

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (総合理工)



### 研究課題名 巨視的量子系を用いた量子物理

国立情報学研究所・量子情報国際研究センター・特任教授

せんば こういち  
仙場 浩一

研究分野: 総合理工

キーワード: 原子・分子、超伝導、スピン物性、量子エレクトロニクス、量子情報

#### 【研究の背景・目的】

物質と光の基本的な相互作用を光子1個のレベルで取り扱う共振器量子電磁力学 いわゆる cavity-QED は、従来 Q 値の大きなシングルモード空洞共振器中の光子およびその光子とエネルギー的に共鳴条件にある一対の準位を有する原子という組み合わせを用いて行なわれてきた。この原子を巨視的量子系である超伝導人工原子に、空洞共振器を超伝導共振回路にそれぞれ置き換えて同様な実験が可能であると理論的には予想されていた。それが近年、実験で実証された。私達は、超伝導人工原子とマイクロ波光子の相互作用(g)は、従来知られていた大きな双極子モーメントをもつリュードベリ原子とマイクロ波光子の場合に比べて更に3桁以上も巨大であることを実証した。

また、超伝導人工原子と LC プラズモン調和振動子系間の単一光子の交換 (量子もつれ) 振動である真空ラビ振動を時間領域で観測することに初めて成功した。さらに、ダイヤモンド結晶中に高濃度に生成させた窒素空孔欠陥の電子スピン集団に、超伝導人工原子の任意の重ね合わせ状態を Dicke の1励起集団スピン状態として、一定時間保存した後に読み出す操作「量子メモリの原理実験」にも世界に先駆けて成功している。このように、原子を巨視的人工原子で置き換えて実験することにより、未踏領域での量子物理の実験が可能になっているのである。

これらの技術を発展させ、例えば、他の量子系との相互作用(g)を必要な時間だけ、必要な大きさに変える手法の獲得等を目指す。さらに、巨視的量子系だからこそ可能な強結合条件下での相互作用の大きさの自在な制御や、量子多体系基底状態に関する量子相転移の制御技術への発展などが考えられる。

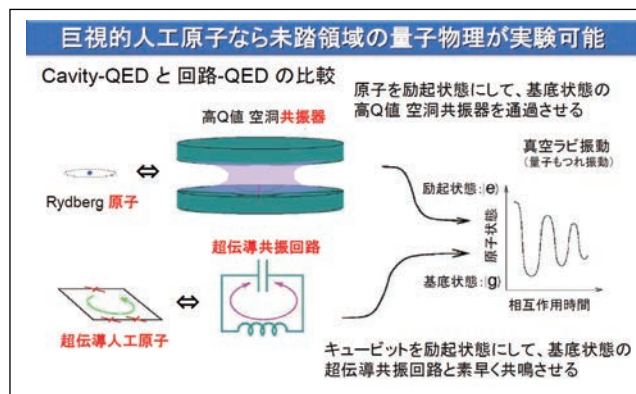


図1 原子と空洞共振器を使った共振器量子電磁力学 (上段)

巨視的人工原子を使った回路量子電磁力学 (下段)

#### 【研究の方法】

超伝導人工原子をマイクロ波超伝導共振器、集団電子スピン、あるいはプラズモン等の調和振動子系と組み合わせ、相互作用の弱結合～超強結合までの自在な制御を目指して以下の項目の研究を行う。

- ・相互作用制御分光法を実現可能な測定系の構築。
- ・超伝導人工原子を マイクロ波、スピン波、LC プラズモン等と強結合させ、非古典的状态を形成する。
- ・ジョセフソン接合を含む超電流可変型超伝導回路、アンサンブル増強 等で超強結合の実現を目指す。
- ・基底状態相転移の観測と制御の試み。

#### 【期待される成果と意義】

量子シミュレーションや量子計算等の革新的な情報処理応用への可能性をもつ超伝導素子には大きな期待が集まっている。しかし、量子情報素子はその真価を発揮する領域へと到達するためには、系全体の量子状態制御に関するブレークスルーが必要だと考えられ初めている。中でも量子系の結合エネルギーの制御による基底状態の量子相転移の制御は、量子情報処理を更に進化させる上で大きなポテンシャルをもつテーマであり、本研究から得られる知見や研究成果はこのテーマの有用な一歩を提供する。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・仙場, 齋藤, 角柳, 中ノ: 「超伝導回路で共振器量子電磁力学実験が可能に! - ジョセフソン cavity-QED -」日本物理学会誌 **64**, (2009), 37-41.
- ・S. Ashhab, F. Nori, “Qubit-oscillator systems in the ultrastrong-coupling regime and their potential for preparing non-classical states”, Phys. Rev. A **81**, 042311 (2010).
- ・X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W. J. Munro, Y. Tokura, M. S. Everitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi & K. Semba, “Coherent coupling of a superconducting flux-qubit to an electron spin ensemble in diamond”, Nature **478**, 221-224 (2011).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
170,600 千円

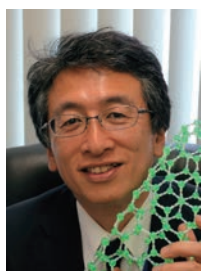
#### 【ホームページ等】

<http://www.ryosi.com/qis/201207/01/>

<http://kaken.nii.ac.jp/d/r/50393773.ja.html>

## 【基盤研究 (S)】

### 理工系 (総合理工)



## 研究課題名 完全制御カーボンナノチューブの物性と応用

産業技術総合研究所・ナノシステム研究部門・首席研究員

かたうら ひろみち  
片浦 弘道

研究分野: 材料科学、ナノサイエンス

キーワード: ナノチューブ・グラフェン、分離、単結晶

### 【研究の背景・目的】

単層カーボンナノチューブ (SWCNT) は、1993年に日本で発見された、炭素一原子層からできた直径 1 ナノメートル程度の筒状物質であり、優れた物理的・電気的特性を持つことから、様々な分野での応用が期待されている。しかし、発見から 20 年も経過したにも関わらず、いまだに炭素原子間の結合距離でさえ、正確な値が得られていない。それは、単結晶が得られていないためである。SWCNT は、原子の配列に極めて高い自由度を持つため、合成時に直径を注意深く制御した試料でさえ、数十種類の構造体の混合物になってしまい、そのままでは単結晶を作ることができない。

そこで本研究では、我々が開発したゲルカラムクロマトグラフィー法により、数十種類の混合物から一種類だけを高純度で大量に分離精製し、SWCNT の単結晶を作製する事を第一の目的としている。単結晶ができれば、たとえば X 線構造解析により、炭素原子間距離も正確に測定することが可能になる。物性研究では当たり前に行われるこの基礎的な研究が、発見から 20 年の時を経て、単結晶を実現する事により、ようやく実現する事になる。

### 【研究の方法】

我々の SWCNT 分離法は、日本古来の食材である「ところてん」(ゲル) に、特定の性質の SWCNT が選択的に吸着するという不思議な現象を利用して行う独自のものである。原理的に、大量に処理できるため、ほんのわずかな割合でしか含まれない構造体も効率良く分離・精製することができる。本研究では、この原理を応用した大量分離装置を設計・製作して、特定構造の SWCNT を大量に分取し、それを用いて単結晶を作製する。

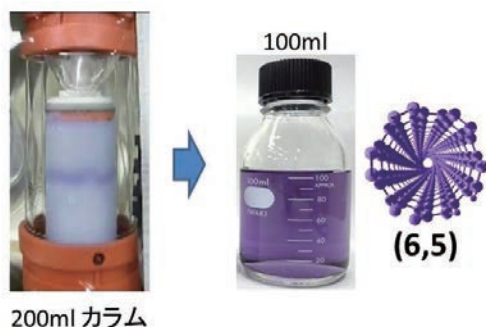


図1 (6,5)型の単一構造 SWCNT の分離の様子。左の写真は、単一構造 SWCNT を流し出しているところ。(Nano Lett. (2013))

図1は、温調カラムを使って(6,5)型の SWCNT を大量に分離している様子を示している。SWCNT は炭のように黒いと思われているが、特定の構造を取り出せば、ナノ材料特有の発色を見せる。我々はすでに 13 種類の SWCNT の単離に成功しており、本研究でさらなる高純度化、他種類化を進める。

### 【期待される成果と意義】

結合長の他に SWCNT の長周期構造についても未解決の問題がある。たとえば自発的ねじれがエネルギー論的予測から指摘されている。事実であれば、長周期構造の消失も考えられ、SWCNT の電子構造についても考え直す必要が出てくる。単結晶を用いた精密構造解析は、これらの問題に答を与える。

さらに、これまで得られていた SWCNT の集合体は、多様な構造体の混合物であったため、お互いに特徴を打ち消し合ってしまう、SWCNT 結晶本来の物性を見せていなかった。単一構造体の単結晶は、混合物とは全く異なり、純粋炭素の新たな固体相と呼べる物である。多様な SWCNT の構造の数だけ単結晶も存在し、それぞれ独自の電子構造をとることが期待される。グラファイトやフラーレンの結晶と同様に、アルカリ金属をドーブした系で超伝導の発現も期待できる。そのほか、単一構造 SWCNT 結晶を用いた炭素材料のみによる高耐久太陽電池など、新たな電子デバイスへの応用も含め、SWCNT 研究の大きなブレークスルーとな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】

- ・ "Large-scale single-chirality separation of single-wall carbon nanotubes by simple gel chromatography", H. Liu *et al.*, Nat. Commun. **2** (2011) 309.
- ・ "High-Efficiency Single-Chirality Separation of Carbon Nanotubes Using Temperature-Controlled Gel Chromatography", H. Liu *et al.*, Nano Lett. **13** (2013) 1996.

### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
167,500 千円

### 【ホームページ等】

<http://staff.aist.go.jp/h-kataura/index.html>  
[h-kataura@aist.go.jp](mailto:h-kataura@aist.go.jp)

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (総合理工)



### 研究課題名 環動分子構造を利用した物質輸送膜システムの創成

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

いとう こうぞう  
伊藤 耕三

研究分野: 高分子材料学、超分子化学、ソフトマター物理

キーワード: 高分子構造・物性、超分子化学、ナノ材料

#### 【研究の背景・目的】

我々の研究室では、架橋点が自由に動く環動高分子を創成することに成功するとともに、この特異な分子構造に基づく環状分子の運動性(環動性)がもたらす物性やその応用について研究を行ってきた。その中でごく最近、この環動高分子ゲル膜について液体の透過量の圧力依存性を測定していたところ、従来の高分子ゲル膜ではまったく見られない顕著で可逆的な流速のオンオフ特性を発見した。これは、環動高分子ゲル膜中で圧力勾配がある閾値を起えると、流動場によってナノスケールの架橋点が移動してゲル膜に可逆的な構造変化が起こり、まったく新しい流路チャンネルが非平衡状態の散逸構造として膜内に形成されたためと解釈されている(図1)。本研究では、このような環動高分子独自の架橋構造に由来するオンオフ特性の機構解明と、本現象の基盤となっている環のエントロピーを分子レベルでの設計を通じて制御することで、様々な物質にオンオフ特性を示すデジタル物質輸送膜システムの創成を目標としている。

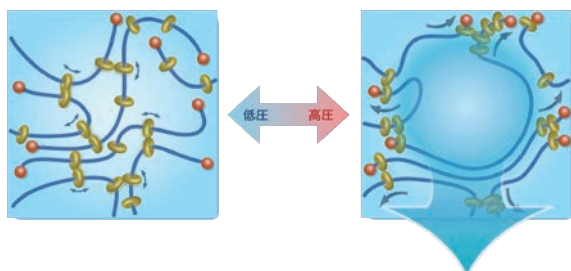


図1 圧力勾配による可逆的な流路チャンネルの形成

#### 【研究の方法】

本研究目的を達成するために、圧力や濃度勾配下でのX線あるいは中性子小角散乱用の測定装置を試作し、環動ゲルの構造解析を行うことで、オンオフ特性の分子的機構を解明する。それと同時に、溶媒ではなく物質輸送のオンオフ特性についても検証を行う。ここでは透過する分子の大きさと網目サイズの相関が重要なパラメータであり、これらを様々な変化させながら、ゲル膜内の拡散定数を測定する。また、物質透過におけるオンオフ特性を物理的・化学的に制御するために、環のエントロピー制御に必要な分子設計を行うとともに、実際に新しいポリロタキサンを合成する。さらに、通常の薬物徐放シ

テムと環動ゲル膜を組み合わせ、薬物を間欠的(デジタル的)に放出し、しかも放出量と間隔が自在に制御可能なデジタル特性を示す物質輸送膜システムを実際に作製することで、環動ゲル膜のオンオフ特性のシステム化を図る。これにより、本研究の新規性と有効性を実証するとともに、研究成果の速やかな普及を図る。

#### 【期待される成果と意義】

本研究によって、アナログからデジタルへのパラダイムシフトが物質輸送膜の分野で起こることが期待される。また本研究を推進することによって、高分子科学の中に環状分子のエントロピーという研究分野が新たに誕生することになる。さらに、環のエントロピーに基づく新しい理論モデルの構築、各種の新規動的物性・構造形成の発見などを通じて、高分子や超分子に関連する学問分野の飛躍的發展に貢献できる。一方で応用面では、デジタル特性を示す分離膜という従来の高分子膜ではこれまで不可能な特性が実現できるため、たとえばDDSや分離膜の分野にイノベーションをもたらすことが予想される。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- K. Kato and K. Ito, "Dynamic transition between rubber and sliding state attributed to slidable cross-links", *Soft Matter*, **7**, 8737 (2011).
- A. Konda, K. Mayumi, K. Urayama, T. Takigawa, and K. Ito, "Influence of structural characteristics on stretching-driven swelling of polyrotaxane gels with movable cross links", *Macromolecules*, **45**, 6733 (2012).
- K. Kato, T. Yasuda, and K. Ito, "Viscoelastic properties of slide-ring gels reflecting sliding dynamics of partial chains and entropy of ring components", *Macromolecules*, **46**, 310 (2013).

#### 【研究期間と研究経費】

平成25年度-29年度  
160,700千円

#### 【ホームページ等】

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

## 【基盤研究（S）】

### 理工系（総合理工）



#### 研究課題名 電界効果による磁性の制御と誘起

東京大学・大学院工学系研究科・准教授 ちば だいすけ  
千葉 大地

研究分野： 応用物性

キーワード： スピントロニクス、電界効果

#### 【研究の背景・目的】

本申請の根本にある狙いは、電氣的に材料の機能開拓を可能にする手段・電界効果・を、材料の枠を超えて活用し、省エネ・高効率な利用展開・材料間の融合的新機能の創発を図るものである。その広い目的の中で、本研究では磁性に焦点を当て、身近な金属の磁性を電界効果で自在に操る手法を確立する。最近、コバルトなど身近な 3d 遷移金属磁石に電界を加えると、その磁氣的な秩序(強磁性)を誘起したり、消したりできることを見出した[1,2]。この原理を理解することで、天然には磁石として存在しない金属を電氣的に磁石にすることが可能となるかもしれない。まさに磁石の性質を電氣的に自在に操る技術への展開を拓く礎となるものであり、本研究ではその実証と背景サイエンスの着実な理解を進める。さらに、将来のスピントロニクス分野の研究を先導すべく、ナノ構造の新奇形成手法への展開など、新たな原理で動作するデバイスの提案を積極的に行う。

#### 【研究の方法】

金属電極で絶縁膜を挟むとコンデンサーの構造となる。また、近年、巨大なキャパシタンスを得るために、イオン液体を用いて電気二重層を形成する技術が積極的に用いられている。このようなコンデンサー構造で、片側の電極を磁性金属にすると、本研究で用いる基本素子構造となる。この構造に電圧を加えると、磁性金属には電荷が蓄積される。つまり、金属表面の電子濃度が増減し、もともとの元素が持つ電子数が電圧の符号により減ったり増えたりすることに相当する。片側の電極をコバルトにした素子では、0.1 個の電子数の変化により、室温を挟んで 100 K もの温度範囲で、強磁性が発現したり、消えたりすることが分かった[2]。このように予想外に大きな効果が起こる原理を注意深く理解することを一つのテーマとする。ところで、このような構造は、半導体の電界効果型トランジスタ(金属/絶縁膜/半導体構造)でも用いられている。半導体の部分を様々な物質に置き換え、その物性を制御して得られる効果を広い意味での「電界効果」と呼ぶことにする。

二つ目のテーマは、天然には磁石として存在しない非磁性の金属を磁石化することである。例えば、周期表で隣り合わせの、ニッケルと銅に注目しよう。ニッケルは磁石であるが、銅は磁石ではない。現状では上記のコンデンサー構造で、原子一個あたり 0.1 個の電子数を変化させられるが、これをさらに大き

く変化させ、銅から電子を一個抜くことが出来れば、ニッケルの特性を持たせる(磁石化する)ことが可能になるのではないかという素朴な疑問が生じる。この例のように、金属の磁性を電界で誘起し、自在に制御することを目指す。

その他、電界による磁極方向のスイッチングを通じた磁気記録素子の省エネ化や、ナノ構造への展開など、近い将来の応用や未来の研究へ橋渡しができるテーマにも取り組む。

#### 【期待される成果と意義】

これまで、作り方を工夫することで磁石の特性をチューニングすることはできた。しかし、一度作った磁石の特性をあとから電氣的に制御することは人類がこれまでアクセスできなかったことであり、一つの新しい材料探索手法となり得るものである。刺激を与えて応答を見る実験のようなものであり、背景の物理をより緻密に理解する上でも大きな意味がある。これら様々な基礎学術的背景の理解を通し、将来的に「電界効果」を、多様な物質群での融合的新機能の創発を実現する共通基盤技術に拡張させる意味を持つ研究となることが期待される。また、将来に繋がる研究の種を多く見つけることができると考えている。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] D. Chiba, S. Fukami, K. Shimamura, N. Ishiwata, K. Kobayashi and T. Ono, Electrical control of the ferromagnetic phase transition in cobalt at room temperature *Nature Materials* **10**, 853-856 (2011).
- [2] K. Shimamura, D. Chiba, S. Ono, S. Fukami, N. Ishiwata, M. Kawaguchi, K. Kobayashi, and T. Ono, Electrical control of Curie temperature in cobalt using an ionic liquid film *Applied Physics Letters* **100**, 122402 (2012).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
172,300 千円

#### 【ホームページ等】

<http://chiba-lab.t.u-tokyo.ac.jp/>  
[dchiba@ap.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:dchiba@ap.t.u-tokyo.ac.jp)

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (総合理工)



### 研究課題名 純スピンの注入による磁気相転移の選択的制御と革新的ナノスピンドバイスへの応用

九州大学・大学院理学研究院・教授 **木村 たくし**

研究分野: スピントロニクス

キーワード: スピン注入、純スピン流、相転移現象

#### 【研究の背景・目的】

磁石の不揮発特性と巨大磁気抵抗効果などのスピン依存伝導現象を絡めて電子デバイスを動作させるスピントロニクスは、消費電力・集積度・動作速度・書き換え回数など、さまざまな点で魅力的なポテンシャルを有しており、次世代のナノエレクトロニクス・デバイスの最有力候補の一つとして期待されている。近年の目覚ましい関連技術の進展により、現在では、室温で抵抗変化 200% を超える磁気抵抗素子の量産が可能になっている。最近では、更に大きな抵抗変化も観測されており、スピン情報を電気信号で読み取るための十分な抵抗変化は得られている。しかし、半導体トランジスタなどのようにゲート電圧で電気抵抗が数桁変化する素子と比べると、スピンドバイスの抵抗変化率は、まだまだ圧倒的に小さい。その結果、スピン RAM などでは、不揮発記憶効果により低消費電力化が可能であるが、集積度の限界は、半導体 RAM と同様、トランジスタの微細化限界で決まってしまうのが現状である。

そこで本研究では、強相関係におけるスピン間の相互作用により生み出される相転移現象を用いて数桁の電気抵抗変化を引き起こす革新的スピンドバイスを創出する。具体的には、代表者のシーズ技術である高効率・純スピン流制御技術を駆使して、スピン流による巨大な有効磁界を強相関係電子系に作用させることで、金属-絶縁体転移やメタ磁性転移などの相転移現象を引き起こす。本技術により、スピン RAM の更なる高密度化・高性能化のみならず、革新的ナノスピンドバイスの創成が期待できる。

#### 【研究の方法】

既に確立している巨大純スピン流注入技術を磁気相転移を引き起こすナノドットに適用し、スピン注入によるメタ磁性転移を実現する。同時に、高品質な Mn 酸化物/Cu 二層膜作製技術とナノ加工技術を開発し、同様の純スピン流制御技術を用いて、スピン注入誘起の金属-絶縁体転移を実現する。上記の要素技術を確立したスピン注入誘起の相転移現象を用いたナノ磁界発生装置や三端子スピンスイッチなど、革新的スピンドバイスの試作と高性能化を実施する。

#### 【期待される成果と意義】

強相関係物質は電気抵抗が高いため、これまで電气的スピン注入は適さないと考えられていた。本研究では、電気の流れを伴わない純スピン流を用いるこ

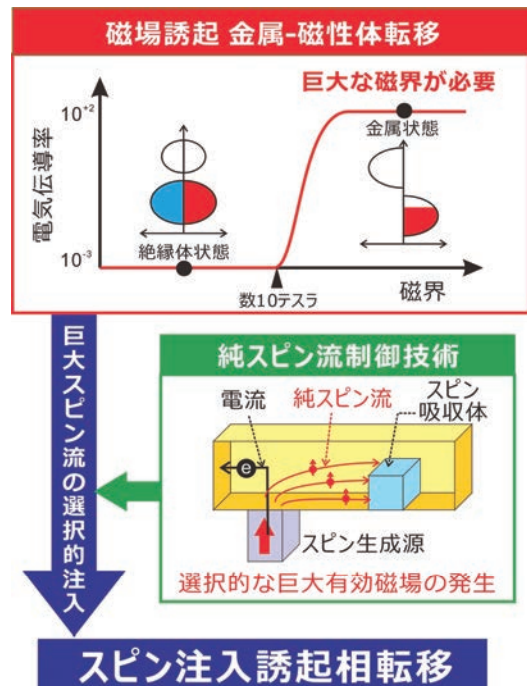


図1. 純スピン流注入による選択的磁気相転移概念図  
とで、効率的なスピン注入を可能にする。スピン注入誘起相転移という革新的原理により数桁の電気抵抗変化をもたらす本デバイスの実現は、スピンドバイス、及びナノエレクトロニクス分野に革命をもたらすと期待できる。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- S. Nonoguchi, T. Nomura, and T. Kimura "Nonlocal spin transports in nanopillar-based lateral spin valve" Appl. Phys. Lett. 100, 132401 (2012)
- S. R. Bakaul, S. Hu and T. Kimura, Large pure spin current generation in metallic nanostructures, Appl Phys A 111, 355-360 (2013)

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度-29 年度  
119,400 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.phys.kyushu-u.ac.jp/ssp/index.html>  
t-kimu@phys.kyushu-u.ac.jp

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (総合理工)



### 研究課題名 超高感度テラヘルツヘテロダインCTおよび分光イメージングの実現

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授 かわせ こうどう  
川瀬 晃道

研究分野: テラヘルツ工学

キーワード: テラヘルツ波、非線形光学、テラヘルツパラメトリック発生、イメージング

#### 【研究の背景・目的】

我々は最近、ダイナミックレンジ 10 桁 (SN 比 10 桁) という優れた性能を有する光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムの開発に成功した。さらにこのシステムの検出方式はコヒーレントなテラヘルツ波のみに感度を有するため、測定ターゲット中を直線的に透過した成分のみを計測し、散乱光は計測しないという、理想的な高精細イメージングが可能となる。本研究では、この新方式の長所を活用した透過型 CT および分光イメージングを実現し、例えば、プラスチック製品やセラミクス製品内部の欠陥検査、厚手の郵便物内に隠された禁止薬物検出、製薬工場でのロットミス検出、などの社会的ニーズに応え得る非破壊検査システムを、超高感度で実現することを目的とする。

#### 【研究の方法】

研究期間内に明らかにする項目は、①光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムを用いた超高感度テラヘルツ分光イメージングシステムの実現 ②光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムを用いた超高感度テラヘルツヘテロダイン CT システムの実現 ③光注入型テラヘルツパラメトリック発生検出システムの 1THz 以下の低周波域への拡大、および④上記システムの各種応用に対する実用性能評価および基盤技術の醸成である。

項目③は、理化学研究所の南出、林研究員が担当し、1THz 以下の領域における光注入型テラヘルツパラメトリック発生器の開発を目的としている。1THz 以下の帯域では、紙、ビニール、プラスチック、セラミクス、衣類、試薬、錠剤、など本研究で対象とする測定ターゲット中に含まれる様々な物質の透過率が高くなる。

#### 【期待される成果と意義】

本研究ではまず、テラヘルツ分光/イメージングシステムを高いレベルで実現し、従来不可能であった、厚手の郵便物等に隠された禁止薬物の検出などを可能にする。さらに、従来透過イメージングが困難であった複雑な構造のプラスチック製品やセラミクス製品などの欠陥検査へ供するテラヘルツヘテロダイン CT システム (図 1) を実現する。なお、これらの分光・イメージング技術に対する要請は、申請者らが過去に共同研究を進めてきた企業などからも大きく、

それらの要請に応えうる新技術を世界に先駆けて日本から発信する意義は大きい。

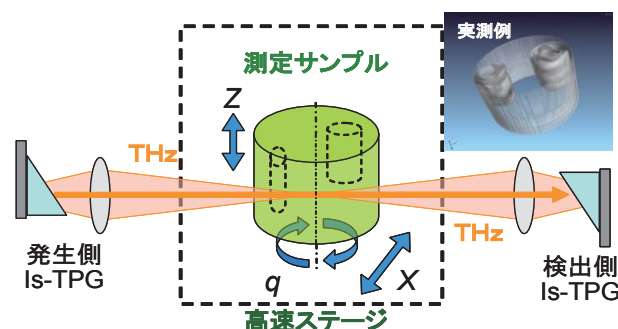


図 1 is-TPG を発生/検出に用いる THz ヘテロダイン CT システム

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- K. Kawase, M. Sato, T. Taniuchi, and H. Ito, "Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO<sub>3</sub> with monolithic grating coupler," Applied Physics Letters, vol. 68, no. 18, pp. 2483-2485 (1996).
- K. Kawase, J. Shikata, K. Imai, and H. Ito, "Transform limited, narrow linewidth, terahertz-wave parametric generator," Applied Physics Letters, vol. 78, no. 19, pp. 2819-2821 (2001).
- S. Hayashi, H. Minamide, T. Ikari, Y. Ogawa, J. Shikata, H. Ito, C. Otani, and K. Kawase, "Tunability enhancement of a terahertz wave parametric generator pumped by a microchip Nd:YAG Laser," Applied Optics, vol. 48, no. 15, pp.2899-2902 (2009).
- S. Hayashi, K. Nawata, H. Sakai, T. Taira, H. Minamide, and K. Kawase, "High-power, single longitudinal mode terahertz-wave generation pumped by a microchip Nd:YAG laser," Optics Express, vol. 20, no. 3, pp. 2881-2886 (2012).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
163,500 千円

#### 【ホームページ等】

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



研究課題名 自在な熱輻射制御のための新技术/概念の構築

京都大学・大学院工学研究科・教授 **野田 進**

研究分野: 光科学、光量子光学

キーワード: 熱輻射、フォトニック結晶、熱光発電

【研究の背景・目的】

一般に、高温物体からの熱輻射は、極めて幅広いスペクトルを有し、その応答速度は極めて遅い。このことが、熱輻射を活用した光源の、エネルギー利用効率の悪さ、動作速度の遅さにつながっている。

本研究では、電子系と光子系の双方の状態を制御することにより、物体からの熱輻射を、エネルギーの損失なく、望む波長に、望む線幅で集約する技術、また、熱輻射を動的かつ超高速に制御する技術など、高温物体からの熱輻射を自在に制御・利用するための、新しい技術や概念を構築することを目的とする。

【研究の方法】

研究代表者らは、極最近、量子井戸のサブバンド間遷移による電子制御と、フォトニック結晶の共振効果による光子制御を組み合わせ、中赤外波長域において黒体の 1/30 に熱輻射スペクトルの線幅を狭め、かつ投入電力がこの狭い熱輻射スペクトルに集約可能であるということの世界で初めて示すことに成功している。本研究では、この技術をさらに深化させ、以下に示す 4 つの目標を設定し、物体からの熱輻射を自在に制御・利用するための、新しい技術や概念を構築する。

(I) 熱輻射スペクトルのさらなる狭帯域化: ここでは、線幅のさらなる狭帯域化のため、新たなフォトニック結晶共振効果 (光子制御) を導入し、その  $Q$  値を増大させつつ、この  $Q$  値に量子井戸のサブバンド間遷移 (電子制御) で決まる吸収  $Q$  値をマッチングさせることで、放射率  $\epsilon$  を最大化しつつ、系全体の  $Q$  値の増大 (スペクトルの狭帯域化) を図る。

(II) 熱輻射の動的・超高速制御: 上記の共鳴  $Q$  値とサブバンド間吸収  $Q$  値のマッチングで決まる放射率  $\epsilon$  を、超高速に動的変化させるという新しい概念を導入する。このときナノ秒からピコ秒の高速スイッチング速度を実現するために、温度変化ではなく、サブバンド間吸収の大きさで決まる  $Q$  値を時間領域で変化させることにより、熱輻射強度を動的に、かつ超高速に変調することを目指す。

(III) 熱輻射波長の近赤外 (~1 $\mu$ m 域) への展開: 熱輻射波長を中赤外から近赤外域へと展開するために、量子井戸に代わり、新たに Si のバンド間遷移の活用を考える。この際、様々な厚みの Si 薄膜を用意し、吸収  $Q$  値を調整しつつ、フォトニック結晶共振  $Q$  値とのマッチングをとり、望む波長において放射率  $\epsilon$  の増大を目指す。

(IV) 黒体リミットを超える熱輻射強度実現: 通常、熱輻射制御を行っても黒体リミットにより、同じ温度、同じ波長における黒体からの輻射強度を超えることは出来ない。本限界は、熱輻射デバイスから、“自由空間”へと熱輻射を発する場合に生じる。本研究では、共振器—共振器結合により、自由空間の光の状態に制限されない、熱輻射の授受を行うという新たな熱輻射引き出し法を検討する。

【期待される成果と意義】

本研究により、熱輻射でありながら、レーザとも見間違えるような、単一スペクトルで極めて狭い線幅をもつ高効率な熱輻射を実現できると期待される。またこのような輻射の高速制御が可能になれば、各種分析用高効率・高速赤外光源の実現、熱の出ない高効率・高速ランプへの展開が期待できる。さらには、近年注目を集める太陽光発電の分野において、太陽からの熱輻射のスペクトルが極めて広いことが、太陽電池の光電変換効率を低く留める根本的な原因となっている (例えば Si 太陽電池の場合、10-25% 程度)。本研究により、太陽からの熱輻射を、単一の太陽電池が吸収可能な波長域の熱輻射に変換・集約することが出来れば、光電変換効率を大幅に増大できる可能性がある。このような研究を通じて、「高温ナノフォトニクス」と呼ぶべき、新分野の基礎が築けるものと考えられる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- M. De Zoysa, T. Asano, K. Mochizuki, A. Oskooi, T. Inoue, and S. Noda: "Conversion of broadband to narrowband thermal emission through energy recycling", **Nature Photonics**, vol.6, pp 535-539 (2012).
- T. Asano, K. Mochizuki, M. Yamaguchi, M. Chaminda, and S. Noda: "Spectrally selective thermal radiation based on intersubband transitions and photonic crystals", **Optics Express**, vol. 17, pp.19190-1923 (2009).

【研究期間と研究経費】

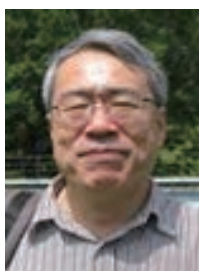
平成 25 年度—29 年度  
164,600 千円

【ホームページ等】

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

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (数物系科学)



### 研究課題名 代数多様体のモジュライ空間と自己射の数理

京都大学・数理解析研究所・教授 向井 茂

研究分野: 数学

キーワード: 代数幾何学、複素幾何、表現論、複素解析、数論幾何学

#### 【研究の背景・目的】

代数幾何学は多くの固有の方法や問題をもっているが、他の分野への応用にも目覚ましいものがある。それは現在も続いている。応用のされ方としては、モジュライに関するものが多いが、近年は自己射 (写像) に関連するものも増えてきている。特に、複素力学系における隣接分野では、自己同型のエントロピーやクレモナ群等の研究において代数幾何学へのフィードバックを与える結果が得られている。

本研究は、代数多様体とモジュライという伝統的な問題群に対して、自己射の観点を取り入れることによって、また、複素力学系や幾何学的表現論等における隣接分野との問題意識や研究手法の共有をはかることによって、研究のさらなる発展を目指すものである。

#### 【研究の方法】

次のテーマを中心に研究チームを組んで協力し合い、大きな成果と相乗効果を目指す。

① 代数多様体のモジュライとコンパクト化をエンリケス曲面やカラビ・ヤオ多様体を中心に研究する。

向井は、Nikulin が定義したルート系の概念を精密化して、それをエンリケス曲面の諸問題に適用している。この研究の周辺には面白い無限離散群をもつエンリケス曲面や有理曲面の候補、さらに、それらの高次元類似が沢山できてきているので、複素力学系的に面白そうな無限位数自己同型をその中から探し出したい。

また、Borchers 保型形式値の具体的な計算 (吉川・川口と共同研究中) を拡張していくことによってエンリケス曲面の周期写像をより深く理解したい。

② 代数多様体の自己射の力学系・エルゴード理論的な性質、特に、不変集合の構造や不変測度の性質などを研究する。

空間の自己射は、それを時間発展と見なして力学系と考えられるが、カオス的な現象の起きることが知られている。カオス的な挙動を示す系については、数学的な取り扱いが困難な場合が多い。利用できる手法は限られていたが、代数多様体の射の場合には、代数的手法、複素解析的手法、ポテンシャル論的手法などにより、様々な性質が明らかにされつつある。代数多様体の自己射の力学系に関して、このような観点から研究していく。

③ Fomin-Zelevinsky によって導入されたクラスター代数、およびその量子化は、近年、多くの分野との関連が見出されて、活発な研究が行われている。中島は、Hernandez-Leclerc の研究に示唆されて、あるクラスのクラスター代数を次数付き簇多様体の上の偏屈層から作られる合成積代数の表現の圏の、グロタンディエク環として実現することに成功した。一方で、Kontsevich-Soibelman や長尾の研究により、3 次元カラビ・ヤウ圏における一般化された Donaldson-Thomas 型不変量の壁越え公式とクラスター代数の間に密接な関係があることが分かっている。両者はともにモジュライ空間に関係するという意味では粗い意味で類似しているものの、精密な関係ははっきりしない。この点を解消して、クラスター代数の幾何学的な理解を深める。

#### 【期待される成果と意義】

明示的な定義式をもっていて自己同型群も具体的な無限群になるエンリケス曲面は今まで知られていなかった。それが沢山構成できそうである。また、ある種のエンリケス曲面の全体のモジュライ空間は非自明な自己写像を持っている可能性がある。Borchers の保型形式への理解の深まりも相俟って、エンリケス曲面は楕円曲線論の類似を展開するに相応しい領域になりつつある。古典的成果のエンリケス曲面への一般化が期待できる。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Shigeru Mukai: Kummer's quartics and numerically reflective involutions of Enriques surfaces, J. Math. Soc. Japan 64(2012), 231-246.
- Hiraku Nakajima: Quiver varieties and cluster algebras, Kyoto J. Math. 51(2011), 71-116.

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
42,800 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~mukai/index-j.html>



## 【基盤研究 (S)】

理工系 (数物系科学)



### 研究課題名 数理モデルにおける非線型消散・分散構造の 臨界性の未開領域解明

東北大学・大学院理学研究科・教授 おがわ たかよし  
小川 卓克

研究分野： 実解析学、調和解析学、偏微分方程式論

キーワード： 非線型偏微分方程式、臨界型函数不等式、臨界函数空間

#### 【研究の背景・目的】

多くの数理モデルは物理量の相互作用による非線型偏微分方程式で記述され、偏微分作用素による「線形構造」と、物理量の干渉に起因する「非線型構造」を含む。線形構造は消散構造(散逸構造)や分散構造に基づき、系の安定化に寄与し、物理量の干渉による非線型構造は系を非安定化に導く。これら「線形・安定」構造と「非線形・不安定」構造が釣り合う問題を「臨界問題」と呼び本研究の中心的対象となる。数学的にも応用上も重要な多くの問題で、こうした臨界状況が発生し、興味深い数学的現象が現れる。また臨界状況では解析学的に主要な技法である「摂動法」がそのままでは通用しないため解析学的な研究はより困難となる。本研究はこうした臨界性にまつわる問題を研究し、その背後に残されている未開領域ともいえる優臨界問題への足がかりを築くことにある。

#### 【研究の方法】

臨界問題の多くは背景にある数理モデルから自然に導かれる質量保存則、運動量保存則、エネルギー、エントロピー保存則、ガリレイ変換普遍性などに加えて、数学的な等角・擬等角保存則といった構造を伴い、それらの無限次元空間内での挙動を詳しく知ることが問題の解決に大いに寄与する。そして無限次元空間内での汎函数の幾何学的状況を把握し、拮抗する状況がどのような構造により引き起こされるかを研究する。さらに、汎用函数不等式をより精密化した、いわゆる臨界型函数不等式を研究することは、臨界問題に非常に有効である。そのため函数解

析学による函数空間の理解と同時に、不等式の精密化に寄与する実解析学・フーリエ解析の緻密な議論(実補間理論・ウェーブレット理論)を援用し、様々な臨界型函数不等式を確立することがこうした問題を取り扱う上で最も効果的である。

本研究では、とりわけ臨界型ソボレフ不等式、対数関数を制御するグロスの不等式、ブレジス-ガローエの不等式、および、その双対版と考えられるツールディング・モーザー型不等式の精密な研究を行う。そして自然な発展として、定数係数の線形偏微分方程式に対する消散-分散型評価(Lp-Lq型評価あるいはストリッカーツ・ブレンナー評価)をオルリッツ空間を用いて精密化する。

#### 【期待される成果と意義】

様々な臨界問題の背後にはミレニアム問題として著名な問題を始めとして、重要な未解決問題が軒を連ねる。とりわけ重要な課題として分散性と消散性が同時に存在するモデルにおける解析で、従来、分散性と消散性の解析が互いに相殺し、数学的な証明が困難に陥って、一方の構造をもつ場合に及ぶ成果が得られなかったが、本研究により様々な問題における消散分散構造の分離と非線形干渉による効果の分類が明らかになるにつれて、こうした困難さが解決されるものと考えられる。また臨界函数不等式の確立に伴い、消散・分散効果を伴った様々な解析学的評価群(双線形・三重線型評価、線形消散型評価・線形分散型評価・最大正則性原理)を確立し手法を磨き上げる。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

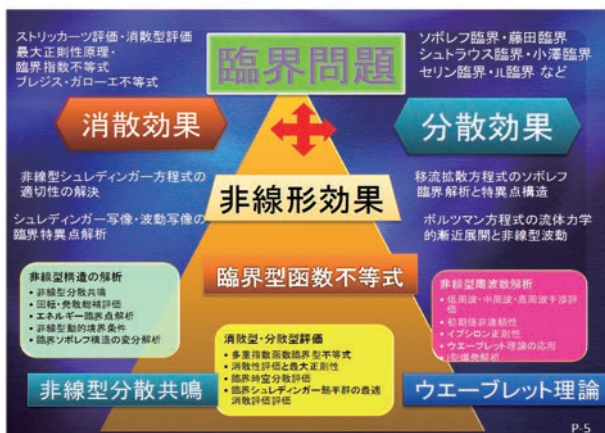
- ・ 小菌 英雄・小川 卓克・三沢 正史 共編著  
「これからの非線型偏微分方程式」日本評論社  
300pp, 2007年。
- ・ 小川 卓克 著「非線型発展方程式の実解析的方法」シュプリンガー現代数学シリーズ 丸善出版  
430pp, 2013年。

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度～29 年度  
132,700 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.tohoku.ac.jp/~ogawa.html>



基盤研究(S)

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (数物系科学)



### 研究課題名 太陽コロナ・彩層加熱現象に迫る —ひので・IRIS・CLASP から SOLAR-C へ

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・所長 つねた さく  
常田 佐久

研究分野: 天文学、太陽物理学、プラズマ科学

キーワード: 太陽物理学、国際協力、人工衛星、ロケット、プラズマ

#### 【研究の背景・目的】

2006年に打上げられた日本の太陽観測衛星「ひので」の観測により、太陽物理学は激変し、新たな発展の時代に突入した。「ひので」は、磁気流体波動や超音速まで加速されたジェット現象を光球・彩層のいたるところで発見し、『彩層・遷移層が光球とコロナをつなぐ中間層にすぎない』との従来認識は、これら動的現象が彩層・コロナの加熱に深く関連しているらしいとの考えに変わりつつある。彩層を通してコロナへエネルギーが輸送される点や、コロナの約10倍の加熱エネルギーが彩層の維持に必要な点からも彩層は重要で、『プラズマ圧優勢から磁気圧優勢に切り替わる彩層・遷移層の磁場構造とこれら動的現象との同時観測こそが次の太陽物理のフロンティアである』との認識が、ここ数年急速に生まれた。

次期太陽観測衛星 SOLAR-C(平成31(2019)年度打上げ希望)の主要科学目的の一つは、彩層・コロナの加熱現象・動的現象の解明のため、光球～コロナの3次元磁場構造を明らかにすることである。そこで本研究で、彩層・遷移層研究を通して、SOLAR-C計画に確実な科学的・技術的目処をつける。

#### 【研究の方法】

以下の2ステップにより、本研究を進める。

#### 第1ステップ: 「ひので」-IRIS 同時観測による研究

2013年6月にNASAの太陽観測衛星 IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) が打上げられた。この IRIS 衛星は、5千度から1千万度までの9つの輝線で彩層～コロナの分光観測を行う衛星であり、「ひので」衛星では得られない、彩層・遷移層の温度・密度・速度といった物理状態を調べることができる。分光観測で初めて0.3秒角という高い解像度を実現しており、時間変化が激しい彩層のダイナミクスや微細な温度構造を捉えるには最適の観測装置である。

一方「ひので」衛星は、世界最高精度での光球磁場観測と、高い空間時間分解能による彩層撮像観測とがあり、彩層研究においてベストの組合せである。

2013年夏予定の IRIS 衛星の科学運用開始に合わせて、米国の IRIS 科学運用センターに現地拠点を築き、IRIS 研究者と協力して、「ひので」-IRIS の系統的かつ集中的な同時観測を実施し、共同研究を行う。

#### 第2ステップ: 観測ロケット実験 CLASP の実施

CLASP (Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter) は NASA 観測ロケットを用いたロケット実験(2015年実施予定)で、世界で初めて太陽彩層・遷移層が放つライマン $\alpha$ 輝線の直線偏光度を高精度(0.1%)計測し、そこからハンレ効果を用いて彩層・遷移層の磁場を求める計画である。2013年に観測装置を製作し、2014年に装置校正・機能試験・耐環境試験を実施する予定である。2015年に観測を実施し、「ひので」・IRIS 衛星の観測では得られない彩層・遷移層磁場の情報を加えることで、彩層・遷移層研究を加速させる。

#### 【期待される成果と意義】

太陽の彩層・遷移層と光球・コロナの磁気的カップリングという同一科学目的について、

- ・ 「ひので」世界最高精度の光球磁場データ
- ・ IRIS 彩層・遷移層の高空間分解能分光データ
- ・ CLASP 彩層・遷移層の磁場データ

という、相補的なデータを得るミッションシリーズにより、いままでにない情報が得られ、太陽物理に確実な進歩をもたらす。また、CLASP 実験により装置の技術実証ができ、ライマン $\alpha$ 線とハンレ効果による磁場診断手法の有用性も示される。これらの成果をもとに、SOLAR-C 計画の課題: (1)彩層・遷移層の磁場観測装置の仕様確定、(2)それにより彩層・遷移層のベクトル磁場を必要な精度で求めることができるか? (3)彩層・コロナの加熱や太陽風加速のエネルギーを供給していると考えられている波動を検出できるか? などに初めて回答が得られ、SOLAR-C 計画を格段に進展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】

- “Small-Scale Jetlike Features in Penumbra Chromospheres”, Katsukawa, Y. et al., Science 318, 1594 (2007)
- “Propagating Waves along Spicules”, Okamoto, J. et al., Astrophysical Journal, 724, L24 (2011)
- “Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP)”, Kano, R. et al., Proc. of SPIE 8443, 84434F (2012)

#### 【研究期間と研究経費】

平成25年度～29年度  
150,900千円

#### 【ホームページ等】

<http://hinode.nao.ac.jp/KakenS>



研究課題名 カムランド禅での世界最高感度のニュートリノレス2重ベータ崩壊の探索研究

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

しらい じゅんぺい  
白井 淳平

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)、ニュートリノ、2重ベータ崩壊

【研究の背景・目的】

物質の基本粒子である素粒子の中で、ニュートリノは唯一電荷を持たないため、それ自体が反粒子である (マヨラナ粒子である) 可能性がある。これは自明ではなく極めて重要な問題である。もしニュートリノがマヨラナ粒子ならばニュートリノの小さな質量を説明すると同時に極めて重い質量のニュートリノを示唆するシナリオ (シーソー機構) を考えることができ、それは標準理論を大きく超える超高エネルギーの物理を示唆する。ニュートリノの出ない2重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$  崩壊) はニュートリノのマヨラナ性を実験的に確認する唯一可能な方法であり、世界中で探索が行われているが未発見である。本研究は  $0\nu\beta\beta$  崩壊の最高感度の探索を目的とする。探索の鍵は大量の2重ベータ崩壊核と極低放射能環境である。本研究は300kgの $^{136}\text{Xe}$ 核を用いて既存の実験施設 (カムランド) で行われた実験 (カムランド禅) の成果をもとに、感度を飛躍的に高めた探索を行うものである。

【研究の方法】

カムランド禅実験の検出器は、岐阜県神岡鉱山の地下千mに位置し、世界最大の液体シンチレータを擁するニュートリノ検出器カムランドの中心に $^{136}\text{Xe}$ 核を含む液体シンチレータを収納する薄く透明な袋 (ミニバルーン) を設置したものである (図1)。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊によるシンチレーション光は周囲の光電子増倍管で検出する。地上のわずか10万分の1の宇宙線量と超高純度かつ大容量の液体シンチレータは本研究に絶好の極低放射能環境を提供する。2011年9月に開始した実験は最も厳しい $^{136}\text{Xe}$ 半減期の制限を与えたが (図2)、本研究ではさらに感度を上げるためキセノン及び液体シンチレータの蒸留純化による残留放射性不純物の除去を行った後、ミニバルーンをよりクリーンかつ大型化し $^{136}\text{Xe}$ 量を倍増す

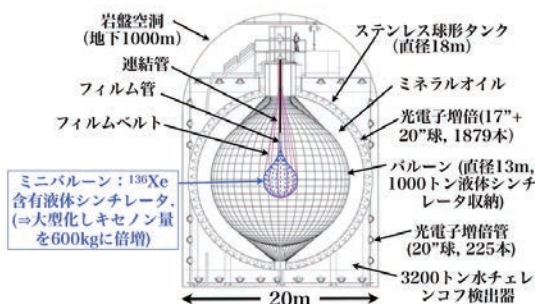


図1. カムランド禅検出器

るとともに、宇宙線ミュー粒子識別用の外水槽光検出器の補強を行い、宇宙線由来の邪魔物反応の除去効率の大幅な向上により飛躍的な感度の向上を目指す。

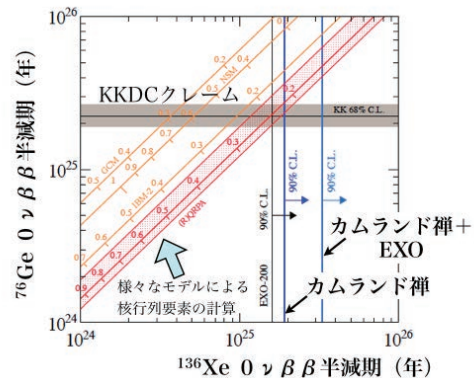


図2. カムランド禅実験 (第1期) と EXO 実験による $^{136}\text{Xe}$ の $0\nu\beta\beta$ 半減期の制限。縦軸は $^{76}\text{Ge}$ 実験による半減期。 $0\nu\beta\beta$ 検出の主張 (KKDCクレーム) は90% C.L.で否定された。

【期待される成果と意義】

$0\nu\beta\beta$ 崩壊が観測されればニュートリノがマヨラナ粒子であることが判明し、ニュートリノ質量の謎の解明に迫る大発見となるほか、超高エネルギーの物理が示唆されそれは宇宙の開闢と物質優勢の謎の解明への鍵を与える。また発見されなくてもニュートリノ質量の絶対値や階層性を決定付けるか、厳しい制限を与える重要な情報が得られる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ “Limit on Neutrinoless  $\beta\beta$  Decay of  $^{136}\text{Xe}$  from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in  $^{76}\text{Ge}$ ”, A.Gando et al. (KamLAND-Zen Collaboration), Phys. Rev. Lett. 110, 062502 (2013).
- ・ “Measurement of the Double-Beta Decay Half-life of  $^{136}\text{Xe}$  in KamLAND-Zen”, A.Gando et al. (KamLAND-Zen Collaboration), Phys. Rev. C85, 045504 (2012).

【研究期間と研究経費】

平成25年度-29年度  
131,600千円

【ホームページ等】

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (数物系科学)



### 研究課題名 南極点複合ニュートリノ望遠鏡で探る深宇宙— 高エネルギーニュートリノ天文学の始動

千葉大学・大学院理学研究科・准教授

よしだ しげる  
吉田 滋

研究分野: 物理学

キーワード: 宇宙線(実験)、素粒子、ニュートリノ、超高エネルギー、南極

#### 【研究の背景・目的】

可視光で観測する宇宙は可視光に対応するエネルギー帯の放射で描画される宇宙像である。しかし宇宙からの放射は可視光よりも遥かに高いエネルギーにまで及んでいることが分かっている。陽子・原子核からなる宇宙線と呼ばれる物質流が最も高エネルギー帯の放射を担っており、そのエネルギーは、可視光の 10 億倍のそのまた 10 億倍にまで達する。このような莫大なエネルギーを生み出す宇宙加速器の機構は長年の謎である。超高エネルギー帯では、光はビッグバンの名残りである宇宙背景放射と衝突するため、銀河系程度の距離しか伝播できない。すなわち通常の電磁波による宇宙観測では銀河系外の遠方宇宙を超高エネルギー帯で視ることができないことが謎の解決を妨げてきた。背景放射や物質と衝突せずに遠方宇宙から飛来するニュートリノを捕捉することで、超高エネルギー宇宙を描画し、宇宙加速器の起源を探ることが本研究の目的である。

#### 【研究の方法】

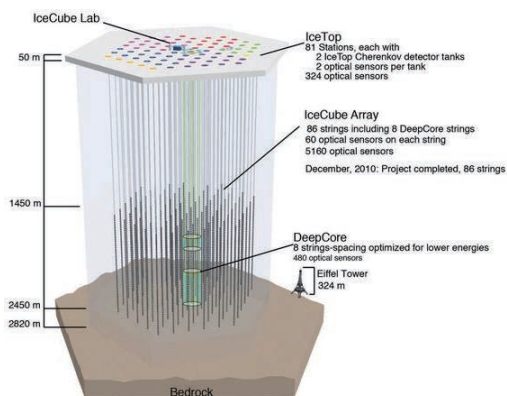


図 1 : IceCube 実験の概観

南極点直下の深氷河に 1 キロ立方の容積に特殊な光検出器を埋設し、宇宙から飛来する超高エネルギーニュートリノを探索・測定する IceCube (アイスキューブ) 実験によって超高エネルギーニュートリノの流量を測定するとともに、隣接する場所に IceCube に比して 10 倍以上大きな面積に検出器を埋設する拡張

実験(ARA 実験)を開始することで、検出事象数を上げ、宇宙加速器として働いている未知の天体の性質を探る。

遠方からも減衰せずに届くニュートリノの特質から、遠方すなわち過去においても活発な放射活動があれば、地球に飛来するニュートリノの総量は増える。この関係を逆算することで、測定されたニュートリノ事象数から、天体放射が宇宙の歴史と共にどのように変遷したかを推定することができる。ニュートリノによる宇宙探査の大きな強みの一つである。

#### 【期待される成果と意義】

現在 IceCube 実験により PeV (= $10^{15}$  eV) 領域で宇宙ニュートリノが 2 事象検出されている。この観測をさらに高エネルギー領域に拡張し 100 PeV 以上の十分な観測感度を達成することにより、超高エネルギー粒子放射を生み出す宇宙加速器天体の性質が理解される。もしニュートリノ流量が十分強ければ、加速器天体の同定も実現することができる。この何れもが、ニュートリノを媒介とする観測によってのみ得られる知見である。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ S.Yoshida and A.Ishihara, "Constraints on the origin of the ultrahigh energy cosmic rays using cosmic diffuse flux limits: An analytical approach", Phys.Rev. D **85**,063002 (2012)
- ・ IceCube Collaboration, "Constraints on the extremely-high energy cosmic neutrino flux with the IceCube 2008-2009 data", Phys. Rev. D **84**, 082001 (2011).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
160,900 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.icehap.chiba-u.jp>

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (数物系科学)



### 研究課題名 極低温・超高分解能レーザー光電子分光の開発と低温超伝導体の超伝導機構の解明

東京大学・物性研究所・教授

しん しぎ  
辛 埴

研究分野： 物性 I  
キーワード： 光物性

#### 【研究の背景・目的】

高温超伝導体の発見と超伝導機構解明の研究を通して、超伝導のメカニズムは従来型の BCS 機構を超えて多彩であることがわかってきた。角度分解光電子分光法 (ARPES) は物質の電子構造を直接観測する強力なツールであり、銅系・鉄系高温超伝導体の超伝導ギャップ対称性、擬ギャップ、バンド分散の折れ曲がりなどの微細電子構造を解明してきた。一方、 $T_c$  の低い非従来型超伝導体も多く、研究者の興味を引いてきたが、機構解明にとって重要となる超伝導ギャップ対称性を ARPES で直接観測することは不可能であった。これは、ARPES の分解能と最低到達温度が低温超伝導体の測定に不十分であるために他ならない。しかしながら、超伝導の多様性を解明し、室温超伝導への可能性も含めて新規超伝導体の設計・発見への指針を得るには、ARPES による低温非従来型超伝導体の研究 (図 1) を可能にすることが必須であると考えられる。

最近我々は、光電子分光器、ヘリウム 4 クライオスタット、そして世界初の高分解能準 CW 7 eV レーザーを独自に開発し、ARPES においてエネルギー分解能 70  $\mu\text{eV}$  と最低到達温度 1.5 K を達成した。これにより、 $T_c = 3.4$  K の鉄系超伝導体  $\text{KFe}_2\text{As}_2$  の超伝導ギャップのノード構造を明らかにした (Okazaki *et al.*, Science 2012)。レーザー励起型 ARPES により、未踏の低温超伝導体の電子状態研究が可能になりつつある。

#### 【研究の方法】

本プロジェクトでは、これまで培ってきた高調波レーザー、極低温クライオスタット、高分解能光電子の技術を大幅に発展させて、超低温高分解能 ARPES 装置を開発し、これまで測定が不可能であった低  $T_c$  のエキゾチック超伝導体の電子状態、特に超伝導ギャップ異方性を直接観測し、機構解明を行う。ヘリウム 3 クライオスタットを新たに開発し、また、高調波レーザーの高繰り返し化・CW 化を行うことにより、最高分解能 50  $\mu\text{eV}$ 、最低温 500 mK 以下を目指す。更に、非線形結晶 KBBF を 2 つ用いた 8 eV 高調波レーザー等の新規高調波レーザーの開発を行い、ブリュアンゾーン全体の測定を可能にする。

#### 【期待される成果と意義】

本プロジェクトにより達成される究極の ARPES 装置により、図 1 に示すエキゾチック超伝導体の機構について重要な知見が得られるはずである。また、トポロジカル超伝導体におけるマヨラナフェルミオンなど、全く新しい量子状態が実現している可能性も検証可能となる。多様な超伝導対形成機構の理解を進めることで、新規超伝導体の設計・発見にも大きな寄与をもたらすことが期待される。また、本研究による新たな真空紫外域の高調波レーザー開発は大きなチャレンジであり、光科学分野の新しい展開を生むことが期待される。

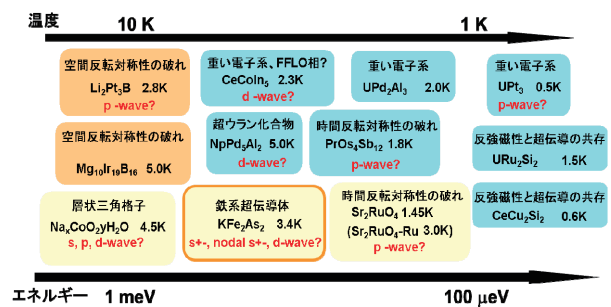


図 1 エキゾチック超伝導体

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Octet-line node structure of superconducting order parameter in  $\text{KFe}_2\text{As}_2$ , K. Okazaki, S. Shin *et al.*, Science **337** (2012) 1314-1319.
- Orbital independent superconducting gaps in iron pnictides, T. Shimojima, S. Shin *et al.*, Science **332** (2011) 564-567.

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
149,700 千円

#### 【ホームページ等】

<http://shin.issp.u-tokyo.ac.jp/>  
[shin@issp.u-tokyo.ac.jp](mailto:shin@issp.u-tokyo.ac.jp)

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (数物系科学)



### 研究課題名 トポロジカル絶縁体・超伝導体における新奇な量子現象の探求

大阪大学・産業科学研究所・教授

あんど ういち  
安藤 陽一

研究分野: 物理学  
キーワード: 半導体

#### 【研究の背景・目的】

トポロジカル絶縁体・超伝導体は最近数年で大きな注目を集めるようになった物質であり、その波動関数が形成するヒルベルト空間の位相幾何学的性質のために、表面に特殊なギャップレス状態 (トポロジカル絶縁体ではディラック粒子、トポロジカル超伝導体ではマヨラナ粒子) が現れるという顕著な特徴を持っている。その応用上の大きな可能性に加え、これらの物質は「トポロジカル量子現象」という新しいテーマを研究する舞台となるため、いま世界中で多くの物理学者がその研究に取り組み始めている。本研究は、これらの物質のバルク単結晶及びエピタキシャル薄膜の作製と、それらを用いた精密物性測定の方を、それぞれ世界トップレベルで行うことによって、トポロジカル物質に特有の新奇な量子現象を世界に先駆けて検証・解明することを目的とする。特にディラック電子系特有の物性の解明とマヨラナ粒子の検証に注力する。

#### 【研究の方法】

トポロジカル絶縁体が理論的に議論され始めたのは2005年頃からだ。研究代表者らは2008年からいち早くその物質開発と輸送特性測定に取り組み、この新しい分野をリードしてきた。本研究ではこれまでの実績を活かして、世界最高品質のバルク単結晶試料とMBE法薄膜試料を作製し、それを用いた極低温磁場中物性測定を行う。その実験を通して、トポロジカル絶縁体・超伝導体に特有の新奇な量子現象を探求する。

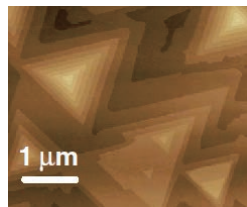
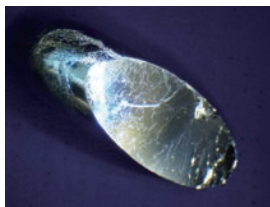


図1 トポロジカル絶縁体のバルク単結晶試料(左)とMBE法薄膜試料(右)

#### 【期待される成果と意義】

1) トポロジカル絶縁体におけるスピン偏極した表面ディラック電子系の物性解明  
特有のヘリカルなスピン偏極がもたらす無散逸のスピン流とそれに伴う新奇物性、ホール係数の半整

数量子化、ディラック粒子の相関による分数量子ホール効果など、トポロジカル絶縁体に宿るディラック電子系に関しては様々な新奇現象が予想されている。本研究では表面電子移動度の高い試料を用いた実験によって、これらの予想を検証する。

#### 2) トポロジカル表面状態における超伝導近接効果

トポロジカル絶縁体を介した超伝導電流の起源と性質を解明し、さらにこの近接効果系において量子化磁束中に現れると予測されている局在マヨラナ粒子の存在を明らかにする。

#### 3) トポロジカル電気磁気効果

トポロジカル絶縁体の表面状態にギャップを開けて試料全体を絶縁体状態にすると、磁場による電気分極の誘起及びその逆過程が、量子化された巨大効果として現れると予想されている。その実験的観測は、トポロジカル絶縁体がひき起こす全く新しい量子化現象の実証として極めて重要である。

#### 4) トポロジカル超伝導体候補物質の物性解明

研究代表者らが時間反転対称トポロジカル超伝導体である可能性が高いことを発見した  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  と  $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  の詳細な超伝導対称性を解明する。さらにトポロジカル超伝導体と普通の超伝導体のジョセフソン接合で期待される新奇な電流位相関係を観測し、表面マヨラナ粒子の存在を検証する。

上記の結果、量子力学におけるトポロジーの役割の理解が実証的に進展するとともに、トポロジカル量子現象という新しい概念の確立が進むことが期待される。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ A. A. Taskin, S. Sasaki, K. Segawa, and Y. Ando, Manifestation of Topological Protection in Transport Properties of Epitaxial  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  Thin Films, Phys. Rev. Lett. 109, 066803 (2012).
- ・ S. Sasaki, M. Kriener, K. Segawa, K. Yada, Y. Tanaka, M. Sato, and Y. Ando, Topological Superconductivity in  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , Phys. Rev. Lett. 107, 217001 (2011).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
171,700 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/fmc/>

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (数物系科学)



### 研究課題名 分子性物質の可制御性を用いた領域横断型研究と境界領域の物性開拓

東京大学・大学院工学系研究科・教授

かのだ かずし  
鹿野田 一司

研究分野: 物性物理学

キーワード: 分子性物質、強相関電子系、誘電物性、ディラック電子系

#### 【研究の背景・目的】

“More is different”で象徴されるように、粒子が多数集まると集団としての新たな存在が生まれる。そして、その振る舞いが極めて多様であることが、物質科学の成り立ちの根本にある。その多様な物性の間を繋ぐことができたとき、物質科学が一段と高い系統性を獲得することになるが、実験的に“異なる物性を繋ぐ”ことは容易なことではない。なぜなら、様々な物性はそれぞれに特徴的な物質の構造から生まれ、異なる構造を繋ぐことは一般的に難しいからである。近年、分子性物質が、強相関物理学をはじめとする様々な分野で興味ある物性を示し注目されているが、それらのいくつかは、類似の構造を持つ物質系から生まれていることに我々は注目した。

本研究では、分子性物質における誘電性、伝導性、磁性、半導体といった多岐に渡る領域での重要課題を取り上げ、有機物質の構造の可制御性を用いて、領域間の境界で新たな物性を開拓する。分子性物質の構造的な特徴を利用することで、既存の研究領域の間を往来する実験方法を確立し、領域間を横断して物性研究を行うことにより、境界領域に潜む未知の物性を発掘し物質科学における新たな研究の潮流を創出することを目指す。具体的には、以下の4つの課題に取り組む: (i) 電子分極強誘電体からイオン分極強誘電体への相制御および金属化の試み; (ii) 強相関電子系における電荷ガラス相の探索と新規物性の開拓; (iii) 強相関 Dirac 電子系の物理学の構築; (iv) スピン液体と超伝導体の境界領域における新規電子相の探索。

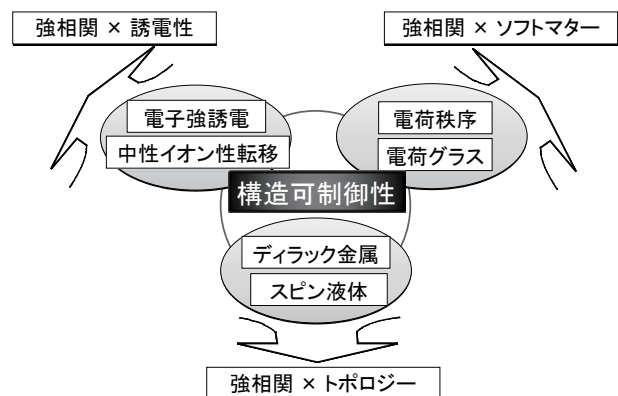
#### 【研究の方法】

異なるテーマにおいて興味ある物性を示しながらも類似構造を有する一連の分子性物質に対し、物理的/化学的に圧力を印加して構造を変化させ、電子相の質的な変化を追う。加圧法としては、従来の静水圧および一軸加圧に加え、両者を組み合わせる方式も取り入れる。

電子状態は、微視的手法と巨視的手法を併用して、複眼的に調べる。微視的な実験手法としては、スピン状態を核磁気共鳴 (NMR) で、電荷状態を核四重局共鳴 (NQR) で調べ、巨視的な手法として、磁化率、電子輸送特性及び誘電特性の測定を行う。特に、NMR 実験では、圧力セル中の単結晶試料を磁場方向に対して任意の方向に設定できるように、横磁場超伝導マグネットと組み合わせて実験を行う。

#### 【期待される成果と意義】

本研究の学術的な特色は、強相関電子系に発現する電荷ガラス、電子型量子強誘電性、金属-絶縁体転移、Dirac 電子相、スピン液体相、超伝導相というそれぞれが物理学の大きな問題となっているテーマに対し、分子性物質における分子配列の可制御性を利用することで、共通の舞台で横断的に研究することが可能となり、境界領域に潜む未知の物性を発掘し物性物理学に新しい潮流を生み出そうとする点にある。下の概念図に示すように、強相関物理学を核として、誘電性、ソフトマター、トポロジーといった分野に跨る学際的な物性科学が創成されることが期待される。



#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- K. Kanoda and R. Kato, “Mott physics in organic conductors with triangular lattices”, Annual Review of Condensed Matter Physics 2, 167 (2011).
- F. Kagawa, T. Sato, K. Miyagawa, K. Kanoda, Y. Tokura, K. Kobayashi, R. Kumai, and Y. Murakami, “Charge-cluster glass in an organic conductor”, Nature Physics 9, 419 (2013).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
168,500 千円

#### 【ホームページ等】

[http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/kanoda\\_lab/](http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/kanoda_lab/)

## 【基盤研究 (S)】

### 理工系 (数物系科学)



#### 研究課題名 重い電子の人工制御

京都大学・大学院理学研究科・教授

まつだ ゆうじ  
松田 祐司

研究分野: 数物系科学

キーワード: 重い電子系化合物、強相関電子、人工超格子

#### 【研究の背景・目的】

f 電子を含む重い電子系化合物は、新奇超伝導状態や量子臨界現象など未解明の興味ある電子状態の宝庫である。我々は最近希土類原子を原子 1 層単位で制御した人工超格子や超薄膜を作製する技術を世界で初めて確立した。

本研究の目的はこの独自の技術を用いて、自然界には存在しない強相関電子状態を創製することである。さらにバルクの結晶では実現できなかった原子レベルで平坦かつ清浄な表面を実現し、世界最高レベルのエネルギー分解能をもつ極低温走査トンネル顕微鏡でその電子状態を「その場観察」する。このように本研究は、究極に強い電子相関をもつ人工 2 次元電子系において種々の異常な電子状態やエキゾチック超伝導状態を実現し、その解明を行うものである。

#### 【研究の方法】

超高真空チャンバー内で、分子線エピタキシー (MBE) 法により異なる化合物を交互に積層成長させた人工超格子を作製し、新奇な重い電子状態を創製する。さらに作製した試料を大気に晒すことなく超高真空中で、極低温走査トンネル顕微鏡 (STM) に移動し、300 mK までの温度領域で電子状態を「その場観察」する。

また原子層程度の厚みしか持たない希土類化合物の超薄膜を作製、微細加工し新奇な重い電子状態を人工的に創り出す。作製した超格子や超薄膜は、極低温・強磁場まで輸送現象、磁気トルク、高周波応答等の測定を行うとともに、国内外のグループと協力して核磁気共鳴、THz 分光、光電子分光などの様々な実験手段で多角的にその電子状態を調べる。

#### 【期待される成果と意義】

本プロジェクトにより 2 つの極限物を世界に類を見ないシステムにより融合させ、自然界には存在しない新奇な強相関電子の状態を創出できるようになるだけでなく、これまで理論的には予測されていたが実現されたことのない新しい超伝導状態を実現できるようになる。

極限的な 2 次元強相関電子系の研究は、例えば量子ゆらぎや強相関といった物理学における基本問題

へのアプローチであり、さらに高温超伝導に代表される様々な物質で実現している強相関効果の理解といった普遍的問題を含む。また本研究における様々な新奇量子状態の実現は、ナノサイエンスへの波及効果だけでなく、例えば冷却原子、高密度原子核、中性子星といった、高エネルギー物理や宇宙物理学への波及効果も期待できる。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- "Anomalous upper critical field in CeCoIn<sub>5</sub>/YbCoIn<sub>5</sub> superlattices with a Rashba-type heavy fermion interface"  
S. K. Goh, Y. Mizukami, H. Shishido, D. Watanabe, S. Yasumoto, M. Shimosawa, M. Yamashita, T. Terashima, Y. Yanase, T. Shibauchi, A. I. Buzdin, and Y. Matsuda  
Phys. Rev. Lett. **109**, 157006 (2012)
- "Extremely strong-coupling superconductivity in artificial two-dimensional Kondo lattices"  
Y. Mizukami, H. Shishido, T. Shibauchi, M. Shimosawa, S. Yasumoto, D. Watanabe, M. Yamashita, H. Ikeda, T. Terashima, H. Kontani, and Y. Matsuda  
Nature Physics **7**, 849-853 (2011);
- "Tuning the Dimensionality of the Heavy Fermion Compound CeIn<sub>3</sub>"  
H. Shishido, T. Shibauchi, K. Yasu, T. Kato, H. Kontani, T. Terashima, and Y. Matsuda  
Science **327**, 980-983 (2010).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
187,900 千円

#### 【ホームページ等】

<http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.php>



## 【基盤研究 (S)】

理工系 (数物系科学)



### 研究課題名 光格子中イッテルビウム量子気体の究極的操作・観測が拓く新奇量子凝縮相研究の新展開

京都大学・大学院理学研究科・教授 たかはし よしろう  
高橋 義朗

研究分野: 量子エレクトロニクス

キーワード: 原子物理、レーザー冷却、光格子、量子情報

#### 【研究の背景・目的】

レーザー冷却による量子縮退気体の研究の勢いはとどまることを知らぬほど進展が著しい。その中でも、特に注目を集めている重要な研究テーマとして、本分野における世界的な一大アジェンダとなっているものに、光格子と呼ばれる周期的なポテンシャルにナノケルビン台の極低温原子気体を導入した系を用いた量子多体系の量子シミュレーションの研究を挙げることができる。ここで、制御性のよい量子系を用いて別の量子系をシミュレートすることを、ファインマンに倣い、量子シミュレーションと呼んでいる。光格子中の冷却原子は、格子点間のトンネリング項と格子点内での原子間相互作用項の2つの項からなるハバードモデルで記述されることが知られている。このハバードモデルは、遍歴磁性や異方性超伝導などの強相関電子系を記述する凝縮系物理にとって大変重要なモデルであり、光格子中の冷却原子系は、極めて制御性の良いハバードモデルの新たな実験系として、大変注目を浴びている。

以上のような背景のもと本基盤研究 (S) では、我々のグループがこれまで世界をリードしてきた超低温 2 電子系原子の系を、光格子に導入して、冷却原子を用いた量子凝縮相に関する物性研究を格段に発展させることを目的とする。

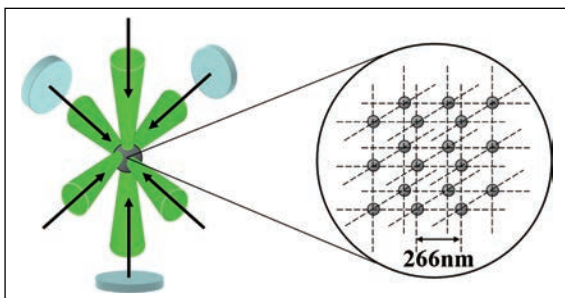


図1 光格子

#### 【研究の方法】

具体的には、イッテルビウム (Yb) 原子量子気体のハバードモデルを実装し、“異なる電子軌道間クーパー対のフェルミ超流動の実現とスピン軌道相互作用の導入によるトポロジカル超流動の実現”、“フェルミ同位体  $^{173}\text{Yb}$  を用いた SU(6)量子磁性の解明”、“ボース・フェルミ混合系における対向流超流動の観測”、“「リーブ格子」で誘起される新規磁性相の解

明”、“量子混合気体によるアンダーソン・ハバードモデルの研究”を行う。さらに、光格子の超高空間分解能「その場」観測を実現し、量子凝縮相の研究における全く新しい可能性を開拓する。

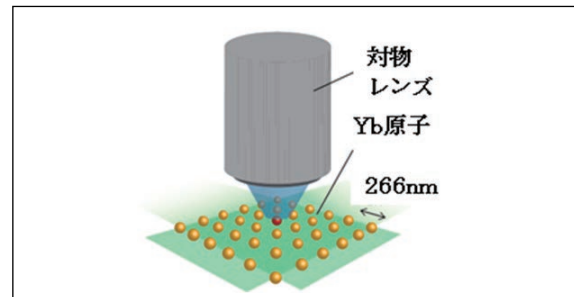


図2 空間分解観測

#### 【期待される成果と意義】

上記の具体的な本研究課題設定はすべて、独創的なものであり、固体系での難問に対応する。これを本研究により実現・解明することにより、当該分野の一大アジェンダである量子シミュレーション研究が飛躍的に発展するのは間違いない。さらには凝縮系理論・計算物理などへの学術的な波及効果や、物質設計に対する重要な指針の提示など、科学技術・産業に幅広い意味でインパクト・貢献が期待できる。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- An SU(N=6) Mott insulator of an atomic Fermi gas realized by large-spin Pomeranchuk cooling”, S. Taie, S. Sugawa, R. Yamazaki, and Y. Takahashi, **Nature Physics**, **8**, 825(2012.9.23)
- “Interaction and filling induced quantum phases of dual Mott insulators of bosons and fermions”, S. Sugawa, K. Inaba, S. Taie, R. Yamazaki, M. Yamashita, and Y. Takahashi, **Nature Physics**, **7**, 642-648(2011.6.26)

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度—平成 29 年度  
165,400 千円

#### 【ホームページ等】

<http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

## 【基盤研究 (S)】

### 理工系 (数物系科学)



## 研究課題名 下部マントルの化学組成と初期地球の分化過程

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授

いりふね てつお  
入船 徹男

研究分野: 地球惑星科学

キーワード: 地球内部ダイナミクス、鉱物物性、超高压実験

### 【研究の背景・目的】

地球深部科学における最大の未解決問題の一つは、下部マントルの化学組成である。過去数十年に渡り、下部マントルは上部マントルと同様なパイロライト的組成なのか、あるいはよりシリカに富んだコンドライト（またはペロブスカイト）的な組成か論争が続いている。下部マントルは地球全体の体積の55%を占める最大の領域であり、その化学組成を明らかにすることは、地球全体の化学組成を知る上で重要である。

地球深部の物質を探る上で、最も重要な観測に基づくパラメーターは地震波速度と密度である。密度に関しては高温高压下での X 線その場観察実験により、下部マントル深部領域まで精度良く決定が可能になっている。一方で、超音波測定と X 線その場観察実験を組み合わせることにより、下部マントル最上部領域での弾性波速度精密測定も可能になりつつある。本研究では、下部マントルの化学組成を明らかにすることを目的とし、候補物質の下部マントル領域下での密度や弾性波速度、また相転移にともなう元素分配実験を行う予定である。

### 【研究の方法】

超合金・焼結ダイヤモンド・ナノ多結晶ダイヤモンド（ヒメダイヤ）・単結晶ダイヤモンドをアンビルとして使い、圧力や温度領域また目的に応じた超高压装置と、放射光を利用した X 線その場観察や物性測定実験を下部マントル領域に対応する 24 万気圧～136 万気圧程度の圧力・2000～3000K 程度の温度でおこなう。また急冷回収実験も併用し、得られた試

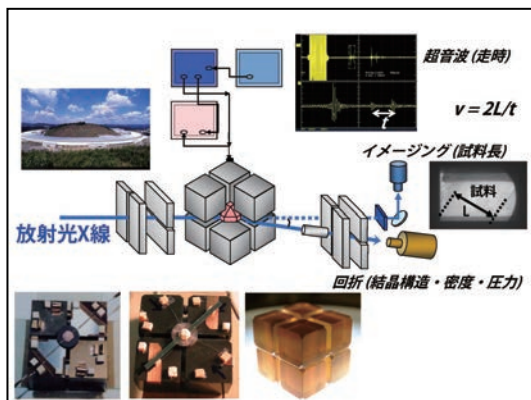


図1 高温高压下での弾性波測定と様々なアンビル

料の SEM・TEM 分析を始めとした化学組成や微細組織の観察を行い、相転移や融解に伴う共存相の化学組成の精密決定をおこなう。

### 【期待される成果と意義】

下部マントル全域に対応する圧力温度条件のもとでの、下部マントル候補物質であるパイロライトなどの相転移・密度・弾性と、共存相および金属鉄間の元素分配の精密決定に基づき、下部マントルの化学組成を明らかにする。これにより、マントル対流の様式（2層対流か1層対流か）や地球の始源物質の化学組成、またマグマオーシャンの深さと、その固化に伴う分化過程の解明が期待される。

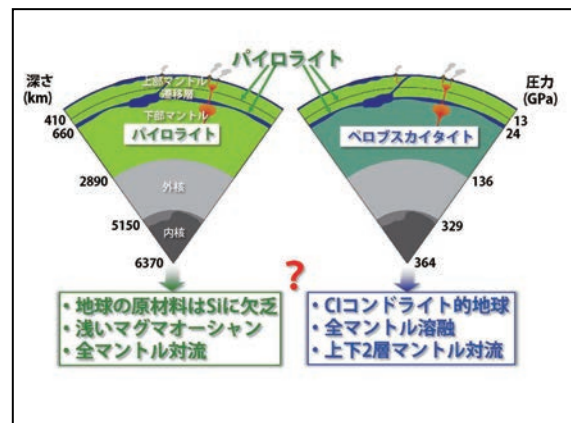


図2 下部マントル化学組成の2つのモデル

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T. Irifune, et al., Iron partitioning and density changes of pyroxene in Earth's lower mantle, Science 327, 193-195, 2010.
- ・ T. Irifune, et al., Sound velocities of majorite garnet and the composition of the mantle transition region, Nature, 451, 814-817, 2008.

### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度～29 年度  
167,800 千円

### 【ホームページ等】

<http://www.ehime-u.ac.jp/~grc/>  
[irifune@dpc.ehime-u.ac.jp](mailto:irifune@dpc.ehime-u.ac.jp)



研究課題名 光電荷分離の基礎学理構築と新展開

京都大学・物質-細胞統合システム拠点・教授

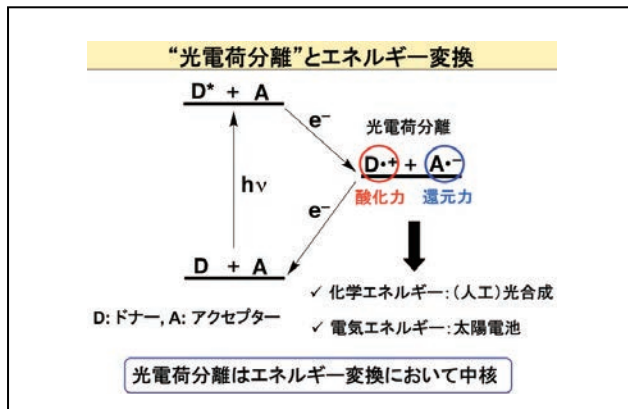
いまほり ひろし  
今堀 博

研究分野： 有機化学、光化学

キーワード： 光誘起電子移動、ポルフィリン、ナノカーボン材料、有機太陽電池、光遺伝子工学

【研究の背景・目的】

光電荷分離では分子が光を吸収し生成した励起状態において、電子供与体 (D、ドナー) から電子受容体 (A、アクセプター) へ電子が移動し、ドナーラジカルカチオンとアクセプターラジカルアニオンからなる電荷分離状態を生成する。前者は強い酸化力を、後者は強い還元力を有するため、物質変換に用いれば人工光合成、電気エネルギー変換に用いれば太陽電池となる。従って、光電荷分離は太陽エネルギー変換において重要な中核となる過程であると言える。



一方、我々は光電荷分離の研究において、数々の世界記録、新概念を提唱し、研究を先導してきた。(1) フラーレンを利用し、光合成をまねた電荷分離寿命として世界最高値を達成した。(2) D-A 連結分子を金属電極上に自己組織化した光電変換系で光電流発生効率の世界最高値を実現した。(3) ボトムアップ型の新規太陽電池を創製した。(4) 色素増感太陽電池高効率化のための新規提案を行った。

しかしながら、光電荷分離に関しては未解明の重要な課題が残っている。(1) 我々は D-A 間に強い相互作用があるポルフィリン・フルーレン連結分子において、励起状態からまず励起錯体 (エキシプレックス) が普遍的に生成し、そのまま速やかに基底状態に失活するか、あるいは電荷分離状態に移行することを初めて報告している。(2) ポルフィリンを用いた色素増感太陽電池において、酸化チタン電極上の色素の傾き角、電子移動特性、太陽電池特性に良好な相関があることを初めて見だし、かつ光電荷分離状態からの速い失活が一部起こることを明らかにした。また、有機薄膜太陽電池においても初期の光電荷分離状態から一部速い失活が起こることも報告さ

れている。このように、光電荷分離の初期過程において、基底状態に一部失活することは人工光合成、有機太陽電池などの高効率化において深刻な問題であるが、その原因はよくわかっていない。

そこで本研究では、光電荷分離状態を高効率で利用できる学理を確立し、有機太陽電池などの太陽エネルギー変換系の高効率化、および細胞機能制御へと展開していくことを狙う。すなわち、D-A 界面において、D-A 相互作用の指標である電子カップリングを強い状態から弱い状態へと連続的に変化させることで、エキシプレックス形成と電荷分離状態生成および電荷分離寿命とその生成収率の関係を系統的に明らかにする。それによって、今まで系ごとに違った“光電荷分離状態”に関する統一した学理を構築することを目指す。

【研究の方法】

具体的には次の項目を検討する。(1) 単純な D-A 連結分子において、架橋部位を工夫することで系統的に電子カップリングを変化させ、高効率な光電荷分離状態生成の学理を構築する。(2) 有機薄膜太陽電池への展開を指向し、より複雑な D-A 界面で電子カップリングを系統的に変化させることで、光電荷分離状態の高効率利用のための学理を構築する。(3) 光電荷分離状態の異分野への応用として、生きた細胞の光機能制御 (光遺伝子工学) を目指す。

【期待される成果と意義】

本研究によって電子移動化学に関する基礎的学理が構築できるだけでなく、高効率な太陽エネルギー変換の実現や光電荷分離を用いた新規な細胞工学への展開が期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Umeyama and H. Imahori, *J. Phys. Chem. C* (Feature Article) **2013**, *117*, 3195-3209.
- Y. Mori, H. Imahori et al., *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 6092-6095.

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
167,300 千円

【ホームページ等】

[http://www.moleng.kyoto-u.ac.jp/%7Emoleng\\_05/imahori@scl.kyoto-u.ac.jp](http://www.moleng.kyoto-u.ac.jp/%7Emoleng_05/imahori@scl.kyoto-u.ac.jp)

研究課題名 超ポルフィリン化学の新展開-新規 $\pi$ 電子系の開拓



京都大学・大学院理学研究科・教授

おおすか あつひろ  
大須賀 篤弘

研究分野: 有機化学  
キーワード: 構造有機化学

【研究の背景・目的】

ポルフィリンは、その金属錯体の多彩な触媒機能に加え、優れた電気化学的・光化学的な特性のため、広範な分野で長年にわたり研究されており、その化学は相当に成熟したレベルにある。本研究では、当研究室で独自に開発してきた「単分散巨大ポルフィリンアレー」や「電子共役が高度に拡張したポルフィリンテープ」や「環拡張ポルフィリン」や「環縮小サブポルフィリン」や「メビウス芳香族性分子」「メビウス反芳香族性分子」など、通常のポルフィリン化学を超えた「超ポルフィリンの化学」をより一層深化・発展させて、有機化学、構造化学、錯体化学、光化学、触媒化学などの広範な分野で真にインパクトを持つ概念的に新しい共役電子系を開拓する。

【研究の方法】

近年当研究室では[26]ヘキサフィリンとポルフィリンがメゾ-メゾ結合したハイブリッド分子を合成し、更に酸化してハイブリッドテープに変換することに成功している。酸化的二量化を繰り返し、伸張限界に挑戦すると同時に、酸化的縮合により、完全共役平面型ハイブリッドテープを合成し、そのHOMO-LUMO Gap がどこまで低下するか見極める。

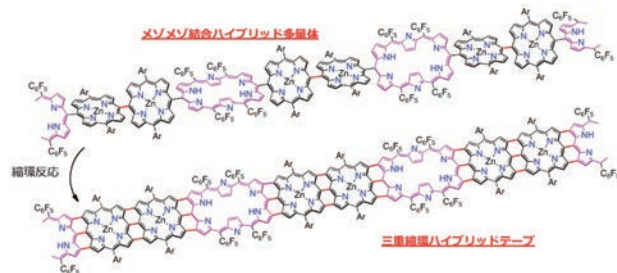


図1 ハイブリッド多量体、テープの合成

チオフェンやピロールで内部架橋したヘキサフィリンを合成し、[18]ポルフィリン電子系と[26]ヘキサフィリン電子系のデュアルな芳香族系を持つ分子を実現する。全体の共役電子系に対して、内部架橋部位がどの程度傾くかによりデュアルな芳香族系の相対的な寄与を変化させ、それを吸収スペクトルや単結晶 X 線結晶構造解析により明らかにする。

最近、メゾプロモサブポルフィリンの還元的カップリングにより、メゾ-メゾ結合サブポルフィリン 2 量体の合成に成功した。この化学を拡張し、縮環サブポルフィリン二量体など、 $\pi$ 拡張したサブポルフィリン類の合成と構造、物性を明らかにする。

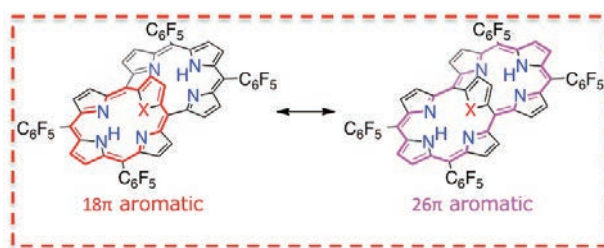


図2 アヌレノアヌレン分子

その他に、cycloparaphenylenes(CPP)のポルフィリン版ともいふべき、環状ポルフィリン多量体や、高効率な触媒能を持つポルフィリンピンサー化合物の開発も行う。

【期待される成果と意義】

ポルフィリノイドの $\pi$ 電子系は非常に柔軟であり、外部摂動に対し敏感に応答し、新しい物性や反応性を示す。こうした点に着目して、我々は世界に先駆けて新規なポルフィリノイドの開発を行ってきた。これらの研究の学問的意義や独創性の高さは既に国際的に高く認知・注目されているが、これをさらに深化させた「超ポルフィリンの化学」を推進することで、アヌレノアヌレン型デュアル芳香族性やサブポルフィリン多量体による凸面型 $\pi$ 共役系やメビウス三重ねじれ芳香族性などの概念的に新しい共役電子系を開拓する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- 北野匡章, 大須賀篤弘 他 “Effective *meso*-Fabrications of Subporphyrins” *Angew. Chem. Int. Ed.* **51**, 5593-5597 (2012)
- 森裕貴, 田中隆行, 大須賀篤弘 “Fused porphyrinoids as promising near-infrared absorbing dyes” *J. Mat. Chem. C* **1**, 2500-2519 (2013)

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度-29 年度  
97,400 千円

【ホームページ等】

<http://kuchem.kyoto-u.ac.jp/shuyu/>  
[osuka@kuchem.kyoto-u.ac.jp](mailto:osuka@kuchem.kyoto-u.ac.jp)

## 【基盤研究 (S)】

理工系 (化学)



### 研究課題名 化学制御 Chirality が拓く新しい磁性

広島大学・大学院理学研究科・教授 井上 克也 (いのうえ かつや)

研究分野: 機能物性化学

キーワード: キラル磁性, スピントロニクス, スピン位相, マルチフェロイクス

#### 【研究の背景・目的】

天然に産出する磁鉄鉱の強磁性は、人類が最も早く知った物性の一つです。右手と左手の関係に代表される掌性 (Chirality、キラリティ) も哲学や科学の問題として非常に古くから考えてこられた形に関する問題です。本研究の目的は、掌性を持つ磁性体に関する科学原理を明らかにすることです。

科学的には 1884 年にケルビン卿が chirality の概念を提唱し、その後 19 世紀前半のアラゴからパステールへと受け継がれ、結晶・分子の chirality と自然光学活性の研究が合流して進展してきました。しかし、ともに光の偏光面が回転する現象であり、M. ファラデーが見出した磁気光学効果との関係が明らかにされたのは、20 世紀後半になって、chirality と磁場の協奏効果として磁気不斉二色性 (MChD) が量子論的に予言されたのが初めてです。このように、100 年以上に渡って連綿と続く chirality 研究の歴史の中で、底流にある「化学と物理」、「構造 chirality と磁気 chirality」といった対概念を包摂統合する研究の流れを創るため、2006 年度より本研究計画代表者を中心とする化学・物理研究者の連携によって 2 つの基盤 A を実施しました。Chiral 磁気構造では、スピンの巻き方が定まるため、らせんピッチが巨視的な秩序パラメータとなりえます。このため、スピンの位相を巨視化することができます。本研究計画ではこれを新たな視点とし、「結晶と磁性の chirality」研究の第二段階として《スピンの位相をマクロスケールで制御する》研究の流れを確立します。また、物質科学との関係ではスピン自由度の情報を伝える技術《スピントロニクス》が、現在活発な研究分野となっていますが、Chiral 磁性結晶は、新しいスピントロニクス研究の舞台を提供します。

#### 【研究の方法】

本研究は、スピン位相のマクロ制御による機能性材料の創製を目指す新しい試みです。研究計画では、化学 (井上 (広島大学)・菊地 (首都大学東京)・美藤 (九州工大)) と物理 (秋光 (青山学院大学)・岸根 (放送大学)・戸川 (大阪府立大学)・鳥養 (山梨大学)・松浦 (東京大学)) の連携をさらに深め、この分野を大きく発展させます。具体的な研究内容を以下に示します。

- (1) 分子性・無機 chiral 磁性体の物質設計・制御戦略の確立
- (2) 結晶・磁気 chirality の定量化
- (3) 電場・磁場・応力を外部パラメータとする

chirality のコントロール

(4) 新たなスピントロニクス分野の開拓

#### 【期待される成果と意義】

電磁気の基本要素に磁場、電場と光があります。それぞれの要素はスピン、電荷と光子であり、電荷の位相がマクロサイズで揃った現象が超伝導、光子の位相が揃ったものがレーザーに相当します。今までスピンの位相がマクロレベルに揃った例は見つかっていませんでしたが、我々の Chiral 磁性体で、最近発見しました。右手と左手が本質的に混ざりあわないのが原因と考えられます。このスピン位相がマクロスケールで揃った状態は、未知の様々な協同現象が見つかる可能性が高いと考えられ、本研究は基礎的見地から研究して行きます。

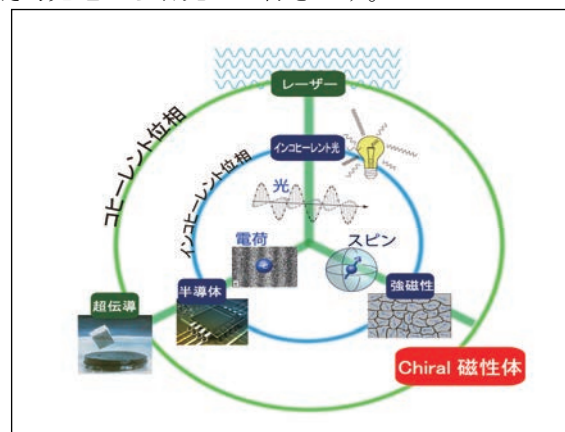


図1 光・電荷・スピンの位相とコヒーレンス

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Chiral Magnetic Soliton Lattice on a Chiral Helimagnet, Y. Togawa, et. al., Phys. Rev. Lett., 108, 107202 (2012)
- Giant nonlinear magnetic response in a molecule-based magnet, Mito Masaki et. al., Phys. Rev. B, 79 12406 (2009)
- K. Inoue and J. Kishine, Chapter 4: "Magnetism and Chirality" Multifunctional Molecular Materials, Pan Stanford Publishing Group, 2012

#### 【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
185,100 千円

#### 【ホームページ等】

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/kotai/kxi@hiroshima-u.ac.jp>



研究課題名 ラセン構造からなるナノ空間の精密制御を基盤とする革新的キラル材料の創製

名古屋大学・大学院工学研究科・教授 やしま えいじ  
八島 栄次

研究分野： 高分子化学

キーワード： ラセン構造、らせん空間、不斉触媒、不斉識別

【研究の背景・目的】

DNA やタンパク質等の生体高分子の多くはラセン構造に代表されるユニークな高次構造を形成し、生命活動に不可欠の高度な機能を発現している。これに学び、類似のラセン構造の構築を目指した研究は、ここ20年の間に目覚ましい進歩を遂げ、多くの分子や超分子、高分子についてラセン構造の制御が可能になりつつある。一方、生体内で酵素が発現する精緻な分子(キラル)認識や不斉反応を可能にするキラル認識場・不斉反応場、膜タンパク質による物質の取り込み・輸送、情報伝達で重要な役割を担うチャンネル構造等は、いずれも“柔らかい”タンパク質からなる“しなやかな”ナノ空間で構築されている。すなわち、「ナノ空間」の精密制御技術の開発は、次世代の精密合成化学・材料開発に革新をもたらす中核的分子技術になりうる可能性を秘めている。

以上の背景を踏まえ本研究では、ラセン構造の最大の特長である剛直性としなやかさをあわせ持つ「ラセン空間」を自在に制御可能な分子設計・精密合成技術を確立し、キラルなラセン状ナノ空間を特異な不斉場を用いた、従来法では困難な不斉反応や一次構造・二次構造を制御した重合反応の開発、キラル分子の効率・省エネルギー分離を可能にするキラル充填剤・キラル分離システムの開発を目指す。さらに、ラセン構造を伸縮自在なナノスプリングとしてとらえ、外部刺激を駆動力とした刺激応答性材料の開発、二重ラセンの伸縮に由来する不斉反応・不斉識別の制御をも目指す。

【研究の方法】

申請者が10数年来築いてきた独自の研究領域である人工ラセン超分子・高分子研究で培った基礎から応用に至るまでの膨大な知見を集約し、(1)本研究の鍵となる「ラセン空間」を形成しうる分子・超分子・高分子の設計と合成を行う。生成ラセン高分子の構造は、円二色性(CD)やNMR、光散乱、X線構造解析や原子間力顕微鏡(AFM)等を用いて調べる。(2)(1)で合成したキラルなラセンナノ空間を特異な反応場として利用した触媒的不斉反応や立体特異的重合反応を行い、反応性・不斉選択性、分子量やその分布におよぼすラセン構造・ラセン空間の影響について詳細に検討する。動的二重ラセンも新たに合成し、様々な金属存在下、不斉反応を行い高い不斉選択性の発現を目指す。(3)(1)で合成したキラルなラセンナノ空間をキラル分離場を用いた様々のラセミ体のキラル識別や光学分割を行い、

実用的なキラル材料の開発を行う。(4)スピロボレートで連結された二重ラセンヘリケートがナトリウムイオンの出し入れにより、ラセンがバネのように2倍以上に可逆的に伸び縮みし、光学的に純粋なヘリケートを用いた実験より、この分子スプリング運動がラセミ化をまったく伴わない極めて特異な伸縮運動であることを見出している。そこで、ラセン中央部や末端に金属配位能のあるピピリジル基やピリジル基を新たに導入し、ヘリケート内部の金属の出し入れに由来するラセンのバネ(伸縮)運動を活用した不斉反応・不斉識別能の制御(ON-OFF)、刺激応答性材料の創製を目指す。

【期待される成果と意義】

「ラセン」をキーワードにした研究は世界中で精力的に展開されているが、ラセン構造に由来する機能創出については、現時点でもその潜在的能力が十分に発揮されていない。加えて、ラセン構造に特長的なナノ空間、バネ運動に焦点をあて、新たな反応・識別・分離の場、モチーフとして利用しようとする研究は世界的に見ても例が無く、これまでのラセン研究で手つかずの研究分野であると言える。その実現は、医薬を含むキラル新物質創製のための独創的分子技術の確立に繋がるだけでなく、ラセン構造の特長を最大限に活用した革新的キラル材料の創製を可能にする。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- H. Yamada, Z.-Q. Wu, Y. Furusho, E. Yashima, Thermodynamic and Kinetic Stabilities of Complementary Double Helices Utilizing Amidinium-Carboxylate Salt Bridges, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 9506-9520 (2012).
- K. Miwa, Y. Furusho, E. Yashima, Ion-Triggered Spring-like Motion of a Double Helicate Accompanied by Anisotropic Twisting, *Nature Chem.*, **2**, 444-449 (2010).

【研究期間と研究経費】

平成25年度-29年度  
187,500千円

【ホームページ等】

<http://helix.mol.nagoya-u.ac.jp/>



研究課題名 自己組織化に基づく機能性高分子ナノシステムの開発

九州大学・大学院工学研究院・教授 きみづか のぶお  
君塚 信夫

研究分野： 高分子化学

キーワード： 自己組織化、金属錯体、誘電性、アップコンバージョン、ナノ界面

【研究の背景・目的】

自己集積型高分子は、構成元素の多様性、高次構造や機能の設計性など、従来の共有結合高分子を超えるポテンシャルを有する。有機分子や金属錯体の自己組織化に基づいてエネルギーランドスケープが分子制御された自己集積型高分子を設計・構築する方法論を開拓することは、それらを社会的要請の高い課題解決に応用して、グリーンイノベーションにつなげるための基盤となる。研究代表者は、これまで有機分子、生命分子、金属イオンや金属錯体を構成要素とする新しい自己組織化ナノ材料の開発を進めてきた。本研究では、“分子の自己組織化”にエネルギーランドスケープ制御の概念を導入して、科学技術的要請の高い①フレキシブルなナノ誘電材料や、②近赤外 (NIR) 光のエネルギー変換 (アップコンバージョン) 材料をはじめとする、新しい自己集積型高分子を設計・開発するための方法論と基礎科学の樹立を目指す。

【研究の方法】

分子システム機能の観点から自己組織化技術をイノベーションするために、以下の研究を推進する。

(1) 自己集積型高分子錯体の新しい構造・機能：自己組織性一次元金属錯体の開発においてこれまで蓄積してきた知見を基に、ナノから巨視的レベルにいたる階層構造やドメイン構造の制御をはかる。

(2) 電場応答型高分子錯体の設計と開発：脂溶性金属錯体を、双極子を有する架橋配位子 (分子シャフト) で配位連結した新しい高分子錯体を開発する。金属錯体-分子シャフト軸配位結合の回転運動を溶液系  $^1\text{H-NMR}$  や薄膜の誘電特性から評価し、エネルギーランドスケープを分子レベル制御するための分子設計指針を明らかにする。

(3) 超分子アップコンバージョンシステム：分子の自己組織化に基づき、近赤外光を効率良く捕集し、三重項-三重項消滅 (TTA) 機構に基づいて光エネルギー変換する新しい分子システムを開発する。光吸収系として Pd(II) ポルフィリン錯体など、また発光素子としてアントラセンなどの芳香族発色団を用い、溶液系における分子組織化により三重項エネルギー移動を促進する。これにより、エネルギーランドスケープの分子集積制御に基づく光アップコンバージョン効率の向上をはかる。

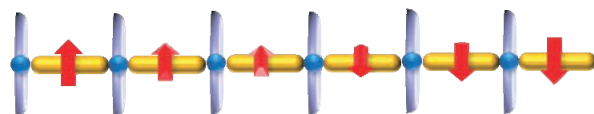


図1 金属錯体と双極性軸配位子 (分子シャフト) の自己組織化により形成される自己集積型高分子

(4) ナノ界面における分子集積機能：最近、藤川 (連携研究者、九州大学カーボンニュートラル・エネルギー研究所) により、シリコンなどの基板表面に、高さ・厚みの制御された金ナノフィン構造を一定間隔で構築することにより、近赤外光が界面にトラップされることが見いだされた。この光トラップ現象が、光アップコンバージョンシステムに及ぼす効果を明らかにし、トップダウンアプローチと自己組織化の融合に基づくナノ界面のエネルギーランドスケープ制御を目指す。

【期待される成果と意義】

本研究では自己組織化に基づき、電場ならびに光応答機能を有する集積型高分子錯体と、そのエネルギーランドスケープ制御手法を開発する。さらに、トップダウン手法により構築される金ナノフィン構造界面の光増強場との相乗効果を発現させる。革新的な集積型高分子システムの創製、ナノ界面科学との融合領域開拓は、基礎学術のみならず、持続的社会に必須なエネルギー制約の克服に資する成果に繋がるものと期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. R. Kuwahara, S. Fujikawa, K. Kuroiwa, N. Kimizuka, *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, *134*, 1192-1199.
2. J. Liu, M-a. Morikawa, N. Kimizuka, *J. Am. Chem. Soc.*, **2011**, *133*, 17370-17374.

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
192,000 千円

【ホームページ等】

<http://www.chem.kyushu-u.ac.jp/~kimizuka/>

研究課題名 光エネルギー変換系におけるナノ触媒の単一分子化学



大阪大学・産業科学研究所・教授 まじま てつろう  
真嶋 哲朗

研究分野: 光化学

キーワード: 太陽光エネルギー、光触媒、単一分子蛍光イメージング

【研究の背景・目的】

太陽光エネルギーを化学・電気エネルギーに変換できる光エネルギー変換系の実用化には、ナノスケールの不均一界面で起こっている分子間相互作用や化学反応過程を理解し、構成要素の構造を最適化する必要がある。

本研究では、ナノサイズの触媒 (ナノ触媒) 上で起こる光エネルギー変換過程を、単一粒子および単一分子レベルで分光観測し、従来のバルク試料を対象とした測定では得ることができない反応の空間的・時間的不均一性に関する知見を獲得することで、不均一界面反応における新しい化学的概念を創出する。さらに、超高活性なナノ触媒の有する構造的特徴や反応の特異性を見出すことで、太陽光を最大限に活用できる光エネルギー変換系の設計指針を提案する。

【研究の方法】

光エネルギー変換系における分子間相互作用や化学反応過程を明らかにするため、ナノ触媒および蛍光プローブ分子の設計・合成、アンサンブルおよび単一粒子・単一分子レベルでの反応解析、量子化学計算などを用いた反応機構の理論的検証を行う。

単一分子蛍光イメージング法による反応観測

触媒反応を選択的に検出するため、選択性の高い反応部位 (蛍光消光部位) を有する非蛍光性色素をプローブ分子とする。光照射などによって触媒反応を誘起し、生じた蛍光性生成物 1 分子からの発光を顕微分光システムで観測する。蛍光輝点を二次元ガウス関数によって解析することで、反応サイトの空間分布を数十ナノメートルの精度で決定することが可能である。また、蛍光輝点の発生頻度や発光持続時間の定量解析から、粒子毎の反応ターンオーバー速度、吸着・解離のダイナミクス、界面電子移動速度、反応の時間揺らぎなど、従来のバルク測定では得ることができない知見を獲得する。

反応基質 (非蛍光性) 生成物 (蛍光性)

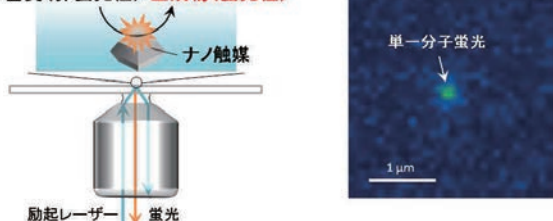


図1 光触媒反応の単一分子蛍光イメージング

ナノ触媒における光エネルギー変換機構の解明

平成25年度は、半導体光触媒に焦点を絞ってデータの蓄積と解析を行い、触媒構造と反応活性の関連性を検証する。同時に、半導体ナノ材料と均一系触媒の複合化に着手し、次年度以降に行う触媒活性評価と構造最適化につなげる。また、平成26年度には、実際の反応環境下における均一系および不均一系触媒の活性評価を開始する。さらに、平成27年度以降は、二酸化炭素光固定化反応の単一分子観測へと進展させ、最終年度にはナノ触媒を基盤とする光エネルギー変換過程の系統的な理解に到達する。

具体的には、二酸化チタンをはじめ、バナジウム酸ビスマスなど可視光照射下でも光触媒活性を示す金属酸化物ナノ・マイクロ材料の合成を行う。新たに開発する酸化還元反応検出用蛍光プローブを用い、光触媒反応の単一分子蛍光観察を行う。蛍光プローブの濃度、溶媒、pH、照射光強度などを変化させることで、反応条件の最適化を達成する。反応サイトの空間分布から、反応性と表面構造との関連性を明らかにする。蛍光輝点の発生頻度や発光持続時間の定量解析から、粒子毎の反応ターンオーバー速度、吸着・解離のダイナミクス、界面電子移動速度、反応の時間揺らぎなどに関する知見を得る。さらに、貴金属ナノ粒子や、超分子、DNAあるいはタンパクなどの生体関連分子における光反応ダイナミクスをアンサンブルおよび単一分子レベルで明らかにし、ナノ触媒としての応用可能性を検討する。

【期待される成果と意義】

本研究で達成される不均一界面における構造と反応に関する基礎的理解の進展は、環境やエコに配慮したナノ触媒の応用開発につながると期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T. Tachikawa, S. Yamashita, T. Majima, *J. Am. Chem. Soc.*, **2011**, *133*, 7197–7204.
- ・ T. Tachikawa, T. Yonezawa, T. Majima, *ACS Nano*, **2013**, *7*, 263–275.

【研究期間と研究経費】

平成25年度–29年度  
145,900 千円

【ホームページ等】

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/mec/index.html>





研究課題名 現物モデリングによる実験・計測融合マルチレベルトライボロジーシミュレータの開発

東北大学・未来科学技術共同研究センター・教授

みやもと あきら  
宮本 明

研究分野： 機械工学  
キーワード： トライボロジー、計算化学

【研究の背景・目的】

これまで培ってきたマルチレベルトライボロジーシミュレータに加え、最近ではトライボロジー分野の機器分析、計測試験方法が飛躍的に進歩している。そのような研究の進歩を背景に本研究では、マルチレベルシミュレーションとトライボロジー分析、トライボロジー計測、トライボ部品シミュレーションを融合した実験融合マルチレベルトライボシミュレータ (図1) を世界に先駆けて開発する。実験研究者との連携を推進するシームレス可視化・シミュレーション手法とともに、トライボロジーに係る研究開発手法を飛躍的に革新する。実物材料・実物条件を扱う実験研究と量子化学を中心とする理論研究が協奏・融合することにより、初めて、未来のトライボロジー技術開発を支える強力な方法論が構築されることになる。

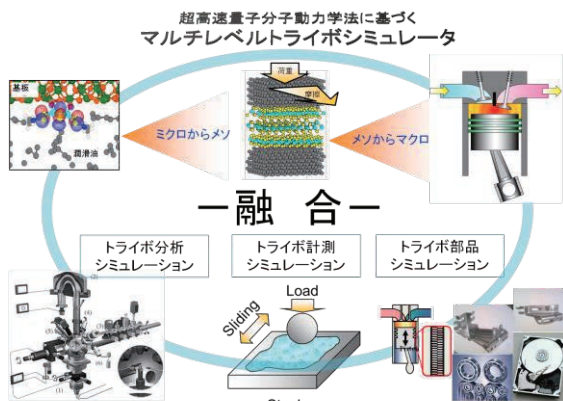


図1 シミュレータ概念図

【研究の方法】

本研究では、(1) 実験トライボロジーで現れる実構造・本物構造のコンピュータモデリング手法の開発、(2) 実構造・本物構造モデルからのトライボロジー物性の理論予測手法の開発、(3) 原子レベルからの積上げによるトライボ計測・トライボ試験結果予測手法の開発、(4) 原子レベルからの積上げによるトライボ部品・トライボ機器摩擦・摩耗挙動予測手法の開発、(5) 実験研究者との共同を加速するためのヒューマンインターフェイスの開発、(6) 実験研究者との共同による開発シミュレータの有効性の検証と課題抽出という6つの課題を、長年の実践的コンピュータ化学の経験を有する研究代表者と、こ

れまで共同で研究を進めてきた研究分担者が、それぞれの特色、持ち味を生かしつつ、多くの産官学の実験研究者と協力しながら遂行する。

【期待される成果と意義】

既存の第一原理分子動力学法により 1000 万倍も高速な「超高速化量子分子動力学法」に基づき開発したマルチレベルトライボシミュレータからさらに先に進み、トライボ分析、トライボ計測、トライボ部品などの実験的手法をも融合した新しい研究手法「現物モデリングによる実験・計測融合マルチレベルトライボロジーシミュレータ」を確立する。これは、世界的にみても全くなく、本研究の独創的な点である。学術的な面での特色、独創性をもつだけでなく、本研究によって、多様な計測・実験融合マルチスケールトライボシミュレータが完成すれば、次世代自動車、医療機器などトライボロジーが関与する社会的に重要な課題を電子・原子レベルから解析し設計できる強力なツールを提供するだけでなく、今後の機械工学研究の在り方に大きな影響を与えるものと考えている。トライボロジーは学問と社会ニーズがリンクした領域であるので、他の重要産業領域へのインパクトも広がるものと期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ J. M. Martin, T. Onodera, M.-I. De Barros Bouchet, N. Hatakeyama, A. Miyamoto, "Anit-wear Chemistry of ZDDP and Calcium Borate Nano-additive. Coupling Experiments, Chemical Hardness Predictions, and MD Calculations," Tribol. Lett., 50, 95-104, (2013).
- ・ Y. Morita, S. Jinno, M. Murakami, N. Hatakeyama, A. Miyamoto, "A Computational Chemistry Approach for Friction Reduction of Automotive Engines," Int. J. Engine Res., (2013), in press.

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
167,400 千円

【ホームページ等】

<http://www.aki.che.tohoku.ac.jp/>  
[miyamoto@aki.niche.tohoku.ac.jp](mailto:miyamoto@aki.niche.tohoku.ac.jp)



研究課題名 摩擦誘導超低摩擦ナノ構造層によるスマートトライボシステムの開発

名古屋大学・大学院工学研究科・教授 うめはら のりつぐ  
梅原 徳次

研究分野: 機械工学、設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード: トライボロジー、機械要素、カーボン材料、超低摩擦、構造変化

【研究の背景・目的】

油潤滑が困難な過酷な摩擦条件下の耐摩耗・超低摩擦の摺道材としてカーボン系硬質膜の応用が進められている。申請者らは、カーボン系硬質膜 CN<sub>x</sub> 膜表面の数 10nm の厚さのナノ構造変化層が摩擦係数 0.01 以下の超低摩擦を発現することを初めて明らかにした。本研究では申請者らが提案、実証した「反射光スペクトルによるカーボン系硬質膜のナノ構造変化層厚さの評価方法」と「ESEM 内での数 μm の液滴の接触角から表面エネルギーマッピング方法」を発展させ、「カーボン系硬質膜の超低摩擦発現ナノ構造変化層のその場評価法」及び「超低摩擦摩擦面の表面エネルギーの ESEM 内その場評価法」を開発する。その結果より、カーボン系硬質膜による自己潤滑スマートトライボシステムの材料と摩擦条件の設計指針を確立する。

【研究の方法】

1. 「超低摩擦発現ナノ構造変化層の摩擦時その場計測装置」の試作と実証

カーボン系硬質膜が摩擦係数 0.01 以下の超低摩擦を発現する際は、その構造変化層厚さ、合成表面あらしの標準偏差の比がある値以上となる必要がある。しかし、これらのパラメータが摩擦に伴いどのように変化するか不明であり、その変化により早期に安定した超低摩擦状態となるか、それとも長期間必要か、またその原因は構造変化なのか表面あらしなのか不明となる。そこで、本研究ではピンオンディスク型摩擦装置及び反射分光分析装置を複合した「超低摩擦発現ナノ構造変化層の摩擦時その場計測装置」を環境制御チャンバー内に試作し、摩擦初期からの超低摩擦を発現するまでの、これらのパラメータのモニタリングの可能性を実証する (図 1)。

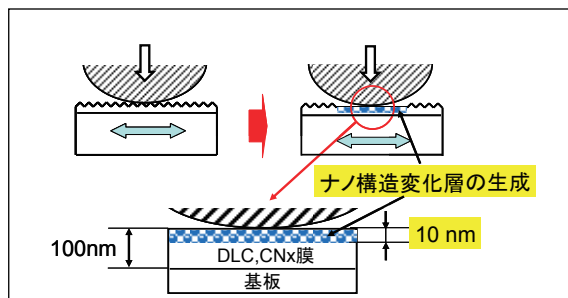


図 1 カーボン系硬質膜の超低摩擦発現ナノ構造変化層

2. 「超低摩擦摩擦面の表面エネルギーの ESEM 内その場評価装置」の試作と実証

研究代表者が提案した ESEM 内表面エネルギーの評価方法を、摩擦直後の摩擦面に施し、カーボン系硬質膜の摩擦による表面エネルギーの変化を明らかにする。そのため、「超低摩擦摩擦面の表面エネルギーの ESEM 内その場評価装置」を試作し、種々のカーボン系硬質膜において、種々の面圧、温度で摩擦実験を行い、表面エネルギーの極性成分、非極性成分を分離して明らかにする。

3. 超低摩擦発現ナノ構造変化層を安定維持するカーボン系硬質膜の実用的設計指針の提案と実証

実用的な機械部品の摩擦面を考えた場合、加工精度及び表面あらしを向上せず超低摩擦を実現する必要がある。上述した機械的特性及び化学的特性に関する設計指針を統合し摩擦誘導超低摩擦ナノ構造層によるスマートトライボシステムを実現する。

【期待される成果と意義】

油潤滑下の境界潤滑特性向上を目指し、計算化学によるトライボケミカル反応のシミュレーションが進んでいる。しかし、摩擦による構造変化層のシミュレーションは未だ困難であり、カーボン系硬質膜の工学的利用の拡大のためには、効率的な超低摩擦ナノ構造変化層のその場評価法の開発とそれに基づくトライボシステムの開発が急務の課題である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T. Tokoroyama, M. Kamiya, N. Umehara, et al., Influence of UV irradiation in low frictional performance of CN<sub>x</sub> coatings, *LUBRICATION SCIENCE*, 24, 3, (2012) 129-139.
- ・ K. Ohara, N. A. Masripan, N. Umehara, H. Kousaka, T. Tokoroyama, et al., Evaluation of transformed layer of DLC after sliding in oil with spectroscopic reflectometry, *Tribology International*, 68, (2013) in press

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
116,500 千円

【ホームページ等】

<http://huga.ume.mech.nagoya-u.ac.jp/ume@mech.nagoya-u.ac.jp>



研究課題名 力触覚技術による医工融合基盤の革新

慶應義塾大学・理工学部・教授

おおにし こうへい  
大西 公平

研究分野: 工学、電気電子工学、電力工学、電力変換、電気機器  
キーワード: ハプティクス、モーションコントロール、人間支援

【研究の背景・目的】

我が国を含む超成熟社会において、豊かさの指標は「モノの量」から「生活の質」への転換期を迎えつつあり、各個人に対応した人手や手間暇のかかる身体的行為を人工的に実現しない限り社会全体が立ち行かなく恐れがある。身体的行為の人工実現には力触覚のある柔らかな動作が必要不可欠であるが、従来のロボット技術においては「理想力源」と「運動機能を表す一般化座標変換」が抜け落ちているために硬い運動しか実現されない。

本研究では、運動双対性の原理に基づき、ハプティクス機能のあるエンドエフェクタ HEM<sup>2</sup> (Haptic End-effector for Medicine & Manufacturing) を実現し、身体的支援を可能にする。HEM<sup>2</sup> は従来の機械では欠落していた「柔かい」運動を実現するばかりでなく、人間の持つ様々な動きのスキルを抽出、記録、再現する能力を有するため医工融合基盤の鍵技術となる。これにより医療福祉分野と産業分野に共通する身体機能の高度化、自動化、遠隔化が可能になり、超成熟社会の持続的発展に大きく貢献する。

【研究の方法】

本研究課題では、運動双対性の原理に基づき、行為と身体機能との関係を数理的に解明し、人に優しい人工支援を実現するための医工融合基盤を創生する。研究遂行にあたっては、図 1 に示す A から D の研究計画を実行する。【A. 身体機能の「表現」研究】では人の持つ多機能を表す直接座標に対して運動双対性の原理を発展的に適用する。これにより、直接行為を構成する身体機能を、理想力源と理想速度源および一般化座標変換の三独立要素で表現する基礎理論を確立する。【B. 身体機能の「発見」研究】では多様な行為を実現するための単位行列となる身体機能データを解析する。そして、理想力源と理想速度源、および一般化座標とを時空間的に統合し、行為の構成要素となる単位身体機能を生成する理論を確立する。【C. 多機能統合による行為の「実現」研究】では単位身体機能の時空間的統合のため、行為を構成する単位身体機能を効率的にデータベース化する手法、および、単位身体機能をインデックス化する手法を開発する。【D. 身体機能支援システムの試作開発研究】では研究計画 A から C までで得られた学理を順次具現化しながら段階的に実証し、最終的には 22 自由度 44 軸身体機能支援システム HEM<sup>2</sup> を試作開発し、その有効性を示す。

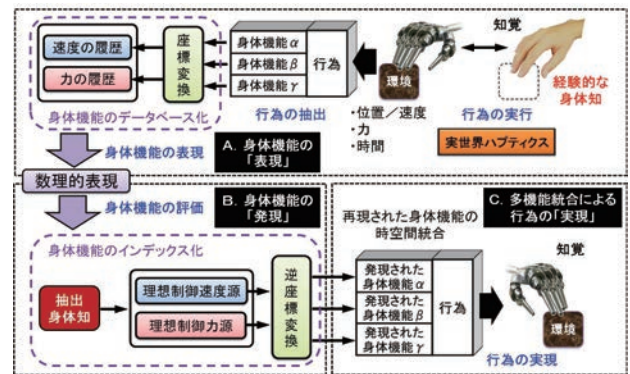


図 1 研究方法および概要

【期待される成果と意義】

力触覚技術による身体機能の設計原理を飛躍的に発展させることで、人の直接的運動行為と身体機能との関係を理工学的に明らかにしようとする点に特色がある。また本研究課題によって、身体機能を制御エネルギー源と機能トポロジーとの統合として初めて数理的に扱うことが可能となるため、その学術的な意義および独創性は極めて高い。

本研究課題の成果として確立する身体機能に基づく行為支援方法論を体系化すれば、医療や介護などで典型的にみられる人手に依存してきた手間暇のかかる肌理細やかな作業（手術やリハビリなど）に対する理工学的支援や、勘や経験に代表される暗黙知の明示化への道筋が示され、新たな産業価値の創出が期待される。また、本技術は原理から応用まですべて我が国において育成してきた純国産の学問分野であり、世界に貢献する独創的技術である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ S. Sakaino, T. Sato, and K. Ohnishi: "A Novel Motion Equation for General Task Description and Analysis of Mobile-Hapto," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 7, pp. 2673-2680, 2013.
- ・ A. Sabanovic, K. Ohnishi: "Motion Control Systems," John Wiley, 2011.02.

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
154,100 千円

【ホームページ等】

<http://www-oml.sum.sd.keio.ac.jp/>

【基盤研究 (S)】  
理工系 (工学)



研究課題名 集積グラフェン NEMS 複合機能素子によるオートノマス・  
超高感度センサーの開発

北陸先端科学技術大学院大学・  
マテリアルサイエンス研究科・教授

みずた ひろし  
水田 博

研究分野: 工学、電気電子工学

キーワード: 電子デバイス・集積回路、NEMS、グラフェン、質量センサー

【研究の背景・目的】

近年、ナノスケールに微細化された微小電子機械システム (NEMS) の高度機能素子応用が大いに注目されている。RF スイッチなどの研究に加えて、NEMS の表面对体積比が大きいことを利用して、微少な電荷および質量の変化を超高感度で検出する NEMS センサーの研究も盛んになってきた。

本研究では、これまで研究代表者が構築してきたシリコン複合 NEMS センサーとパワーマネジメント素子技術と、グラフェン超微細デバイスに関する研究の成果を融合させることで、①サブ・zeptogram～原子質量単位 (ダルトン) / Hz レベルの質量感度と、単電荷移動検出を同時に可能とする振動グラフェン NEMS 超高感度センサーおよび、②サスペンデッド・グラフェンと基板間の van der Waals 力などの短距離力を設計・制御して動作する不揮発性グラフェン NEMS スイッチを開発する。併せて、マルチスケール・グラフェン NEMS 集積システムシミュレーション技術と集積化プロセス技術を構築することで、オートノマス・極限感度・グラフェン集積センサーシステムに基盤技術を開発する。

【研究の方法】

本研究課題では、研究開発項目を以下の5つのワークパッケージ【WP1】～【WP5】に区分して推進する。【WP1】では、サスペンデッド・グラフェンナノリボン (GNR) を垂直振動チャンネルとして用いる共鳴 GNR トランジスタ構造 (図1)を用いて、GNR 表面の吸着ガス分子による共振周波数変化検出と、吸着分子 - GNR 間の電荷移動による電流 - 電圧特性の電荷中性点シフト検出を組み合わせた精度の高いセンシング方式を検討する。【WP2】では、吸着ガス分子の種類を同定する新たなセンシング方式として、吸着分子の固有振動モードを伝導電子の非弾性散乱トンネルスペクトロスコピーにより検出する手法を検討する。【WP3】では、GNR-基板間の短距離力を制御して、準エネルギー可逆型 NEMS スイッチを可能とする不揮発性グラフェン・パワーマネジメント素子の設計・作製を行う。【WP4】では、アトムスケールから等価回路解析レベルまでをカバーする集積モノレイヤーセンサーシステム設計・解析用マルチスケール・シミュレーション技術の構築と、原子分解能走査透過型電子顕微鏡を駆使した GNR 上分子吸着状態の微視的解明を行う。【WP5】では、【WP1】と【WP2】で開発した超高感度センサー素

子とパワーマネジメント素子を同一グラフェン膜内に集積化するプロセス技術を開発する。以上の鍵要素技術を構築することで、オートノマス・超高感度集積グラフェンセンサーシステムの実現を目指す。

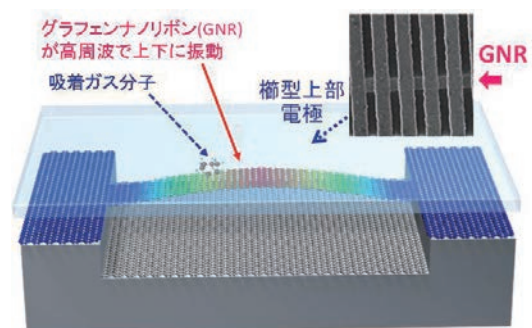


図1 共鳴 GNR チャンネル質量検出型センサー

【期待される成果と意義】

本研究は、モノレイヤー材料であるグラフェンを用いて、複合機能 NEMS センサー素子と、ナノスケール・パワーマネジメント素子の融合システムを狙う大変独創性の高いものである。近年深刻な問題となっている揮発性有機化合物 (VOC) 分子などに対応する超高感度・環境センシング技術を生み出すだけでなく、幅広い集積回路・システムのオートノマス化に対して適用が可能であり、科学技術と ICT 産業の両面において大きなインパクトが期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ F. A. Hassani, H. Mizuta *et al.*, 'Numerical analysis of zg/Hz-level mass responsivity for in-plane resonant nano-electro-mechanical sensors', *Microelectronic Engineering* **88**(9), 2879-2884 (2011)
- ・ 水田, 土屋, "NEMS とナノデバイス", ナノシリコンの最新技術と応用展開", *N. Koshida ed.*, 108 - 121, CMC 出版 (2010)

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
124,800 千円

【ホームページ等】

<http://www.jaist.ac.jp/ms/labo/mizuta.html>  
mizuta@jaist.ac.jp

## 【基盤研究（S）】

### 理工系（工学）



## 研究課題名 ラテラル電界制御電荷変調素子による超高時間分解撮像デバイスと応用開発

静岡大学・電子工学研究所・教授

かわひと しょうじ  
川人 祥二

研究分野： 工学、電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード： 電子デバイス・機器、先端機能デバイス、撮像デバイス、時間分解撮像

### 【研究の背景・目的】

本研究では、1分子蛍光等の極微弱光に対するサブピコ秒の時間分解能での検出と、その超並列的検出（高い空間分解能）を両立する超高時間分解撮像デバイスとその応用に関して研究を行う。これを実現する新概念の超高速電荷変調素子であるラテラル電界制御電荷変調素子 LEFM (Lateral Electric Field controlled charge Modulator) の考案に基づき、本素子を用いたピクセルによる超高時間分解撮像デバイスが、他に類を見ない本質的に優れた時間分解性能を有すること、またバイオ・メディカルイメージングや産業応用において、従来の点計測走査型から、面計測並列型へと時間分解撮像に革命的進展をもたらすデバイスとなることを試作と応用計測によって実証する。これにより、生命科学、先端医療・医学の発展、イメージング関連産業の振興に貢献することを目的とする。

### 【研究の方法】

ラテラル電界制御電荷変調素子 LEFM (図1) は、電荷輸送路の電界制御を、その側面に設けた複数のゲートによる横方向電界により行い、高速電子輸送制御を行う素子である。1タップ型、2タップ型を基本として、3タップ以上のマルチタップ型が実現可能である。LEFM の形成条件の確立、構造最適化を図り、基本素子としてサブピコ秒の時間分解能が達成可能であることを実験的に示すための基本素子群と少数画素による2次元アレイの設計と試作を行う。

基本素子試作の結果を踏まえて、本素子(2タップ型 LEFM) を応用した蛍光寿命イメージングデバイスを開発し、自家蛍光を用いた癌等の病巣の検出法としての有効性を実証する。また、これに必要な低ノイズ・高ダイナミックレンジ撮像技術であるマルチサンプリング A/D 変換回路の高精度化を図り、応用する。

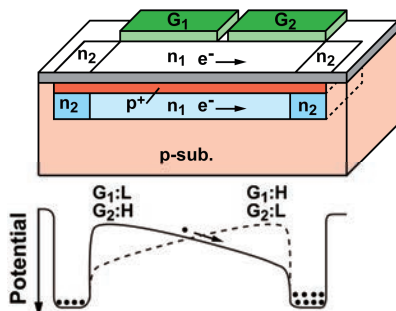


図1 ラテラル電界制御電荷変調素子

LEFM素子は、多くのバイオ・メディカル光計測、産業計測を革新する技術になると考え、中期以降、積極的な応用展開を図る。特にマルチタップ LEFM 素子を用いた蛍光相関分光(細胞内分子の動態解析に有用)の超並列計測(100×100 点以上)を可能にする蛍光相関イメージセンサや、サブミリメートル分解能の光飛行時間型距離画像センサ等、従来実現困難であった時間分解撮像デバイスを開発し、その有用性を明らかにする。

### 【期待される成果と意義】

ラテラル電界制御電荷変調は、日本オリジナルの新しい撮像デバイス原理であり、これを用いた時間分解撮像は、今後のバイオ・メディカル光計測、産業計測のキーテクノロジーとなりうるものである。本研究を通してその技術の体系化の基礎が築かれることは、学術的に極めて大きな意義がある。また本研究は、従来の点計測走査型から面計測並列型へと時間分解撮像の真のパラダイムシフトをもたらすものである。これによって微小プローブ型の病理診断装置が実現され、in vivo での腫瘍の検出機能の実現等、医学・医療機器を革新し、医療機器産業の発展にも寄与しうるものである。さらに、本研究による高時間分解撮像デバイスは、蛍光寿命、蛍光相関分光、ラマン分光、近赤外分光(NIRS)、光飛行時間3D計測等、広範な応用が期待され、その成果が光計測にもたらすインパクト・波及効果は計り知れない。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Z. Li, S. Kawahito et al., "A time-resolved CMOS image sensor with draining-only modulation pixels for fluorescence lifetime imaging," IEEE Trans. Electron Devices, **59**(10), pp. 2715-2722, 2012.
- S. Kawahito et al., "CMOS Lock-in Pixel Image Sensors with Lateral Electric Field Control for Time-Resolved Imaging," Proc. Int. Image Sensor Workshop, pp. 361-364, Snowbird, 2013.

### 【研究期間と研究経費】

平成25年度－29年度  
151,100千円

### 【ホームページ等】

<http://www.idl.rie.shizuoka.ac.jp/>  
kawahito@idl.rie.shizuoka.ac.jp

## 【基盤研究（S）】

### 理工系（工学）



## 研究課題名 化学集積回路の創成と医療機器への展開

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

なかざと かずお  
中里 和郎

研究分野： 工学 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】

本研究は、化学反応の検出、化学反応の制御、物質の効率的な輸送を半導体集積回路上で行うことにより、様々な化学反応をチップ上に集積した化学集積回路の実現を目的とする。この化学集積回路は、医療・環境・健康への応用が最も期待される分野である。検査診断システムにおいては、その取扱いに専門性を要せず短時間で分析可能で、ユビキタス情報社会と整合性の高いことが求められ、その上で極微の生体分子を検出することが最重要課題となる。本研究の主な目的は、生体分子の増幅を行いながら化学反応の検出を行う化学集積回路の実現にある。

### 【研究の方法】

生体分子はウェット環境にあり、半導体チップに溶液が接し、生体分子が絶えず化学反応している系を対象とする。極微の生体分子を検出することを目的として、以下の研究を推進する。

1. 生体分子のオンチップ・リアルタイム増幅検出：極微の生体分子を検出するため、オンチップでリアルタイムに生体分子を増幅しながら検出する技術を体系化する。生体分子の検出に最適化した化学反応系の設計、増幅に最適化した多重ウエル構造、生体分子増幅の電気的制御を探索する。
2. 生体1分子分布の電気的計測：生体1分子を同時並行で電気的に検出し、分布として計測する技術を確認する。初年度は $0.05\sim 5\mu\text{m}$ の大きさのウイルス・細菌をターゲットに基礎技術を立ち上げ、次年度以降、たんぱく質・DNA等のnmオーダーの1分子検出に発展させる。
3. 化学反応検出制御回路：これまでのスタティック・センサセル回路の最適化を行うと共に、ダイナミック・センサセル回路の開発と生体分子のフロー検出技術を確認する。
4. 化学集積回路に向けたマイクロフルイド形成：半導体集積回路上の化学反応のアイソレーション・配線技術としてのマイクロフルイド形成技術を確認する。

### 【期待される成果と意義】

これまでのナノバイオテクノロジーはマイクロフルイド系が主体であったが、本研究はCMOS集積回路を主体とする。半導体集積回路上で多種の生体分子を増幅しながら検出する研究は国内外に例が無い。化学、生物、医学の分野の研究機関と密接な連携を

とりながら、半導体集積回路による医療分野の革新を目指す。

本研究は半導体工学と化学・医学との融合分野を拓くものであり、半導体集積回路の応用を、創薬、医療・看護、食品、農業、環境の分野に広げるものである。第4期科学技術基本計画「II. 将来にわたる持続的な成長と社会の発展の実現」における今後重点的に推進すべき取組では、ライフイノベーションの推進 i)革新的な予防法の開発、ii)新しい早期診断法の開発、iii)安全で有効性の高い治療の実現、iv)高齢者、障害者、患者の生活の質(QOL)の向上があげられているが、電子デバイス・集積回路の分野がこの目的の実現においてキー・テクノロジーになると考えている。

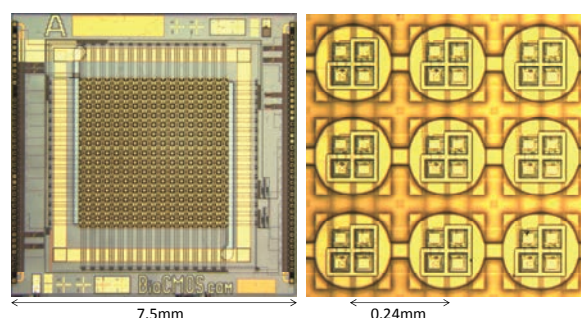


図1 化学集積回路

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・K. Nakazato, Potentiometric, Amperometric, and Impedimetric CMOS Biosensor Array, in *State of the Art in Biosensors/Book 1*, pp. 163-178, ISBN 980-953-307-669-5, ed. by T. Rinken, InTech, 2012 doi:10.5772/53319
- ・K. Nakazato, Integrated ISFET Sensor Array, *Sensors* 9, 8831-8851, 2009; doi:10.3390/s91108831

### 【研究期間と研究経費】

平成25年度～29年度  
131,700千円

### 【ホームページ等】

<http://biocmos.com>  
<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/nakazatolab/>



研究課題名 痛みの分る材料・構造の為の光相関領域法による  
光ファイバ神経網技術の学術基盤の確立

東京大学・大学院工学系研究科・教授

ほたて かずお  
保立 和夫

研究分野: 工学

キーワード: 計測システム、光ファイバセンサ

【研究の背景・目的】

光ファイバに沿う歪や温度の情報を分布測定する「光ファイバ神経網」を、橋や航空機翼等に張り巡らせて「痛みの分る材料・構造」が実現できる。しかし、従来法では、空間分解能等が不十分であった。

研究代表者らは、光波の周波数や位相を変調して干渉特性を任意に合成する「光相関領域法」を発明し、従来技術を凌ぐ性能の「光ファイバ神経網」を提案した。学術創成研究(04-08)・基盤研究S(09-13)を得て、mm 分解能、kHz 測定速度、ランダムアクセス機能等を実現し、歪と温度の同時計測や分布情報全体の動的測定等の高次機能も提案・実証した。

本研究では、最近発案した新機能の実現手法を実証するとともに、理論研究も深めて、本独自センシング手法の学術基盤を確立する。

【研究の方法】

下記サブテーマを推進して新機能を実証し、理論研究も進めて、本技術の学術基盤を確立する。

- ・ 温度と歪の同時・分布計測での極限性能の実現
- ・ 分布情報全体の高速ダイナミック測定の最適化
- ・ BOCDR 法の総合機能の実現
- ・ S-BOCDA 法での温度と歪の分離・分布測定
- ・ 長尺 FBG 歪センシングシステムの機能進化
- ・ BOCDA 法による光集積回路の評価技術
- ・ 痛みの分る材料・構造の実証研究

【期待される成果と意義】

BOCDA 法は、誘導ブリルアン散乱を光ファイバ中の特定の位置でのみ発生・掃引する独自分布測定技術である。本散乱の周波数シフトの温度と歪依存性により「光ファイバ神経網」を実現する。偏波維持光ファイバの一偏波モードによる誘導ブリルアン散乱と直交偏波光が示すブラッグ反射周波数シフトから高精度に温度と歪を分離・分布測定する独自技術により、世界初の温度・歪の高精度・分布計測を実現した。本研究では、空間分解能、測定レンジ、歪・温度精度等の性能を総合的に高め、これら性能の理論限界も明確化する。独自の全歪分布情報の高速測定手法(図1)に関しても、総合性能を高める。

自然ブリルアン散乱を活用して、被測定光ファイバの一端から入射した光のみで歪分布測定を実現する独自の BOCDR 法でも、空間分解能、測定レンジ、歪レンジ等の性能を極限化し、シミュレーションも行って、学術基盤を固める。誘導散乱発生の為のポ

ンプ・プローブ光を時分割発生させる S-BOCDA 法でも、温度と歪の同時・分布計測機能を高める。

長尺 FBG 内のブラッグ波長変化を「光相関領域法」で分布測定する技術では、独自の測定位置掃引法を確立する。BOCDA 法の高空間分解能を活かし、PLC 光導波路中の導波路パラメータの分布測定も実現して、本デバイスの評価手法を提示する。

上記光ファイバ神経網技術を航空機に実装し、「痛みの分る材料・構造」を実現する。プラント、土木・建築、通信等の分野においても、社会基盤の安全・安心を高め、その稼働年月の延伸にも寄与することで、持続可能社会の実現に貢献する。

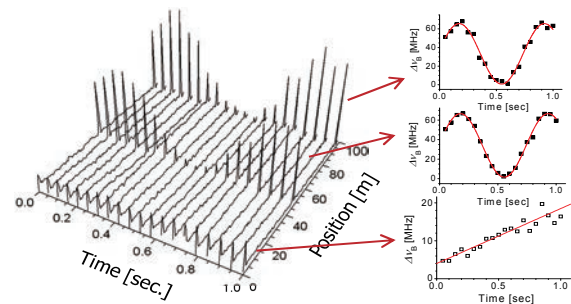


図1 全歪分布の高速測定例(20 分布/秒の達成)

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K.-Y. Song, M. Kishi, Z. He and K. Hotate, "High-repetition-rate distributed Brillouin sensor based on optical correlation-domain analysis with differential frequency modulation," Optics Letters, vol. 36, pp. 2062-2064, May 2011.
- ・ R. K. Yamashita, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, "Measurement range elongation based on temporal gating in Brillouin optical correlation domain distributed simultaneous sensing of strain and temperature," Photonics Technology Letters, vol.24, pp.1006-1008, 2012.

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度-28 年度  
134,800 千円

【ホームページ等】

[http:// www.sagnac.t.u-tokyo.ac.jp/](http://www.sagnac.t.u-tokyo.ac.jp/)  
hotate@sagnac.t.u-tokyo.ac.jp

## 【基盤研究（S）】

### 理工系（工学）



## 研究課題名 次世代都市モデルの多数地震シナリオ統合地震シミュレーションに基づく被害推定

東京大学・地震研究所・教授

ほり むねお  
堀 宗朗

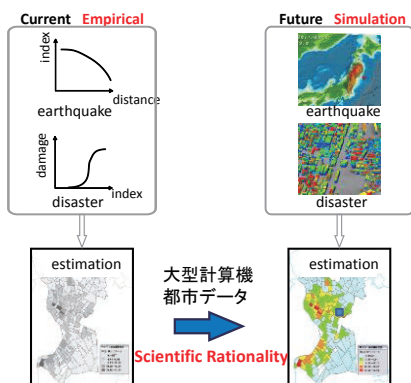
研究分野： 工学、土木工学、構造工学、地震工学、維持管理工学

キーワード： 地震防災、地震被害推定

### 【研究の背景・目的】

地震被害推定の信頼度を上げるため、大規模数値計算を使って地震災害を解析する統合地震シミュレーション (Integrated Earthquake Simulation, IES) の開発が進められている。京計算機を使った解析も可能となり、多数の地震シナリオに対する被害推定の準備が整いつつある。

本研究の目標は、精度を格段に向上させた次世代都市モデルを構築する手法と、多数地震シナリオの膨大な計算結果を分析する手法の開発である (図1参照)。次世代都市モデルの構築ではモデルの品質確保のために独創的な理論と手法を提案している。1,000 を目安とした多数地震シナリオの被害推定はそれ自体意義がある。



開発技術  
・次世代都市モデル  
・多数地震シナリオ

図1 研究の構想。大規模計算機と都市データを使った統合地震シミュレーションを実行し、科学的合理性を持つ地震被害予測を実現

### 【研究の方法】

研究計画は4段階に分かれる。第1段階では次世代都市モデルの構築手法を開発、第2段階では実際に次世代都市モデルを構築し構築手法を改良する。第3段階は多数地震シナリオ IES の分析手法を開発、第4段階は多数地震シナリオの IES を実際に実行し、計算結果を使って分析手法の有効性を検討する。第1段階の具体的作業はメタモデリング理論の構築とプログラムの作成、第2段階は品質検証を利用した理論の精緻化とプログラムの改善、第3段階は Big Data の分析手法を基として、被害クラスタの抽出と特性解明を行う手法の考案、そして第4段階は東京・仙台・神戸を対象とした分析の試行である。

### 【期待される成果と意義】

次世代都市モデルの構築手法の根幹となるメタモ

デリングは、都市の多様な構造物の解析モデルに一定の品質を確保する点が独創的である (図2参照)。多岐多様な構造物を対象とすること、及び、品質検証を重視することの意義は高い。メタモデリングでは、段階的モデル構築の他、連続体モデルの高速解法と高度な可視化にも利用される。構造モデルの解を連続体モデルの近似解として使うことで数値計算の高速化を図り、詳細な連続体モデルの解を構造モデルの応答に集約することで応答の理解を容易にする。

多数の地震シナリオに基づいて計算される被害推定は、科学的に想定された地震の不確からしさに応じた合理的な幅を持つ (図3参照)。合理的な幅を持つ推定を行うという意味で、物理過程のシミュレーションを多数地震シナリオに対して実行することは意義があると考えられる。さらに、1,000 を目安とした地震シナリオの計算結果の分析によって被害クラスタを抽出し、各被害クラスタの防災・減災対策の必要性を定量的に提示する。

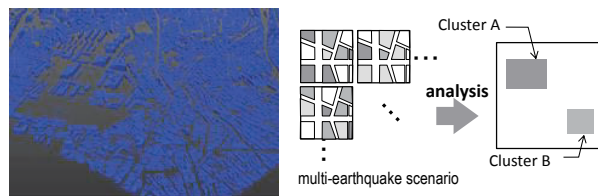


図2 次世代都市モデル。メタモデリングという新しい理論に基づき、各建物・構造物に多様な詳細度のモデルを構築。

図3 多数地震シナリオの分析。1000を目途した地震シナリオを考え、頻度・程度を分析した上で、被害の集中域を合理的に抽出。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・ M. Hori, Introduction to computational earthquake engineering, 2<sup>nd</sup> edition, Imperial College Press, 2011.

### 【研究期間と研究経費】

平成25年度～29年度  
85,100千円

### 【ホームページ等】

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/LsETD/>





研究課題名 わが国における都市史学の確立と展開にむけての基盤的研究

東京大学・大学院工学系研究科・教授 **伊藤 毅** (いとう たけし)

研究分野: 建築学  
キーワード: 都市史学

【研究の背景・目的】

1980年代以降本格化したわが国における都市史学は、いまだ個別分散的であり一つの学問領域に統合されるには至っていない。都市史学は学的融合が不可欠な分野であり、これを実質的に担いよう研究者が限定されることがひとつの原因である。本研究はわが国における学際的都市史学の牽引者・第一人者が一堂に会し、この間蓄積してきた学的達成、人的ネットワーク、国際的連携実績を一举に結集し、わが国における都市史学の組織基盤を確立するとともに、このプラットフォーム上で最先端の研究論題を全面展開し、成果を社会化することを目的とする。

都市史学はいまや全世界が直面する都市的危機の淵源を再考する基礎的・総合的学問領域である。この基盤形成と研究展開を通して、若手研究者の育成および研究成果の国内外への発信と還元をはかる。

伊藤毅 (建築史) と吉田伸之 (日本史) は四半世紀に及ぶ研究連携の実績と、その一つの到達点としての『伝統都市1~4』(東京大学出版会、2010年)の出版を対象として2012年日本建築学会賞(業績)を受賞した。この受賞理由のなかに、都市史学の今後の展開のための基盤形成について大いに期待する文言が含まれていた。各研究分担者はすでに高度な学的達成を行い、その下で有力な若手都市史研究者が分厚い裾野を形成している。いまこそ都市史学統合の好機が到来したというべきである。

【研究の方法】

本研究は都市史学の基盤確立と研究論題の5年次にわたる段階的展開のために、周到かつ明快な研究計画を策定している。すなわち、①都市史学センターを中核とし、5つの主要な研究部を設置し、その下部に多くの都市史研究者を組織し、それを徐々に充実化すること(A組織)、②5つの研究論題は各年度の主要なテーマとなり、そのテーマを発展させるためのサブテーマを各3~4本ずつ立てる。サブテーマはその年度の国内外集会の柱として、主要交流国および関係諸国との都市史学シンポジウム・講演会・



図1 組織・研究・成果

ラウンドテーブルなどで成果を集積する(R研究)。研究成果のアウトプットは年度ごとに達成度を自己点検しつつ着実に進め、研究期間中から成果物の公開をスタートし、研究期間終了後一気に書籍化・ウェブ公開を実現することになる(O成果)。

【期待される成果と意義】

本研究で展開する論題は以下のようなものである。

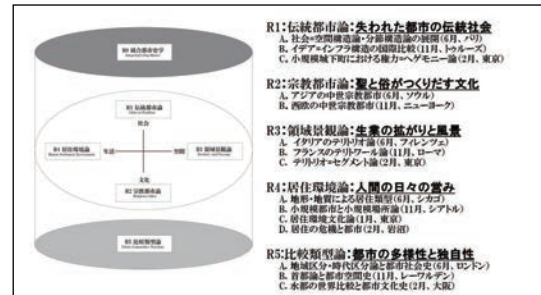


図2 研究論題構造図

R 統合都市史学(都市社会史/都市空間史/都市文化史)。これらはR1 伝統都市論(吉田・伊藤)社会=空間構造論/権力・ヘゲモニー論/イデア=インフラ論、R2 宗教都市論(高橋・樺山)日本宗教都市論/アジア宗教都市論/欧米イスラム宗教都市論、R3 領域景観論(伊藤・陣内)テリトリオ=セグメント論/景観構成論/沼地・荒地論、R4 居住環境論(陣内・高橋)居住類型論/環境文化論/危機都市論/小規模場所論、R5 比較類型論(樺山・陣内)地域=文化構造論/首都・世界都市論/水都・ネットワーク論など多岐にわたるが、その成果は『年報都市史研究』(山川出版社)、都市史叢書(上記R1~R5の成果を統合した論集、世界100都市ブックレット、都市史図集・城下町データブック、東京の歴史(全10巻、吉川弘文館)、都市史基本文献の英訳化(電子ブックとして作成)として結実し、わが国の都市史学の確立と展開に向けての堅固な基盤を形成する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・吉田伸之・伊藤毅編『伝統都市1~4』(東京大学出版会、2010年)
- ・伊藤毅編『バスティードーフランス中世新都市と建築』(中央公論美術出版、2009年)

【研究期間と研究経費】

平成25年度-29年度  
144,000千円

【ホームページ等】

<http://suth.jp>  
[office@suth.jp](mailto:office@suth.jp)



研究課題名 規則合金スピントロニクス材料の新展開

東北大学・金属材料研究所・教授

たかなし こうき  
高梨 弘毅

研究分野： 金属物性・材料

キーワード： 磁性材料、スピントロニクス、規則合金

【研究の背景・目的】

次世代の情報通信技術を担う新しいエレクトロニクスとしてスピントロニクスが注目されている。スピントロニクスで使用されている磁性材料は、主として Fe, Co, Ni 系のランダム合金であるが、それでは性能に限界がある。我々は規則合金に着目し、高スピン分極材料として  $L2_1$  型ホイスラー合金、高磁気異方性材料として  $L1_0$  型規則合金を用いて、スピントロニクス機能の探求を行ってきた。本研究ではこれまでの実績を踏まえ、より一層の高機能化、多機能化を目指して、 $C1_b$  型ホイスラー合金および  $L1_1$  型規則合金に着目し、新たな材料展開を図る。さらに、従来のスピントロニクスに加え、これに熱磁気効果を融合させたスピンカロリトロニクスにも着目し、機能性探求の新展開として、規則合金を用いた

を進める。高機能化に関しては、平成 25 年度はこれまで取り組んできた  $L2_1$ - $Co_2MnSi$  系の膜面垂直通電型巨大磁気抵抗効果 (CPP-GMR) の向上を図り、平成 26 年度以降に  $CoMnSb$  などの  $C1_b$  型への展開を図る。多機能化に関しては、高磁気異方性と低ダンピングの両立を目指して、平成 25 年度は MBE を用いた単原子層積層制御によって単結晶基板上に  $L1_1$ - $CoNi$  エピタキシャル薄膜の作製を試みる。平成 26 年度以降は、MBE を用いた基礎研究を続けつつ、実用的な観点からスパッタ法を用いた作製にも取り組み、最終年度はガラス基板上で高配向  $L1_1$ - $CoNi$  薄膜の実現を目指す。スピンカロリトロニクスに関しては、年度毎に上記の規則合金試料を用いて、ペルチエ冷却効果および異常ネルンスト効果の測定を行い、他の物理量や理論計算との系統的比較から、材料創製の指導原理を確立する。

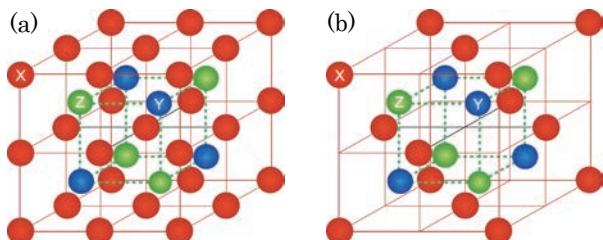


図1 (a)  $L2_1$  型ホイスラー合金および (b)  $C1_b$  型ホイスラー合金の結晶構造。

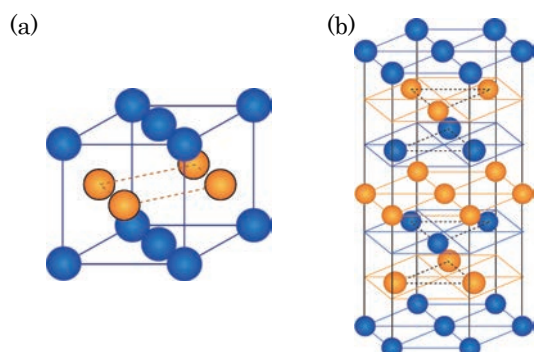


図2 (a)  $L1_0$  型合金および (b)  $L1_1$  型合金の結晶構造。

高いスピンカロリトロニクス機能の創出を目指す。

【研究の方法】

研究目的で掲げた高機能化、多機能化、スピンカロリトロニクスへの展開の3つの課題について、全期間を通じて相互に関連させながら、並行して研究

【期待される成果と意義】

$L2_1$  型ホイスラー合金や  $L1_0$  型規則合金を用いたスピントロニクスの研究で豊富な実績を有する我々のグループが、材料を  $C1_b$  型ホイスラー合金および  $L1_1$  型規則合金に拡張・展開することによって、さらなる高機能化、多機能化の実現が期待される。さらに、現在勃興期にあるスピンカロリトロニクスに関して、その材料依存性が初めて系統的に明らかにされる。本研究の達成は、スピントロニクスの新しい発展につながる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・「スピントロニクス材料としてのホイスラー合金」, 桜庭裕弥, 高梨弘毅, 機能材料としてのホイスラー合金 (鹿又武編著, 内田老鶴圃, 2011年) 第9章 (pp. 233-270).
- ・ "Magnetic Anisotropy and Chemical Order of Artificially Synthesized  $L1_0$ -Ordered FeNi Films on Au-Cu-Ni Buffer Layers", T. Kojima, M. Mizuguchi, T. Koganezawa, K. Osaka, M. Kotsugi, and K. Takanashi, Jpn. J. Appl. Phys. (Rapid Comm.), **51** (2012) 010204.

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
168,400 千円

【ホームページ等】

<http://magmatelab.imr.tohoku.ac.jp>  
koki@imr.tohoku.ac.jp



研究課題名 高密度水素化物の材料科学  
—水素の結合自由度を利用したハイドライド・ギャップの克服

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構 (WPI-AIMR) ・教授 おりも しんいち  
折茂 慎一

研究分野： 材料工学、材料化学

キーワード： エネルギー材料、無機材料創成・合成プロセス、原子・電子構造評価

【研究の背景・目的】

水素の高密度化が困難なために「ハイドライド・ギャップ」とよばれてきた  $3d$  遷移金属群。これらが主相となる新たな水素化物を合成して、量子ビームでの解析やデータベースの構築、そしてエネルギー関連機能の強化などにより、「高密度水素化物の材料科学」を飛躍的に発展させる。

具体的には、“水素の結合自由度”を反映した水素ダイアグラム (図1) や計算材料科学に基づく特性予測、水素流体での高圧合成、多様な量子ビームによる水素化反応過程や原子・電子構造の解析、などの要素研究を融合して、従来技術では合成できないペロブスカイト・錯体水素化物を系統的に探索する。さらに水素化物中の水素やリチウムのダイナミクス測定もふまえて、高密度水素貯蔵材料や高速イオン伝導材料などとしての組成最適化を進める。

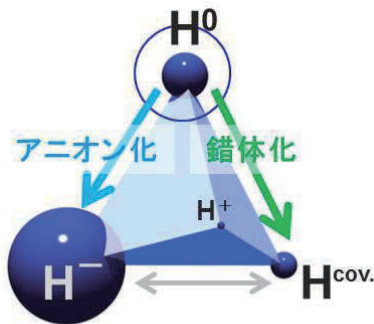


図1 水素ダイアグラムの概念図

【研究の方法】

1. 水素の結合自由度の制御:

水素のアニオン化 ( $H^-$ ) によるペロブスカイト水素化物や錯体化 ( $H^{cov}$ ) による錯体水素化物の合成を目指して、理論・実験両面から水素の結合自由度の解析を進め、出発物質や候補水素化物を選定する。

2. ハイドライド・ギャップの克服:

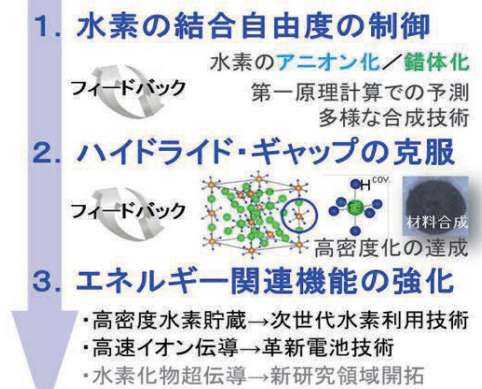
電子ドナー添加技術や高圧水素化技術を確立して、鉄やニッケルなどを中心とした  $3d$  遷移金属群を含む高密度水素化物を広く探索・合成する。

3. エネルギー関連機能の強化:

出発物質や合成条件、水素化反応過程や原子・電子構造の解析結果などを統合したデータベースを構築することで、水素貯蔵やイオン伝導などの機能強化に向けた開発指針の解明と組成最適化を進める。

これらの研究の方法や展開を図2にまとめる。

水素の高密度化が困難な  $3d$  遷移金属群



「高密度水素化物の材料科学」

図2 研究の方法や展開

【期待される成果と意義】

水素化物に関わる従来研究を水素の結合自由度の観点で抜本的に見直すことで、元素戦略上も極めて重要な  $3d$  遷移金属群 (およびそれらの水素化物) の社会的・学術的価値を格段に高めることができる。これにより、燃料電池や二次電池などに代表されるエネルギー関連産業の活性化や国際競争力の向上、さらに水素が関与する超伝導や量子性などの未解明の学術課題の解決と新たな研究領域の開拓に資する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- M. Matsuo et al., “Experimental studies of complex hydride  $YMn_2H_6$  on formation kinetics and X-ray absorption fine structure analyses”, Appl. Phys. Lett., 100 (2012) 044101.
- S. Takagi et al., “Theoretical investigation of Fe substitution for Mn in complex hydride  $YMn_2H_6$ ”, Appl. Phys. Lett., 100 (2012) 021908.

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度—29 年度  
158,300 千円

【ホームページ等】

<http://www.hydrogen.imr.tohoku.ac.jp/>  
orimo@imr.tohoku.ac.jp

【基盤研究 (S)】  
理工系 (工学)



研究課題名 骨配向化誘導のためのマテリアルブーンバイオロジー

大阪大学・大学院工学研究科・教授 なかの たかよし  
中野 貴由

研究分野: 材料工学  
キーワード: 生体・医療・福祉材料、骨配向化機構

【研究の背景・目的】

正常な骨配向化組織の回復は、最先端の骨再生手法を駆使しても困難である (図 1)。骨配向性の回復には、異方性を強く意識した材料工学をベースとした異分野融合による新規骨代替材料の開発が不可欠である。そのためには、骨配向化機構を原理から理解することが必須であり、その知見に基づき骨配向化誘導材料の開発を行う必要がある。

本研究では、(A) 生物学的観点からの、遺伝子・分子、骨系細胞、骨組織レベルでの骨配向化機構の本質的な解明、(B) 骨配向化機構を人為的に再現しつつ、骨組織に異方性を誘導する新規骨代替材料の創製、という両輪からの研究展開を行う。

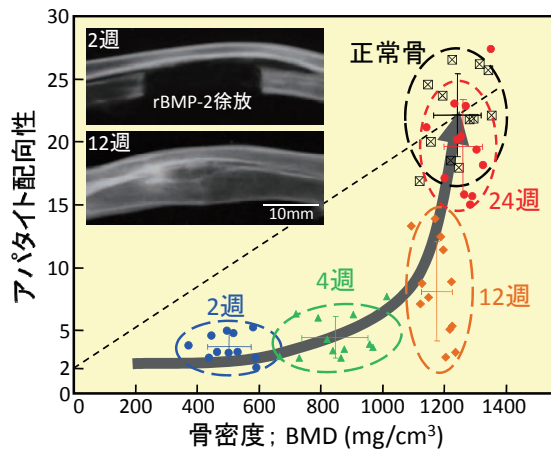


図 1 骨再生過程における骨密度と骨配向性の変化

【研究の方法】

骨配向化機構を本質的に解明するとともに、配向化機構を人為的に再現しつつ骨配向化誘導を可能とする新たな骨代替材料の創製を達成するため、以下の具体的課題を解決する。  
(A) 骨配向化機構を遺伝子・分子、骨系細胞、配向化組織レベルから解明 (骨配向化機構解明)  
(1) 遺伝子・分子レベル: 特定シグナル・特定遺伝子・細胞骨格形成たんぱく等に注目  
(2) 骨系細胞レベル: OCY の形態・配列、骨芽細胞遊走等に注目  
(3) 骨組織レベル: *in vivo* 応力、構造パラメータ・材質パラメータの観点から骨力学特性に注目  
(B) 骨配向化誘導を可能とする新たな骨代替材料の

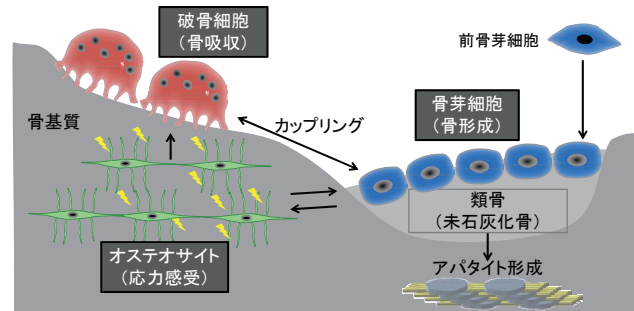


図 2 骨系細胞のクロストークによる骨配向化

創製 (骨配向化促進材料の創製)

- (4) 配向化誘導材料の創製: 配向化表面創製や配向化基材の開発と細胞相互作用解明
- (5) 骨配向化促進のための細胞増殖因子の導入: 骨系細胞分化誘導・骨代謝回転・石灰化促進

【期待される成果と意義】

材料工学手法をベースに、生物科学手法を融合しつつ、骨配向化機構を解明し、その配向化原理を基軸にした骨配向化を再現するための新規生体材料の開発を可能とする。

最終的には、材料工学と生物科学の融合によるマテリアルブーンバイオロジー新領域を構築する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T. Nakano et al.: Biological apatite (BAp) crystallographic orientation and texture as a new index for assessing the microstructure and function of bone regenerated by tissue engineering, *Bone*, 51 (2012) pp.741-747.
- ・ T. Ishimoto, T. Nakano et al.: Degree of biological apatite c-axis orientation rather than bone mineral density controls mechanical function in bone regenerated using rBMP-2, *J. Bone Miner. Res.*, 28 (2013) pp.1170-1179.

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
165,900 千円

【ホームページ等】

<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp6/nakano/nakano@mat.eng.osaka-u.ac.jp>

## 【基盤研究 (S)】

### 理工系 (工学)



## 研究課題名 超精密／高効率化学プラント構築のための大量生産型マイクロデバイス設計・操作

京都大学・大学院工学研究科・教授 はせべ しんじ  
長谷部 伸治

研究分野： 工学

キーワード： ナノマイクロ化学システム、反応装置、プロセスシステム設計、プロセス制御

### 【研究の背景・目的】

化学産業の構造改革を進めるためには、既存の装置での生産を前提とした製品開発から、新製品の合成に必要な運転条件を達成できる装置、プラントを開発するというように発想を転換する必要がある。

このような考えのもと、製品品質を厳密に制御しつつ飛躍的に高効率な生産ができるマイクロプラント構築の基礎となる、マイクロ機能デバイスの設計論を、マイクロ流体セグメントという概念をベースに開発する。また、大量生産に欠かせないマイクロデバイスの集積化に関する方法論、および大量生産型マイクロ化学プラントの操作・制御論を確立する。そして、プロトタイププラントを製作し、提案した設計論、集積化法、操作・制御論の妥当性を検証する。これにより、高付加価値生産次世代化学産業に対応できる新化学工学の学理を提示する。

### 【研究の方法】

期間前半は、「マイクロデバイスの設計論の構築」と「集積化および操作法の開発」の2項目について2グループ体制で研究を遂行する。設計論の構築では、単一流路および多流路のデバイスの最適設計までを対象範囲とし、設計手法の提案と提案した手法に基づくデバイスの試作、液相、気相、液液、気液のモデル反応、分離操作を実施して、統一的な設計論を確立し妥当性を検証する。集積化および操作法の開発では、デバイス単位での集積化法の確立と長期安定運転に不可欠な制御法、状態推定法、異常診断法の確立とその実験による検証を行う(図1参照)。

期間後半では、全研究者一体となってそれまでの成果を融合し、大容量生産用マイクロデバイス・プラントを設計するための統合的手法を開発するとともに、実際にポリマーの製造、有機合成、CO<sub>2</sub>吸収などの各分野での典型的な対象に対応できるプロトタイププラントを試作し、その性能を評価する。そして、その成果をもとに、従来の化学工学の考え方を一段階精密化した設計、操作の方法論を提示する。

(1)形状を含むデバイス設計論 (2)集積化法、プロセス設計・操作論

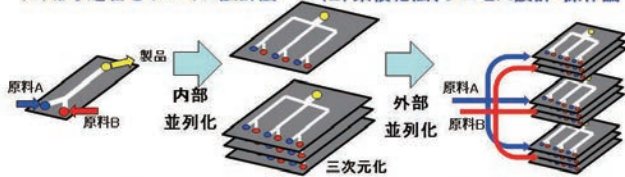


図1 大量生産型デバイスの設計手順

### 【期待される成果と意義】

実験用ではなく、大容量マイクロデバイスおよびプラントの設計・操作を対象としている点、およびデバイス形状やデバイス内の流れの状態を考慮したモデルに基づく設計法を構築しようとしている点が、本研究の大きな特徴である。よって、提案した設計法が確立できれば、マイクロプラントのみならず、一般の化学プラントの設計法としても革新的なものとなり、高機能製品の機能を装置の形状によって引き出すという、プロセスオリエンティッド合成という新発想のプロセス工学を確立できる。

本研究では、数千流路という単純な並列化では達成できない集積度のプラント構築・運転法を開発しようとしている。本開発が進めば、混合、反応、熱交換の効率化で1/10にコンパクト化された本質安全なプロセスを提供可能となり(図2参照)、我が国の化学産業の構造改革へ大きく貢献できる。



図2 大量生産型マイクロ化学プラント

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- N. Aoki, R. Umei, A. Yoshida & K. Mae, "Design Method for Micromixers Considering Influence of Channel Confluence and Channel Bend on Diffusion Length", *Chem. Eng. J.*, 167, 643-650 (2011)
- Y. Tanaka, O. Tonomura, K. Isozaki, & S. Hasebe: "Detection and Diagnosis of Blockage in Parallelized Microreactors", *Chem. Eng. J.*, 167, 483-489 (2011)

### 【研究期間と研究経費】

平成25年度～29年度  
162,000千円

### 【ホームページ等】

<http://www-pse.cheme.kyoto-u.ac.jp/>  
hasebe@cheme.kyoto-u.ac.jp

研究課題名 熱可塑 CFRP の直接その場成形プロセスの解明と  
実用展開



名古屋大学・大学院工学研究科・教授 いしかわ たかし  
石川 隆司

研究分野: 総合工学、航空宇宙工学  
キーワード: 構造・材料、複合材料

【研究の背景・目的】

炭素繊維強化複合材料(CFRP)は、同じ重量の構造用鋼と比較して約 10 倍の強度があり、耐食性にも優れるため、製品のエネルギー効率の向上や寿命の拡大に寄与し、持続可能社会に不可欠の材料として期待されている。しかしながら、高強度な CFRP は、素材となるプリプレグ(樹脂を予め染みこませた繊維のシート)や成形設備であるオートクレーブ(高温高圧でプリプレグを硬化させる釜)が高価であり、かつ、製作に長時間を要するので、製品が高価なものになってしまう。また、リサイクル性も悪く、オートクレーブのサイズの制限により実用的な製作可能な最大サイズにも限界がある。

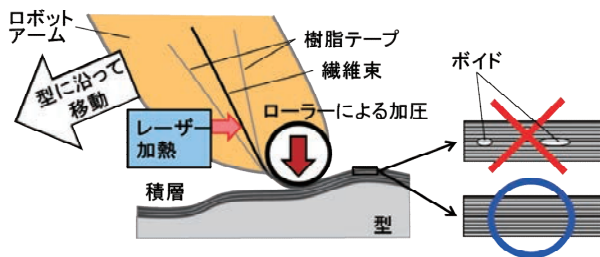


図 1 直接その場成形法概念図

そこで、低コストでリサイクル可能な CFRP の成形法として、プリプレグやオートクレーブを用いず、熱可塑樹脂(加熱により柔らかくなる樹脂)テープと炭素繊維束を直接、最適方向へ積層し、加熱・加圧、硬化を行う手法(直接その場成形法;図 1)を提案し、各プロセスの基礎現象を解明し、さらに実用に向けた評価法を確立する。そして、この方法における、繊維や樹脂の熱伝導、樹脂同士の融着、樹脂の繊維への含浸や、ポイド(気泡)の発生、消滅、放出を含むマクロからミクロに至る熱可塑 CFRP(CFRTP)の成形プロセスを解明する。また、成形条件やポイド、繊維配向等のミクロ、メゾレベルの内部構造と CFRTP の強度の関係や超高速現象である CFRTP の破壊プロセスを解明する。これらの現象の解明により、低コスト CFRTP を高強度にするための最適な成形条件と内部構造を探索することを目的とする。

【研究の方法】

直接その場成形法の実現可能性を調べるために、主要部分を抽出した簡易モデルを製作し、レーザー強度、加圧、送り、繊維や樹脂の種類や厚さ、繊維

配向等の成形条件や内部構造と材料中のポイドや材料の強度等の関係を調べる。ポイドの生成、放出に関しては、プロセス途中の材料を製作しデジタル顕微鏡等により観察評価する。

衝撃破壊試験においては、高速ビデオカメラや速度干渉法を用いた観察や数値シミュレーションにより高速衝突時の動的挙動を解析し破壊機構を解明する。得られた結果を分析し、耐衝撃破壊特性の改善等 CFRTP を高強度にするための最適な成形条件、内部構造を科学的に明らかにする。

【期待される成果と意義】

プリプレグテープにより CFRP を成形する装置自体の開発は欧米を中心に行われてきており、数は少ないが製品となっている。しかしながら、成形プロセスの科学的な理解は進んでいない。当該研究課題では、新たにレーザー融着による直接その場成形法を提案し、成形プロセスおよび破壊プロセスを科学的に解明することにより、CFRTP をより高品質なものとするための最適な成形条件と内部構造を設計する方法の提案を世界に先駆けて行おうというものである。この結果、低コストでも高強度で性質のばらつきも少ない高品質な CFRTP の製作が可能となり、CFRTP の利用対象を著しく拡大し、持続可能社会実現に向けて大きな貢献ができるものとする。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T. Ishikawa, et al., "Some Experimental Findings in Compression-After-Impact Tests of CF/PEEK(APC-2) and Conventional CF/Epoxy Flat Plates," Composites Science and Technology, Vol. 55 No. 8, pp. 349-363, (1995).
- ・ Y. Yamada, et al., "Three-dimensional Measurement of CFRP Deformation during High-speed Impact Loading," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 646, pp. 219-226, (2011).

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
174,100 千円

【ホームページ等】

<http://structure.nuae.nagoya-u.ac.jp/>



研究課題名 宇宙システムの高電圧化に向けた超小型衛星による帯電・放電現象の軌道上観測

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

ちょう めんう  
趙 孟佑

研究分野: 総合工学、航空宇宙工学

キーワード: 航空宇宙環境、衛星帯電、小型衛星

【研究の背景・目的】

ISS 以降の 1MW 近い次世代大型宇宙システムの実現には、最低でも 300V での発電が必要である。しかし、低軌道で発電電圧が 200V を超えるとプラズマによる太陽電池表面の帯電により放電が発生する。放電は中・大型衛星の信頼性を脅かす主要因の一つである。現在の衛星開発では、打上げ前に、太陽電池アレイで放電が発生するか、発生したとしてどのような影響があるかについて、地上試験が行なわれているが、軌道上での放電電流波形や放電画像は誰も観測したことがない。「正しい地上試験」を実施するには、真空容器の壁がなく、超高真空・太陽光・紫外線・衛星速度等々といった軌道上複合環境の中で、一度は放電電流を計測し、場所を特定する必要がある。

本研究の目的は、衛星帯放電に関する諸現象の軌道上観測並びにその抑制技術を超小型衛星「鳳龍四号」にて実証する。オーロラ帯を通過する低軌道上に衛星を打ち上げて以下の宇宙実験を行なう。

- (1) 太陽電池アレイ上での放電電流を高速サンプリング(毎秒数 10M サンプル以上)で計測し、放電画像を撮影して放電発生点を特定すると共に、放電による太陽電池の電気性能劣化を調べる。
- (2) 300V で発電しても放電を起こさない高電圧 SA 技術の実証
- (3) 受動的電子エミッタによる衛星帯電緩和技術の宇宙実証

【研究の方法】

H24 年に趙等が開発した鳳龍弐号によって、世界で初めて軌道上での 350V 発電を行なうことに成功した。また、-300V にバイアスされた従来型太陽電池アレイでの放電検知にも成功した。本研究課題は鳳龍弐号で得られた成果を更に発展させようとするものである。

鳳龍弐号をベースに鳳龍四号を開発する。ミッション機器以外の殆どは、既開発品または市販品で構成する。放電電流計測と画像取得は民生品の高速デジタルカメラやカメラ・画像取得ボード等をベースに開発する。放射線試験を除き、衛星及び搭載機器は全て九工大内で試験する。衛星を 2 年半で製作し、海外での商業打上げと H2A ロケット相乗りの両方を追求する。H27 年度下期から H29 年度上期の間で H2A 相乗りが可能となれば、H2A を選択し、相乗りの時期が合わないか選定に漏れた場合は、海外で H28 年度に打上げる。運用は最低でも 1 年間実施する。

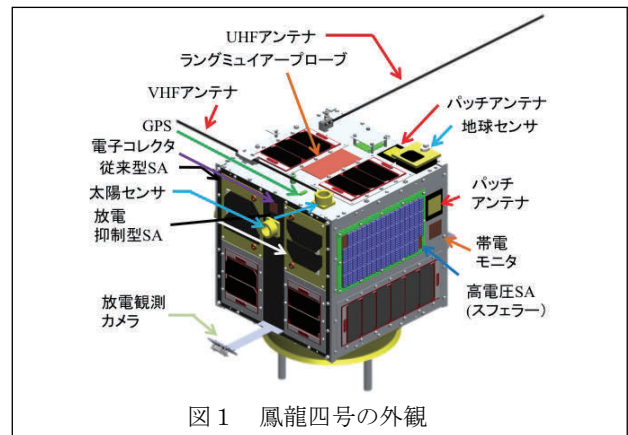


図1 鳳龍四号の外観

【期待される成果と意義】

放電波形・画像の観測結果を国際標準規格「衛星搭載太陽電池パネルの帯電放電試験方法」(ISO-11221)の改訂版に反映させ、大型衛星の信頼度向上に貢献する。また、300V を超える電圧で発電しても放電しないことを実証し、近い将来の 1MW 級の大型宇宙システムや 100kW 級の電気推進システムに必須の高電圧発電技術の実現に貢献する。更に、センサ・電力・ケーブルを必要としない完全受動型の動作が可能な電子エミッタの実証により、革新的帯電緩和手法の実用化を促して地球観測衛星や静止衛星の信頼度向上に貢献する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Cho, M., Masui, H., Iwai, S., Yoke, T., Toyoda, K., “Three Hundred Fifty Volt Photovoltaic Power Generation in Low Earth Orbit”, J. Spacecraft and Rocket, doi: 10.2514/1.A32559, 2013.
- ・ Hosoda, S., Toyoda, K., Cho, M., et al., “Development of 400V Solar Array Technology for Low Earth Orbit Plasma Environment”, IEEE Trans. Plasma Sci. Vol.34, pp. 1986-1996, 2006

【研究期間と研究経費】

平成 25 年度 - 29 年度  
157,700 千円

【ホームページ等】

<http://laseine.ele.kyutech.ac.jp>  
cho@ele.kyutech.ac.jp