

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 幾何学的モジュライ理論の深化と理論的応用

北海道大学・大学院理学研究院・名誉教授

なかむら いく
中村 郁

研究分野: 理工系・数物系科学・数学・代数学

キーワード: 代数幾何

【研究の背景・目的】

同種類の幾何学的対象は、一斉にいくつかのパラメーターを用いて表示されることが多い。このパラメーターの定める空間をモジュライ空間と呼ぶ。幾何学的対象のあらゆる変化の中でもっとも重要なのは、「自然で安定な」ものである。「自然で安定な」極限をすべて集めた空間をモジュライ空間のコンパクト化と呼ぶ。重要な点は、このコンパクト化に現れた対象以外には、その幾何学的対象の変化を考える必要が(殆ど)ない、ということである。モジュライ空間のコンパクト化を求めると、さまざまな理論的応用がある。本課題に関連した最近までの進展は以下のとおりである([]は関連文献を表す):

1. 中村[1][2]は非可換レベルつきアーベル多様体のモジュライ空間のコンパクト化を2つ構成し、Hilbert点の安定性との関連を明らかにした。
2. 寺尾[6]は経済統計学者 紙屋、竹村と、超平面配置の補集合を各個人の選好のモジュライ空間と同一視、優先順位付けモデルの個数の公式を与えた。
3. 小野 [3] は、『閉じたシンプレクティック多様体のハミルトン写像の不動点が全て非退化ならば、(不動点の個数の上限に関する)Betti 数版 Arnold 予想は正しい』ことを証明した。
4. 岩崎は[4]でパンルヴェ方程式のモジュライ論的定式化を与え、パンルヴェ VI 方程式のエントロピー、孤立周期点の個数の増大度、その解の解析接続に伴う力学系のカオス的構造を研究した。本研究の目的は、上に述べたモジュライ空間のコンパクト化の研究をさらに深化、異なる領域の理論に応用をはかることである。

【研究の方法】

- (1) 良い素点でのアーベル多様体のモジュライ空間のコンパクト化を詳しく記述する。(退化)アーベル多様体の自然な定義方程式を書き下し、その係数として主要な Siegel 保型形式を構成する。悪い素点までアーベル多様体のモジュライ空間のコンパクト化を拡張する。そのために、モジュラー曲線に関する Katz-Mazur 理論 [5] を Dieudonné 理論を用いて高次元に一般化する。
- (2) 超平面配置の代数的な研究を通して、超幾何級数、超平面配置の補空間や原始積分の理論の深化を目指す。超平面配置(代数学)を(社会科学者との研究交流により)社会科学に応用する。
- (3) ラグランジュ・フレア理論(微分幾何学)とポテンシャル関数の変形理論の間のミラー対称性、ないし、ギベンタールのミラー対称性理論(代数幾

何学、物理学)の間の関係を明らかにする。

(4) モジュライ空間のコンパクト化(代数幾何学)を用いて、他のパンルヴェ型の方程式(微分方程式)のエントロピー、孤立周期点、解の解析接続に伴う力学系のカオス的構造、ランダム・モノドロミーを決定する。

【期待される成果と意義】

- (1)では、モジュライ関数は表現可能なので、原理的には、主要な Siegel 保型形式はすべて現れる。これにより、合同部分群 $\Gamma(N)$ の主要な Siegel 保型形式を表現付きで、すべて求めることのできる可能性がある。(1)の Katz-Mazur 理論の高次元化は長年の未解決問題である。悪い素点での振る舞いが、Heisenberg 群の表現論を通して正確に記述できる可能性がある。(2)の発展は代数学の社会科学への応用と言う点で注目に値する。(3)によるミラー対称性の研究、(4)のパンルヴェ方程式の代数幾何学的研究は新しい方向であり、国際的に評価が高い。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] I.Nakamura, Stability of degenerate abelian varieties, Inv. math., vol. 136, 659-715 (1999).
- [2] I. Nakamura, Another canonical compactification of the moduli space of abelian varieties, ASPM of MSJ., vol. 58, pp. 69-135, (2010).
- [3] K.Fukaya, K.Ono, Arnold conjecture and Gromov-Witten inv., Topology, vol. 38 (1999).
- [4] M.Inaba, K.Iwasaki, M.-H.Saito, Moduli of stable parabolic connections, ..., geometry of Painleve equation of type VI, part I, Publ. Res. Inst. Math. Sci., vol. 42, 987-1089 (2006).
- [5] N.M.Katz and B.Mazur, Arithmetic moduli of elliptic curves, Princeton (1985).
- [6] H. Kamiya, A. Takemura, H. Terao, Periodicity of hyperplane arrangements ..., J. Alg. Comb., vol. 27, 317-330 (2008).

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
139,300千円

【ホームページ等】

<http://www.math.sci.hokudai.ac.jp/~nakamura/>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 ホモロジー的ミラー対称性の証明

京都大学・大学院理学研究科・教授 ふかや けんじ
深谷 賢治

研究分野: 数学

キーワード: 微分幾何学, 位相幾何学, 複素多様体, 代数幾何学

【研究の背景・目的】

ミラー対称性予想は、1990年代に物理学者によって提出された予想である。数学者の間でそれが有名になったのは、Calabi-Yau 多様体の有理曲線の数が定める母関数が、そのミラーと呼ばれる Calabi-Yau 多様体の複素構造の変形理論から決まる微分方程式を満たすという予想 (Candelas たちによる) によってである。

この予想そのものは Givental らにより多くの場合に証明され、古典的ミラー対称性と呼ばれる。

1994年に M.Kontsevitch が提出したホモロジー的ミラー対称性予想はそれを深めるもので、シンプレクティック多様体のフレアーホモロジーによって定まる圏 (深谷圏) とそのミラーである複素多様体の接続層の導来圏の圏同形を予想する。

この予想は 2009年に深谷らがラグランジュ部分多様体のフレアーホモロジーの一般的に定義を完成したことにより、数学的な定式化が完成した。

この研究では、ホモロジー的ミラー対称性予想の証明を目指したい。

【研究の方法】

ホモロジー的ミラー対称性の証明のアイデアとして、族のフレアーホモロジーを用いる方法と、トーリック多様体のミラー対称性を先に示し、その部分多様体同士のミラーに進む方法が知られている。前者は Strominger-Yau-Zaslow のアイデア、すなわち、ミラー多様体をトラスファイバー空間のファイバーごとの双対として実現するやり方とも深い関係を持つ。族のフレアーホモロジーを用いるホモロジー的ミラー対称性の証明のアイデアは 1997年頃 M.Kontsevitch と深谷によって提案されたもので実現に向けて研究を進める段階になってきている。

後者は、Givental が古典ミラー対称性を示すときに用いたものともいえ、Hori-Vafa がミラー対称性の (物理的) 証明として提示したのもこのアイデアである。深谷・Oh・太田・小野は、トーリック多様体のラグランジュ部分多様体のフレアーホモロジーの研究を押し進めており、その場合には、ホモロジー的ミラー対称性の証明を含めて、ミラー対称性で重要なフレアーホモロジーについて、多くの結果を出した。これをさらに発展させることで、この方法による証明にも進んでいきたい。

【期待される成果と意義】

ホモロジー的ミラー対称性の証明はシンプレクティック幾何学にも下記のような応用があると考えられる。擬正則曲線の理論は大域シンプレクティック幾何学において中心的方法である。この方法により、グロモフ-ウィッテン不変量やフレアーホモロジーなどの重要な不変量が得られ、それらの研究が大域シンプレクティック幾何学の中心的な諸問題になっている。

擬正則曲線の理論から得られる不変量を研究する上で一番難しい点は、計算である。擬正則曲線の理論の中心をなすモジュライ空間は、非線形方程式の解のなす空間である。不変量を定義に従って計算するには、このような解空間を決定する必要がある。勿論、これは一般には、困難である。ホモロジー的ミラー対称性予想は、このような困難な不変量を複素幾何学にうつって計算する道を開く。

むろんこの予想の証明は、元来の由来であるミラー対称性や弦理論の理解にも役立つと考えられる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

K. Fukaya, Y.-G. Oh, H. Ohta and K. Ono, Lagrangian intersection Floer theory-anomaly and obstruction, } International Press/Amer. Math. Soc. (2009).

K. Fukaya, Y.-G. Oh, H. Ohta and K. Ono, Lagrangian Floer theory on compact toric manifolds I, Duke Math. J. 151 (2010), 23-174. ibid II Selecta Math. New Ser. (2011) 17:609-711

Cyclic symmetry and adic convergence in Lagrangian Floer theory, Kyoto J. Math. 50 (2010) 521-590

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
81,600千円

【ホームページ等】

<http://www.math.kyoto-u.ac.jp/~fukaya/>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 非線形発展方程式の凝縮現象と解の構造

京都大学・大学院理学研究科・教授 つつみ よしお
堤 誉志雄

研究分野: 数物系科学, 数学, 基礎解析学

キーワード: 関数方程式

【研究の背景・目的】

非線形発展方程式に対し解の性質を調べる際、最も重要なことのひとつは、“凝縮現象”とよばれる広い意味での特異性を特徴付けることである。この広い意味での特異性というのは、通常用いられるような、解の滑らかではない部分という意味ではなく、解が持つと期待される性質を阻害する可能性がある解の性質のことを意味する。たとえば、べき乗タイプの非線形項を持つ非線形クライン・ゴールドン方程式や非線形シュレディンガー方程式の非線形散乱問題(すなわち、時刻無限大の近傍で非線形方程式の解が、線形の摂動を受けていない自由解に漸近するかという問題)をエネルギークラスで考えると、方程式やエネルギーは時空間変数についての平行移動や反転に関して不変なため、時間が十分たっても、ある特定の空間領域にエネルギーが局在化し続ける(言い換えると、ソリトン解のように、空間的にエネルギーが局在化した解が存在する)可能性が生じる。従って、このような解の凝縮・集約現象を排除することができれば、非線形散乱理論が構築されることになる。非線形発展方程式において、広い意味での特異性は解の何らかの量(たとえば、 p 乗積分ノルムなど)が局所的に凝縮・集約することにより発生することが多い。本研究では、非線形波動・分散型方程式および反応拡散系方程式や非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を研究対象とし、解の凝縮現象によって代表される広い意味での特異性生成メカニズムを、調和解析的手法(フーリエ制限法や I-method など)を用いて数学的に研究するとともに、それらの凝縮現象を数値シミュレーションによって捉えることを試みる。

【研究の方法】

凝縮現象は様々な解析学的分野において現れる、きわめて興味深い現象であり、理論的解析と数値計算による解析の双方の研究が重要である。その観点から、理論的には近年発展の著しい非線形波動・分散型方程式研究を通して開発された、フーリエ制限法、I-method および最小爆発解の議論を用いて凝縮現象を解析するとともに、これらの方法の改良と新しい研究方法の開発を目指す。また、数値計算の立場からは、精度保証付き数値計算によって、どこまで解の特異性を再現できるかを調べる。そのためには、無限大を含む関数の精度保証理論を研究する必要がある。また、数学理論は非常に抽象的なものを研究対象とするので、研究

者どうしが直接会ってディスカッションを重ねることはきわめて重要である。そのため、研究者の派遣・招へいおよび研究集会の開催などを進める。さらに、若い研究者を本研究に参加させるため、研究支援者雇用を行う。

【期待される成果と意義】

フーリエ制限法は時間局所的に精密な評価式を得るのに有効であり、I-method は弱解の時間大域的な評価式を得るために開発された。最近提唱された最小爆発解論法は、解の漸近挙動を分類するのに有効な理論である。これら3つの方法を融合することを目指し、凝縮現象を数学的に統一的に扱う理論あるいはその基礎付けが得られるものと期待される。従って、弱解の大域存在理論や非線形散乱理論の分野において、この研究の意義は非常に高い。また、数値計算の立場から凝縮現象をどのように捉えるか、という問題も重要である。この研究を通して、凝縮現象が再現可能な数値計算スキームの開発・研究の進展が期待される。特に、精度保証付き数値計算により無限を捕まえることができれば他分野への応用も期待され、その意義はきわめて大きいであろう。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Nakanishi, H. Takaoka and Y. Tsutsumi, Local well-posedness in low regularity of the mKdV equation with periodic boundary condition, *Discrete Contin. Dyn. Syst.*, 28(2010), 1635-1654.
- ・ J. Ginibre, Y. Tsutsumi and G. Velo, On the Cauchy problem for the Zakharov system, *J. Funct. Anal.*, 151(1997), 384-436.

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
57,700千円

【ホームページ等】

ホームページなし

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 宇宙初代星誕生から銀河系形成期における恒星進化と物質循環

自然科学研究機構国立天文台・光赤外研究部・助教

あおき わこう
青木 和光

研究分野：天文学

キーワード：光学赤外線天文学、理論天文学

【研究の背景・目的】

約137億年前に起こったビッグバン以降、宇宙では星や銀河などの構造がつけられるとともに、多様な元素が生まれ出されてきました。この歴史を理解する上で重要なポイントと考えられているのが、ビッグバン後数億年で誕生してきた宇宙の初代星たちです。当初、水素とヘリウムだけしか含まないガス雲から誕生してきた初代星には、太陽よりもはるかに質量の大きな星が多かったとみられており、それらは超新星爆発により多量の重元素を宇宙空間に放出したと考えられています。

放出された重元素はダスト(細かな固体粒子)を形成し、それを含むガス雲からは次世代の星が生まれてきます。その中には太陽程度の質量の小さな星も多数含まれていました。小質量星の寿命は長いので、なかには約130億年を経た現在でも生き残っているものがあります。

この段階の星は、太陽に比べればまだ重元素の含有量が少ないのが特徴で、分光観測によって星の組成を測定してみれば見分けることが可能です。「銀河系とその周辺に生き残っている古い星」を詳しく調べることで、初期の宇宙における星形成と進化・超新星爆発、その後の物質循環、さらには星の集団としての小さな銀河たちの形成史をさぐるのが本研究の目的です。

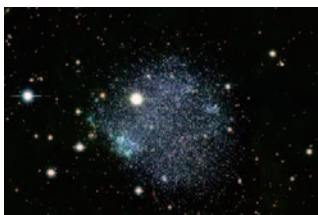
【研究の方法】

私たちは、国立天文台すばる望遠鏡の分光器を用いて、銀河系内の古い星の探索とその組成測定を推進してきました。これを発展させるとともに、銀河系周辺の小さな銀河(矮小銀河)の星の観測を進めます。観測効率を大幅にあげるために、複数の天体を同時に測定できるように分光器の機能向上を行います。

矮小銀河ろくぶんぎ座A

(すばる望遠鏡撮影)

宇宙の初期にはこのような小さな銀河が多数形成されたと考えられている。



すばる望遠鏡



観測結果から初代星の進化や銀河系形成について情報を引き出すために、過去の観測結果と合わせてデータベースを構築するとともに、超新星爆発と放出される物質からつくられるダスト、それを材料にした小質量星の形成および矮小銀河の形成についての理論研究を推進します。

【期待される成果と意義】

銀河系周辺の矮小銀河の星の研究は近年、少しずつ進みましたが、その結果、似たように見える銀河の化学組成にも意外と個性があることがわかってきています。矮小銀河の星の観測を本格化し、その多様性および銀河系の星との類似性・相違を明らかにしていきます。これにより、初代星として生まれた大質量星がどのような天体で、どのような爆発を起こしたのか解明するとともに、銀河系形成史のなかで小質量星がどのように生まれ進化し、現在観測されるにいたっているのか明らかにするのが目標です。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

“Nucleosynthesis signatures of the first stars”
Frebel, A., Aoki, W., (ほか), 2005年, Nature 434, 434, 871-873

(銀河系内でこれまで見つかった最も重元素量の低い星を発見し、化学組成を解明した。)

“The first chemical enrichment in the universe and the formation of hyper metal-poor stars”
Iwamoto, N., Umede, N., Tominaga, N., Nomoto, K. Maeda, K., 2005年, Science 309, 451

(上記天体にみられた特異な化学組成の説明として、初代の極超新星による元素合成を提案した)

“Formation and evolution of dust in type IIb supernovae with application to the Cassiopea A supernova remnant”
Nozawa, T., Kozasa, T. Tominaga, N.他, 2010年, Astroph. J., 713, 356
(超新星爆発後のダスト形成の理論的研究)

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
90,500千円

【ホームページ等】

<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/~waoki/>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 広視野多天体分光・面分光で探る銀河形態の起源

自然科学研究機構国立天文台・光赤外研究部・教授

ありもと のぶお
有本 信雄

研究分野：天文学

キーワード：光赤外線天文学, 銀河天文学

【研究の背景・目的】

近赤外線では、遠方銀河の赤方偏移した可視光を観測することができる。すばる望遠鏡の主力装置である近赤外線広視野カメラ・多天体分光器(MOIRCS, モアクス)による遠方銀河の観測によって、赤方偏移が2-3の時代の銀河形成の様子が垣間見えてきたが、それらがその後いかに進化し、現在の多様だが秩序ある形態の銀河へと至ったか、という根源的な問題については未だ確固たる答えは得られていない。銀河の形態が分岐し秩序だった状態を確立する過程を理解するためには、銀河内部のガス運動(回転およびランダム運動)や、銀河中心部(バルジ)、円盤部、ハロー部といった領域ごとの星生成史の違いを調べることが必要である。

本研究では、先端的な技術の利用によって独自のサイエンスを目指す。すなわち、MOIRCSに面分光ユニットを新設し、さらに、検出器の交換による感度の向上をはかり、面分光による内部構造を分解した分光観測と、多天体分光による系統的な星形成量、金属量探査を徹底的に行い、銀河進化の研究、特に星形成銀河から楕円銀河へと至る銀河形態の発現過程に迫る研究を展開する。

【研究の方法】

① 面分光で探る銀河形態進化の起源
赤方偏移0.5-1.5付近の星形成銀河における内部構造を探査する。この時代に、それまで活発であった宇宙全体での星形成活動が徐々に収束し、同時に現在の宇宙で見られるような渦状銀河、楕円銀河などの形態が発現してきたと考えられる。本研究では、この間の複数の時代の銀河について面分光観測を行うことで、内部のガス運動の様子、力学的な質量と星形成の関係、ガス運動と銀河形態の関係を調べ、現在およびより過去の時代の銀河と比較し、時代をつなげることで進化過程を明らかにする。

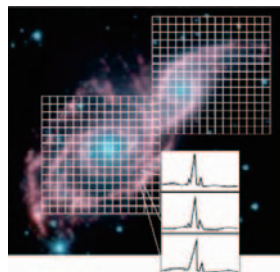


図1 合体銀河の面分光観測

② 多天体分光で迫る星形成と銀河形態進化
赤方偏移0.5-1.5の星形成銀河の金属量測定を行

う。銀河の金属量は、銀河が経験した星形成の記録を残した「化石」である。近赤外線分光により金属量を調べることで、星形成史と形態の関係に注目し、サンプル数を飛躍的に増やして、現在の銀河につながる銀河の進化パスを描き出す。

【期待される成果と意義】

赤方偏移2-3付近の時代個々の銀河の星形成活動はピークを迎え、その後、星形成活動は徐々に下降し、同時に銀河の形態が発現してきたと考えられる。このような活動性の変化、形態の出現は何によって引き起こされたのか?赤方偏移2-3の時代と現在とをつなぐ、「ミッシングリンクの時代」の銀河を系統的に調べ上げることによって、この銀河進化の本質的な問いに答えることができよう。

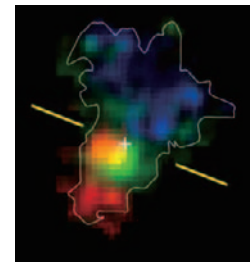


図2 回転する巨大なガス状円盤銀河(z=2.4)

次世代超大型地上望遠鏡では、すばる望遠鏡で見えない、さらに遠方の銀河の面分光を行い、銀河の形成過程の始原を探ることになる。面分光機能は超大型望遠鏡では必須の観測技術であり、本研究はその技術開発に貢献する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

Onodera, M., Daddi, E., Gobat, R., Cappellari, M., Arimoto, N. et al. "A $z=1.82$ Analog of Local Ultra-Massive Elliptical Galaxies", *ApJ* 715, L6-L11, 2010

Onodera, M., Arimoto, N., Daddi, E., Renzini, A., Kong, X. et al. "A Wide Area Survey for High-Redshift Massive Galaxies. II. Near-Infrared Spectroscopy of BzK-Selected Massive Star-Forming Galaxies", *ApJ* 715, 385-405, 2010

【研究期間と研究経費】

平成23年度-26年度
165,600千円

【ホームページ等】

<http://www.naoj.org/Projects/newdev/nm/>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 エマルションによる大統計ダブルハイパー核生成実験

岐阜大学・教育学部・教授

なかざわ かずま
仲澤 和馬

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】

原子核物理学における緊急かつ最重要課題の一つは、ストレンジネスまで含めたバリオン間相互作用の解明です。

陽子と中性子とで記述される核力については50年以上に及ぶ詳細な研究から多くの知見が得られてきました。そしてハイペロン-核子間相互作用については、最近10年間の γ 線分光により、理解が急速に進んでいます。次なる課題は、ハイペロン-ハイペロン相互作用の解明です。

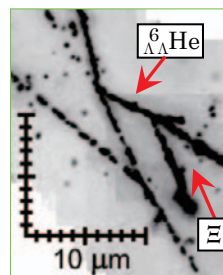
この解明の唯一無二の手段は、二つのハイペロンを原子核に注入したダブルハイパー核を数多く生成して発見しそれらの構造を研究することです。ダブルハイパー核生成の最強の方法は、私どもが開発してきた原子核乾板を用いたエマルション実験です。私どもはこれまでの20年間で、8例のダブルハイパー核を発見してきました。なかでも1例(Nagara event)は、ヘリウムと二つのラムダ粒子で構成された新種の原子核(${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$)であると確定し、結合エネルギーの導出に成功しました。しかしハイペロン間の相互作用を、核の構造から生じる不定性を除いて決定するには、さらにいくつかのダブルハイパー核の質量を測定しなければなりません。

そこで、東海村に建設されたJ-PARCの良質で高強度の素粒子ビームを用いてダブルハイパー核を生成し、従来の100倍をも超える発見が可能なエマルション実験(E07)を実施します。この結果をもとに、理論家との密接な協力により、ストレンジネスをも含めたハドロン間相互作用の解明を、世界に先駆けて達成することを目指します。

【研究の方法】

従来の4倍近く高純度なJ-PARCのK-粒子ビームを、先の実験(KEK-E373)の3倍量の原子核乾板に照射します。照射の際には、ストレンジクォークを二つもつグザイ(Ξ)粒子が作られたという情報を、電気的信号で知らせる検出器で乾板を覆います。特に、乾板の上流側に配置するゲルマニウム検出器は、 Ξ 粒子が原子核に吸収される際に発するエックス線を捉えることができます。 Ξ 粒子の吸収は乾板中で確認できるので、無関係な反応によるエックス線をデータから取り除くことができ、世界で初めて Ξ 粒子と核子との相互作用の情報が得られると期待しています。そして約1万個の Ξ 粒子の吸収点を注意深く観察して、まず従来の100倍のダブルハイパー核を検出します。この電気信号利用の手法を複合実験法とよびます。

さて複合実験法では、電気的な信号に頼りますので、生成された Ξ 粒子の1割程度しか捉えられません。右図のNagara eventに見られるように、ダブルハイパー核の崩壊では三つの分岐点を持つ特徴があります。このような特徴的な事象を、乾板中で高速に全面的に探査して、前記複合実験法のさらに10倍のダブルハイパー核を発見します。この手法を全面スキャン法といい、従来の100倍のダブルハイパー核の検出が可能になりました。



発見したダブルハイパー核では、電荷を帯びた娘粒子の乾板中での散乱と電離損失の測定により、質量を求めます。さまざまなダブルハイパー核で質量を計測し、二つのハイペロンの結合エネルギー(いわゆる質量欠損)をもとに、ハイペロン間の相互作用を解明します。

【期待される成果と意義】

ハイペロン間相互作用の情報により、核力をストレンジ量子数をも含めたSU(3)に拡張したバリオン間相互作用の統一的な理解が可能となります。また新種のダブルハイパー核の発見が期待されるばかりでなく、3つのハイペロンを含むトリプルハイパー核や、チャームクォークを含むチャーム核などの生成・検出実験へと、新しい核物理を切り開く足がかりがもたらされます。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. "Observation of a ${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$ Double Hypernucleus". H.Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. Vol.87, 212502 (2001)
2. "Experimental Study of Double- Λ Hypernuclei with Nuclear Emulsion". K.Nakazawa and H.Takahashi, Prog. Theor. Phys. Suppl. 185, 335-343 (2010)

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
151,600千円

【ホームページ等】

<http://www.phys.ed.gifu-u.ac.jp/index.htm>

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 中性 K 中間子の稀崩壊で探る標準理論を超える新しい物理

大阪大学・大学院理学研究科・教授 やまなか たく
山中 卓

研究分野：数物系科学・物理学

キーワード：素粒子 (実験)、中性 K 中間子、CP 対称性の破れ

【研究の背景・目的】

宇宙が始まったとき、宇宙には粒子と反粒子が同じ数だけあったが、反粒子は現在ほとんど残っていない。これは、粒子と反粒子がわずかに異なる挙動をするからである。これを CP 対称性の破れと言う。実験室では CP 対称性の破れは K 中間子や B 中間子で発見され、小林・益川によって理論的に説明された。しかし、現在の素粒子の標準理論ではまだ CP 対称性の効果が小さく、宇宙から反粒子が消えたことを説明できない。したがって、宇宙の粒子・反粒子のアンバランスは、標準

Big Bang直後

同数の
粒子と反粒子

宇宙の初期に

粒子と反粒子の対称性の破れ



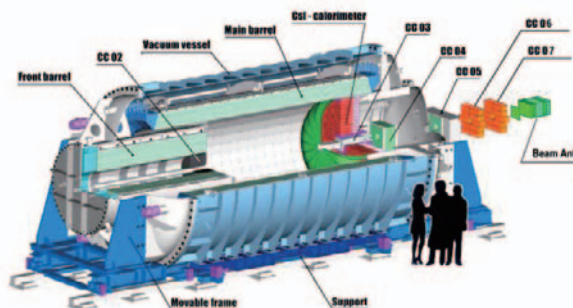
理論を超える新しい物理による CP 対称性の破れが生んだはずである。

よって、CP 対称性を破る、標準理論を超えた新しい物理を探るのが本研究の目的である。

【研究の方法】

CP 対称性を破る新しい物理の現象を探るために、中性の K 中間子が中性の π^0 中間子とニュートリノ対に壊れる崩壊を用いる。標準理論によればこの崩壊の分岐比は 3×10^{-11} と低く、その理論的不確定性も 2~3% と小さい。しかし、超対称粒子や第 4 世代のクォークなど、新しい物理による粒子がこの崩壊に寄与すると、崩壊分岐比が大幅に大きくなる可能性がある。したがって、この稀な中性 K 中間子の崩壊を、標準理論で予測しているレベルまで探索し、その分岐比を測定する。

稀な崩壊を観測するために、茨城県東海村にある J-PARC 大強度陽子加速器で加速された陽子を標的に当て、大量の K 中間子のビームを作る。目的とする崩壊の特徴は、中性の π^0 中間子が壊れてできる 2 つのガンマ線だけが観測されることである。その他の崩壊は、荷電粒子か 4 個以上のガン



マ線を含む。従って、上図のように K 中間子が崩壊する領域の下流に電磁カロリメータを設置し、2 個のガンマ線のエネルギーと当たった位置を測る。また崩壊領域全域を荷電粒子とガンマ線検出器を覆い、余分な粒子を出す他の崩壊を排除する。

【期待される成果と意義】

標準理論が予測する分岐比よりも有為に大きな分岐比が測定された場合は、新しい物理の存在を示し、その効果の大きさを決めることができる。また崩壊が発見されなかった場合も、新しい理論のモデルやパラメータに対して制限を与えることができる。さらに、現在建設中のヨーロッパの CERN 研究所の荷電 K⁺ 中間子の実験や、つくばの KEK の B 中間子実験の結果と合わせれば、さらに強い制限を与えることができる。また、CERN の陽子・陽子衝突型 LHC 加速器によって超対称粒子が発見された場合も、超対称粒子のフレーバーの構造について知見を与えることができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. “Experimental Study of the Decay $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ”, J.K. Ahn *et al.*, Phys. Rev. D **81**, 072004 (2010).
2. “Testing the CKM Model with Kaon Experiments”, E. Blucher, B. Winstein and T. Yamanaka, Prog. Theo. Phys. **122**, 81 (2009).

【研究期間と研究経費】

平成 23 年度 - 27 年度
171,500 千円

【ホームページ等】

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

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 核構造におけるテンソル力と隠された相互作用の研究

大阪大学・核物理研究センター・教授 谷畑 勇夫

たにはた いさお

谷畑 勇夫

研究分野：原子核物理学

キーワード：原子核理論、原子核実験、核構造、テンソル力、パイオン、中性子過剰核

【研究の背景・目的】

不安定核ビームの開拓により中性子ハローや中性子スキンの発見など原子核の基本的な性質である密度分布の常識が覆され、構造の変化による核励起（例えばソフトな励起の）や反応過程ダイナミクスの変化も見出されてきた。そのような不安定核の研究の進展にともない、最近まで不動のものと考えられてきた魔法数が、中性子過剰核では、大きく変化することが発見された[1]。

魔法数の変化は、これまで隠されていた相互作用が現われ殻構造を変化させているという、新しい視点を生み出した。中性子過剰核での魔法数 8, 20 の消滅と 16 の出現は、価陽子と価中性子数のしめる軌道が大きく違うので、テンソル力の効果が現れたとの見方での説明が可能である[2]。しかしながら、元々核力の中で原子核の引力エネルギーの半分程度もあるテンソル力を摂動として取り扱うだけで良いのか、大きな疑問が生まれる。実際そのような理論的取り組みが始まっており、パイオンを含めた平均場模型やテンソル力をはじめから陽に含めた新しい殻模型の構築が始まっている[3]。テンソル力が引き起こす物理を明白な形で理解することが核物理の基礎として必要とされるようになった。

【研究の方法】

湯川が導入したパイ中間子は原子核の形成に重要な役割を果たすことは知られているが、その擬スカラー粒子の性質から生じる強いテンソル力は平均場的取り扱いはできず、その難しさからこれまではほとんど議論されてこなかった。これまで核構造模型に本格的に取り入れられてこなかったテンソル力について、その重要性和核構造への影響を実験・理論の両面から総合的な視点で解明する。陽子・中性子が大きくバランスを欠いた核の構造から、テンソル力の物理を研究するとともに、ほかにも隠されているかもしれない核子間相互作用を探る。実験手法としては核子あたり 20 MeV 付近と数百 MeV 以上の安定核や中性子過剰核での核子移行反応との測定が中心である。

本計画では三つの観点から以下の様な実験的・理論的研究を総合的に行う。

実験 1. 核内核子の運動量分布の 300-400 MeV/c 付近での振る舞いの測定、[4]

実験 2. 中性子過剰核特に質量数が小さく第一原理計算が可能か、将来可能となると期待される核の核子移行反応の測定、

理論 3. 理論面でこれらの実験結果をテンソル力の効果として計算し、定量的な比較を行う。中重核での定量的記述を可能にしマジック数の本質的な物理を理論的に引き出す。[5]

【期待される成果と意義】

テンソル力の寄与を確立し、それを陽に含んだ核構造理論を構築する。そのような理論は安定核から離れた原子核の構造や性質に対してこれまでにない予言力を持つことが期待される。

そのような構造理論を持ったときには現在の実験的手法では直接研究が不可能な R-過程の原子核などの正確な予言が出来、元素合成の理解に対しても大きな寄与が出来る。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

[1] “New Magic Number $N=16$, near the Neutron Drip Line”, A. Ozawa, T. Kobayashi, K. Suzuki, K. Yoshida, I. Tanihata, Phys. Rev. Letters 84 (2000) 5493.

[2] “Evolution of Nuclear Shells due to the Tensor Force”, T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, H. Grawe, and Y. Akaishi Phys. Rev. Letters, 95 (2005) 232502.

[3] “Tensor Correlation in He isotopes”, T. Myo, K. Kato, H. Toki, and K. Ikeda, J. Phys. G: Nucle. And Part. Phys. 31 (2005) s1681. “Tensor-optimized shell model with bare nucleon-nucleon interaction for He-4”, T. Myo, H. Toki, and K. Ikeda, Progr. Theor. Phys. 121 (2009) 511.

[4] “Searching for effects of tensor forces in nuclei”, Modern Physics Letters A 25 (2010) 1886.

[5] “Extended relativistic chiral mean field model for finite nuclei”, Y. Ogawa, H. Toki, S. Tamenaga, and A. Haga, Progr. Theor. Phys. 122 (2009) 477.

【研究期間と研究経費】

平成 23 年度 - 27 年度
161,400 千円

【ホームページ等】

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/cnp/>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 超強磁場中性子・XMCD による量子磁気偏極相の解明

のじり ひろゆき
野尻 浩之
東北大学・金属材料研究所・教授

研究分野：物理学、磁性

キーワード：X線・粒子線、超強磁場、量子相転移

【研究の背景・目的】

物質には、磁場や温度等の外部環境により、多様な状態が導かれる性質がある。このような状態のことを相とよび、その相間の移り変わりを相転移という。物質に新しい性質や機能を持たせるためには、相の起源を統一的に理解することが大切である。相転移においては、入れ替わる2つの相が互いにせめぎ合いにより、状態が定まらないゆらぎという現象がつきものである。ゆらぎには熱エネルギーによるゆらぎと物質の2重性による量子ゆらぎがある。量子ゆらぎが支配する相転移を量子相転移とよび、そこでは常識では予想できない新しい相が見出される。

量子相転移を研究するとき、熱によるゆらぎは、いつも本質的な現象をぼやけさせる。我々は、超低温と超強磁場を組み合わせ、熱ゆらぎを押さえたクリーンな環境での研究を目指している。それに加えて、物質の性質を原子レベルでずばりと知ることの出来る中性子線やX線を探針として用いる。残念ながら、超低温と超強磁場と中性子・X線を組み合わせた実験はウルトラEの難しさで、これまで実現してこなかった。しかし、つい最近、我々はこれらの実験で強磁場の世界記録を樹立して、その可能性を示した。この成功を受けて、量子ゆらぎによる非日常的な磁気状態を原子レベルで理解し、それにより、物質の多様性の起源を探るのがこの研究の目的である。

【研究の方法】

我々が作ろうとしている強磁場は地磁気の100万倍に近い50テスラという超強磁場である。このために、コンデンサに電気をたくさん貯めて、一気に10キロアンペアもの大電流を流して強い磁場を作るパルス磁場方式を用いる。その際に、我々の秘訣として、装置の小型化がある。写真のように手のひらに載るような超小型の磁石を利用すれば、強い磁場を小さな空間で、場所を選ばずに発生できる。持ち運びに便利なので、海外にも簡単に持って行くことが出来、アメリカやフランスの研究所でも盛んに利用されている。

測定では、X線を用いた分光が1つの柱である。X線は元素によって異なる吸収エネルギーを持っているので、放射光という大型施設を用いてエネルギーを変えながら測定すると、ある原子だけの信号を取り出すことが出来る。例えば、幾つかの

元素からなる合金において、どの元素が大きな磁気を出しているのか、全体の平均の磁気の強さだけでは決してわからない決定的な情報が得られる。

一方、中性子は小さな磁石の性質をもっている。物質にあてると、内部の磁気の並び方が原子レベルで決定できる。このような強力な探針と強磁場環境を用いると、いままでもややとしていた、量子相転移がすっきりとわかると期待される。

【期待される成果と意義】

このような実験が進めば、物質の多様性の起源が明らかに出来るとともに、そこから多くの有用な物質への展開が開かれる。磁気と誘電を併せ持つ物質や、方向により異なる状態が共存する磁石、省資源の磁石など、物質科学に新しいブレークスルーがもたらされ、我々の世界と知識を豊かにしてくれると期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- (1) H. Nojiri *et al.* Neutron Laue Diffraction Study on the Magnetic Phase Diagram of Multiferroic MnWO_4 under Pulsed High Magnetic Fields, *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 237202.
- (2) T. Nakamura, Y. Narumi *et al.*, Soft X-ray Magnetic Circular Dichroism of a CoFe/MnIr Exchange Bias Film under Pulsed High Magnetic Field, *Applied Physics Express* **4** (2011) 066602.



図1 直径3 cmの小型コイル

【研究期間と研究経費】

平成23年度－27年度
163,000千円

【ホームページ等】

<http://www.hfpm.imr.tohoku.ac.jp/>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 超高分解能3次元スピン分解光電子分光による新機能物質の基盤電子状態解析

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授 たかはし たかし
高橋 隆

研究分野: 数物系科学

キーワード: 強相関係、スピントロニクス、光電子分光、トポロジカル絶縁体、表面

【研究の背景・目的】

近年、トポロジカル絶縁体や巨大磁気抵抗物質などの新機能性物質が次々と発見され、その物性やデバイス応用に向けての研究が加速的に進展している。これらの物性発現機構の完全解明には、スピンに依存した電子状態の決定が不可欠であるが、スピン検出の困難さのため、そのような研究は殆ど行われていない。本研究は、超高分解能スピン分解光電子分光法を用いて、物質内の特異な電子スピン状態に由来する量子伝導現象が、物性に密接に関与するスピントロニクス関連新機能性物質におけるフェルミ準位近傍の基盤電子構造を解明し、特異物性発現機構との関連を明らかにするものである。

【研究の方法】

新機能性物質における微細電子構造を解明するために、世界最高のエネルギー、運動量、およびスピン分解能を持つ「3次元スピン分解超高分解能光電子分光装置」の建設と改良を行う。建設した装置を用いて、スピントロニクス関連新機能性物質、具体的には、トポロジカル絶縁体、ラッシュバ金属、巨大磁気抵抗物質、ハーフメタルなどのスピン分解 ARPES を行い、フェルミ面、バンド分散、スピン偏極率とスピンベクトル、および準粒子のダイナミクスを、バルク・表面・界面に分離して高精度で決定することで、物性の起源となる基盤電子構造を明らかにする。

【期待される成果と意義】

- (1) トポロジカル絶縁体の候補物質について、その構造/組成/ドーピングなどを制御して系統的な高分解能 ARPES 測定を行い、新型の非自明トポロジカル絶縁体の物質探索を行う。
- (2) スピン分解 ARPES により、トポロジカル絶縁体のスピン偏極度とスピンベクトルを、表面バンドのあらゆる波数で測定する。フェルミ面の warping の度合いと z 成分のスピン偏極度との関係を調べ、スピントロニクスで重要となる、スピン偏極ベクトルの決定因子を明らかにする。
- (3) Bi 超薄膜を作成してスピン分解 ARPES を行い、膜厚の薄い極限で理論予測されているトポロジカ

ル相と実験的に決定した電子構造との比較を行う。Bi を中心に Pb、Tl、Au 等の重元素の薄膜や量子細線を半導体表面上に作成し電子状態を精密決定して、巨大なラッシュバ分裂を持つ物質を探索する。(4) 主に遷移金属酸化物を中心として、巨大磁気抵抗物質やハーフメタル物質を、パルスレーザー堆積(PLD)法を用いて作成し、その電子状態をバルクのものと比較する。さらに人工ヘテロ構造を作成し、そのスピン分解光電子分光を行うことで、界面磁性、界面伝導と電子状態との関係を明らかにする。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] T. Sato et al., Direct Evidence for the Dirac-cone Topological Surface States in the Ternary Chalcogenide $TlBiSe_2$, Phys. Rev. Lett. **105**, 136802-1-4 (2010).
- [2] S. Souma et al., Direct Measurement of the Out-of-Plane Spin Texture in the Dirac Cone Surface State of a Topological Insulator, Phys. Rev. Lett. **106**, 021680-1-4 (2011).
- [3] A. Takayama et al., Giant Out-of-Plane Spin Component and the Asymmetry of Spin-Polarization in Surface Rashba States of Bismuth Thin Film, Phys. Rev. Lett. **106**, 166401-1-4 (2011).

【研究期間と研究経費】

平成23年度—26年度
162,300千円

【ホームページ等】

<http://arpes.phys.tohoku.ac.jp/>

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 波動粒子相互作用直接観測システムの開発による 相対論的電子加速機構の研究

おの たかゆき
東北大学・大学院理学研究科・教授 小野 高幸

研究分野：地球惑星科学

キーワード：太陽地球システム・放射線帯・粒子加速・宇宙天気

【研究の背景・目的】

地球のまわりの宇宙空間(ジオスペース)には、放射線帯(ヴァンアレン帯)と呼ばれる MeV を超えるエネルギーをもった電子・イオンが地球磁場に捕捉されている領域がある。放射線帯の高エネルギー電子がどのようなメカニズムによって作り出されているかについては、長い議論が続いているがまだ同定されるにいたっていない。近年、ホイッスラーモード・コーラス放射と呼ばれるプラズマ波動がこの高エネルギー電子の加速を起こしている可能性が、理論・シミュレーション研究から指摘されている。コーラスの励起と電子加速過程の双方で、非線形の波動粒子相互作用が本質的に重要であることも指摘されている。

波動と電子のエネルギー交換過程を検出するためには、波動電磁場ベクトルと電子のサイクロトロン運動との位相差を検出する事が必要となる。近年、波動の位相変化と粒子個々の捕捉タイミングから位相差を検出した上で積分する事により、波動-粒子間エネルギー交換フラックスの直接計測を実現する WPIA と呼ばれる新しい計測手法が、本研究グループによって提案された。本基盤 S 計画においては、この計測手法を衛星搭載用の CPU 上で行うソフトウェア型波動粒子相互作用解析装置(S-WPIA)として実現する。本計画では S-WPIA をロケットおよび 2015 年ごろに予定されているジオスペース探査衛星に搭載、波動粒子相互作用にともなう波動と粒子のエネルギー交換過程を直接的かつ定量的に明らかにする計測手法の確立を目的とする。

【研究の方法】

本研究計画においては、S-WPIA システムの開発に向けて、以下の 3 つの具体的な課題を設定する。

- 1) S-WPIA シミュレータの開発
- 2) S-WPIA 計測システムの開発
- 3) S-WPIA システムを飛翔体に搭載し、宇宙空間での波動粒子相互作用直接計測

1)においては、ジオスペースのグローバルなシミュレーションモジュールと波動粒子相互作用のミクロなシミュレーションモジュールを結合させ、ジオスペースの実際のプラズマ環境の中で、どのようにコーラスが生起し、電子を加速していくかを明らかにする。また、このシミュレーションから得られる粒子およびプラズマ波動データをもとに、S-WPIA システムにおける計測アルゴリズム

や観測シーケンスの検討を行う。

2)においては、粒子および波動データを CPU で処理するための要となる、粒子パルス変化データ回路、プラズマ密度オンボード測定ユニット、および時刻同期信号回路部を開発し、また 1)で検討されたアルゴリズム開発を受けて、CPU での処理システムを開発する。

開発された S-WPIA システムを用いた飛翔体観測を行うことにより、波動粒子相互作用の直接計測を実証、S-WPIA 計測手法を確立する。

【期待される成果と意義】

本研究で実現される S-WPIA システムによって、宇宙空間におけるプラズマ波動と粒子のエネルギー交換過程を直接計測することを可能とする。このような観測は、諸外国でも例を見ない独創性がきわめて高いものである。この S-WPIA システムを本計画で実現することによって、宇宙における粒子加速の理解を飛躍的に拡大させる高い意義を持つとともに、宇宙空間プラズマの新たな観測手法を確立するものでもある。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Fukuhara, H., H. Kojima, Y. Ueda, Y. Omura, Y. Katoh, and H. Yamakawa, A new instrument for the study of wave-particle interactions in space: One-chip wave-particle interaction analyzer, *Earth Planets Space*, 61, 756-778, 2009.
- Miyoshi, Y., et al., Geospace exploration mission: ERG project, *Trans. Japan Soc. Aer. Space Science*, 8, ists27, 2010.

【研究期間と研究経費】

平成 23 年度 - 27 年度
162, 200 千円

【ホームページ等】

<http://stpp.gp.tohoku.ac.jp/s-wpia/>

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 大陸成長史と構造浸食 : 第二大陸の成長とマントルダイナミクス

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授 丸山 茂徳 (まるやましげのり)

研究分野: 数物系科学

キーワード: 地球史, テクトニクス, 地球惑星進化

【研究の背景・目的】

放射性物質を比較的多く含む花こう岩 (=大陸地殻) は、地球の冷却史と表層環境の進化を議論する上で重要な物質である。これまでは、一度生成した花こう岩は、地表に留まると考えられてきたが、近年、構造浸食により、これがマントル深部に再運搬され、マントルに第二大陸を形成するという観測が現れた (図1)。本研究は、花こう岩の沈み込みの規模を見積り、これを考慮した、新たなマントル対流と地球の進化シナリオを提示することを目的とする。

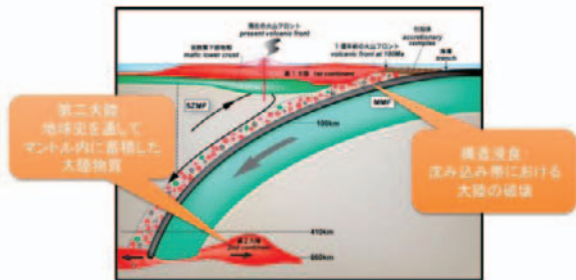


図1 構造侵食と第二大陸

【研究の方法】

表層地質グループ: 世界の造山帯で、砂岩試料採取を行う。碎屑性ジルコンの年代頻度分布と表層地質を対比し、構造侵食年代と規模を見積り。超高压実験グループ: 大陸地殻物質のマントル深部における物性を決定する。地震グループ: マントル内の花こう岩質不均質を地震波を用いて検出する。地球化学グループ: ジルコンのウラン-鉛年代測定を行う。数値計算グループ: マントル対流を、数値シミュレーションにより可視化する。

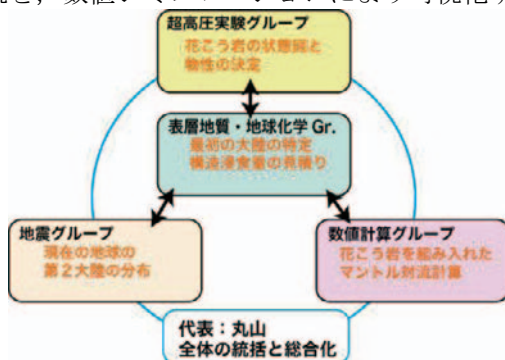


図2 研究組織

【期待される成果と意義】

本研究計画の特色は、表層地質、超高压実験、地震学、地球化学、および数値実験の5分野による学際共同研究と、各グループがこれまで系統的に国内外で進めてきた共同研究を更に発展させることによって新たなブレイクスルーを目指すところにある。「第二大陸」存在とそれを考慮した研究計画は、本研究のような学際的発想以外からはでてこない。地球システムとその変動機構の理解は大きく刷新され進展し、固体地球変動と表層環境変動の関係の理解が更に進むことになろう (図3)。

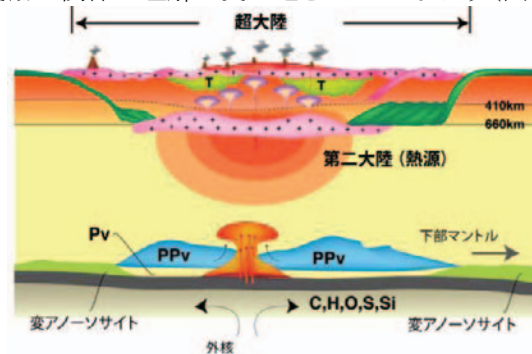


図3 期待される新たなマントルダイナミクス像

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

Kawai, K., Tsuchiya, T., Tsuchiya, J., and Maruyama, S. (2009). Lost primordial continents. *Gondwana Res* 16, 581-586.
丸山茂徳・大森聡一・千秋博紀・河合研志・B.F. WINDLEY (2011) 太平洋型造山帯—新しい概念の提唱と地球史における時空分布—, *地学雑誌*, 120, 115-223.

【研究期間と研究経費】

平成23年度—27年度
162,900千円

【ホームページ等】

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/maruyama/maruyamalab/maruyamalab.html>

【基盤研究(S)】

理工系 (数物系科学)



研究課題名 アイソトポマーの計測・解析技術開発による物質循環解析

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

よしだ なおひろ
吉田 尚弘

研究分野：数物系科学

キーワード：物質循環、アイソトポマー

【研究の背景・目的】

地球化学分野において、軽元素の安定同位体組成は、様々な分子の循環を推定する上で非常に有効な指標として利用されている。しかしながら、利用されている安定同位体組成情報は、分子中の単一元素の単一同位体に着目したものがほとんどである。アイソトポマーとは、分子中の多種の同位体の組み合わせからなる同位体置換種の総称であるが、このアイソトポマーが多数存在する分子は、単一同位体情報のみでは得ることができない、豊富な多次元情報を保持している。

これまで申請者のグループでは、温室効果ガスに着目してアイソトポマー計測法を開発・適用し、より定量的な温室効果ガスの循環像の把握を行ってきた。例えば、温室効果ガスの1つである大気中一酸化二窒素 (N_2O) については、 $^{14}N^{14}N^{16}O$ 、 $^{14}N^{15}N^{16}O$ など 12 種類の区別しうるアイソトポマーが存在するが、それらの内 $^{15}N^{14}NO$ 、 $^{14}N^{15}NO$ を区別して計測する方法を世界で初めて確立し、様々な試料に適用することで生物圏・対流圏・成層圏中 N_2O のソース・シンクの詳細化および定量化を行ってきた(例: Yoshida and Toyoda, 2000)。

近年、上記 N_2O 以外の地球温暖化関連物質についてもアイソトポマー計測が可能となり、地球温暖化関連物質の知見は集積しつつある。しかし、一方で、分子構造がより複雑な生体分子などについては、地球温暖化関連物質の前駆物質として循環解析に不可欠であるにもかかわらず、計測法が困難であるためにアイソトポマーに関する知見が非常に限られている。

そこで本研究では、これまで計測法が困難であった環境物質に着目したアイソトポマー計測法の確立および実試料への適用を行うとともに、アイソトポマー情報を用いた数値モデリングも行うことで、従来よりも高精度な地球環境物質の循環解析を行うことを目的とする。

【研究の方法】

研究方法として、以下4点を実行する。

1. 地球温暖化関連物質の前駆体として重要な生体分子の新規アイソトポマー計測法の開発および環境試料・微生物試料への適用を行う。
2. 地球温暖化に直接・間接的に関わる気体・エアロゾル成分について、非質量依存同位体分別を対象とする最先端のアイソトポマー計測法を開発し、高感度化および高精度化を図って大気試料に適用する。
3. 大気化学反応において提案されている N_2O 、 CO_2 、 SO_x などが関与する化学反応素過程において第一原理に基づく量子反応動力を実施することにより、様々なアイソトポマーに関する光解離断面積および反応定数の理論決定を行う。

4. これまでに集積した、そして本研究で得られるアイソトポマーデータを基に、 N_2O アイソトポマーモデルと硫黄化学種アイソトポマーモデルを構築し、主要な地球温暖化関連物質である N_2O と硫酸エアロゾルの循環像を定量的に解明する。

【期待される成果と意義】

本研究の意義は、第一に主要な温暖化関連物質の収支の不確実性を低減する点である。新たな計測技術の確立を通して、地球温暖化関連物質のアイソトポマー実測が充実することで、ソース・シンク不確実性の低減を可能とする。第二に生体分子のアイソトポマー計測の実現により、温暖化関連物質の循環を追跡する基点情報が得られる点である。さらに温暖化関連物質の循環解析のみではなく、生物地球化学を中心として地球化学全般の解析にアイソトポマー情報が広く利用されることも期待できる。第三に地球温暖化関連物質の生成メカニズムを定量的に解明することで、効果的な温暖化緩和策を提案できる点である。 CO_2 換算総排出量を削減するためには、削減対策が進んでいる CO_2 の削減のみならず、まだあまり対策が進んでいない本研究で扱う N_2O 、 CH_4 、エアロゾルなどの非 CO_2 温暖化ガスの削減が効果的であると考えられる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

Yoshida, N., and S. Toyoda, Constraining the atmospheric N_2O budget from intramolecular site preference in N_2O isotopomers, *Nature*, **405**, 330-334, 2000.

Ueno, Y., M. S. Johnson, S. O. Danielache, C. Eskebjerg, A. Pandey, and N. Yoshida, Geological Sulfur Isotopes Indicate Elevated OCS in the Archean Atmosphere, Solving Faint Young Sun Paradox, *Proc. Nat. Acad. Sci., USA.*, **106**, 14784-14789, 2009.

【研究期間と研究経費】

平成23年度－27年度
160,300千円

【ホームページ等】

<http://nylab.chemenv.titech.ac.jp/>
yoshida.n.aa@m.titech.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系（数物系科学）



研究課題名 磁気圏プラズマの自己組織化 — 磁場によって歪むメトリックの非線形効果

よしだげんしょう
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授 吉田 善章

研究分野：プラズマ科学

キーワード：プラズマ物理学，自己組織化，渦，磁気圏

【研究の背景・目的】

天体磁気圏は宇宙に遍在する典型的な構造でありながら、そこに閉じ込められるプラズマには多様な構造や運動が現れ、未解明のものが多い。それらはしばしば通常の物理的常識に反する「奇妙な現象」として観測され、注目を集めている。私たちは、磁気圏をつくるダイポール型磁場の強い非一様性のために生じる「時空の歪み」によって、こうした現象が引き起こされると考えている（図1）強い勾配をもつ磁場が与えられると、荷電粒子が感じる時空のメトリックが歪む。このことで、一様な磁場中では縮退しているプラズマの性質が発現する。その物理的特性を理解し、様々な応用に繋げることが本研究の目的である。とくに磁気圏型配位の中で高ベータプラズマの閉じ込めが自己組織化されることが実験的に示され、そのメカニズムが解明されるならば、高性能の核融合プラズマ閉じ込め、とりわけ $D-^3He$ の燃焼を可能にする先進的核融合の研究に道が開かれる。

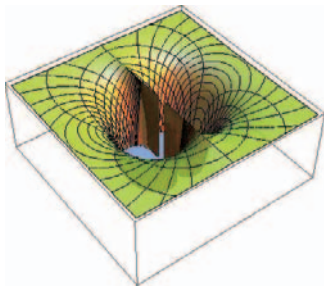


図1. ダイポール磁場の近傍で荷電粒子が感じる時空のメトリック.

【研究の方法】

東京大学において開発された RT-1 は「地上の磁気圏プラズマ」を作り出す実験装置であり（図2）、電子サイクロトロン加熱(ECH)によるプラズマでは超高ベータプラズマの高性能閉じ込め（電子温度 $\geq 10\text{keV}$ 、電子密度 $\leq 10^{17}\text{m}^{-3}$ 、電子ベータ ≥ 0.7 、エネルギー・粒子閉じ込め時間 $\geq 0.5\text{s}$ ；同時データ）を実証している。

本研究では、RT-1 実験装置を用い、高電子温度プラズマに対して①イオンサイクロトロン加熱(ICH)を行い、電子とイオンの双方が高い温度・ベータ値・閉じ込め時間をもつプラズマを実現する。ICHにおける非線形磁気ビーチ効果を検証するため、②プラズマ内部の高周波電場をポッケルスプローブで直接計測する。プラズマの特性を評価する無次元数は、宇宙・天体プラズマに匹敵する領域に達し、その実験室シミュレーションとなる。イオンの高ベータ化で反磁性効果が顕著とな

り、高速（Alfvén Mach 数 $\sim(\beta_{\text{ion}})^{1/2}$ ）で回転する渦構造を形成する。このとき磁化した粒子の内向き拡散（自発的閉じ込め）が生じることを③プラズマ内部の密度、イオン温度、イオン流速、電子温度、密度揺動の計測によって検証する。また高ベータ平衡の安定性を検証する。

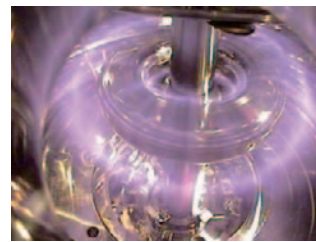


図2. RT-1 プラズマ実験装置. 超伝導マグネットを磁気浮上させ、磁気圏型配位を形成して1億度を超える超高温プラズマを閉じ込める.

【期待される成果と意義】

磁気圏型プラズマは、トカマクやヘリカルなど従来の核融合プラズマ装置とは全く異なる領域に位置づけられ、内向き拡散や悪い曲率磁場による安定閉じ込めなど常識に反する現象が起こる。いうまでもなく磁気圏型配位は宇宙の典型的な構造であるから、この領域における物理現象を解明することの学術的な意義は大きい。本研究が明らかにしようとしている現象は、一様な磁場中では縮退しているプラズマの根本的な性質の発現であり、効率的なプラズマ生成・閉じ込めに適用でき、先進的核融合に道を開く先駆的な学術研究となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. Z. Yoshida, H. Saitoh *et al.*; Magnetospheric vortex formation: self-organized confinement of charged particles, *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010), 235004 1-4.
2. S.M. Mahajan and Z. Yoshida; Twisting space-time-Relativistic origin of seed magnetic field and vorticity, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010), 095005 1-4.

【研究期間と研究経費】

平成23年度—27年度
81,800千円

【ホームページ等】

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

【基盤研究(S)】
理工系(化学)



研究課題名 密度汎関数理論の新展開

独立行政法人理化学研究所・計算科学研究機構・機構長 平尾 公彦 (Hirao Kimihiko)

研究分野: 理論化学

キーワード: 電子状態理論、密度汎関数法、長距離補正汎関数

【研究の背景・目的】

本研究の目的は密度汎関数法(DFT)の決定版、長距離補正の密度汎関数理論(LC-DFT)を確立し、世界をリードする理論化学・計算化学の基盤技術を構築することである。

理論化学・計算化学には波動関数法とDFTの2つのアプローチがある。波動関数法は歴史も長く、体系的理論がほぼ完成している。小さな系では極めて精度の高い結果を与える。しかし大規模系では計算時間がかかりすぎる。DFTは現在もっともよく使われている理論であり、計算も簡単で大きな系に適用可能である。しかし計算精度は汎関数に依存している。エネルギーや分子構造は高い精度で算出するが、2次の分子物性の記述には問題がある。DFTではよりよい汎関数の開発が課題である。これまでのDFTの課題を解決したのが私たちが開発した長距離補正汎関数、LC汎関数である。LC汎関数では電子間相互作用 $1/r$ を誤差関数(erf)を使って、単距離部分と長距離部分にわけ、短距離にはDFTの交換汎関数を長距離にはHartree-Fockの交換積分を使う理論である。

$$\frac{1}{r_{12}} = \frac{1 - erf(\mu r_{12})}{r_{12}} + \frac{erf(\mu r_{12})}{r_{12}}$$

これによって電子間の長距離相互作用を取り込むことができる。 μ は短距離部分と長距離部分を分けるパラメータで、 μ が0の極限ではDFT、 μ が無窮大で波動関数法となる。LCでは中間の $\mu=0.5$ の値をとる。LC汎関数はこれまでの汎関数の問題点をすべて解決したものとして高い評価を得ている。LC-DFTが与えたインパクトは大きく、現在では、多くの理論計算に使われている。本研究ではLC-DFTを理論的にもさらに発展させ、様々な化学の問題に応用し、LC-DFTをDFTの決定版にすることである。

【研究の方法】

最近、LC-DFTがHartree-Fock法と同じようにKoopmans定理を満足することを証明した。Koopmans定理とは、HOMOの軌道エネルギーの符号を変えたものが、イオン化エネルギーになるという定理である。これまでDFTではKoopmans定理は成立しないといわれてきたが、そうではない。LC-DFTの軌道や軌道エネルギー

は明確な物理的意味を持っている。LC-DFTを使うと、分子軌道法でこれまで培われてきた言葉、概念をそのままDFTに当てはめることができる。

本研究ではLC-DFTのさらなる理論発展、効率的なアルゴリズム開発、ソフトウェア開発に加え、理論を様々な化学の問題に応用する。特に、新しい光化学・電気化学反応理論の開発、次世代スパコン「京」での利用に向けたDFTの超高速計算アルゴリズムの開発、実験研究者との連携による重要な光化学・電気化学の反応機構の解明と新機能材料の設計をおこなう。

【期待される成果と意義】

LC-DFTがDFTの決定版となり、世界中の多くの人々に利用されること。また新しい光化学・電気化学反応理論と軌道にもとづく解析法、それらを含むDFTの次世代スパコン「京」での利用に適した超高速計算アルゴリズムを搭載した計算ソフトウェアが公開されること。計算ソフトウェアが、現在において理論解析の難しい数千から数万原子レベルの分子の光化学反応や、電子移動をとともう固体・溶液界面の反応の解析を可能にすること。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Y. Tawada, T. Tsuneda, S. Yanagisawa, T. Yanai and K. Hirao, "A long-range-corrected time-dependent density functional theory", *J. Chem. Phys.* **120**, 8425 – 8433 (2004)
- ・ T. Tsuneda, J. Song, S. Suzuki, and K. Hirao, "On Koopmans' theorem in density functional theory", *J. Chem. Phys.*, **133**, 174101(1-9) (2010)

【研究期間と研究経費】

平成23年度－27年度
165,500千円

【ホームページ等】

<http://www.aics.riken.jp/>



研究課題名 スーパー・ブレンステッド酸触媒を用いる迅速化学合成

中部大学・学長付・教授

やまもと ひさし
山本 尚

研究分野：化学、複合化学、合成化学

キーワード：選択的合成、反応、分子性酸触媒

【研究の背景・目的】

20世紀後半に急発展した精密化学合成は、遷移金属を巧みに用い、選択的に欲しいものだけを作り出す新反応群を人類に提供した。しかし、今世紀に入って、環境負荷の少ない化学合成法が求められ、金属を使わない有機触媒研究が一齐に開始された。本研究では有機触媒の主役となる有機酸触媒システムを構築し、多岐にわたる反応系に適用する。特に高い酸性を持つスーパー・ブレンステッド酸触媒とスーパー・シリル基とを組み合わせ、その不斉触媒のデザイン、合成、種々の応用開発を目指し、ごく微量の触媒量で、従前の有機触媒では達成できなかった反応の位置及び立体制御を実現すると同時に、環境にも優しい合成法を樹立する。これによって、従来の方法では達成できなかった3次元分子の迅速で立体選択的合成法が初めて確立する。

【研究の方法】

スーパー・シリル基とスーパー・ブレンステッド酸触媒を用いる合成反応、特に高分子合成に見られる逐次反応を2-5段階で停止し得る反応を行う。一方では分子性ブレンステッド酸触媒の反応をさらに進展させ、陽イオン中間体を経由する反応の立体制御に積極的に取り組む。加えて、新規なキラル・ブレンステッド酸触媒を設計し、その合成プロセスを確立し、それを用いる不斉合成に取り組む。

具体的には、スーパー・シリル基の作る特殊反応空間を用いて高分子合成反応の途中停止を計る。その反応制御は高高いスーパー・シリル基が造り出す空間に閉じ込められた基質の主鎖末端の官能基が複数のスーパー・シリル基によって立体保護されることに起因する。本研究ではこうした反応制御を使った2-5量体停止反応を行い、これまでに作れなかった様々な化合物のジアステレオ選択的迅速合成法を確立する。例えば、アセトアルデヒドのアルファ位にエーテル基やアミノ基等を導入したシリルエノールエーテルの逐次アルドール合成を試みる。これによって、水酸基とアミノ基が連続的に並んだ化合物の立体選択的迅速合成がはかれる。また、2位にスーパー・シリル基のついたブタジエンを用いた1、5-ポリエン骨格の合成を行う。比較的小さなトリエチルシリルブタジエンでもアニオンリビング重合がE-立体選択的進行することが報告されている。従って、スーパー・シリル基を用いた場合にE体が選択的に生成することは容易に予測できる他、分子動力学計算ではスーパー・シリル基の立体効果で反応は3量体段階で停止すると予想できる。その後、親電子反応剤を入れて後処理すれば、従前の方法では作

れなかった多官能基の様々な1、5-ジエン骨格を立体選択的に、しかも単工程で合成できる方法となる。一方、生成するアニオンはピーターソン型のオレフィン化反応で2重結合にも変換できる。同様の反応をビニルスーパー・シリルで行うことで玉尾酸化と組み合わせ、ポリオール構造を選択的に作れる。一方、複合酸触媒のコンセプトに基づく新しいブレンステッド酸触媒も合成し、上記の迅速化学合成の鍵触媒として用いる。

【期待される成果と意義】

分子を作る有機合成は今世紀の最大のテーマである分子技術(Molecular Engineering)研究の根幹をなす。本申請に述べる分子性酸触媒は炭素骨格の短工程一挙合成と官能基間の立体選択性を同時に満足し、従来の有機合成の方法論を一変させ、革新をもたらす。医薬品から材料化学の機能性物質の安全な工業生産に広く応用出来る可能性があり、我が国の化学工業に貢献することが期待出来る。また、本申請の中核をなすスーパー・ブレンステッド酸やスーパー・シリル・ルイス酸は本研究代表者によって開始された新分野であるが、革新的触媒としての機能の他に、環境負荷のないクリーンな合成としての特色も大きい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- (1) Cheon, C.H., Yamamoto, H., A Brønsted Acid Catalyst for the Enantioselective Protonation Reaction, *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**,130, 9246-9247.
- (2) Boxer, M. B., Yamamoto, H., Ketone Super Silyl Enol Ethers in Sequential Reactions: Diastereoselective Generation of Tertiary Carbinols in One Pot, *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**,130, 1580-1583.
- (3) Boxer, M. B., Yamamoto, H. "Super Silyl" Group for Diastereoselective Sequential Reactions: Access to Complex Chiral Architecture in One Pot, *J. Am. Chem. Soc.*, **2007**, 129, 2762.

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
165,600千円

【ホームページ等】

hyamamoto@isc.chubu.ac.jp



研究課題名 極微な領域規制に基づくメソ薄膜の形態発現と光応系の創成

名古屋大学・大学院工学研究科・教授 せき たかひろ
関 隆広

研究分野：高分子化学、自己組織化高分子

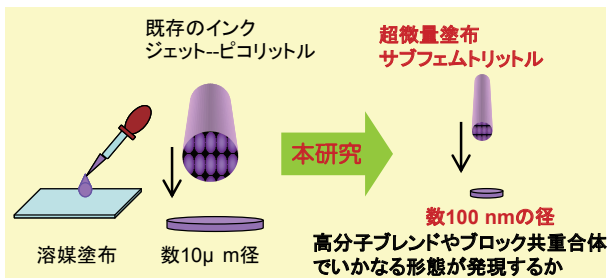
キーワード：高分子ブレンド、ブロック共重合体、超微量塗布、表面リンクル、光応答システム

【研究の背景・目的】

我々は、これまで液晶性薄膜を中心とした界面での光形態制御や配向現象について系統的な知見を蓄積してきたが、いずれも膜形態は巨視的なものを用いてきた。本研究では、二次元方向にも極微界面の規制を加えたメソスケールの膜系の検討を提案する。具体的には、サブフェムトリットルの超微量液滴から得る高分子ブレンド膜、ブロック共重合体膜、有機無機ハイブリッド膜の構造や物性の諸特性の解明と展開、および表面リンクル現象の光制御に関する新たな高分子機能化学の創成を行う。高度に次元規制を受けた膜状態からいかなる自己集合現象を示すかについて詳細かつ系統的な理解を得るとともに、その現象に基づく階層構造を有する新たな光応答システムの構築を目指す。

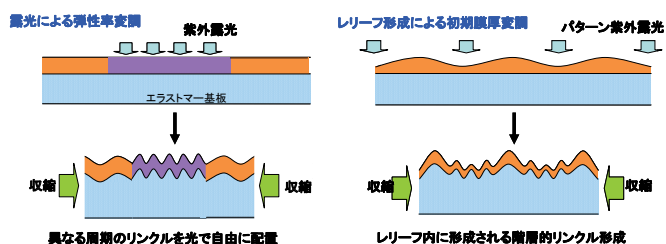
【研究の方法】

本研究では、近年開発されたサブフェムトリットルの超微量液滴の塗布による 1 μm 径以下の解像度のドット形成あるいは描画・立体形成に基づく、新たな光機能表面と構造体の構築を目指す。基板表面には加工をせず、物質そのものを微小サイズにすることによる自己集合化や組織化挙動を観測する。超薄膜状態において高分子が特異な挙動を示すことが知られているが、ここでは、さらに平面方向にも制限を加え、相分離の特性サイズ以下あるいはそれに匹敵する領域で、高分子ブレンドやブロック共重合体がいかなる挙動を示すかに着目する。



一方、弾性率の高い皮膜を有するエラストマーの変形で生じるリンクル形成にも着手する。従来、皮膜は特に グループで蓄積してきたアゾベンゼン系光応答高分子膜の知見に基づき、光による弾性変調とレリーフ形成(膜厚変調)させたアゾベンゼン高分子膜をスキン層としてエラストマーにのせ、表面リンクル(シワ)形成現象の光制御という新たな研究を提案する。

光応答する表面皮膜を用いたリンクル形成



【期待される成果と意義】

巨視的なレベルで実証してきた、分子の光配向やレリーフ形成に関して、メソスコピック領域での規制を加える新たなアプローチであり、自己組織化高分子における新規な学問領域を開拓できるものと期待される。また、こうした自己組織化挙動の知見に基づき、応答性のアゾベンゼン高分子を系沖に組み込むことにより、高精度で俊敏に動く光メカニカル応答などの新たな光機能材料群の創出も期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- J. Isayama, S. Nagano, T. Seki, Photo-triggered Mass Migrating Motions in Liquid Crystalline Azobenzene Polymer Films with Systematically Varied Thermal Properties, *Macromolecules*, **43(9)**, 4105–4112 (2010).
- T. Seki, Light-directed smart responses in azobenzene-containing liquid crystalline polymer thin films, *Functional Polymer Films* (R. Advincula & W. Knoll eds.), Vol. 2, Wiley-VCH, chapter 31, pp. 961-982 (2011).

【研究期間と研究経費】

平成23年度－27年度
144,000千円

【ホームページ等】

<http://www.apchem.nagoya-u.ac.jp/06-BS-2/sekilabo/index-j.html>
E-mail: tseki@apchem.nagoya-u.ac.jp



研究課題名 高分子の自己集合を用いる機能材料の創製と
生医学領域への応用

大阪大学・大学院工学研究科・教授 あかし みつる
明石 満

研究分野：高分子化学

キーワード：ナノ構造制御バイオマテリアル、高分子薄膜・表面、交互積層法

【研究の背景・目的】

低分子では弱い相互作用であっても、高分子となることで、分子間相互作用は強く発現する。これまでに当該研究課題の研究代表者は、高分子間相互作用を利用した交互積層法(LbL法)を基盤技術とし、医療用材料や規則性ナノ空間の創製へと展開してきた。LbL法とは、互いに相互作用する二種類の高分子溶液へ、基板を交互に漬け込むことで、基板表面に薄膜を調製する手法である。例えば、図1に示すように、生分解性高分子であるポリ乳酸のステレオコンプレックス形成を駆動力として交互積層膜による中空カプセルを作製可能であることを示し、LbL法が生医学領域へ応用可能であることを示した。また2000年には、立体規則性ポリメタクリル酸メチル間に働くファンデルワールス相互作用をLbL法に適用し、「弱い相互作用」をこのシステムに導入可能であることを報告し、ナノ反応場として機能することを示した。

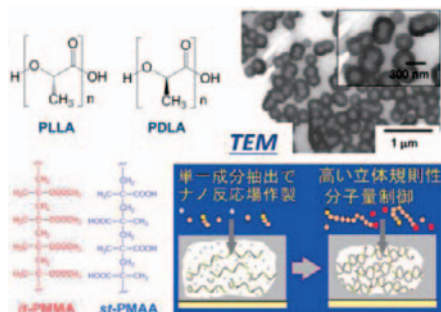


図1. 弱い高分子間相互作用による交互積層法

本研究では、世界に先駆けて開発した「弱い高分子間相互作用を利用したLbL法」に関する基礎研究と、それに基づいて高分子機能材料を創製すること、さらには生体組織に適する成分から構成し形状も制御して安全性が担保された新しい高分子バイオマテリアルを創出することを目的とする。また、種々の材料の機能性評価の後に、臨床応用を最終目的とした細胞実験、動物実験さらには臨床応用研究を行ない、高分子化学の研究が社会に役立つことを明確に示す。

【研究の方法】

これまでにLbL膜作成の基板には主に2次元の平面状のものが多く用いられていたが、これを細胞のような点(0次元)、チューブ状(1次元)、や3次元の構造体を用いてLbL法を適用することで、生医学領域において適する形態と界面特性を備えた様々な高分子材料を調製する(図2)。



図2 材料の界面制御と形態の次元制御

γ -グルタミン酸、ゼラチン、多糖類、ポリ乳酸などのように、生体適合性の高い種々の高分子素材を用いたLbL法により構築される薄膜の構造、物性、および機能について、化学的手法により基礎的な知見を整理するとともに、細胞実験や動物実験を通じて、臨床研究を可能とするバイオマテリアル及び三次元細胞組織を創出する。また、これらの安全性試験を行い、医療に応用可能な高分子バイオマテリアル創製技術を確認する。

【期待される成果と意義】

高分子の自己集合に関わる重要な知見が得られるとともに、界面特性や形態を自在に制御可能な新しい高分子バイオマテリアル創製が期待される。本研究の成果は医学部研究者により新しい治療開発に活かされると予想され、将来の新しい医療開発に効果を及ぼすと期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. Takeshi Serizawa, Ken-ichi Hamada, Mitsuru Akashi, "Polymerization within a molecular-scale stereoregular template" *Nature* **2004**, *429*, 52-55.
2. Michiya Matsusaki, Kohji Kadowaki, Yoshio Nakahara, Mitsuru Akashi, "Fabrication of cellular multilayers with nanometer-sized extracellular matrix films" *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 4689-4692.

【研究期間と研究経費】

平成23年度－27年度
163,900千円

【ホームページ等】

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



研究課題名 有機スピン三角格子を基盤とする複合電子機能の開発研究

名城大学・総合研究所・教授 さいとう ぐんじ
齋藤 軍治

研究分野: 化学

キーワード: 電気・磁氣的機能、結晶構造、有機電子材料・素子

【研究の背景・目的】

有機スピン三角格子物質 $\kappa(\text{ET})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ において研究代表者が初めて実証した量子スピン液体は、極低温までスピンの波動性が保持された新規量子状態であり、複数の電子相 (Mott 絶縁相、金属相、超伝導相) と微妙なエネルギーバランスで拮抗している。量子スピン液体を発現させるスピン三角格子において、トランスファー積分 t の大きさや異方性 (t/t' ; 図1参照) は構成分子の選択や集合体の設計によって制御可能であり、周辺電子相の探索を包含した系統的な物質開発は喫緊の課題である。本研究では、有機化学の力を駆使してスピン三角格子を計画的に開発し、有機物の特徴 (柔軟な格子・電子状態) を最大限に利用した圧力印加による t や t/t' の制御、電界や光によるキャリア注入を行い、新規量子スピン液体の創生ならびに超伝導やスイッチング現象などの複合電子機能の探索を目的とする。

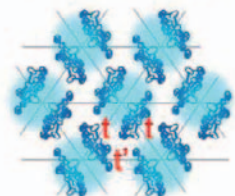


図1 $\kappa(\text{ET})_2\text{X}$ における ET 分子配列。水色円は $(\text{ET})_2^{2+}$ 二量体を示す。

【研究の方法】

これまで蓄積してきた知見に基づいた分子設計・選択を行い、 $S=1/2$ スピンを有する分子ユニット (TTF 系ではダイマー陽イオンラジカル、 C_{60} 系ではモノマー陰イオンラジカル) から構成されるスピン三角格子を新たに開発する (文献1)。電子系の局在性や対称性、すなわち分子ユニット間のトランスファー積分の大きさ・異方性やバンド充填率の化学的な制御方法を確立する。一軸性歪や静水圧によりスピン幾何異方性やバンド幅を調整し、電子状態の連続的な制御を行う。量子スピン液体相と周辺電子相の境界を集中的に解明して温度・圧力相図を導出するとともに、フラストレーションに由来する特異な圧力誘起超伝導相の探索やその機構解明を行う。また、電界や光によるキャリア注入を行い、量子スピン液体を出発点とした電子状態の制御、ならびに外場誘起金属・絶縁体転移や超伝導相の探索を行う。電界によるキャリア注入では、FET 挙動の高性能化に適したイオン液体の開発を行う。さらに、主に光をプローブとして、電子・格子の励起状態の非平衡ダイナミクスを、広範なエネルギーおよび時間スケール (フェムト秒~ミリ秒) にわたり明らかにする。

【期待される成果と意義】

物性科学の長年の課題である量子スピン液体の解明には、新規量子スピン液体系の探索とその包括的な理解が必須である。研究代表者らによる発見以降、7種の新物質 (有機物1種、無機物6種) が報告されているが、超伝導相が隣接するのは $\kappa(\text{ET})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ のみであり、本研究は物性科学における重要課題である量子スピン液体と超伝導の相関関係の導出を目指した、量子スピン液体の本質に迫る先導的かつ独創的な課題である。さらに、超伝導相などの電子相との拮抗を利用して、基礎・応用両面において重要な微小な外的摂動による電子物性の制御を目指す。化学的および物理的 (温度・圧力・電場・電界・光・磁場など) な制御によりスピン三角格子系を系統的に探索することにより、フラストレーションが絡んだ新たな量子スピン系の開拓や新原理デバイスの構築を推進し、斬新で高度な物質材料科学の礎を与える。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. G. Saito and Y. Yoshida “Development of Conductive Organic Molecular Assemblies: Organic Metals, Superconductors and Exotic Functional Materials” *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **80**, 1-137 (2007).
2. D. V. Konarev, S. S. Khasanov, A. Otsuka, M. Maesato, G. Saito, and R. N. Lyubovskaya, “A Two-Dimensional Organic Metal Based on Fullerene” *Angew. Chem. Int. Ed.*, **49**, 4829-4832 (2010).
3. Y. Shimizu, H. Kasahara, T. Furuta, K. Miyagawa, K. Kanoda, M. Maesato, and G. Saito “Pressure-Induced Superconductivity and Mott Transition in Spin-Liquid $\kappa(\text{ET})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ Probed by ^{13}C NMR” *Phys. Rev.*, **B81**, 224508/1-5 (2010).

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
188,400千円

【ホームページ等】

準備中



研究課題名 高効率な光捕集・局在化を可能にする光アンテナの開発
とその太陽電池への応用

北海道大学・電子科学研究所・教授 三澤 弘明

みさわ ひろあき

三澤 弘明

研究分野：光化学

キーワード：局在プラズモン、ナノ材料、光物性

【研究の背景・目的】

太陽光は紫外から赤外波長域に至る幅広いスペクトルを有しており、地表に到達する太陽光エネルギーの44%は波長800nm以上の赤外光で占められているが、シリコン太陽電池を含め、赤外光を高効率に光電変換できる太陽電池はほとんど存在しない。従来有効に利用する術がなく光電変換としては未踏ともいえる赤外光を確実に電気エネルギーに変換できる革新的な太陽電池の開発が、高い光電変換効率を達成するためには必要不可欠である。研究代表者らは、最近酸化チタン単結晶基板(ルチル、0.05wt% ニオブドープ)上に金ナノ構造をアレイ状に配置した金ナノ構造/酸化チタン電極界面に波長1050nm付近の近赤外光を照射することにより、金ナノ構造に誘起される局在表面プラズモン共鳴に基づき光電流が観測されることを明らかにした。本研究では、光を捕集・局在化させることが可能な「光アンテナ機能」を有する金ナノ構造/酸化チタン電極を用いて光電変換系を構築し、金ナノ構造から酸化チタンへの高効率な電子移動を実現可能な構造設計の最適化を導出するとともに、「光アンテナ」の機能を極限まで高めるための学理と技術を構築することを目的とする。

【研究の方法】

加速電圧125kVの超高精度電子ビーム露光装置を用いて、酸化チタン単結晶基板上に比較的広範囲に数ナノメートルの加工分解能により金ナノブロック構造を作製する方法を明らかにする。作製した金ナノ構造/酸化チタン電極の光電変換特性を追跡し、構造や基板表面の結晶性、結晶面方位、或いは単結晶表面のステップが光電変換効率に及ぼす効果について検討を行う。また、構造設計の最適化を導出し、プラズモン共鳴が放射モードと結合することにより生じる散乱を著しく抑制可能な構造を作製して光電変換効率の向上を図る。散乱を抑制する一つの方法として、二つの金ナノ構造間において位相が揃った状態のプラズモン共鳴と位相が揃っていない状態のプラズモン共鳴間の干渉に基づくファノ効果を誘起する。また、半導体量子ドットや電気双極子モーメントの比較的大きな分子であるシアニン色素のJ会合体分子などを金ナノ構造近傍に配置し、エキシトン-プラズモン共鳴の強結合に基づくラビ振動を誘起し、二つの準位間におけるポピュレーションの往復を

促進させて緩和時間の増大を図り、「光アンテナ」の機能を極限まで高めて光電変換効率の向上を試みる。

【期待される成果と意義】

本赤外光太陽電池は、金ナノ構造が示す局在プラズモンを利用して光を捕集し、金ナノ構造/酸化チタン電極界面のナノ空間に局在させ、その「光電場増強効果」によって入射した光子を逃さず電極と相互作用させる、従来の太陽電池には具備していない「光アンテナ」という優れた機能を有している。本研究では、この特徴的な「光アンテナ」機能を極限まで高め、極めて高い光電変換効率を有する赤外光太陽電池の実現を目指すものであり、太陽電池の研究に新たな地平を拓く独創的な研究と言える。さらに、現在、学術的に未解明な点が多く残る局在プラズモンと物質との相互作用に関する研究に対しても様々な知見を与えるものであり、本研究領域の研究者に大きなインパクトを与えるもの考えられる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. Y. Nishijima, K. Ueno, Y. Yokota, K. Murakoshi, H. Misawa, *J. Phys. Chem. Lett.*, **1**, 2031-2036 (2010).
2. S. Gao, K. Ueno, H. Misawa, *Accounts. Chem. Res.*, **44**, 251-260 (2011).
3. K. Ueno, S. Juodkazis, T. Shibuya, Y. Yokota, V. Mizeikis, K. Sasaki, H. Misawa, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 6928-6929 (2008).
4. K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, K. Sasaki, H. Misawa, *Adv. Mater.*, **20**, 26-30 (2008).

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
166,400千円

【ホームページ等】

<http://misawa.es.hokudai.ac.jp/>
misawa@es.hokudai.ac.jp

【基盤研究(S)】
理工系(工学I)



研究課題名 高周波スピントロニクスの研究

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授 すぎき よししげ
鈴木 義茂

研究分野：応用物性・結晶光学

キーワード：(S)スピントロニクス

【研究の背景・目的】

近年、固体中の電荷のみでなくスピンの流れを制御することが可能となってきた。本研究では、磁化が磁場や交換相互作用のもとで示す GHz から THz にいたる歳差運動をスピン流の注入によって励起することを原理とする「高周波スピントロニクス」の学理を確立する。

【研究の方法】

1. 高性能スピントルク発振器

(a) 発振線幅の原因究明

発振信号の実時間測定により、発振線幅の原因を特定する。

(b) 結合発振器動作の解明

外部高周波あるいは相互結合の影響を調べることで発振器間結合動作原理を解明する。

(c) 超 50 GHz 発振およびその測定法の開発

スピン偏極電流と光学モードの結合を調べる。周波数が 50GHz を超える発振の研究およびその測定法の開発をオランダ Radboud 大の Rasing 教授のグループと協力により行う。

2. 超高感度磁場センサーの研究

発振振幅・位相揺らぎおよび外部磁場応答の測定を通してセンサとしての性能を明らかにする。

3. 超高感度スピントルクダイオードの研究

磁化のスピン流に対する非線形応答とそのスピントルクダイオード効果に与える影響について解明する。スピントルクダイオード効果を微小な磁性体について測定することにより、検出限界を解明する。

【期待される成果と意義】

磁化が磁場や交換相互作用のもとで示す GHz から THz にいたる歳差運動をスピン流の注入によって励起することを原理とする「高周波スピントロニクス」の学理の確立が期待される。

そのことにより、高性能トンネル磁気抵抗素子をベースとして高出力、high-Q あるいは 50GHz から 100 GHz 超にいたる発振器、半導体を凌駕する感度をもつ検波器、超常磁性微粒子の漏れ磁場の測定が可能な超高感度ナノサイズ磁気センサーなどの実現が期待される。さらには、シングルスピンの作るダイポール磁場検出の原理の明確化が期待される。

この研究の成果は、磁気記録の限界を打破する新しい原理を与え、さらに、化学、生物物理、医療、などの他分野に波及するものと期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, and Y. Suzuki, "Quantitative measurement of voltage dependence of spin-transfer torque in MgO-based magnetic tunnel junctions", Nature Physics 4, 37-41 (2008).
- [2] A. M. Deac, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, Y. Suzuki, S. Yuasa, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira and N. Watanabe, "Bias-driven high-power microwave emission from MgO-based tunnel magnetoresistance devices", Nature Physics Vol 4. No 8. 803-809 (2008).
- [3] A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe & S. Yuasa, "Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions", Nature, Vol 438, 339 (2005).

【研究期間と研究経費】

平成23年度－27年度
165,700千円

【ホームページ等】

<http://www.suzukiylab.mp.es.osaka-u.ac.jp/>

【基盤研究(S)】

理工系(工学I)



研究課題名 高強度フェムト秒レーザープラズマ高速電子パルスによる 高速時間分解電子線回折の実証

京都大学・化学研究所・教授

さかべ しゅうじ
阪部 周二

研究分野: 理工系、工学、応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物性

キーワード: 電子顕微鏡

【研究の背景・目的】

物質の極微細状態変化のような構造的な動力学を単一原子の振動周期の時間尺度 (<数 100fs) で直接観察する技術として時間分解電子線回折 (TRED) が期待される。TRED を用いて固体の相転移、気相の過渡的な分子構造、表面力学が調べられてきたが、今日までの TRED 実験はみな数 ps の時間分解能に留まっている。フェムト秒の時間分解で電子線回折により構造変化を直接測定するには、十分な強度のフェムト秒電子パルスが絶対不可欠である。最近の当該研究では電子を低強度フェムト秒レーザーとフォトカソードを用いて発生している。この方式では、発生した電子を回折に必要な数 100keV のエネルギーにまで外部電界で加速する間に空間電荷効果によりパルス幅が大きく広がる。このような効果を減じるために電子数を減じると単一ショットで回折像を撮像できない。すなわち、不可逆過程の観察ができない。

レーザープラズマから発せられる放射線は一般に点源・パルス・高輝度・小型などの特徴を有しており、本研究では上述の空間電荷効果問題を解決するために、高強度短パルスレーザー光を用いて生成したプラズマ中で瞬時に初期エネルギー数 100keV のパルス電子を発生・制御する。高速時間分解電子線回折に求められるパルス電子線源は数 100keV、数 100fs 以下、百万個程度以上と評価される。従来のフォトカソード方式ではレーザー単一ショットで回折像を取得する事は不可能であるのに対して、本研究の方式では時間分解回折像を取得できると考えられる。

高強度レーザーを固体や気体に照射することにより高エネルギー電子が発生することは知られているが、本研究が目標としている数 100keV 領域において、電子線回折解析に利用しうる高品位のパルス電子線の発生と制御の研究は国内外問わず殆ど行なわれていないのが現状である。

本研究の目標は高強度フェムト秒レーザー加速電子を用いて高エネルギー (数 100keV) 短パルス (数 100fs) 高輝度 (100 万個) のパルス電子線源を生成し、それにより数 100fs 以下の時間分解能での電子線回折の単一ショット撮像を実証することにある。

【研究の方法】

超高強度短パルスレーザーにより高品位のパルス電子線を生成し、パルス電子線の特性を制御しつつ電子パルス圧縮を行ない、観察試料に短パルス電子線を照射する。それに先立つように短パル

スレーザー光により試料を光励起し、その後の試料構造変化を電子線回折により観察する。単一レーザーパルスによる回折像の取得を目指す。主な課題と方法は、(1)電子線の高密度化←金属薄膜線源の利用←プリパルスの低減←プラズマミラーの開発、(2)電子線源の低エミッタンス化←線源に孤立微小薄膜の利用←レーザー剥離駆動薄膜飛行法の確立、(3)電子線源の短パルス化←位相反転によるパルス自己圧縮の実証、(4)試料の光励起と電子線照射系の構築、(5)高速時間分解電子線回折像の取得の実証である。レーザー、レーザープラズマ物理、放射線科学、電子顕微鏡科学、結晶科学の専門家により編成された研究チームにより本研究を実施する。

【期待される成果と意義】

本研究は世界に先駆けたものであり、高速時間分解電子線回折手法が確立できれば、物質科学・ナノ科学の分野において革新をもたらすことができる。最先端の電子顕微鏡技術 (高性能電子レンズ系、試料の極低温化など) と融合すれば、様々な環境下での物質の相変化をはじめ高速の諸現象の観察が可能となる。また、電子線源開発のための孤立固体系と高強度レーザー光との相互作用研究などは高エネルギー放射線科学の分野において、電子以外の放射線発生に応用でき、次世代の放射線源の開発の可能性を広げるものである。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- S. Tokita, M. Hashida, S. Sakabe, *et al.*, "Single-Shot Femtosecond Electron Diffraction with Laser-Accelerated Electrons: Experimental Demonstration of Electron Pulse Compression," *Physical Review Letters* **105**, 215004(4) (2010).
- S. Tokita, M. Hashida, S. Sakabe, *et al.*, "Single-shot ultrafast electron diffraction with a laser-accelerated sub-MeV electron pulse," *Applied Physics Letters*, **95**, 111911(3) (2009).

【研究期間と研究経費】

平成 23 年度 - 27 年度
129,200 千円

【ホームページ等】

<http://laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp>

【基盤研究(S)】

理工系(工学I)



研究課題名 1keV 領域での高次高調波発生とアト秒軟 X 線分光への展開

東京大学・物性研究所・准教授
いたたに じろう
板谷 治郎

研究分野: 工学

キーワード: 量子エレクトロニクス

【研究の背景・目的】

高強度レーザー技術の進展によって、「高次高調波」と呼ばれるコヒーレントなアト秒パルス光の発生が近年になって実現されました。しかし、アト秒パルス光の実用的な波長領域は 10 ナノメートル前後に止まっています。これは、高次高調波の最短波長がレーザー波長の二乗に反比例しており、従来型の高強度レーザー光源の波長は可視域にあるためです。本研究では赤外線領域における新規な高強度超短パルスレーザー光源を開発することによって、従来型レーザー光源による短波長限界の壁を打破し、高次高調波の波長域を 1 ナノメートル程度 (光子エネルギー 1keV 程度に相当) まで拡大させます。それによって、アト秒精度の時間分解能をもつ超高速軟 X 線分光法を実現させます。光子エネルギー 1keV 付近までの軟 X 線は物質との相互作用が強く、軽元素や遷移金属元素の吸収端をカバーしているという特徴があります。この特徴を利用して、特定の元素を含む物質の励起状態の動的過程を、フェムト秒からアト秒という極めて短い時間精度で観測する手法を実現させます。特に、気相分子を対象としてアト秒分光法の実証実験を進めながら、未踏分野である凝縮系を対象としたフェムト秒からアト秒領域での超高速分光法の確立を目指します。

【研究の方法】

申請者らが近年原理実証に成功した、赤外領域での超広帯域チャープパルス光パラメトリック増幅法に基づき、高強度赤外レーザー光源を開発します。本光源は、チタンサファイアレーザー発振器と増幅器をベースとしたものであり、この出力光を波長変換後にパラメトリック増幅することによって、単一サイクルに近い極限的な高強度超短パルス光を発生させます。また、超高速分光への応用として重要な、高い繰り返し (1kHz) と高度な位相制御性を実現させます。

この光源を用いることによって、光子エネルギー 1keV までのコヒーレントなアト秒軟 X 線パルスを発生させます。このアト秒軟 X 線パルスを用いて気相分子を対象としたアト秒光電子分光を行い、気相分子の光励起に伴う電子緩和過程の解明を行います。さらに、気相分子のアト秒分光で確立した実験手法を凝縮系に拡大し、フェムト秒からアト秒領域での時間分解光電子分光および吸収分光を実現させます。

【期待される成果と意義】

赤外域の高強度レーザー光源を開発することによって、フェムト秒からアト秒領域における超短パルス軟 X 線の発生と超高速分光法を、実験室規模のレーザー装置で実現させます。これによって、光励起状態の原子・分子・凝縮系における超高速緩和過程に関して様々な実験的な知見が得ることが可能となります。また、高強度レーザー光の波長範囲を可視域から赤外からテラヘルツ領域まで拡大させることによって、物質中の素励起を制御する新しい手法が実現でき、光触媒・表面光科学・化学反応ダイナミクス等における非平衡状態における新規な物性開拓への展開や、強光子場科学・アト秒光科学などの新分野への展開が期待されます。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] N. Ishii, K. Kitano, T. Kanai, S. Watanabe, J. Itatani, "Carrier-envelope-phase-preserving, octave-spanning optical parametric amplification in the infrared based on BiB₃O₆ pumped by 800 nm femtosecond laser pulses," Appl. Phys. Express vol.4, p.022701-1-3 (2011),
- [2] J. Itatani, J. Levesque, D. Zeidler, H. Niikura, H. Pepin, J. C. Kieffer, P. B. Corkum, "Tomographic imaging of molecular orbitals with high-harmonic generation," Nature vol. 432, p.867-871 (2011).

【研究期間と研究経費】

平成 23 年度 - 27 年度
119, 800 千円

【ホームページ等】

<http://itatani@issp.u-tokyo.ac.jp>
jitatani@issp.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 補償光学系を駆使した多段光学系による X 線自由電子レーザーのナノメートル集光

大阪大学・大学院工学研究科・教授 やまうち かずと
山内 和人

研究分野：超精密加工学、光学機器、X線光学
キーワード：超精密加工、光計測、X線光学

【研究の背景・目的】

レントゲンによって X 線が発見されて以来、X 線分析技術は、DNA の二重螺旋構造を明らかにしたように、医学・生物学・材料科学など、あらゆる分野の最先端研究の進展に不可欠な存在である。そして、今日、SPRING-8 に代表される第 3 世代放射光の高輝度 X 線を用いた X 線顕微鏡技術が飛躍的な発展を遂げつつある。このような状況のもと、当該研究グループは、精密加工学や精密計測学、X 線光学などを基盤に、集光ミラー開発の立場から X 線顕微鏡の高度化に携わっており、原子スケールで平滑なナノ精度ミラーの具現化によって、走査型顕微法においてプローブ X 線として世界最小のビーム径 7nm を実現した(Nature Physics, (2010))。また、部分コヒーレント X 線の性質を活用した透過型回折顕微法の開発では、やはり世界最高の空間分解能 3nm を達成しており(Nano Letter, (2010))、放射光 X 線光学の進展に大きく貢献している。

本研究では、次世代 X 線源「X 線自由電子レーザー(XFEL: X-ray free electron laser)」の高度利用に不可欠な XFEL のナノ集光技術の確立を目的に、これを実現し得る光学系として、ビーム拡大のための「開口数変換光学系」と極限集光のための「大開口数集光光学系」からなる多段光学系を構築し、XFEL の Sub-10nm 集光を実現する。

【研究の方法】

集光ミラー表面の加工技術を極限まで高度化するとともに、すべての要素に要求される極度に高い精度を回避できる新たなアプローチとして、At-wavelength ホ

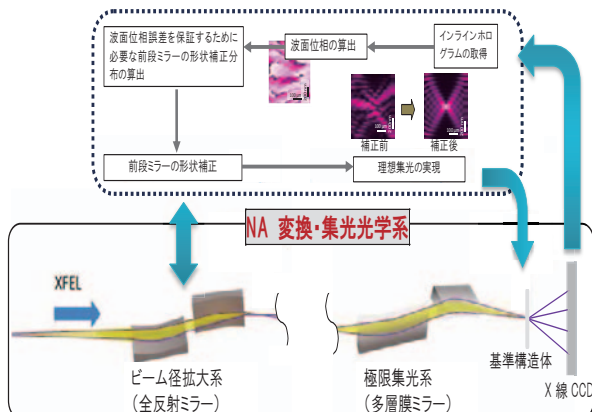


図 1 補償光学に基づく NA 変換集光光学系

ログラフィーによる集光ビーム波面の on-site 計測を提案し、これによって求められる波面誤差を前段ミラーの形状補正によって修正する補償光学システムを実現する。

【期待される成果と意義】

XFEL は、波長 1Å レベルの硬 X 線であり、ビーム径 200µm、完全な空間コヒーレンスを有し、ピーク強度が SPRING-8 光の 10 億倍、パルス幅が数 fs の極短パルスレーザーである。

従来の X 線の特性を超越した「夢の光」とされ、これによって、結晶化を必要としない究極の回折法である単分子による分子構造解析や、強光子場を利用した X 線領域の非線形光学など、新たな学問が拓かれるものと期待されている。特に、タンパク質の構造解析では、創薬のために極めて重要でありながら結晶化できない膜タンパク質の構造を単一分子の状態でも解き明かせる可能性がある。

しかしながら、XFEL の真の応用展開には X 線ビームの更なる高密度化が不可欠であり、集光性能が研究成果の「質」を決めるとも言われている。本研究では、フラックスロスの無い状態で、XFEL を世界最小のサイズ 5nm に 2 次元集光することを目指す。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] H. Mimura, S. Handa, T. Kimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, H. Yokoyama, S. Matsuyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, "Breaking the 10 nm barrier in hard-X-ray focusing," Nature Physics, vol. 6, 2010, pp. 122-5.
- [2] Y. Takahashi, N. Zettsu, Y. Nishino, R. Tsutsumi, E. Matsubara, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, "Three-dimensional electron density mapping of shape-controlled nanoparticle by focused hard X-ray diffraction microscopy.," Nano letters, vol. 10, 2010, pp. 1922-6.

【研究期間と研究経費】

平成 23 年度 - 27 年度
166, 100 千円

【ホームページ等】

<http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp>

【基盤研究(S)】

理工系(工学I)



研究課題名 多次元複合光学計測と GPU クラウド DNS による乱流予混合火炎の多重階層構造の解明

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授 みやうち としお
宮内 敏雄

研究分野: 工学

キーワード: 燃焼, 乱流, 流体計測, 数値流体力学, エネルギー利用

【研究の背景・目的】

我が国の一次エネルギー供給の約 85%は依然として化石燃料の燃焼が担っている。このため、IC エンジンやガスタービン等の各種燃焼器には、更なる高効率化と低環境負荷化が求められており、それらは地球・都市環境問題の解決に直結する。多くの実用燃焼器内の流れは、化学反応と乱流による熱物質輸送が混在した複雑な乱流燃焼状態にあり、乱流の階層構造による火炎面の階層構造が乱流燃焼特性を支配している。高レイノルズ数の場合、乱流中のコヒーレント微細渦と火炎の干渉はより強調され、火炎内部で化学反応に起因する階層構造が新たに形成されることが予測される。また、高圧下では、火炎自身が有する固有不安定モードが変化し、上述の火炎面の階層構造及び火炎内部の階層構造と複雑な干渉を引き起こすものと考えられる。

本研究では、詳細化学反応機構を考慮に入れた超並列 GPU (画像演算処理装置) クラウドによる直接数値計算(DNS)及び複数の燃焼生成物濃度と速度の同時・時系列計測法等の多次元複合光学計測を用いて乱流予混合火炎の火炎面及び火炎内部の階層構造を明らかにし、実用的な燃焼器において観察される高圧力環境下の高レイノルズ数乱流火炎の構造解明とモデル化を目的としている。

【研究の方法】

本研究は、超並列 GPU クラウドによる DNS を用いた数値的研究と高解像度時系列ステレオ投影粒子画像流速計(PIV)や高時間分解能平面レーザ誘起蛍光法(PLIF)等を組み合わせた多次元複合光学計測を用いた実験的研究からなる。数値的研究では、東京工業大学に平成 22 年度に設置された国内最高速の GPU 並列計算が可能なクラウド型グリーン・スーパー・コンピュータ TSUBAME 2.0 を用いる。実験的研究では、研究代表者らによる過去の研究を通じて構築した、世界最高速の時系列ステレオ PIV システム、世界初の CH ラジカルと OH ラジカル PLIF 及びステレオ PIV 同時計測システム、世界初の火炎伝播速度の直接計測法であるダブルパルス CH PLIF 計測システム等の最先端光学計測システムを更に発展させて用いる。実用燃焼器内で観察される乱流燃焼の階層的構造を総合的に解明するには、高レイノルズ数及び高圧力環境下の火炎面の階層構造、乱流のコヒーレント微細渦と火炎の干渉による火炎内部の

階層構造及びそれらと火炎自身が有する固有不安定性との関連を詳細に検討する必要がある。本研究では、これらの課題に対して研究代表者らが共同で効率良く研究を進める。

【期待される成果と意義】

詳細化学反応機構を考慮に入れた乱流燃焼の DNS は研究代表者らによって世界で初めて行われたものであり、現在でも世界をリードしている。また、本研究で用いる多次元複合光学計測技術も世界最先端である。さらに、これら最先端の数値的・実験的研究手法を組み合わせることで総合的に高レイノルズ数乱流燃焼機構を明らかにする研究は国内外を通じて本研究が唯一である。本研究により実用燃焼器内の乱流燃焼機構が明らかとなり、それらが高効率・低環境負荷燃焼器の開発に応用され、地球・都市環境問題の解決に多大な貢献をするものと予想される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Y.-S. Shim, S. Tanaka, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Local Structure and Fractal Characteristics of H₂-Air Turbulent Premixed Flame, Proc. Combust. Inst., Vol. 33 (2011), pp. 1455-1462.
- ・ M. Shimura, T. Ueda, G.-M. Choi, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Simultaneous Dual-plane CH PLIF, Single-Plane OH PLIF and Dual-plane Stereoscopic PIV Measurements in Methane-Air Turbulent Premixed Flames, Proc. Combust. Inst., Vol. 33 (2011), pp. 775-782.
- ・ M. Tanahashi, S. Taka, M. Shimura and T. Miyauchi, CH Double-Pulsed PLIF Measurement in Turbulent Premixed Flame, Exp. Fluids, Vol. 45, No. 2 (2008), pp. 323-332.

【研究期間と研究経費】

平成 23 年度 - 27 年度
161,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.navier.mes.titech.ac.jp/kiban-s-2011/index.html>



研究課題名 超微細手術のための汎用プラットフォーム開発とそれを支える超精密テクノロジーの追求

東京大学・大学院工学系研究科・教授 光石 衛 (みついし まもる)

研究分野: 工学, 機械工学, 知能機械学・機械システム
キーワード: ロボティクス, 手術支援ロボット, マイクロサージェリ

【研究の背景・目的】

本研究では、従来の手術では達成できない高度治療を社会に普及させることを目指す。とくに、医師の手の動作では実現不可能なスーパー・マイクロ・サージェリ技術を実現することにより、超低侵襲・超微細・超精密手術を可能とする。さらに、究極のスーパー・マイクロ・サージェリとして血管内治療用マイクロロボットを開発する。この研究は、これまでの手術ロボット群をさらに進化・汎用化させ、超精密ロボティック技術・加工技術を搭載することによって実現するものであり、この分野の学問技術体系を確立する。

【研究の方法】

本研究では、軟組織対応手術ロボット、硬組織対応手術ロボット、血管内治療用マイクロロボットの3つの汎用手術ロボット・プラットフォームを開発する。初年度は現有のプロトタイプを基にプラットフォームを構築し、次年度よりスーパー・マイクロ・サージェリを実現する超精密ロボティック技術・超精密加工技術を開発・搭載する。本研究は、各手術領域を担当する医師と各要素技術を担当する工学系研究者からなる医工連携研究であり、産業界からの研究協力者も参加する産学連携研究である。この体制により、研究成果の早期臨床応用と産業化を目指す。

【期待される成果と意義】

(1)スーパー・マイクロ・サージェリを実現するメカニズムと安全性を高める技術の確立(図1)

人の手による手術では実現できない微細高精度手術を、微細加工技術を生かした特殊な構造による極細径多自由度鉗子により実現する。また、マスタとスレーブ間の座標系の対応手法の確立、力覚情報の強調・早期提示による安全性の確保などをスーパー・マイクロ・サージェリに特化した分野において確立する。ここで議論される手法は一般性を有し、他の手術分野・手術支援システムのユーザ・インターフェイスの構築においても適応可能である。

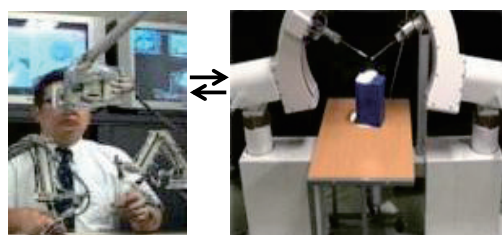


図1 スーパーマイクロサージェリ・システム

(2)生体適合性を有する骨切除手法を組み込んだトータル・システムの確立(図2)

これまでどのような手法をとれば生体適合性を有する骨切除ができるかの知見を確立してきた。そこで、本研究では生体適合性を有し、かつ、低侵襲で短時間に骨切除を行うトータルなシステムを構築する。これらを盛り込んだシステムはこれまでになく、特に、生体適合性を考慮したシステムは独創的であり、新たな学術分野を創成する。

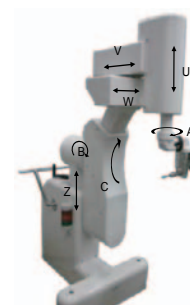


図2 硬組織ベース

(3)血管内治療用マイクロロボットの基礎プラットフォーム構築(図3)

血管内治療用マイクロロボットであり、外部磁場駆動方式を採用する。本研究では実際の血管に挿入可能である1mm以下、更には数ミクロンのマイクロロボットを実現するものでこれまでに例がない。特に、外部磁場を使うことでロボットがワイヤレスとなり、体内深部まで誘導可能となる。



図3 マイクロロボット

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・Ida Y., Sugita N., Ueta T., Tamaki Y., Tanimoto K., Mitsuishi M., A microsurgical robot to assist vitreoretinal surgery, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2011, in press.

・Sugita, N., Nakano, T., Abe, N., Fujiwara, K., Ozaki, T., Suzuki, M., Mitsuishi, M., Toolpath Strategy Based on Geometric Model for Multi-axis Medical Machine Tool, CIRP Annals, Vol.60, No.1, pp.419-424, 2011.

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
165,800千円

【ホームページ等】

<http://www.nml.t.u-tokyo.ac.jp/>
nml-staff@nml.t.u-tokyo.ac.jp

【基盤研究(S)】
理工系(工学I)



研究課題名 非線形誘電率顕微鏡の高機能化及び電子デバイスへの応用

東北大学・電気通信研究所・教授 ちょう やすお
長 康雄

研究分野: 工学

キーワード: 走査プローブ顕微鏡, 記憶・記録, 電子デバイス・集積回路, 誘電体

【研究の背景・目的】

研究代表者が発明・開発してきた走査型非線形誘電率顕微鏡(SNDM)を研究の核として、原子分解能 SNDM の更なる分解能の向上・適応範囲の拡大を図り、絶縁材料の原子種や、吸着原子が発生するダイポールモーメントの同定等を行う。また静電容量計測で原子分解能が発現する詳細なメカニズムを明らかにする。次に SNDM を用いた強誘電体記録を進展させる。高感度薄膜記録媒体の開発、回転ディスク型高速記録再生における超高密度記録の実現、パターンメディアの作製等を行う。更に SNDM を用いた半導体計測技術を開発させ、次世代の微細なデバイスに対応できるようにすると共に、従来静電容量計測では不可能と言われてきた故障解析への適応技術を開発することを目的とする。

【研究の方法】

①原子分解能 SNDM の更なる分解能の向上・適応範囲の拡大を図るため、高次非線形誘電率顕微鏡法を更に発展させより次数の高い非線形項まで検出できる超高分解能非線形誘電率顕微鏡法を開発する。この成果を応用し幅広い絶縁材料の原子種の同定等の SNDM ならではの長を生かした計測法の確立を行う。②次に現在まで大きく発展してきている強誘電体記録を更に発展させる。このため①で開発した手法を応用する。更に高感度薄膜記録媒体の開発、回転ディスク型高速記録再生における超高密度記録を実現する。③最後に、半導体中の蓄積電荷計測技術においては、①で開発した技術を元に、より微細なデバイスに対応できるようにする。更に従来静電容量計測では不可能と言われてきた故障解析を可能にする。その上で Si デバイスに限らず化合物半導体素子等の次世代の高性能半導体素子の評価法を確立する。

【期待される成果と意義】

SNDM は本申請者が開発した純国産技術であり、得られた成果もその基礎から応用まで独自に開発された極めて独創的なものである。本研究課題が遂行されれば世界で初めての原子スケールで電気双極子モーメント分布の計測ができる顕微鏡の実用化が予想され、強誘電体超高密度記録においては高速かつ高密度な記録が可能となり、更に

SNDM を用いた半導体デバイスの計測技術の発展により、超高性能で微細な次世代半導体素子の開発が可能となると考えられる。

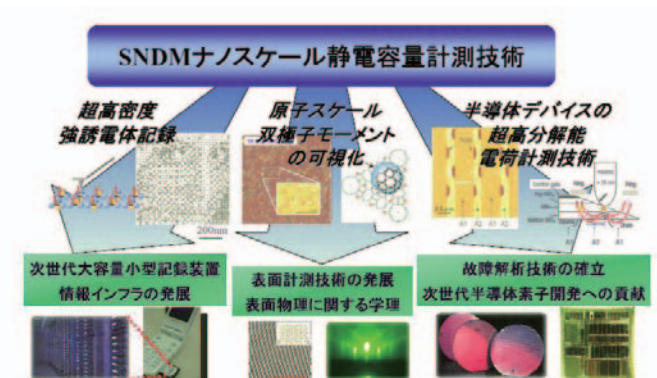


図1 将来展望—SNDM ナノサイエンス&テクノロジーの創生—

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Yasuo Cho and Ryusuke Hirose: "Atomic Dipole Moment Distribution of Si Atoms on a Si(111)-(7×7) Surface Studied Using Noncontact Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy", Physical Review Letters, Vol.99, pp.186101-1-4 (2007).
- Kenkou Tanaka and Yasuo Cho, "Actual information storage with a recording density of 4 Tbit/in.² in a ferroelectric recording medium" Appl. Phys. Lett, Vol.97, pp.092901-1-3 (2010).

【研究期間と研究経費】

平成23年度—27年度
161,800千円

【ホームページ等】

[http:// www.d-nanodev.riec.tohoku.ac.jp/yasuocho@riec.tohoku.ac.jp](http://www.d-nanodev.riec.tohoku.ac.jp/yasuocho@riec.tohoku.ac.jp)



研究課題名 シリコンナノ構造を基盤としたドーパント原子デバイスの開発

静岡大学・電子工学研究所・教授 田部 道晴 (たべ みちはる)

研究分野: 工学

キーワード: 電子デバイス・集積回路、シリコン、ドーパント、原子デバイス

【研究の背景・目的】

シリコンテクノロジーは、トランジスタの発明以来ドーパント不純物原子を利用して発展してきた。これは多数のドーパント原子を統計平均化して扱うものであり今日まで有効に機能してきたが、最近素子の微細化が進みドーパントの数や配置の揺らぎがデバイス特性に大きな影響を与えるようになってきた。これは半導体デバイス原理に関わる問題であり抜本的な解決策が求められている。一方、極限的デバイスの観点から単ドーパントによる FET 特性が我々を含むいくつかのグループから報告されて始めている。

本研究は、個々のドーパント原子を利用したドーパント原子デバイスの開発を目指すものである。1個のドーパント原子を用いたトランジスタを基本とし、さらに2個～数個を利用したメモリ、単電子転送デバイス、フォトニックデバイスなどドーパント原子デバイス群の開発を目指す。並行してドーパント原子導入プロセス、検出技術および第一原理計算によるナノ物性の研究を総合的に行って、ドーパント原子デバイス工学の基盤を構築する。

【研究の方法】

本研究計画では、ドーパント原子デバイス、ドーパント高精度導入プロセス技術、ドーパント位置検出技術および第一原理計算による理論的解析を総合的に進める。特に、デバイスでは本研究計画の要となる単一原子トランジスタに最重点を置くとともに、将来の集積化を想定した時に重要となると思われるメモリ、単電子転送、およびフォトン検出デバイスの動作実証を行う。

【期待される成果と意義】

本研究計画の目的は、従来技術の延長ではなく、原子デバイスの学問・技術体系の構築である。オーストラリア・欧・米を中心として、リンのスピンの利用した量子コンピュータの研究が見られるが、世界的に見て類似の研究はほとんどない。本研究から生み出される原子デバイスはスケールアップの極限に位置する究極の低消費電力デバイスであり、大きなオンオフ比を持つ単電子 FET や、電子1個単位で書き込みするメモリ、電子1個を正確に転送制御できるデバイス、光情報処理と融合するフォトニックデバイスなど、いずれも革新的な新デバイス群である。さらに、ドーパント原子の複合化などによりデバイスの室温動作を目指しており、これらが実現できれば実用化への道が大

きく開かれる。その先には集積化ナノエレクトロニクスやナノフォトニクスとの融合など広範な産業応用が待ち構えている。

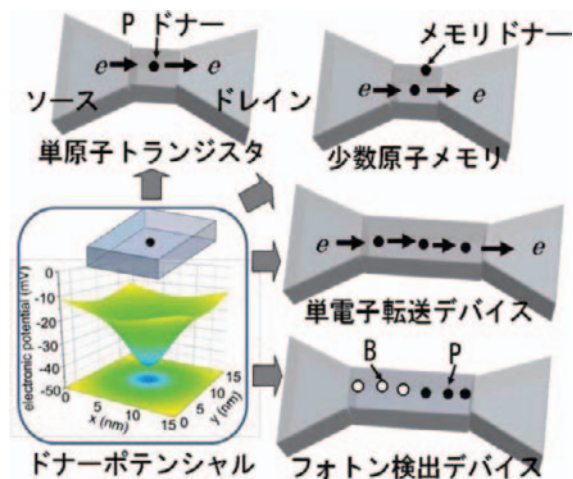


図1. 動作実証を目指すドーパント原子デバイス

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- M. Tabe, D. Moraru, M. Ligowski, M. Anwar, R. Jablonski, Y. Ono and T. Mizuno, "Single-Electron Transport through Single Dopants in a Dopant-Rich Environment", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.105, pp.016803-1-4 (2010).
- E. Hamid, D. Moraru, J. C. Tarido, S. Miki, T. Mizuno and M. Tabe, "Single-electron transfer between two donors in nanoscale thin silicon-on-insulator field-effect transistors", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, pp.262101-1-3 (2010).

【研究期間と研究経費】

平成23年度～27年度
161,100千円

【ホームページ等】

<http://www.rie.shizuoka.ac.jp/~nanohome>
romtabe@rie.shizuoka.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系(工学I)



研究課題名 マイクロフルイディックエンジニアリングの深化と生体分子高感度定量計測への展開

早稲田大学・理工学術院・教授

しょうじしゅういち
庄子 習一

研究分野：計測工学

キーワード：計測システム、MEMS・NEMS、マイクロバイオシステム

【研究の背景・目的】

本研究では、MEMS および NT をマイクロスケールの流体に応用することにより実現するマイクロフルイディックエンジニアリングで培われた技術に応用し、微小発光サンプルの光学的超高感度定量計測を可能とすべく、on demand 型の光学的補助機能を組み込んだマイクロ流体デバイスを開発する。その実現の為、マイクロ流体内超高感度光学観察場の on demand 構築技術及びそれをサポートする周辺技術の構築、並びに超高感度光学的定量計測に適した微小サンプル前処理技術を開発し、超高感度光学定量計測を実現する。本研究の遂行により、従来定性的観察のみ可能であった光学信号を高感度な定量的計測結果を得るのに十分なレベルに引き上げ、光学的定量計測を可能とする。これにより、極微量サンプルのロスのないリアルタイム分析や、従来不可能であった希少サンプルの定量計測を目指す。

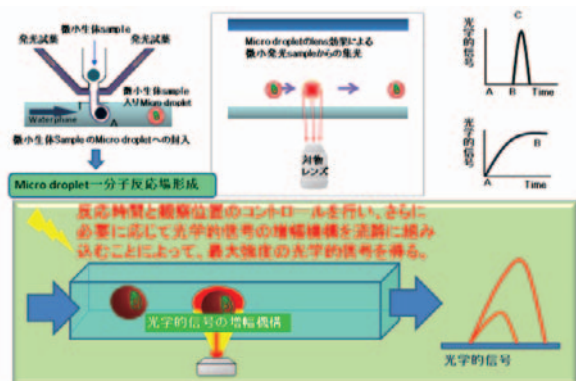


図1：本研究の概念図

【研究の方法】

以下について要素技術の確立を行ったのち、開発した要素技術の集積化とシステム化を行う。

- ①マイクロレンズやマイクロピラー、超フラットガラス平面等の光学部品の in channel での作製技術及びサポートする補助光学部品の作製技術。
- ②三次元フローコントロール技術やナノ・マイクロ磁性粒子を Micro Droplet に閉じ込める技術等を用いて、光学部品及び発光化処理された微小サンプルを所定の場所に安全かつ高速に搬送する技術。
- ③Micro droplet 等による微小サンプルの発光コントロールを実現するための超高感度光学的定量計測に適した微小サンプル前処理技術。

【期待される成果と意義】

本研究の遂行により、超微小サンプル(細胞、細菌、オルガネラ、DNA、ナノパーティクル等)を光学計測に最適な前処理を施した上でマイクロ流体デバイス内の光学計測場まで、一つずつ安全かつ高速に搬送する事が可能となる。また、反応の種類に応じた最適なタイミングでの発光処理技術及び On Demand 観察場構築技術の適用により、発光反応のピークにおける光信号の観察が可能となり、定性的観察から定量的計測へのレベルアップが期待される。信号強度の増加により、光学システム全体の小型化が可能となり、現在小型が進む光源・光検出デバイスとの整合が期待され、将来 ON SITE での分析が実現できると考えられる。更に、サンプルロスのない効率的なリアルタイム計測・観察の実現が可能となり、希少サンプルの検出など新たな市場の創出が期待される。



図2：本研究の波及効果

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

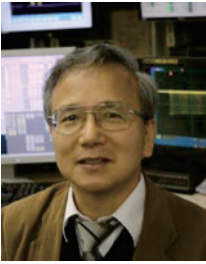
1. K. Ozaki, H. Sugino, T. Funatsu, S. Shoji, et al., "Microfluidic Cell Sorter with Flow Switching Triggered by a Sol-Gel Transition of a Thermo-Reversible Gelation Polymer", Sensors and Actuators B 150 (2010) pp.449-455
2. T. Arakawa, Y. Shirasaki, T. Funatsu, S. Shoji, et al., "Rapid Multi-Reagents Exchange TIRFM Microfluidic System for Single Biomolecular Imaging", Sensors and Actuators B 128, June 2007 (2007) pp.218-225

【研究期間と研究経費】

平成23年度－27年度
166,100千円

【ホームページ等】

<http://www.shoji.comm.waseda.ac.jp/>



研究課題名 超放射による超小型短パルス・コヒーレントテラヘルツ光源

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授 浦川 順治

研究分野: 工学、応用物理学・工学基礎、応用物理学一般、加速器

キーワード: 高周波電子銃、フェムト秒レーザー、フォトカソード、高電界加速、自由電子レーザー

【研究の背景・目的】

約 0.3~10THz のテラヘルツ波は電波と光波の中間領域で、このコヒーレントな短パルス高強度光源は急速に拡大するテラヘルツ波応用研究にブレークスルーを与える。10 パルス以上のフェムト秒レーザーパルス列を光陰極に照射して、フェムト秒の電子バンチ列を数十 MV/m 以上の高周波電場で加速する。これによって、10 パルス以上のフェムト秒電子マイクロバンチ列(Comb Beam)が一つの高周波加速電場に乗れ、7.5cm 高周波空洞で 5MeV 以上に加速できる。Comb Beam が小型(30cm) ウィグラーを通過すると、超放射が THz 領域で起きる。目的は、0.3~10THz 可変、短パルス 10MW 以上、数十 μ J/pulse 放射の超小型高輝度コヒーレント THz 光源研究開発とその応用研究である。

Peak power 10MW 以上は従来の THz 光源の 100 倍程度であり、世界で開発が進められている先端加速器技術を使った 10m サイズの装置で生成されている THz 光源の強度に匹敵する。本光源によって、THz 時間領域分光(THz-TDS)の測定時間の大幅な短縮、測定精度の大幅な向上が可能になる。また、フェムト秒時間スケールの現象や多光子吸収による非線形科学現象を高精度で捉えることが可能になる。THz 光科学は、宇宙の誕生・生命科学から安全/安心技術・情報通信・産業応用などに本質的に関わるものであり、次世代の科学技術発展に極めて重要である。これらの応用実験は本開発装置(図参照)を使って平成 26 年度から実施する。

【研究の方法】

高周波空洞内で生成光電子の時間構造を保存して加速するためには、クーロン反発力に打ち勝ちかつ動力的にバンチ圧縮が生じる高周波位相に乗せる必要がある。光陰極高周波電子銃のカソード端板は空洞の高電界が発生する位置に固定されている。加速電界が増加する位相(20度)で 100fsec ミクロパルスがカソードに照射された場合、S-band(2856MHz)高周波加速電界(130MV/m)は 44.46 から 44.68MV/m まで変化して、後続の光電子は少し大きな加速を得て動的なバンチ圧縮と同時に急速な加速を受け、相対論的なエネルギーに近づくことによってクーロン反発力とローレンツ力が釣り合うようになる。先頭のミクロパルスと最後のミクロパルスの時間差は 8psec 程度であり、位相差で 8 度程度である。加速電界は 61.03MV/m まで増加するので、8psec のバンチが高周波電子源出口で 30%程度バンチ圧縮を受け

ることになる。シミュレーションによって予測された電子マイクロバンチ構造を CDR(Coherent Diffraction Radiation)測定によって確認する。

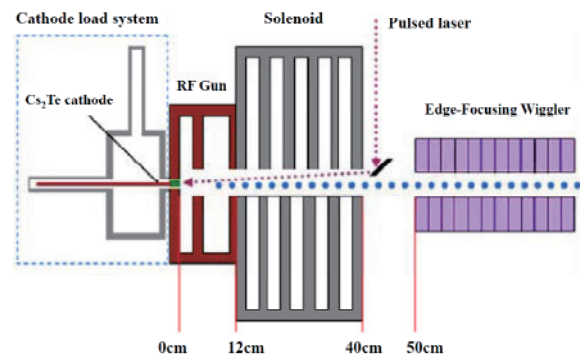


図 超小型短パルス・コヒーレントテラヘルツ光源

【期待される成果と意義】

生成 THz の波長にマイクロバンチ間隔を合わせることによって狭帯域のコヒーレント THz 波発生が行える。高周波空洞内の高周波高電界加速により如何に理想的な Comb Beam 形成ができるかによって、小型(30cm) ウィグラーからの超放射 Peak power が 100MW 以上にもなる。画期的な THz 光源利用が展開できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

“Femtosecond pulse radiolysis and femtosecond electron diffraction”, Jinfeng Yang, Koichi Kan, Takafumi Kondoh, Yoichi Yoshida, Katsumi Tanimura, Junji Urakawa, NIM, A 637, pp. S24-S27, 2011
“Experimental results of an rf gun and the generation of a multibunch beam”, Abhay Deshpande, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Kazuyuki Sakaue, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masakazu Washio, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 14, 063501-1-9, 2011
“Improvement of an S-band RF gun with a Cs₂Te photocathode for the KEK-ATF”, N. Terunuma, M. Fukuda, K. Sakaue, J. Urakawa et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 613, 1-8, 2010

【研究期間と研究経費】

平成 23 年度 - 27 年度
154,700 千円

【ホームページ等】

<http://www-atf.kek.jp/thz/>
junji.urakawa@kek.jp

【基盤研究(S)】
理工系(工学Ⅱ)



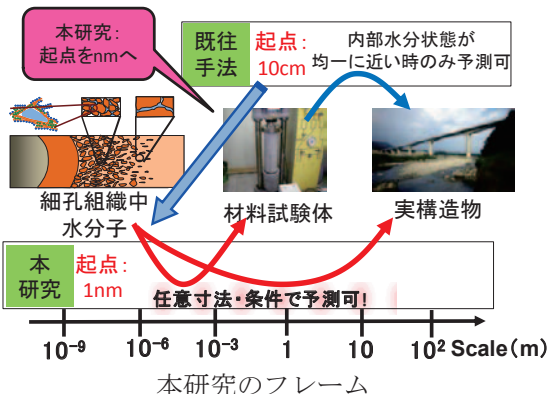
研究課題名 水分子準平衡モデルに基づく大型RC-PC社会基盤構造の長期動態予測

東京大学・大学院工学系研究科・教授 まえかわこういち
前川 宏一

研究分野：土木工学 土木材料・施工・建設マネジメント
キーワード：コンクリート

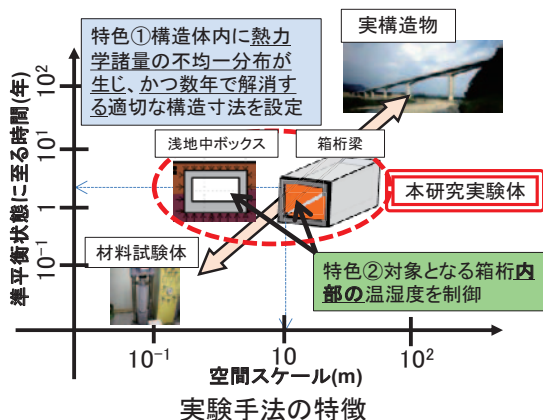
【研究の背景・目的】

セメント系無機多孔体中に存在する水分子の準平衡状態と、それらが有する総運動量の変化を時空間軸で厳密に追跡するマルチスケール解析に基づき、継続的な日射・降雨・乾湿繰り返し・外荷重の組み合わせに曝されるRC-PC実構造の長期動態予測を実現することが、本研究の目的である。世界的な懸念事項となりつつあるPC橋梁の長期(30年超)過剰たわみ問題と、浅地中構造の中期(10年超)過剰変形問題の主因を究明し、1950年代に確立されたクリープ・乾燥収縮設計法と変形制御及び静土圧に関する使用限界状態設計法の再構築を図ることが、本研究の眼目である。



【研究の方法】

既往のクリープ変形予測手法の起点となる材料試験体の熱力学的な状態は、比較的短期間で外環境と平衡状態に到達する。しかし、実構造では構成部位ごとに異なる水分平衡状態が長期に継続し、既往の手法で予測された時間依存変形よりも過大な変形が生じている可能性が高い。本研究では一定期間、部材内に異なる含水状態が維持されつつ、



数年で均一状態に収束すると予見される中規模中空断面構造を対象とする。この箱桁内空の温湿度を制御した実験系を組み、各部位の熱力学状態量と構造変形量を同時に計測することで、マルチスケール解析による予測を検証する。実構造物では約百年後に至る熱力学的平衡状態を実験供試体において数年間で模擬・達成することで、実構造物の百年単位で発生する過剰変形現象の先読みを可能とするものである。

【期待される成果と意義】

部材厚が1m以上では、細孔水分のインクボトル効果の長期解消現象に代表される準平衡状態の変化は、数十年以降になって漸く現れると予見している。この場合、基本クリープ試験に基づく従来の設計法は、結果としては機能する。他方、20cm以下の部材厚では、1年を待たずに部材中心部は外環境と直接平衡に近似するため、実務設計で用いられる乾燥クリープ係数による調整を行うことで、おおよそそのたわみ予測は可能と思われる。しかし、中空箱型PC上部工や中規模地中カルバート・トンネルのように、30~50cm厚の中規模部材で構成される社会基盤構造では、その長期動態変化は本研究による方法以外に予見することは困難と思われる。物質移動と平衡に関する寸法効果を取り入れた新たな設計制御法と、過剰変形の制御方法を併せて本研究で提示したい。あわせて、既存の大型社会基盤施設の維持管理、予防的補強、リスク評価に適用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】

- Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Structural Concrete : Taylor & Francis, 2009
- Maekawa, K., Chijiwa, N. and Ishida, T. : Long-term deformational simulation of PC bridges based on the thermo-hygro model of micro-pores in cementitious composites, Cement and Concrete Research, 2011

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
172,800千円

【ホームページ等】

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



研究課題名 統合型水循環・水資源モデルによる世界の水持続可能性
リスクアセスメントの先導

おき たいかん
東京大学・生産技術研究所・教授 沖 大幹

研究分野: 工学

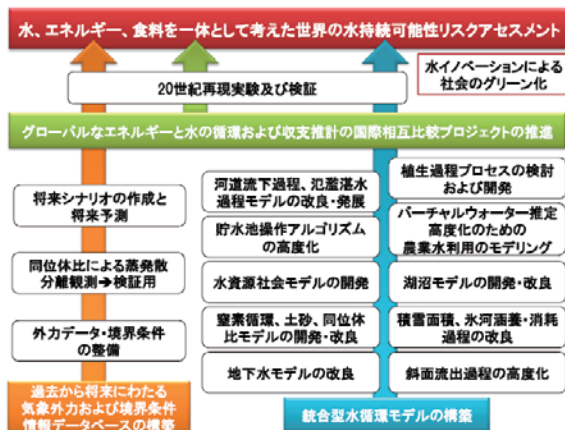
キーワード: 水文学、グローバルな水循環、気候変動、人間活動

【研究の背景・目的】

途上国を中心として人口が増加し、増えた人口が都市に集中し、経済発展に伴って生活・工業・農業用水のいずれもが増大すると想定される今世紀に、地球上の限りある水資源は人類の需要を果たして満たし得るのであるか。水が成長の限界となる可能性はないのだろうか。こうした問いに的確に答えるためには、自然の水循環と人間社会の水需要の両者を統合した水循環・水資源モデルによる現状の評価ならびに将来推計が必要である。

地球科学的な水循環モデルを基礎とし、詳細なプロセス研究に基づいて人間活動、作物生育、環境用水等を考慮可能な人間-自然系の統合水循環・水資源モデルによる世界の水問題研究は依然として日本が世界をリードしている。

本研究では、より一層現実に即した実用的な水資源需給評価を可能とするため、これまでに開発してきた統合水循環・水資源モデルをさらに発展させ、高性能化すると共に、全球水循環・水資源モデル比較の国際共同研究計画(GSWP3)を主導し、世界の主要研究グループによるモデル推計値を総合して信頼度の高い世界の水循環・水資源需給情報ベースを構築する。この成果をWebで公開すると共に、水、エネルギー、食料を一体として考えた世界の水持続可能性リスクアセスメントを行い、今後の気候変動、社会変化が水を通して人類の持続可能性に及ぼす影響を明らかにする。



【研究の方法】

開発してきた統合水循環・水資源モデルの水収支部分を先端的な陸面植生水文モデルに置き換えると共に、大気中の二酸化炭素濃度変化に対する植生の応答などに関して最新の知見を取り込むな

ど、さらなる改良、発展を図る。長期気象外力データ、地表面パラメータ、気候変動・社会変化シナリオを整備して GSWP3 を主導し、複数の推計値に基づき世界の水循環・水資源に関する最適推計値を得る。得られた水情報データベースに基づき、今後の気候変動と社会変化が、渇水洪水被害、水質汚染、水力発電量、食料生産などに及ぼす変化をその不確実性を考慮しながら推計し、将来の社会における水利用に関わるリスクとして、世界の持続可能性に及ぼす影響を評価する。

【期待される成果と意義】

本研究で構築される信頼度の高い世界の水循環・水資源需給情報は、水分野における気候変動への適応策計画、国際援助や水ビジネスによる世界の水問題解決などの際の意思決定、あるいは現在国際標準化機構(ISO)によって推計手法の世界標準化が進められているウォーターフットプリントの推計などにも利用されることが期待される。学術・科学技術の成果が国際政治、外交に利用される現代において、日本独自の情報源があることは極めて意義深い。また、改良発展される統合水循環・水資源モデルはスマートシティ構想におけるスマートウォーターを支える先端的な水情報システムの基盤となることも期待されるなど、本研究は最先端の学術的成果が得られるばかりではなく、社会的にも重大な意義が認められる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Oki, T. and S. Kanae, 2006: Global Hydrological Cycles and World Water Resources, *Science*, Vol.313(5790), pp1068-1072.
- Hanasaki, N., T. Inuzuka, S. Kanae, T. Oki, 2010: An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model, *Journal of Hydrology*, 384, pp232-244.

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
134,300千円

【ホームページ等】

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



研究課題名 水都に関する歴史と環境の視点からの比較研究

法政大学・デザイン工学部・教授 じんないひでのぶ
陣内 秀信

研究分野：都市史、建築史

キーワード：水都、類型学、サステナビリティ、文化的景観

【研究の背景・目的】

世界には、魅力的な水都が数多く存在する。海や川の水辺に立地し、舟運により経済を繁栄させ、美しい景観や華やかな文化を育んだ。だが、工業化を進め車中心の陸の時代となった20世紀には、水辺の空間が先ず犠牲になり、市民にとって遠い存在になった。歴史は巡って21世紀の今、都市の川や海を再び人々の手に取り戻す絶好のチャンスを迎えている。効率と機能性を追求しエネルギーを大量消費してきた陸の論理を乗り越え、海から、そして川から都市や地域を捉え直し、自然のもつ豊かさを環境形成の根幹に取り戻すための研究が求められている。

法政大学には、水の都市の再生を研究する「エコ地域デザイン研究所」の7年間にわたる研究成果があり、国際的なネットワークが形成されている。本研究はその蓄積を活かし、歴史と環境の視点を結合する独自性をさらに発展深化させながら、世界の水都を学際的かつ総合的に研究する。本来、豊かな水の環境と生活文化を歴史のなかで育んできた「東京」の水都としての特徴を、国際的な視点から比較解明することも大きな目的である。

【研究の方法】

異なる歴史観、環境観をもつ西の世界(欧米)と東の世界(アジア・日本)をグローバルな視点で比較研究する。従来、別の専門領域として扱われがちだった「歴史」と「環境」を結合し、水都の形成・変容・再生の動態をサステナビリティの視点から考察する。

対象としては、ヴェネツィア、蘇州、バンコク、アムステルダム、東京や大阪のような水網都市から、アマルフィ、ジェノヴァ、鞆のような入江の中世・近世都市。ロンドン、パリ、フィレンツェ、京都等の内陸河川沿いの都市。そしてニューヨーク、シドニー等の近代の港町など、都市類型に分けて調査研究し、水の機能・役割・意味が古代・中世から近代まで時代とともに変遷し、空間構造が変化した状況を動的に捉える。

古地図、文献史料、絵画史料を活用しつつ、現地フィールド調査を実施し、歴史的につくられた空間が現在の都市にいかに関与しているかを調べる点も大きな特徴である。水都の

再生という現代の課題にとってもそれが重要な方法になると考えている。

【期待される成果と意義】

従来、相互に関係が薄かった河川工学、水循環・水資源・生態学の分野と建築史・都市史、そして都市計画・都市づくり等の学問分野の間に水を媒介に相互の連携が生まれる。特に建築史・都市史に川、海からの視点を導入することにより、水の側から都市や地域を見る新たな方法が確立でき、同時に、水循環の仕組みを環境構成の基層から把握することで、サステナビリティの視点から都市を捉え直すことが可能になる。

世界における西と東の地域の比較考察を通じて、相互の知恵の交流を推進できる。特に、江戸東京等、日本の都市が本来はエコシティであったことを歴史と環境の結合によって実証することによって、水と密接に結びついた21世紀型の都市づくりの理念と手法の日本モデルを確立し、海外に発信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】

- ・法政大学エコ地域デザイン研究所編『水の郷 日野-農ある風景の価値とその継承』鹿島出版会、2010年。
- ・陣内秀信『イタリア海洋都市の精神』講談社、2008年。
- ・陣内秀信監修：出口清孝・森田 喬 ほか、エコロジーと歴史にもとづく地域デザイン、学芸出版社、2004年。
- ・H.Jinnai, *Tokyo: A Spatial Anthropology*, University of California Press, Berkeley, 1995.

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
105,500千円

【ホームページ等】

<http://suito.ws.hosei.ac.jp>
<http://eco-history.ws.hosei.ac.jp/>

【基盤研究(S)】
理工系 (工学Ⅱ)



研究課題名 量子化磁束のダイナミクス制御と物質科学への展開

九州工業大学・大学院工学研究院・教授 まつもと かなめ
松本 要

研究分野：理工系・工学・材料工学・無機材料・物性
キーワード：(A) 結晶構造・組織制御

【研究の背景・目的】

2 つ以上の物質からなるナノ複合・ヘテロエピタキシャル薄膜はまったく新しい機能性材料を生み出す可能性に満ちている。例えばゼロ抵抗超伝導電流の上限を極限にまで高めた高性能超伝導薄膜、磁性相と強誘電体相を同一膜中に共存・制御するマルチフェロイック薄膜、変換効率を飛躍的に高めた量子ドット型太陽電池薄膜など多くの有望なターゲットがある。この技術は異なる物質相や秩序相、異種結晶界面や局所ひずみ、結晶構造や電子状態の急峻な変化・パターン、等々をエピ膜中に作り出し、相固有の特徴的長さ・量子効果と物質との最適な相互作用を引き出すことを可能とする。本研究では、ナノ複合・ヘテロエピタキシャル薄膜技術を発展させ、超伝導電流の上限を理論限界近傍にまで高めるための道筋を明らかにするとともに、得られた知見の様々な機能性材料への展開も目指す。

【研究の方法】

超伝導秩序相を規定する重要な熱力学的パラメータとして、臨界温度 T_c 、上部臨界磁場 B_{c2} 、および対破壊電流密度 J_0 がある。 T_c と B_{c2} は小さな電流密度下で実測できるためよく理解されているが、 J_0 の実測には大電流通電が必要である。しかし J_0 に達するはるか以前に、ローレンツ力に耐え切れず量子化磁束のピン止めがはずれてしまうので、熱力学的上限に近い臨界電流密度 J_c は実現されたためではない。本研究では応用の可能性を飛躍的に拡大することを念頭に、現状の $J/J_0=1\sim 10\%$ の限界を超え、 $J/J_0=30\sim 50\%$ という大きなローレンツ力下の磁束物理という新分野を開拓する。そのため、①最適ピン構造の設計、②ナノ

複合・ヘテロエピ薄膜作製技術、③マイクロ構造および物性キャラクタリゼーションの3つの観点から研究を進め、量子化磁束の強力なピン止め構造を超伝導体中に導入する。

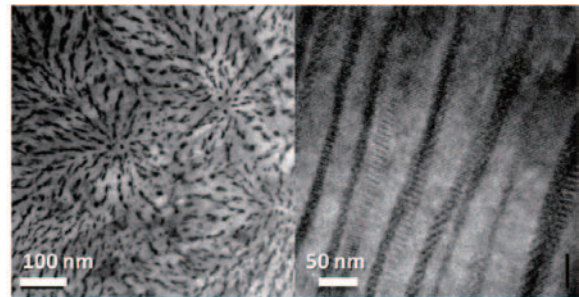


図2 ナノ複合・ヘテロエピ薄膜法によるピン構造の例

【期待される成果と意義】

本研究では、熱力学的理論限界の J_0 に限りなく近い J_c の実現を目標とするが、まず $J/J_0=30\sim 50\%$ を達成する道筋を示すことは、量子化磁束制御技術の金字塔となる。また、その道筋において自在なナノ複合・ヘテロエピ構造作製プロセス、原子・分子レベルからの設計・評価、および大規模計算などの知見を積むことは、他の機能性ナノ複合・ヘテロエピ薄膜への展開にも有効である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ K. Matsumoto, P. Mele, “Artificial pinning center technology to enhance vortex pinning in YBCO coated conductors”, *Supercond. Sci. Technol.* **23**, pp. 014001–pp. 014013, 2010.
- ・ Tomoya Horide, Kaname Matsumoto *et al.*, “Control of the glass-liquid transition temperature in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ films”, *Phys. Rev. B* **79**, pp. 092504–pp. 092507, 2009.

【研究期間と研究経費】

平成23年度－27年度
159,600千円

【ホームページ等】

<http://w3.matsc.kyutech.ac.jp/energy/index.html>

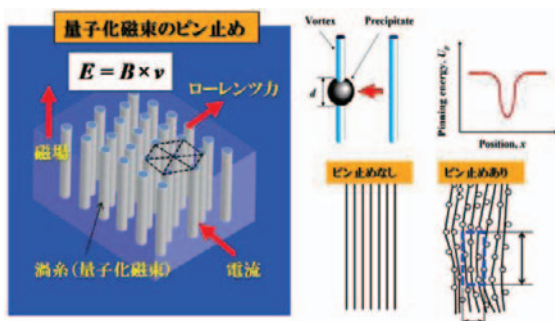


図1 量子化磁束のピン止めの概念図

【基盤研究(S)】

理工系(工学II)



研究課題名 燃料電池高耐久性電極触媒設計工学の構築

九州大学・大学院工学研究院・教授 ささき かずなり
佐々木 一成

研究分野: 工学

キーワード: 燃料電池材料

【研究の背景・目的】

代表的な固体電気化学デバイス・システムの一つである燃料電池は、重要な環境共生型エネルギー技術として期待されている。固体高分子形燃料電池(PEFC)の性能を左右し、決定づけるのが電極触媒である。特に実作動条件下での耐久性を確保するためには、起動停止や待機運転、出力変動などに伴う電池セル電位の変動に対しても十分な耐久性を示す必要がある。この耐久性確保における最大の技術課題が、カソード(空気極)のPt系電極触媒を担持しているカーボンブラック担体の高電位下での酸化腐食(Carbon Corrosion)である。10~20年間の燃料電池車などの寿命を保証するためには、根本的な解決策として、カーボン担体を用いない高耐久性の電極触媒材料創製によるブレークスルーが不可欠である。

当研究代表者らは、導電性酸化物を電極触媒担体として用いることで、車の寿命に相当する6万回の高電位サイクルへの耐性を、世界に先駆けて達成することに成功した[1,2]。本基盤(S)プロジェクトでは、この当研究室オリジナルの高耐久性「カーボンフリー電極触媒」を用いた電池セルを開発して実作動条件下で性能と耐久性を検証・実証するとともに、関連する固体電気化学、化学熱力学、触媒化学、材料プロセス工学、機械工学を融合した電極触媒設計工学を構築し、燃料電池や関連する電気化学デバイスの設計論への展開を図ることを目的とする。

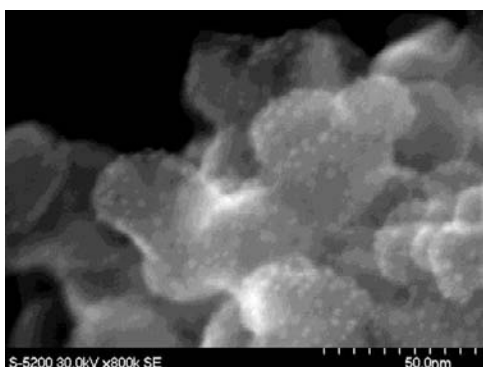


図: Pt/SnO₂ 触媒の FESEM 写真。数十 nm 径の酸化スズ粒子の表面に、数 nm 径の白金触媒微粒子が高分散担持。

【研究の方法】

電極触媒設計工学の新展開につながる高耐久性

電極触媒の材料開発のための具体的な研究項目として、(1) 超強酸環境下での安定性同定と溶出速度の定量化、(2) 新規担体材料を用いた電極触媒材料の創製とナノ構造制御、(3) 酸化物担持電極触媒の電子・イオン伝導性と欠陥化学、金属/半導体接合体の界面特性評価、(4) 高耐久性燃料電池の試作・開発と実作動条件下での実証、(5) 関連する電気化学デバイスへの応用に取り組む。固体電気化学、固体イオニクス、材料プロセス工学、機械工学を専門とする研究チームで研究を進めるとともに、世界トップレベル研究拠点(WPI)の燃料電池研究部門所属の海外研究者とも連携して、電極触媒設計工学の体系化へ発展させる。

【期待される成果と意義】

本研究は、燃料電池はもちろん、水電解や水素ポンプなどの他の電気化学デバイスへの応用にも展開できる。担体は電極触媒材料の骨組みであり、金属/半導体接合体の科学として根本的に異なる学術的アプローチにもつながる。技術的課題に対して成果を出すことはもちろん、将来の更なる展開に寄与する設計工学を確立でき、燃料を燃やさずに使う、高効率な低炭素エネルギー社会の実現[3]に貢献できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- 1) K. Sasaki, F. Takasaki, Z. Noda, S. Hayashi, Y. Shiratori, K. Ito, "Alternative Electrocatalyst Support Materials for Polymer Electrolyte Fuel Cells.", *ECS Transactions*, **33** [1] 473-482(2010).
- 2) A. Masao, Z. Noda, F. Takasaki, K. Ito and K. Sasaki, "Carbon-Free Pt Electrocatalysts Supported on SnO₂ for Polymer Electrolyte Fuel Cells", *Electrochem. Solid-State Lett.*, **12** [9] B119-B122 (2009).
- 3) 佐々木一成、水素エネルギー：現状と将来展望、日本機械学会誌、**114** [4] 265-267 (2011).

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
166,000千円

【ホームページ等】

<http://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~hup/sasaki@mech.kyushu-u.ac.jp>



研究課題名 磁気微粒子合成オルガネラの再構築による有用物質生産
磁性細菌の創製

東京農工大学・学長 まつなが ただし
松永 是

研究分野: 工学、プロセス工学、生体機能・バイオプロセス

キーワード: 応用微生物、ゲノム、細胞・組織、生体機能利用、バイオテクノロジー

【研究の背景・目的】

磁性細菌は、池や川などの底泥中に見られるバクテリアで、細胞内におよそ数十～百ナノメートルの大きさの磁気微粒子を合成する。その組成はマグネタイト(Fe_3O_4)であり、人工的には合成の困難な多面体や弾丸状、勾玉状などの多様な形態の磁気微粒子を合成する。また、粒子の表面は脂質の二分子膜に覆われており、ここにタンパク質やDNAなどの分子を修飾することで、バイオ計測や物質回収に応用できる。研究代表者らのこれまでの研究において、磁気微粒子は細胞内小器官(マグネトソーム)の中で合成されることがわかっている。また、比較ゲノム解析から、マグネトソームに局在し、その形成に関わるタンパク質の遺伝子を同定した。

本研究では、マグネトソームの形成に関わるタンパク質の機能と局在を解析し、ゲノムの再編によるマグネトソームの再構築を行う。さらにタンパク質の発現制御や機能改変により、細胞を用いて磁気微粒子を自在に合成する技術を開発する。

【研究の方法】

本研究では、研究代表者らの分離した *Magnetospirillum magneticum* AMB-1 株 (図 A) と *Desulfovibrio magneticus* RS-1 株 (図 B) の 2 株の磁性細菌と、これらの遺伝子組換え株を利用する。これまでの研究において、2 株の磁性細菌の全ゲノムを明らかにし、磁気微粒子合成オルガネラであるマグネトソームに局在するタンパク質とその遺伝子を同定した。本研究では、これらの遺伝子、タンパク質の情報に基づいて多様な遺伝子欠損株を作製し、磁気微粒子の形態や細胞内構造を解析する。また、マグネトソームタンパク質の細胞内での局在解析、マグネトソームタンパク

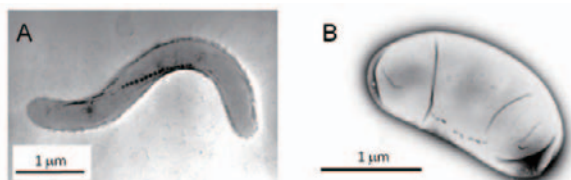


図 磁性細菌 *Magnetospirillum magneticum* AMB-1 株(A) と *Desulfovibrio magneticus* RS-1 株(B) の電子顕微鏡写真

質をコードする遺伝子の発現解析を行い、マグネトソームの機能と構造を分子レベルで理解する。

一方で、これまでの研究において大規模な遺伝子領域の欠損によってマグネトソーム形成能を失

った突然変異株が得られている。マグネトソームの形成に関わる遺伝子を欠損株に導入することで、マグネトソームを細胞内で再構築する。さらに、遺伝子への変異導入によるタンパク質の機能や構造の改変、タンパク質発現量やタイミングの調節を行い、マグネトソームの機能を人工的に制御する。これにより、磁気微粒子のサイズや形態、組成の自在な改変を実現する。

【期待される成果と意義】

複雑な構造や機能を持つオルガネラをゲノム再編により細胞内に再構築した例はこれまでになく、システムバイオロジーや合成生物学の研究分野に指針を与えることができる。また、本研究は酸化鉄バイオミネラリゼーション機構の解明にも繋がると考えられる。さらに、これらの基礎研究は、機能性磁気微粒子の生産や磁性細菌の磁気回収能を利用した物質生産への利用など、産業利用微生物の応用範囲の拡大に繋が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】

M. Tanaka, E. Mazuyama, A. Arakaki, and T. Matsunaga; "Mms6 protein regulates crystal morphology during nano-sized magnetite biomineralization *in vivo*." *J. Biol. Chem.*, 286, 6386-6392 (2011).

H. Nakazawa, A. Arakaki, S. Narita-Yamada, I. Yashiro, K. Jinno, N. Aoki, A. Tsuruyama, Y. Okamura, S. Tanikawa, N. Fujita, H. Takeyama, and T. Matsunaga; "Whole genome sequence of *Desulfovibrio magneticus* strain RS-1 revealed common gene clusters in magnetotactic bacteria." *Genome Res.* 19, 1801-1808 (2009).

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度

160,800千円

【ホームページ等】

<http://www.tuat.ac.jp/~matunaga/tmatsuna@cc.tuat.ac.jp>



研究課題名 流出重油・ガスの自動追跡システムの確立と革新的
海洋防災システムへの展開

大阪大学・大学院工学研究科・教授 かとう なおみ
加藤 直三

研究分野：総合工学(船舶海洋工学)

キーワード：海洋探査・機器，環境保全技術，環境モデル，安全システム

【研究の背景・目的】

本研究は、船舶からの重油流出事故や海底の油やガスの生産施設からの流出事故に際し、油やガスなどの海底生産施設まわりの重油やガスのプルームの追跡を行う海中ロボットや、海面の流出重油を回収まで自動的に長期間に亘り追跡し、リアルタイムで情報を供給する複数の浮遊式浮流重油自動追跡ブイロボットに関する自動追跡システムを確立する。次に、ロボットから得られた油やガスの漂流位置、海象条件および浮流重油の性状に関するデータを使い、重油拡散シミュレーションの精度向上を図ることで、海底生産施設まわりの定期的な環境モニタリングを行うことや、流出重油の海上での回収や流出重油の漂流が予測される地域への適切な油防除機材の配置を行うことによって、革新的海洋防災システムへの展開を図る。

【研究の方法】

- 1) 重油やガスのプルームの追跡を行う海中ロボットについて、浮力と翼角の制御により、鉛直方向および水平方向への移動が可能な仕様とし、ロボットに、海中の油やガス成分が検出可能なセンサーなどの海洋環境計測センサーを配置した垂直円筒型の海中ロボットを開発し、最終的に、メキシコ湾での油流出事故周辺や新潟沖でのメタンガス湧出海域での海洋試験を実施する。
- 2) 浮遊式浮流重油自動追跡ブイロボットでは、帆の面積と角度を制御し、マストの上部に浮流重油の検出センサーを取り付けた浮遊式ブイを複数台開発し、最終的には、日本での海面上のターゲット

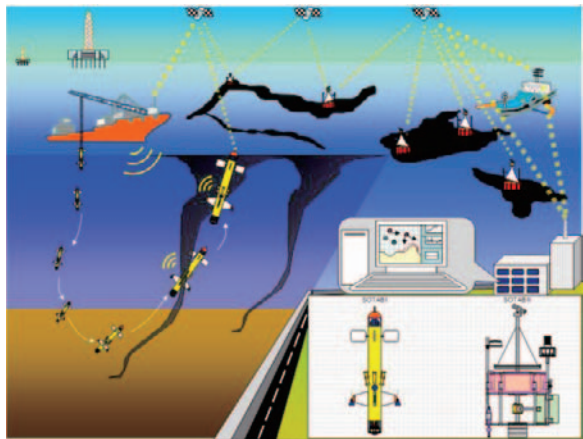


図1 流出重油・ガスの自動追跡システムの概念図

トの自動追跡実験や、ノルウェーでの実際の重油を用いた海洋実験に参加し、その検証実験を行う。
3) 深海からの油とガスの噴出に関する熱化学的反応を含む拡散シミュレーション技術を新たに開発し、過去の実験データと比較し、評価する。
4) これまでに開発した重油の蒸発・分解・拡散などの過程を考慮した大気-海洋モデルをベースに、モデルの更新を行い、このモデルを用いて、複数のブイによって得られた重油の漂流位置や海象・気象のリアルタイム データをシミュレーションに融合する手法を開発し、予測精度の向上を図る。

【期待される成果と意義】

この研究によって、船舶などから海上に浮流した重油塊を自動的に長期間追跡し、浮流重油の漂流位置、海象・気象条件および浮流重油に関するリアルタイム データを供給することができる。このデータと重油漂流シミュレーションを組み合わせ、浮流重油の時々刻々の漂流予測が行え、海上・沿岸での回収作業の機会を増加させ、自然環境災害や地域経済に対する影響の低減に寄与する。一方、海底から海面までの三次元空間の環境計測を行う海中ロボットを用いて、世界的な趨勢となっている深海での油やガスの生産施設のまわりの定期的な環境モニタリングが行え、このデータを用いて、自然環境に対する災害の低減に寄与する。万が一、事故が発生した場合でも、上記4つの手法を組み合わせることで、災害の低減に寄与する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ H. Senga, N. Kato, M. Yoshie et al., Spilled Oil Tracking Autonomous Buoy System, J. of Advanced Robotics, Vol. 23, pp.1103 - 1129, 2009
- ・ H. Senga, N. Kato, H. Suzuki, M. Yoshie, T. Tanaka et al., Development of a New Spilled Oil Tracking Autonomous Buoy, Marine Technology Society Journal, Vol.45, No. 2, pp.43-51, 2011

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
156,200千円

【ホームページ等】

<http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/~kato/project/>
E-mail: kato@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

【基盤研究(S)】

理工系(工学II)



研究課題名 「パルス中性子による物質材料および空間場の組織構造・物理量イメージング」

北海道大学・大学院工学研究院・教授 **鬼柳 善明** (きやなぎ よしあき)

研究分野：原子力工学

キーワード：放射線、中性子、イメージング、結晶組織構造、磁場

【研究の背景・目的】

パルス中性子を用いたエネルギー分析型イメージングは、従来のラジオグラフィとは全く異なり、物質内部の結晶歪、配向、結晶子サイズ、元素などの情報、また、磁場や磁気ドメインなどの情報を、厚い物質に対して実空間イメージとして与えられることが分かってきた。このような物理量を非破壊で総合的に取得することができるのは中性子だけであり、物質材料評価・開発の点で非常に有用で応用範囲も広い。結晶組織情報導出は、現在、日本だけができるもので、世界を大きくリードしている。本研究では、本手法を発展させるために必要な技術を開発し、物質材料の総合評価手法として確立し、先進的応用研究を進める。

【研究の方法】

パルス中性子源では、中性子が一定間隔で発生する。色々なエネルギーの中性子が一度に発生するため、ある距離のところを時間を依存で観測すると、時間が早いところで、エネルギーの高い中性子が、時間が遅い所でエネルギーの低い中性子が観測される。この飛んでくる時間を測って、中性子の速度(エネルギー)を決める方法を飛行時間法という。図1に示すように、中性子と物質の相互作用の強さを表す中性子断面積はエネルギーによって大きく異なる。エネルギーが高いところには元素特有の共鳴ピークが表れる。これは元素の指紋のようなものであり、これを分析することによって、元素の種類や量、またこの幅から温度情報も引き出せる。一方、エネルギーが低いところでは、ギザギザが表れるが、これは結晶構造に対応するものである。ここから結晶子サイズ、

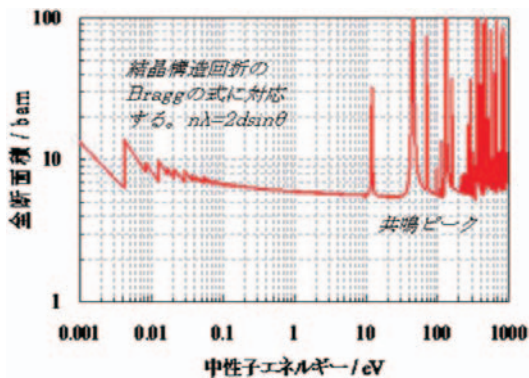


図1 中性子と物質の相互作用の大きさ

結晶配向の程度、結晶歪の情報が得られる。また、水素を含む物質では低エネルギーで断面積が増加し、水素の結合が弱いと傾きが大きくなる。さらに、中性子にはスピンのあり、小さな磁石と見なすことができる。中性子が磁場と相互作用して歳差運動し、スピンの回転の様子を解析することによって磁場の強さを測定することができる。

パルス中性子を用いて、飛行時間法で物質の透過実験を行なうと、透過強度のエネルギー依存性を位置依存で一度に取得できる。このデータを解析することによって、例えば図2に示すような結晶子サイズ、結晶歪などの情報を得ることができる。これは鉄の引っ張り試験片内の情報である。

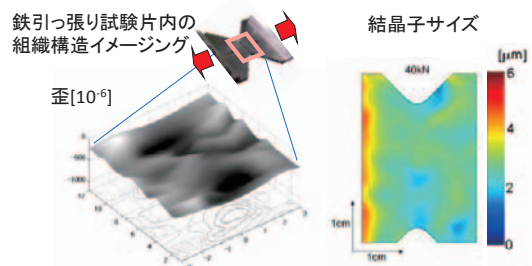


図2 結晶歪(左)と結晶子サイズ(右)

【期待される成果と意義】

結晶組織構造解析コードの汎用化をはかり、解析できる結晶構造を広げる、磁場の定量的評価を可能とするなど、非破壊で物質材料の内部情報を得る方法を確立する。さらに、構造物の信頼性評価、水素エネルギー機器評価、磁気機器や磁性材料開発、日本刀など古美術品の組織構造評価などを行なうことで、新規機能性材料開発・省エネルギー社会・文化への貢献が期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

H. Sato, T. Kamiyama and Y. Kiyonagi, A Rietveld-Type Analysis Code for a Pulsed Neutron Bragg-Edge Transmission Imaging and Quantitative Evaluation of Texture and Microstructure of a Welded Iron, *Materials Transactions*, 52, 1294-1302(2011).

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
204,400千円

【ホームページ等】

<http://toybox.qe.eng.hokudai.ac.jp/about.html>



研究課題名 百万画素サブミクロン分解能中性子ラジオグラフィのための固体超伝導検出器システム

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授 いしだ たけかず
石田 武和

研究分野: 超伝導物性、ナノ構造超伝導

キーワード: 中性子、ラジオグラフィ、MgB₂超伝導体、単一磁束量子素子

【研究の背景・目的】

21世紀の学術・産業を支える基幹技術として、サブミクロン分解能を持つ大画素中性子ラジオグラフィが求められている。本研究では代表者と分担者が実績を持つ複数のオンリーワン技術を投入し、要求を満たすサブミクロン分解能・100万画素・高フレームレート・全固体素子の開発を目指す。アイデアの核は、二硼化マグネシウム(MgB₂)による直線状超伝導ナノワイヤ配列を形成することで、ワイヤ中の同位体¹⁰Bと中性子の核反応熱を運動インダクタンスの変化 ΔL_k として検出する方式を採用した点にある。これにより、サブミクロン空間分解能とともに、2次元配列、すなわち大画素化が可能となる。また、単一磁束量子(SFQ)尤度判定回路により ΔL_k の高感度検出と高速超低電力大容量読出しを実現する。

【研究の方法】

まず、MgB₂薄膜の高品質化、微細加工技術を高度化し、N x Nの多素子中性子検出器アレイを実現する。図1に示すように、一次元のリニアアレイを直交して並べ、ボロンの核反応で出てくるアルファ線とリシウム線が180度異なる方向に放出される2つの荷電粒子をX方向のリニアアレイとY方向のリニアアレイで同時計測する。これによりN²の画素が2N個の素子で実現できる。検出器とSFQの測定系をワンチップ化し、世界初の全固体超伝導中性子検出器チップを実現する。MgB₂ナノワイヤ検出器は、4Kで動作させる運動インダクタンス測定方式とし、MgB₂検出器(1ns高速動作)のための100GHzのSFQ尤度判定回路を採用した新しい全固体超伝導検出器中性子ラジオグラフィを創出する。

最終的には、J-PARC/JRR-3Mに於ける実証実験で、サブミクロン分解能の革新的中性子ラジオグラフィを完成させる。

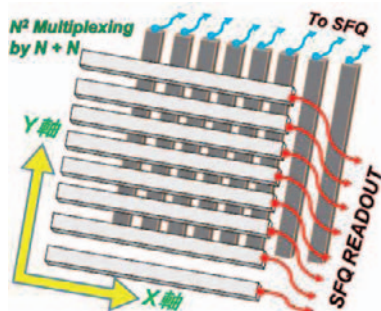


図1: MgB₂検出器を多重化する1次元アレイがN素子、X方向とY方向に並べられ同時計測する。

【期待される成果と意義】

中性子ラジオグラフィは、これまで他の技術では困難であった物質中における水素などの軽元素の位置や磁気構造などの観察を可能とする。サブミクロン分解能で大画素が実現すれば、スピン偏極中性子源を用いたスピントロニクスなど支援ツールとなる。例えば、産業界から燃料電池内の水の観察ニーズには、生成水の排水ダイナミクスを高空間分解能の動画として観測が可能となるだけでなく、農学、生物学に及ぶ革新をもたらす。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. T. Ishida, M. Nishikawa, Y. Fujita, S. Okayasu, M. Katagiri, K. Satoh, T. Yotsuya, H. Shimakage, S. Miki, Z. Wang, M. Machida, T. Kano, M. Kato, "Superconducting MgB₂ thin film detector for neutrons", *J. Low Temp. Phys.* **151**, 1074-1079 (2008).
2. M. Machida, T. Kano, T. Koyama, M. Kato, T. Ishida, "Direct numerical simulations for non-equilibrium superconducting dynamics at the transition edge: Simulation for MgB₂ neutron detectors", *J. Low Temp. Phys.*, **152**, 58-63 (2008).
3. Y. Fujita, K. Arai, M. Nishikawa, K. Satoh, T. Yotsuya, H. Shimakage, S. Miki, Z. Wang, M. Machida, M. Kato, T. Ishida, "Nonequilibrium response of a meandered MgB₂ sensor by the irradiation of a pulsed laser", *Physica C* **468**, 1995-1997 (2008).
4. Y. Yamanashi, T. Kainuma, N. Yoshikawa, I. Kataeva, H. Akaike, A. Fujimaki, M. Tanaka, N. Takagi, S. Nagasawa, and M. Hidaka, "100 GHz Demonstrations Based on the Single-Flux-Quantum Cell Library for the 10 kA/cm² Nb Multi-Layer Process," *IEICE Trans. Electron.*, **E93-C**, 440-444, (2010).

【研究期間と研究経費】

平成23年度-27年度
165,100千円

【ホームページ等】

<http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/pe1/>