

## 【基盤研究(S)】

### 理工系(数物系科学)



#### 研究課題名 代数幾何と可積分系の融合と深化

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

研究分野: 数学

キーワード: 代数幾何、可積分系、微分幾何、複素多様体

#### 【研究の背景・目的】

稲場・岩崎・齋藤は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を非特異代数多様体として構成し、さらに線形接続に解空間の局所系を対応させるリーマン・ヒルベルト対応が全射かつ固有双有理正則写像であることを示した。また稲場・齋藤はこの結果を条件付きではあるが不確定特異点の場合にも拡張した。このリーマン・ヒルベルト対応の幾何学的确立から、モノドロミー・ストークスデータ保存変形から得られる非線形微分方程式系の幾何学的パンルヴェ性の厳密な証明をあたえた。

これらの結果に加えて、近年の双有理幾何学や、種々の量子不変量の研究の進展があり、代数幾何と可積分系の理論の融合と深化が期待される。

これらの背景の下に我々は次の3つを研究目的とする。

1. 不確定特異点を許す安定放物接続のモジュライ空間とリーマン・ヒルベルト対応の幾何学の研究
2. 双有理幾何学の極小モデル理論の研究と可積分系の相空間の良いモデルの構成や、幾何学的ラングランズ対応等への応用
3. 量子的不変量およびその相関関数の研究および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、ミラー対称性、幾何学的表現論、導来圏の幾何学、数理論理学等を専門とする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、また共同研究を進展させる。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との交流も密にして、研究交流を活発化し、共同研究等を行う。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。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。

#### 【期待される成果と意義】

モノドロミー保存変形から得られる微分方程式の相空間を安定放物接続のモジュライ空間の族として

代数的に構成する事により、微分方程式に付随する種々の代数幾何学的構造が明らかになることが期待される。また、リーマン・ヒルベルト対応により、接続のモジュライ空間と穴開き代数曲線の基本群の表現のモジュライ空間が解析的に同型になる事が示されるが、これらの同型を用いて表現のモジュライ空間の種々の構造が明らかになることが期待される。さらに、正則シンプレクテック構造、見かけの特異点による標準的な座標、ラグランジュ多様体の族、ラプラス変換等の接続のモジュライ空間の詳細な幾何構造が解明されることが期待される。さらに、これらの研究を進展させ、幾何学ラングランズ対応やミラー対称性等の理解のための数学的基礎が確立することが期待される。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] F. Loray, M.-H. Saito, C. Simpson, Foliations on the moduli space of rank two connections on the projective line minus four points, *Sém. et Cong.* 27, (2012), 115-168
- [2] M. Inaba, K. Iwasaki and M.-H. Saito, Moduli of Stable Parabolic Connections, Riemann-Hilbert correspondence and Geometry of Painlevé equation of type VI, Part I, *Publ. Res. Inst. Math. Sci.*, 42, (4), (2006), 987-1089.
- [3] T. Mochizuki, Asymptotic behaviour of tame harmonic bundles and an application to pure twistor D-modules. I, II, *Mem. Amer. Math. Soc.*, 185, (2007), no. 869-870

#### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
94,900千円

#### 【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 無限群と幾何学の新展開

東京大学・大学院数理科学研究科・教授

つばい たかし  
坪井 俊

研究分野：幾何学

キーワード：位相幾何、無限群

### 【研究の背景・目的】

様々な幾何学における対称性を記述する群は通常、非可換無限群であるが、有限的な対称性を記述する有限群と比較して、非可換無限群の理解は難しいものであった。近年、リー群およびその離散部分群、様々な構造を保つ微分同相群、曲面の写像類群、有限表示群、実樹木の変換群などの理解が進んだ。また、群作用の特性類、無限群上の安定交換子長、解析的、確率論的力学系不変量を用いた無限群の研究の手法が整えられてきた。すなわち、無限群と幾何学の研究を総合的に進める基礎が固められてきた。

そこで本研究では、幾何学およびトポロジーにおける無限群の幾何学的研究の発展を踏まえ、関係する分野の研究者の共同研究により、無限群作用のトポロジー的、幾何的、力学系的な性質と様々な不変量の関係を明らかにする。さらに無限群に対する新しい不変量を創出し、その意味を明らかにするとともに、それらをトポロジーおよび幾何学の諸問題へ応用する。

### 【研究の方法】

5つのテーマを相互に関係させて研究する。

- (1) [空間形と無限群] 不定値の計量を持つ空間形への離散的等長作用の変形の様子を、空間形に付随する無限遠空間への作用とともに明らかにする。クライン群の分類理論と同様の理論を他の種類の空間形への作用について構築する。

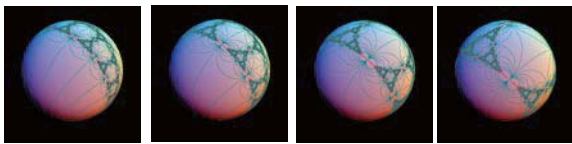


図1. 極限集合となるアポロニアンガスケットの变形

- (2) [多様体の微分同相群] シンプレクティック微分同相群、接触微分同相群、葉層構造を保つ微分同相群などについての、群自体の位相、分類空間の位相を明らかにするとともに、それから導かれる不変量を定義し計算する。これを葉層構造論に応用する。
- (3) [曲面の写像類群] 写像類群と微分同相群の不変量の関係を解明する。曲面の写像類群の不変量と3次元多様体の不変量を新たに定義し、3次元多様体の分類に応用する。閉曲線複体、測地的ラミネーション、ファットグラフなどによるアプローチの相互関連を明らかにする。

- (4) [無限群の力学系的不変量] 不変集合におけるダイナミクスから導かれる不変量、幾何学的群論の成果として得られる不変量を微分同相群に対して計算する。アフィン群のような群の作用の存在の問題、一意性の問題、共役の問題を明らかにする。

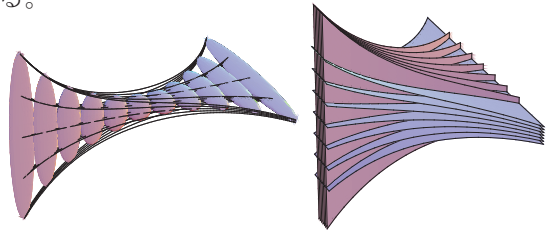


図2. アノソフ作用は伸縮を表す力学系不変量で記述される

- (5) [無限群と野生的空間] 群作用の空間のコンパクト化への作用について、その従順性を明らかにする。群作用の極小集合として現れる位相空間の研究を行う。リーマン面の変形空間であるタイヒミュラー空間の様々なコンパクト化に応用する。

### 【期待される成果と意義】

非可換無限群の研究の新しい方法の確立が期待され、微分同相群など手掛かりが少ないが非常に重要な無限群の研究を大きく前進させることができる。これにより、様々な数学的対象に表れる現象を統一的に理解できるようになる。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・Takashi Tsuboi: On the uniform perfectness of the groups of diffeomorphisms of even-dimensional manifolds, *Commentarii Mathematici Helvetici*, 87, (2012) 141-185.
- ・Takashi Tsuboi: On the group of real analytic diffeomorphisms, *Annales Scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, 49, (2009) 601-651.

### 【研究期間と研究経費】

平成24年度－28年度  
156,700千円

### 【ホームページ等】

<http://faculty.ms.u-tokyo.ac.jp/users/IGAG/>

## 【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）



### 研究課題名 現代解析学と計算科学の手法による 乱流の数学的理論の構築

早稲田大学・理工学術院・教授

こぞの ひでお  
小菌 英雄

研究分野：偏微分方程式論、非線形解析学

キーワード：ナビエ・ストークス方程式、調和解析学、関数解析学、大域的適切性、漸近解析

#### 【研究の背景・目的】

非線形発展方程式における主要な研究テーマとして、解の時間無限大における漸近挙動が上げられる。研究代表者小菌はナビエ・ストークス方程式の解のエネルギー減衰について先駆的な研究を行ってきた。これは、元来、ナビエ・ストークス方程式の数学的研究の始祖である Leray によって提唱された有名な問題である。最近、数学解析における解の漸近指数は、数値シミュレーションによる計算結果と完全に一致することが明らかになった。また、数値シミュレーションとの比較において、現代解析学の有力な手法としては、無限大の取り扱いを可能にすることが上げられよう。実際、無限領域を有限領域の極限とみなし、有限領域で得られた種々の厳密量の漸近挙動を求めることは、有限サイズでのみ可能な数値計算結果を本質的に超越する手法を提供するものである。一方、金田らはこれまで乱流の計算科学および統計理論的研究を行ってきた。とくに最も規範的な乱流場である一様等方性乱流について、世界最大規模の DNS 実現の実績 (Super Computing 2002, Gordon Bell 賞) を持ち、そのデータ解析に基づいた最先端の知見を有している。また 2 平板間の乱流についても現在世界最大レイノルズ数の DNS を進めている。さらに恣意的パラメータを含まず、最も理論的整合性の高いとされる乱流のスペクトル統計理論の開発を進めてきた。以上のような実績を背景に、本研究では、現代解析学の手法を用いて複雑な流動現象の解明、およびその予測信頼性向上に貢献すべく乱流の数学的理論を構築する。

#### 【研究の方法】

本研究は、数学解析研究班と流体力学研究班の 2 つ研究グループの連携によって推進する。数学解析研究グループでは、非線形偏微分方程式の手法、特に調和解析学を用いてナビエ・ストークス方程式および簡素化された方程式の解の性質を、数学的厳密理論および数値実験双方の観点から考察する。領域のサイズの影響やエネルギー減衰といった数値計算では扱えない無限大や極限操作を研究対象とし、乱流の普遍原理に解明に数学的な確証をえる。流体力学グループでは、主として計算科学的方法、とくに大規模直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation=DNS) による乱流現象の解明、及び、数理物理的根拠を持ち恣意的調節パラメータを含まない情報縮約手法の開発に挑戦する。

(I) 調和解析学、特異極限と有限性の評価

- ・無限領域における流れの解析
- ・渦度の集中と特異点の発生の解明
- ・乱流の普遍性に対する計算領域サイズの影響評価

(II) 乱流のもつ普遍的法則性の解明

- ・粘性領域での渦度集中領域の統計法則
- ・乱流・非乱流界面近傍の統計法則
- ・一様等方性乱流の減衰則の検証

(III) 情報縮約手法、予測可能性、信頼性評価

- ・2 進分解関数の渦度の表現と方程式の適切性の解明
- ・乱流の非経験的 LES スペクトルモデルの開発

#### 【期待される成果と意義】

乱流の解明は単に数理解析学や流体力学の分野に留まらず、地球環境、大気・海洋、宇宙・航空、エネルギー、防災等に象徴される社会の諸問題に深く関わっている。大型計算機の発達により単純化された乱流モデルの構築、小さなスケールの流れの解析がかなりの精度で実現されている。更に無限大や極限といった数学解析独自の手法を展開することにより、これまでの大規模計算科学による流体现象、特に大きなスケールの乱流の普遍原理の確立が「流れの数理」に大いなる成果をもたらす。当該研究課題は、非線形偏微分方程式論の見地からは「ナビエ・ストークス方程式大きなデータに対する解の一意存在」から真正面から取り組むという挑戦的なものである。ここで大きなデータとは、まさに大きなレイノルズ数と同値であり、乱流の解明と密接に関わる。それゆえ本研究の現代解析学と計算科学の手法による「流体数学理論の構築」は、乱流を典型とする非線形超巨大自由度力学系に対する数理科学の新しい応用分野の開拓にも貢献すると期待される。即ちナビエ・ストークス方程式を代表とする非線形偏微分方程式論、更に巨大自由度の非線形力学の変革をもたらしうる重要なものである。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・小菌,小川,三沢,これからの非線形偏微分方程式 日本評論社 2007
- ・小菌, 乱流の数理 パリティ 18, 28--35 (2003).
- ・小菌, Navier-Stokes 方程式,クレイ研究所ミレニアム懸賞問題解説 数学 54 巻 178--202 (2002).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度

147,000 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.math.sci.waseda.ac.jp/math/>



## 【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）



### 研究課題名 流体现象のマクロ構造とメゾ構造解明のための 解析理論の構築

早稲田大学・理工学術院・教授

しばた よしひろ  
柴田 良弘

研究分野：基礎解析学

キーワード：関数方程式、流体数学、確率解析、大域解析学、数値解析

#### 【研究の背景・目的】

工学を始めとして気象学、海洋学、医学、生命科学などに現れる流れの解析は現代科学の重要な課題である。本研究は、その中でも特に運動する剛体周りの水や空気の流れの安定性と流体機械の気泡による壊蝕問題に関連する混相流の解析を主な対象とする。これらの問題を数学的に厳密に解くことは、流体数学の発展のみならず、飛躍的に進歩している計算機能力と合わせて、流体力学を基盤とする多くの科学技術の進展にも深く寄与するものである。

ただし、上記の問題を厳密に解析する際に、そこに現れる多重スケール性が大きな障害となっている。そこで、本研究ではナビエ・ストークス方程式の解析に新展開を与えるとともに、メゾレベルからの新しい運動方程式を導出し、流体構造のマクロとメゾ両面の理解のための解析理論を確立することを目標とする。具体的には、従来の研究方法に加え  $\mathcal{R}$  有界性、Fourier 制限法、擬微分作用素、有限要素法などを導入し、ナビエ・ストークス方程式の初期値・境界値問題の解析に新展開を与える。また確率解析、大域幾何学、非線形偏微分方程式の専門家の共同研究で、メゾレベルの流体分子の運動から確率項を本質的に含む粘性流体の運動方程式を導出し、流体数学の解析に新しい知見を与える。

#### 【研究の方法】

本研究では作用素値 Fourier multiplier 理論によるとストークス作用素のレゾルベントの  $\mathcal{R}$  有界性から解析半群の生成と最大正則性原理が同時に導かれることを用いることにより、粘性流体の自由境界問題に対する時間局所解の一意存在について統一理論を構築する。また従来の手法に加えて非線形分散型方程式研究で成功を収めている Fourier 制限法と擬微分作用素、有限要素法を用いることによりナビエ・ストークス方程式の定常解の安定性を示す。更にはメゾレベルのランダム運動に変分原理を導入し Arnold-Ebin-Marsden のプログラムを粘性流体に拡

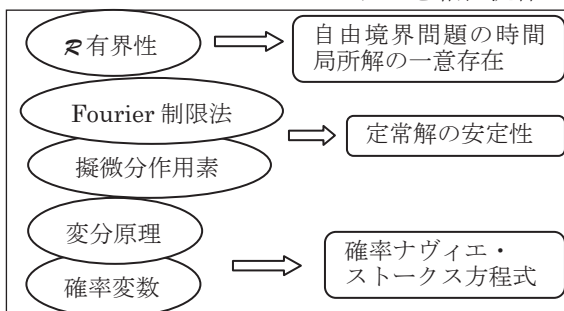


図1 研究の方法

張することにより、あるいは現象論的な議論によるトップダウン的な方法により、確率項を本質的に含む運動方程式を導出する。

#### 【期待される成果と意義】

レゾルベントの  $\mathcal{R}$  有界性を示すことで解析半群の生成と最大正則性原理を同時に示すことは、自由境界問題の時間局所解の存在に関する一般的な統一理論を与えるばかりでなく、より一般の非線形放物型発展方程式の理論に新しい研究方法を与えるものである。またストークス作用素のスペクトル近傍の解析に Fourier 制限法や擬微分作用素を導入することは流体数学研究では初めての試みであり、安定性理論を格段に進歩させると期待される。さらにキャビテーションの構造解明は現在のマクロレベルのナビエ・ストークス方程式だけでは不可能であるが、本研究により流れの構造をマクロオーダーとマイクロオーダーの両面から解明できるようになると、マクロとメゾを繋ぐ数学理論の統一プログラムを提言することができるとともに、流体機械の壊蝕問題の解決にも新しい視点が導入できると期待される。

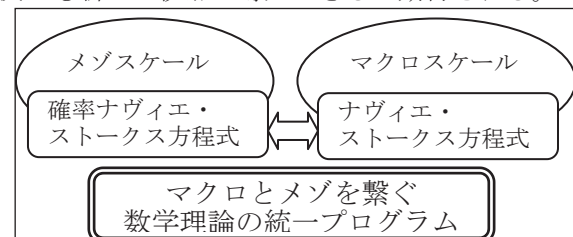


図2 期待される成果

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Shibata and S. Shimizu, On the  $L_p$ - $L_q$  maximal regularity of two phase Stokes equations: Model problems, J. Diff. Eqns. **251** (2011), 373-419.
- T. Hishida and Y. Shibata,  $L_p$ - $L_q$  estimate of the Stokes operator and the Navier-Stokes flows in the exterior of a rotating obstacle, Arch. Rational Mech. Anal. **193** (2009), 339-421.

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度  
66,500 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.fluid.sci.waseda.ac.jp/shibata/index.html>

## 【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



### 研究課題名 星間物質の精査によるガンマ線超新星残骸の探求

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

ふくい やすお  
福井 康雄

研究分野: 天文学

キーワード: 電波天文学、超新星残骸、星間陽子、ガンマ線

#### 【研究の背景・目的】

近年のガンマ線観測の目覚ましい発展により、分子雲と比較できる高分解能のガンマ線データが取得できるようになった。星間陽子(分子雲と水素原子ガス(HI))とガンマ線放射の比較を通して、我々は最も代表的な TeV ガンマ線超新星残骸(supernova remnant = SNR) RX J1713.7-3946において、陽子起源ガンマ線を支持する成果を得た(図1、Fukui et al. 2012)。本研究ではこの比較・手法を20余個のガンマ線 SNR に拡張し、前例のない系統的な星間物質の精査を行い、陽子起源ガンマ線の可能性を追究する。これにより、SNRにおけるガンマ線起源と宇宙線加速機構を解明し、宇宙線エネルギーの定量、宇宙線加速の時間発展の描像を明らかにする。

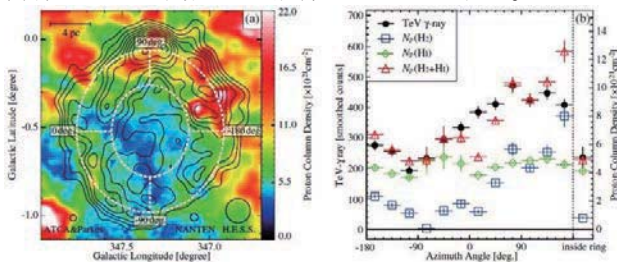


図1. (左) 星間陽子の柱密度(カラー)に TeV ガンマ線放射の分布(コントア)を重ねたもの。(右) 水素分子、水素原子、星間陽子の柱密度と TeV ガンマ線放射の方位角分布を表している。

#### 【研究の方法】

本研究の骨子は、20余個のガンマ線 SNR を対象とした 1) 分子と原子の総合による全星間陽子の定量と、2) 100 MeV - TeV 領域のガンマ線との比較、3) 理論との比較によるガンマ線放射機構の解明、である。以下に各骨子の詳細を示す。

##### 1) 分子と原子の総合による全星間陽子の定量

分子と原子状態の陽子について、SNR に付随する成分を定量する。そのために、主に NANTEN2 の CO 輝線と ATCA (オーストラリア電波干渉計) の HI 輝線を用いて 2-3 分角の分解能で全星間陽子を観測する。また、北天の天体については、分子雲は大阪府大 1.85m 鏡によって観測データを取得し、HI については Arecibo、VLA 等によって同様の観測を行なう。さらに、分子雲の微細構造を分解するために、Mopra 22m 鏡、NRO 45m 鏡、ALMA 等を活用する。

##### 2) 100 MeV - TeV 領域のガンマ線との比較

まず、CO 輝線とガンマ線・X 線のイメージの比較から、付随する分子雲の速度範囲をしぼり込む。この際、粒状に、かつ狭い速度範囲に分布する分子雲に

よって、速度は見通しよく特定できる。HI は CO に比べて空間的速度的に切れ目なく広がる特徴がある。CO で特定された速度範囲について HI を解析し、分子とあわせて全陽子の分布を求める。申請者らはすでに HESS [1 - 10 TeV]、Fermi [1 - 10 GeV]、AGILE [100 MeV - GeV] との国際共同研究を行なって多くの実績をあげている。これらの3桁以上にわたるガンマ線のエネルギー分布の全体を星間陽子と比較し、ハドロン起源ガンマ線を特定する。

##### 3) 理論との比較によるガンマ線放射機構の解明

MHD計算では、非一様星間媒質中の衝撃波相互作用をシミュレートする。粒状の分子雲が存在する場合、原子ガスが主である場合等について、観測からのインプットを反映させて計算を行う。計算結果を放射スペクトルと比べ、磁場分布等を検討する。宇宙線と星間媒質の分布は、ガンマ線・X線スペクトルに強く影響する。本解析では、空間分布をも考慮した加速機構の詳細の解明を目指す。

#### 【期待される成果と意義】

高エネルギー宇宙線の起源は天文学の大きな謎であり、多くの研究者がその解明に取り組んできた。宇宙線の主要成分は陽子であり、その百分の一以下の電子成分他を含む。 $10^{15.5}$  eV 以下の宇宙線は銀河系内起源と考えられており、SNR が系内宇宙線加速源として最も有力である。星間陽子が加速されている証拠は未だに確立されていない。本研究によって星間陽子加速現場が特定され、宇宙線加速の詳細が明らかになると期待される。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- "A Detailed Study of the Molecular and Atomic Gas Toward the  $\gamma$ -ray SNR RX J1713.7-3946: Spatial TeV  $\gamma$ -ray and ISM Gas Correspondence", Fukui, Y.(1/17), Hayakawa, T.(6/17), Yamamoto, H.(12/17), Okuda, T.(13/17) et al., The Astrophysical Journal, vol. 746, Issue 1, id. 82, 2012
- "12 mm line survey of the dense molecular gas towards the W28 field TeV gamma-ray sources", Nicholas, B., Fukui, Y.(5/8) et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol.411, pp.1367-1385, 2011

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度  
163,700 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/ae/>

## 【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）



### 研究課題名 革新的な実験手法を用いた ミュオン・電子転換過程の探索

大阪大学・大学院理学研究科・准教授 あおき まさはる  
青木 正治

研究分野：数物系科学

キーワード：素粒子（実験）、ミュオン

#### 【研究の背景・目的】

ミュオン・電子転換過程 ( $\mu^- + N \rightarrow e^- + N$ ) は荷電レプトン・フレーバを保存しない (CLFV) 反応である。CLFV 反応は、ミュオンや K 中間子、タウレプトンなど様々な粒子を用いた実験で探索されて来たが、未だに 1 例も発見されていない。そのため、素粒子の標準模型にも組み込まれていない。

ところが、ニュートリノの微小な質量を説明する超対称性シーソー理論や、余剰次元理論など、標準理論を超える多くの新理論においては CLFV 反応が観測されるのが自然であると考えられている。これまで行われた実験の感度をわずかに改善するだけで、CLFV の信号を発見できる可能性が示唆されている。

CLFV 反応を発見できれば宇宙や素粒子の研究に大きなインパクトを与えることは必至である。本研究では、これまでに行われた実験の感度を 100 倍以上改善して、 $10^{-14}$  の感度でミュオン・電子転換過程を探索する。

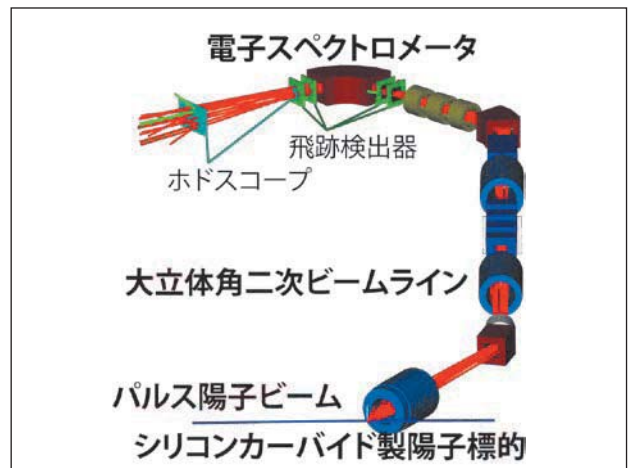
#### 【研究の方法】

$10^{-14}$  の感度でミュオン・電子転換過程を探索するために、茨城県東海村にある大強度陽子加速器 J-PARC で作り出す大強度高品質パルス陽子ビームを活用する。このパルス陽子ビームをシリコンカーバイド製陽子標的に当てることにより、陽子標的に大量 ( $10^{10}/\text{sec}$ ) のミュオン原子を生成する。ミュオン・電子転換過程の結果放出される 105 MeV/c の電子は、大立体角二次ビームラインで輸送して、電子スペクトロメータで運動量を精密に測定する。パルス陽子ビームから遅れたタイミングで 105 MeV/c の電子を観測できれば、ミュオン・電子転換過程の証拠となる。

ミュオンを利用する従来の研究では、二次ビームラインでミュオンを実験室へ取出してから実験を行うのが普通であった。これに対して本研究では、陽子標的に静止したミュオンを直接利用して、陽子標的の原子核とミュオンが反応して発生する電子を二次ビームラインで取出すという斬新な手法を開発した。これにより、現存する施設を活用して、高感度の実験を低コスト・短期間で実現することが可能となった。

#### 【期待される成果と意義】

これまでに行われた実験感度を 100 倍改善するので、米国で計画中の Mu2e 実験よりも先にミュオン・電子転換過程の信号を発見できる可能性がある。



実験装置

また、たとえ信号を発見できなかったとしても、スイス PSI 研究所で行われている  $\mu \rightarrow e\gamma$  崩壊探索実験や、つくば KEK で計画されているタウレプトンの実験などと組み合わせることによって、超対称性など標準理論を超えた新しい物理を理解する大きな情報源となる。

本研究は J-PARC の特徴を最大限活かした提案であり、J-PARC から世界に発信する重要な学術研究として期待される。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- “ミュオン・電子転換過程探索実験” 青木正治, めそん **32**, 26-33 (2010).
- “Search for right-handed currents in the decay chain of  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ,  $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ ”, M. Aoki, T. Yamazaki, J. Imazato *et al.*, Phys. Rev. D **50**, 69-91 (1994).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度  
167,800 千円

#### 【ホームページ等】

<http://deeme.hep.sci.osaka-u.ac.jp/>



## 【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）



### 研究課題名 48Ca の 2 重ベータ崩壊の研究

大阪大学・核物理研究センター・センター長

きしもとただふみ  
岸本 忠史

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核（実験）

#### 【研究の背景・目的】

我々の周囲を取り巻く環境はすべて「物質」で出来ている。一方、「物質」と対をなす「反物質」も存在することが分かっている。しかし、「反物質」は自然界にはほとんど存在していない。この現在の「物質」優勢の宇宙を説明するには、次の二つのことを証明する必要がある。一つは、「物質」と「反物質」の世界の物理法則にわずかな差があること（CP 対称性の破れ）、もう一つが、「物質」と「反物質」が転換可能であること（レプトン数保存則の破れ）である。本研究の目的は、「物質」と「反物質」が転換可能であるか否かを検証するものである。

「物質」と「反物質」が転換可能であるか否か、を検証するためには、二重ベータ崩壊の研究が必要である。二重ベータ崩壊のなかでも、「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」（図 1 参照）は、「物質」と「反物質」が転換可能である時のみに起こる現象である。本研究課題では、この「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」の研究を行う。

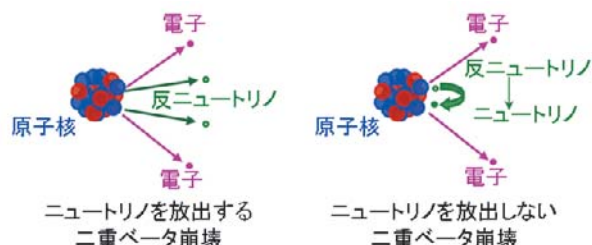


図 1 「ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊（左）」と「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊（右）」。

#### 【研究の方法】

「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」は、非常に崩壊確率が低い。その半減期は  $10^{24}$  年以上とされている。この非常にまれな崩壊を観測するためには、次の二点が重要となる。まず、大量の二重ベータ崩壊核を準備すること、そしてこの二重ベータ崩壊核を低ノイズの環境で測定することである。この二つを同時に満たすのは容易ではない。なぜならば、大量の二重ベータ崩壊核を準備し測定装置を大型化すると、比例してノイズも増えるためである。そのために我々は、まず低ノイズ測定装置を開発し、その後、濃縮した二重ベータ崩壊核を使用することで、測定装置を大型化にすることなく二重ベータ崩壊核を増やす、という方法をとる。

このために、数多くある二重ベータ崩壊核の中で、本研究では 48 カルシウムを用いる。48 カルシウムは、二重ベータ崩壊の際に放出される二つの電子のエネルギー和が、環境放射線よりも高いため、より低ノイズ環境での測定を行いやすいと

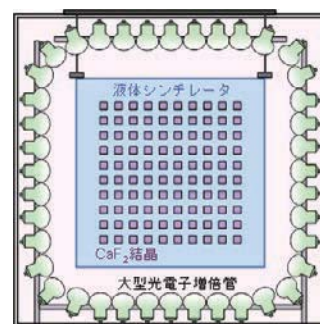


図 2 CANDLES 装置の概念図

いう利点がある。本研究では、48 カルシウムを含んだフッ化カルシウム ( $\text{CaF}_2$ ) 結晶をメイン検出器とした CANDLES 装置（図 2 参照）を用いて二重ベータ崩壊の測定を行う。合わせて、濃縮度を上げた 48 カルシウムを生産するための装置建設を行う。

#### 【期待される成果と意義】

48 カルシウムの濃縮を実現し、かつ、CANDLES 装置での低ノイズ測定を実現することは、二重ベータ崩壊観測に向けた大きな一歩を踏み出すことになる。「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」を検出することで、現在の「物質」優勢の宇宙を説明することにつながり、宇宙素粒子研究分野を飛躍的に推進させる。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ "Neutrino-less Double Beta Decay of  $^{48}\text{Ca}$ -CANDLES", T. Kishimoto *et al.*, AIP Conf. Proc., 1388 (2011) 142.
- ・ "Search for neutrino-less double beta decay with CANDLES", CANDLES collaboration, AIP Conf. Proc., 1441 (2012) 448.

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度  
167,000 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~candles/KibanS2012/index.html>  
e-mail:candles@rcnp.osaka-u.ac.jp

## 【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）



### 研究課題名 革新的低速 RI ビーム生成技術による超重元素の直接質量測定

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター  
チームリーダー

わだ みちはる  
和田 道治

研究分野：原子核物理学

キーワード：質量測定、超重元素、低速 RI ビーム、イオントラップ

#### 【研究の背景・目的】

原子核物理学の夢の一つは注重元素のさらに先にあると予想されている「安定の島」の発見である。その道程は遠いが、殆ど未知である超重元素の質量を直接精密測定し、質量公式の精度を高めること、長寿命であるか $\alpha$ 崩壊しない為検出困難な核種の同定法を確立することが安定の島を目指す王道である。

本研究では、革新的低速 RI ビーム生成技術と高速・高精度質量測定装置を用いて、困難であった短寿命かつ収量の小さい超重元素の質量を 0.1ppm 代の相対精度で能率よく直接測定し、励起準位の不定性の無い真の質量をもって全ての核模型の検証をする。

そして超重核の精密分光の道を拓けると同時に質量のみによる超重元素の同定法の確立を目指す。

#### 【研究の方法】

重イオンの衝突によって生成される超重元素は、気体充填型反跳核分離器（GARIS）によって集められる[1]。従来はその生成された重い原子核の連続した $\alpha$ 崩壊を測定し、核種の同定および $\alpha$ 線のエネルギーから相対質量を導出していた。この方法では $\beta$ 崩壊や自発核分裂核種の同定は出来ず、崩壊 Q 値による間接質量測定では常に励起準位と基底準位の判別に問題があった。

本研究では、分離器からの高速ビームをヘリウムガスセル内で減速熱化し、それを高周波イオンガイド法[2,3]と命名した高周波カーペットによる不均一高周波電場によって高速かつ高効率で導き出す。この低速 RI ビーム生成技術は次世代 RI ビーム施設の標準技術として世界で認められており、本研究者らは短寿命 Be 同位体のレーザー分光で実証した[4]。

こうして減速捕集された低速の超重核イオンビームはイオントラップで冷却・バンチ化され、多重反



図1 RFカーペット

射型飛行時間測定式質量分析器（MRTOF）で質量測定される。MRTOF は一対の静電ミラーからなり、数百回往復させることで飛行距離を稼ぐと同時に初期エネルギー広がりに対する等時性を得る[5]。参照

イオンとの飛行時間差から僅か数ミリ秒の測定時間で質量分解能 20 万が得られ、精度・確度共に<1ppm で直接質量を決定できる。参照用イオンとして電子スプレーイオン源で生成できる分子イオンを使用する。

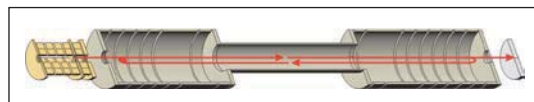


図2 MRTOF 質量分析器

#### 【期待される成果と意義】

大強度重イオンビームと高立体角分離器に本研究の高効率・高速ビーム減速冷却機構、高速高精度直接質量測定装置を組み合わせることによって、これまで極少数しか実験データのない超ウラン元素の質量を新たに百核種以上高精度で決定できる。そのデータを用いて原子核の理論モデルと合わせ質量公式の確度を超重元素の領域において飛躍的に上げることが期待される。それによって安定の島の位置の予言、到達に必要な標的・ビーム・ビームエネルギーを高精度で決定できるようになる。さらに、この高効率直接質量測定法は長寿命 $\beta$ 崩壊核種の同定法の有力な候補となる。

MRTOF は短寿命原子核のみならず、質量数の大きい分子イオンの質量測定にも威力を発揮する。これによって生物・化学分子の組成を質量のみから一意に決定する分析への応用も期待されている。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73, 2593 (2004).
- [2] M. Wada et al., Nucl. Inst. Meth. B204, 570 (2003)
- [3] A. Takamine, M. Wada et al., Rev. Sci. Inst. 76, 103503 (2005).
- [4] K. Okada, M. Wada et al., Phys. Rev. Lett. 101, 212502-0-4 (2008).
- [5] P. Schury et al., Eur. Phys. J. A 42 (2009) 343.

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度－28 年度  
106,500 千円

#### 【ホームページ等】

[http://www.nishina.riken.jp/labo/inst\\_slowri.html](http://www.nishina.riken.jp/labo/inst_slowri.html)



## 【基盤研究(S)】

### 理工系(数物系科学)



## 研究課題名 磁性体における創発電磁気学の創成

東京大学・大学院工学系研究科・教授 ながおさ なおと  
永長 直人

研究分野：数物系科学

キーワード：磁性

### 【研究の背景・目的】

固体電子論は近年新しい展開を見せている。その源流は、高温超伝導と量子ホール効果、に遡ることができる。前者は、**電子相関**の物理を開拓し、後者は**トポロジー**の概念を固体物理学に導入する端緒となった。現在、この2つの潮流が合流するところに「創発性」という概念が構築されつつある。本研究は、このような背景下、固体中、特に磁性体中に焦点を絞って新しい電磁気学の創成を行う。電子状態・スピン状態をトポロジーの観点から理論・実験双方から研究し、実空間における非自明なスピン構造(スキルミオン、モノポール、など)と運動量空間におけるベリー位相構造とを統一的に記述する理論的枠組みを構築するとともに、磁性、誘電性、量子輸送現象、光学特性、熱輸送現象における新現象を、新物質・超構造において第一原理計算を援用して予言し、その実験的検証を行う。トポロジカル磁性体の探索とともに、時間依存現象(ダイナミクス)に着目し、非散逸性電流による超低電力消費デバイスの基礎学理創成を目指す。

### 【研究の方法】

概念形成と第一原理計算を援用した理論設計を起点に、物質設計・試料作製、物性測定グループと、中性子散乱を主としたスピン構造、スピンドイナミクスを行うグループを両翼として3者の密接な連携のもとに磁性体の創発電磁気学を建設する。より具体的には、次の3つの方向で研究を進める。

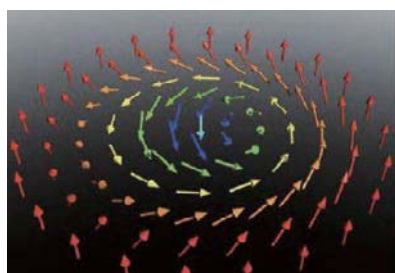


図1：スキルミオン構造

#### (i) 実空間構造によるトポロジカル磁性体の研究：

ヘリカル磁性体薄膜において実現するスキルミオン構造(図1)は理想的な創発電磁気学の舞台である。中性子小角散乱によるスピン構造の解明を基礎に、スキルミオンのホール効果、スピン起電力、電流駆動相転移、雑音現象などを理論・実験から明らかにし、「スキルミオニクス」の創成を目指す。

#### (ii) 運動量空間でのベリー位相効果の研究：

トポロジカル絶縁体に磁性原子をドーピングして磁性体を作り、量子化異常ホール効果の実現を目指す。また、金属酸化物超構造や界面におけるトポロジカル絶縁体・トポロジカル磁性体の設計を行い、MBEによる試料作製、電気2重層トランジスタによるキャリア制御などを駆使してその実験的研究を行う。

#### (iii) 創発電磁気学のダイナミクスの研究：

マグノンを中心とした磁気励起の織り成す時間依存創発電磁気学を研究する。エレクトロマグノンの光電気磁気結合効果(光ME効果)や方向2色性などの進んだ磁気光学効果、絶縁体スキルミオン結晶の光学測定・中性子散乱実験を行う。

### 【期待される成果と意義】

固体の中の電子に固有の「創発電磁気学」の学理の構築は、基礎物理の進展に大きく寄与するばかりでなく、以下のように応用までにらんだ機能開拓につながる事が期待される。

- (1) 低い電場、磁場で巨大な「創発磁場」の制御：スピン構造の時間変化させ創発電磁誘導を用いて巨大な電気磁気効果などの新機能が開拓される。
- (2) 室温、極小磁場での量子ホール効果と非散逸性カレント
- (3) テラヘルツ・マイクロ波の非相反性応答：テラヘルツ周波数領域におけるダイオード機能

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Emergent phenomena at oxide interfaces  
H.Y.Hwang et al. Nature Materials 11, 103 (2012).
- Emergent electromagnetism in solids  
Naoto Nagaosa and Yoshinori Tokura, PHYSICA SCRIPTA T146, 014020 (2012)

### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
167,700千円

### 【ホームページ等】

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/nagaosa-lab/>

## 【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



### 研究課題名 重い 5d 遷移金属酸化物のスピン軌道相互作用と新奇電子相

東京大学・大学院理学系研究科・教授 たかぎ ひでのり  
高木 英典

研究分野：数物系科学

キーワード：強相関係、スピン軌道相互作用、5d 遷移金属酸化物、電子相

#### 【研究の背景・目的】

イリジウムやオスmiumなどの重い5dの遷移金属は、銅やマンガンの様な軽い3d遷移金属と比べると馴染みの薄い元素であるが、極めてユニークな物理的特徴を有する。相対論効果であるスピン軌道相互作用が0.5 eV程度と3dと比べると桁違いに大きいのである。

遷移金属酸化物は電子の運動エネルギーとクーロン反発の競合によって出現する多彩な電子相の物理、電子相関物理の舞台である。本課題はこれまで集中的に研究されてきた3dに代わって重い5d遷移金属酸化物をその舞台とすることで、スピン軌道相互作用が創る新しい相関電子物理を開拓することを目的としている。5d遷移金属酸化物のスピン軌道相互作用は、運動エネルギーやクーロン反発に比肩するほど大きく、電子相関効果を大きく変え、今までにない新しい電子相を生み出す可能性を秘めている。実際、我々は最近この視点からイリジウム複合酸化物 $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$ に注目し、強いスピン軌道相互作用によって、本来金属であるべき物質が磁性絶縁体へとその姿を変えることを実験的に示すことに成功している。

#### 【研究の方法】

$\text{Sr}_2\text{IrO}_4$ におけるスピン軌道モット絶縁体と呼ぶべき新しい電子相の発見を受けて、さらに広範な物質群を対象に、強いスピン軌道相互作用によって、電子状態やスピン・軌道・電荷励起が一般にどのようにその姿を変えるのかを調べる。具体的にはペロブスカイト類縁酸化物 $\text{Sr}_{n+1}\text{Ir}_n\text{O}_{3n+1}$ とパイロクロア酸化物 $\text{RE}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ を取り上げ、光応答・電子輸送現象や共鳴X線散乱などをプローブとして駆使する。

強いスピン軌道相互作用によって、軌道運動が復活すると、5d電子の波動関数には位相項が誘起される。格子のトポロジーとの協奏によっては、原子レベルの位相の効果が顕在化し、エキゾチックな電子相が出現すると期待されている。結晶化学のデータベースの力を借りながら、イリジウム複合酸化物の中から、ハニカム格子やパイロクロア格子をとる物質を開拓し、現実の物質中に量子位相効果に起因するエキゾチック電子相を探索する。今日的なアプローチである超格子薄膜を用いた電子相探索も並行し

て進める。

#### 【期待される成果と意義】

エキゾチックな電子相、例えばトポロジカル絶縁体、ディラック半金属、キタエフスピン液体、エキゾチック超伝導などを、少なくとも一つは現実の物質中に実現したい。同時に、物質横断的な電子状態・励起のデータを基盤として、教科書の新しい章になるようなスピン軌道相互作用と電子相関の基礎学理を構築、発信する。「5d遷移金属酸化物の科学」を分野として確立することを強く意識している。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- B. J. Kim, H. Ohsumi, T. Komesu, S. Sakai, T. Morita, H. Takagi, and T. Arima, "Phase-sensitive observation of a spin-orbital Mott state in  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$ ", *Science* 323, 1329-1332 (2009).
- K. Ishii, I. Jarrige, M. Yoshida, K. Ikeuchi, J. Mizuki, K. Ohashi, T. Takayama, J. Matsuno, and H. Takagi, "Momentum-resolved electronic excitations in the Mott insulator  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  studied by resonant inelastic x-ray scattering", *Phys. Rev. B* 83, 115121 (2011).
- S. Fujiyama, H. Ohsumi, T. Komesu, J. Matsuno, B. J. Kim, M. Takata, T. Arima and H. Takagi, "Two-Dimensional Heisenberg Behavior of  $\text{Jeff}=1/2$  Isospins in the Paramagnetic State of the Spin-Orbital Mott Insulator  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$ ", *Phys. Rev. Lett.* 108, 271472 (2012).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度  
164,200 千円

#### 【ホームページ等】

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

## 【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）



### 研究課題名 成層圏-対流圏結合系における極端気象変動の 現在・過去・未来

京都大学・大学院理学研究科・教授 **よでん しげお**  
**余田 成男**

研究分野：地球惑星科学  
キーワード：気象、気候

#### 【研究の背景・目的】

冬季周極渦が数日内に大きく変形し崩壊に至る成層圏突然昇温現象は、典型的な成層圏-対流圏結合系の極端気象である（図1は主要力学過程の模式図）。基本的に地球規模の自然内部変動であるが、強非線型な力学的現象なので、その出現予測と影響評価は依然として難問である。太陽活動変動や火山噴火といった自然起源、および温室効果気体やオゾン破壊物質の増加という人為起源の各外部強制の変動・変化に対して、このような極端気象はどう応答し、出現頻度がどう変化するか、よく分かっていない。

本研究では、成層圏-対流圏結合系内のこれら内部・外部各変動の力学的関連性を総合的に理解することを目的とする。そして、極端気象変動の予測能力の向上に資することを目指す。現在気候の観測および予報データの解析による結合系変動の現状把握と、過去気候の再現実験および感度解析によるモデル検証・改良を踏まえて、予測の不確実性を押さえて未来気候の結合系変動に対する影響評価を行う。

#### 【研究の方法】

研究体制は、研究手法をもとに、1) データ解析班、2) 大気循環力学モデル・統計理論班、3) 大気大循環モデル・数値予報モデル班、4) 気象研究所気候モデル班、からなる4班体制とし、中層大気気候変動力学分野における我が国の第一線研究者および海外共同研究者で構成する。

各班が、現在・過去・未来に関わる各研究目的を定め、多重の時間空間スケールで変動・変化する成層圏-対流圏結合系での極端気象について、現象の記述と力学過程の理解から最先端モデルによる予測まで総合的に研究を推進する。多重時間空間変動像と極端気象に関する新たな研究のアイデアを共有し、定期的な情報交換に基づいて全参加者が協調して研究を展開する。

#### 【期待される成果と意義】

成層圏突然昇温現象という極端気象を周極渦崩壊という強非線型現象の不規則で稀な出現と捉え、理想化した大気循環モデルおよび最先端の気候モデルのアンサンブル実験データをもとに、歪度の大きい非ガウス型確率密度関数の先端部に関わる統計解析を行うのが、本研究でもっとも独創的な点である。その結果として、気候変化に伴う影響の評価を確率密度関数の変化として定量的に把握できると予想される。また、アンサンブル実験データの活用により、

極端気象の予測可能性変動に関する新たな理論的枠組みを構築することにより、異常天候の予測能力の向上に資すると期待される。

本研究代表者は世界気候研究計画/成層圏気候影響研究計画(WCRP/SPARC)のテーマリーダーとして「成層圏-対流圏力学結合」に関する共同研究を推進してきており、本研究の実施は国際的研究活動のなかで日本の存在感を高めるうえでも重要な意義がある。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Kohma, M., S. Nishizawa and S. Yoden, 2010: Classification of polar-night jet oscillations and their relationship to fast and slow variations in a global mechanistic circulation model of the stratosphere and troposphere. *J. Climate*, **23**, 6438-6444.
- ・ Randel, W.J., K.P. Shine, ..... and S. Yoden, 2009: An update of observed stratospheric temperature trends. *J. Geophys. Res.*, **114**, D02107, doi:10.1029/2008JD 010421.

#### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
134,200千円

#### 【ホームページ等】

<http://www-mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/kakenhi2012/index.html>

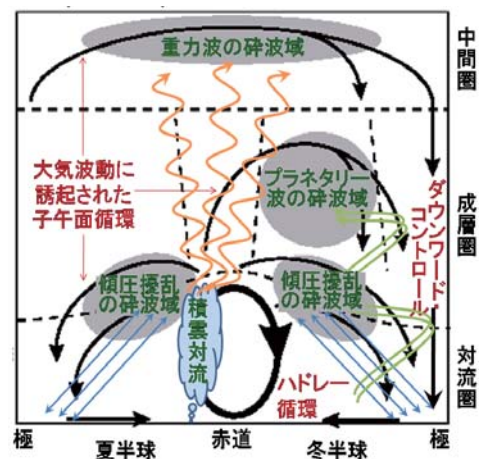


図1 成層圏-対流圏結合系の主要力学過程



## 【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）



### 研究課題名 星間塵表面での分子進化と新しい同位体分別機構

北海道大学・低温科学研究所・教授

わたなべ なおき  
渡部 直樹

研究分野：数物系科学、地球惑星科学

キーワード：地球外物質化学、星間塵表面反応

#### 【研究の背景・目的】

星間分子雲で分子がどのように生成し、同位体分別するかを定量的に明らかにすることは、太陽系誕生に至る化学進化の初期条件を知るうえで非常に重要である。従来、化学進化の研究はイオン分子反応などの気相反応を中心に行われてきたが、宇宙に豊富に存在する始原分子： $H_2$ 、 $H_2O$ 、 $CO_2$  や有機分子は気相反応での生成が困難で、宇宙に浮かぶ固体微粒子（星間塵）表面反応がきわめて重要になるが、その反応メカニズムは長年の謎であった。我々は、星間塵表面でのトンネル反応により、光やイオンのない極低温環境でも、これらの分子が効率的に生成することを実験的に示してきた。さらに、最近では星間塵表面トンネル反応が同位体分別にも非常に有効であることを見いだした。星間塵表面反応に関する研究の気運は世界的に高まっている。本研究のねらいは、極低温下の星間塵物質表面における原子・分子素過程、トンネル反応による分子生成、同位体分別プロセス、および脱離分子を定量的に実験で調べ、これまでの成果とあわせて、分子雲での星間塵による分子進化・同位体分別機構を包括的に解明することである。

#### 【研究の方法】

宇宙空間で始原的で存在度の高い星間分子種および始原有機分子の生成・同位体分別機構を明らかにするため、図1に示すような、極低温冷凍機、原子（ラジカル）線源、フーリエ変換型赤外吸収分光計、波長可変色素レーザーシステム、飛行時間型質量分析計からなる超高真空実験装置を用いて実験を行う。実験の主な手順は以下の通り：①疑似星間塵物質表面の冷却、②反応分子の表面への蒸着、③反応原子（ラジカル）の照射、④生成分子数密度の時間変化測定（固相表面の観測は赤外吸収分光、気相の観測は共鳴多光子イオン化法を用いる）。得られたデータから、極低温星間塵表面における分子生成反応経路、反応速度の表面物質・温度依存性、脱離分子のエネルギー状態・核スピン温度を調べ、表面反応素過程の情報を引き出す。これら情報から、分子雲環境での同位体分別過程を含めた星間塵表面反応ネットワークを構築する。

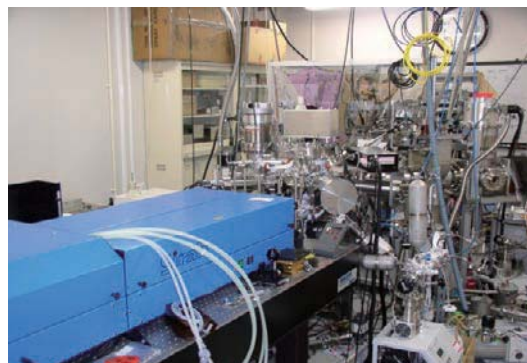


図1. 本研究で用いられるものと同型の装置

#### 【期待される成果と意義】

宇宙における分子生成・同位体分別過程の研究は天文観測、隕石分析、モデル計算が中心である。星間塵表面反応は分子雲における分子生成・同位体分別の鍵を握っていると考えられ、本研究はその全容解明に実験的に迫ることができる世界的にも非常にユニークな試みである。分子によって同位体分別度が異なる原因や、未知の分子生成・同位体分別プロセスが明らかになると期待される。分子雲の分子は隕石に見られる複雑な有機分子の起源の可能性もあり、星間塵表面における同位体分別プロセスは極めて重要である。本研究で得られるトンネル表面反応の知見には基礎化学・物理分野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】

- N. Watanabe, *et al.*, “Direct measurements of hydrogen atom diffusion and the spin temperature of nascent  $H_2$  molecule on amorphous solid water”, *Astrophys. J. Lett.* 714, L233-236 (2010)
- N. Watanabe & A. Kouchi, “Ice surface reactions: a key to chemical evolution in space”, *Prog. Surf. Sci.* 83, 439-489 (2008)

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度－28 年度  
99,800 千円

#### 【ホームページ等】

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

## 【基盤研究(S)】

理工系(化学)



### 研究課題名 革新的高輝度近赤外発光プローブの創製と 生体内癌イメージングへの応用

慶應義塾大学・理工学部・教授

すずき こうじ  
鈴木 孝治

研究分野: 分析化学

キーワード: 分子イメージング、化学発光、生物発光、タンパク質プローブ、融合型発光分子プローブ

#### 【研究の背景・目的】

分子プローブによる細胞・生体イメージングは、次世代の医療や創薬において主要な役割を果たすことが期待されている。特に生体内の微小癌イメージングにおいては、既存の分析ツールでは、実現困難な高性能・高機能を有するツール開発が急務である。革新的な分子プローブを早期に開発し、生体イメージングにいち早く応用するために、特長ある研究者を結集し、効果的かつ迅速に開発研究を進める必要がある。このため、本研究では、合成小分子プローブ開発に強い研究グループとタンパク質プローブ開発に強い研究グループとの学・学協力で、生体イメージングで標準として使用されるような汎用性の高い発光分子プローブを開発する共同研究を行う。

現在の分子イメージングは、蛍光検出の研究開発が主流であるが、蛍光プローブが直面する自家蛍光等の問題に無縁であり、より高感度が実現できる発光プローブが期待されている。また、生体深部からの情報取得には組織透過性の高い近赤外(NIR window: 650~900 nm)検出が有利である。これらを勘案し、本研究では、合成小分子とタンパク質分子を機能的に用いる“融合型分子プローブ”の概念に基づいて、高輝度近赤外発光分子プローブ等の開発研究を行い、癌イメージングに役立てる。

#### 【研究の方法】

基質分子であるルシフェリンの基本骨格から、発光特性(最大発光波長と輝度)に与える要因(分子構造と発光特性の相関)を調べ、発光波長の長波長化および高輝度化がどのような分子構造にしたらできるのかを、種々の誘導体を合成することから詳しく調べる。分子骨格に電子ドナーとアクセプターを最適な位置で連結することにより、ICT(分子内電荷移動)により長波長するアプローチに加えて、RET(共鳴エネルギー移動)などを利用して長波長化と高輝度を達成する発光基質分子を合成する。RETを利用すれば、ストークスシフトを大きくできる利点もあるため、励起波長と発光波長を変化させるのに役立つとともに、内部消光を軽減させるメリットもあるため、実用応用の際に使い易い利点がある。

一方、酵素ルシフェラーゼの改変では、天然ルシフェラーゼの基質結合部位近傍アミノ酸にさまざまな変異を導入することにより、ルシフェラーゼを高輝度化できることを見いだしている。本研究では、ルシフェラーゼへの変異導入方法と変異体の評価系を大幅に改良してルシフェラーゼを飛躍的に分

子進化させ、著しく輝度の高い変異体を効率よく単離する技術を確認する。具体的には、ルシフェラーゼの基質結合部位近傍のアミノ酸残基(20個程度)にランダムにアミノ酸変異を導入し、これにより生成した大量のルシフェラーゼ変異体を、それぞれ大腸菌に発現させ、その大腸菌コロニーをCCDカメラでハイスループットスクリーニングする。この実験系を最適化して確立することで、著しく輝度が向上した変異体を効率よく取得する方法および条件を詳しく調べ、最適な酵素を作製する。

#### 【期待される成果と意義】

高輝度近赤外発光分子プローブが作製できると、ラベル化剤として微量物質の検出に役立つだけでなく、生体の深部からの発光イメージングが実現する。このことは、癌研究や脳研究を加速することに寄与する。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. “A Novel Luciferin-Based Bright Chemiluminescent Probe for the Detection of Reactive Oxygen Species”, M. Sekiya, K. Umezawa, A. Sato, D. Citterio, K. Suzuki, *Chemical Communications*, 21, 3047-3049 (2009).
2. “Bright, Color-Tunable Fluorescent Dyes in the Vis/NIR Region: Establishment of New “Tailor-Made” Multicolor Fluorophores Based on Borondipyrromethene”, K. Umezawa, A. Matsui, Y. Nakamura, D. Citterio, K. Suzuki, *European Journal of Chemistry*, 15, 1096-1106 (2009).

#### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
157,400千円

#### 【ホームページ等】

<http://suzuki-lab.applc.keio.ac.jp/>  
suzuki@applc.keio.ac.jp

## 【基盤研究(S)】

理工系(化学)



### 研究課題名 普遍結合の自在変換に基づく機能性分子創製法の革新

みうら まさひろ  
大阪大学・大学院工学研究科・教授 三浦 雅博

研究分野：化学、複合化学、合成化学

キーワード：普遍結合活性化、カップリング、有機機能性材料

#### 【研究の背景・目的】

近年、炭素-水素結合ならびに炭素-炭素結合に代表される普遍結合の活性化の化学は、新しい効率的な次世代型分子変換法として注目を集め、国内外を問わず最も活発に研究が行われている分野の一つである。本研究では、これらの結合を選択的に活性化し、自在に制御することによって高度な分子変換を可能とする高性能錯体触媒の設計、開発を行う。これを通して、単純で入手容易な複素環や炭素環から迅速にパイ共役系を拡張、機能化しうる、有機機能性材料の創製のための新手法の樹立を目指す。これにより、有機合成化学に普遍結合活性化という真に実用性と信頼性に優れた革新的方法論を提供するとともに、周辺領域である錯体化学、材料化学の更なる進展を図る。また、一連の触媒反応の直截性を活かし、現代社会が抱える環境、エネルギー、資源枯渇といった諸問題の解決にも貢献することを目標とする。

#### 【研究の方法】

芳香環や複素環が高度に連結もしくは縮環したパイ共役化合物が半導体特性や発光特性をはじめとする多様な性質を有することから、次世代を担う有機機能性材料として近年多方面から多くの期待が寄せられている。それに伴い、これら一連の化合物の効率的な合成法の開発が極めて重要な課題となっている。本研究では、この要請に応えるべく、普遍結合の自在変換に基づく新しい高効率パイ共役拡張法の開発を中心に、以下の研究を展開する。

(1) 高性能触媒系の創出と基質適用範囲の拡張：  
これまで蓄積してきた知見を基に、パラジウムやロジウムを含む第二周期遷移金属の配位子の理想的かつ合理的な設計と合成を行うことにより、申請者が開発した複素環の直接官能基化や炭素環の酸化環化カップリングのさらなる効率の向上を図る。具体的には、新しいシクロペンタジエン系配位子やリン及び窒素系配位子の合成とそれを用いた高活性錯体触媒の創出を行う。また、異種二金属中心の共同作用の発現を可能とする複合型配位子も検討する。これによって利用可能な反応基質の拡張を検討し、従来の触媒系では合成が困難であったヘテロ芳香族縮環骨格への収束的な合成ルートの開発を行う。

(2) 第一周期遷移金属の活用：  
上記検討に加えて、安価な銅やニッケルを中心とした第一周期遷移金属触媒を積極的に利用し、貴金属系触媒を用いても未だ困難な炭素結合形成法の開

発を行う。特に脱水素型クロスカップリングや芳香族直接アミノ化反応を中心に検討を行う。

(3) 新規有機機能性材料の創製法の開発：

これまでに見出した手法ならびに(1)、(2)で得られる知見を有機的に結びつけ、複素環ならびに炭素環の効率的かつ選択的な機能化反応の開発を行う。特に発光材料や有機半導体などの新規パイ共役有機機能性材料の創製に適用可能な結合形成法を中心に検討する。複素環の反応では、アリール化やビニル化を対象とする。炭素環ではアルキンによる縮環反応を検討する。さらに開発した反応法を用いて新規材料の創出を目指す。

#### 【期待される成果と意義】

上記のように本研究では、高性能錯体触媒の開発と、これを用いた高度分子変換法の創出を軸に研究を展開し、優れた機能をもつ高度パイ共役系分子の実用的合成法の樹立を目指すものである。これにより、革新的方法論を有機合成化学にもたらすと同時に、周辺領域の進展にも複合的に寄与しようとする点に本課題の学問的意義と特徴がある。さらに、反応の直截性や選択性の更なる向上、ならびに安価な汎用金属の高度利用によって、埋蔵資源に乏しい我が国の持続可能な発展に対しても貢献することが期待される。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Copper-Mediated Intermolecular Direct Biaryl Coupling, M. Kitahara, N. Umeda, K. Hirano, T. Satoh, M. Miura, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 2160-2162.
- Oxidative Coupling of Aromatic Substrates with Alkynes and Alkenes under Rhodium Catalysis, T. Satoh, M. Miura, *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 11212-11222.

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度  
167,700 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.chem.eng.osaka-u.ac.jp/~miura-lab/>





研究課題名 有機ラジカルの SOMO 制御による  
新しい光・電子機能性ポリマーの開拓

にしで ひろゆき  
早稲田大学・理工学術院・教授 西出 宏之

研究分野：高分子化学

キーワード：高分子合成、有機ラジカル、機能性高分子、蓄電、光電変換

【研究の背景・目的】

有機安定ラジカル種の可逆的かつ速い電子授受にはじめて着目し、世界に先駆け合成してきたラジカルポリマーによる高速電荷輸送と高密度電荷貯蔵の発見とその解釈を起点として、 $\pi$  共役物性に支配される従来の導電性ポリマーから脱却した、電子交換反応に基く導電・蓄電物質の基礎科学を確立する。その学問的深化を ①効率高い電荷輸送系の創出と ②ヘテロ接合を用いた輸送性の制御を基軸とした現象の普遍化により計り、③有機ラジカル種の拡充による超高速化や pn パイポラ性など新規物性も活用して ④SOMO (Singly Occupied MO)- $\pi$  共役複合系へと一般化する道筋で、有機物性化学の新領域を開拓する。これをもって、持続可能な未来技術と期待される有機エレクトロニクスに一つの突破口を拓くと共に、新型太陽電池や次世代蓄電池など実デバイスに波及する実践的学術として確立する。

【研究の方法】

有機安定ラジカル種の SOMO が関与する電極反応の多くが酸化・還元いずれも安定に単離・精製可能な閉殻分子を与えることを見出し、電子交換が非共役鎖のペンダント基間で促進されたラジカルポリマーを用いて、数千回以上劣化なく繰返し充放電可能な有機電池を初めて例示したこれまでの成果について、本研究では、その学術的意義を咀嚼した普遍性ある知識基盤を構築し、密度高く局在化させた不對電子の授受(図1)を切り口とした物理化学の描像を通して、新しい機能性ポリマー開拓のための一般性ある方法論を確立する。

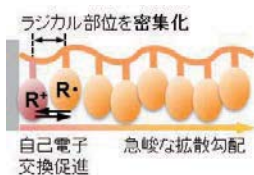


図1 非晶質凝縮系による電荷輸送・貯蔵。

具体的には、高密度化とレドックス勾配制御によって限界に迫る電荷輸送をヘテロ界面の構築・制御により電荷分離へ展開させる方法論で、多様なラジカルポリマーの合成有機化学を基盤とした SOMO- $\pi$  共役系や励起種の複合と組合せた推進により、電荷分離・輸送・貯蔵特性をステップアップさせる。これらは幅広い分野に適用できる普遍的概念の抽出から、従来必ずしも解明されていない SOMO- $\pi$  複合系の創出や、SOMO 関与の光化学および電子移動反応に基く基礎化学の創製を目的として計画している。

【期待される成果と意義】

電荷分離・輸送・貯蔵を担う新しい機能性ポリマーの創出とそれらの複合制御、分子レベルから界面・バルクスケールまで俯瞰した高次構造により、ラジカル不對電子に期待できる諸物性の増幅と、斬新な光・電子機能ポリマーの基礎科学確立が期待される。これを基盤として電気エネルギーの高密度貯蔵と高出力特性を両立できる次世代ラジカル電池、ヘテロ界面での整流輸送に基づく湿式太陽電池など革新的な有機デバイスへの波及が見込める点に意義がある。具体的には、(1) 電子交換反応の効率化を切り口とする斬新なエネルギー変換・貯蔵化学への展開、(2) 交換反応を支配する因子の解明による革新的電気物性を追究する手法、(3) 安定ラジカル種を関与させた有機光・電気化学の開拓(図2)に学術的特色がある。ポリマーが形成する非晶質凝縮系の描像を通して、単一電子の物性を最大限引き出す着想に独創性あると考えている。シリコンや化合物半導体など無機系材料の廃棄手順の難しさと資源の限界は明白であり、有機ポリマーの波及効果は極めて大きい。

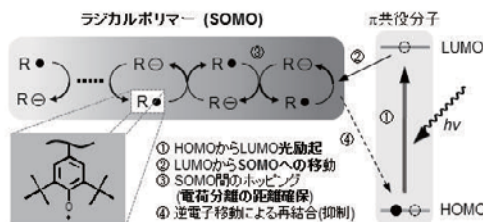


図2 SOMO 関与の交換反応に基く電荷輸送性から光電荷分離特性を引き出すアイデア。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ H. Nishide, et al., "Morphology-driven modulation of charge transport in radical/ion containing, self-assembled block copolymer platforms", *Adv. Mater.*, **23**, 5545-5549 (2011).
- ・ H. Nishide, et al., "Radical polymer-wrapped SWNTs at a molecular level: high-rate redox mediation through a percolation network for a transparent charge-storage material", *Adv. Mater.*, **23**, 4440-4443 (2011).

【研究期間と研究経費】

平成 24 年度-28 年度  
150,300 千円

【ホームページ等】

<http://www.appchem.waseda.ac.jp/~polymer/index.html>



研究課題名 小分子アルカン類を水酸化するバイオ触媒システムの分子設計

名古屋大学・物質科学国際研究センター・教授 わたなべよしひと  
渡辺 芳人

研究分野：生物無機化学

キーワード：酵素、シトクロム P450、ガス状アルカン、触媒、水酸化反応

【研究の背景・目的】

天然ガスの主成分であるメタンやエタンは、炭素資源として注目されているが、不活性なため、合成反応に利用可能な誘導体への変換が求められている。特に水酸化が注目されているが、現在用いられているアルコールへの変換プロセスは、高温・高圧など過酷な反応条件が必要となる。本研究では、メタンやエタンなどの小分子アルカン類の水酸化反応を温和な条件下で触媒する強力な人工金属酵素とその反応系を開発することを研究目的とする。

【研究の方法】

本研究で利用するシトクロム P450 (以下、P450) は、不活性な有機化合物を水酸化する酵素で、有機合成反応への応用が期待されてきた。特に細菌由来の P450 は非常に高い触媒活性を有するためバイオ触媒として有望視されてきた。しかし、細菌由来の P450 は基質の選択性が非常に高く、適用できる反応は非常に限られている。P450 は、対象とする基質が活性部位に取り込まれることを「トリガー」として反応が進行する巧妙な仕掛けが施された酵素であるため、対象とする基質とは構造が大きく異なる有機分子では、P450 のスイッチは「ON」の状態とはならず、それらの酸化反応はほとんど進行しない。P450 のスイッチを「ON」の状態とするために、対象とする基質と構造が似た疑似基質 (以下、デコイ分子と呼ぶことにする) を P450 に取り込ませることで、反応のスイッチを強制的に常に「ON」状態にすることができ、様々な基質を酸化可能になることを過酸化水素駆動型の P450<sup>BSβ</sup> で見出した (図 1)。

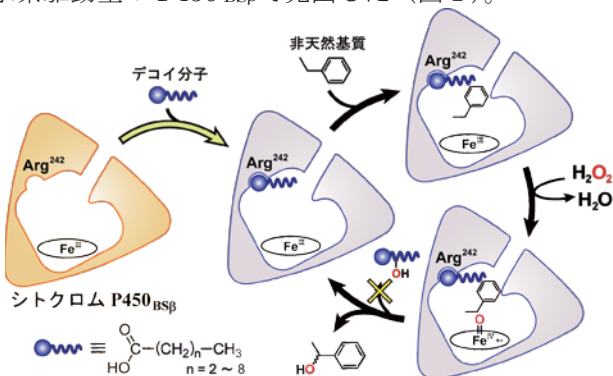


図 1 疑似基質 (デコイ分子) を利用する反応システム

最近、デコイ分子を用いる手法は、P450<sup>BSβ</sup>だけでなく、P450<sup>SPα</sup>、P450<sup>BM3</sup>にも適用可能で、P450に共通に利用できることも明らかにしている。P450<sup>BM3</sup>の場合、プロパンやブタンなどの飽和炭化水素の水酸化が可能で、メタンの水酸化に向けた第一歩と捕らえることができる。本研究では、「疑似基質の構造を対象とする基質に対して最適化する」ことで、その反応活性を制御し、最終目標のメタンやエタンなどの超高難度酸化反応を達成する。

【期待される成果と意義】

酵素の基質選択性を制御して、目的の反応を加速するバイオ触媒を開発することは、酵素利用開発の根幹をなす重要なテーマである。これまで、基質選択性の変換方法は、遺伝子工学的手法によりアミノ酸の置換を繰り返すことが主流であった。申請者が開発した疑似基質を利用する方法は、アミノ酸の置換を行わなくとも酵素の基質選択性を変換できることを示した画期的な方法で、酵素利用開発の新たな方法として様々な酵素系へ応用可能である。本研究課題で開発する人工金属酵素、および疑似基質を利用する手法により、メタンやエタンなどの超高難度酸化反応を達成することができれば、環境負荷の少ないクリーンな資源活用への道が開けると期待する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] N. Kawakami, O. Shoji, Y. Watanabe, "Use of Perfluorocarboxylic Acids To Trick Cytochrome P450<sup>BM3</sup> into Initiating the Hydroxylation of Gaseous Alkanes" *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 5315-5318.  
[2] O. Shoji, T. Fujishiro, H. Nakajima, M. Kim, S. Nagano, Y. Shiro, Y. Watanabe, "Hydrogen Peroxide Dependent Monooxygenations by Tricking the Substrate Recognition of Cytochrome P450<sup>BSβ</sup>" *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 3656-3659.

【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度  
171,100 千円

【ホームページ等】

<http://bioinorg.chem.nagoya-u.ac.jp/>  
E-mail: yoshi@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp

【基盤研究(S)】  
理工系(化学)



研究課題名 分子科学的アプローチによる遺伝子発現の  
制御と機構の解明

京都大学・大学院理学研究科・教授 すぎやま ひろし  
杉山 弘

研究分野: ケミカルバイオロジー

キーワード: 遺伝子発現制御、DNA ナノ構造体、SAHA Py-Im ポリアミド

【研究の背景・目的】

遺伝子発現の制御機構において、ヒストンの化学修飾の制御やシトシンの脱メチル化などの遺伝子発現の制御機構は、生命科学の根本でありその解明が必要不可欠である。しかしながら、これらの遺伝子発現に参与する分子が動的にどのような挙動を示すのかについての情報は得られていない。

本研究では、エピジェネティックな遺伝子発現の制御に関する分子科学的な総合研究を三つの目的を掲げて進める予定である。

(1) DNAの配列特異的な結合分子にエピジェネティックな遺伝子発現の活性化機能を付与することによって、細胞の初期化や分化の制御を実現する。

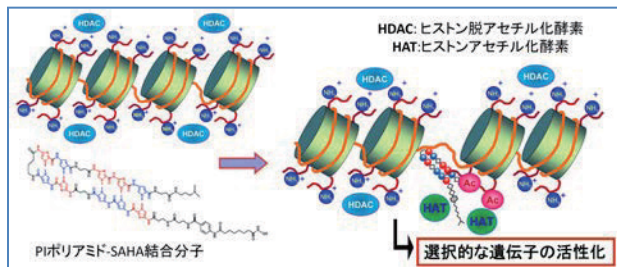
(2) DNAの構造を認識する機能分子を設計することによって、新しい遺伝子発現の制御法を開発する。

(3) 遺伝子制御に関連する酵素や反応を直接可視化し解析する手法の開発を行うことである。

【研究の方法】

細胞の初期化を誘導する Py-Im ポリアミドの開発

iPS細胞は様々な細胞に分化することが知られており、再生医療のための鍵となる技術である。近年の細胞生物学の進歩によって、ヒストンの脱アセチル化やDNAのメチル化など、エピジェネティックに遺伝子発現が制御されていることが明らかになってきた。実際に、ヒストン脱アセチル化酵素(HDAC)の阻害剤である suberoylanilide hydroxamic acid (SAHA) は、ヒストンのアセチル化を引き起こすことによって、ヌクレオソーム構造をほどくことによ



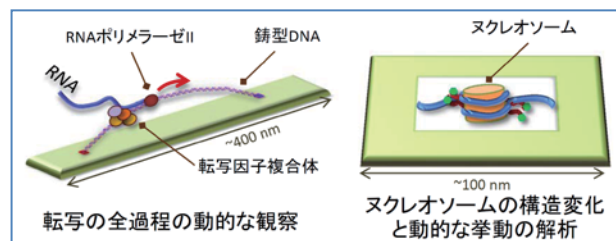
り、遺伝子の活性化を行うことが知られている。

我々は、SAHAをDNA配列特異的な結合能を持つPy-Imポリアミドに連結させた複合体のライブラリーを作成することによって、Oct3/4やNanogなどiPS細胞化に重要な遺伝子の発現を選択的に上昇させることにマウス胎生細胞において成功している。このとき、プロモーター領域のヒストンのアセチル化が上昇していることを確認している。

本研究は、上述のSAHA Py-Imポリアミドによるスクリーニングライブラリーを拡張し、ヒト細胞に対してOct-4, Sox-2, Klfなど初期化に関与している一連の遺伝子群の活性化を試みる。さらにヒストンのアセチル化、DNAメチル化の解析を進める。

遺伝子発現に関連する酵素群の直接可視化

高速原子間力顕微鏡(AFM)を使った1分子測定技術確立のために、真核生物の転写系に関して、鋳型DNAを結合したDNAナノ構造体上で、転写因子との複合体構造及びRNAポリメラーゼIIによる転写を動的に観察する系を構築する。次に、エピジェネティックに関連する酵素の挙動を1分子観察によって明らかにするため、ヌクレオソームを固定したDNA構造体の作成と高速AFMによるヌクレオソームの実時間観察を進める。



【期待される成果と意義】

我々の有する研究技術を組み合わせることで、目的とする構造依存的な遺伝子発現の制御と可視化を実現し、エピジェネティックな遺伝子発現のメカニズムを解明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】

- G. N. Pandian, H. Sugiyama *et al.*, *ChemBioChem*, 2012, 13, 47 – 50
- A. Rajendran, M. Endo, H. Sugiyama, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012, 51, 874 – 890

【研究期間と研究経費】

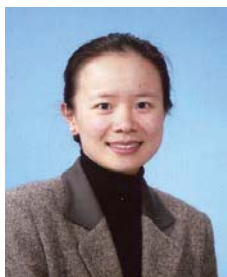
平成24年度–28年度  
163,700千円

【ホームページ等】

<http://kuchem.kyoto-u.ac.jp/chembio/>



【基盤研究(S)】  
理工系(化学)



研究課題名 「犠牲結合原理」の普遍性の証明と多様な犠牲結合による  
高靱性・高機能ゲルの創製

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  
龔 劍萍

研究分野：高分子科学

キーワード：高分子、ゲル、高靱性、バイオマテリアル

【研究の背景・目的】

ソフト&ウェット物質であるゲルは、生体親和性、超低摩擦性などを示す大変魅力的な材料であるが、一般的なゲルは脆くて壊れやすく、応用先は極めて限られていた。本問題に対し、研究代表者らは工業用ゴム並みの強度を持つダブルネットワーク (DN) ゲルを開発した。硬くて脆い電解質網目と柔らかくて伸びる中性網目で構成される DN ゲルでは、破壊時に亀裂周辺に存在する脆い電解質網目が広範囲に渡って先に壊れる(降伏する)ため、亀裂周辺の応力は常に分散される。この仕組みによって、亀裂が生じてもその伝播が起らず、ゲル全体が壊れずに強靱になる。この時、電解質網目の脆さは、ゲル全体を破壊しないための犠牲結合と呼ぶことが出来る。この「犠牲結合による効果」は、骨の高靱性に対して提案されているメカニズムと類似している。このことから、研究代表者らは「犠牲結合による高靱性化原理」は、他の高靱性材料を設計する上でも通用する普遍性を持っていることを提唱している。これにより、「壊れやすい部分を意図的に導入することにより、材料全体が強靱になる」という、従来の高強度材料設計とは全く異なる新しい戦略を導いた。

この原理に基づき、本研究課題では共有結合、イオン結合、疎水結合などの様々な「犠牲結合」をゲルに導入し、多様な犠牲結合の破壊がゲルの靱性を大きく増大させることを実証する。また、本原理を様々な機能性高分子に適用することで高機能・高靱性ゲルを創製し、先端医療などへの応用展開を図る。

【研究の方法】

犠牲結合となる構造は、DN ゲルのような電解質高分子の化学結合の他、様々な物理結合(疎水結合、イオン結合など)から構成された分子集合体が考えられる。研究方法の例を以下に示す。

イオン結合として、ゲルの高分子側鎖に正・負イオンを導入してポリイオンコンプレックスを形成させ、その可逆的な犠牲結合としての効果を研究する。この場合、犠牲結合の役割が高分子鎖間のイオン結合の破壊によって果たされるため、DN ゲルとは異なり、単一の高分子網目でも高靱性化が実現できる。また、イオン結合は可逆的であるため、一旦破壊された犠牲結合は時間と共に自己回復すると考えられる。そこで、導入した犠牲結合の構造や回復速度とゲルの自己修復能、衝撃吸収能との相関についても検討する。

疎水結合として、ゲルに二分子膜ラメラ構造を導

入する。予備実験においては、せん断を加えることで、一軸に配向した 3000 層ものラメラ構造を含有するゲルの創製に成功している。本ゲルは、ラメラ構造の犠牲的破壊に由来するであろう高靱性に加え、精緻な二分子膜ラメラ構造に由来する膨潤異方性や構造色などの創発機能をも発現することが分かっている。今後は、配向した二分子膜の犠牲結合としての機能を証明する他、ゲルの構造と異方的な物性(膨潤・収縮、物質拡散、力学応答など)との関連を解明する。

【期待される成果と意義】

本研究成果を様々な機能性高分子に応用することで、高靱性と高機能を併せ持つ、真に材料として利用可能なゲルが創製できる。これらのゲルは、医療、工業用材料としての幅広い応用が期待される。さらに、この「犠牲結合による高靱性化原理」は、将来的にプラスチック等の固体材料にも応用可能な新規指導原理としてのポテンシャルを秘めており、新たな材料イノベーションをもたらす可能性がある。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. Jian Ping Gong, "Why are double network hydrogels so tough?" *Soft Matter* 2010, 6, 2583.
2. Md. Anamul Haque, Gen Kamita, Takayuki Kurokawa, Kaoru Tsujii, Jian Ping, "Unidirectional Alignment of Lamellar Bilayer in Hydrogel: One-Dimensional Swelling, Anisotropic Modulus, and Stress/Strain Tunable Structural Color," *Adv. Mater.* 2010, 22, 5110.

【研究期間と研究経費】

平成 24 年度-28 年度  
209,600 千円

【ホームページ等】

<http://altair.sci.hokudai.ac.jp/g2/index.html>  
[gong@mail.sci.hokudai.ac.jp](mailto:gong@mail.sci.hokudai.ac.jp)

## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学I)



## 研究課題名 規則合金系ヘテロ接合における多彩な物理現象と スピンドバイス創製

東北大学・大学院工学研究科・教授 あんどう やすお  
安藤 康夫

研究分野：応用物性・結晶工学

キーワード：スピントロニクス

### 【研究の背景・目的】

スピントロニクス研究領域において近年の成膜技術、微細加工技術などの急速な発展によりデバイス開発が加速化してきている。初期の強磁性トンネル接合(MTJ)は多結晶強磁性/アモルファス絶縁層/多結晶強磁性の構造であったが、近年ではフルエピタキシャル強磁性/絶縁体/強磁性接合の作製が可能となり、これまで複雑なデバイス構造においてあまり使用されてこなかった規則合金系材料を比較的容易に積層でき、多彩な物性を示す薄膜および多機能のデバイス作製が可能となってきた。

$L2_1$ 規則構造をもつホイスラー合金を用いた研究は、材料の多彩さにもかかわらず、最適な材料探索に関しては手探り状態であるという状況である。 $L1_0$ 規則合金においては、その高磁気異方性を用いて、次世代の微小磁気記録媒体、磁気メモリ素子等への応用が期待されている。特に磁気メモリ応用に関しては磁気異方性の大きさもさることながら、磁化反転に必要な電流の制限から、磁気緩和定数の小さい材料が求められている。これらを共に有する材料の開発は途についたばかりであり、更なる材料探索の観点からの研究が必要である。

本研究はこれまでの申請者らの薄膜作製技術、微細加工技術、およびスピンドバイス測定技術をさらに押し進め、以下に示す二段階のステージをマイルストーンとして研究を推進する。

### 【研究の方法】

(1) 規則合金の高品位化を行うとともに、積層界面において合金の本来有する理想的な物性発現のための新材料の探索、薄膜作製条件、積層構造の確立を行う。これらの結果、 $L2_1$ の規則合金を用いたデバイス構造における室温の高スピン分極率(90%以上)の実現、 $L1_0$ の規則合金における低磁気緩和定数(0.01以下)の実現を具体的な目標とする。

(2) 規則合金を含むヘテロ接合においては多くの組み合わせ、新規機能の発現の可能性があるが、本研究はその中でも  $L2_1$ 、 $L1_0$ 合金薄膜の積層化による  $10^7$  erg/cc 以上の高磁気異方性、90%以上の高スピン分極率、0.01 以下の低磁気緩和定数の全てを同時に有するヘテロ構造の実現を目標とする。

(3) これらの後、上記素子を用いた高周波(> 50 GHz)、高出力( $\mu$ W 級)のスピン注入発振素子、および高速(ns)、低電流( $10^5$  A/cm<sup>2</sup> 台)によるスピン注入磁化反転素子、の開発を行う。

### 【期待される成果と意義】

現在のスピントロニクスデバイスの主流は CoFeB/MgO/CoFeB の構成の MTJ 素子である。この構造において、300%以上の TMR 比が得られることから、これを基本構造とする素子はハードディスクの読み出しヘッド、高密度不揮発性磁気メモリに応用されている。しかしながら、CoFeB はそもそもアモルファス構造であり、熱処理による準安定結晶構造をデバイスとして用いている欠点がある。その点において規則合金はもともと構造的に安定で長期間安定に特性を維持することができ、かつ動作環境の変化による特性変動に対して安定性を有していると考えられ、工学的観点からみて世の中にあたる影響は絶大である。

本研究は、将来のマイクロ波を用いた高速通信デバイスのキーテクノロジーとなり得る重要な技術となるばかりでなく、現在スピントロニクス分野におけるキーデバイスである、低電流かつ高速のスピン注入磁化反転の実現、に対する大きなブレークスルーであり、このようなイノベーション技術の開発の工業界への波及効果は絶大である。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

M. Oogane, T. Kubota, Y. Kota, S. Mizukami, H. Naganuma, A. Sakuma, and Y. Ando, Gilbert magnetic damping constant of epitaxially grown Co-based Heusler alloy thin films, Appl. Phys. Lett., 96 (2010) 252501-1-3.

T. Hiratsuka, G. Kim, Y. Sakuraba, T. Kubota, K. Kodama, N. Inami, H. Naganuma, M. Oogane, T. Nakamura, K. Takashi, and Y. Ando, Fabrication of perpendicularly magnetized magnetic tunnel junctions with  $L1_0$ -CoPt/C<sub>02</sub>MnSi hybrid electrode, J. Appl. Phys., 107 (2010) 09C714-1-3.

### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度～28 年度  
167,800 千円

### 【ホームページ等】

<http://www.apph.tohoku.ac.jp/spin/>

【基盤研究(S)】  
理工系(工学)



研究課題名 酸化物二次元界面の量子機能とデバイス応用

東京大学・大学院工学系研究科・教授  
かわさき まさし  
川崎 雅司

研究分野：応用物性・結晶工学

キーワード：ヘテロ構造、酸化物エレクトロニクス

【研究の背景・目的】

酸化物には、通常の半導体や金属には不可能な、あるいは遙かに凌駕する物性や機能がある。これらを電子技術に応用する「酸化物エレクトロニクス」は、四半世紀に及ぶ薄膜・界面技術の進展により、まさに量子効果を顕わに活用できるレベルに達している。最近の、最も顕著な研究成果は、電界効果によるキャリア蓄積で絶縁体に超伝導を誘起したこと[1]や、酸化亜(ZnO)系ヘテロ接合界面に蓄積した電子の移動度を著しく向上して分数量子ホール効果の観測に成功したこと[2]である。これらのブレイクスルーは酸化物エレクトロニクスにおいて目に見える貴重なマイルストーンであり、超伝導・強磁性・強誘電性・非線形光学効果などの多様な物性・機能を活用した酸化物エレクトロニクスの発展に大きな波及効果を及ぼす。本研究課題では、上記の基礎研究をさらに発展させ、電界効果による新超伝導体の発見、強誘電体をチャネルとした新型トランジスタ、超高移動度強相関電子系における新量子効果の探索、を行う。

【研究の方法】

固体表面と電解質の界面に形成した電気二重層を用いると強烈な電界を印加でき、 $10^{15}\text{cm}^{-2}$ に達するキャリア蓄積が可能となる。この原理を用いた電気二重層トランジスタ(図1)を用いて、様々な絶縁性酸化物の表面にキャリア蓄積を行い、新超伝導体を発見する。また、絶縁体として強誘電体を用いた際に、強誘電体自身の自発分極と電界効果によるキャリア蓄積の効果を重畳すると、界面でのキャリア濃度がどう変調するかを解析し、強誘電体をチャネルとするトランジスタの不揮発性動作を実現する。

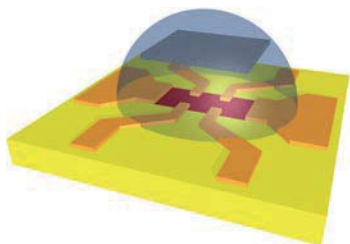


図1 電気二重層トランジスタの模式図

ZnO/(MgZn)O 界面に自発的に蓄積した電子の移動度は  $770,000\text{cm}^2/\text{Vs}$  に達しており、イオン化不純物による散乱がその上限を決めている。界面の清浄

度を向上し、低キャリア濃度において散乱を極限まで抑制したとき(図2)、電子相間の強い理想的な低次元系が実現する。この様な系で、ウイグナー結晶化やスピン偏極状態を実現し、その先にある未知の量子現象を探求する。

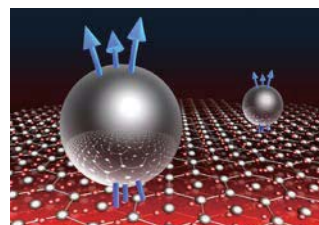


図2 分数量子ホール効果の模式図

【期待される成果と意義】

電界効果による超伝導探索は、古風なバルク新物質合成による探索とは一線を画する手法であり、大きなブレイクスルーが期待できる。強誘電トランジスタは、強誘電体表面の自発分極によるキャリア蓄積の本質を顕わにし、新型不揮発デバイスの構築に資する知見となる。他の物質では実現できない強相関低次元高移動度電子系は、新しい電子相転移の舞台を提供するとともに、派生する結晶成長技術の向上は ZnO ヘテロ接合の光電子デバイスの性能向上に資する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] K.Ueno, S.Nakamura, H.Shimotani, H.T.Yuan, N.Kimura, T.Nojima, H.Aoki, Y.Iwasa, M.Kawasaki "Discovery of superconductivity in  $\text{KTaO}_3$  by electrostatic carrier doping", *Nature Nanotechnology*, **6**, 408-412 (2011).
- [2] A. Tsukazaki, S. Akasaka, K. Nakahara, Y. Ohno, H. Ohno, D. Maryenko, A. Ohtomo, M. Kawasaki, "Observation of the fractional quantum Hall effect in an oxide", *Nature Materials*, **9**, 889-893 (2010).

【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度  
167,800 千円

【ホームページ等】

<http://www.kwsk.t.u-tokyo.ac.jp/>  
[kawasaki@ap.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:kawasaki@ap.t.u-tokyo.ac.jp)



## 【基盤研究(S)】

### 理工系 (工学 I)



## 研究課題名 ナノスロットレーザの極限的な光局在を利用する 超高感度バイオマーカーセンサ

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 ばば としひこ  
馬場 俊彦

研究分野：バイオフォトニクス

キーワード：バイオセンシング、バイオマーカー、フォトニック結晶、ナノレーザ、ナノスロット

### 【研究の背景・目的】

医療において癌、アルツハイマー病などの重度疾病は早期診断が重要とされ、これを可能にする血中バイオマーカー（疾病を特徴付ける特定のタンパク質）が活発に研究されている。しかし多量の夾雑物中で微量のマーカータンパク質を高感度、高確度、かつ煩雑な蛍光ラベル修飾なしに検出するのは依然として困難である。

本研究では、私たちが自ら開発したフォトニック結晶ナノレーザを蛍光ラベルフリーのセンサチップとして用い、同センサに極めて細い溝（ナノスロット）を導入したときに発現する超高感度の光物理を解明し、それを極限まで高める。さらに高選択性を与える表面処理を開発し、従来の最高性能を超えるバイオマーカー検出を目指す。これはナノフォトニクス物理や表面・流体化学の探求、実用的な医療技術の開発という分野融合的な意義をもつと考えている。

### 【研究の方法】

以下の3つの研究を通じて光物理、表面・流体化学、医療応用の融合分野に挑戦する。

(1) 光局在を指数関数的に増強するナノスロット幅30nm以下を実現し、ナノレーザの感度とタンパク質の吸着を分析する。光勾配力が高感度の主要機構であれば、これにより感度がさらに向上し、単一分子検出が可能になる。さらに分子ふるい的な形状効果が起こり、特定分子の選択検出に貢献すると考えられる。また同型のナノスロットをパッシブ共振器と共に製作し、タンパク質のラマン蛍光を観測する。同様の光局在による増強効果を検証すると共に、ナノレーザによるセンシング結果と比較、検証する。

(2) タンパク質がスロット近傍に至る遠隔距離での分子操作機構を解明し、微小流体デバイスによる効率向上をはかる。表面安定用ポリマーを形成し、血中の状況に近い緩衝液中で不要な静電効果を抑制する。もしくは静電効果を利用したセンサ信号の増強を検討する。現行よりも高確度の医療診断が期待される低濃度バイオマーカーを選定し、その抗体の整列固定と夾雑物のブロック層の形成を探求する。これにより血中のように10億倍以上の夾雑物を伴う環境でもマーカーセンシングを可能にする。

(3) 低コストなデバイス製作、多数のデバイスのアレイ集積による統計判定や定量評価の高度化、スポットによる複数抗体の固定と並列検出、光勾配力によ

る抗体の濃縮・選択固定などに取り組む。これと並行して可搬型簡易測定システムを構築し、医学系の意見をフィードバックする。実際に血液に目的タンパク質を混入させた試料を用いてセンシングを行い、実用的なセンシングを実証する。

### 【期待される成果と意義】

タンパク質分析には HPLC、ELISA などの方法が用いられるが、重度疾病の高確度判定が期待される pM レベルの低濃度バイオマーカーを大量の夾雑物試料から検出するのは容易ではない。従来は多くの前処理と蛍光ラベル修飾を用いてようやく可能となる場合があるが、そのプロセスは一般に煩雑・高コストであり、また蛍光ラベル自体がタンパク質を変質させる懸念もある。そのため、簡易・低コスト、かつ高感度・高選択性のラベルフリーセンサが待望されている。本ナノレーザセンサはこれら全ての要求を満たす可能性があり、医療応用に至る初めての光デバイスとなることを期待している。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- S. Kita, K. Nozaki, S. Hachuda, H. Watanabe, Y. Saito, S. Otsuka, T. Nakada, Y. Arita and T. Baba, "Photonic crystal point-shift nanolaser with and without nanoslots --- design, fabrication, lasing and sensing characteristics", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 17, no. 6, pp. 1632-1647, 2011 (Invited Paper)
- S. Kita, S. Otsuka, S. Hachuda, T. Endo, Y. Imai, Y. Nishijima, H. Misawa and T. Baba, "Super-sensitivity in label-free protein sensing using nanoslot nanolaser", Opt. Express, vol. 19, no. 18, pp. 17683 - 17690, 2011.
- S. Kita, S. Otsuka, S. Hachuda, T. Endo, Y. Imai, Y. Nishijima, H. Misawa and T. Baba, "Photonic crystal nanolaser bio-sensors", IEICE Trans. Electronics, vol. E95-C, no. 2, pp. 188-198, 2012 (Invited Paper).

### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度  
152,800 千円

### 【ホームページ等】

<http://www.baba-lab.ynu.ac.jp/index.html>

## 【基盤研究(S)】

理工系(工学I)



### 研究課題名 高度機能集積形マザーマシンシステム AIMS の実現とそれによる工作機械工学の体系化

東京工業大学・精密工学研究所・教授 **しんの ひでのり**  
**新野 秀憲**

研究分野：機械工学、生産工学・加工学

キーワード：工作機械、超精密加工、ナノ・マイクロ加工

#### 【研究の背景・目的】

高度情報化社会の進展に伴い、情報通信、メカトロニクス分野を中心に製品の高性能化への要求が一段と高まっている。特に、nm スケールの加工分解能で難加工材料の超精密3次元形状を創成する加工要求が増大している。しかし現状では、そのような nm 精度の実現は、小寸法の単純形状の部品に限られ、今後、加工ニーズが高まる大加工空間における難加工材料の3次元ナノ形状創成技術およびそれに必要な工作機械技術について学術面から国内外でほとんど検討されていない。

本研究では、広域3次元ナノ複合加工機能とオンマシン複合計測機能を備えた高度機能集積形マザーマシンシステム(AIMS)を開発すると共に、その開発工程の分析・定式化を行い、新たな学の体系「工作機械工学」を確立することを目的とする。

開発する AIMS は、誤差発生要因の最小化構造、ハイブリッド運動機構、新素材適用、オンマシン複合計測機構、ハイブリッド加工機能等の革新的な機能および構造を有することを特徴とする。

#### 【研究の方法】

研究代表者・研究分担者の開発による図1に外観を示す超精密加工機 ANGEL および超精密3次元計測システム Nano-profiler を通して獲得、蓄積したシステム構築に必要なコア技術、すなわち設計・製造・組立・運動制御技術、さらに関連する工学的知識、ノウハウ、スキルを適用し、それら集大成として AIMS を実現する。具体的な研究は、要素研究を段階的に遂行すると共に、適宜マイルストーンを設定し、系統的に研究の進捗を管理する。最終段階で総ての研究成果を組み合わせて全体システムを完成する。なお、開発工程ではデータや手続きを定式化し、最終的にそれらを工作機械工学として体系化する。

#### 【期待される成果と意義】

本研究は、図2に示す研究の流れにより、市販の工作機械や計測機器では困難な3次元複雑形状の広域複合ナノ加工機能およびオンマシン複合計測機能を備えたマザーマシンを独自技術で構築する。また、その設計・製造プロセスを体系化することにより、新たな学の体系を確立しようとするものである。

研究成果は、産業ニーズの高まる革新的なナノ加工・ナノ計測技術の確立、我が国の製造産業の国際競争力の強化、広範なナノテクノロジーの展開に多大な貢献が期待される。したがって波及効果が期待さ

れ、学術的意義だけではなく工業的意義も大である。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Shinno,H., Yoshioka,H., Sawano,H., A newly developed long range positioning table system with a sub-nanometer resolution, CIRP Annals-Manuf.Tech., 6-1, pp.403-406, (2011).
- Yoshioka,H., Shinno,H., Design concept and structural configuration of advanced nano-pattern generator with large work area "ANGEL", Inter. Jour. of Automation Tech., 5-1, pp.33-44, (2011).

#### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
142,400千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.upm.pi.titech.ac.jp>  
[shinno@pi.titech.ac.jp](mailto:shinno@pi.titech.ac.jp)

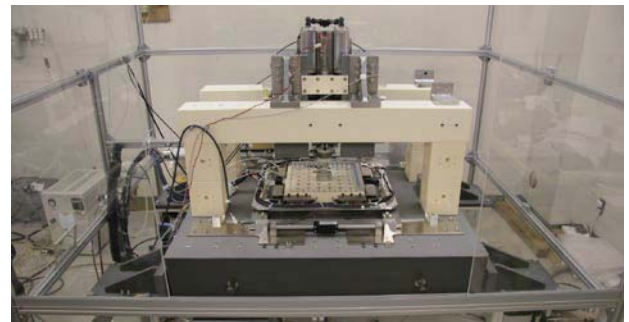


図1 超精密加工機

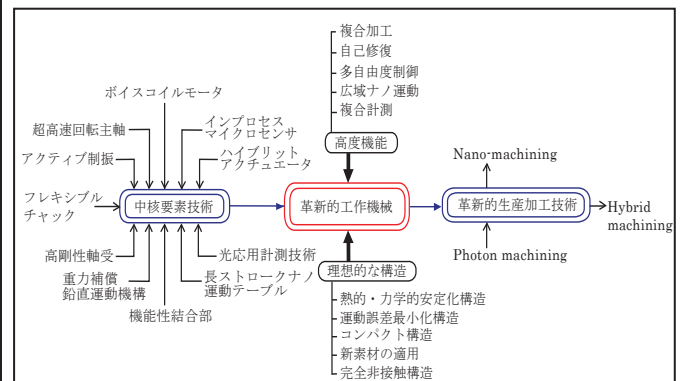


図2 期待される成果

## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学I)



## 研究課題名 究極デバイスとしてのダイヤモンド基板の 革新的超精密加工プロセスへのブレークスルー

九州大学・産学連携センター・特任教授 **どい としろう**  
**土肥 俊郎**

研究分野：超精密加工学

キーワード：特殊加工、CMP, P-CVM

#### 【研究の背景・目的】

半導体薄膜下地としてのサファイア基板や、SiCやGaNなどの半導体材料によるLED、パワーデバイスなどが注目される中、“半導体ダイヤモンドによる究極デバイス”がある。特に機械的・化学的に極めて安定しているダイヤモンド結晶に関しては、本研究開発に関係する超精密加工研究は手付かずの状況にある。

本研究では、SiC、GaNをはじめとする半導体ダイヤモンド基板を研究対象として、当該研究グループによるこれまでの成果を踏まえて、超微小欠陥種疑似ラジカル場の形成法を検討するとともに、密閉式研磨/CMP(Chemical Mechanical Polishing)法とPCVM(Plasma Chemical Vaporization Machining)法を融合させた革新的密閉式CMP/P-CVM融合装置を提案・試作する。そして、高圧～準高圧の酸素雰囲気環境下で光触媒反応とプラズマを援用することによって、従来の10～数10倍の加工能率を狙う高品位面加工法を開発する。本研究によって、次世代グリーン・デバイス用の難加工材料基板の超精密加工の体系化を図り、低炭素化社会に向けたデバイスの早期実用化の起爆剤とする。

#### 【研究の方法】

難加工材料の超精密加工プロセスを設計に当たり、次の二つの加工工程を基本とする。まず、前処理工程では、疑似ラジカル場を形成し、次工程で仕上げ加工し易い状況を醸成することを重点に検討する。仕上げ加工工程では、密閉式研磨/CMP法と高圧酸素下でプラズマを使うP-CVM法を融合させた装置を設計・試作して適用する。ここでは、(a)前処理工程を基板表面に与える場合、(b)加工中に与える場合を考える。

前加工工程の検討;加工対象基板の極表層(数～100原子層)に限定してフェムト秒レーザーなどの超短パルスレーザーによる超微小欠陥種(疑似ラジカル場)を形成する。この疑似ラジカル場を形成することによって、機械的な研磨あるいはCMPにて摩擦磨耗をとまなう化学反応とラジカル場の強力なメカノケミカル的反応を誘起させ、大気圧下での研磨/CMPを容易にする。

仕上げ加工工程の検討;高効率・高品位加工を可能とする密閉式CMP/PCVM融合装置を提案する。設計・試作した本融合装置の最もキーとなる加工箇所には、物理的作用を与える特殊パッドやスラリーを配置し、トライボロジカル摩擦磨耗をとまなう化学

反応とラジカル場の強力なメカノケミカル的反応を誘起させる。より効果的なエッチング作用を誘発させるため、融合装置内を高圧酸素雰囲気環境下にすることも考える。

以上を骨子とする研究から、難加工材料基板の高効率の革新的超精密加工プロセス技術を確立し、グリーンデバイスの実現に貢献する。

#### 【期待される成果と意義】

グリーンデバイスの開発・応用研究そして低コスト化の熾烈な戦いが展開される中で、革新的融合加工技術導入がブレークスルーとなり、生産性・低コスト化を実現できる。

本研究は、究極のグリーンデバイスに貢献できるのみならず、日本が得意とするモノづくり先端産業への貢献ができるもので、日本の活性化の起爆剤になると考える。本研究開発によって、難加工材料のSiC、GaN基板はじめダイヤモンド基板の加工を可能とする。とくにダイヤモンド基板については、従来研磨の数1000分の一以下の加工時間で高品位面が得られることを目指す。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] O. Ohnishi, T. Doi, S. Kurokawa et al.: Effect of Atmosphere and Ultraviolet Light Irradiation on Chemical Mechanical Polishing Characteristics of SiC Wafers, JJAP, 51(2012)05EF05-1
- [2] Y. Sano, T. Kato, T. Hori, K. Yamamura, H. Miura, Y. Katsuyama, K. Yamauchi, K. Aida et al.: Thinning of 2-inch SiC Wafer by Plasma Chemical Vaporization Machining Using Cylindrical Rotary Electrode, Materials Science Forum, 679-680 (2011) pp. 481-484.
- [3] T. Doi, I. Marinescu and S. Kurokawa: Advances in CMP/Polishing Technologies, Elsevier (2011)

#### 【研究期間と研究経費】

平成24年度～27年度  
165,600千円

#### 【ホームページ等】

<http://premach903.mech.kyushu-u.ac.jp/> (当面)  
(新たにホームページを構築する予定。)



## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学I)



## 研究課題名 ナノ・マイクロ熱物性センシング工学の確立と応用

慶應義塾大学・理工学部・教授

ながさか ゆうじ  
長坂 雄次

研究分野：工学、機械工学、熱工学

キーワード：熱物性、輸送現象、マイクロ・ナノデバイス、計測工学

#### 【研究の背景・目的】

ナノ・マイクロレベルの熱物性値の計測技術は、次世代熱工学の基盤としてのみならず、あらゆる分野を横断する最先端研究開発の基盤技術として極めて重要である。また学術的には、これら最先端の技術的課題を包括的に取り扱うためのナノ・マイクロ輸送現象に関する横断的な学問体系を構築する必要がある。本研究の目的は、近接場光や熱的ゆらぎに起因した表面波そして温度波の干渉などを利用した測定原理と光 MEMS 技術を革新的に融合し、ナノ・マイクロレベルのエネルギー・運動量・物質輸送物性(熱伝導率、温度伝導率、粘性係数、拡散係数、ソーレー係数など)を包括的にセンシング可能なナノ・マイクロ熱物性センシング技術群を高度化(精度・時空間分解能の飛躍的向上および計測パラメータの拡張)することによって、新たな工学的応用を開拓し、『ナノ・マイクロ熱物性センシング工学』を確立することである。

#### 【研究の方法】

これまで開発を進めてきた熱物性センシング技術(近接場光学熱物性顕微鏡(図1)、フォトサーマル赤外検知法、レーザー誘起表面波法、リブロン表面光散乱法、ソーレー強制レイリー散乱法)に新たに4つの熱物性センシング技術(周期加熱サーモリフレクタンス法、光 MEMS 粘性センサー、光 MEMS 拡散センサー、近接場相関分光法)を加えた計9種類のセンシング手法を以下の2つの方向で高度化させ、新たな工学的応用を実施する。

高度化①「精度・時空間分解能の飛躍的向上」

[1] 近接場光、レーザー誘起表面波や温度波の干渉など熱物性測定の原理としては従来利用されていなかった物理現象を応用して時空間分解能を向上させる。

[2] より厳密な Working Equations の導出と GUM による不確かさ評価および計測システムの性能向上。

高度化②「計測パラメータの拡張と新規熱物性センシングへの応用」

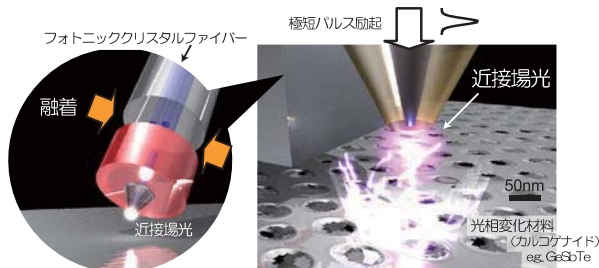


図1 近接場光学熱物性顕微鏡

- [1] 従来考慮されていなかった新たな計測パラメータ拡張を行う。
- [2] 開発した熱物性センシング技術を拡張発展させて新規熱物性に適用する。
- [3] 熱物性センシングの原理を利用した MEMS センサーを開発する。

#### 【期待される成果と意義】

本研究で提案・高度化させる9種類の熱物性センシング技術は、これまでの古典的熱物性計測技術と比較して、本質的にナノ・マイクロレベルの系に適した計測手法であり、申請者らが考案した独創的なもので学術的にも大きな特色がある。このような日本発の世界最先端の独創的センシング技術が実用化されれば、半導体デバイス、バイオチップ、ナノ材料、燃料電池、超伝導応用デバイス等の技術開発における重要なデータとして、ナノレベルの熱伝導率、粘性率や拡散係数等の熱物性が高い精度で取得でき、微細デバイス内部の温度分布、濃度分布や速度分布等の数値シミュレーションの信頼性を格段に向上させることが可能になる。学術上では『ナノ・マイクロ熱物性センシング工学』という熱工学・化学工学・材料工学・計測工学・ナノ工学などを横断的に融合した新たな学問分野を切り拓くことになる。本研究成果は、単に計測技術そのものだけに留まらず、ナノ・マイクロ熱物性センシング群をベースにした例のない工学的応用や熱物性データを提供するという意味で、その意義は大きい。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Oka, T., Itani, K., Taguchi, Y. and Nagasaka, Y., "Development of Interferometric Excitation Device for Micro Optical Diffusion Sensor Using Laser-Induced Dielectrophoresis", J. Microelectromechanical Systems, 21(2), pp. 324-330, (2012).
- Kasahara, K. and Saiki, T., "Numerical simulation of near-field fluorescence correlation spectroscopy using a fiber probe", J. Nanophotonics, 4, 043502/1-6, (2010).

#### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
167,900千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.naga.sd.keio.ac.jp/>

## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学I)



## 研究課題名 固体光源から発生する光子対の量子もつれに関する研究とその量子情報応用

北海道大学・電子科学研究所・教授

すえむね いくお  
末宗 幾夫

研究分野: 工学・電気電子工学・電子電気材料工学

キーワード: 薄膜・量子構造、量子ドット

### 【研究の背景・目的】

安心・安全なネットワーク社会が求められる昨今、量子情報通信の重要性が増している。その実現・高度化には、量子もつれ光源を用いた量子情報ネットワークの展開が必要であり、パラメトリック下方変換を標準光源とした研究が進められているが、光子対の発生がランダムなポアソン分布となる課題がある。これに対して量子ドットを用いると、理想的にはオンデマンド動作が可能となるが、光子を光ファイバーに取り出す効率が低いなどの課題があった。

本研究では、(1)これまで研究を進めてきた金属埋め込み構造による光子取り出し効率の増大によるオンデマンド動作に向けた特性向上、(2)量子情報通信におけるエラーレートを低下するのに重要な単一光子発生純度の向上、(3)1550nm 光ファイバー通信波長帯での光子対の発生、(4)電子クーパ対による量子もつれ光子対発生、(5)光共振器を用いた量子もつれ光子対発生などの研究を進め、固体光源の量子情報応用に関する検討を進める。

### 【研究の方法】

半導体量子ドットのエネルギー準位に対する、パウリの排他律に基づいた単一光子(対)の発生を基本とし、(1)半導体発光源を図1のように金属(Ag)の中に埋め込み、高い効率で光子を外部の光ファイバーに結合する。また(2)金属に埋めることにより、雑音となる背景光子を発生する部分を最小化し、単一光子発生純度を向上させる。(3)図2に示す1550nm帯の光ファイバー通信波長帯で発光する量子ドットに適用して、これまで研究が遅れているこの波長帯での単一光子源の研究を進める。また(1)の金属埋め込み構造により光子の取り出し効率を限りなく高くすることが出来れば、光子対の発光効率はその2乗に比例するので、光子対発生にも大きく寄与する。

(3)において追求する光子対は時間的に異なる時系列発光光子対となる。しかし、今後の量子テレポーテーションや量子もつれスワッピングなどへの応用

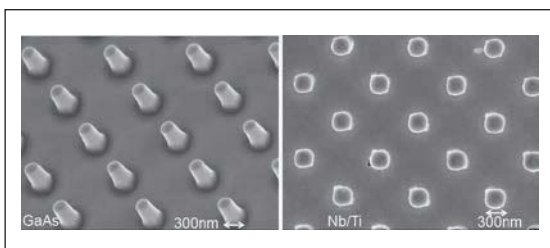


図1 ピラー構造(左)とその金属埋め込み構造(右)

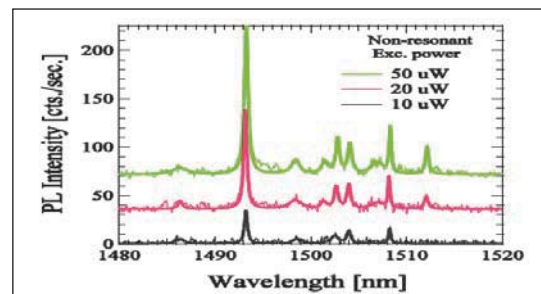


図2 1500-nm帯 InAs/InP 単一量子ドットの発光

を考えると、同時に光子を発生する固体光子対源が必要となる。これを実現する方法として、(4)我々がこれまでその原理を実証してきた電子クーパ対による光子対の同時生成の検討を進め、光子対生成の直接的な確認を行う。さらに(5)光共振器による2光子同時発生確率の増強の可能性を探り、(1)の光子取り出し効率増強構造と組み合わせて、効率の良い光子対源の実現を目指す。

### 【期待される成果と意義】

具体的に量子情報通信に応用しようとする、光子(対)源を効率よく単一モード光ファイバーに結合する必要があるが、金属埋め込み構造で実用的な固体光子源が実現できれば、量子情報通信に大きく貢献する。さらに電子クーパ対や光共振器を用いた新たな方法で同時光子対生成が可能になれば、固体光源を用いた量子もつれ光子対に基づく量子情報ネットワークの実現に大きなインパクトを与える。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・末宗幾夫、熊野英和、笹倉弘理:「量子情報通信のための単一光子・量子もつれ光子対光源」光学、40巻、9号(2011)pp.472-477。(解説)
- ・H. Sasakura,..... H. Kumano, I. Suemune: "Enhanced Photon Generation in a Nb/ n-InGaAs/ p-InP Superconductor/ Semiconductor -diode Light Emitting Device" Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 157403.

### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
165,000千円

### 【ホームページ等】

<http://nanophoto.es.hokudai.ac.jp>  
[isuemune@es.hokudai.ac.jp](mailto:isuemune@es.hokudai.ac.jp)

## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学I)



## 研究課題名 希土類添加窒化物半導体における赤色発光機構の 解明/制御による高輝度発光素子の開発

大阪大学・大学院工学研究科・教授 ふじわらやすふみ  
藤原 康文

研究分野：電気電子工学、電気電子材料工学

キーワード：電気・電子材料、薄膜、発光機能制御

### 【研究の背景・目的】

発光ダイオード(LED)はディスプレイや照明等、地球規模の「省エネ」や「CO<sub>2</sub>削減」など環境対策に貢献する「エコデバイス」として脚光を浴びている。このような背景の中、窒化物半導体を用いた赤色LEDの開発が強く求められている。我々は、従来のLEDとは全く発光原理が異なる、ユロピウム(Eu)添加GaNを用いた窒化物半導体赤色LEDの開発に、世界に先駆けて成功している(図1)。

本研究では、究極のナノテクノロジーである、半導体への原子レベル制御Eu添加技術を基盤とし、計算機ナノマテリアルデザインとの強力な有機的連携のもとに、Eu励起機構の解明と制御に立脚して、日本発オリジナルである「Eu添加窒化物半導体を用いた赤色LED」の高輝度化を達成する。

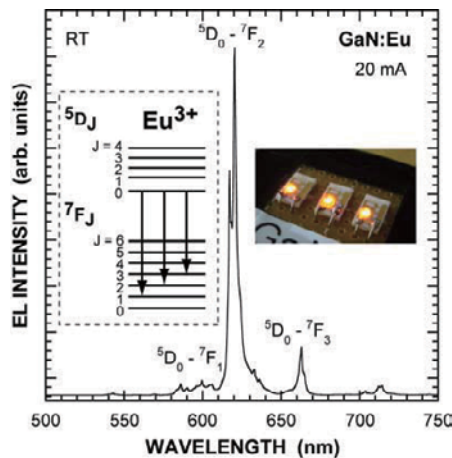


図1 室温で動作するEu添加GaN赤色LED

### 【研究の方法】

本研究では、窒化物半導体へ添加されたEuを研究対象とし、Eu特有の発光機能の究極を追求する。試料作製手法には原子層レベルでの結晶成長が可能な有機金属気相エピタキシャル(OMVPE)法を用いる。

- (1) Eu原子周辺局所構造と発光機能との関連を明らかにし、原子レベルで制御されたEu添加技術の更なる高度化を図る。また、励起・緩和に関わる、窒化物半導体母体からEuイオンへのエネルギー輸送機構を定量的に明らかにする。
- (2) Eu特有の発光機能を最大限に発揮させるために、(1)で明らかにしたエネルギー輸送機構の制御を

目指して、Euと他の不純物の同時添加や、トップダウンおよびボトムアップによるナノ超構造へのEu添加を行う。また、LEDを設計・試作し、その高輝度化を実証する。

### 【期待される成果と意義】

- (1) <希土類材料開発の指導原理を構築する> 希土類蛍光体や希土類磁石に関わる、これまでの希土類材料科学は「勘と経験」に基づく思考錯誤的な「トライ・アンド・エラー」の上に成り立っている。本研究では、希土類元素の発光機能解明に焦点を定め、究極的性能を引き出すための指導原理を構築することが期待される。
- (2) <電池を繋いで希土類元素を光らせる> 希土類元素の発光機能は良く調べられており、既に実用化されている。これらの応用では、希土類元素を紫外線照射や電子線照射により励起することが一般的である。本研究で取り組む「電池を繋いで希土類元素を光らせる」ことは、従来の希土類蛍光体研究者には想像すら出来なかった革新的・独創的な技術のブレイクスルーであり、発光機構の解明とデザインによる新しい応用展開が期待される。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ A. Nishikawa, T. Kawasaki, N. Furukawa, Y. Terai, and Y. Fujiwara: "Room-temperature red emission from p-type/europium-doped/n-type gallium nitride light-emitting diodes under current injection," *Applied Physics Express* **2**, 071004 (2009).
- ・ D. Lee, A. Nishikawa, Y. Terai, and Y. Fujiwara: "Eu luminescence center created by Mg codoping in Eu-doped GaN," *Applied Physics Letters* **100**, 171904 (2012).

### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
163,600千円

### 【ホームページ等】

<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/mse6/kiban/fujiwara@mat.eng.osaka-u.ac.jp>



## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学I)



## 研究課題名 細胞機能解明のためのイオン・蛍光マルチモーダル イメージセンサシステム創製

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

さわだ かずあき  
澤田 和明

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：センシング、集積化バイオセンサ、イメージセンサ

### 【研究の背景・目的】

同一画素で、生体関連物質・光・蛍光を同時に検出することが可能なマルチモーダルセンサをアレイ化し、細胞に存在するイオンチャネルの動き、働きを弁別できるマルチモーダルバイオイメージセンサを製作する。製作するイメージセンサの解像度を1ミクロン以下にした超高解像度マルチモーダルバイオイメージセンサを製作・検証し、このバイオイメージセンサに、マウスの海馬初代神経細胞や脳スライスを直接密着させ、細胞内のイオン情報は蛍光画像として、イオンチャネルから放出されるイオンや生体関連物質(アセチルコリン、グルタミン酸、ATP)は、化学画像として観察するシステムを製作し、生化学分野の共同研究者と外的な刺激による細胞内外のイオンの動きを可視化する。

従来の光学顕微鏡では不可能であったイオンチャネルを経由した細胞内外のイオンなどの動きをリアルタイムで可視化可能なデバイス・システムの実現を目的とする。

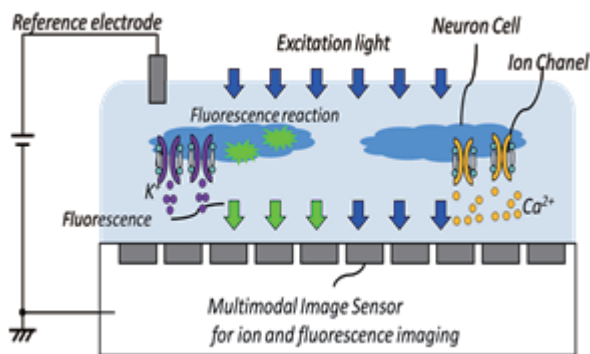


図1 イオンチャネルを介したイオンの動きを可視化する蛍光・イオンイメージセンサ

### 【研究の方法】

本研究は新規なデバイス開発とその応用研究に大別できる。サブミクロンの画素ピッチを持つ、蛍光・イオンイメージセンサを実現するため3つの課題、①0.18ミクロン特殊イオンイメージセンサプロセス構築、②画素縮小のための構成検討、③サブミクロンセンサのイオン感度確保を本学LSI製造設備と協力LSI製造企業を用いながら進める。

サブミクロンプロセス開発はプロセス技術を専門とする連携研究者が、製造企業のプロセスエンジニ

アに指示を出しながら進めていく。さらに細胞・組織・生体の機能を低侵襲リアルタイムで解析する光学技術の専門家である連携研究者と共に、細胞のイオンチャネルからのイオン放出、細胞内の蛍光観察実現を図る。サブミクロンピッチのマルチモーダルイメージセンサが実現するまでは、開発をすでに行った20ミクロンピッチのセンサを利用する。

### 【期待される成果と意義】

全く同じセンサ領域(センササイズ0.5ミクロン程度)で、異なる物理量(蛍光：特定波長情報、化学情報：種類と濃度、形・場所：光強度)を混在なしに取得できるセンサを発明し、これまでに試作を通して実現させてきた。全く同じ領域であるため、極微小領域の異なる情報の相関に信頼性がある。それぞれの物理量の時間差は10マイクロ秒以下であるが、本研究を通じて時間をなくすような原理を検討する。このようなセンサは世界に類がなく大変独創的であるといえる。ただし、画素ピッチをサブミクロンにするためには、これまでのプロセスの更なる改良が必要であるばかりではなく、面積を削減できる画素構成を新たに考案・実証する必要がある。

この提案が実現できれば、イオンチャネルを通して細胞内外の化学物質の動きを可視化することが可能となり、日本オリジナルの技術に基づいた、これまで未知であった生化学機能の解明が可能なツールとして世界の多くの医療・バイオ研究に貢献できると確信する。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・ Multimodal bio-image sensor for real-time proton and fluorescence imaging, Hirokazu Nakazawa, Makoto Ishida, Kazuaki Sawada, Sensors and Actuators B: Chemical, in press.

・ A Fused pH and Fluorescence Sensor Using the Same Sensing Area, Hirokazu Nakazawa, Hiroyasu Ishii, Makoto Ishida, and Kazuaki Sawada, Appl.Phys.Express, No.3, 047001-3 (2010)

### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
134,200千円

### 【ホームページ等】

<http://int.ee.tut.ac.jp>

研究課題名 高次機能半導体ナノフォトニックデバイスと  
その光 RAM への応用



奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・教授

かわぐち ひとし  
河口 仁司

研究分野: 工学

キーワード: 光デバイス・光回路、光制御、レーザー、スピントロニクス

【研究の背景・目的】

急速な情報量の増大に応えるため、より一層高速の光ファイバ通信システムの開発が望まれている。現状のネットワークではIPパケットのルーティング等の信号処理は、電気的に行われており、中継のたびに電気光信号変換が必要になるため消費電力が大きい。最終的には、光信号のままIPパケット毎にルーティング処理を行うルータの実現が期待され、パケット単位でのスイッチ機能とパケットの衝突防止のためのメモリ機能が不可欠であり、これらをフォトニック技術によって実現することが課題である。

研究代表者らは、偏光双安定面発光半導体レーザー(VCSEL)を実現し、これを1ビットの光メモリとして使い、光バッファメモリを実現した。40 Gbps NRZ 信号のメモリ動作や、VCSEL を4個用いた4ビット動作を実現した。本研究では、プラズモンやスピン注入を半導体レーザーへ導入し、高次機能化・省電力化をはかる。又、偏光双安定 VCSEL の省電力化・高速化の極限を追求する。さらにこれまで複数の個別の VCSEL で実現してきた多ビットメモリ動作を、二次元アレイにより実現する。

【研究の方法】

省電力光 RAM の実現をめざし、高次機能半導体ナノフォトニックデバイス、および偏光双安定 VCSEL 二次元アレイの実現技術を研究し、光 RAM の有力な候補となり得るデバイスを完成する。具体的には、

(1) 極微小領域に光とキャリアの閉じ込めが可能で、極めて小さなしきい値電流が期待できる半導体マイクロレーザーを作製し、双安定性を実現する。又、(110)GaAs 量子井戸構造を持つ VCSEL に強磁性電極からスピン偏極電子を注入することにより円偏光レーザー発振を実現する。

(2) 偏光双安定 VCSEL の低消費電力化と高速化の極限を追求する。低消費電力化では、消費電力 0.2 mW で1ビットのメモリ動作を可能とする。低 Q 共振器 VCSEL などにより高速メモリ動作をめざす。

(3) 全光型バッファメモリの実用化に向け大きな課題である多ビット光メモリの実現をめざし、メモリ動作特性の均一化の新しい手法および、2次元アレイ化について研究する。

【期待される成果と意義】

半導体レーザーの低しきい値電流化の研究は、半導体レーザー研究の初期からずっと続いてきた。本研究では金属による光閉じ込めを用いて、微小電流で動

作する半導体レーザーを作製する。ナノ構造半導体レーザーの発振特性を明らかにするとともに、発振モード間の双安定性の実現をめざす。将来的には、光 RAM の基本素子になることを期待している。又、スピン偏極電子を VCSEL の活性層に注入することにより、レーザー発振しきい値の低減・および発振円偏光の高速スイッチを実現する。その過程で、強磁性体/半導体接合によるスピン偏極電子の注入やスピン偏極電子のトランスポートについて新しい知見が得られる。これまでフォトニックネットワーク技術で是非必要と言われながらも実現されてこなかった、全光型パケットメモリ実現の目途が立てば、その意義は大きい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

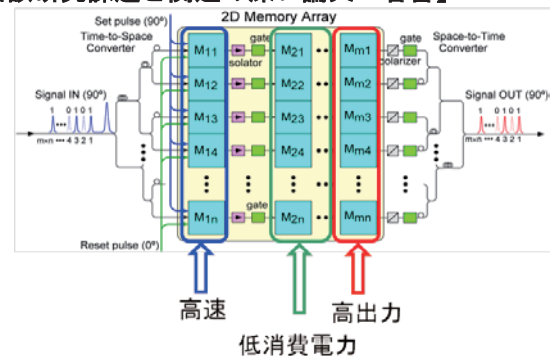


図1 動作実証をめざす光 RAM の概念図

- H. Kawaguchi, T. Mori, Y. Sato and Y. Yamayoshi, "Optical buffer memory using polarization-bistable vertical-cavity surface-emitting lasers," Japanese J. Appl. Phys., Vol. 45, pp. L894-L897 (2006).
- H. Kawaguchi, "Polarization-bistable vertical-cavity surface-emitting lasers: application for optical bit memory," Opto-electronics Review, Vol. 17, pp. 265-274 (2009).

【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 26 年度  
99,100 千円

【ホームページ等】

<http://mswebs.naist.jp/LABs/kawaguchi/index;.html>  
khitoshi@ms.naist.jp

## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学II)



## 研究課題名 先端的要素技術と膜分離の統合による 水処理システムの革新

北海道大学・大学院工学研究院・教授 まつい よしひこ  
松井 佳彦

研究分野：工学、土木環境システム

キーワード：用排水システム

### 【研究の背景・目的】

都市化と気候変動に伴い世界的な水不足と水質劣化が進行しています。これに対し、低質な水を含む多様な水資源を低コスト・低消費エネルギーで、安全・安心な水として利用するための、維持管理が容易な高度水供給技術が求められています。このためには、水処理システムを構成する個々のプロセスとその構成にイノベーションの創出が不可欠です。本研究は、ナノ粉碎技術による吸着剤の超微粒子化、多価金属塩の準安定領域を応用した高分子技術による凝集剤の高機能化、真空紫外線と繊維状光触媒を組み合わせた酸化処理の高性能化を水処理技術へ応用し、これらをセラミック膜分離技術と統合し、先端的浄水システムを創出します。

### 【研究の方法】

要素研究として、吸着、凝集、酸化の水処理プロセスの根幹をなす資機材の高機能化から研究に取り組み、資機材の試作と基本特性評価、バッチラボ実験とプラント試験で性能を検討・評価します。①：吸着材をナノ領域へと超微粒子化し(図1)、極性物質の吸着容量の著しい増加、その原因として粒子外表面吸着(図2)、低競合吸着性、ウイルス除去性、フロック形成の促進効果、膜ファウリング抑止を、材料表面と除去対象物質の物性から検討します。②：凝集剤中のアルミニウムを重合高分子化し、低膜ファウリング性や高いウイルス除去性などを有する機能性凝集剤を開発し、分子量・サイズ・構造・荷電量などとの関連を研究します。③：真空紫外線も照射する紫外線ランプを光触媒や過酸化水素等と組み合わせることによりOHラジカルを積極的に生成し、微量化学物質の高効率分解プロセスを開発します。

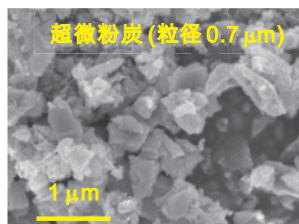


図1 超微粉炭

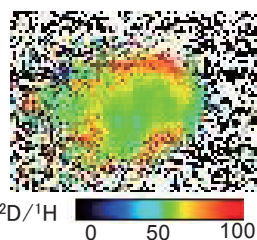


図2 同位体顕微鏡写真  
活性炭粒子の外側(赤色部分)に  
臭気物質MIBが吸着している

個々の革新的要素処理技術を組み込んだ膜処理パイロットプラントを運転し、微量化学物質やウイル

スなどの汚染物質の除去性や運転に要する動力エネルギーの観点からシステム全体として評価します。

### 【期待される成果と意義】

超微粒子活性炭・機能性凝集剤・真空紫外線触媒酸化により分離・質変換要素処理技術に対して技術革新をもたらします。さらにセラミックス膜分離が統合され(例、図3)、劣化した原水水質にも対応可能な、高い分離・分解能力を有する低消費エネルギーで維持管理性の高い先端的浄水システム創出され、学術的基盤の明確な技術として成果が社会へ還元されます。このことは、人口減、低人口密度化を迎える日本における飲料・生活用水の安定供給に大きく貢献できることを意味します。さらに、わが国よりも深刻な水問題に直面する諸外国に対し、多様な課題解決策を提示可能となり、国際的なリーダーシップの発揮、水ビジネスの国内外への展開に寄与します。

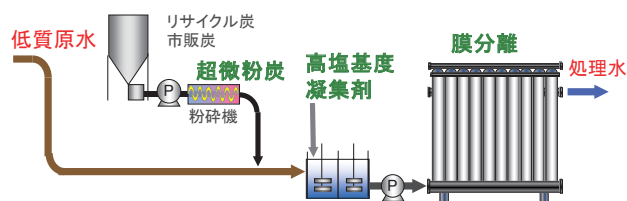


図3 超微粉炭+高塩基度凝集剤+膜分離の統合

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Ando, N., et al., Direct observation of solid-phase adsorbate concentration profile in powdered activated carbon particle to elucidate mechanism of high adsorption capacity on super-powdered activated carbon. Water Research 45(2), 761-767, 2011.
- Matsui, Y. et al., Effects of super-powdered activated carbon pretreatment on coagulation and trans-membrane pressure buildup during microfiltration. Water Research 43(20), 5160-5170, 2009.

### 【研究期間と研究経費】

平成24年度～28年度  
145,400千円

### 【ホームページ等】

<http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/risk/>



## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学II)



## 研究課題名 都市環境防災のための高解像度気象情報予測プラットフォームの構築

東京大学・生産技術研究所・教授 おおおかりょうぞう  
大岡 龍三

研究分野：都市・建築環境工学

キーワード：建築環境・設備、自然現象観測・予測、大気現象、防災

### 【研究の背景・目的】

気象現象は人々の生活を取り巻く第一次的な環境の境界条件であり、我々の生活に多大な影響を及ぼす。災害面でいえば、近年注目を集めている集中豪雨や局所的大雨、2011年9月13日に発生した台風15号(Roke)による被害、都市域の劣悪な暑熱環境による数多くの熱中症患者の発生などが記憶に新しい。また環境面で言えば、ヒートアイランドによるエネルギー消費の増大とエネルギー供給安定性の問題、渇水の危険性等の問題や、都市空間の高密度利用の進展による局所的な大気の高濃度汚染が発生するといった問題が挙げられる。

これら近年の都市環境や災害の問題に対処するためには、10km オーダーの解像度で予測する既存の気象情報予測ツールでは不十分である。そこで、本研究では、健康・安全かつ環境負荷の小さい都市空間の形成を目的として、マクロな気象情報からミクロな気象情報をダウンサイズする手法の開発、あるいはミクロ解析の結果からマクロな解析モデルの予測精度向上を図り、大気汚染や雲形成などを含めたマルチスケール・マルチフィジックスな高解像度気象情報予測プラットフォームの構築を行う。

### 【研究の方法】

本研究計画は主に3つの段階から構成される。

#### ①構成要素モデルの開発

実在街区での屋外実測により都市大気環境の把握(図1)を行うとともに、風洞実験及びチャンバー実験によって非等温場や大気汚染物質の化学反応性を考慮した拡散実験を行い数値モデルの検証用データとする。それと同時に、LES (Large-eddy simulation) を用いたミクロ解析を行い、キャノピーモデルや積乱雲の生成・消滅モデルなどマクロな解析で用いられる数値モデル構築のための基礎データを整備する。

#### ②各モデルの接続

メソとミクロ解析を接続するためLESにおける流入変動風の作成手法に関しても検討を行う。本研究では特に、運動方程式に摂動としての体積力を与え、変動風を作成する手法について検討を行う。

#### ③統合モデルのプリ・ポスト整備とケーススタディ

上記開発したモデルを統合するとともに、インプットとしてGIS (Geographic information system) データと各気象観測所による出力値を、アウトプットとしてBIM (Building information model) 利用するインターフェースを構築し、気象情報プラットフォームの構築を行う。

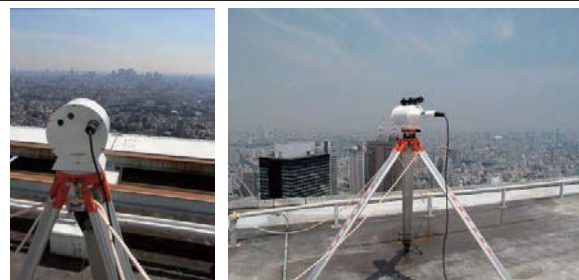


図1 都市上空の顕熱フラックス測定

### 【期待される成果と意義】

本研究は健康・安全かつ環境負荷の小さい都市空間の創出を最終目標とし、本研究で構築する高解像度気象情報予測システムが都市空間の計画や設計段階で有効に活用されることを期待している。

本研究で構築するプラットフォームの実現によって、都市空間に直接影響を及ぼす様々な気象問題の再現が可能となる。また、GIS や BIM データとの統合によって、都市から建物設計に至るまで環境に適応する最適設計案の立案を支援することで、より良い都市空間の創出に貢献する。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ M. Khiem, R. Ooka, H. Hayami, H. Yoshikado, H. Huang, Y. Kawamoto, Process analysis of ozone formation under different weather conditions over the Kanto region of Japan using the MM5/CMAQ modelling system, Atmospheric Environment 44, pp. 4463-4473, 2010
- ・ H. Kikumoto, R. Ooka, A numerical study of air pollutant dispersion with bimolecular chemical reactions in an urban street canyon using large-eddy simulation, Atmospheric Environment 54, pp. 456-464, 2012

### 【研究期間と研究経費】

平成24年度～28年度  
156,800千円

### 【ホームページ等】

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

## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学II)



## 研究課題名 生体に学ぶゆらぎエレクトロニクス

東京大学・大学院工学系研究科・教授 たばた ひとし  
**田畑 仁**

研究分野：酸化物エレクトロニクス、バイオエレクトロニクス

キーワード：スピングラス、リラクサー、ゆらぎ、確率共鳴

### 【研究の背景・目的】

一般にコンピュータの特徴は、熱雑音に対して高エネルギーを用いて誤作動率を極めて低く抑さえ、決定論的作動を高速に行う点にある。しかし、その高速な処理は膨大な消費電力を伴う。また、その動作を規定するアルゴリズムはソフトウェアとしてハードウェアから切り離され、システムは環境変動に対し脆弱である。一方、生体情報処理の特徴は、熱ゆらぎ(生体ゆらぎ)を利用することによって、処理速度が低速であるが、熱雑音と同レベルの低エネルギーで確率的に動作する点にある。しかしながら、こうしたあいまいで確率的にゆらぐ素子がシステム化されると、脳に見られるような生体特有の柔軟な情報処理が生み出される。例えば、脳を構成する神経細胞一つ一つは雑音を包含している素子であるにもかかわらず、それらが集まると信頼性が高い情報処理が可能なシステムを構築している。またアルゴリズムを自発的に形成することができ、そのシステムは環境変動に対し頑強(ロバスト)なものになる。

そこで本研究では阪大在職中よりゆらぎPJに関連して進めてきた研究を発展させ、生体における「ゆらぎの利用」を「情報処理」へ活用することにより、脳機能に代表される生体機能を備えた、従来には無い新しい情報処理システムを構築し、生体に学んだ超低消費電力デバイスを創製する事を目的とする。

### 【研究の方法】

生体ゆらぎを模倣するため、まず室温スピングラス材料の開発を進める。先行研究で開発した、室温クラスターガラス材料：スピネル型フェライト材料を活用して、その“スピングラス”を利用することで、生体ゆらぎの模倣を試みる。具体的な材料として $\text{Fe}_3\text{O}_4$ に $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ru}^{3+}$ 、 $\text{Ti}^{3+/4+}$ 等を置換した化合物を検討する。

次に、代表的な双極子ガラス(リラクサー)物質の $\text{Pb}(\text{Mg}^{2+}, \text{Nb}^{5+})\text{O}_3$ 等に注目する。これはMgとNbのイオン半径、価数の違いから、 $\langle 111 \rangle$ 方向に1:2の比で秩序配列しているリラクサー系誘電体と知られている。人工格子法により、この秩序配列の割合を人為的に0~100%まで制御する秩序—無秩序人工格子のアプローチにより、双極子ゆらぎの人為制御を目指す。従来の人工格子研究は全て「自然界に存在しない秩序構造を人為的に導入する」という、秩序構造の構築にベクトルが向けられていた。しかし、本研究が目指すものは、従来とは異なる逆転の発想である「無秩序性の人工制御」である。

さらにスピングラス材料に於ける、“スピングラス”を活用した情報処理素子の研究開発を目指す。シナプス情報処理の原理式が、スピングラス状態と同値の物理的数式(ハミルトニアン)で示されることを利用して、スピングラス材料により脳機能模倣型の情報処理素子の開発を目指す。

具体的には、磁性素子として磁気記憶装置利用が期待されている磁気抵抗素子をモデルとして、磁性(100nm)/絶縁体(1~2nm)/スピングラス材料のスピントンネル接合素子においてトンネル接合の障壁を閾値として、スピントンネル電流を検出することにより、脳型低消費電力デバイスを実現させる。スピングラスを認知・判断機能素子としてスピインジェクション層に使用する事で、最適解と照合(認知・判断)するフィルター機能を検証する。

### 【期待される成果と意義】

“生体に学ぶ”ことで、これまで“悪者”であった“ばらつき、ゆらぎ”を積極的に活用した新しいデバイス(情報処理素子、メモリ素子)の実現を目指すものである。生体が生来備え、巧妙に活用している“情報のゆらぎ：確率共鳴現象による情報処理原理”を利用するという、従来とは、全く逆の発想(アプローチ)により、新しい情報処理システムの学理を構築し、超低消費電力デバイス(確率共鳴デバイス)を創製する。これまでは“厄介者”であった“熱ゆらぎ/環境からのエネルギーを生かす”逆転の発想による超低消費電力デバイスの実現が期待できる。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Science, 280(1998)1064
- Appl.Phys.Lett. 78 (2001) 512 & 76 (2000) 1179
- Phys.Rev.E, 79 (2009) 021902
- Appl.Phys.Express. 1 (2008) 088002.

### 【研究期間と研究経費】

平成24年度—28年度  
123,400千円

### 【ホームページ等】

<http://www.bioxide.t.u-tokyo.ac.jp/index.html>  
[tabata@bioeng.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:tabata@bioeng.t.u-tokyo.ac.jp)

## 【基盤研究(S)】

理工系(工学II)



### 研究課題名 リバース 4D 材料エンジニアリングによる 材料開発プロセス革新

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

とだ ひろゆき  
戸田 裕之

研究分野：構造、機能材料

キーワード：強度、靱性、破壊、疲労、クリープ、応力腐食割れ、超塑性、磨耗

#### 【研究の背景・目的】

近年、3D/4D イメージング法の発展により、物質内部の複雑かつ動的な現象にダイナミックにアプローチできるようになってきた。本研究では、これを活用し、材料開発の新しい技術体系：リバース 4D 材料エンジニアリングを創成する。これまでの材料開発(図1上)は、「材料設計→評価→実材料創出」という時系列であった。提案は、これと逆方向のプロセス(図1下)により、迅速、高精度に高性能材料を開発するというものである。本法では、その複雑さ故、現在の科学では理論的取り扱いはおろか、そのパターン化さえ困難な現実の材料のマルチスケール 3D 構造を忠実に取り込む高精度イメージベースシミュレーションにより、仮想的にマイクロ構造を最適化する。さらに、複雑な 3D 微視形態を従来の材料設計技術に反映できる程度に「粗視化」(不要な情報を無視し、必要なものを単純なパラメーターで表現)表現することで、ものづくりに展開可能な実用組織制御技術とする。

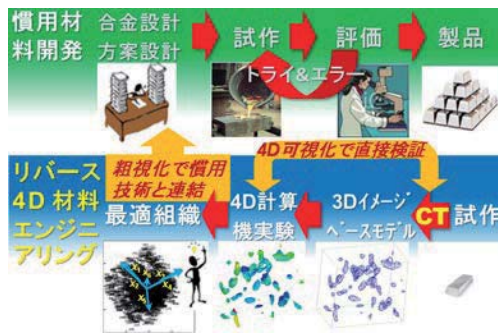


図1 提案法(下)と従来の材料開発(上)の比較

#### 【研究の方法】

既存の材料のナノ～マクロ組織を 3D/4D イメージングし、それを忠実に再現した 3D イメージベースモデルにより計算機実験を行う。膨大な数のマイクロ組織のうち、所望する特性に大きく影響する、極めて限定された種類、性状、領域のマイクロ組織を特定した後、超大情報量となる 3D/4D 組織情報を粗視化により徹底して取捨選択する。要素技術となる 3D/4D イメージング、4D 画像解析、イメージベースシミュレーション、粗視化のうち、研究開発が必要な後 2 項目を研究するとともに、4つの要素技術を連成させて方法論として確立する。また、実用材料の材料組織最適化をデモンストレーター研究とし、実効性を実証する。

#### 【期待される成果と意義】

構造・機能材料の共通基盤技術となる材料開発法であり、実在する物質の複雑な形態をこれまでのものづくり技術に取り込む点で、材料開発のパラダイムチェンジが期待できる。また、我が国が得意な先進計測・解析法を基にすることで、他の模倣・追従を許さず、我が国の産業に幅広く、強力かつ継続的に貢献できる。例えば、図2に示すように、材料開発の新概念としてセラミックスやポリマー、複合材等の幅広い材料に、また素材だけではなく電子分野のハンダ接合部の様なマイクロ・ナノ構造体やインフラの劣化挙動など、材料以外分野にも幅広く活用できる。

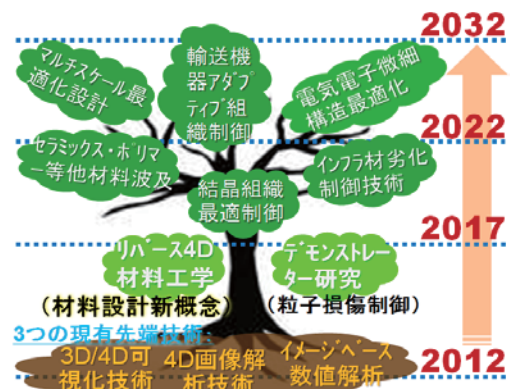


図2 研究期間以降の波及効果

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- H. Toda, S. Masuda, et al., Statistical assessment of fatigue crack initiation from sub-surface hydrogen micropores in high-quality die-cast aluminum, Acta Mater., Vol.59, 4990-4998, 2011
- L. Qian, H. Toda, et al., Direct observation and image-based simulation of three-dimensional tortuous crack evolution inside opaque Materials, Phys. Rev. Lett., Vol.100, 115505, 2008

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度～28 年度  
125,700 千円

#### 【ホームページ等】

<http://four-d.me.tut.ac.jp/index.html>



## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学II)



## 研究課題名 ナノヘテロ界面制御に立脚する超酸素イオン伝導体の創出と革新的燃料電池

九州大学・大学院工学研究院・教授 いしはら たつみ  
石原 達己

研究分野：材料工学、無機機能材料

キーワード：ナノイオニクス、燃料電池、エネルギー効率化

### 【研究の背景・目的】

近年、異なる格子の接合界面のイオン伝導が注目されている。これは異なる格子を接合すると、格子の緩和現象で、界面には不安定な格子間隔の原子層が出現し、バルクとは異なり、イオンが移動しやすくなることが期待される。従来イオニクス材料ではこのような界面の物性はほとんど使っていないことから、界面緩和層を積極的に利用することで、興味あるイオニクス材料が創造できる可能性がある。本研究では、 $K_2NiF_4$ 型構造などの2次元的に酸素イオンを伝導可能な混合伝導体と酸素イオン伝導体、誘電体や金属などと格子を整合させ、接合させたナノヘテロ接合界面を作成し、電子伝導を制御して界面での酸素イオン伝導を向上させるという新しいナノイオニクス効果を創出する。この効果に基づいて革新的な燃料電池を創出する。

### 【研究の方法】

製膜方法としてレーザーアブレーション(PLD)法、酸化物ナノシートを積層する化学的なナノコンポジット製膜法を用いて、ナノレベルの膜厚の積層体または3次元の混合伝導体と酸素イオンまたは誘電体、金属の接合の作成をおこなう。とくに3次元コンポジットへの展開を図1に示すようなダブルカラムナー構造の酸化物を用いて行う。得られたナノレベルの構造制御された接合面を有する酸化物膜のイオン伝導性と電子伝導の挙動解析を、伝導度の温度依存性やホール効果、ゼーベック効果を用いて解析する。一方、接合状況をTEMを用いて原子レベルで解析するとともに、 $^{17}O$ を用いて、酸素の局所構造の変化をNMR分析やEELSスペクトルに基づいて解析する。作成した新規イオン伝導体を用いる可逆動作SOFCや金属-空気燃料電池への展開を行うとともに、新概念触媒への展開を検討する。

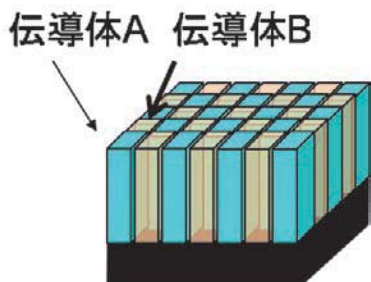


図1 作成するダブルカラムナーコンポジット膜

### 【期待される成果と意義】

本研究によりホールや電子濃度を制御して酸素イオン伝導を向上させる新概念の材料開発の設計指針を確立する。とくに金属ナノ粒子との複合化では、3次元的に大きな応力を発生できることから、近年指摘されている3次元的な引っ張り応力による格子歪を利用する酸素イオン伝導の向上についても詳細に検討する。さらに本研究では新規な人工格子の作成法としてナノシートに着目し、アルカリ元素からなるNb系などの欠陥ペロブスカイトの層剥離を行なってナノシートを作成し、その積層化により、新規な原子レベルの積層膜の作成を検討する。一方で、このようなナノイオニクス効果を利用した高酸素イオン伝導体は、現在、要望のある低温作動型固体酸化燃料電池の電解質として有用なもので、 $400^{\circ}C$ 前後で作動するSOFCの実現へ応用するとともに、低温作動により2次電池的な応用が行えることからNaS電池を凌駕する新概念蓄エネルギーデバイスとしての酸素イオン伝導体を電解質とする”金属-空気燃料電池”という概念を切り開く。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Sirikanda Nuansaeng, Masatomo Yashima, Maki Matsuka, and Tatsumi Ishihara, "Mixed Conductivity, Nonstoichiometric Oxygen, and Oxygen Permeation properties in Co-Doped  $Sr_3Ti_2O_{7-8}$ ", Chemistry a European Journal 2011 No.40 pp11324-11331
- Young-Wan Ju, Toru Inagaki, Shintaro Ida, and Tatsumi Ishihara, "Sm(Sr)CoO<sub>3</sub> Cone Cathode on LaGaO<sub>3</sub> Thin Film Electrolyte for with IT-SOFC High Power Density", Journal of The Electrochemical Society, 158 (7) B825-B830 (2011)

### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
154,700千円

### 【ホームページ等】

<http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~ishihara-lab/>  
[ishihara@cstf.kyushu-u.ac.jp](mailto:ishihara@cstf.kyushu-u.ac.jp)

## 【基盤研究(S)】

理工系(工学II)



### 研究課題名 極限環境パワー半導体の異相界面科学

大阪大学・産業科学研究所・教授 **菅沼 克昭**

研究分野: 工学

キーワード: 電気接続・配線、パワー半導体、エレクトロマイグレーション

#### 【研究の背景・目的】

SiC や GaN などワイドバンドギャップ・パワー半導体の実現には、Si では到達できない 300°C 近い極限環境動作が望まれ、異相界面における熱的、機械的、電気的、光学的に最適化された幅広い視点を持った材料選択と界面設計指針が必要不可欠である。図 1 には、新世代パワー半導体実現のための各種課題を示す。本研究では、提案者が実現したハイブリッド自動車のセラミック/金属界面設計に基づくパワー半導体実装技術と鉛フリーはんだ材料基礎科学を基にして、応力緩和を考慮した超耐熱鉛フリー放熱接続構造、腐食・酸化や電極界面反応、大電流負荷によって生じるエレクトロマイグレーション(EM) やウィスカ現象の未知の領域に取組み、極限環境動作のパワー半導体実現に向けた異相界面基礎科学を確立する。

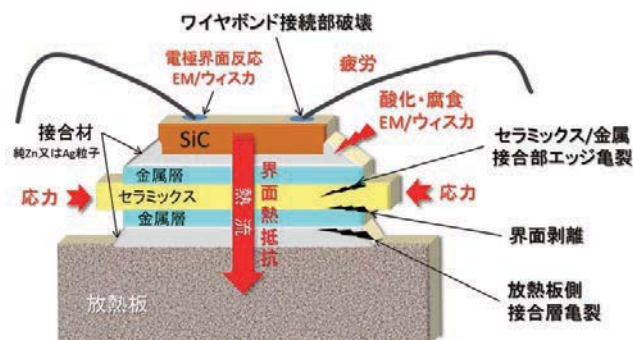


図 1. 新世代パワー半導体の異相界面課題

#### 【研究の方法】

本研究では、提案者が開発した新たな純 Zn はんだ、及び Ag 焼結接合による超耐熱鉛フリーダイアタッチ材料技術を基礎とし、各種異相界面の組織・物性評価とシミュレーションを通して、目標達成のために以下の 4 研究項目について研究を推進する。

- ① 応力緩和放熱接続材料・構造: 有限要素シミュレーションと実測を併用し、柔軟な接続材料開発と構造設計指針確立する。
- ② 極限条件腐食・酸化電極界面構造設計: 接続、配線材料の 300°C 安定化対策を考案し界面構造設計を行う。
- ③ 大電流負荷 EM 現象: 大パワー配線・接続部位における EM 現象のメカニズム解明と評価技術開発、新提案材料の安定性評価を行う。
- ④ 極限温度サイクルウィスカ発生メカニズム: メカニズムの解明に基づくウィスカ対策を提案する。

#### 【期待される成果と意義】

新世代パワー半導体実現に向けた異相界面設計指針に基づき、高信頼性と高機能を兼ね備えた新世代パワー半導体実装が可能になる。これによって、再生可能エネルギーにおける高効率電力変換の実現、革新的省エネルギー機器の開発、ハイブリッド自動車や電気自動車の電力変換高効率化、あるいは、新幹線などの高速輸送機関や地殻探査や宇宙探査の高信頼機器の製造が実現する。

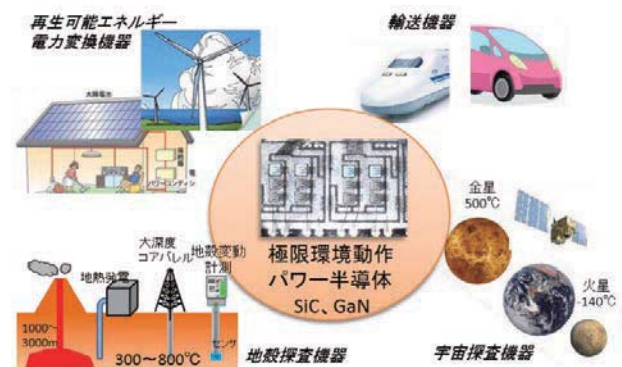


図 2. 期待される極限環境機器

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- K. Suganuma, et als, Sn whisker growth during thermal cycling, Acta Materialia, 59[1](2011), 7255-7267.
- K. Suganuma, S. Kim, Ultra heat-shock resistant die-attachment for silicon carbide with pure zinc, IEEE Electron Device Letters, 31[12](2010), 1467-1469.

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度 - 28 年度  
157,800 千円

#### 【ホームページ等】

<http://eco.sanken.osaka-u.ac.jp/suganuma@sanken.osaka-u.ac.jp>

## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学II)



#### 研究課題名 マイクロアロイングの科学と材料組織ベースの凝固ダイナミクスの構築

大阪大学・大学院工学研究科・教授 やすだ ひでゆき  
安田 秀幸

研究分野：理工系、工学、材料工学、金属生産工学

キーワード：融体、凝固

#### 【研究の背景・目的】

金属材料の多くが製造される凝固プロセスでは、 dendraitの組織形成ダイナミクス(ミクロ)と液相の流動や固相の移動・変形のダイナミクス(マクロ)が相互に影響しながら多様な現象を引き起こすため、組織制御・欠陥抑制には現象の理解が重要である。しかし、有効な研究手法がなく、ミクロとマクロダイナミクスの実証的な統合はできていない。また、変形・偏析の制御に有効な微量元素添加による組織制御(マイクロアロイング)も、科学的基盤がなく、経験的手法に頼っているのが現状である。

本課題では、金属材料を対象に、 dendraitの発達・粗大化・溶断および固相・液相の移動・変形といった凝固ダイナミクスの素過程をその場観察により定量化し、ミクロ組織形成とマクロ変形・偏析を実証的に統合したモデルを構築する。特に、ミクロ/マクロ相互作用により発現する固液共存体の脆化、不均一変形と偏析、凝固とそれに続く固相変態も含めた変形機構を明らかにする。さらに、マイクロアロイングによる凝固組織改質機構の解明から能動的な変形・偏析制御に展開する。

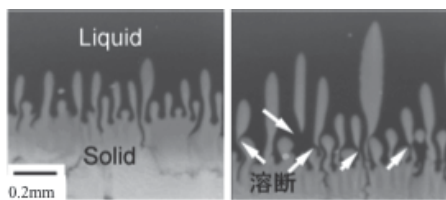


図1 dendraitアームの溶断例(時間分解X線イメージング)

#### 【研究の方法】

放射光を用いた時間分解その場観察は、金属材料の凝固過程をありのまま観察できる特長がある。図1のように、Sn合金の dendraitアームの溶断を時間・空間分解で観察でき、凝固の素過程を実証的に把握できる。また、蛍光X線分析では微量元素の存在位置を確認できる。図2に示したAl-Si合金に添加された微量Srのマッピングによると、Siに固溶しないSrがSi結晶中に存在しており、微量添加元素の役割を解明する上で有益な情報が得られる。

これらの特長ある手法を発展させ、凝固現象の解明とモデル化、格子静力学計算・フェーズフィールド法を用いたマイクロモデルによる補完・検証、これ

らのデータを基礎にミクロ/マクロ統合モデルの構築と検証を行う。さらに、微量元素の分析などを利用し、組織制御の基本となるマイクロアロイングの科学的基盤の構築を目指す。

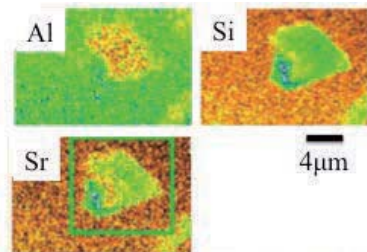


図2 放射光蛍光X線マッピング(Al-Si-Sr)

#### 【期待される成果と意義】

実証データに基づいたミクロダイナミクスを内包したマクロダイナミクスの構築は、凝固現象を解明する新たな学理になるとともに、多様な金属材料の凝固組織の予測に寄与できる。さらに、能動的な組織制御を実現するマイクロアロイングの科学的基盤が確立できれば、効率的な微量元素による組織制御の可能性が拡大する。このような現象の理解と制御手法は、凝固・ castingプロセスにおける現在の課題を克服し、金属材料生産の高度化に貢献できる。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- H. Yasuda, I. Ohnaka, A. Sugiyama, et al, "Direct Observation of Stray Crystal Formation in Unidirectional Solidification of Sn-Bi Alloy by X-ray Imaging", *J. Cryst. Growth*, **262** (2004) 645.
- H. Yasuda, T. Nagira, M. Yoshiya, A. Sugiyama, et al, "Development of X-ray Imaging for Observing Solidification of Carbon Steels", *ISIJ Int.*, **51** (2011) 402-408.
- T. Nagira, C.M. Gourlay, A. Sugiyama, M. Yoshiya, H. Yasuda, et al, "Direct Observation of Deformation in Semi-Solid Carbon Steel", *Scr. Mater.*, **64** (2011) 1129.

#### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
104,400千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.mpd.ams.eng.osaka-u.ac.jp>  
[yasuda@ams.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:yasuda@ams.eng.osaka-u.ac.jp)



## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学II)



## 研究課題名 生体分子の油状ナノ分散化技術を利用した 低侵襲性経皮ワクチンの創製

九州大学・大学院工学研究院・教授 **ごとう まさひろ**  
**後藤 雅宏**

研究分野：プロセス工学、生物工学

キーワード：ドラッグデリバリーシステム (DDS)

### 【研究の背景・目的】

経皮免疫法とはウイルスなどの抗原を皮膚から投与し、体内の抗原特異的な免疫力を増強・記憶させ、以後その病気にかかりにくくする“塗り薬型のワクチン療法”である。これまでの成果によって、ワクチンは特定感染症に対する最も有効かつ経済的な予防策であることが認識されている。しかし、一般的にワクチン投与は注射によって行われている。

本研究の目的は、生体分子の油状ナノ分散化技術 Solid-in-Oil (S/O 化技術) を応用し、今まで注射でしか投与できなかったワクチンを塗り薬として投与できる“塗り薬型ワクチン (経皮免疫システム)”を完成させることである。申請者はこれまでに、S/O 技術を利用して生体分子の皮膚浸透性の向上に成功したので、この技術を利用して高効率な経皮免疫システムを確立する。

### 【研究の方法】

図1に本研究によって経皮免疫が達成されるまでの概念図を示す。我々は高効率な経皮免疫システムの達成には、次の3点が重要であると考えている。



図1 経皮免疫機構

- (1) 抗原が角質層を効率よく通過できること (A)。
- (2) 抗原が効率よくランゲルハンス細胞へ取り込まれること (B)。
- (3) 抗原投与時にリンパ節中の免疫細胞が活性化されること (C)。

我々のナノコーティング技術によって、(1)の抗原が角質層を通過することは既に表示されている。したがって本研究では抗原が表皮に浸透した後の過程において、後者の2点を達成可能な新しい経皮免疫システムの創製に挑戦する。(2)への挑戦の例として、細胞融合性の高いカチオン性リポソームを用いてランゲルハンス細胞との融合性を高め、経皮免疫を達成した系が報告されている。申請者はこの点に注目

し、抗原となるタンパク質や遺伝子を効率よく細胞へデリバリーできる新規ナノキャリアを独自に作成することで(2)を達成することを試みる。(3)に関しては、リンパ球中のT細胞やB細胞を活性化する物質(アジュバント)が報告されている。そこで(2)で調製するキャリアは疎水性の物質でも親水性の物質でも自由に封入することが可能であるという特徴を生かし、有効なアジュバントの添加によって(3)の効率を向上させる計画である。

### 【期待される成果と意義】

本研究で提案する、ナノコーティング技術を応用したS/O化技術は、タンパク質や遺伝子といった生体分子による“がんワクチン療法”において重要な皮膚浸透性を向上させることができる。これによって日本発のワクチン開発が可能になると考えられる。本技術は、現在の注射投与を経皮吸収に剤形変更できる可能性を秘めており、発展途上国へのワクチン供与も可能となる。

高齢化社会を迎えた今日の日本にとって、治療から予防へのパラダイムシフトが重要であり、経皮ワクチンは、その達成の鍵を握ると考えられている。今後はこれまで得られた最先端の創薬システムをいかに国民生活に有効に活用するかが重要な課題である。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・ Y. Tahara, K. Namatsu, N. Kamiya, S. Kamiya, M. Arakawa, M. Goto, "Transcutaneous immunization by a solid-in-oil nanodispersion", *Chem. Comm.* 46. 1452-1454 (2010).

・ Y. Tahara, S. Honda, N. Kamiya, M. Goto, "A solid-in-oil nanodispersion for transcutaneous protein delivery", *J. Control. Release*, 131, 14-18 (2008).

### 【研究期間と研究経費】

平成24年度-28年度  
138,400千円

### 【ホームページ等】

<http://www.bioeng.cstm.kyushu-u.ac.jp/>  
[m-goto@mail.cstm.kyushu-u.ac.jp](mailto:m-goto@mail.cstm.kyushu-u.ac.jp)

## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学II)



## 研究課題名 多階層複雑・開放系における粒子循環の物理とマクロ制御

九州大学・応用力学研究所・教授 **ずし ひでき**  
**図子 秀樹**

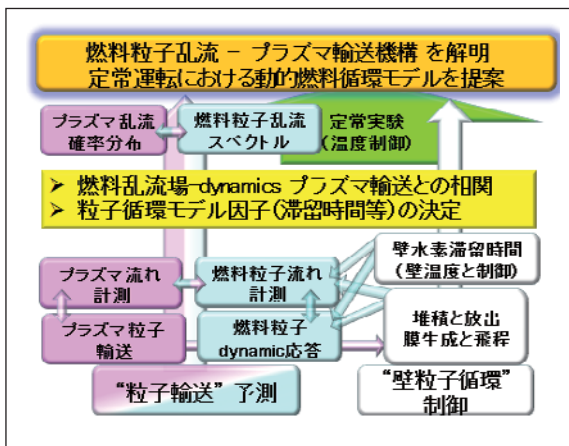
研究分野: 工学、総合工学、核融合学

キーワード: プラズマ・壁相互作用、核融合炉の定常運転、多階層複雑・開放系

### 【研究の背景・目的】

半世紀を経た核融合炉開発研究は国際熱核融合炉 ITER の建設・実験を経てエネルギー生成源としての核燃焼物理と工学の検証段階へと進展している。燃料注入と燃焼制御、He 生成と燃焼維持、He 灰の排出などの核燃焼物理の理解と制御性の確認が予定されている。核融合炉が基幹エネルギー源としての役割を果たすには、“定常運転”が前提であるが、これまで世界中の大型核融合実験装置で10分を超える運転実績はなく、ITERでも400秒が当面の目標である。パルス運転では問題とならない燃料粒子の系内での循環制御が定常運転では第1議的な研究課題となる。

本研究では核融合炉を構成する3つの系(炉心プラズマ CORE、周辺プラズマ SOL、第一壁 HW)における、燃料粒子循環の各系素過程と系間相互作用の解明、循環モデル、全系粒子循環制御により、炉の定常運転のための基礎構築を目的としている。これらの粒子循環制御は正負の排気速度を示す壁と外部排気装置のために外部開放・複雑系を成している。この研究のために“多階層複雑・開放系における粒子循環物理とマクロ制御”という観点を導入し、3つの系が入れ子状の複雑系を構成し、各々の系内の粒子循環と系間の相互干渉過程の解明が系全体の粒子循環マクロ制御の鍵であるという立場で研究を進める。



### 【研究の方法】

温度制御可能な第1壁(HW)をプラズマ実験装置 QUEST に設置し、300-500°C で温度制御することにより壁での粒子循環時定数の短時間化と循環拘束化を試みる。HW は2ヶ年かけて整備し、3つのステップ,1) HW (~100 °C)+パルス運転, 2) HW(100 °C

<温度制御無し)+連続運転,3)HW 温度制御(300-500 °C)+冷却系+連続運転、をへて放電管全系の熱収支を確認する。熱バランスのとれた系における粒子循環のもとで、①壁温度に対する壁吸蔵・放出特性遷移、②plasma 運転時間の長時間化や中性粒子密度の時間発展に伴う blob 動特性の変化、③中心ピーク分布形成・維持を調べる。これら3つの系の相互干渉性の定量化は HW 温度、放電時間、壁近傍の中性粒子束や空間分布の関数として指標化し、そのために SOL/Core 部の揺動や速度場計測は高速カメラ、超多点計測により広域の2次元データとして取得する。こうしたデータを活用し全系での循環モデルを構築する。

### 【期待される成果と意義】

近年マクロ、メゾ、ミクロの多階層構造による自然認識のモデルが成功を収めつつある。しかしながら、開放粒子循環系である核融合炉エネルギー生成システムの制御に関しては、入れ子状の多階層構造を持つ複雑系として新たに問題を設定すべきであり、異なる階層構造間の相互干渉性を抽出するモデルに従っていかに安定にマクロ系(定常密度運転)を維持・制御するかということに取り組むべきである。個別の時空スケールで特徴づけられる複雑系が複数入れ子状に構成された系を外部に開放されている最外領域で強く拘束することにより、システムの安定化が図れるか否かという課題に取り組むことで、定常炉の実現に学術的な立場で貢献する。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- H.Zushi, et al., "Steady-state tokamak operation, ITB transition and sustainment, ECCD experiments in TRIAM-1M", Nucl. Fusion, **45** (2005) 1-15  
H.Zushi, et al., "Active particle control experiments and critical particle flux discriminating between the wall pumping and fuelling in CPD tokamak", Nucl. Fusion, **49** (2009) 055020 (9pp)

### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度-28 年度  
154,800 千円

### 【ホームページ等】

<http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST-PJ/index.html>  
zushi@triam.kyushu-u.ac.jp

## 【基盤研究(S)】

### 理工系(工学II)



## 研究課題名 福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理 ・処分システム構築に向けた基盤研究

東京工業大学・原子炉工学研究所・教授

いけだ やすひさ  
池田 泰久

研究分野：総合工学、原子力学

キーワード：バックエンド

#### 【研究の背景・目的】

福島第一原子力発電所事故の復旧のためには、サイト内に大量に存在する高汚染固体・液体廃棄物を処理することが、緊急な課題であるが、これら放射性廃棄物は再処理プロセスから発生するものとは異なる性状であり、新たな科学的知見の取得と新概念に基づく処理・処分法の研究・開発が必要となる。

そこで、本研究では、福島原発事故で発生した汚染物の性状評価－除染処理－廃棄物の保管・管理－廃棄物の最終処分の各プロセス間の整合性、全体としての合理性を図った処理・処分システム開発のための基盤研究を実施する。

#### 【研究の方法】

上記の目的を達成するため、汚染物性状研究、汚染物処理研究、廃棄物処分研究の3分野に分け、相互に整合性を取りつつ進める。

##### 1.1 汚染物性状研究(固体)：

原子炉事故時の圧力容器内の燃料損傷に伴い、圧力容器内からサイト内へ燃料成分や核分裂生成物(FP)等が放出されたため、それらが付着した固体汚染物がある。そこで、これら固定汚染物の発生経緯を考慮して、所定の条件において、どのような汚染物を構成するか、模擬実験及びホット試験を行い、固体汚染物の性状を明らかにし、処理・処分研究に資する。

##### 1.2 汚染物性状研究(液体)：

事故初期に、核燃料冷却のために海水が原子炉内に注水されたことから、高温状態の核燃料に海水を含む冷却水が接触し、 $UO_2$ の酸化やその他核種の溶解反応や分散が進行したと考えられる。そこで、海水成分ならびに接触直後の水の温度上昇の溶存核種への影響を検討するため、Cs(I), Sr(II), 希土類(III), Pu(III,IV,VI), ヨウ素を検討対象とし、化学形態、溶解度等について検討し、汚染水の生成過程と化学状態を明らかにし、処理・処分研究に資する。

##### 2.1 汚染物処理研究(固体)：

高濃度に汚染された固体廃棄物には従来の除染技術が適用できないことが予想される。また、通常の核燃料サイクル工程のものとは異なる固体廃棄物(汚染水処理で発生するゼオライト等)も発生するが、ガラス固化法が合理的処理法の一つと考えられる。そこで、新規媒体(超臨界 $CO_2$ やイオン液体)を利用した除染法及び様々な廃棄物の効率的なガラス固化技術の開発のための基盤データを取得する。

##### 2.2 汚染物処理研究(液体)：

原子炉の安全な冷却及び処分の軽減の観点からは、汚染水中の放射性物質の除去・淡水化・再利用、汚染海水及び余剰の精製淡水の海への放流のための法定レベル以下までに高除染する技術が必要である。そこで、前者用ゼオライト(ZEO)の高機能化及びその処理法、後者用 Cs, Sr, T,  $\alpha$ 核種等の高除染吸着剤の開発とその処理法、事故時緊急用ヨウ素除染法を検討し、技術開発基盤を構築する。

##### 3. 処分研究：

汚染廃液処理によって発生した ZEO、汚染水との接触により汚染したコンクリートや金属構造物の減容処理固化された廃棄物(セメント固化体あるいはガラス固化体等)、それらの処理によって発生する二次廃棄物を処分する際に必要とされるデータを取得し、既存の処分形態を参考に、RIや放射能レベルを考慮した高濃度の塩を含む廃棄物の処分体系を構築する。

#### 【期待される成果と意義】

本研究の成果と意義として、次の事項が挙げられる。  
・原子炉過酷事故において発生する汚染物の性状に関する科学的知見の取得→新規汚染物処理法の創出  
・原発事故で発生する特殊廃棄物の体系的な処理・処分システムの基盤構築→世界へ向けての提示  
・今後検討される福島原発の廃炉技術の客観的評価に役立つ基盤データの提供

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ The Application of Novel Hydrophobic Ionic Liquids to the Extraction of Uranium(VI) from Nitric Medium and a Determination of the Uranyl Complexes Formed. T.J. Bell and Y. Ikeda, *Dalton Trans.*, **40**, 10125-10130 (2011).
- ・ Selective Uptake of Cesium Ions on AMP-loaded Silica Gels. Y. Endo, Y. Wu, H. Mimura, *et al.*, *J. Ion Exch.*, **18**, 300-305 (2007).

#### 【研究期間と研究経費】

平成 24 年度－27 年度  
156,300 千円

#### 【ホームページ等】

<http://www.nr.titech.ac.jp/~yikedada/yikedada@nr.titech.ac.jp>