し、その中で多数の粒子の軌道計算を行うことで粒子分布関数の変動を表す数値グリーン関数を求める。内部磁気圏に注入される電子の分布関数とグリーン関数との畳み込み積分から放射線帯の形成過程を再現できる。

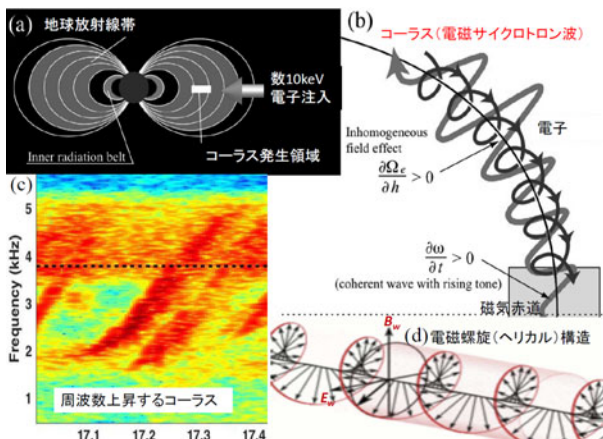


図1 電磁サイクロトロン波

2. 磁気圏の磁気リコネクション領域を探索するMMS衛星によるプラズマ波動および粒子の観測によって、空間的に螺旋構造をもつ電磁サイクロトロン波を検出し、その時空間の解析から波の伝搬方向、成長、減衰の詳細な変動を検出する。

3. プラズマ波動観測器は、アナログ回路とデジタル回路を統合したアナログデジタル混載型ワンチップの実現に取り組む。粒子観測装置は、検出器を含む解析部の小型軽量化が課題である。小型化すると、粒子の入射面積が減るため感度が下がる。小型軽量アナライザーを面方向に必要な数だけ敷き詰めたものが、最小のアナライザーとなる。これらの部品を重ねていくことで必要な感度を確保する。数値実験・衛星探査の結果から次期衛星の観測要求仕様を求め、機器の性能バランスに反映させる。

【期待される成果と意義】

多領域宇宙探査のデータおよび、これまでの電磁サイクロトロン波動の数値実験の結果を用いてプラズマ波動粒子相互作用を再現することにより、無衝突プラズマエネルギー授受機構を解明することが期待できる。並行して本研究で実証される物理機構の知見を活かしてプラズマ波動・粒子計測機器の新機能の開発と小型化・高性能化を進め、次期国際共同観測ミッションへの観測提案を行うことができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Omura, Y., Y. Miyashita, M. Yoshikawa 他, (2015), Formation process of relativistic electron flux through interaction with chorus emissions in the Earth's inner magnetosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 9545-9562, 2015.
- Foster, J. C., P. J. Erickson, Y. Omura 他, Van Allen Probes observations of prompt MeV radiation belt electron acceleration in nonlinear interactions with VLF chorus, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 324-339, 2017.

【研究期間と研究経費】

平成29年度－33年度
133,700千円

【ホームページ等】

<http://pcwave.rish.kyoto-u.ac.jp/>
omura@rish.kyoto-u.ac.jp



研究課題名 フェムト秒時間分解 X 線溶液散乱による分子構造の
超高速ダイナミクス of 直接観測

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

あだち しんいち
足立 伸一

研究課題番号：17H06141 研究者番号：60260220

研究分野：放射光科学、物理化学

キーワード：超高速ダイナミクス、構造科学

【研究の背景・目的】

「百聞は一見に如かず」の言葉の通り、溶液化学反応中の分子構造変化を実験的に直接観測することは、化学者の夢である。本研究課題では、この化学者の夢の実現を目指して、新しい時間分解 X 線計測法と解析手法を開拓する。

これまで溶液中の超高速化学反応の計測には、主に赤外から紫外域における時間分解分光法が用いられてきたが、これらの時間分解分光法は価電子帯の電子状態や分子振動に関する情報を与える一方で、分子構造に関しては間接的な情報を与えるのに限定される。液相の分子構造に関する直接的な情報を与える最も有力な測定法は、分子内の結合長と同程度の波長を有する X 線による回折・散乱現象を利用した時間分解測定法である。本研究課題では、フェムト秒～ピコ秒オーダーの時間分解 X 線溶液散乱法を用いることにより、液相の超高速な分子構造変化を直接観測する。

【研究の方法】

これまで液相の超高速化学反応計測において、多くの場合、赤外から紫外光が使用され、X 線が使われていなかったのは、計測に適したパルス X 線光源が実在しなかったことによる。しかしながら近年、フェムト秒オーダーの極短パルス幅を有する X 線を発生させる X 線自由電子レーザー (X-ray Free Electron Laser, XFEL) が日本、米国を始めとする

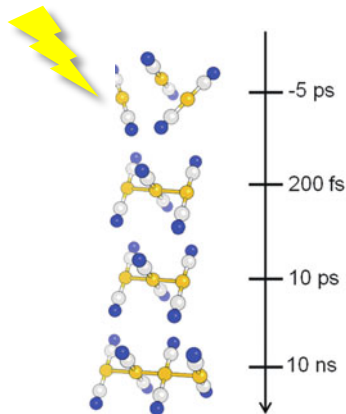


図 1：シアノ金錯体の光反応に伴う分子構造変化

世界各地で建設され、X 線領域での干渉性や短パルス特性を活かした先端研究が急速に発展している。本申請は、従来の蓄積リング放射光源から得られるピコ秒 X 線と、XFEL 施設から得られるフェムト秒 X 線を相補的に活用して、液相での化学反応におけるコヒーレントな分子振動から分子構造変化まで、X 線散乱法により直接観測することを目指すものである。これまでに我々は、シアノ金錯体 ($\text{Au}(\text{CN})_2^-$) の水溶液系において、光励起後に金原子間に結合が形成する過程を時間分解能 0.5 ピコ秒で観測することに世界で初めて成功した (図 1)。このシアノ金錯体の時間分解 X 線溶液散乱の研究成果が、本申請の全体構想の出発点となっている。

【期待される成果と意義】

時間分解 X 線溶液散乱法は、分子構造に関する直接的な情報を与える手法であるという点で、他の時間分解分光法と相補的であると同時に、極めてユニークな測定手法である。この実験手法を広く液相の光化学反応に適用することにより、基礎化学における計測のための新たな基盤技術を創出し、「液相における超高速分子構造科学」の新分野創成を牽引する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

"Direct observation of bond formation in solution with femtosecond X-ray scattering"

Kim, Kim, Nozawa, Sato, Ihee, & Adachi *et al.*
Nature, 518, 385-389 (2015).

"Synchrotron-Based Time-Resolved X-ray Solution Scattering (Liquidography)"

S. Adachi, J. Kim, & H. Ihee

Advances in Lasers and Electro Optics, Nelson Costa and Adolfo Cartaxo Ed., (2010) ISBN: 978-953-307-088-9, INTECH.

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度～33 年度
154,400 千円

【ホームページ等】

<http://www2.kek.jp/imss/pf/shinichi.adachi@kek.jp>



研究課題名 明日をひらく基質支配の化学反応開発

中部大学・総合工学研究所・教授 やまもと ひさし
山本 尚

研究課題番号：17H06142 研究者番号：20026298
研究分野：基礎化学、有機化学
キーワード：基質支配の化学反応

【研究の背景・目的】

有機合成は歴史的には古く反応剤支配の化学反応から始まった。基質支配の化学反応は必ずしも十分には開発されていなかった。本研究では基質の官能基を起点として、様々な位置に立体選択的な革新的反応を開発する。

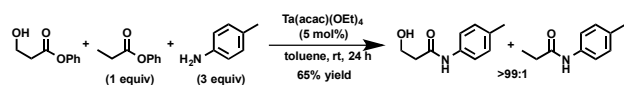
これら触媒の一般化に成功すれば、これによって得られる新触媒は、古典的有機合成化学を一変させる。即ち、化合物構築に於いて、並列に炭素-炭素骨格を結びつける合成ではなく、骨格の所望の位置に自在に官能基を選択的に導入する新たな手法を提供し、これによって飛躍的な合成工程の短縮化を実現する。言い換えれば、提案する触媒設計の概念は、従来の単機能型触媒反応ではなく、その分子の所望の位置での自在の官能基化を可能にし、結果的には、酵素を模倣・再現する人工触媒を創生する。

【研究の方法】

「基質支配の化学反応」とは、アンカーに水酸基、エーテル基、アミノ基、カルボニル基等を用い、遠隔位のカルボニル基、二重結合やC-H基を自在に官能基化する化学反応である。具体的には、基質支配の化学反応でアンカー基から離れた位置の、連続不斉中心を思い通りの立体化学で自在に発生させる。特に、ラジカル反応、アミド化反応、エステル化反応、C-C結合生成反応やC-H活性化反応を実現する。本研究で、古典的反応では位置の制御ができない反応を、位置と立体化学の双方が満足する触媒的不斉合成反応を実現させ、有機合成に「基質支配の化学反応」という新研究分野を開く。

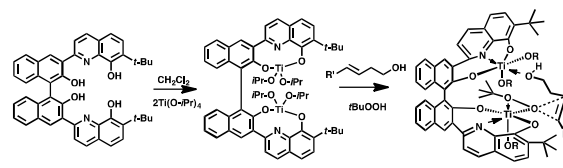
【期待される成果と意義】

水酸基の配向基効果がTa触媒により、ベータ・ヒドロキシカルボン酸エステルのアミド化反応を促進することを利用し、一般的新ペプチド合成法に着手する。オキシム・エステルの水酸基の配向効果を用いた金属触媒によるアミド化反応と、続く触媒的水素化反応により、ジペプチドを得る。



さらに一般的に、基質の水酸基を起点とし、その周辺に存在するエステル基のアミド化反応、リン酸エステルのエステル化反応、さらには5-9 Åの位置に存在するsp³炭素の活性化によるハロゲン化反応、

水酸基導入反応、アミノ基導入反応、炭素-炭素結合合成反応等を検討する。本研究は複数の独立した金属を触媒内に持ち、それぞれの金属が互いに影響することなく、基質が金属間のキラルな空間に填まるように設計する。ここでは、新たな不斉対象軸を持つ配位子設計に着手する。具体的には、下図のように光学活性ビナフトールの3,3'位に金属を取り囲む配位グループを結合させる。ここでは、8-ヒドロキシキノリンを用いる。金属種によってはオルソフェナンスロリン等各種ヘテロ環、各種アミド、3級アルコール等を用いる。



さらには、上下に異なる配位子を備える触媒を設計して、上部には典型金属を下部には遷移金属を配することで、様々な遷移金属に固有の反応を水酸基から一定の場所で進行させることを試みる。

以上の研究により、古典的な「反応剤支配の化学反応」では達成できなかった「分子を真に位置と立体化学を制御して自在に合成する」という今世紀の合成化学者に課せられた使命に応える。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

Tsuji, H.; Yamamoto, H., Hydroxy-Directed Amidation of Carboxylic Acid Esters Using a Tantalum Alkoxide Catalyst, *J. Am. Chem. Soc.*, 138, 14218-14221, 2016
Bhadra, S.; Akakura, M.; Yamamoto, H., Design of a New Bimetallic Catalyst for Asymmetric Epoxidation and Sulfoxidation, *J. Am. Chem. Soc.*, 137, 15612-15615, 2015

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
159,200千円

【ホームページ等】

https://www3.chubu.ac.jp/catalyst/member/hisashi_yamamoto/



研究課題名 二酸化炭素資源化反応の新展開

東京工業大学・理学院・教授

いwasawa のぶはる
岩澤 伸治

研究課題番号：17H06143 研究者番号：40168563

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】

二酸化炭素を一炭素源として有効利用する手法の開発は、反応性の低い二酸化炭素の効率的活性化という基礎科学的な側面からのみならず、現在我々が直面する炭素資源問題とも関連する極めて重要な研究課題である。本研究は申請者が先導的に研究開発を行っている炭素-炭素結合の生成を伴いつつ二酸化炭素を有機化合物へ取り込む触媒反応開発に関するこれまでの成果を踏まえ、その拡大と深化、そして新たな展開を目指してこれをさらに強力に、かつ多面的に推進し、二酸化炭素を炭素資源として利用する新手法を開発することを目的とする。具体的には、独創的な金属錯体の創出を鍵として、1) 不飽和炭化水素のヒドロカルボキシル化反応、2) 炭素-水素結合活性化を契機とするカルボキシル化反応、3) アルケンと二酸化炭素の酸化的環化・β水素脱離を利用する触媒的不飽和カルボン酸合成、4) 光エネルギーを駆動力として利用する反応、5) 新概念に基づく二酸化炭素固定化反応等の実現を目指す。

【研究の方法】

本研究の目的を達成するための基本的なアプローチとして、特に金属-金属間相互作用や金属錯体間の協働作用に着目して、独自のさまざまな機能性遷移金属錯体を設計・合成し、これを用いて二酸化炭素を効率良く有機分子中に取り込むことのできる優れた触媒反応の開発を目指す。その際、可視光エネルギーの利用を積極的に推進する。具体的には、多様なピンサー錯体の合成法の確立と、これを用いた

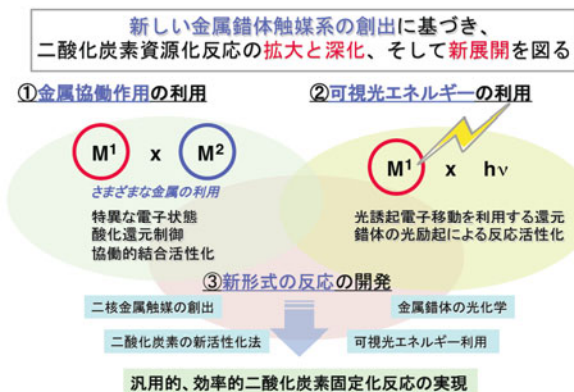


図1 本研究の目的と方法

さまざまな基質に適用可能な効率的ヒドロカルボキシル化反応や炭素-水素結合の直接カルボキシル化反応の実現、メタラクトンを鍵中間体とする効率的な触媒反応の開発、光励起された電子の還元力を利用する触媒系の構築や光励起状態を活性種として利用する反応の開発、さらには有用カルボン酸の合成を可能とする新しい反応形式の二酸化炭素固定化反応の実現を目指す。

【期待される成果と意義】

本研究により、入手容易な炭化水素類を基質とし原子効率の高い無駄のない反応を実現すること、また、金属錯体の高機能化によりこれらを汎用的かつ高効率な反応へと展開することで、実用的な二酸化炭素固定化反応の開発が期待できる。本研究課題として掲げた目的を達成することができれば、基礎科学の立場からは、①不活性な二酸化炭素の効率的な活性化法の実現、②新たな高機能性遷移金属錯体の創製、③錯体の光化学の新展開、の三つの観点からその研究意義は極めて大きい。また現在の我々が直面する資源問題にいかに関わり組むかという社会的な要請からも、二酸化炭素の有効利用法を新たな視点で実現することに大きな意義がある。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Mechanistic Study of the Rhodium-Catalyzed Carboxylation of Simple Aromatic Compounds with Carbon Dioxide, T. Suga, T. Saitou, J. Takaya and N. Iwasawa, *Chem. Sci.*, **8**, 1454-1462 (2017).
- Construction of a Visible Light-Driven Hydrocarboxylation Cycle of Alkenes by the Combined Use of Rh(I) and Photoredox Catalysts, K. Murata, N. Numasawa, K. Shimomaki, J. Takaya, N. Iwasawa, *Chem. Commun.*, **53**, 3098-3101 (2017).

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度 - 33 年度
161,300 千円

【ホームページ等】

<http://www.chemistry.titech.ac.jp/~iwasawa/index.html>
niwasawa@chem.titech.ac.jp



研究課題名 犠牲結合原理が導く戦略：金属を凌駕するソフト・ハード複合強靱材料の創製と機能開拓

北海道大学・大学院先端生命科学研究院・教授

ぐん ちえんびん
ゲン 剣萍

研究課題番号：17H06144 研究者番号：20250417

研究分野：高分子科学

キーワード：複合材料、高分子材料、ソフトマター、ゲル、高強度

【研究の背景・目的】

申請者らはこれまでに、ゲル、エラストマーなどのソフト材料を格段に強靱化出来る「犠牲結合原理」を発見し、本原理を基に多様な強靱ソフト材料を創製している。例えば、90%もの水を含んでいながら工業用ゴム並みに強靱なダブルネットワークゲルを開発している。一方、異種の材料を組み合わせ得られる複合材料は両材料の優れた特性を併せ持ち、例えば軽量・高強度な繊維強化プラスチックなどとして社会で広く使われている。

申請者らは近年、上記の強靱ソフト材料を一般的なハード材料と複合させると、両者の性質の相乗効果による犠牲結合原理の発現により、極めて強靱なソフト/ハード複合材料が創製されることを見出した。そこで本研究では、「犠牲結合原理」をソフトマターとハードマターとの複合材料に拡張し、金属、繊維強化プラスチックなどの既存のハード高靱性材料を凌駕した破壊耐性を有する「世界最強のソフト/ハード複合材料」を創製する。またその強靱化メカニズムを理解、一般化し、ソフト/ハード複合材料に関する学理を構築する。

【研究の方法】

強靱なソフト/ハード複合材料を、以下の2通りの方法で開発する。1. ソフト相を犠牲結合とする場合：犠牲結合原理に基づく強靱なソフト材料を、ハード材料である繊維、金属などの構造体と複合させる。2. ハード相を犠牲結合とする場合：ハード材料から構築された脆い網目構造を、強靱なソフト材料と複合させる。

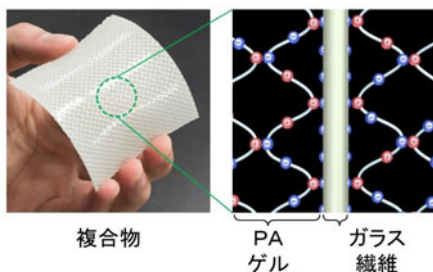


図1 ソフト相を犠牲結合とするソフト/ハード複合材料のプロトタイプ

犠牲結合原理によると、高靱性材料の力学挙動には三つの特徴がある。それは、引張試験で見られる応力降伏現象、弾性率の低下を伴う力学的ヒステリ

シス現象、および引裂試験で見られる亀裂周辺の降伏領域(内部破壊領域)の形成である。この三つの特徴を評価することによってソフト/ハード複合材料の靱性及びその高靱性化機構を解明する。

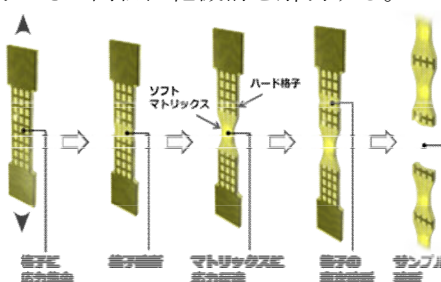


図2 ハード相を犠牲結合とするソフト/ハード複合材料の設計

【期待される成果と意義】

従来のハード複合材料の研究は、主に各成分の微小変形下における弾性率に注目して展開されている。本研究の特色と独創的な点は、ソフト/ハード複合材料の場合、弾性率の検討のみでは不十分で、大変形時の犠牲結合効果によるエネルギー散逸こそが複合材料の強靱化に重要であると着目したところにある。大変形、非線形、緩和などの効果を考慮に入れたソフト/ハード複合材料の研究は、殆ど未開拓な領域である。「犠牲結合による高靱性原理」を複合材料でも展開できれば、強度と靱性の両方において、既存のハード系複合材料を超える高分子複合材料を創製する可能性があり、材料イノベーションに繋がる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Huang, D. R. King, T. L. Sun, T. Nonoyama, T. Kurokawa, T. Nakajima, J. P. Gong, *Adv. Funct. Mater.*, 27(9), 1605350 (2017).
- D. R. King, T. L. Sun, Y. Huang, T. Kurokawa, T. Nonoyama, A. J. Crosby, J. P. Gong, *Mater. Horiz.*, 2(6), 584-591 (2015).

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度～33 年度
157,000 千円

【ホームページ等】

http://altair.sci.hokudai.ac.jp/g2/p_gong@sci.hokudai.ac.jp



研究課題名 超イオン導電体の創出

東京工業大学・物質理工学院・教授 かのの りょうじ
菅野 了次

研究課題番号：17H06145 研究者番号：90135426

研究分野：固体イオニクス、無機固体化学

キーワード：超イオン導電体、電気化学デバイス、中性子、放射光

【研究の背景・目的】

固体中をイオンが高速で拡散するイオン伝導体は電池への応用が期待されているが、物質開拓は遅れている。イオン伝導体さえ存在すれば実現できるエネルギーデバイスも多い。リチウムやナトリウム系では大容量・高出力電池が可能になり(図1)、酸素やプロトン系は燃料電池の高効率作動を可能にする。ヒドリドのような未開拓の材料では、全く新たなサイエンスとともに新規なデバイスの可能性が広がる。本研究では、未来の電気化学エネルギー変換・貯蔵デバイスの開発の鍵を握る超イオン伝導体において、最高のリチウムおよびヒドリド伝導を示す新物質を創り出す。

1. 開拓する物質系:(i)バルク材料：広範な組成領域で探索を行い、新物質発見をめざす。(ii)ナノ界面材料：電気化学ナノ界面で超イオン伝導を示す物質を開拓する。

2. 目標:新物質探索を成功に導くために、(i)元素置換による物質探索、(ii)相関係図に基づく系統合成、(iii)計算化学の手法を用い、効率的に多元系の物質探索を行なう。

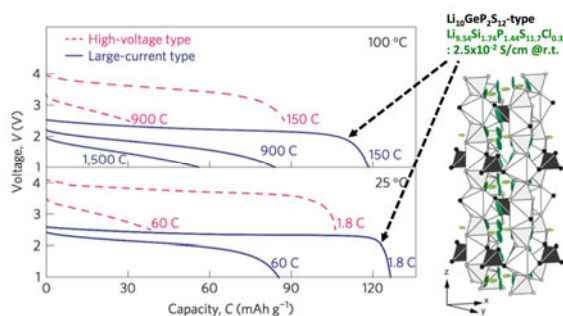


図1 Li超イオン導電体 $\text{Li}_{9.5}\text{Si}_{1.74}\text{P}_{1.44}\text{S}_{11.7}\text{Cl}_{0.3}$ を用いた全固体リチウム電池の充放電性能

【研究の方法】

バルク超イオン伝導体開発：リチウム系、ヒドリド系で物質探索を行う。通常合成に加え極端条件下の合成(高圧力下)で、相関係図作成と物質探索を行う。

ナノ領域超イオン伝導体開発：真空下での単結晶膜合成(PLD法)によりヘテロ界面を作成し、空間電荷層の制御を行い、イオン拡散に適したヘテロ界面を構築する。

系統的合成手法の構築：物質合成化学主導の計算

科学手法導入により、系統的合成を実施する。評価、デバイス構築、探索指針確立：物性評価、デバイス特性の基礎評価を行う。

【期待される成果と意義】

新物質のインパクト：新物質のインパクトは強烈である。しかし新物質の発見には、物質合成の基本が重要であり、新物質合成の指針が必要である。優れた新物質が発見できれば、社会への影響は大きい。

既存の開発手法から新規手法への探索法の確立：物質開拓の経験と知識に基づいた手法は、長い歴史があり多くの物質を生み出してきた。一方で、その限界が近づいていることも示されてきた。物質科学の進展のために既存の物質創成の手法を完成させ、物質合成の知識を集積し、新規な計算・情報科学手法との融合を図るための道筋をつけることは、合成化学者の課題である。物質開拓の古典的な知を集積し集大成を目指し、その最先端と限界を示すとともに、新しい物質開拓につなげることは意義がある。

ナノ領域のイオン伝導の確立：理想界面の作成手法を導入して、系統的にイオン伝導の向上する現象を調べ実際の物質開拓につなげる。ナノ界面での高イオン伝導状態の出現は、新たなイオン伝導体設計手法を生み出すとともに、既存の電池の電気化学界面の設計にも展開できる。

イオン伝導種の展開：基本的に普遍的な概念に基づく上記の物質開拓に加え、個々のイオン伝導種の物質には特有の物質開発手法がある。本研究では、エネルギー変換デバイスに直結し、かつ拡散が容易な一価のイオン種であるリチウムとヒドリドで物質開発を開始する。特に未知の研究領域であるヒドリド伝導体の可能性が広がれば、新たな科学に発展する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- *Nat Mater*, **10**, 682-686 (2011).
- *Nature Energy*, **1**, 16030 (2016).
- *Science*, **351**, 1314-1317 (2016).

【研究期間と研究経費】

平成29年度-32年度
129,500千円

【ホームページ等】

<http://www.kanno.chem.titech.ac.jp>

【基盤研究(S)】

理工系 (工学)



研究課題名 革新的応力場制御による高秩序ナノ空間構造体の創製と展開

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

じゅ やん
巨 陽

研究課題番号：17H06146 研究者番号：60312609

研究分野：機械材料・材料力学、ナノ材料工学

キーワード：ナノ材料・創製プロセス、ナノ粒子・ワイヤー・シート、ナノマイクロ材料力学

【研究の背景・目的】

ナノセンサ、ナノデバイスを構成するナノ構造体の高秩序・高品質の作製は困難とされている。本研究は、革新的な応力集中および酸化プロセス制御手法を構築することにより、高密度単結晶金属ナノワイヤレイおよび半導体ナノフラワー配列の創製を実現する。さらに、応力場における原子の拡散および表面酸化現象を明らかにすることにより、ナノ空間構造体の生成メカニズムを系統的に解明する。最終的に、応力集中および酸化制御手法を確立することにより、ナノ空間構造体の形状、寸法、空間位置の高度制御を実現し、高透過率かつ高導電性を有するフレキシブル透明導電膜、および低コストかつ高変換効率を有する太陽光水素製造デバイスの創製を実現する。

【研究の方法】

金属原子の拡散速度および表面酸化膜の形成速度を統合的に制御し、構造体成長過程における原子配列および分子形成の制御を実現することにより、形状、寸法、位置の制御を可能にする高秩序、高品質、高密度、金属・半導体ナノ空間構造体の作製を行う(図1、図2)。また、材料の熱膨張と酸化膜の体積膨張に起因する応力勾配や原子の密度が原子拡散速度に及ぼす影響、温度、湿度、触媒が材料の表面酸化膜の形成速度に及ぼす影響、そして材料表面の応力状態、結晶構造、原子密度がナノ構造体の形成に及ぼす影響の解明を行う。さらに、独創的な応力集中誘導手法を確立し、ナノワイヤレイの形状、寸法、密度の高度制御を実現し、最適な導電性ネットワークを有する大面積の単結晶金属ナノワイヤレイを形成することにより、高透過率かつ高導電率を有するフレキシブル透明導電膜を創製する。一方、独創的な応力酸化誘導法を確立し、ナノフラワーの

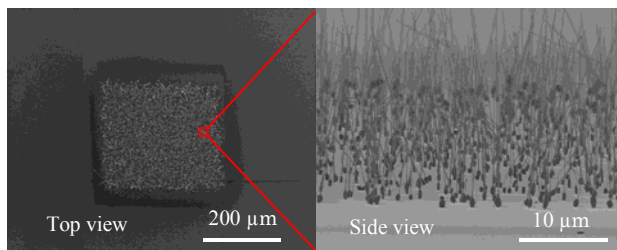


図1 高密度 Al ナノワイヤ

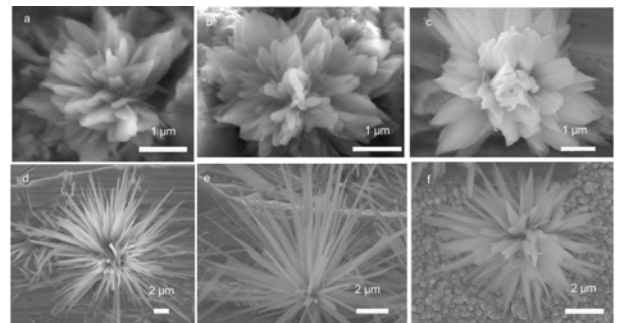


図2 異なる形態の Cu₂O ナノフラワー

形状、寸法、空間位置の高度制御を実現し、最適な空間間隙を有する大面積の3次元半導体ナノフラワー配列を形成することにより、低コストかつ高変換効率を有する太陽光水素製造デバイスを構築する。

【期待される成果と意義】

本研究で計画しているナノ空間構造体の形状、寸法、空間位置の高度制御が実現できれば、高透過率の金属ナノワイヤネットワークの創製が可能となり、低コストかつ高強度なフレキシブル透明導電膜を実現することにより、太陽電池や有機 EL ディスプレイなどへの応用が期待できる。また、太陽光水分解に最適なエネルギーバンドギャップを有する半導体ナノ空間構造体の開発が可能となり、現在の太陽光水素製造のコスト、分解効率の問題を一挙に解決し、大きな社会貢献をもたらすことができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- L. Hu, Y. Ju, M. Chen, A. Hosoi, S. Arai, Growth of Cu₂O Flower/Grass-like Nano Architectures and their Photovoltaic Effects, Applied Surface Science, 305, 710-715, 2014.
- Chen Y. Yue, and Y. Ju, Growth of Metal and Metal Oxide Nanowires Driven by the Stress-induced Migration, Journal of Applied Physics, 111, 104305-1-6, 2012.

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度－33 年度
161,000 千円

【ホームページ等】

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/ju/index.html>



研究課題名 効率 99.9%級のエネルギー変換が拓く
持続的発展可能グリーン社会の実現

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 かわむら あつお
河村 篤男

研究課題番号： 17H06147 研究者番号： 80186139
研究分野： 電気電子工学
キーワード： 電力変換、高効率インバータ

【研究の背景・目的】

持続可能な産業の発展を促すための重要な基礎となる技術の1つは、省エネルギー化を推し進め、再生可能エネルギーの利用を促進するための電気エネルギーの超高効率電力変換である。

本研究では、5kW級の電力変換器(インバータ)において、変換効率99.9%に近い効率が実現可能であることを実証し、それを用いて電力配電ネットワークに分散電源を自由に配置できることを実証することを目標とする。

第一段階では、効率99.9%級の単相インバータ、第二段階では、効率99.9%級の三相インバータの実現を実証する。第三段階では、このインバータを用いて太陽光発電システムの高速潮流制御が可能であることを示す。第四段階では、このインバータを用いて低圧系の複数の分散電源(電気自動車バッテリー(V2G)、太陽光発電システム)の高効率連携運転を実証し、超高効率インバータで連系したマイクログリッドが、省エネかつ安定に電圧制御が可能であることを実証する。そして、最終段階では、この5年間の成果に基づき、再生可能エネルギーなど時間変動の大きいエネルギーの有効利用のための電気エネルギー配電網の改革の指針と手法を提案する。

【研究の方法】

本研究では、電力配電網において自由なエネルギー移動を可能とするための効率99.9%級の電力変換器の実現とその運用に関して、研究目的を5つの具体的な研究計画に分類し、逐次推進する。特に、一番の核となる99.9%級のインバータは、図1に示されるように、部分電力変換の原理に基づく超高効率チョップと、高効率折り返し回路から構成される。前者はスイッチング損失を最小化し、後者は導通損失を最小化する。さらに、このインバータの高速制御を実現することにより、太陽光発電などの時間変

動の大きい再生可能エネルギーの有効利用や電気自動車用バッテリーの充放電を効率良く行うことにより、新しい電力配電網の構成を実現する。

【期待される成果と意義】

再生可能エネルギーは本質的に短時間での変動が大きいので、安定運用のための対応策が求められている。効率99.9%に近い数kWレベルのインバータの実現は、配電系の末端あるいは家庭内において、エネルギーの制御が高効率かつ高速に行えることを意味しており、このような変換器が普及すれば、再生可能エネルギーによる電力網の電圧変動問題などは解決される。この技術の応用分野は多岐にわたり、現在の交流電力配電網を革新的に変化させる可能性が高い。その結果、持続的発展可能グリーン社会の実現の基礎技術となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- (1) K. Aoyama, N. Motoi, Y. Tsuruta, A. Kawamura, "High Efficient Energy Conversion System for the Decrease in the Battery Terminal Voltage of Electric Vehicles", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.5, No.1, pp.12-19, 2016
- (2) Y. Hosoyamada, M. Takeda, T. Nozaki, A. Kawamura, "High Efficiency Series Chopper Power Train for Electric Vehicles Using a Motor Test Bench", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.4, No.4, pp.460-468, 2015

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
138,000千円

【ホームページ等】

<http://www.kawalab.dnj.ynu.ac.jp/>

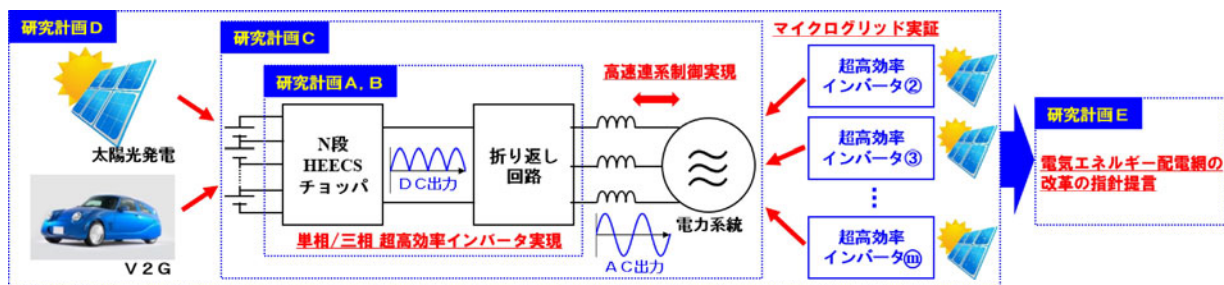


図1 提案するシステム構成と研究計画



研究課題名 layer transfer による高移動度材料 3次元集積 CMOS の精密構造制御

東京大学・大学院工学系研究科・教授 **たかぎ しんいち**
高木 信一

研究課題番号：17H06148 研究者番号：30372402
研究分野：電気電子材料工学
キーワード：MOSFET、ゲルマニウム、III-V 族半導体

【研究の背景・目的】

近年、集積回路に用いられる CMOS の微細化の物理限界はより明白となり、集積度の向上と性能向上の両立は極めて難しくなっている。この観点から、性能を損ねずに集積度を高める方法として、CMOS を 3 次元的に積層していくことが検討されている。本研究では、図 1 に一例を示すような、将来の微細 CMOS 構造として極めて有望な高移動度チャンネル材料による 3次元集積 CMOS を実現するために必要な(1) layer transfer によるチャンネル形成技術、(2) ソースドレイン (S/D) 形成と 3次元コネクティビティ技術、(3) MOS 界面制御技術 の手法と学理を創出し、ナノメートルレベルでの精密構造制御手法を確立することにより、3次元集積 CMOS の動作を実現すると共に、将来世代の微細 CMOS 適用のための道筋を明らかにする。

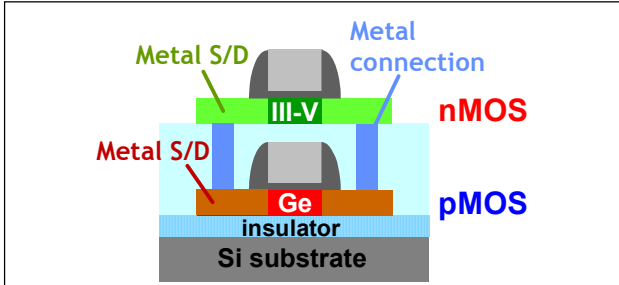


図 1 3次元集積 CMOS の一例

【研究の方法】

上記の要素技術を確認し、集積構造として組み合わせることで、3次元集積 CMOS を実証してその有用性を明確化する。具体的な内容を以下に示す。

(1) layer transfer によるチャンネル形成技術
極薄、高平坦性かつ結晶性に優れた GOI 層/III-V-OI 層を、smart cut 法や epitaxial lift-off 法などの手法を最適化することにより実現すると共に、極薄半導体チャンネルの電子物性を包括的に明らかにする。

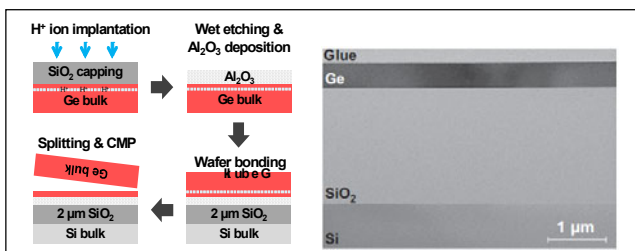


図 2 Smart cut 法による貼り合せ GOI 作製方法と作製された GOI 構造の一例

(2) 低温ソースドレイン (S/D) 形成と 3次元 CMOS コネクティビティ技術

極薄 Ge/III-V チャンネルに対し、低温形成でき制御性の高いメタル S/D 材料・プロセスを見出し、メタル SD/反転層界面抵抗を極小化すると共に、多層チャンネル SD のコネクティビティ技術を創出する。

(3) 高品質 MOS 界面形成技術

GOI/III-V-OI MOS 界面欠陥を最小化し高移動度が実現できる MOS 界面制御技術を確立し、その体系化を行う。

【期待される成果と意義】

- ・将来世代において極めて有望な 3次元集積 III-V/Ge CMOS 構造の実現に向けて、精密かつ最適な構造形成技術・構造制御技術を、その基礎学理の確立を通して実現することを目指す。
- ・ナノサイズの 3次元的なコンタクトや異種材料の界面の物性を学術的に明確化する。
- ・CMOS 性能向上や実証のみならず、将来の 3次元的なデバイス設計を可能とする異種材料転写技術の高度化と多様化に向けた展開を視野にいれ、その応用可能性を広げる。
- ・III-V/Ge CMOS 技術としてこれまで培われてきた要素技術を将来の素子実現に向けて集大成し、その基礎物性から製造技術・素子設計技術まで、包括的な体系化を目指す。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ S. Takagi et al., “III-V/Ge Channel MOS Device Technologies in Nano CMOS era”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 54, 06FA01 (2015)
- ・ T. Irisawa, T. Maeda et al., “Demonstration of Ultimate CMOS based on 3D Stacked InGaAs-OI/SGOI Wire Channel MOSFETs with Independent Back Gate”, 2014 Symposium on VLSI Technology, 146 (2014)

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度－33 年度
158,900 千円

【ホームページ等】

[http:// www.mosfet.k.u-tokyo.ac.jp/](http://www.mosfet.k.u-tokyo.ac.jp/)



研究課題名 拍動する心筋細胞シートを用いた伸縮性多点電極
アレイによる薬物反応の評価

東京大学・大学院工学系研究科・教授 **そめや たかお**
染谷 隆夫

研究課題番号：17H06149 研究者番号：90292755
研究分野：電気電子工学
キーワード：電子デバイス・集積回路

【研究の背景・目的】

近年、伸縮性のある柔らかい電子素材を活用することによって、生体と親和性の高いエレクトロニクス(伸縮性エレクトロニクス)を実現しようとする動きが活発になっている。筆者らは、最近、厚さ1マイクロメートルの極薄高分子フィルム上に高性能な有機デバイスを実現することに成功した。極薄フィルムは、生体のように複雑な表面の形状に追従して貼り付けることができる。実際に、このデバイスを動物の心臓、肺、皮膚など複雑な形状をした生体表面に装着して、生体情報をモニターした。本研究では、これまでの成果を発展させ、心筋細胞を用いた伸縮性多点電極アレイによる薬物反応の評価に応用することを目的としている。

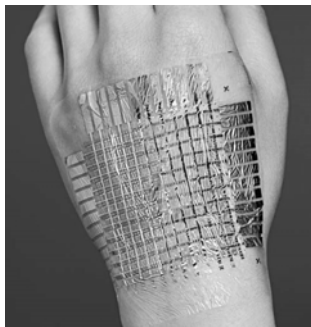


図1 有機センサー

【研究の方法】

これまでに極薄の高分子フィルム、ゴムシート、布地をはじめとする様々な柔らかい素材の上に高度な伸縮性電子部品を製造する技術が確立されてきた。本研究では、これらの技術に改善を加え、柔らかさを維持した上で、伸縮性デバイスの耐久性を向上する。基本的に、柔らかくて計測時に生体への負荷がないという条件は、耐久性とトレードオフの関係にある。そこで、材料に検討を加え、柔らかさを維持しつつ、定量的に耐久性を評価する。まず、伸縮性デバイスの伸長試験や屈曲試験を繰り返し行い、伸縮性と耐久性を定量的に評価する。特に、材料そのものに検討を加えると同時に、製造プロセスの視点からも改良を加えて耐久性を上げていく。その後、心筋細胞に対する電氣的計測を進め、生体信号の質を高めていく。

【期待される成果と意義】

本研究では、生体と伸縮性エレクトロニクスが接触するバイオインターフェースの学理を構築する。柔らかさによって生体との親和性が格段に向上されたバイオインターフェースでは、長期間に渡って安定して生体信号が計測できると期待される。この高い安定性と信頼性を強みとして研究を推進することによって、バイオインターフェースにおいて電子・イオン・化学物質など多様な媒体による生体信号を高効率にエレクトロニクスの電気信号に変換する手法が確立され、バイオエレクトロニクスならびにその薬物反応評価への応用に大きな発展が期待される。

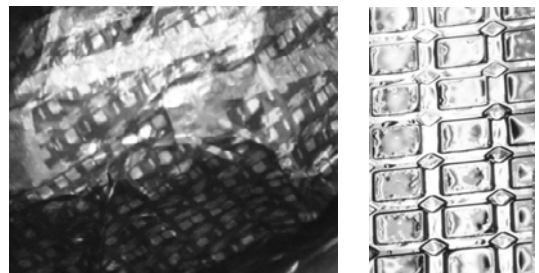


図2 拍動するラットの心臓に貼り付けた有機デバイス

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Sungwon Lee, Amir Reuveny, Jonathan Reeder, Sunghoon Lee, Hanbit Jin, Qihan Liu, Tomoyuki Yokota, Tsuyoshi Sekitani, Takashi Isoyama, Yusuke Abe, Zhigang Suo and Takao Someya, Nature Nanotechnology, vol. 11, pp.472-478 (2016).
- Martin Kaltenbrunner, Tsuyoshi Sekitani, Jonathan Reeder, Tomoyuki Yokota, Kazunori Kuribara, Takeyoshi Tokuhara, Michael Drack, Reinhard Schwodiauer, Ingrid Graz, Simona Bauer-Gogonea, Siegfried Bauer, and Takao Someya, Nature, vol. 499, pp.458-463 (2013).

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
157,100千円

【ホームページ等】

<http://www.ntech.t.u-tokyo.ac.jp/>
someya-sec@ee.t.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 昆虫のゾンビ化から紐解く生物の多様な振る舞いの源泉

大阪大学・大学院工学研究科・教授 おおすか こういち
大須賀 公一

研究課題番号：17H06150 研究者番号：50191937

研究分野：制御工学、生物学

キーワード：振る舞いの多様性、ゾンビ化、陰的制御、制御構造、脳・身体・場、ミニマルセット

【研究の背景・目的】

生物は、単純な脳神経系しかもたない種であっても、十分に高度な適応的行動を見せる。このような振る舞いは、脳・身体・環境の相互作用から生み出されていると考えられているが、依然としてその発現機序は明らかではない。この本質の理解のためには、脳・身体・環境の相互作用のミニマルなセットに着目し、そこに内在する制御構造を抽出することが必要である。

そこで本研究では、生物の上位脳機能を生きたままで段階的に阻害(ゾンビ化)した上で行動観察するという新奇な方法論を提案する。これによって同定された制御構造に基づき、劇的にシンプルな制御則で実世界に適応可能な人工物を開発する。

【研究の方法】

我々は、カリバチの狩猟行動から着想を得て、モデル生物として設定したコオロギの脳神経系を薬理的に機能阻害させて、コオロギを殺すことなく段階的に「ゾンビ化」する新奇な方法論が構築できるという考えに至った。このような「ゾンビコオロギ」が実現できると、それによってはじめて、最小の脳神経系に辿り着け、その時こそ「多様な歩容を生み出す源泉」が見えてくるとの確信を得た。

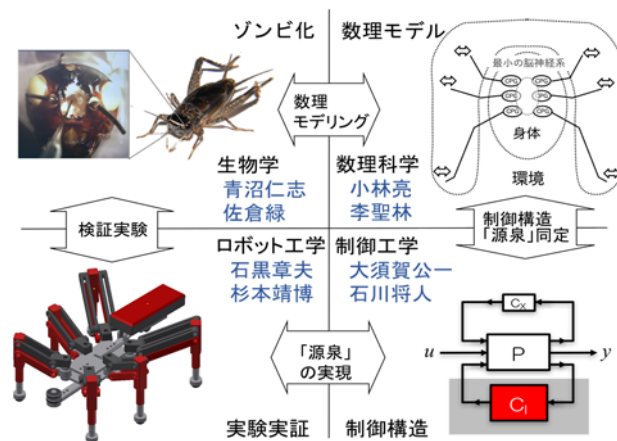


図1 研究体制

そこで、図1のように、生物学、数理科学、制御工学、ロボット工学を融合することで下の手順で研究を遂行する。

主題1：コオロギの脳神経系の適切な部位に適切に配合した薬剤を適量投与することでその部位の機能を阻害させる行為を「ゾンビ化」と呼び、その手法を確立する。

主題2：脳神経系レベルを段階的にそぎ落とした「ゾンビコオロギ」を外部からの刺激によって様々な場で歩行させ、その時の脳・身体・環境の相互作用の数理モデルを求め、その中に歩容の変容を生み出す制御構造を同定する。それが本研究で求めている「歩容(振る舞い)の源泉」である。

主題3：同定された「源泉」を実現する実証用ロボットを試作し、シンプルな制御則で従来のロボットを凌駕する環境適応能力が発現することを実験的に検証する。

【期待される成果と意義】

生物が見せる多様な振る舞いの源泉を脳神経系の複雑さに求めるのではなく、最小限の脳神経系と身体と環境との相互作用の中に求める点が学術的な特徴である。そして、コオロギを「ゾンビ化」という発想は、これまで「源泉」を直接抽出するための方法論がなかったことに対して画期的な解決策を与えることになり、極めて独創的である。

この試みが成功すると、単純な脳神経系しかもたない生物が予想以上に見せる知的行動の発現機序の解明に向けての大きな一歩になる。同時に、昨今のAIブームの流れに反して、極めてシンプルな制御則で実世界に適応可能な人工物を開発するための多大なる知見を与える。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・大須賀、石黒、鄭、杉本、大脇：制御系に埋め込まれた陰的制御則が適応機能の鍵を握る！？、日本ロボット学会誌、Vol.28、No.4、pp.491-502(2010)
- ・大須賀、衣笠、林、吉田、大脇、石黒：陰的制御によるムカデ型ロボット(i-CentiPot)の実現について、第29回自律分散システム・シンポジウム(計測自動制御学会)、pp.18-23(2017)

【研究期間と研究経費】

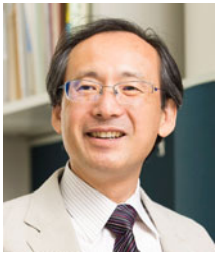
平成29年度～33年度
136,800千円

【ホームページ等】

<http://www-dsc.mech.eng.osaka-u.ac.jp/>

【基盤研究(S)】

理工系 (工学)



研究課題名 住環境が脳・循環器・呼吸器・運動器に及ぼす影響実測と疾病・介護予防便益評価

慶應義塾大学・理工学部・教授

いかが としはる
伊香賀 俊治

研究課題番号： 17H06151 研究者番号： 30302631

研究分野： 建築環境工学、公衆衛生学

キーワード： 住宅断熱、健康寿命、コホート調査、介入調査、コ・ベネフィット

【研究の背景・目的】

住宅の健康への影響に関しては、世界保健機関WHOの報告書を始め、多くの書籍・論文にまとめられており、住宅の寒さによる健康全般への影響、メンタルヘルスへの影響、空気質・ダンプネスによる呼吸器疾患への影響など住宅と健康に関する研究は特にイギリス、ニュージーランドで進んできた。しかしそれらの既往研究の多くが主観指標による評価であるため、実測に基づく客観的エビデンスが必要と示唆されている。一方、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次・第3作業部会報告書の第9章では、健康性、知的生産性のコ・ベネフィットの可視化が建築部門の低炭素化推進に有効であることと指摘している。このため本研究では、断熱性能などの住環境改善が脳・循環器・呼吸器・運動器に及ぼす影響に関する科学的根拠を獲得すること。さらに、住環境改善による疾病・介護予防便益評価手法の確立を目的とする。

【研究の方法】

研究方法の概要を図1に示す。

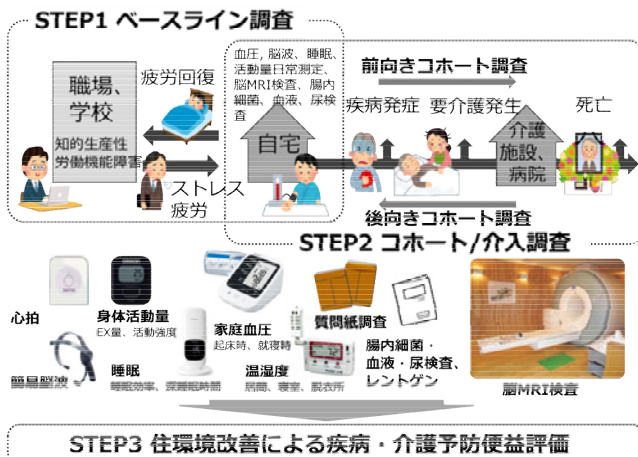


図1 住環境が健康に及ぼす影響の研究手法の概要

STEP1. ベースライン調査

研究チームは、これまで国、自治体、企業、住民との良好な関係のもとに、さまざまな住環境が、幼児から高齢者まで幅広い年齢層の住民の健康指標に与える影響に関するベースライン調査を拡充する。

STEP2. コホート・介入調査

STEP1のベースライン調査対象者について、数年後のコホート調査、新築・改修による住環境改善の

介入調査を行う。

STEP3. 住環境改善による疾病・介護予防便益評価

STEP2の研究成果と公的統計データの原票データを組み合わせ、住環境改善による疾病・介護予防便益評価を1世帯あたりで行うほか、全国及び基礎自治体毎の中長期予測を行う。

表1 建築学・医学共同研究チーム

1	伊香賀 俊治 教授	建築都市環境工学	博士 (工学)	
2	慶應義塾大学	満倉 靖恵 准教授		脳工学
3		小熊 祐子 准教授	運動疫学	博士 (医学)
4		星 亘二 客員教授	公衆衛生学	
5	首都大学東京	伊藤 史子 教授	都市計画学	博士 (工学)
6	自治医科大学	河尾 七臣 教授	循環器内科学	博士 (医学)
7		星出 聡 准教授	公衆衛生学	
8	産業医科大学	藤野 善久 准教授	公衆衛生学	博士 (医学)
9		久保 達彦 講師	公衆衛生学	
10	金沢大学	中村 裕之 教授	産科	博士 (理学)
11	東邦大学	福島 富士子 教授	助産学	
12	東京歯科大学	鈴木 昌 教授	救急医学	博士 (工学)
13	国立医薬品食品衛生研究所	渡辺 麻衣子 室長	衛生微生物学	
14	北九州市立大学	白石 靖幸 教授	建築都市環境工学	博士 (工学)
15	法政大学	安藤 真太郎 講師	建築都市環境工学	博士 (工学)
16		川久保 優 講師	建築都市環境工学	博士 (工学)

【期待される成果と意義】

本研究は、表1に示す建築学、医学の専門家が国・自治体・企業・住民と連携して、日常生活での住環境測定、血圧・活動量・睡眠等の健康データ測定を大規模に行う点に特徴がある。本研究の成果は個人の住環境改善のインセンティブになるだけでなく、国・自治体の住環境・健康政策の基礎資料となり、超高齢社会を迎える中でより良い住環境の創出に貢献する点に学術的・社会的意義がある。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- 健康維持がもたらす間接的便益 (NEB) を考慮した住宅断熱の投資評価、日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.666, pp.735-740 (2011.8)
- Lower Physical Performance in Colder Seasons and Colder Houses: Evidence from a Field Study on Older People Living in the Community, Int. J. Environ. Res. Public Health 2017

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度 - 33 年度
159,700 千円

【ホームページ等】

<http://www.ikaga.sd.keio.ac.jp/>
ikaga@sd.keio.ac.jp



研究課題名 実用デバイスに向けたハーフメタルホイスラー合金の
スピン依存伝導機構の解明

物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・
フェロー

ほうの かずひろ
宝野 和博

研究課題番号：17H06152 研究者番号：60229151

研究分野：金属物性・材料

キーワード：スピントロニクス、ハーフメタル、CPP-GMR

【研究の背景・目的】

スピントロニクスは、スピン分極した電子を制御することで、不揮発性磁気メモリ(MRAM)や超高感度磁気センサーといったIoT社会に必要な高機能デバイスの実現を目指す学問・技術領域である。もし室温で伝導電子が100%スピン分極したハーフメタルが開発されれば、それを用いて飛躍的に優れた性能のスピントロニクス素子が実現できる。

われわれはこれまでCo基ホイスラー合金系ハーフメタルの研究に取り組んできた。特に強磁性/非磁性/強磁性の積層構造を持つ面直電流巨大磁気抵抗(CPP-GMR)素子の開発において、磁気抵抗(MR)比の世界記録を次々に更新し、図1に示すように2016年には低温(10K)で285%と大きなMR比を達成

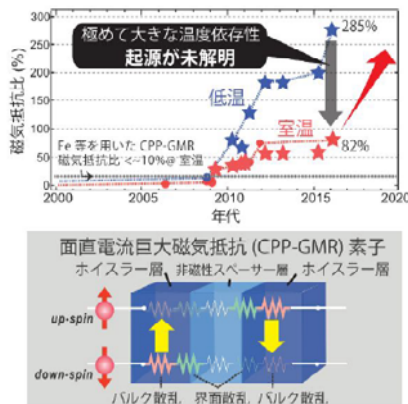


図1: ホイスラー合金を用いた CPP-GMR の MR 比の推移と温度依存性。★がわれわれによる成果。下: CPP-GMR のバルクと界面散乱。

した。しかしこの MR 比は室温ではその 1/3 の 82% にまで低下してしまう。これは温度上昇によってハーフメタル性が損なわれるためであり、その克服が重要な課題である。原因としては、バルクや界面での理想的な結晶構造からの乱れが考えられる。本研究では、構造と電子状態を詳しく調べ、その関係を第一原理計算と組み合わせることで解明することにより室温でのハーフメタル性を実現し、実用デバイスにつなげることを目的とする。

【研究の方法】

ホイスラー合金薄膜と CPP-GMR デバイスを作製し、それらの MR 特性、及び異方性磁気抵抗の測定によるスピン分極率の評価を行う。超高真空試料輸

送システムを構築し、薄膜試料を大気にさらさず実験施設に輸送し、清浄表面・界面のスピン分解光電子分光(PES)による電子構造観察を行う。また X線磁気円二色性(XMCD)による界面磁性評価、放射光異常分散 XRD により原子番号の近い構成元素からなるホイスラー合金薄膜の規則度の定量的評価を行う。収差補正走査透過電子顕微鏡(STEM)により、界面終端構造と局所微細構造を観察する。これに加え、第一原理計算により原子不規則化や終端界面、界面バンド整合を予測する。有限温度における伝導特性を計算する新規理論モデルを考案する。

これらの知見を元に、磁気抵抗出力の増大と、温度依存性改善のための新規材料や新規プロセスを開発し、高性能磁気センサーの実現に向けた研究へと展開させる。

【期待される成果と意義】

本研究はホイスラー合金薄膜とデバイス試作、界面構造・電子構造・界面磁性の測定、そして理論計算を有機的に結びつけることにより、デバイス応用上の重要な工学問題を解くことに特色がある。ハーフメタル性はあらゆるスピントロニクスデバイスの性能の根幹となるものであり、CPP-GMR 素子をはじめとし、超高感度磁気センサーや MRAM 等の実用化・高性能化に多大な貢献が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- J. W. Jung et al., *Enhancement of magnetoresistance by inserting thin NiAl layers at the interfaces in $\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}/\text{Ag}/\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ current-perpendicular-to-plane pseudospin valves*, Appl. Phys. Lett. 108, 10408 (2016).
- Y. Sakuraba et al., *Quantitative analysis of anisotropic magnetoresistance in Co_2MnZ and Co_2FeZ epitaxial thin films: A facile way to investigate spin-polarization in half-metallic Heusler compounds*, Appl. Phys. Lett. 104, 172407 (2014).

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度 - 33 年度
162,400 千円

【ホームページ等】

http://www.nims.go.jp/mmu/index_j.html
kazuhiro.hono@nims.go.jp



研究課題名 電子化物のコンセプトと応用の新展開

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

ほその ひでお
細野 秀雄

研究課題番号：17H06153 研究者番号：30157028

研究分野：無機材料・物性

キーワード：無機材料創成、電子化物、エレクトライド

【研究の背景・目的】

電子がアニオンとして振る舞うエレクトライド(電子化物)は、溶媒和電子が結晶化した化合物とも捉えられ、1983年にJ. Dyeによって初めて合成された。エレクトライドは、新概念の物質としてかなりの関心を集め、標準的な無機化学の教科書類に記載されるまでに至っている。しかしながら、これらの物質は環状有機エーテル分子で活性な電子を包接するために、極めて不安定なため(-100°C以下かつ不活性雰囲気下でのみで安定)、その材料研究はもとより物性研究も殆ど進展していなかった。

本研究者は有機分子の代わりにサブナノのケージから成る無機結晶 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C12A7) を用いることで、2003年に室温・空气中で安定な初めての電子化物 C12A7:e を実現した。これによって電子化物の物性研究が可能になった。さらに、2次元電子ガスのバルク結晶とも見做せる2次元エレクトライド物質 Ca_2N の発見や触媒活性や超伝導などの興味深い物性や応用の可能性を明らかにするにつれて、電子化物の新物質探索と材料研究が世界中で活発化してきている。中国のY. Maらによる金属ナトリウムを高圧にすると透明な絶縁相が生成し、この構造はエレクトライドとなっているという報告(Nature 2009)やCornell大学のR. Hoffmannらによるエレクトライド

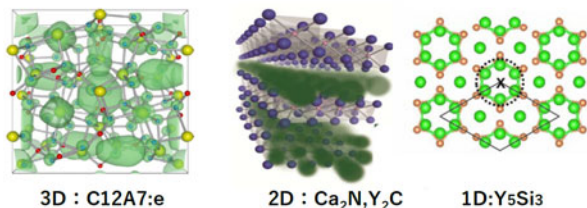


図1. これまで見出した代表的電子化物

は典型金属の高圧相として共通であるという理論的指摘(Accounts of chemical research, 2014)がその例として挙げられる。

しかしながら、これまでの電子化物の研究は電子過剰型のバルク結晶に限定されており、アモルファス系や表面、および化学量論組成の結晶系については、物質の存在も含め未開拓のままである。最近、本研究者は初めて電子化物ガラスの合成に成功した。また、化学量論組成の結晶系でアニオン電子が隙間に存在する物質を発見した。本研究では、これらの成

果を足場にして、エレクトライド物質の概念の拡張を図り、かつその本性に起因する物性を解明することで、材料への応用の可能性を明らかにする。

【研究の方法】

学術のフォーカス：電子アニオンが存在する物質系を、これまでの電子過剰型バルク結晶から、中性バルク結晶、アモルファス、そして表面に拡張して物質探索を行う。そして、新たに見出された物質群に対して構造・電子状態の解明と電子化物ならではのユニークな電子物性の発掘に集中する。

応用のフォーカス：前期では、仕事関数が金属リチウムやカルシウム並みに小さく、化学的・熱的に安定で、室温形成が可能なアモルファス C12A7:e に着目し、薄膜化を行う。そして、得られた薄膜試料の電気特性を明らかにしつつ、有機ELディスプレイで重要な技術課題となっている電子注入層への応用を検討する。後期には新電子化物の電子物性と電子放出源となどデバイス応用を検討する。

【期待される成果と意義】

電子化物はこれまで極めて特殊な物質系だと捉えられてきたが、本研究で提唱する概念が具体的物質で見出せれば、普遍性が得られる。また、アモルファスエレクトライドは、既存のアモルファス半導体と全く異なるクラスの物質系であり、物質科学と応用に新領域が拓け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】

- H.Hosono et al. Superconductivity in room-temperature stable electride and high-pressure phases of alkali metals: Phil. Trans. R. Soc. A373, 20140450-62(2015).
- E. Johnsona, P.V. Sushko, Y.Tomota, and H.Hosono: Electron anions and the glass transition temperature; Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 113, 10007-10012(2016).

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
134,600千円

【ホームページ等】

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

【基盤研究(S)】

理工系 (工学)



研究課題名 次世代完全レア・アースフリー磁石として利用可能なL1₀規則相の人工的創製研究開発

東北大学・未来科学技術共同研究センター・教授

まきの あきひろ
牧野 彰宏

研究課題番号：17H06154 研究者番号：30315642

研究分野：工学

キーワード：エネルギー材料

【研究の背景・目的】

約30年前に国内で開発された希土類磁石のネオジム磁石は、その高性能ゆえ、種々のモータの小型・高効率化を通して、次世代自動車(HV,PHV,EV,FCV)や家電、産業機械などの省エネ化に貢献し、世界をリードしてきました。しかし、現在、ネオジム磁石は、その基本特許の失効によるアドバンテージの消失や、更なる性能改善が限界に達している状況にあり、加えて、レア・アース供給リスクに端を発する資源問題は、今後、我が国の産業基盤及び、省エネ技術の維持・進展に大きな障害になると予測されます。また併せて、学術的な進歩のためにも新たな磁石材料の出現が切望されています。このような中、数十億年かけて形成された隕石中にごく微量存在する天然 FeNi-L1₀ 規則相は、磁石として有用であると予測がなされています。本研究は、次世代完全レア・アースフリー磁石として利用可能な、FeNi-L1₀ 規則相の人工的創製研究開発に挑戦します。

【研究の方法】

我々は、アモルファス相(疑似液相)のナノ結晶化時に見られる高速拡散に着目し、液体急冷 FeNi 基アモルファス相から結晶化させる手法によって、その組織中に体積分率約10%、規則度0.8の人工的 FeNi-L1₀ 規則相を得ることに成功しています。

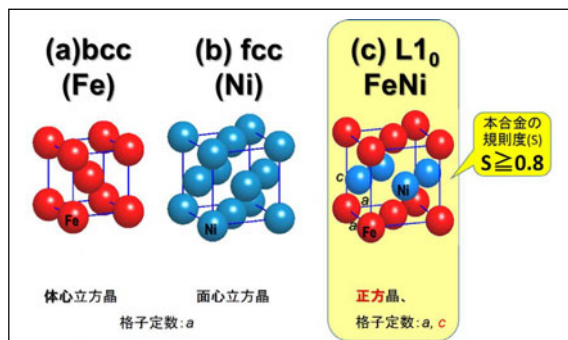


図1 Fe-Ni 二元系合金の代表的な相の種類と構造

本研究ではまず、この人工的に作製された規則相の硬磁性および磁石材料としての基礎物性を把握し、次世代磁石材料としてのポテンシャルを明らかにします。その為、合金探索による最適組成の把握と、ナノ結晶化プロセスの最適化を図り、現在得られている試料中における規則相の体積分率を向上させ、L1₀規則相単独の物性測定を実施します。続いて、示差走査熱量計(DSC)による熱分析、振動試料型磁力計

(VSM)による磁気特性の測定、高分解能電子顕微鏡観察及びマイクロマグネティクスシミュレーション等により、基礎物性を詳細に把握します。次に、工業化に向けた課題を抽出し、解決して行きます。

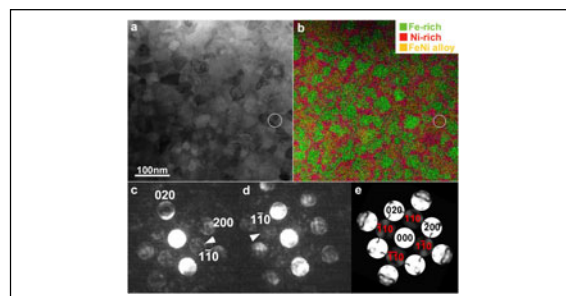


図2 電子顕微鏡による組織観察および電子回折像の観察ならびに計算結果

【期待される成果と意義】

レア・アース供給リスクを一気に解決し、省エネ技術を基盤とする我が国の将来における技術優位性を確保すると共に、我が国の国際競争力維持に貢献します。此の上、磁性材料分野における不連続的な進歩をもたらし、材料科学における新しい“超平衡”の扉を拓くものと期待されます。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- An Artificially Produced Rare-Earth Free Cosmic Magnet. [Scientific Reports,5,(2015),16627-1-16627-7] Makino A., Sharma P., Sato K., Takeuchi A., Zhang Y., Takenaka K.
- Crystallization induced ordering of hard magnetic L1₀ phase in melt-spun FeNi-based ribbons. [AIP Advances,6(5),(2016),055218-1-055218-9] Sato K., Sharma P., Zhang Y., Takenaka K., Makino A.

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
156,600千円

【ホームページ等】

<http://nanom.imr.tohoku.ac.jp/>
nanom@imr.tohoku.ac.jp



研究課題名 三次元時間分解・その場観察を基礎とした凝固組織のダイナミクスの構築と展開

京都大学・大学院工学研究科・教授

やすだ ひでゆき
安田 秀幸

研究課題番号：17H06155 研究者番号：60239762
研究分野：材料工学 金属・資源生産工学
キーワード：融体・凝固、鑄造、結晶育成・成長

【研究の背景・目的】

金属材料を製造する凝固・鑄造プロセスでは、材料特性を発現させるために、偏析などの欠陥を抑制し、材料組織を制御することが重要である。しかし、可視光に不透明で高融点の金属材料の凝固・結晶成長過程には不明な点が多くあった。これまでに、硬X線領域の高輝度・単色光が利用できる第3世代放射光施設 (SPring-8 など) において金属合金の凝固過程の時間分解・その場観察 (透過像の二次元観察) を実現し、1500℃付近の高温で鉄鋼材料などの凝固現象を観察することで新たな知見を得てきた。時間分解で三次元の観察が可能になれば、試料形状の影響を受けずに凝固現象を定量的に把握できる長所があり、凝固現象の理解が飛躍的に発展すると期待される。

本課題では、これまで培ってきた高温X線イメージング技術とSPring-8のX線光学系の長所を活かし、金属合金の凝固組織形成の三次元時間分解・その場観察を実現するトモグラフィ (4D-CT) を開発する。開発した4D-CTを用いて、金属材料を対象にミクロスケールからメゾスケールの凝固組織や偏析の形成過程、固液共存体の脆化を観察する (図1に観察対象の模式図)。観察結果に基づいて、凝固組織・欠陥形成の定量的理解から物理モデルを構築し、凝固・鑄造プロセスに適用可能な凝固組織・欠陥形成に関する学理を確立する。

【研究の方法】

【A】4D-CTの開発

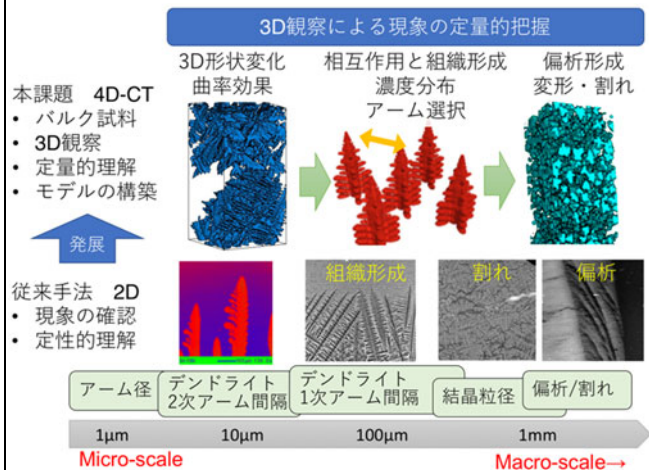
室温~1700℃の温度範囲でFe系、Al系合金などの組織形成を観察できる4D-CTを実現する。2sごとに空間分解能10μmの三次元観察 (高時間分解観察)、10sごとに高空間分解能1μmの観察 (高空間分解能観察) を実現することが目標である。また、凝固組織形成に適用した解析手法も開発する。

【B】凝固過程の三次元組織観察

Fe系、Al系合金などの凝固組織形成の時間分解三次元観察を行う。例えば、デンドライト形状を精密に計測し、曲率の三次元分布からミクロスケールでの物質輸送の把握、組織形成機構を明らかにする。凝固過程の固液共存体 (バルク試料) の結晶粒の配置 (粒形状、結晶方位) と変形を観察し、偏析や割れを理解するための固液共存体の力学を明らかにする。

【C】凝固現象のモデリング・シミュレーション

観察結果に基づいて曲率効果や結晶粒の配置を考



慮した凝固モデルを構築し、凝固組織、偏析の形成機構を検証する。材料計算科学的手法も導入して独自のモデル構築を実現する。

【期待される成果と意義】

高融点の金属材料の凝固・結晶成長過程の時間分解三次元観察の実現により、高温での凝固組織形成に関する新しい知見が獲得できる。従来手法では獲得できなかった時間分解三次元データは、凝固現象の実証的な理解を深め、信頼性の高い凝固モデルの構築に結びつく。これらの成果は、金属合金の凝固現象の体系化だけでなく、凝固・鑄造プロセスの向上にも貢献する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- M.A.A. Mohd Salleh, C. M. Gourlay, J. W. Xian, S. Belyakov, H. Yasuda, S. McDonald, K. Nogita, Sci Rep, 7 (2017) 40010.
- K. Yamane, H. Yasuda, A. Sugiyama, T. Nagira, M. Yoshiya, K. Morishita, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki, Metal. Mater. Trans A, 46A (2015) 4937-4946.
- T. Nagira, S. Morita, H. Yokota, H. Yasuda, C. M. Gourlay, M. Yoshiya, A. Sugiyama, K. Uesugi, Y. Takeuchi, Y. Suzuki, Metall Mater Trans A, 45A (2014) 1415-1424.

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
130,200千円

【ホームページ等】

[http:// cast.mtl.kyoto-u.ac.jp](http://cast.mtl.kyoto-u.ac.jp)
yasuda.hideyuki.6s@kyoto-u.ac.jp



研究課題名 マイクロ波誘起非平衡状態の学理とその固体・ 界面化学反応制御法への応用展開

東京工業大学・物質理工学院・教授 **和田 ゆうじ**
和田 雄二

研究課題番号：17H06156 研究者番号：40182985

研究分野：プロセス・化学工学、触媒・資源化学プロセス

キーワード：マイクロ波、触媒作用制御、非平衡反応場、マイクロ波特殊効果

【研究の背景・目的】

マイクロ波の光子エネルギーは 10^{-5} eV 程度（周波数：2.45 GHz）であり、物質中の電子、イオン、分子構造、結晶格子の集団運動が励起され、通常の加熱過程とは異なる非平衡状態が実現される。固体表面がマイクロ波によって誘起される短時間かつ局所的な非平衡状態に起因する反応速度増大に加え、マイクロ波照射下では特定成分が他成分よりも優先的にマイクロ波を吸収し、選択的に高温に発熱する現象（選択加熱）が起こる（図1）。

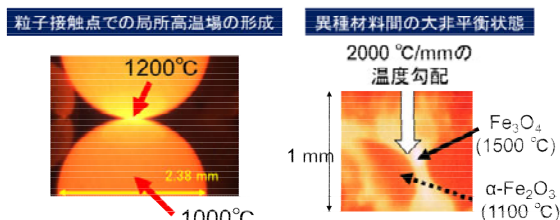


図1. マイクロ波によって形成する非平衡高温場

本研究では、マイクロ波交番電場・磁場との相互作用によって誘起される物質の表面あるいはバルク内の短時間かつ局所的な非平衡状態の *in situ* 観測手法の確立を行い、そこで誘起される特異的化学反应加速・反応温度低温化と非平衡構造の発生に関する学理構築を行う。具体的には、1) 非平衡状態発現の原理解明と一般的体系化を行い、固体触媒制御法の確立、2) 金属酸化物還元反応におけるマイクロ波特異的促進・低温化現象の原理解明とマイクロ波金属精錬法の確立、3) マイクロ波によって発生する微視的非平衡反応場を用いることで可能となる非平衡相（新規物質、過飽和固溶体）合成手法の確立、4) 通常の固相反応では合成不可能な強誘電性、強磁性、光-電気、光-磁気、等、マルチ機能を有する新材料の創製、がターゲットである。

【研究の方法】

本課題では、東工大 G および東北大 G で培った成果を融合し、5年間の計画でマイクロ波によって誘起される非平衡局所高温状態の直接観測と原理解明、さらに化学反応系への応用展開に取り組む。

大項目 1, 固体表面における非平衡局所高温場の実測と機構解明（東工大 G・東北大 G）：マイクロ波によって誘起される非平衡局所高温場を理解するために以下の小項目を検討する。

■ マイクロ波照射下の局所化学構造や温度を高空

間分解かつ高時間分解で実測できる、*in situ* 観測システムの開発と非平衡局所高温場の実測

- 化学反応系中の不均一な温度分布を解析する電磁波分布/熱流束シミュレーション手法の確立
- 非平衡高温場を誘起する局所領域におけるマイクロ波吸収能の測定

上記項目の結果から、マイクロ波交番電磁場との相互作用によって誘起される固体表面での局所的な非平衡状態の学理を体系化し、下記項目に展開する。

大項目 2, マイクロ波非平衡局所高温場を用いた革新的触媒反応系の創製（東工大 G）

大項目 3, マイクロ波非平衡局所高温場を用いた革新的新素材創製（東北大 G）

【期待される成果と意義】

化学反応を制御する手法に関する研究は、熱力学的パラメーター、あるいは速度論的観点からの触媒など、すでに成熟しつつある。しかし、メタン、二酸化炭素など化学的に安定な化合物を変換するためには、今までは無い手法が必要である。さらに材料分野では、非平衡状態を用いて初めて創製可能な新物質の合成がマイクロ波により実現できる。本研究の成果は、熱力学的条件、触媒等に加え、第3世代の化学反応制御法を形成する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Ano, F. Kishimoto, R. Sasaki, S. Tsubaki, M. M. Maitani, E. Suzuki, Y. Wada, *In situ* temperature measurements of reaction spaces under microwaves using photoluminescent probes, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 18, 13173-13179, (2016).
- D. Nagao, J. Fukushima, Y. Hayashi and H. Takizawa, Synthesis of homologous compounds $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{ZnO})_m$ ($m = 6, 8, 34$) by various selective microwave heating conditions, *Ceram. Int.*, 41, 14021-14028, (2015).

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度 - 33 年度
160,200 千円

【ホームページ等】

[http://www.apc.titech.ac.jp/~ywada/wada/yuji-w\(at\)apc.titech.ac.jp](http://www.apc.titech.ac.jp/~ywada/wada/yuji-w(at)apc.titech.ac.jp)



研究課題名 工業用動物細胞を用いた統合バイオプロセスに関する基盤的研究

大阪大学・大学院工学研究科・教授 おおまさ たけし 大政 健史

研究課題番号：17H06157 研究者番号：00252586
研究分野：生物機能・バイオプロセス
キーワード：バイオ生産プロセス、バイオ医薬品

【研究の背景・目的】

チャイニーズハムスター卵巣 (CHO)細胞は、Puckらによって構築されてから50年以上、生体外において増殖している細胞株であり、科学的研究のみならず、産業においても多用されている。

特に、抗体医薬に代表される糖蛋白医薬品生産においては上市されている抗体医薬の6割以上の生産宿主としてCHO細胞が利用されており、バイオ医薬

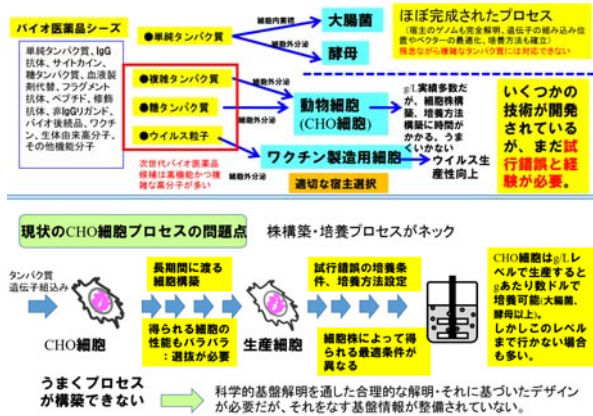


図1 CHO細胞バイオプロセスの現状

品の生産基盤を支える工業用動物細胞となっている。現在、CHO細胞は10g/Lを超える高レベル生産も可能であり、培養コストも大腸菌、酵母と遜色無いg数ドルを達成可能である。ところがこれを達成しているCHO細胞自身の科学的解明については、未だ十分になされていない。これまで代表者はCHO細胞のゲノム不安定性の重要性に着目し、世界初の遺伝子増幅CHO細胞のBAC(バクテリア人工染色体)ライブラリー構築を通して、CHO細胞染色体の再編成を世界で初めて解析し、生産細胞の構築にこの不安定性が重要であることを解明している。

本研究では、この生産基盤を支える工業用動物細胞に着目し、ゲノム育種基盤技術を行った細胞を用いた基盤的統合バイオプロセス研究として、工業用動物細胞の染色体の不安定性/多様性に着目したゲノム育種基盤プラットフォームに基づいて、①ゲノム育種基盤プラットフォームを用いたセルエンジニアリング手法の構築、②工業用動物細胞を用いた高度バイオプロセス構築、これらを組み合わせた③工業用動物細胞を用いた統合バイオプロセスの基盤プラットフォームを構築する。

【研究の方法】

具体的な研究手法は大きく3つに分けて行う。①ゲノム育種基盤プラットフォームを用いたセルエンジニアリング手法の構築：染色体への特異的組込みと染色体安定性情報を組合せたゲノム改変技術の構築、②工業用動物細胞を用いた高度バイオプロセス構築：連続プロセスや長期流加培養における細胞の品質制御/安定性の解明・解析を通じたバイオプロセスの構築、③工業用動物細胞を用いた統合バイオプロセスの基盤プラットフォーム：上記の知見を統合した統合バイオプロセスの基盤を構築する。

【期待される成果と意義】

人工的に蛋白質を高発現させているCHO細胞におけるゲノム情報の解明は着実に加速されているが、CHO細胞特有の染色体不安定性(ゲノム変動)のため、その有効活用には至っていない。本研究が達成されることにより、不安定かつ多様なゲノムを持つ株化細胞であるCHO細胞の科学的解明が進み、CHO細胞を用いたバイオ医薬品生産における統合バイオプロセスの基盤に資することができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Noriko Yamano, Mai Takahashi, Seyed Mohammad Ali Haghparast, Masayoshi Onitsuka, Toshitaka Kumamoto, Jana Frank, and Takeshi Omasa "Increased recombinant protein production owing to expanded opportunities for vector integration in high chromosome number Chinese hamster ovary cells" Journal of Bioscience and Bioengineering, 122(2):226-231 (2016).
Yihua Cao, Shuichi Kimura, Takayuki Itoi, Kohsuke Honda, Hisao Ohtake, and Takeshi Omasa "Construction of BAC-based physical map and analysis of chromosome rearrangement in Chinese hamster ovary cell lines" Biotechnology and Bioengineering, 109(6):1357-1367 (2012).

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
118,400千円

【ホームページ等】

http://www-bio.mls.eng.osaka-u.ac.jp/
omas@bio.eng.osaka-u.ac.jp



研究課題名 新規生理活性物質生産株の超ハイスループット
スクリーニングプラットフォーム構築

早稲田大学・理工学術院・教授 たけやま はるこ
竹山 春子

研究課題番号：17H06158 研究者番号：60262234

研究分野：プロセス・化学工学 生物機能・バイオプロセス

キーワード：ラマン分光、データベース、生理活性物質、シングルセル解析、難培養性微生物

【研究の背景・目的】

創薬に資するリード化合物(生理活性物質)を微生物から探索する研究は長い歴史を有し、現在までに20000種以上の生理活性物質が発見されている。例えば、海綿動物からは数多くの生理活性物質が発見されるが、これらの多くは、海綿に共生している微生物が生産したものである。このような生理活性物質生産株の解析のために単離培養が試みられてきたが、未だ多くの共生微生物は難培養であり、その特性には多くの謎が残されている。生理活性物質生産に関与する代謝遺伝子群を理解することが出来れば、新たな創薬リード化合物の獲得や生産に繋げることができる。このためには、多様な微生物から新規の生理活性物質の生産者を効率よく探索し、ハイスループットに培養または代謝遺伝子群の取得を試みることができる新たなプラットフォームが求められる。

【研究の方法】

本研究では、陸由来、海洋由来の豊富な生理活性物質生産微生物のライブラリーを元に微生物二次代謝産物のラマンスペクトラムデータベースを構築する。顕微ラマン分光法は非侵襲的に物質の分子構造を明らかにできるため、代謝物を産生している菌体をシングルセルレベルで同定できる。

さらに、環境中の未知微生物から生理活性物質生産株をハイスループットにスクリーニングするために、ドロップレットを基礎としたシングルセルラマンスペクトラム取得と微生物単離の機構を統合する。また難培養微生物については、シングルセルからゲノム情報を取得する。このために、マイクロ流体デバイスを利用した微生物シングルセルのハイスループットハンドリング技術と情報科学的解析法を改良する。得られた新規生理活性物質遺伝子群の機能解析を進め、創薬リード化合物スクリーニングの分野で世界的なリーディング技術として確立する(図1)。

【期待される成果と意義】

新規解析技術の開発において海外のリードを許している現状で、日本発信の革新的な技術・システムが期待されている。本研究のキーである顕微ラマン分光法による非破壊・非標識の二次代謝産物のin vivo検出法は新しい分析技術として、世界を牽引する可能性を持つと評価されている。本研究で構築するin vivoラマンシグナルデータベースはこれを具現化する

るものであり、研究現場、創薬リード化合物スクリーニングの分野で多様な活用が見込まれ、世界的なリーディング技術として新産業へもつながる技術となり得る。また、シングルセルゲノミックスのプラットフォームは難培養、未知微生物等の未利用資源の有効活用を今までにはないスピード感をもって進展させるものである。このような超ハイスループットスクリーニングプラットフォームは、今後の創薬研究におけるリード化合物探索とその活用に必須の基盤技術となる。

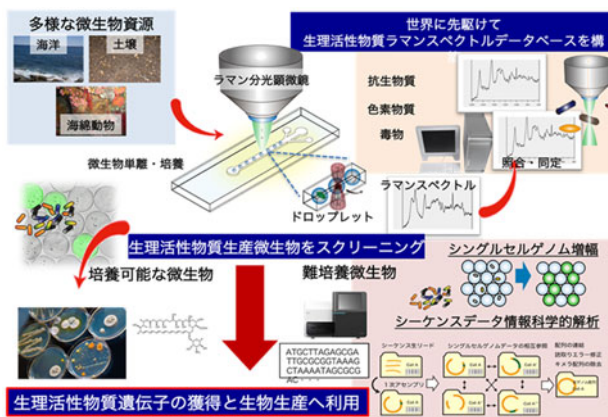


図1 生理活性物質生産微生物の高速スクリーニングと利活用

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Miyaoka R, et al. 2014. In situ detection of antibiotics Amphotericin B produced in *Streptomyces nodosus* using Raman microspectroscopy. *Marine Drugs*. 12(5), 2827-2839
- ・ Wilson MC, et al. 2014. An environmental bacterial taxon with a large and distinct metabolic repertoire. *Nature* 12959. 506(7486):58-62

【研究期間と研究経費】

平成29年度-33年度
157,700千円

【ホームページ等】

<http://www.f.waseda.jp/haruko-takeyama/haruko-takeyama@waseda.jp>

研究課題名 多光子ガンマ線時間／空間相関型断層撮像法の研究



東京大学・大学院工学系研究科・教授

たかはし ひろゆき
高橋 浩之

研究課題番号：17H06159 研究者番号：70216753

研究分野：総合工学

キーワード：放射線計測、核医学、イメージング、同時計数、ガンマ線

【研究の背景・目的】

従来のガンマ線診断法である PET では解像度、SPECT では撮像感度の点で原理的限界があった。我々は複数ガンマ線放出核種では時間相関から空間情報が得られる点に着目し、ガンマ線入射方位を特定できる反跳電子追跡型ガンマカメラを駆使した多光子ガンマ線時間／空間相関型断層撮像法を新たに考案した。本撮像法は複数光子間の相関を用いて体内放射能濃度を高分解能・高感度・高 S/N 比で描出し、従来の PET、SPECT の本質的な限界を突破する画期的な手法である。本研究では新手法の分解能・感度・S/N 比等の諸特性の評価を狙い、象徴的な半球型試験装置を製作し、分子イメージングを革新する計測原理を追求する。具体的には ^{111}In 標識ペプチドを用いて 2 光子放出核種検出 1 分子イメージングを実現し、日本発の革新的ガンマ線診断技術の確立と、 ^{45}Sc などの多光子核種への展開を図る。

【研究の方法】

時間・空間相関によるガンマ線イメージング技術の原理実証を行い、その高い解像度・感度・S/N 比を追求するために 2 光子電子飛跡精密測定型断層撮像装置(Double Photon Emission CT: DPECT)を製作する。本装置では入射方位を検出する 3 次元検出器を半球型に配置することで、2 光子同時測定により 1 イベントで位置を特定するものである。

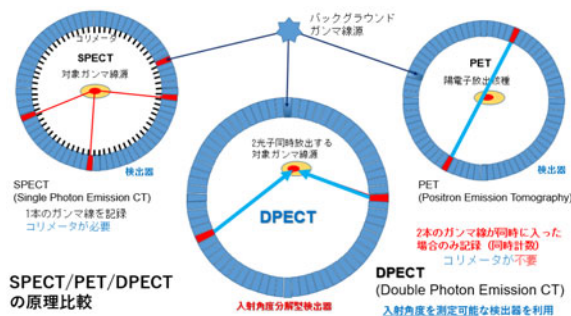


図1 SPECT/PET/DPECT の原理の比較

具体的には高解像度反跳電子飛跡精密計測カメラおよび高エネルギー分解能シンチレータからなる撮像モジュールを開発し、これを半球型に配置した撮像装置を作り、ペプチド標識 ^{111}In 核種を用い、DPECT 撮像方法の原理実証試験を行う。

【期待される成果と意義】

従来、高感度全身分子イメージングは 2 光子 (511keV) を 180 度方向に放出する陽電子放出核種を用いる PET に限られてきた。そのため陽電子核種同士の弁別は不可能であり多核種イメージングの制約となっていた。一方我々の開発する 2 光子撮像方式ではガンマ線飛来方向およびエネルギーの精密測定が可能となるため、 ^{111}In および他核種の同時イメージングも可能となる。また従来 10^6 以上の LOR(Line Of Response)を必要とする PET と比較して、1 度のイベントにおいて対象薬剤位置を特定可能であるため真の 1 分子イメージングが可能となり分子間相互作用や抗体標識による悪性腫瘍の定量的研究などが飛躍的に進展することが期待できる。

図 2 には ^{111}In の場合に電子飛跡追跡を行わずに単純に二つのコンプトンカメラに同時計数を適用した例を示すが、同時計数の効果によりバックグラウンドが抑えられ、コントラストが非常に高くなっており、また、空間分解能も改善されている様子がわかる。これを更に改善して、PET、SPECT を超える新しいガンマ線イメージング手法の確立を目指す。

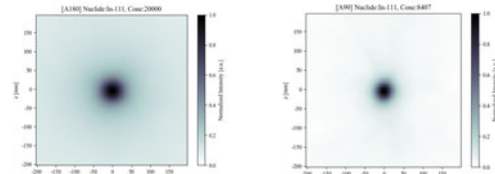


図2 二台のコンプトンカメラによる二光子同時計数の効果 左：同時計数なし 右：同時計数有

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・ Y. Yoshihara, et al., Evaluation of double photon coincidence Compton imaging method with GEANT4 simulation, Nucl. Instr. and Meth. A, in press.

【研究期間と研究経費】

平成 29 年度－33 年度
158,300 千円

【ホームページ等】

<http://sophie.q.t.u-tokyo.ac.jp/~mpect>
leo@n.t.u-tokyo.ac.jp