



研究課題名 複雑現象に挑む形態変動解析学の構築

東京大学・大学院数理科学研究科・教授 **ぎが よしかず**
儀我 美一

研究分野：数物系科学・数学・大域解析学(4105)

キーワード：非線形現象

【研究の背景・目的】

形状や構造の変動を正確に捉え解析することは、数学分野だけではなく、科学技術全般の複雑な現象を理解し、解明するために重要です。複雑な結晶がどのように形成されてきたのか、といった自然科学的な問題から複雑な画像からどのようにノイズを除いたらよいかといった工学的な問題まで、形態変動に関する問題は様々です。

幾何学が図形の特徴の分類を一つの目的とするのに対し、解析学は極限、収束の概念を基に様々な量の変動を扱ってきました[2007年発行の岩波数学辞典(第4版)参照]。しかしこの20年、図形の変動が非線形解析学の発展と共に解析学で次第に取り扱えるようになってきました。特に通常の微分幾何学では扱いにくいカドのような特異点を持つ、必ずしも滑らかではない図形の変動を数学的にある程度追跡できるようになりました。例えば、金属の粒界の運動を記述する平均曲率方程式に対して、等高面法を粘性解理論により構築することで動く曲面がちぎれて特異点が発生した後も、その運動が追跡可能になったことは我々の典型的な成功例の一つです。

本研究では図形やパターンの変動を記述する重要な非線形偏微分方程式に対し、必ずしも微分可能とは限らない解の複雑な挙動や性質を解明すると共に、様々な数学モデルとの関係を明らかにするために、粘性解析、変分解析、漸近解析、実解析、確率解析を深化させていきます。これにより、形態変動を組織的に数学解析する「形態変動解析学」の構築を目指します。また、結晶成長分野、画像処理分野など関連分野への応用を目指すだけでなく、複雑な現象を図形の変動と解釈することにより、従来つながりの無かったとされる新たな分野への応用の可能性を探索していきたいと考えております。

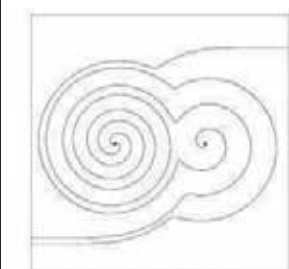
【研究の方法】

個人研究、海外共同研究者や研究協力者との共同研究を主体とします。数学的手法の現状を理解していくために、関連した分野でテーマを絞って国際ワークショップを開催いたします。また、諸科学に潜む問題を発掘するための学際的国際会議を開催いたします。さらにより広い範囲の研究者の関心を高め、研究に協力していただくために、チュートリアルセミナーを開催いたします。

【期待される成果と意義】

数学的側面：これまで、解析学の様々な分野で、図形の変動はばらばらに考察されてきました。本研究では、手法を限定せず、形態変動解析という統一的視点で様々な問題に取り組んでいきます。その結果、非線形偏微分方程式論に寄与するだけでなく、粘性解析、変分解析、漸近解析、実解析、確率解析に新たな展開を与えることになると予想されます。

応用面：形態変動の問題は、渦巻のような特異な構造が現れる結晶成長学や流体力学のような物理分野だけではなく、画像処理のような工学分野、また生命科学分野、さらには微分ゲーム等を通じて社会科学にも関連し、まさに科学技術全般に横たわる問題です。この様な状況で、その解析のための基礎となる数学理論が整備されることは、今後の諸学問の連携融合にとって鍵となる事が予想されます。



結晶表面の遷移する渦巻状位相の数値計算結果
(Y. Giga, T. Ohtsuka, Y.-H. R. Tsai)



金雲母 (phlogopite) の結晶表面
I. Sunagawa - P. Bennema (1982)

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Y. Giga, Surface Evolution Equations—A Level Set Approach, Birkhauser (2006) 273pp
- ・ 儀我美一—儀我美保, 非線形偏微分方程式一解の漸近挙動と自己相似解, 共立出版(1999) 300頁

【研究期間と研究経費】

平成21年度—25年度
134,500千円

ホームページ等

<http://www.ms.u-tokyo.ac.jp/teacher/giga.html>



研究課題名 多波長ラインサーベイによる星形成から惑星系形成に至る化学進化の解明

東京大学・大学院理学系研究科・教授

やまもと さとし
山本 智

研究分野：天文学

キーワード：電波天文学

【研究の背景・目的】

星と惑星系の形成過程の理解は、天文学の中心的課題の一つである。それは構造形成の過程であると同時に、星間空間から惑星系への物質進化の過程でもある。その詳細な探究は、地球および生命の起源の理解につながる重要な意義をもつ。

これまで、星間分子雲から星形成までの化学進化については、電望望遠鏡による観測で解明されてきた。一方、その先の惑星系形成に至る過程についての同様な研究は、電波望遠鏡の観測感度が十分でなかったため、非常に限られてきた。しかし、その改善にともない、この5年程度の間、星形成領域の化学組成の驚くべき姿が浮かび上がりつつある。フランスのグループによるギ酸メチルなどの「複雑な」有機分子の検出、我々のグループによる長い炭素鎖分子の検出などである。これら結果から、物理的には同じに見える星形成領域であっても、化学組成が大きく違い得ることが示された。惑星系形成に向けてそれらがどう進化していくか、また、我々の太陽系はどうであったのかなどについて、大きな関心が集まりつつある。

本研究では、様々な進化段階にある低質量原始星についてスペクトル線サーベイ観測（ラインサーベイ）を通して、この問題の解決を目指す。

【研究の方法】

本研究では、ミリ波、サブミリ波、テラヘルツ波の各領域で、ラインサーベイ観測を行う。ミリ波では様々な有機分子のスペクトル線の検出を、サブミリ波では簡単な分子の高励起輝線の検出を、テラヘルツ帯では基本的分子のスペクトル線の検出を狙う。そこから、化学組成の多様性と、それを支配する基本分子の振舞いの関係を総合的に明らかにすることができると考えられる。

ミリ波帯の観測には国立天文台野辺山45m電波望遠鏡を、サブミリ波帯、テラヘルツ帯での観測にはチリ・アタカマ砂漠（標高4800m）に設置されている国立天文台ASTE望遠鏡を用いる。本研究で70GHz帯の受信機、および、テラヘルツ帯（0.9-1.5THz）の受信機を新たに製作して、観測に用いる。これによりミリ波の観測領域を拡大するとともに、テラヘルツ帯観測を可能にする。

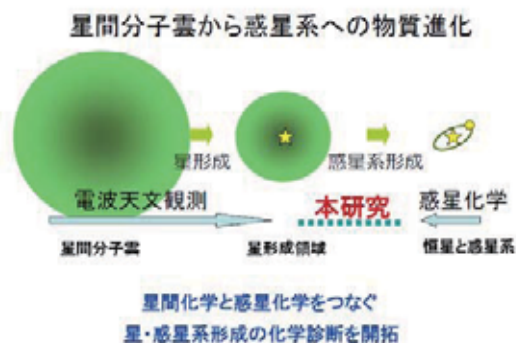
テラヘルツ帯受信機のためのヘテロダイナ素子には、本研究室のクリーンルームで製作する超伝導 Hot Electron Bolometer (HEB) ミキサを用い

る。すでにNbTiNを用いた素子で、1.5THz帯で1700Kの受信機雑音温度を達成しているので、超伝導薄膜の改良などを通して1000K以下まで低雑音化を図り、観測に用いたい。

【期待される成果と意義】

本研究により、異なる進化段階にある5個程度の低質量原始星の化学組成が詳細に明らかになる。特に、テラヘルツ帯観測で、CH、CH₂、NH、H₂D⁺などの基本分子が定量できる意義は非常に大きい。その結果をもとに、星形成から惑星系形成に至る化学進化の概要を明らかにできる。また、星形成領域の化学組成の多様性が原始惑星系円盤にどう波及するかについても理解が進むであろう。

これまで、星間物質から惑星系に至る化学進化にはひとつのミッシングリンクがあった。それは、電波天文観測による星間雲側からのアプローチと、惑星化学など太陽系からのアプローチの狭間である（下図）。本研究は、まさにこの部分を埋めるもので、得られる成果は天文学、惑星科学の両面において重要な意義があると考えている。



【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., "Abundant carbon-chain molecules toward the low-mass protostar IRAS 04368 +2557 in L1527", *Astrophys. J.* **672**, 371 (2008).
- 坂井、山本、「高感度宇宙観測が拓く極限環境下での化学」、*化学と工業* **61**(2), 119 (2008).

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

131,200千円

ホームページ等

<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~submm/Welcome.html>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 小型衛星を目指した多素子X線マイクロカロリメータの開発

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授 おおはし たかや
大橋 隆哉

研究分野：数物系科学

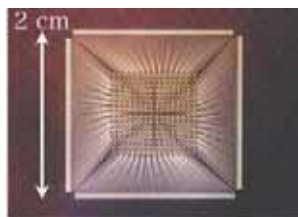
キーワード：X線γ線天文学、宇宙物理(実験)

【研究の背景・目的】

現在の宇宙に存在するバリオンの約半分は、温度が数100万度の銀河間物質として、宇宙の大構造に沿って広く分布すると予想されている。しかし、その大部分は未検出でありダークバリオンと呼ばれている。広視野で約2 eVのエネルギー分解能を持つTES型マイクロカロリメータを用いれば、ダークバリオンが放射する酸素輝線を赤方偏移によって区別し、宇宙のバリオンの大部分を同定すると同時に、宇宙大構造の3次元像とその進化を描き出すことができる。これは同時に、宇宙の熱的・化学的進化についても貴重な情報をもたらすと考えられる。本研究の目的は、256素子からなるTES型X線マイクロカロリメータと、信号処理系、冷却システムを開発し、ダークバリオンの観測を目指す小型科学衛星DIOSのプロトモデルを製作することにある。TESカロリメータは、非平行光に対しても約2 eVという高いエネルギー分解能を発揮するため、広がった天体のX線分光観測では究極に近い性能を発揮する検出器である。

【研究の方法】

256素子のTESカロリメータの開発が本研究の柱であり、これを首都大、JAXA宇宙研で立ち上げたインハウスプロセスにより、われわれ自身の手で進める。本グループでは、単

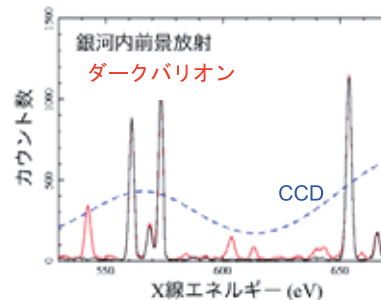


本研究で開発される256素子のTESカロリメータの試作品

素子でエネルギー分解能2.8 eV、256素子で4.4 eVを達成しているが(ただしX線吸収体無し)、効率のよいX線吸収体を開発することで、全面にわたって高い分解能を実現させる。これと並行して、SQUIDを用いた多チャンネルの信号の多重化読み出しシステムや、断熱消磁冷凍機の開発を合わせて進める。5年間で小型衛星DIOSの搭載検出器のプロトモデルを完成させ、2015年ごろの打ち上げを目指して衛星ミッションの実現につなげる。これまで続けてきた米・欧グループとの国際協力も本研究で進めていく。

【期待される成果と意義】

本研究により、世界で初めて、256素子のTESカロリメータと読み出し系が、ほぼ衛星搭載可能な形で整備されることになる。DIOSは重量約400 kgの小型衛星ではあるが、1度ほどの広視野と高いエネルギー分解能を実現



TESカロリメータで検出が期待されるダークバリオンからの酸素輝線

し、広がった輝線の感度では数トンクラス的大型衛星をしのぐ性能をもつ。DIOSが実現すれば、ダークバリオンの探査に加えて、超新星残骸や銀河団など宇宙大規模プラズマのダイナミクスの研究や、電荷交換反応を用いた地球外圏大気の観測などが大きく進展すると期待される。これにより宇宙がダイナミックに進化する姿が鮮明に捉えられるようになる。また、本研究で開発される技術は、将来の大規模国際協力による大型衛星計画の基盤となるほか、さまざまな地上実験へも応用できるという意義を持つ。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Ohashi, T., Ishida, M., Sasaki, S., et al.: DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor, SPIE 6266, 62660G (2006)
- Paerels, F., Kaastra, J., Ohashi, T., Richter, P., Bykov, A., Nevalainen, J.: Future Instrumentation for the Study of the Warm-Hot Intergalactic Medium, Space Science Reviews 134, 405-418 (2008)

【研究期間と研究経費】

平成21年度-25年度
86,700千円
ホームページ等

<http://www-x.phys.metro-u.ac.jp/index.html>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 超新星背景ニュートリノの探索

東京大学・宇宙線研究所・教授

なかはた まさゆき
中畑 雅行

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

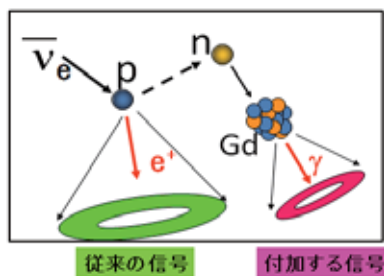
キーワード：宇宙線(実験)

【研究の背景・目的】

太陽の8倍以上重い星は、その進化の最終過程として大爆発(超新星爆発)をおこし、星の内部の物質を宇宙空間に放出する。超新星爆発は星の中心核が重力崩壊することを引き金としておこる現象であり、密度の高い物質が星の内部にあるために爆発エネルギーの99%はニュートリノによって放出されると考えられている。実際、この超新星にともなうニュートリノは1987年にカミオカンデによって観測された。宇宙には10の20乗個の恒星があり、そのうちの0.3%、つまり約10の17乗個の星は太陽の8倍以上の質量を持ち、超新星爆発をおこしてきたと考えられている。それにともなうニュートリノ(超新星背景ニュートリノ)が宇宙に満ちていると考えられる。本研究の目的は、超新星背景ニュートリノを観測するための手段を開発することである。

【研究の方法】

超新星背景ニュートリノの強度は1秒間1平方センチメートルあたり数十個程度だと見積もられている。一見数が多いように思われるが、太陽ニュートリノのエネルギーが高い成分(ホウ素の崩壊からのニュートリノ)が同じ単位で600万個であることと比べると非常に弱いことがわかる。ニュートリノは物質との反応断面積が非常に弱いため、超新星背景ニュートリノを捉えるためにはスーパーカミオカンデ(SK)のような非常に大きい実験装置が必要である。SKでは、年間に超新星背景ニュートリノからの信号が0.8-5個期待できる。(数字の幅はモデルによる予想の広がりを出す。)しかし、太陽ニュートリノや他のバックグラウンドと超新星背景ニュートリノによる現象とを見分けるためには、何か新たな手法を使わないといけない。超新星爆発ではすべての種類のニュートリノが生まれるが、そのうち最も観測しやすいのは反電子ニュートリノである。反電子ニュートリノ陽子と反応して陽電子と中性子を発生する。そこで、陽電子による信号のみならず、中性子による信号も捉えることができれば、他の現象と区別することができ



る。それをおこなうためにSKにガドリニウムという物質を0.2%程度の濃度で加えることを考えている。ガドリニウムは中性子を捕獲する断面積が非常に大きく、かつ捕獲した後にエネルギーが高いガンマ線を放出するためにSKで捉えることができる。しかし、SKでは太陽、大気、人工ニュートリノを使った精密ニュートリノ観測が常におこなわれているためにガドリニウムを加えても他の観測に影響を与えないこと(具体的には、良い水の透過率が保証されていることやタンクの構造体を腐食させたりしないということ)を確認しなければならない。本研究でSKを模擬した100トンクラスの試験用水タンクを作り、ガドリニウムを使用した実験装置の実証実験を行う。

【期待される成果と意義】

本研究によりガドリニウムを溶かしてもSKに悪影響を与えないということが示されれば、実際にガドリニウムをSKに溶解させて観測を開始することができる。SKでは5年間の観測で4-20個の超新星背景ニュートリノの事象が期待でき、世界で初めての観測となる。超新星背景ニュートリノは宇宙の初めから蓄積されてきたニュートリノであるため、その観測により宇宙の星形成の歴史を探ることができる。特に、超新星爆発は重元素(ヘリウムよりも重い元素)が生まれた源であり、我々の身の回りの物質の起源を探ることができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Super-Kamiokande collaboration, "Search for supernova relic neutrinos at Super-Kamiokande", Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 061101.
- J.Beacom and M.Vagins, "GADZOOKS! Anti-neutrino spectroscopy with large water Cherenkov detectors.", Phys. Rev. Lett. 93(2004)171101.
- Super-Kamiokande collaboration, "First Study of Neutron Tagging with a Water Cherenkov Detector", Astroparticle Physics 31 (2009) 320-328.

【研究期間と研究経費】

平成21年度-25年度

159,900千円

ホームページ等

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~nakahata/kibanS/index.html>

e-mail: nakahata@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 広視野ガンマ線カメラによる MeV ガンマ線銀河内天体 気球観測

京都大学・大学院理学研究科・教授 **たにもり とおる**
谷 森 達

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：MeV γ 線天文学、コンプトンカメラ、高エネルギー天体、元素合成、TPC

【研究の背景・目的】

MeV 領域は天文学の未開拓領域であり、ブラックホールなど興味を持たれる魅力的な領域である。しかしイメージング手法の開発が困難であり、ほとんど観測が出来なかった。新たな観測手法を開拓し、他のガンマ線領域と同等の観測を実現する。我々は世界に先駆けガスをを用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron Tracking Compton Camera:ETCC) を開発し、入射ガンマ線の方位角の決定、および運動学的検証による低雑音化を実現、効率よく雑音ガンマ線、宇宙線除去の可能性を示した。この ETCC はピクセル型ガス増幅検出器 μ PIC など多くの独自技術により実現した。ETCC は図 1 のように μ PIC を用いて散乱電子の 3 次元方向測定から従来の Compton Camera (CC) では不可能だった入射ガンマ線の方位角の決定、また反跳ガンマ線散乱角(図 1 の α)を用いた運動学的検証による雑音除去を実現した。さらに 10cm 角 ETCC を用いて 06 年に 3 時間の気球観測を行い 0.1-1MeV で宇宙拡散ガンマ線および大気ガンマ線スペクトル観測に成功した。この申請ではさらに ETCC 技術を発展・確立させ、実際の個々の γ 線天体観測を行い、宇宙衛星観測の可能性を定量的に示す。

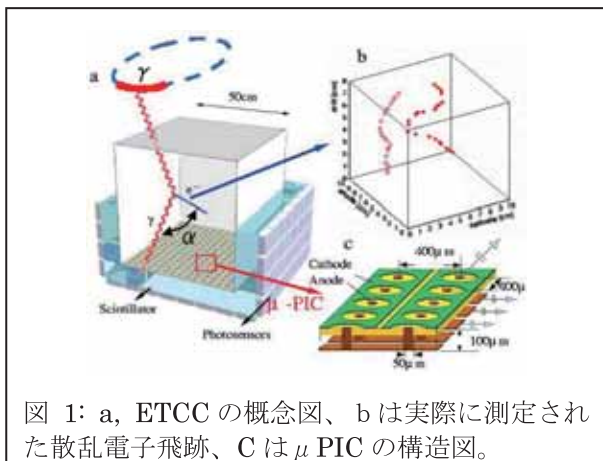


図 1: a, ETCC の概念図、b は実際に測定された散乱電子飛跡、c は μ PIC の構造図。

【研究の方法】

具体的には、この申請で 10cm 角 ETCC の気球実験を発展、また同時に開発した 30cm ETCC 地上装置、(図 2)、さら 08 年まで行った医療用高解像度 ETCC の技術を取り込み、衛星用装置に近い 40cm 角 ETCC 気球観測装置を開発・製作し、JAXA 気球観測所と協力し国内で 3-6 時間程度の観測を行う。Crab または CygX-1 など強いガンマ線天体のスペクトル観測を行う。かに星雲観測の場合、ETCC に

よる偏光測定の可能性も調べる。またこの観測成果に基づき速やかに現在 JAXA が開発中の長時間気球実験による銀河面探査用装置のシミュレーション設計を行う。

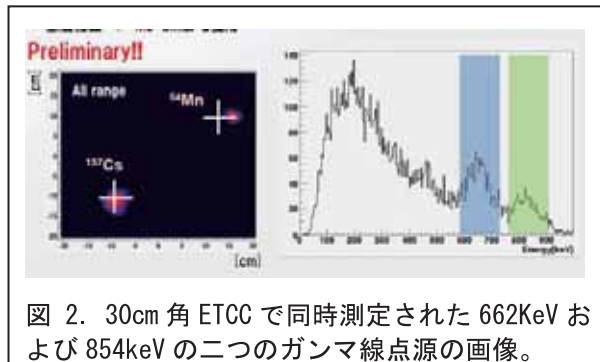


図 2. 30cm 角 ETCC で同時測定された 662KeV および 854keV の二つのガンマ線点源の画像。

【期待される成果と意義】

まず宇宙 MeV ガンマ線の広視野イメージング観測技術の確立がある。特に MeV 領域特有の宇宙線の検出器放射化による雑音ガンマ線除去法を確立する。ETCC はエネルギー分解能以外の除去法を持ち、宇宙ガンマ線エネルギー連続放射成分検出の大幅な改善が期待できる。放射の大半を占める連続成分の高感度測定は、MeV ガンマ線天文学の発展を保障する重要な成果となる。またガスをを用いた μ TPC とシンチレータ検出器という扱いが容易で安定な装置の組み合わせであり、気球実験でも十分な検出面積を確保出来る装置である。今後、長時間気球により年間数百時間の観測が可能となり銀河面に限れば衛星と同程度の成果が期待できる。今後長時間気球の発展と相まって 10 年以内の早期の高精度 MeV ガンマ線天文学が実現が期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ "MeV Gamma-Ray Imaging Detector with micro-TPC" T. Tanimori et al., New Astronomy Reviews 48 (2004) 263-268
- ・ "The Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays with an Electron-Tracking Compton Camera Loaded on a Balloon" A. Takada, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) Supplement A pp. 161-164

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 - 25 年度

161,500 千円

ホームページ等

<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/MeV-gamma/index.html>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 高エネルギー電子・陽電子観測による暗黒物質・近傍加速源の探索

早稲田大学・理工学術院・教授 とりい しょうじ 鳥居 祥二

研究分野：数物系科学

キーワード：宇宙線(実験)

【研究の背景・目的】

我々の宇宙で既知粒子が占めるエネルギー密度はわずかに4%程度であるのに対して、正体が不明な暗黒物質が23%を占めており、その解明が宇宙物理学上の最重要課題となっている。その最有力な候補が、”Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)”である。WIMPの正体は宇宙初期に生成された素粒子(が残存したもの)である可能性が極めて高い。その発見は素粒子物理学にとっても最重要な課題であり、数多くの探索実験が行われている。

WIMPの対消滅で生成される電子・陽電子は、バックグラウンドとなる天体起源の粒子が霧型のエネルギースペクトルであるのに対して、検出が可能な特徴的スペクトルを持つ。このため反陽子やγ線の観測とともにWIMP検出の有力な手段となっている。我々は、電子・陽電子をTeV領域まで観測可能な観測装置を開発し、長期間気球実験や国際宇宙ステーションでの観測により、WIMPの検出を目指している。宇宙線近傍加速源からの電子・陽電子もWIMP同様な特徴的スペクトルを形成するが、到来方向の異方性の検出等によりWIMPとは区別が可能であり、近傍加速源の直接的検出も期待できる。

【研究の方法】

暗黒物質の探索を、国際宇宙ステーション搭載を目的として開発中のCALET(Calorimetric Electron Telescope)のプロトタイプである気球搭載型装置(bCALET: balloon CALET)によって電子・陽電子観測を実施する。装置製作に必要な要素技術開発はすでに完了しており、1号機のbCALET-1による観測により、1GeV-数10 GeVでの電子観測にすでに成功している。本研究では、平成21年度に2号機のbCALET-2による1-100 GeV領域の電子観測の気球観測を実施し、性能実証を行う。そして、研究期間内に、図1に示すようなbCALET-3によりTeV領域にいたるエネルギー領域での電子観測を、南半球周回の圧力气球と極域周回気球による飛翔実験により、合計で50日間程度の観測の実現を目指す。

【期待される成果と意義】

bCALET-3による観測から期待される電子観測量

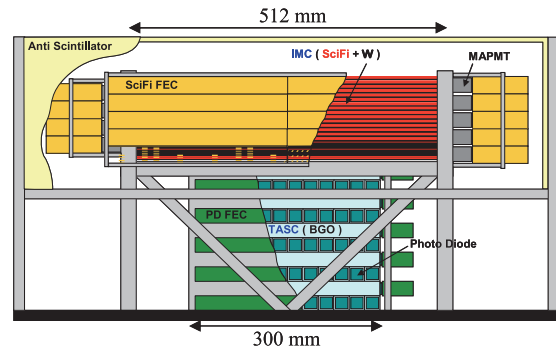


図1: bCALET-3の側面概念図。上部は18,432本の1 mm角シンチファイバーと4 r.lのタングステンによるIMC, 下部は25mm角のBGOを10層X,Y方向に積層したTASCで構成する。装置全体は、γ線用のアンチシステムで覆う(一部のみ表示)。

は、100GeV以上で約3,800イベントであり、これまでの気球観測で300-800GeVのエネルギー領域で観測されている、WIMPからの寄与と思われる電子フラックスの過剰について高精度な検証を行う。さらにTeV領域におけるVelaなどの近傍加速源からの寄与の有無について、99%の信頼度で推定が可能である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Cosmic Ray Electron Spectrum above 100 GeV from PPB-BETS Experiment in Antarctica: K. Yoshida, S. Torii, T. Tamura, Y. Katayose, J. Nishimura et al., *Advances in Space Research*, 42 (2008) pp. 1670-1675.
- The Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electrons from 10 to 100 GeV Observed with a Highly Granulated Imaging Calorimeter: S. Torii, T. Tamura, K. Yoshida, J. Nishimura et al., *Astrophysical Journal*, 559 (2001) pp. 973-984.

【研究期間と研究経費】

平成21年度-25年度

161,400千円

ホームページ等

<http://www.crlab.rise.waseda.ac.jp/>

torii.shoji@waseda.jp



研究課題名 新世代超冷中性子源による時間反転不変性の検証

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授 **ますだ やすひろ**
増田 康博

研究分野：原子核素粒子物理

キーワード：超冷中性子、時間反転対称性

【研究の背景・目的】

我々が存在する宇宙では、物質のみが存在し、反物質は見つかっていない。これは、サハロフによると CP 非保存が一因している。素粒子の標準理論は、K、そして B 中間子崩壊における CP 非保存を説明できるが、この宇宙における物質の存在を説明できない。また、素粒子の階層性の問題を解決できず、重力を理論の中に取り込めない。これらの問題を解決するため、標準理論を超える様々な理論が提唱されている。

電気双極子能率 (EDM) を使えば、CP 非保存を最も精度よく検証できる。標準理論を超える新物理による EDM の予言値は、 $10^{-25} \sim 10^{-28} \text{ e}\cdot\text{cm}$ である。現在、最も精度が高い実験は、ILL (仏) の超冷中性子 (UCN) 実験である。UCN 密度 0.7 UCN/cm^3 で、EDM 上限値 $3 \times 10^{-26} \text{ e}\cdot\text{cm}$ が得られている。超対称性理論 (SUSY) は、当初 $10^{-24} \text{ e}\cdot\text{cm}$ の EDM を予言していたが、既に実験で否定されている。

最近、我々は新しい UCN 源^[1]を開発し、世界最高の UCN 密度を実現した。今回、これをさらに発展させ、 10^3 UCN/cm^3 の UCN 密度で $10^{-27} \text{ e}\cdot\text{cm}$ の EDM 測定を行い、標準理論を超える様々な理論を検証する。

【研究の方法】

EDM は、UCN を実験容器内に閉じ込め、そこに電場と微小磁場をかけ、Ramsey 共鳴を用いて測定する^[2]。系統誤差は主に幾何学的系統誤差 (GPE)^[3]で、磁場勾配に起因し、容器の直径の 2 乗に比例する。本研究では、容器の直径を ILL の $1/10^{1/2}$ にし、軸対称磁場を発生する球面コイルを用いて、EDM を測定する。軸対称磁場の場合、GPE は磁気共鳴周波数シフトから求められる。磁場のふらつきも系統誤差の原因となる。超伝導磁気遮蔽を用いて磁場を安定化し、さらに ^{129}Xe 核スピン磁束計を用いて磁場をモニターする。 ^{129}Xe では、GPE は、これまで使用されていた ^{199}Hg より小さい。

UCN 密度を上げて、統計誤差を小さくする。これまで、世界最強の UCN 源は ILL のタービン型 UCN 源であった。原子炉内の冷中性子源からの中性子を垂直上方に取り出し、重力とタービンのドップラー効果で減速し、UCN を生成してい

た。この方法では冷中性子の温度は下がらず、UCN 密度は上がらない。つまり、保存系では、Liouville の定理により位相空間密度は不変である。本研究の特徴は、Liouville の定理による限界を打ち破るため、超流動ヘリウム (He-II) をスパレーション中性子源内に設置し、He-II フォノンの位相空間を用いて、冷中性子を効率よく冷却することにある^[4]。今回、He-II 冷凍器の改良と陽子ビームの増強により冷中性子束を上げ、UCN 貯蔵寿命を増大して、UCN 密度を大幅に増強する。

【期待される成果と意義】

UCN 物理の発展には、UCN 密度増強が決め手となる。今回の EDM 測定は、標準理論を超える新物理の発展に、そして、今回開発する UCN 源は、UCN による物理実験に広く応用することができる。原子炉や大強度陽子加速器を持つ世界の主要研究機関は、新しい UCN 源を開発している。ILL や Oakridge (米) では、冷中性子源からの冷中性子をガイド管で捕らえて、遠く離れた He-II に導いている。Los Alamos (米) や PSI (スイス) は固体重水素 (SD_2) を用いて UCN 源の建設を行っている。Munich (独) や North Carolina (米) は原子炉内に SD_2 を設置しようとしている。我々の UCN 源は、最も少ない予算と中性子源出力で、最高の UCN 密度を得ることができる。既に、阪大核物理研究センターの 390 W の陽子ビームで世界最高である。この発展型である今回の UCN 源は、この分野の発展に大きく寄与すると考えている。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- [1] Y. Masuda et al., Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 284801.
- [2] Y. Masuda et al., Phys. Lett. A364 (2007) 87~92
- [3] J.M. Pendlebury et al., Phys. Rev. A70 (2004) 032102.

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 - 25 年度

158,500 千円

ホームページ等

<http://fnp.kek.jp>



研究課題名 共鳴軟X線散乱と中性子散乱による
外場下での局所電子構造と混成軌道秩序の研究

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授

むらかみ よういち
村上 洋一

研究分野：数物系科学 物理学・物性Ⅱ

キーワード：放射光、中性子、共鳴X線散乱、強相関電子系、軌道秩序、電荷秩序、磁気秩序

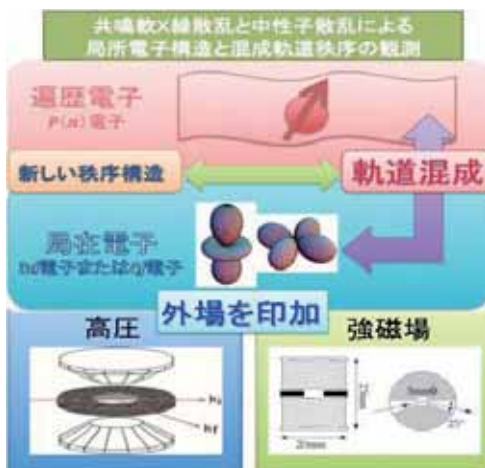
【研究の背景・目的】

強相関電子系において現れる多彩な物性の発現には、電子自由度（電荷・スピン・軌道）が織りなす秩序状態とその揺らぎが、重要な役割を担っている。強相関電子物性を外場により制御しようという試みは、応用研究と結びつき発展しつつあるが、どのような機構によって電子自由度秩序とマクロ物性が結びついているのか、という基礎的な理解はまだ十分には進んでいない。

本研究では、強相関電子系（ π - d 電子系・ $3d$ 遷移金属化合物・ $4f$ 多極子秩序系）を対象として、外場（磁場・圧力）を加え、局所的な電子自由度秩序構造と遍歴的な電子自由度秩序構造の変化を直接観測することにより、これらの系の新奇な物性（磁気抵抗効果・金属絶縁体転移・マルチフェロイクスなど）の発現機構を明らかにする。本研究の特徴は、局所的電子と遍歴的電子の混成軌道の秩序化を、放射光共鳴X線散乱と中性子散乱を用いて観測する点である。特に、共鳴X線散乱法において独自に開発を進めてきた手法をさらに発展させ、偏光状態を制御した軟X線領域での共鳴散乱を行う新しい実験装置・手法を開発する。また、J-PARCのビームラインを利用して高エネルギー領域までの非弾性散乱実験を行う。これらの測定結果と理論計算を比較検討することにより、局所電子構造がマクロ物性に及ぼす影響を明らかにすることが本研究の目的である。

【研究の方法】

本研究の目的を達成するためには、下図に示した局在電子（ $3d$ または $4f$ 電子）の電荷・スピン・軌道秩序状態を観測すると共に、遍歴電子（ p ま



たは π 電子)の秩序状態を観測することが重要である。特に、両者の軌道混成効果が顕著な場合には、両電子系が混然となった新しい電子状態が実現する。本研究では、このような電子状態を明らかにするために、高圧または強磁場下において、共鳴X線散乱、共鳴軟X線散乱、そして中性子散乱実験を相補的に行なう。

【期待される成果と意義】

本研究では、顕著な混成効果によって新しい電子状態を形成していると考えられる下記の3つの系を対象として、局在・遍歴電子の両側面から実験的・理論的研究を進める。

(A) π - d 電子系

遷移金属イオンを含んだ分子系で、局所的な d 電子軌道と遍歴的な π 軌道との混成効果により、顕著な物性（巨大磁気抵抗やフラストレーション効果によるスピン液体状態）を示す π - d 電子系を対象として、その物性発現機構を明らかにする。

(B) $3d$ 遷移金属化合物

ペロブスカイト型遷移金属酸化物を対象とする。磁場や圧力によって、遷移金属 $3d$ 軌道と酸素 $2p$ 軌道または含有される希土類金属 d 軌道との混成状態を変化させたときに出現する、マルチフェロイクス物性などの発現機構を明らかにする。

(C) $4f$ 多極子秩序系

f 電子系において混成効果が重要となる物質群を対象として、磁場や圧力下において、 $4f$ 軌道と遍歴電子軌道の混成効果が高次電気多極子秩序や金属-非金属転移に及ぼす機構を明らかにする。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Murakami et al., PRL80, 1932 (1998).
- Y. Murakami et al. PRL81, 582 (1998).
- T. Kiyama et al., J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 785 (2003).
- H. Ohsumi et al., J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 1006 (2003).
- K. Ohwada et al., Phys. Rev. B **72**, 014123 (2005).
- K. Iwasa et al., J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1930 (2005).
- Y. Murakami et al. J. Mag. Mag. Mater. **310**, 723 (2007).
- D. Bizen et al., Phys. Rev. B **78**, 224104 (2008).

【研究期間と研究経費】

平成21年度—25年度
168,900 千円
ホームページ等
<http://cmrc.kek.jp>
youichi.murakami@kek.jp



研究課題名 電気化学的界面の超強電界を用いた電子物性制御

東北大学・金属材料研究所・教授

いわさ よしひろ
岩佐 義宏

研究分野：数物系科学

キーワード：超伝導・密度波、分子性固体・有機導体

【研究の背景・目的】

コンデンサ構造に電圧を印加して電荷を溜め込み、その結果キャリア数を劇的に増加させるデバイスは、電界効果トランジスタ (FET) と呼ばれ、今日の IT 社会の基幹を支えるデバイスとなっている。この FET による電荷蓄積を用いて超伝導を誘起するなど、物質の状態を変革する研究は約半世紀前から物理学者の興味を引いてきたが、従来の FET 構造を用いた電荷蓄積では、十分な電界強度、蓄積電荷を得ることができないため、原理的には可能でも現実的には実現不可能と考えられてきた。そこで我々は、より大きな電荷量を蓄積できる電気化学的固液界面に着目した。本研究の目的は、電気化学的界面に発生する超強電界を用いたトランジスタ (電気2重層トランジスタ) によって、多様な物質の電子状態を電界によって制御する技術を確立するとともに、化学的ドーピングでは実現できない物質の状態を電界によって形成することにより、電気化学、電子工学、物性物理学にまたがる新たな物質科学分野を構築することである。

【研究の方法】

(1) イオン性液体の導入などによる蓄積電荷の増大

SrTiO₃ で見られた電界誘起超伝導を他の物質で実現させるためには、数倍のキャリア数の増強が必要である。本項目は、これを達成するため、多種多様な電解質溶液、イオン性液体による電荷蓄積を試みるとともに、雰囲気、温度依存性を明らかにする。特に、イオン性液体は電解質溶液よりも一桁近く高い誘電率を有しているため、極めて有望である。最高の $8 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$ 程度の電荷密度の蓄積達成を目指す。この項目は、連携研究者小野新平博士 (電中研) との共同で行う。

(2) 様々な材料による電界誘起超伝導の探索

SrTiO₃ に続く電界誘起超伝導の発見は、最も重要なマイルストーンの一つである。現在目標としている物質は層状窒化物である。層状物質は、グラフェンと同じ技術によって、原子平坦且つ単原子層数枚からなる試料を比較的簡単に用意でき、電子ビームリソグラフィの方法を用いれば、電極付けも可能である。当面は種々の層状物質に注力する方針である。そのために必要な設備が電子ビームリソグラフィである。これを用いて、多様な層状物質、微結晶、ダイヤモンドなど炭素材料、有機材料、ホウ化物などへの電極付けを行い EDLT

作製を行う。試料は、本研究グループ自ら作製するものを中心しつつ、外部研究者との共同研究として拡張してゆく方針をとる。

(3) 電気化学反応のその場プローブ

本研究の主題は、EDLT による電界誘起物質相の探索である。しかし、これを電気化学過程のその観察と考えれば、電気化学反応で生成される安定ではない生成物の検出法として使用することができる。従って、化学反応が起きている状態での低温電気抵抗、磁化率の測定を行う実験系を開発することによって、非平衡状態での新物質相の探索を行う。

【期待される成果と意義】

EDLT による物性研究は、とくに固液界面を舞台とした物性物理という、物性物理、電子工学、電気化学をまたぐ、全く新しい学際的学術領域を形成しうると期待される。そこでの新たなサイエンスは、EDLT における強い電場下での電子物性であり、これは電場を切ると失われる非平衡状態に対応する。すなわち、EDLT を非平衡物質相の探索法として確立できれば、従来の化学合成ではアプローチできない物質の状態を発見できる可能性がある。これを発展させて、新超伝導体や新たな高温超伝導、さらには新種のドーピング有機電子相を誘起できれば、物質科学に大きなインパクトを与えることができると期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ H. Shimotani, H. Asanuma, A. Tsukazaki, A. Ohtomo, M. Kawasaki, and Y. Iwasa, "Insulator-to-metal transition in ZnO by electric double layer gating", *Appl. Phys. Lett.* 91, 082106 (2007).
- ・ K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, A. Ohtomo, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa & M. Kawasaki, "Electric field induced superconductivity in an insulator", *Nature Materials* 7, 85 (2008)

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

168,500千円

ホームページ等

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

TEL 022-215-2030

【基盤研究(S)】 理工系(数物系科学)



研究課題名 ナノスケール・ヘリウム物理学の構築とその応用

慶應義塾大学・理工学部/大学院理工学研究科・教授 **しらはま けい**
白濱 圭也

研究分野：数物系科学、物理学、物性 II

キーワード：超低温・量子凝縮系、ヘリウム、超流動、量子臨界現象、ナノサイエンス

【研究の背景・目的】

物質が極低温で示す超伝導や超流動は、「対称性の破れ」の典型として物理学の根幹をなす基本現象であるだけでなく、その巨視的量子コヒーレント性を利用した量子コンピュータ等のデバイス応用への期待が高まっています。本研究では、「ボース粒子」であるヘリウムをナノスケールの空間に閉じこめたときに現れる新しい量子現象を探索・解明して、物性物理学に新概念をもたらすと共に、超流動の性質がナノスケールで変化することを利用して、超流動ジョセフソン素子や物質波干渉計などの量子コヒーレントデバイスを開発し、応用への展開を図ります。そして「ナノスケール・ヘリウム物理学」と呼ぶ新しい研究分野を構築していきます。

【研究の方法】

本研究は、大きく以下の4つのプログラムに沿って進めます。(1)様々なナノ多孔体構造で実現したナノスケール・ヘリウムにおける量子臨界現象の解明と、その周辺で出現しうる新しい量子相を探索します。(2)ナノスケールで超流動が強く抑圧される性質を利用し、ポーラスアルミナが作るナノポアアレイ中のヘリウムの超流動特性の制御を試みます。(3)更にこれを利用して、超流動に対するジョセフソン効果の発現を目指し、「超流動ジョセフソン素子」を開発します。(4)この新しいジョセフソン素子を使って、超流動体の物質波としての位相を測定する「物質波干渉計」を開発し、地球自転速度などの精密測定や新しい量子干渉効果の研究などの応用研究を展開します。



超流動性制御実験・ジョセフソン素子開発に使用するポーラスアルミナのナノ細孔アレイ

これらの研究は、慶應義塾大学の白濱グループが培ってきた超低温物性

測定技術と、山口大学本多グループが開発するポーラスアルミナをベースにした新しいナノ多孔材料を駆使して行います。

測定技術と、山口大学本多グループが開発するポーラスアルミナをベースにした新しいナノ多孔材料を駆使して行います。

【期待される成果と意義】

多様な量子現象を示す強相関ボース粒子系の典型例がつけられ、物性物理学に新しい概念をもたらしてその発展に資することが出来ると考えています。さらに、ジョセフソン接合の実現により、ヘリウムを用いた本格的なナノサイエンスの展開に道が開けます。これは、半導体界面の2次元電子ガスからナノ量子ドットや細線を作ること、あるいはアルミニウムのような素性のよくわかった金属で微小ジョセフソン接合や量子コンピュータ素子を作る、その「中性原子バージョン」ということになります。

さらに、超流動ヘリウムが有している物質波としての位相コヒーレンスを、相対論・地球科学等の他分野の様々な研究に役立て、ナノスケール・ヘリウム物理学と呼べる新しい物理が発展することになるでしょう。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- K. Yamamoto, Y. Shibayama, K. Shirahama, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 013601 (2008) (Editors' Choice)
- K. Yamamoto, Y. Shibayama, K. Shirahama, Phys. Rev. Lett. 100, 195301 (2008) (Editors' Suggestions).
- K. Shirahama, K. Yamamoto, Y. Shibayama, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 111011 (2008) (Special Topics).

【研究期間と研究経費】

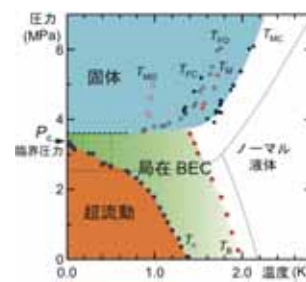
平成21年度－25年度

168,000千円

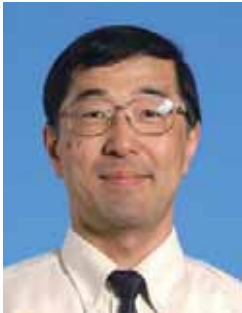
ホームページ

<http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/sirahama/sirahama-lab-jp.html>

上記サイト内に基盤研究(S)ホームページ公開予定



ナノ多孔体中ヘリウムの相図。



研究課題名 液体の階層的自己組織化とダイナミクス

東京大学・生産技術研究所・教授 たなか はじめ
田中 肇

研究分野：生物物理・化学物理

キーワード：化学物理、ソフトマターの物理

【研究の背景・目的】

液体状態には、物質輸送・反応の場として極めて重要な機能が備わっており、工業的な輸送プロセス、マイクロフレイディクス、生命活動における水のように、多くの場面で極めて本質的な役割を果たしている。そのような重要性にもかかわらず、液体状態、そしてそれが凍結した状態であるガラス状態の物理的理解は、気体・結晶状態に比べて著しく遅れている。

本研究では、液体における未解明現象、(1)水型液体の熱力学異常・運動学的異常、(2)単一成分の液体-液体転移現象の起源の解明とその応用、(3)ガラス転移現象の解明、(4)高分子メルトを含む液体の結晶化の素過程と機構解明、(5)液体・ガラス状物質の非線形流動・破壊現象の解明と制御、という5つの基本問題の解明を目指す。

これまで単純液体は、微視的な構造・ダイナミクスに基盤を置く液体論の立場から研究されてきた。しかしながら、我々は、上述の液体における未解明問題の本質は、単純液体の構造・ダイナミクスに潜む階層性(図1参照)にあると考えている。本研究の特徴は、従来の液体論の立場とは異なり、階層性が本質的に重要である複雑液体(ソフトマター)の立場から単純液体に迫る点にある。

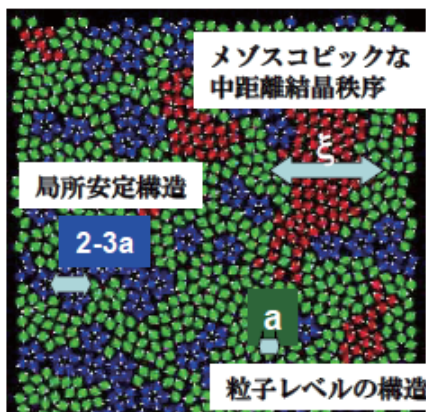


図1 過冷却液体の階層的構造

【研究の方法】

具体的には、(1)-(4)については、結晶構造形成傾向とそれとは異なる対称性をもつ局所安定構造形成傾向の競合という観点から、実験的アプローチ(実空間、波数空間での構造、ダイナミクス解

析、分光学的測定、熱測定)、ブラウン動力学、分子動力学シミュレーション、流体粒子ダイナミクス法などの数値シミュレーション、理論的研究の有機的な連携により、液体の動的階層性という概念に基盤を置いた新たな物理描像を定量的レベルで確立することを目指す。

【期待される成果と意義】

液体状態は物質の基本状態の一つであり、その基礎的な理解の進展の意義は極めて大きいと考えられる。生命現象、化学反応、様々な工業的プロセスにおいて水に代表される液体は不可欠であることは言うまでもない。応用面でも、例えば液体-液体転移を利用すると液体の様々な物理的性質

(密度、屈折率、粘度など)、化学的性質(反応性、異種物質との相溶性)等を、温度、圧力、流れ場、光などの外場を用いて制御することが可能になると期待される。また、液体、ガラス状物質、粉体などの非線形流動、アモルファス物質の破壊の機構解明も、破壊の予測、流動現象の基礎的理解において重要なばかりでなく、材料設計、マイクロ流路、コーティングなど他の工学分野へも多大な貢献が期待される。また、我々は、非平衡状態における運動学的経路の選択には、運動量保存則に関わる輸送係数の動的対称性の破れが決定的な役割を演じていると考えており、これは非平衡状態における系の時間発展の道筋を支配する自然界の基本法則の解明につながると期待され、その波及効果も大きいと考えられる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- H. Shintani and H. Tanaka, Frustration on the way to crystallization in glass, *Nature Phys.* 2, 200-206 (2006).
- R. Kurita and H. Tanaka, Critical-like phenomena associated with liquid-liquid transition in a molecular liquid, *Science* 306, 845-848 (2004).
- C. P. Royall, S. R. Williams, T. Ohtsuka and H. Tanaka, Direct observation of a local structural mechanism for dynamic arrest, *Nature Mater.* 7, 556-561 (2008).

【研究期間と研究経費】

平成21年度-25年度

151,800千円

ホームページ等

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



研究課題名 南アフリカ金鉱山における M2 震源域での地震の準備と発生過程の総合観測

立命館大学・理工学部・教授 おがさわら ひろし
小笠原 宏

研究分野：数物系科学

キーワード：地震現象、地殻変動、地震動

【研究の背景・目的】

震源サイズが数十kmを超える自然の大地震の震源で起こることを予測するために、サイズがせいぜい数十cmまでの岩石試料で行われる室内実験の知見をどのように外挿すべきか？それを知るために、中間サイズの地震の前や発生時に、震源域で起こっていることを至近距離でできるだけ詳細に観察したい。

これまでに、南アフリカ金鉱山の地下2~3.5kmの複数の観測サイトにおいて、地表観測では不可能な詳細さで、最大で100mサイズの地震を含む地震活動域の中で、地震の準備と発生プロセスが観測され始めている。本計画では稠密多点複合観測を行って、さらなる詳細を明らかにし、冒頭の問いに対する答えに迫る。

【研究の方法】

観測候補地は、南アフリカ共和国クラークスドープ市近郊のモアブ・コツオン鉱山の地下約2.5~3kmである。候補地付近は、断層帯内にあり、地質が複雑である。また、金の採掘に伴って断層の法線応力が抜ける。このため、明瞭な前駆を伴って、地震準備・発生プロセスが進行すると期待される。この領域は、2010年と2011年に採掘が本格化し、地震活動も活発化する。2~3年の間にマグニチュード(M)が2~3程度(震源サイズが約百~数百m)の誘発地震が2~3個発生すると期待されている。その前に観測を開始し、2013年ごろまで誘発され続ける多くの地震を観測する。

この鉱山では、複雑な鉱脈を採掘するために、坑道が上下・水平に約100m間隔でほぼ平行に掘削されている。その坑道と断層が交差している付近から長さが数十m以下の何本かのドリリングを行うだけで、断層面上やそれを取り囲むように計器を3次元的に配置させることができる。

本計画では、(1)DC~数十Hzの観測帯域で、前駆を伴う非地震性歪イベントや前震が多発している時の震源域の岩盤の非地震性挙動を高解像度で観測する。また、(2)数十Hz~数十kHzの観測帯域で、100mサイズの断層の地震(高速破壊)にともなう動的応力変化を破壊前線で直接計測する。さらに(3)100mサイズの地震発生やゆっくりした非地震性断層すべりと、数cmスケールの微小破壊(AE)とがどのように関連しながら活動するかを詳しく描

き出す。

この研究は、東京大学、東北大学、京都大学、産業総合技術研究所、東濃地震科学研究所、鹿児島大学、南アフリカ金鉱山(Anglogoldashanti社)や鉱山地震監視会社(ISS社)などのメンバー達との国際産学官協同研究として行われる。

【期待される成果と意義】

室内実験に基づいて、準静的に破壊核が成長し、地震(高速破壊)に至るとい地震発生シナリオが一般に考えられているが、これが実際の地震で検証されたことはない。本研究では、天然の地質構造の中で、このシナリオを初めて検証できる可能性がある。

地震の準備・発展・停止は、準静的現象と動的現象の入れ子構造、あるいは、大小様々なスケールの不均質がコントロールしていると考えられているが、観測による裏付けが乏しく、震源の物理学における謎の一つである。これも本研究によって初めて詳細に観察できる可能性がある。

これらは、100m規模の地震が事前に予測可能な南アフリカ金鉱山で、震源の至近距離に立体的配置の観測観測網を築き、DCから数十kHzまでの周波数帯域を漏れなくカバーしつつ、大きな変動から細かな変動まで高感度かつ広ダイナミックレンジで観測することによって初めて可能になる。本研究は、震源の物理学において長い間困難であり続けた研究課題を解決するものである。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・小笠原宏・他、南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験—至近距離観測による地震発生過程の解明に向けて—、地震2、2009、印刷中。
- ・Naoi, M., et al., Small slow-strain steps and their forerunners observed in gold mine in South Africa, Geophys. Res. Lett., 33, L12304, doi: 10.1029/2006GL026507, 2006.

【研究期間と研究経費】

平成21年度—25年度

148,400千円

ホームページ等

http://www.ritsumei.ac.jp/se/~ogasawar/SA/SeeSA_home.htm



研究課題名 超高压地球化学：地球中心核の化学進化

京都大学・大学院理学研究科・教授 ひらた たかふみ
平田 岳史

研究分野：地球宇宙化学

キーワード：同位体・放射年代

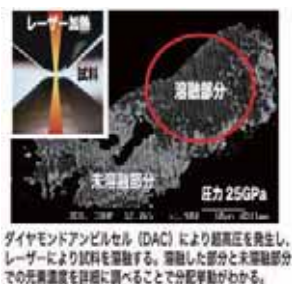
【研究の背景・目的】

46億年にわたる地球の形成と進化を理解する上で、最も根本的かつ重要な未解決問題の一つに「地球中心核」の形成がある。地球中心核は地球半径の半分を占めており、地球内部の熱対流・物質循環に大きな影響を与え、さらに地球表層環境を決める決定因子の一つとして生命の誕生と進化にも強く関係してきた。最近では、地球中心核での物質対流（外核での熔融金属の対流）と地球表層環境変化の関係をより定量的に議論する試みが始まっており、地球中心核の物理的あるいは化学組成的な構造を明らかにしようとする意識が急速に高まりつつある。しかしこれまでに得られている地球中心核の情報は主として地震学に基づくものであり、物性や化学組成等の地球化学的情報は極めて限定的である。地球中心核の組成進化や形成過程を明らかにするには、地球化学的制約条件を付すことが最も直接的かつ有効な研究手段であり、これにより地球表層・大気までも含めた“46億年にわたる全地球システムの進化”がはじめて議論できる。

【研究の方法】

地球中心核での化学組成情報を得るためには、100GPaを越える超高压発生技術と、20ミクロンに満たない微小金属質試料から正確な微量元素分析を行う化学分析技術が要求される。

申請代表者は10年前から金属試料にも対応できる新しい化学分析法の実用化をすすめており、2008年に独自の局所分析装置の実用化に成功している。研究分担者である広瀬はダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた超高压実験技術において世界の先導的立場を維持しており、既に地球中心核の圧力条件(>100GPa)の再現に成功している。本研究ではこれら二つの技術を融合し、金属試料の超高压熔融実験と微量元素分配測定を行い、超高压条件下での元素分配挙動とその圧力依



ダイヤモンドアンビルセル(DAC)により超高压を発生し、レーザーにより試料を照射する。照射した部分と未照射部分での元素濃度を同時に調べることで分配挙動がわかる。

存性を調べることで地球中心核の化学組成やその時間的を実験的に明らかにする。

【期待される成果と意義】

本研究の目的は、地球中心核の化学進化を明らかにするという学術的要素の強いものである。世界最高性能の超高压発生技術と超微量元素分析法を組み合わせることにより、人類未到領域(高压高温条件)での元素分配・物性挙動を調べることができ、従来の「外挿による科学」から「直接観察する科学」が実現できる。これにより、地球中心核から表層までを含めた、「全地球規模での物質循環機構の理解」が飛躍的に進むものと期待できる。また長期的展望として、本研究を通じて得られた地球化学的データは地球内部での親鉄性元素の全地球規模での分配挙動・循環機構に関する基礎的知見を与えるため、最近国際的関心が高まっているレアメタル鉱床の成因等に対する応用展開も期待できる。さらに本研究で実用化する超高压発生法や化学分析法は、将来的に新素材開発や金属・半導体試料の超微量元素分析を支える基盤技術となる可能性もあり大きな社会的波及効果も期待できる。地球中心核という学術的要素の高い研究の推進と、それに続く工学的要素の高い研究開発に貢献できる研究課題である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T. Hirata, Y. Kon (2008) Evaluation of analytical capability of NIR femtosecond laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Anal. Sci.*, 24, 345-353.
- ・ K. Hirose (2006) Post-perovskite phase transition and the nature of D" layer, *Superplumes: Beyond Plate Tectonics*, edited by D. A. Yuen, S. Maruyama, S. Karato, and B. F. Windley, Springer, pp. 69-82.

【研究期間と研究経費】

平成21年度— 25年度

144,200千円

ホームページ等

<http://www.kueeps.kyoto-u.ac.jp/>

【基盤研究(S)】

理工系(数物系科学)



研究課題名 乱流プラズマの動的応答と動的輸送の統合研究

九州大学・応用力学研究所・教授 伊藤 さなえ 早苗

研究分野：数物系科学

キーワード：プラズマ科学

【研究の背景・目的】

国際熱核融合実験炉 (ITER) における核燃焼プラズマの実現に向けて、プラズマの高性能化と制御を目指しプラズマ乱流と構造の詳細研究が世界中で活発に行われている。近年の研究により、帯状流やストリーマーといったメゾスケールの揺動が微視的揺動と共存し、乱流輸送を規定する、という描像が確立しつつある。この描像により、磁場閉じ込めプラズマで広く観察される、拡散的輸送より圧倒的に速いプラズマの構造あるいは輸送の変化を説明できる可能性がある。プラズマ燃焼の制御のためには輸送のダイナミックな変動を制御する必要があり、そのために動的輸送応答の理解が強く求められている。本研究では、従来の「線形・局所的・決定論的」描像を「非線型揺動・大域的・確率的」描像へと拡張すべく、乱流と乱流輸送研究の枠組みを改革する事を目標とする。「プラズマ乱流物理学」を一段と深く進展させ、動的・大域的な輸送現象のモデルを形成し、磁場閉じ込めプラズマの動的輸送現象を解明し、ITER等の燃焼制御法の確固たる基盤を提供する。

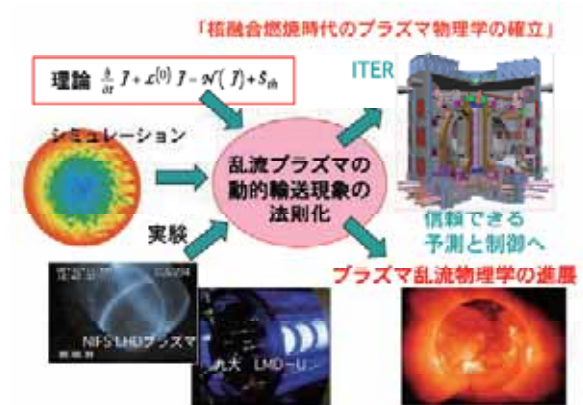
【研究の方法】

先の特別推進研究 (H16-H20) 「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合研究」では、実験・理論・シミュレーションによる統合的研究により乱流プラズマの新しいパラダイムを確立した。この研究手法を更に発展させて、マイクロ、メゾそしてマクロに至る多スケールの揺らぎが共存する「乱流プラズマ」の時空構造や動的応答・遷移の物理過程を定式化し、熱平衡状態からかけ離れた乱流媒質に特有な、大域的・動的乱流輸送にかかわる法則化を試みる。

【期待される成果と意義】

磁場閉じ込めプラズマでの「輸送障壁」の研究は、太陽内部の「タコクライン構造」(回転角速度勾配が急変する面)に代表される自然界の構造の理解を先導した。「乱流プラズマの動的応答」の理解を目指す本研究は、広汎なプラズマ物理学

へのインパクトを与え、宇宙・天体の最先端観測の理解に大きく貢献するだろう。特に、ITER 制御法の研究を加速し、核融合実験炉での予測能力を格段に高めることができる。たとえば、突発的崩壊発生のタイムスケールや平均寿命という予測にあわせ、微視的揺動のモジュレーションなどの相関に着目することによって、突発的現象の発生の事前「予知(予報)」の一方法を提示する。今後の核融合プラズマ研究への応用上の意義は極めて大きい。



【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- *Transport and Structural Formation in Plasmas, K. Itoh, S-I. Itoh, A. Fukuyama, Bristol, Institute of Physics Publishing, 1999
- * Plasma and Fluid Turbulence, A. Yoshizawa, S-I. Itoh, K. Itoh, Bristol, Institute of Physics Publishing, 2002
- * P. Diamond, S-I. Itoh, K. Itoh, T.S. Hahm, Plasma Phys. Control. Fusion 47 R35 (2005)
- *S-I. Itoh, K. Itoh Plasma Phys. Control. Fusion 43 1055 (2001)

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度
163,900千円
ホームページ等

<http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/sanny/>
s-iitoh@riam.kyushu-u.ac.jp



研究課題名 プロブ顕微鏡を用いた単分子スペクトロスコピー

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授 かわい まき
川合 眞紀

研究分野：理工系 化学 基礎化学

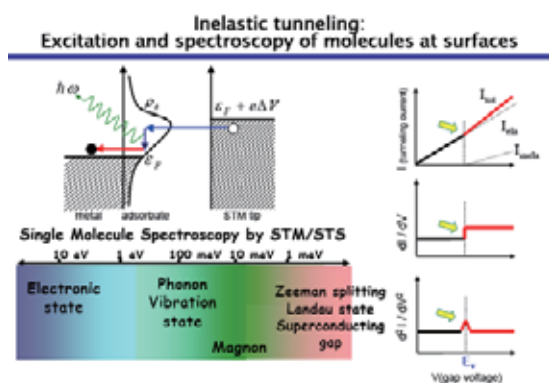
キーワード：表面・界面，単分子操作，ナノプローブ，分子分光

【研究の背景・目的】

走査トンネル顕微鏡 (STM) の二つの特性、即ち、(1) サブÅの空間分解能を有することおよび(2) 高い分解能を有する優れた局所電子源であるという特色を最大限に生かして、走査トンネル顕微分光 (STS)、特に、非弾性トンネル電子を利用した分光法のポテンシャルを最大限に引き出し、その背後にある分子科学の基礎学理を確立する。

【研究の方法】

非弾性トンネル過程を利用した単分子スペクトロスコピーの可能性を更に探索すべく、(1) 振動励起とそれに伴う分子反応のメカニズムをさらに詳しく調べアクションスペクトルの一般的な解析法を確立すること、(2) トンネル電子の注入による単一分子の振動励起状態が緩和する際、輻射によるエネルギー散逸過程を介して放射される光子 (THzあるいは赤外領域) を検出し、IETS との組み合わせによる新しい単一分子振動分光法を探索すること、(3) 非弾性トンネル分光により検出されるスピン状態を手がかりに、分子スピンと吸着場である表面との相互作用を明らかにすることおよび、(4) 超伝導・磁性体界面におけるアンドレーフ反射を利用した磁性材料のスピン分極率の定量的評価が行われているが、この方法のプロブエリアをナノスケールにまで発展させ単原子、単一分子や磁性元素からなる少数多体系を介して流れるスピン分極した電流の検出を試みる。



【期待される成果と意義】

期待される主な成果は、(1) 単分子スペクトロスコピーとして、アクションスペクトルの一般的な解析法を確立し、汎用的な分光法としての地位を確固足るものとする。(2) 分子スピン状態と表面との相互作用に関して、吸着サイトや吸着構造による影響を明らかにする。(3) 吸着分子の振動励起状態の緩和過程におけるエネルギー散逸の検出は、本研究が世界でも初めての試みであり、研究期間中に検出システムを構築し放射される光子の検出を目指す。光子の検出効率が満足いくレベルに達すれば、その後 THz 分光へと展開させる所存である。(4) スピン分極した電流の検出は、装置ができれば可能であると考えている。

本研究提案は、単分子検出としていずれも世界初の試みであり、成功すれば新たな分子科学分野が開拓されると確信している。STM探針を電子源として1つの分子を標的としたスペクトロスコピーの潜在するポテンシャルを引き出す試みは、これまでに高いポテンシャルと実績を有する研究グループだからこそできるユニークなそして挑戦的な課題である。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- M. Ohara, Y. Kim, S. Yanagisawa, Y. Morikawa and Maki Kawai, "Role of molecular orbitals near the Fermi level in the excitation of vibrational modes of a single molecule at a scanning tunneling microscope junction", *Phys. Rev. Lett.* **100**, 136104 (2008).
- S. Katano, Y. Kim, M. Hori, M. Trenary and M. Kawai, "Reversible Control of Hydrogenation of a Single Molecule", *Science* **316**, 1883 (2007).

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

156,600千円

ホームページ等

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



研究課題名 水を溶媒として活用する新しい有機化学ワールドの構築

東京大学・大学院理学系研究科・教授 こばやし しゅう
小林 修

研究分野：化学

キーワード：反応有機化学・水溶媒

【研究の背景・目的】

現在の有機化学は、有機溶媒を用いることを前提として体系化されてきた学問である。有機化合物は基本的に有機溶媒にしか溶解せず、反応基質を溶解して均一にすることが反応を迅速に行うための第一原則であると考えられてきた当該分野において、有機溶媒を用いるのが常識であり、実際、様々な種類の有機溶媒が開発されてきた。その一方で、有機溶媒は環境や人体に有害であり、可燃性で危険なものが多い等の問題点がある。我々はこれまでに、溶媒として水を用いる有機化学の研究を行ってきた。水は、ヒトを始めとして動物・植物の生体の主たる構成成分であり、環境や人体に対して無害であり、また、不燃性のため安全でもある。さらに、地球上に豊富に存在するため有機溶媒と比較して安価である。このため、水を有機溶媒の代わりに用いることができれば環境面からも経済面からも理想的である。我々は、有機溶媒が主たる位置を占めている現在の有機化学に対し、「水を溶媒とする新しい有機化学ワールド」の構築を目指して本研究課題を遂行する。

【研究の方法】

主なサブテーマとして以下を設定する。

(1) 水溶液中において発現する位置選択的の反応

我々は、水溶液（水と有機溶媒の混合均一溶液）中でのアリル化反応において、亜鉛触媒や銅触媒を用いた場合に、有機溶媒のみの場合とは異なる位置が選択的に反応することを見いだしている。これはまさに水溶媒特有の効果が現れた興味深い現象であり、反応機構に関する詳細な解明の検討を行うとともに、この反応を他の付加反応に展開する。

(2) 水の中で機能するゼロ価の金属触媒

ゼロ価のインジウムを用いることで、水中でケトンのアリル化反応が進行することがごく最近申請者によって示されている。これまで価数がゼロである金属の水中での活用例は少なく、これもまた興味深い現象である。本研究課題においてはゼロ価インジウムの他の反応への適用、また、他のゼロ価金属の活用に関する検討を行う。

(3) 水溶性分子を用いる水中での効率的反応

我々はごく最近、パラジウム触媒を用いることで水溶液中でアンモニアから第一級アリルアミンを選択的に合成する方法を見出している。アンモ

ニアのような水溶性の小分子において選択性を発現させたことは意義深い。今後アンモニアのさらなる活用を検討するとともに、種々の水溶性分子の活用を行う。

【期待される成果と意義】

これらの研究課題は、いずれも我々が独自に見出した水溶媒反応に関する知見に基づくものであり、独創的である。有機溶媒中での有機化学とは異なる新しい水中での有機化学ワールドの創造が大きく期待される。これらの成果は有機化学全体に大きなインパクトを与えるものと予想される。

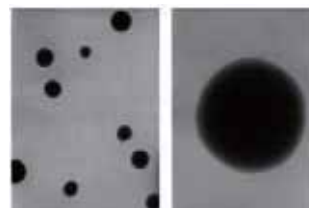


図1：水中に構築された反応場（透過型電子顕微鏡写真）

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・ Zn-Catalyzed Asymmetric Allylation for the Synthesis of Optically Active Allylglycine Derivatives. Regio- and Stereoselective Formal α -Addition of Allylboronates to Hydrazono Esters, M. Fujita, T. Nagano, U. Schneider, T. Hamada, C. Ogawa, S. Kobayashi, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 2914-2915 (2008).

・ Lewis Acid Catalysis in Water with a Hydrophilic Substrate : Scandium-Catalyzed Hydroxymethylation with Aqueous Formaldehyde in Water, M. Kokubo, C. Ogawa, S. Kobayashi, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **47**, 6909-6911(2008).

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

166,000千円

ホームページ等

http://www.chem.s.u-tokyo.ac.jp/users/synorg/index_J.html



研究課題名 動的化学に立脚した超分子錯体システムの創製

東京大学・大学院理学系研究科・教授

しおのや みつひこ
塩谷 光彦

研究分野：化学

キーワード：超分子錯体

【研究の背景・目的】

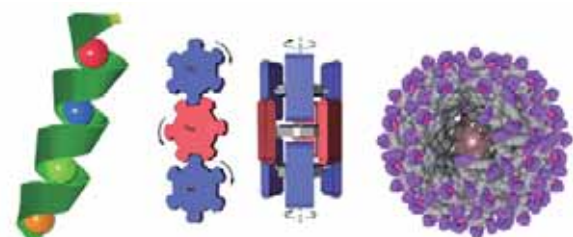
新しい超分子機能は、「要素」の精密合成と「結合」の定量的設計により創出される。その際、「要素」間に働く相互作用は、「要素」の数、配向、配列、および相対配置を動的に変換し、特異な反応場形成や機能の複合化を可能にする。従って、これらの「要素」には、機能発現のための「結合」に関する情報が内包されている必要がある。このような視点で、多成分系の超分子連携システムをつくること、すなわち、多様な「結合」を動的制御し、複数の「要素」を合目的に配列し、高い超分子連携機能を構築する手法を確立することは、重要かつ挑戦的な課題である。本研究は、自己集合情報を内包した有機分子を合理設計し、10 nmサイズの多成分系超分子の構築法を確立し、これらを「エネルギー変換」・「運動変換・伝搬」・「物質変換・輸送」といった複合機能を含む超分子連携システムに発展させることを目的とする。

【研究の方法】

本研究では、以上の観点から超分子を自己集合的手法により構築し、構造・機能解析およびナノ分子システムへの展開を図る。精密分子設計、超分子合成、溶液・結晶解析、表面固定・解析、様々な分光測定により、多面的なアプローチを行う。

(1) 分子・イオン配列プログラミング

- ① 人工生体高分子による金属配列制御
- ② ヘテロ自己集積体のステップワイズ合成
- ③ アザトリプチセン：多重鎖分子電線の構築
- ④ ナノからサブミクロンサイズの動的空間
- ⑤ 巨大有機分子による動的ナノカプセル合成
- ⑥ 金属アコ錯体の集積化によるナノ水滴
- ⑦ 大環状金属錯体のサブミクロン集積化
- ⑧ 分子運動デバイスと連動システム
- ⑨ 二つの回転運動の連動スイッチング
- ⑩ 回転運動と直進運動の連動システム
- ⑪ 光駆動型分子モーターの創出



【期待される成果と意義】

本研究では、生体機能の作動原理を取り入れつつ、申請者らが開発した、人工プログラム分子、分子運動素子、動的ナノカプセルの化学を展開し、「プログラミング」・「変換」・「連動」を *keyword* とする、独自の超分子連携システムを構築する。これらは、生体高分子の特性を生かした *bio-inspired* 分子、あるいは系統的な化学修飾が可能な人工多座配位子と遷移金属イオンとの組み合わせによる機能性超分子群を基盤材料とし、最終的には、機能性超分子の配列プログラミング、長距離運動伝搬システム、分子輸送システム等に関連する超分子連携システムを目指す。これらのアプローチは、多成分系の金属錯体型超分子を階層的にシステムに組み上げる手法を提供するものである。また、そのサイズは10 nmレベルを超えサブミクロンサイズに到達することが期待され、*bottom-up* 法と *top-down* 法との融合による新しい学術領域の創成を促すであろう。

本研究の成果は、錯体化学のみならず、超分子化学、材料化学、触媒化学、バイオテクノロジー等の分野に波及効果を及ぼすことが期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ A Discrete Self-Assembled Metal Array in Artificial DNA, K. Tanaka, T. Kato, M. Shionoya et al., *Science* 299, 1212-1213 (2003).
- ・ Ranging Correlated Motion (1.5 nm) of Two Coaxially Arranged Rotors Mediated by Helix Inversion of a Supramolecular Transmitter, S. Hiraoka, M. Shiro, M. Shionoya et al., *J. Am. Chem. Soc.* 130, 9089-9098 (2008).
- ・ A Self-Assembled Organic Capsule Formed from the Union of Six Hexagram-Shaped Amphiphile Molecules, S. Hiraoka, K. Harano, M. Shiro, and M. Shionoya, *J. Am. Chem. Soc.* 130, 14368-14369 (2008).

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

166,000千円

ホームページ等

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

【基盤研究(S)】 理工系(化学)



研究課題名 希土類元素を基盤とする新反応場の構築

理化学研究所・基幹研究所・主任研究員 侯 召 民

研究分野：化学

キーワード：有機金属化学、多核錯体、錯体・有機金属触媒、高分子合成

【研究の背景・目的】

有機合成や高分子合成などの物質変換化学は一定の成功を収めつつも、期待されるレベルの高さからみればまだ極めて不満足な状態にあり、さらなる進歩を実現するためには、様々な金属の特徴を生かした、斬新な分子設計に基づく新規触媒の開発が極めて重要な鍵となっている。希土類金属は、従来の触媒、反応試剤開発において広く用いられてきた典型金属や d-ブロック遷移金属とは異なる独特の性質をもっており、従来の触媒にはない新しい物質変換機能の発現が期待される。本研究では、提案者がこれまで独自に進めてきたカチオン性希土類錯体触媒や希土類ヒドリドクラスターなどの研究をさらに深化・発展させると共に、d-ブロック遷移金属や典型金属との異種金属混合型錯体へも展開させ有機金属化学の新しい研究領域を開拓し、従来の触媒では実現困難な新規物質変換反応や高選択的かつ高効率な精密重合/共重合反応、精密有機合成反応などの開発を目指す。

【研究の方法】

様々な補助配位子を有する希土類ジアルキル錯体を合成し、それらをカチオン性アルキル錯体へと変換し、様々なオレフィン類の重合/共重合反応について詳細に検討するとともに、アルキンやアルケンのカルボメタリゼーション反応などについても検討を行い、精密有機合成への展開を図る。また、得られた希土類ジアルキル錯体を水素と反応させることによって対応するポリヒドリド錯体を合成し、さらにこれらのヒドリドクラスターなどをベースに様々な異種金属多核錯体の合成を行い、多金属間の協奏機能を開拓することによって、従来の単核錯体では実現困難な新規物質変換反応の開発を目指す。さらに、本研究で開発される新しい構造をもつ有機ポリマー材料を始めとする新規物質群の物理・機械・光学特性などについても検討し、新機能材料の開発へも展開する。

【期待される成果と意義】

本研究で開発するカチオン性希土類アルキル錯体は、酸化状態が変わりやすい多くの d-ブロック

遷移金属では実現できない真の「シングルサイト」重合触媒の構築が可能である。一方、多核希土類ヒドリドクラスターや希土類と d-ブロック遷移金属などを合わせもつ異種多核金属アルキルまたはヒドリド錯体は、隣接同種または異種金属による特異な協同効果が発揮できかつ高い反応性を有する、これまでにない新しい反応場の提供が期待できる。本研究が成功すれば、有機金属化学、触媒化学、高分子化学、有機合成化学などの基礎化学の新たな発展に大きく寄与するだけでなく、本研究を通じて開発される新触媒、新反応及び新規有用物質は化学産業の発展にも貢献できると期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Luo, J. Baldamus, and Z. Hou, "Scandium Half-Metallocene-Catalyzed Syndiospecific Styrene Polymerization and Styrene-Ethylene Copolymerization: Unprecedented Incorporation of Syndiotactic Styrene-Styrene Sequences in Styrene-Ethylene Copolymers", *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 8080–8081.
- Z. Hou, M. Nishiura, and T. Shima, "Synthesis and Reactions of Polynuclear Polyhydrido Rare Earth Metal Complexes Composed of "(C₅Me₄SiMe₃)LnH₂" Units: A New Frontier in Rare Earth Metal Hydride Chemistry", *Eur. J. Inorg. Chem.* **2007**, 2535–2545.
- L. Zhang, M. Nishiura, M. Yuki, Y. Luo, and Z. Hou, "Isoprene Polymerization with Yttrium Amidinate Catalysts: Switching the Regio- and Stereoselectivity by Addition of AlMe₃", *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 2642–2645.

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

163,600千円

ホームページ等

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

houz@riken.jp



研究課題名 金属触媒の複合利用による安定化学結合の活性化と合成的変換

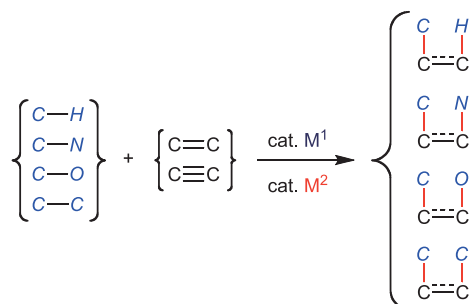
京都大学・大学院工学研究科・教授 **ひやま ためじろう**
檜山 爲次郎

研究分野：化学

キーワード：錯体・有機金属触媒

【研究の背景・目的】

有機合成は、高度な文明社会を支える有用物質の創製に大きく寄与している。しかしながら、環境調和、省資源、安全性の観点から解決すべき課題は依然として多い。特に持続可能社会の実現には、既存の有機合成がもたらす環境負荷を大幅に低減する必要があるが、既知反応の改良には限界があり、全く新しい概念に基づく新しい有機合成反応の創出が急務である。既知反応の多くは、分子を事前に官能基化して、これを手がかりに新しい結合を構築するものであった。この手法では、標的分子の合成に多工程を要するうえ、その過程で多量の副生成物を排出する問題がある。多くの有機分子は、炭素-水素、炭素-炭素、炭素-窒素、炭素-酸素結合（以下それぞれ C-H, C-C, C-N, C-O 結合と略記）を含むので、これらを活性化して新しい結合を形成する反応が事前に官能基化する必要がないため原子効率にきわめて優れている。これらの結合の活性化に遷移金属触媒が用いられているが、通常あまり簡単ではない。そこで本研究では、異なる金属触媒を複合的に利用し、その協同的触媒作用によってこれらの安定化学結合を活性化し、これを利用して触媒的に C-C, C-N, C-O 結合を形成する反応の創出を目指す。



【研究の方法】

これまでに開発してきたニッケル/ルイス酸の協同触媒作用による C-H 結合および C-CN 結合の活性化法をさらに発展させ、ニッケルをはじめとするさまざまな遷移金属とルイス酸の協働触媒による不活性結合の新しい変換反応を開発する。とくに、安定化学結合間にアルケンやアルキンなどの不飽和化合物を挿入させる付加反応の開発に注力する。具体的にはまず、これまで開発してきたヒドロアリール化反応およびカルボシアノ化反応の基質適用

範囲拡大をすすめ、合成反応としての一般性を確立する。特にアルケンを基礎原料とする現代有機工業化学に鑑み、アルケンに対する付加反応を重点的に開発する。また、遷移金属/ルイス酸協働触媒を C-CN 結合以外の歪みのない C-C, C-N, C-O 結合の活性化に応用して、不飽和化合物のアミノシアノ化反応、アルコキシシアノ化反応、カルボアシル(イミノ)化反応、カルボアミド化反応、アミノアミド化反応およびアルコキシアミド化反応を開発する。

【期待される成果と意義】

有機合成化学は、革新的な新反応の開発によってしばしば飛躍的に発展してきた。最近では、クロスカップリング、オレフィンメタセシスが標的分子の合成戦略を一変させ、 sp^2 炭素間結合形成や大環状分子の合成を格段に容易にしたことは、記憶に新しい。本研究で開発する安定な結合の活性化を利用する触媒的 C-C 結合形成反応は、いずれもこれまでの有機合成の常識では考えられなかった分子変換を実現するものであり、分子の逆合成に革新をもたらす可能性を秘めている。医薬品から材料に至るさまざまな機能分子の探索、環境調和合成、工業生産に広く応用できる可能性があり、有機合成化学に与えるインパクトはきわめて大きい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- “A Dramatic Effect of Lewis Acid Catalyst on Nickel-catalyzed Carbocyanation of Alkynes” Nakao, Y.; Yada, A.; Ebata, S.; Hiyama, T. *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 2428–2429.
- “A Strategy for C-H Activation of Pyridines: Direct C-2 Selective Alkenylation of Pyridines by Nickel/Lewis-acid Catalysis” Nakao, Y.; Kanyiva, S. K.; Hiyama, T. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 2448–2449.

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 – 25 年度

164, 100 千円

ホームページ等

<http://npc05.kuic.kyoto-u.ac.jp>

【基盤研究(S)】 理工系(化学)



研究課題名 異種界面接合を基盤とする高分子光運動材料の構築

東京工業大学・資源化学研究所・教授 いけだ とみき
池田 富樹

研究分野：化学

キーワード：機能性高分子

【研究の背景・目的】

クリーンで無尽蔵な太陽光エネルギーを電気を介さず直接力に変換できる材料では、原理的に小型軽量化や高い変換効率の実現が期待できる。池田は平成16-20年度基盤研究(S)を遂行する過程において、高分子内に架橋を施したフィルムが光により屈曲し、力へと変換できることを見いだした。この独創的な成果は世界中に大きなインパクトを与え、液晶高分子の光運動に関する研究の急速な進展を促す契機となった。高性能な光運動材料の構築においては、フォトクロミック分子の光吸収および変形、液晶分子の配向変化、液晶相の変化やフィルム表層の収縮など、ナノレベルからマクロレベルへの階層的かつ高効率な光-力変換が不可欠である。さらに、積層膜における界面の接合状態が極めて重要な鍵を握ると予想されるが、その界面接合の学理と形成技術においては手つかずの状態にある。

そこで本研究課題では、液晶の分子構造、相状態、分子配向や高分子の架橋密度など種々の項目を検討し最適化するとともに、電子線架橋、光架橋、精密重合などの手法を駆使し様々な基材フィルムとの強固な異種界面接合を形成することにより、高性能光運動材料の構築を図る。

【研究の方法】

架橋液晶高分子フィルムにはフォトクロミック分子であるアゾベンゼンが液晶分子として組み込まれている。紫外光を照射すると表層のみで光吸収が起こり、表層でトランス-シス異性化が起こる。このフォトクロミック反応を引き金にして表層のみで液晶分子の配向秩序度における大幅な減少が協同的に誘起される。その結果、表面層の収縮が引き起こされ光源方向に向かって屈曲が誘起されると考えられている(図1)。

最近では、この架橋液晶高分子フィルムを、接着層を介して種々の汎用高分子基材フィルムへと接合することにより、回転や並進など多彩な動作モードへ展開可能であることを明らかにしている。高性能な光運動材料の創製において、積層膜界面の形成および制御は極めて重要であると予想されるが、これまで界面接合の観点から光運動材料に取り組んだ研究は皆無である。そこで本研究課題では、電子線架橋、光架橋、精密重合などに造詣

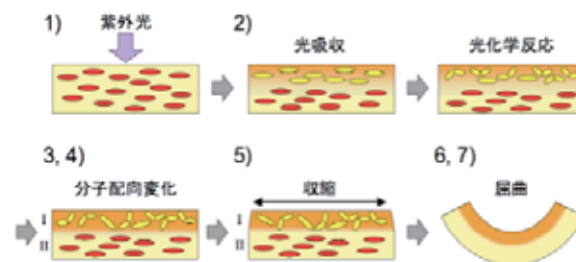


図1 光屈曲のメカニズム

が深い分担者と有機的に連携しつつ、以下の項目について研究を行う。

- (1) 異種界面生成メカニズムの探究とダイナミクスの解明
- (2) 異種界面接合技術の確立
- (3) 新規複合界面の構築と光運動材料への展開

【期待される成果と意義】

上述した項目の遂行により界面接合を解き明かし新たに材料構築を行うことによって、小型軽量な高分子光運動材料の飛躍的な性能向上が図られ、低エネルギー社会実現へ向け大きく前進すると期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Yu, M. Nakano and T. Ikeda
Directed Bending of a Polymer Film by Light
Nature, 425, 145 (2003).
- M. Yamada, M. Kondo, J. Mamiya, Y. Yu, M. Kinoshita, C. J. Barrett and T. Ikeda
Photomobile Polymer Materials - Towards Light-Driven Plastic Motors
Angew. Chem. Int. Ed., 47, 4986-4988 (2008).

【研究期間と研究経費】

平成21年度-25年度

163,300千円

ホームページ等

<http://www.res.titech.ac.jp/polymer>
tikedata@res.titech.ac.jp



研究課題名 バイオサイエンスを支えるイオン液体の開発

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授

おおの ひろゆき
大野 弘幸

研究分野: 化学

キーワード: 生体機能応用デバイス

【研究の背景・目的】

構成イオンをデザインし、融点を著しく低くした塩は室温でも液状で、イオン液体と呼ばれる。分子性液体とは全く異なる特性を有しているため、新規反応溶媒としての展開など爆発的に研究例が増加している。本研究は、有機イオンの構造の多様性に注目して、バイオサイエンス分野に貢献できるイオン液体の設計を目的とし、従来の水系に依存した生物化学を非水系に展開するものである。特に将来のエネルギー危機に対処するための非水系バイオマス燃料電池と、空気中で安定作動する細胞工学デバイスの作製を行うための基礎を確立することを最終目的とする。

具体的には、以下の項目を目標とする。

- (1) バイオマスからセルロースなどの有用物質を非加熱で抽出できるイオン液体を開発する
- (2) イオン液体中で機能するよう設計された酵素類により、セルロース類をグルコースやセロビオースなどに変換する
- (3) 多種類のバイオマスをエネルギー源とし、幅広い条件で安定作動する非水系バイオマス燃料電池を試作する
- (4) 細胞活性を保つことのできるイオン液体の開発にチャレンジし、空気中で機能する細胞ビルドアップデバイスの基礎を確立する

【研究の方法】

これまでに蓄積してきた数百のイオン液体のデータベースを駆使して、構成イオンの構造と塩の物性の相関を整理し、高極性イオン液体を設計し、バイオマスからのセルロース類の抽出能力を評価する。また、さまざまな機能イオン液体を設計し、天然高分子の溶媒、担体として評価する。

バイオ燃料電池に用いることのできる酵素群をイオン液体中に高次構造を保ちながら可溶化あるいは固定させる方法論を検討する。直接溶解のほか、必要であれば酵素表面への両親媒性物質の化学修飾を行い、イオン液体との親和性を改善する。その後、基質を溶解させたイオン液体中での酵素反応を促進させる。電極上の酵素反応はエネルギー密度が低いので、高効率でエネルギー抽出を行えるよう、金などからなるナノ粒子を修飾した電極を用いてバイオ燃料電池の構築を進める。

昆虫細胞や心筋細胞をイオン液体中で機能させ

るための方法論を開拓し、細胞をパターン配列させたアレイをイオン液体中で機能させ、細胞アクチュエーターとして評価する。純粋なイオン液体ではこの課題は達成できないであろうから、水の機能を有効に利用した混合系の展開も併せて検討する。

【期待される成果と意義】

従来の分子性溶媒では達成できなかった「イオン液体ならではの科学」を確立することにより、様々なバイオ分野へのイオン液体の展開の基礎を築くことができる。例えば、イオン液体中でバイオマスからセルロースを抽出し、分解し、酵素反応により直接エネルギーに変換する3段階のステップを one-pot で行うことが可能となる。これにより、現在は廃棄されている莫大な量のバイオマスを有効に且つ省エネルギー的に処理し、新たなエネルギー源として利用できる。

また、これまで不可能とされてきた非水系での細胞機能維持が可能となれば、空気中で作動するバイオマイクロアクチュエーターの構築などが可能となるものと期待される。

このように、本研究ではバイオサイエンスには水が不可欠であるという盲信的な考えを改め、幅広い条件でバイオ物質を機能させることを目指し、より扱いやすいバイオデバイスの設計につながる基礎を確立する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ H. Ohno and K. Fukumoto, "Amino Acid Ionic Liquids" *Accounts of Chemical Research*, 40, 1122-1129 (2007).
- ・ H. Ohno Ed., "Electrochemical Aspects of Ionic Liquids" Wiley Interscience, New York (2005).

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

145,600千円

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~ohno/index.html>

【基盤研究(S)】
理工系(工学I)



研究課題名 近接場マルチプローブ分光の基盤技術開発

京大大学・大学院工学研究科・教授 かわかみ よういち
川上 養一

研究分野：工学

キーワード：光物性，半導体，微小光学，光計測，走査プローブ顕微鏡

【研究の背景・目的】

これまで開発されたカソードルミネッセンスや近接場光学顕微鏡 (SNOM) などの顕微分光技術では、如何にして微細な領域を光励起するかに焦点がおかれていた。したがって、キャリア拡散による空間分解能の低下は不可避であり、それらを詳細に評価するための計測技術は確立していない。

本研究は、微細加工された材料やデバイスそして生体細胞などの各部位へ近接場領域で光アクセス可能なマルチプローブヘッドを開発し、生成された励起子やキャリアの再結合によって生じるルミネッセンスなど、光ダイナミクスを測定するための基盤技術を開拓することを目的としている。すなわち、時間、空間、波長、発光強度からなる5次元データを、並列測定し高速で解析することによって、キャリアの拡散、局在、輻射および非輻射再結合過程をナノ空間において可視化する技術を開発し、新材料・デバイスを研究・開発する上で、非常に有用なツール実現を目指す。

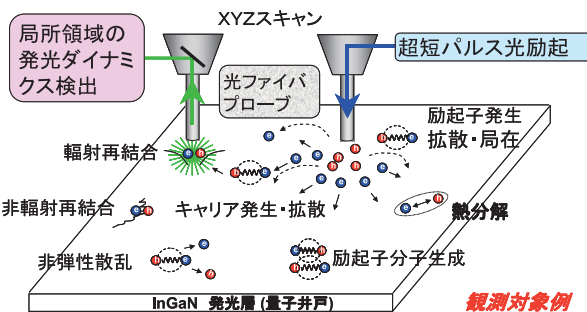


図1：近接場マルチプローブ分光の概念図

【研究の方法】

近接場シングルプローブ技術において、10 nmの空間分解能とピコ秒レベルの時間分解能を両立させて、輻射再結合過程によって生じる発光スペクトルと非輻射再結合過程によって生じる熱スペクトルを同時に検出することを目指す。このことにより、InGaN 量子井戸中の自然形成ナノ構造による局在中心の空間広がりやエネルギー深さに関する情報や転位や欠陥による非輻射再結合中心の分布や捕獲断面の面積の情報など再結合中心の同定技術を開発できるものと期待される。

さらに、光ファイバー先端などからなる一個の微小開口から試料の微小領域を光励起し、数 10 nm～数 μm 程度離れた場所からの発光を別の微小開口プローブを用いて時間分解で検出するマルチプ



図2：試作された近接場2プローブ分光装置

ローブ技術の開発に取り組む。また、時間・空間・波長・強度の多次元データをそれぞれの切口から解析する手法を開発することで、多点間の相関関数など、異なる空間で時々刻々に相互作用して生じる現象を可視化する手法とアルゴリズムを開発する。このことにより、キャリアや励起子の拡散、局在化、輻射、非輻射再結合過程に関するダイナミクスの詳細な解析・評価が可能となる。

【期待される成果と意義】

近接場マルチプローブ分光が実現すれば、(a) ワイドギャップ半導体低次元構造の分光のみならず、(b) フォトニック結晶などの光集積デバイスにおける動作モニタリングや (c) 神経細胞における機能発現を測定することにも展開し、半導体ナノ構造における励起子局在や光機能性発現、さらには生体細胞のシグナル伝達など、離れた場所で相互作用・協調して生じる現象に関する新原理の探索と発見が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・ A. Kaneta, M. Funato, and Y. Kawakami, “Nanosopic recombination processes in InGaN/GaN quantum wells emitting violet, blue, and green spectra”, *Phys. Rev. B*, **78**, pp.125317/1 - 7 (2008).

・ Y. Kawakami, A. Kaneta, and M. Funato, “Assessment and control of recombination dynamics in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -based quantum wells”, *Materials Sci. Forum* **590**, *Advances in Light Emitting Materials*, pp.249-274 (2008).

【研究期間と研究経費】

平成21年度～25年度

123,900千円

ホームページ等

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



研究課題名 繰り返しと光周波数を同時安定化した GHz 帯モード同期パルスレーザーの実現とその応用

東北大学・電気通信研究所・教授 なかざわ まさたか
中沢 正隆

研究分野：応用物理学・工学基礎

キーワード：レーザー、量子エレクトロニクス、非線形光学、光計測、光制御

【研究の背景・目的】

繰り返し周波数が 10~40 GHz の短光パルス光源は、超高速光通信、光信号処理、ならびに光 metrology などの分野において幅広く利用されている。このようなパルスレーザーの光周波数標準・光計測ならびにコヒーレント光通信への応用においては、その繰り返し周波数だけでなく光周波数をも同時に制御する技術が大変重要となる。本研究では、光通信波長 1.5 μm 帯において、繰り返し周波数を Cs 共鳴線(9.1926 GHz)に安定化し、さらに光周波数をアセチレン(C₂H₂)分子吸収線(1538 nm)に同時安定化したモード同期レーザーを世界で初めて実現することを目的とする。さらに、この出力を光ファイバネットワークを介して一般に配信するような光 metrology 技術および超高速コヒーレント光通信への応用展開を図る。

【研究の方法】

本研究で開発する 2 種類の同時安定化パルス光源を図 1 に示す。①は、繰り返しを Cs 共鳴線に安定化したパルスレーザー (Cs 光時計) の出力スペクトルから縦モード 1 本を抽出し、その周波数を C₂H₂ 分子に安定化することにより、同時安定化を実現する方法である。一方②は、C₂H₂ 周波数安定化 CW レーザーの光出力を、超高安定な Cs 原子発振器を基準とする変調周波数によりパルス化する方法である。両者の性能を詳細に評価・検討しながら、理想的な周波数安定化パルス光源を完成させる。最終的には光ファイバ伝送路を用いたパルス伝送実験により本レーザーの光 metrology および次世代コヒーレントパルス伝送への有用性を明確にする。

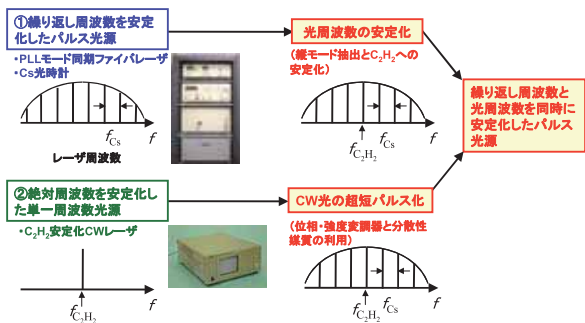


図 1 本研究で開発する新たな同時安定化パルス光源

【期待される成果と意義】

超高速光パルスの高精度周波数制御技術が確立されれば、Cs 時間標準および C₂H₂ 光周波数標準と同程度の長期安定度を有する基準信号が一台の光源から同時に出力できるようになる。さらに、この標準信号を光パルスに載せ光ファイバを介して世界中に遠隔供給する“標準信号の光ネットワーク配信”が可能になり、計測・標準の分野において大きな波及効果が期待される。さらに光通信の分野においても、QAM (Quadrature Amplitude Modulation) や OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) などの位相 (周波数) を利用した光伝送技術が飛躍的に発展し、光をマイクロ波のように使いこなす先端学術分野 (マイクロ波フォトンクス) の創出が期待できる。それらの様子を図 2 に示す。このような応用が可能なのは、本レーザーが他のレーザーとは異なり光通信波長帯で 9.1926 GHz という高繰り返しの超短光パルス (10 Gbit/s の伝送信号に近いパルス) を発生させることが出来る点が特徴である。

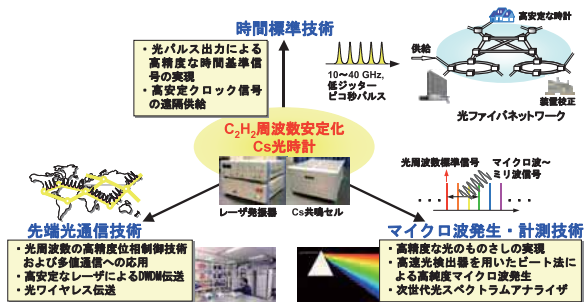


図 2 時間と周波数を安定化した光源の重要性

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ M. Nakazawa and K. Suzuki, "Cesium optical atomic clock: an optical pulse that tells the time," Opt. Lett., vol. 26, pp. 635-637, 2001.
- ・ M. Nakazawa, K. Kasai, and M. Yoshida, "C₂H₂ absolutely optical frequency-stabilized and 40 GHz repetition-rate-stabilized, regeneratively mode-locked picosecond erbium fiber laser at 1.53 μm," Opt. Lett., vol. 33, pp. 2641-2643, 2008.

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 - 25 年度
141,500 千円
ホームページ等

<http://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp>

基盤研究(S)



研究課題名 紫外プラズモニクスの開拓

大阪大学・大学院工学研究科・教授 かわた さとし
河田 聡

研究分野：工学

キーワード：光計測・プラズモニクス

【研究の背景・目的】

本研究は、これまで原理的に可視光・近赤外に限定されていた「プラズモニクス」の分野を紫外・深紫外領域に展開し、紫外領域でのナノ構造と光の相互作用の科学およびそのバイオサイエンス・デバイス工学・ナノ材料科学への展開を目指すことを目的とします。

プラズモニクスの意義は、フォトンと金属自由電子の集団的振動の相互作用により、金属表面に極めて高い運動量（波数）を持つ表面電磁場を局在させることができる点にあります。しかし、金属材料はプラズマ振動数を可視域にもち、それを超える紫外領域では誘電体となるため、プラズモニックなスローライト効果や光の増強効果は得られません。そのため、従来「プラズモニクス」とは可視・近赤外領域の科学であるというのが常識でした。しかし、紫外・深紫外領域は、バイオイメージングや半導体デバイスの評価等において今後ますます重要となります。本研究では、「紫外域でのプラズモニクス」の科学を開拓し、バイオサイエンス・デバイス工学・ナノ材料科学への貢献をはかります。

【研究の方法】

1. 紫外プラズモニクスの原理開発

金属材料を基礎とする可視プラズモニクスに代わる紫外プラズモニクスの原理研究を行います。金属材料は、その局在プラズモン波長が350nmから500nm付近に存在し、紫外領域では透明な誘電体として振る舞います。そのため、プラズモニックな効果は期待できません。私たちは、従来の金属に代わり、紫外域でプラズモニック効果を得る手法の、原理開発および実証を行います。この新原理に基づいてナノ粒子（球、ロッド、ピラミッド、キューブ）やチップを作製し、共鳴波長を深紫外から近紫外領域で制御します。共鳴効果を高め、大きな電場増強効果を得るために、理論計算からの検討も加え、波長によって最適なナノ構造を提案します。

2. 紫外プラズモニックナノプローブのバイオイメージングへの応用

紫外プラズモニクスの原理に基づき作製したナノ構造体をプローブとして用いて、生体分子のナノイメージングを行います。多くの生体分子は、深紫外領域に電子共鳴を持つため、これを利用することにより可視では得られないユニークな情報を得ることができます。また、プラズモニックナノプローブを用いた近接場イメージングでは、分解能はプローブの大きさ程度となり、光の回折限界に左右されません。これらの技術を応用し、生体分子の空間分布や配向、構造に関する情報をナノスケールの空間分解能で得るための技術を確立します。

【期待される成果と意義】

これまで紫外でのプラズモニクス研究は世界に例がありませんでした。しかし、紫外光のフォトンエネルギーは物質の電子共鳴準位のエネルギーに相当し、光スペクトルの中でも利用価値の高い波長域として位置づけられます。本研究は、紫外技術とその応用に、紫外プラズモニクスを基礎とした近接場光学・ナノフォトニクスを結びつけます。「紫外プラズモニクス」はそれ自体が全く新しい科学であるのみならず、新しい産業応用分野をも開拓するポテンシャルを秘めています。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. S. Kawata, "Near-Field Optics and Surface Plasmon Polaritons," Springer (2001).
2. S. Kawata and V. M. Shalaev, "Tip Enhancement," Elsevier (2007).
3. A. Taguchi, N. Hayazawa, K. Furusawa, H. Ishitobi, S. Kawata, "Deep-UV tip-enhanced Raman scattering", J. Raman Spectrosc (in press).

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

150,700千円

ホームページ等

http://lasie.ap.eng.osaka-u.ac.jp/home_j.html



研究課題名 カーボンナノチューブ複合材料の設計・合成・評価ループ構築と高機能化に関する研究

東北大学・大学院工学研究科・教授 **橋田 俊之** はしだ としゆき

研究分野：工学

キーワード：カーボンナノチューブ、複合材料、セラミックス、前駆体法、機械・電気的特性

【研究の背景・目的】

カーボンナノチューブ(CNT)は、新素材としてこれまでに多くの注目を集め、物性の解明について飛躍的な進展が図られ、実用材料への今後の展開が強く期待されている。高分子基複合材料についてはCNT分散法や界面特性改善法などの技術開発が進み、一部は実用化されるに至っているものもある。これに対して、高分子より厳しい環境で利用可能なセラミックス基複合材料には、これまで十分な実用化には至っていないのが実情である。この隘路は、CNTがセラミックスマトリックス中で凝集・クラスター化するため分散効果を発現できなく、複合材料の機械的特性がむしろ大きく低下することにある。

本研究では、セラミックスのうち安価な実用素材であるアルミナを主たるマトリックスの対象とし、前駆体法を利用したCNTセラミックス基複合材料の作製に関する検討を行うことにより、実用化を目指した複合材料の高機能化を実現するための研究を推進する。

【研究の方法】

本研究においては、CNTとして比較的安価な多層カーボンナノチューブ(MWNT)を利用する。マトリックス中での分散性ならびに界面特性を向上させるために、CNT剛性(特に肉厚)の影響ならびに混酸を用いたCNTの表面処理の影響に関する検討を行う。分散性の検討においては強度などの機械的特性に加えて、電気伝導度などの電気的特性の測定結果も踏まえる。また、従来の検討で多用されてきたアルミナ粉とCNTの機械的混合ではなく、水酸化アルミニウムを利用した前駆体法による混合、さらに複合体の形成を図る。以上の検討によりCNT/セラミックス複合材料を作製し、その強度・破壊特性、トライボロジー特性、生体適合性、圧電効果特性ならびに電磁波吸収特性を評価・向上させるための研究を行い、試作するCNT/セラミックス複合材料の高機能化に関する研究を推進する。

【期待される成果と意義】

CNTのマトリックス中での分散特性は、これまでの予備的実験により肉厚が大きいのにもかかわらず剛性の大きいMWNTを使うことで顕著に改善され、実用材料として可能性を有する曲げ強度が400MPa以上のCNT/アルミナ複合材料の合成に成功している。肉厚MWNTは一本ずつと、10mm以下の小さい凝集体として分散している。また、0.3mass%の肉厚MWNTを添加した複合材料は良好な導電体となっていることが示されている。

この成果をさらに実用材料創成へと発展させるために、現在の加圧焼結法による合成に加えて、ニアネットシェイプで製品とすることのできる無加圧焼結法の確立を図ることを予定している。本法が開発でき、十分な強度特性等を発現することができれば、試作するCNTセラミック基複合材料を実用化できる可能性が格段に高まることとなる。当該複合材料については、軸受、メカニカルシール、人工股関節ライナー、電磁波吸収材料、アンテナ、導電性半導体部品、高熱伝道性放熱板などの幅広い応用が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

1. "A Novel Structure for Carbon Nanotube Reinforced Alumina Composites with Improved Mechanical Properties", G. Yamamoto, M. Omori, T. Hashida and H. Kimura, Nanotechnology, 19, (2008), 315708 (7pp).
2. "Structural Characterization and Frictional Properties of Carbon Nanotube/Alumina Composites Prepared by Precursor Method", G. Yamamoto, M. Omori, K. Yokomizo, T. Hashida and K. Adachi, Mater. Sci. and Engineering B, 148, (2008), 265-269.
3. 特許：高機能複合材料とその製造方法，特願2006-98760
4. 特許：高機能複合材料とその製造方法，特願2006-155736

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

103,500千円

ホームページ

<http://www.rift.mech.tohoku.ac.jp/hashida-lab/cnt-kaikenhi>



研究課題名 ナノ界面の疲労損傷と破壊

京都大学・大学院工学研究科・教授 きたむら たかゆき
北村 隆行

研究分野：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：ナノ界面、疲労、損傷、破壊、ナノ材料、転位、界面端、ナノメカニクス、き裂

【研究の背景・目的】

マクロな金属材料では、負荷の繰り返しに伴って数ミクロン大の転位構造が形成され、局部に疲労き裂が発生する。一方、本研究で対象とするナノ金属構造体内では、マクロ材料で見られる疲労損傷が発達するスペースがない(図1)。ところが、研究代表者は、最近の研究において、ナノ薄膜界面に沿った疲労によるき裂の進展現象を発見した。これは、ナノ材料においては、マクロ材料とは異なるメカニズムによって疲労損傷が発達し、応力集中しやすい界面において疲労破壊(き裂発生)が生じることを示唆している。他方、ナノ界面の疲労破壊試験は技術的に多くの困難を伴い、その損傷・破壊過程は知られていない。

そこで、本研究では、ナノ界面の疲労試験および詳細観察が可能である試験装置を開発し、疲労破壊過程を明らかにするとともに、ナノレベルの力学解析を行って、ナノ界面における疲労損傷・破壊のメカニズム・メカニクスを明らかにすることを目的とする。

【研究の方法】

・代表者らが行ってきたナノ構造体の静的強度試験のノウハウを応用して、ナノ界面疲労試験体の作製方法および疲労試験方法を開発する。

・疲労損傷は、表面の微妙な形状変化として現れるため、負荷装置をナノレベルの表面観察が可能で最新顕微鏡に組み込むことで応力集中部(界面端近傍)の損傷発生・き裂発生過程を明らかにする。また、表面形状変化をもたらす内部転位組織の観察を行う。

・ナノ界面試験体の応力設計・加工法を確立し、疲労損傷・破壊を支配する応力場をナノレベルで同定する。

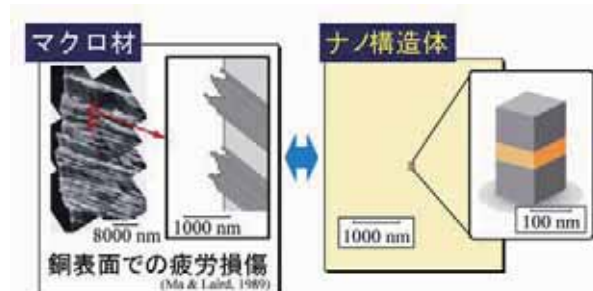


図1 マクロ材の疲労損傷とナノ構造体の寸法比較

・連続体(有限要素法)から原子(分子動力学法)までのマルチスケールの解析手法を用いて、ナノ界面の疲労損傷発展に関する計算機シミュレーションを行い、疲労損傷・破壊に関するナノメカニクスを明らかにする。

・界面破壊には、湿度等の環境の影響が大きいことが知られている。ナノ界面の疲労損傷・破壊に関する成果を基に、環境の影響についても実験・解析より明らかにする。

【期待される成果と意義】

成果と学術的意義：現在までに世界で確認されていないナノ多層金属構造体における疲労現象の存在を示すと同時に、ナノ界面の損傷・破壊に関する体系的なナノメカニクスの学理を確立することができる。さらに、ナノ界面の疲労試験手法およびナノレベルでの観察技術を確立することによって、疲労現象のみならず、ナノ材料に特有な損傷・破壊現象に関する研究手段が得られる。とくに、ナノ構造体に対する応力場設計および環境制御技術の飛躍的発展が期待できる。

成果と社会的意義：ナノデバイスは、生体内を含む重要かつ多様な用途が考えられており、高い信頼性が要求される。新たな機器の思わぬ破壊には疲労現象が関与していることは歴史が示している。本研究によってナノ界面の強度特性が明らかになり、使用条件が過酷になるナノデバイスの信頼性確保に大きく貢献する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ H. Hirakata, M. Kitazawa and T. Kitamura, Fatigue Crack Growth along Interface between Metal and Ceramics Submicron-thick Films in Inert Environment, Acta Materialia, Vol. 54, 89-97 (2006)
- ・ H. Hirakata, Y. Takahashi, D. V. Truong and T. Kitamura, Role of Plasticity on Interface Crack Initiation from a Free Edge and Propagation in a Nano-Component, International Journal of Fracture, 145, 261-271 (2007)

【研究期間と研究経費】

平成21年度～25年度

167,800千円

ホームページ等

<http://cyber.kues.kyoto-u.ac.jp/>



研究課題名 マイクロ・ナノ熱流体複合センシングと界面制御デバイスの開発

慶應義塾大学・理工学部・教授

ひしだ こういち
菱田 公一

研究分野：熱工学

キーワード：マイクロ・ナノスケール伝熱，対流，物質輸送

【研究の背景・目的】

マイクロ TAS 分野を担う次世代のハードウェアである異相界面熱流動制御デバイスの実現のためには、マイクロ・ナノ基盤要素技術（熱流体工学、MEMS・NEMS、超精密加工、ポリマー組成・物性）の巧みな統合化が必要不可欠である。本研究では、マイクロ・ナノ基盤要素技術のシステム統合化を目指して、マイクロ・ナノ熱流体複合センシング技術および熱流動界面制御デバイスの開発研究を行う。MEMS・NEMS 技術に新たにマイクロ・ナノ切削加工技術を融合し、液体・固体、液体・液体、気体・液体、そして気体・固体界面をチャンネル内に形成させ、レーザー光励起による蛍光複合センシング技術を用いて異相界面における熱移動現象の解明を行う。本研究では世界に先駆けて、気体・液体界面極近傍における熱流動センシング技術の開発、そしてデバイス材質としてポリマーを選定し、ポリマーへの気体の選択的吸収を実現する固体・気体界面制御技術の確立を行う。

【研究の方法】

最終年度に図 1 に示す異相界面熱流動制御デバイスを提案するために、

- ①安定した異相界面形成のため、表面張力、粘性や流量等を考慮して、MEMS・NEMS によるチャンネル壁面性状および超精密加工によるチャンネル微細形状の最適化パラメータの抽出および提案を行う。
- ②液体・液体および気体・液体界面に全反射によるエバネッセント波を照射し、低屈折率側流体に混入した蛍光粒子および蛍光色素（液体・液体界面）、そして浮遊金ナノ粒子（気体・液体界面）からの撮像情報、更に光ピンセットによって補足された高屈折率側流体中の蛍光粒子に作用する力のセンシング結果より、界面極近傍における速度、温度、pH や界面電位等の物理量を求め界面熱流動構造の解明を行う。
- ③デバイス材質として気体選択的吸収性ポリマーを選定し、気体・液体界面における表面張力等の力学的因子を制御することによる、気体・固体界面を介するポリマーへの気体吸収メカニズムの解明を行う。

【期待される成果と意義】

本研究で期待される成果として、デバイスの個々の機能の要素分析と統合化をより普遍的にするために、デバイスの個々の機能を階層的に分解および結合することで実現する、統合化計画法に基づいた異相界面熱流動制御デバイス開発プロセス法の確立が挙げられる。更に、熱流体工学に代表される力学的パラメータや電気化学、そして有機化学的パラメータとの相互作用に基づいた画期的な指針の提案を行う点が本研究の意義でもある。

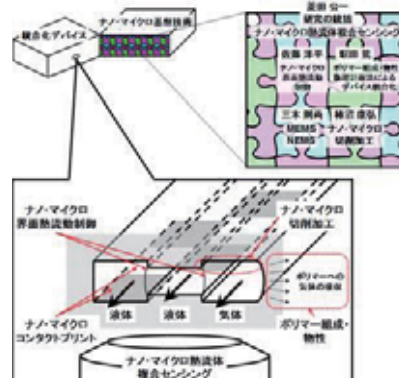


図 1 本研究において開発する異相界面熱流動制御デバイスの概念図。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Ichiyangi, M., Sasaki, S., Sato, Y. and Hishida, K., “Micro-PIV/LIF measurements on electrokinetically-driven flow in surface modified microchannel”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, 045021 (9 pages), (2009).
- ・ Kazoe, Y. and Sato, Y., “Effect of ion motion on zeta-potential distribution at microchannel wall obtained from nanoscale laser-induced fluorescence”, *Analytical Chemistry*, Vol. 79, pp. 6727–6733 (2007).

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度－25 年度

137,500 千円

ホームページ等

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

hishida@sd.keio.ac.jp



研究課題名 極限磁性スピナノ構造体の創製

東北大学・大学院工学研究科・教授 たかはし みがく
高橋 研

研究分野：理工系・工学・電気電子工学・電子・電気材料工学

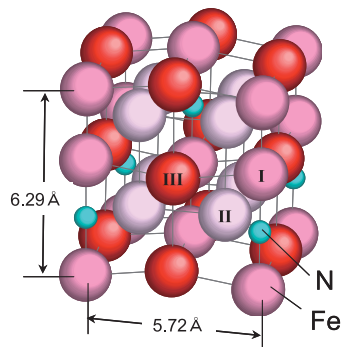
キーワード：磁性体、飽和磁化、窒化鉄、ナノ粒子、薄膜

【研究の背景・目的】

エクサバイト級の情報量が世界中を駆け巡る情報爆発時代の到来に向け、大容量の情報をより高速で伝送する高速情報通信システムに対応した超低消費電力かつ小型であり、加えて、限られた資源環境を駆使し低環境負荷、二酸化炭素排出の大幅抑制を可能とする電子デバイス・電気機器を意図して、高飽和磁化を有するナノサイズのスピナノ構造体(ナノ粒子)の合成技術を構築し、100年間の磁性材料の歴史の中で打ち破られることがなかったスレーター・ポーリング曲線限界を超える極限磁性の獲得を目指す。また、スピナノ構造体の集合体形成技術の構築を通して、電子部品・電気機器材料としての高飽和磁化ナノ粒子の新たな応用展開の可能性を探索する。

【研究の方法】

本研究では、高飽和磁化の可能性を秘めた窒化鉄に着目した。特に、 $Fe_{16}N_2$ 相(下図)は準安定相であるものの最大で 10kOe 程度の大きな結晶磁気異方性磁界を示し、かつ、1880G の飽和磁化を有する。



窒化鉄の結晶構造。

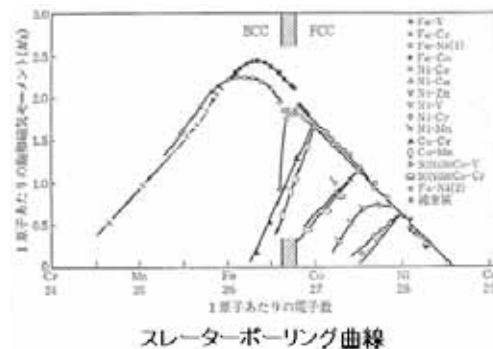
例えば、結晶粒径が数 nm~数百 nm のナノ粒子とし、粒子間の磁氣的相互作用を断ち切った微細ナノ組織に制御し、かつ数 cm~数十 cm 程度の大きさを有するバルク状のナノ粒子集合体とすることができれば、磁気デバイスを中心とした電子部品・電気機器の軽薄短小化ならびに革新的な高特性・高機能化が期待される。そこで、ナノ粒子窒化技術として、窒化とナノ粒子生成を同時に行うアンモニア添加型直接合成法、および、 Fe_3O_4 ナノキューブ等の前駆ナノ粒子を窒化する間接合成法を構築し、各種構造評価・磁気物性評価を通して、フリーな界面を有する表面原子の存在を積極活用し、1880G 以上の高飽和磁化を有する極限磁性ス

ピナノ構造体の実現を図る。

【期待される成果と意義】

磁性材料における高飽和磁化の研究は磁性材料研究の王道であり、その歴史はおよそ 100 年にも及ぶ。しかしながら、得られる飽和磁化の上限はスレーター・ポーリング曲線(下図)に縛られ、Fe-Co 合金の 1880G (2.4 MB)を超える新たな材料の発見に未だ至っていない。

本研究の主眼となる窒化鉄ナノ粒子型磁性材料は、 $Fe_{16}N_2$ 相を主相とし結晶格子歪をさらに誘起することが可能となれば、本問題を一気に解決する革新的ブレークスルーとなり得る新材料につながる可能性を秘めている。また、鉄と窒素のみで構成されるという至極ありふれた元素で超高性能な革新的磁性材料が実現できる可能性を秘めており、資源戦略性の観点からも大変意義深い新材料となることが期待される。



スレーター・ポーリング曲線

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Takahashi and H. Shoji, "α'- $Fe_{16}N_2$ problem - giant magnetic moment or not - (invited)", *J. Magn. Magn. Mater.*, **208**, 145 (2000).
- Sunaga, M. Tsunoda, and M. Takahashi, Effect of Axial Ratio and Atomic Volume on Magnetism of α' and γ'-Fe-N", *IEEE. Trans. Magn.*, **42** (10), 3020 (2006).

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 - 25 年度
157,400 千円
ホームページ等
<http://www.takahashi.ecei.tohoku.ac.jp/index.htm>



研究課題名 炭化珪素半導体の欠陥制御と超高耐圧ロバスト素子への応用

京都大学・大学院工学研究科・教授

きもと つねのぶ
木本 恒暢

研究分野： 工学

キーワード： 電気・電子材料

【研究の背景・目的】

省エネルギーの重要性が益々高まっている現在、発電所や変電所における大規模電力変換システムでは、変換電力の実に 10%に相当する膨大なエネルギーが熱として排出されている。この主な原因は、電力変換機器の中核を担う高耐圧(~5 kV) Si サイリスタと PiN ダイオードの性能限界にある。配送電に使われる典型的な交流電圧は 6.6 kV であるが、この電力変換には耐圧 20 kV のスイッチング素子とダイオードが必要となる。現状では 5~6 kV の Si 素子を多段接続して 20 kV の耐圧を得ているが、導通時の電力損失や発熱が大きい、スイッチング周波数が極めて遅い、発熱による素子破壊を防ぐために莫大な水冷設備が必要である等の深刻な問題を抱えている。

本研究で取り扱う炭化珪素(SiC)は、Si に比べて絶縁破壊電界強度が約 10 倍、禁制帯幅と熱伝導率が約 3 倍という優れた物性を持ち、しかも広範囲の伝導性制御(n 型、p 型とも)が容易な間接遷移型半導体であるので、Si では到達できない超高耐圧(> 20 kV)素子の作製に有望である。そこで本研究では、SiC を用いた超高耐圧かつ高温動作・高信頼性(ロバスト: robust(堅牢))デバイス実現を目指して、その材料物性とデバイス物理に関する学術的研究を行う。

【研究の方法】

将来の電力用キーデバイスとして期待される SiC 素子であるが、材料およびデバイスの両面において多くの課題が山積している。具体的には、最大の課題となっている拡張欠陥(転位、積層欠陥)および点欠陥の構造や物性の解明および欠陥の低減が急務である。また、20kV 以上の超高耐圧を達成するための素子構造のガイドラインがなく、超高耐圧・高温の計測システムも存在しない。

具体的な研究計画の概要を模式的に図 1 に示す。まず、独自に作製する高純度 SiC 厚膜エピタキシャル結晶を用い、多角的かつ系統的評価手法を駆使して、拡張欠陥および点欠陥の検出、欠陥構造と起源の解明を進め、さらにキャリア生成・再結合等の欠陥物性を明らかにする。また、超高耐圧素子の性能を支配するキャリア寿命を測定し、様々な欠陥との相関からその制限要因を特定する。次に、電界集中緩和構造の設計や良質の表面保護膜形成等の要素技術を集約して超高耐圧(> 20 kV)ロバスト PiN ダイオードや IGBT を作製する。絶縁破壊機構や素子内

でのキャリアダイナミクスを明らかにし、耐圧の極限を追求する。最後に、SiC における欠陥物性のデータベースを構築して広く公開すると共に、SiC 超高耐圧ロバスト素子の優位性を示す。

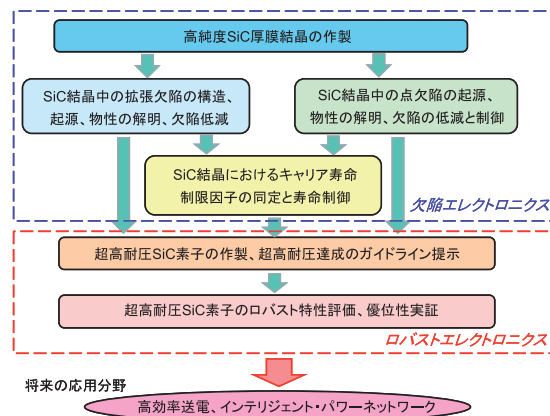


図 1 研究計画の概要

【期待される成果と意義】

SiC 結晶における欠陥の構造と物性の解明、およびその制御は、材料科学から電子工学に亘る「欠陥エレクトロニクス」の発展に寄与する。さらに、10 kV 以上の超高耐圧デバイスの作製と 300°C 以上の高温動作を含めた特性解析は未踏領域であり、「ロバストエレクトロニクス」の発展に寄与する。

超高耐圧 SiC ロバスト素子実現のガイドラインを提示することができれば、高効率の高圧直流送電、FACTS などの電力系統制御、将来的には情報ネットワークで連係された高速 SiC 遮断器を用いたインテリジェント・パワーネットワークを実現でき、社会の高機能インフラ構築に寄与する。いずれの分野でも、省エネルギーに大きく貢献できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Hori, K. Danno and T. Kimoto: J. Crystal Growth. **306**, 297-302 (2007).
- T. Hiyoshi, T. Hori, J. Suda, and T. Kimoto: IEEE Transaction on Electron Devices. **55**, 1841-1846 (2008).

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 - 25 年度
156,500 千円
ホームページ等

<http://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/>
kimoto@kuee.kyoto-u.ac.jp



研究課題名 グラフォアセンブリーによる三次元積層型光電子集積システム・オン・チップ

東北大学・大学院工学研究科・教授

こやなぎ みつまさ
小柳 光正

研究分野：工学

キーワード：電子デバイス・集積回路

【研究の背景・目的】

これまで LSI は、微細加工技術の進歩に伴う半導体素子の微細化により、高性能化、大容量化が達成されてきたが、近年、素子の微細化に伴う様々な問題が顕在化してきている。一方で、LSI への異種材料、異種デバイスの搭載による高機能化の要求が高まってきている。これらの問題を解決して新しい要求に応えるようにするためには、素子の微細化だけでなく、LSI にフォトリソ技術や MEMS 技術、実装技術などの異種技術を融合した新しい集積化技術の実現が必須となる。本研究では、スーパーチップインテグレーションと呼ぶ新しい三次元集積化技術と光電子集積化技術を融合して、高性能で、低電力、高機能の光電子集積システム・オン・チップの実現を目指す。

【研究の方法】

本研究では、図に示すような三次元積層型光電子集積システム・オン・チップの実現を目指す。このようなシステム実現の鍵を握るのが、異種チップや異種デバイス、光導波路、シリコンフォトニクス・デバイスを高精度に位置合わせをして集積化する技術である。このような高精度位置合わせ及び接合のための新しい技術としてグラフォアセンブリー技術を開発する。グラフォアセンブリー技術は、液体の表面張力を利用してチップの自己組織化を行い、LSI チップや各種デバイスを高精度に位置合わせして接合する技術である。本研究では、位置合わせを行うチップと基板の表面にナノ構造を形成して液量と液体の表面積を独立に制御し、液体の表面張力やぬれ性、液体の弾性力を実効的に変化させることによって、位置合わせ/接合精度を飛躍的に向上させる。三次元積層型光電子集積システム・オン・チップ実現の鍵を握るもう一つの技術は、光インターコネクション技術とシリコンフォトニクス技術である。光インターコネクション技術に関しては、チップ内、チップ間に加えて、垂直方向のシリコン貫通光インターコネクションについても検

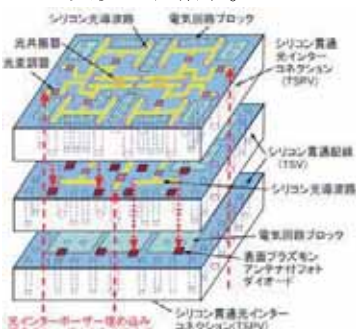


図 1 三次元積層型光電子集積システム・オン・チップの構成

討する。シリコンフォトニクス・デバイスに関しては、プラズモンアンテナ付フォトダイオード、光変調器、マイクロミラー、オプティカル・カップラー、光共振器、光スイッチなどの検討を行う。

【期待される成果と意義】

本研究で提案するグラフォアセンブリー技術を用いることによって、50nm~100nm の位置合わせ精度で、異なった種類のチップやデバイスを三次元積層することが可能となる。その結果として、三次元集積化技術と光インターコネクション、シリコンフォトニクス技術を融合した世界初の三次元積層型光電子集積システム・オン・チップが実現可能となる。このシステム・オン・チップでは、積層されたチップ間が、ビア径 0.5 μ m、ピッチ 2 μ m の高密度シリコン貫通配線(TSV) (100 万本/cm² 以上) で接続される。積層されたチップ間は光 TSV(シリコン貫通光配線: TSFV)によっても接続される。また、各チップには、プラズモンアンテナ付フォトダイオード、光変調器、マイクロミラー、オプティカル・カップラー、光共振器、光スイッチなどのシリコンフォトニクス・デバイスが搭載されるので、本研究によって光電子融合分野の研究を加速することになる。また、三次元積層型光電子集積システム・オン・チップを用いると低電力で高性能のプロセッサや並列処理システムを実現できるので、本研究は、今後の集積回路技術や Green IT 技術、計算機技術の発展に大きな貢献を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】

- T. Fukushima, M. Koyanagi et al. "New Heterogeneous Multi-Chip Module Integration Technology Using Self-Assembly Method", IEEE International Electron Devices Meeting Tech. Dig., pp.499-502, 2008.
- M. Koyanagi, et al. "Three-Dimensional Integration Technology Based on Wafer Bonding with Vertical Buried Interconnections", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.53, pp.2799-2808, 2006.

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 - 25 年度

163, 100 千円

ホームページ等

<http://www.sd.mech.tohoku.ac.jp>



研究課題名 テラヘルツ波による大容量無線通信実現の為のデバイス・システムの開拓

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

あさだ まさひろ
浅田 雅洋

研究分野：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・集積回路、テラヘルツデバイス

【研究の背景・目的】

0.1~数テラヘルツ(THz)の周波数帯は短距離大容量無線伝送への応用が期待されている。このような無線伝送システムの実現には、高性能の THz 発振デバイスや変調方式などの開発が不可欠となる。本研究は、代表者及び分担者による共鳴トンネルダイオード (RTD) THz 発振器、極微細超高速トランジスタ、大容量光伝送システム実証などのこれまでの成果をもとに、大容量 THz 無線通信実現のための研究として、(1)発振デバイスの高出力化、高周波化、ビームステアリングなどの指向性制御、(2)大容量信号伝送のための変調方式の確立と変調デバイスの実現、および(3)これらを用いた機能的な THz 集積デバイス・システムの形成と信号伝送特性測定により、大容量 THz 無線通信の可能性を明らかにする。

【研究の方法】

発振デバイスとして、RTD とスロット共振器を用いた集積デバイス (図 1) を作製し、高周波化として 1THz の基本波発振を目指すとともに、高出力化および電氣的な指向性制御の研究を行う。高周波化については、高電流密度および低容量を得るために層構造を最適化した RTD 素子を用いて行う。高出力化については、高電流密度化と同時に、オフセット構造のアンテナによるインピーダンス整合とアレイ構造による電力合成を用いて行う。これらにより得られた発振素子のコヒーレント特性などの発振特性を明らかにする。指向性制御に関しては、アレイ構造と素子間の相互注入同期を用いたフェイズドアレイの電氣的ビームステアリングの理論解析および実験を行う。

RTD のバイアス電圧変調により周波数変調が起こることを利用し、直接周波数変調と、他の RTD からの注入同期により周波数変調を位相変調に変換した方式の理論解析および実験を行う。また、光信号による変調として、光吸収により発生する自由電子で THz 波の透過を制御する外部変調器を RTD に集積した構造について、変調器へのバイアス印加による高速化のための構造の考案、変調特性の理論解析および実験を行う。また、変調用のヘテロバイポーラトランジスタについて、RTD や変調器に必要な駆動能力を明らかにし、そのための素子構造設計と試作を行う。同時に、

RTD や変調器との集積に適した構造を探索する。これらによる送信デバイスとショットキーバリアダイオードによる受信デバイスを組み合わせて信号伝送特性を測定する。

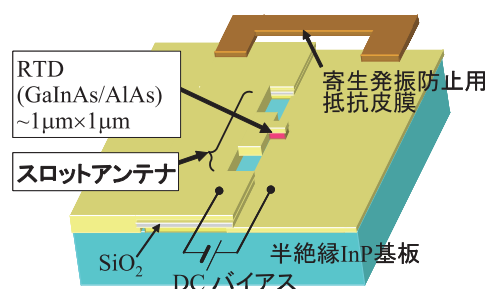


図 1 共鳴トンネルダイオード (RTD) を用いた発振素子

【期待される成果と意義】

テラヘルツ帯での通信という新しい分野の開拓であり、それに必要な超高速電子デバイスが開拓されるとともに、超広帯域性や、短距離通信における局所性を用いた周波数帯有効利用など、この周波数帯の特長が明らかになる。これらに基づいた大容量データ伝送として、災害復旧、遠隔医療操作、科学研究データの配信、室内や航空機・電車内などでの簡便な超高速データ伝送、LSI チップ間伝送など、さまざまな応用が期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- S. Suzuki, A. Teranishi, K. Hinata, M. Asada, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, "Fundamental Oscillation of up to 831 GHz in GaInAs/AlAs Resonant Tunneling Diode", Appl. Phys. Express, vol.2, 054501 (2009).
- M. Asada, S. Suzuki, and N. Kishimoto, "Resonant Tunneling Diodes for Sub-Terahertz and Terahertz Oscillators", Jpn. J. Appl. Phys., vol.47, pp.4375-4384 (2008).

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 - 25 年度

164, 100 千円

ホームページ等

http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab/Asada_Lab.html



研究課題名 痛みの分かる材料・構造の為の光相関領域法による光ファイバ神経網技術の機能進化

東京大学・大学院工学系研究科・教授

ほたて かずお
保立 和夫

研究分野：工学

キーワード：計測システム, 光ファイバセンサ, スマート材料・構造, 分布型センシング

【研究の背景・目的】

光ファイバに沿う歪や温度の情報を伝搬光の属性から分布測定する「光ファイバ神経網」を、ビル、橋、航空機翼等に張り巡らせることで「痛みの分かる材料・構造」を実現する研究が活発である。しかし、従来開発されてきた時間領域法などでは、空間分解能や測定時間等が不十分であった。

これに対し研究代表者は、光源の周波数や光波位相等を変調して干渉特性を任意に合成する「光相関領域法」を発明し、従来技術を凌ぐ性能を発現できる種々の「光ファイバ神経網」を提案・開発した。学術創成研究費(04~08年度)を得て、mm オーダの空間分解能、kHz のサンプリング速度、ランダムアクセス性等の機能を達成した。

本研究では、一本の光ファイバでの歪と温度の高精度・同時・分布計測や、分布情報全体の動的測定等、より高次の機能を独自新手法にて実現し、「光ファイバ神経網」に「機能進化」をもたらす。

【研究の方法】

以下の4サブテーマを併進させる。

1. BOCDA 法の機能進化
 - * 温度と歪の高精度・同時・分布計測技術
 - * 分布情報全体のダイナミック測定
2. ブリルアン散乱センシングシステムの進化
 - * BOCDR 法の高機能化
 - * S-BOCDA 法の機能進化
3. 長尺 FBG 歪センサの多点化技術
4. 上記光ファイバ神経網技術を実装した「進化した痛みの分かる材料・構造」の実現

【期待される成果と意義】

BOCDA 法は、「光相関領域法」により誘導ブリルアン散乱を光ファイバ中の特定の位置でのみ発生させ、その位置を掃引する独自分布測定技術である。本散乱の周波数シフトの温度と歪依存性によって「光ファイバ神経網」を実現する。最近、偏波維持光ファイバの一偏波モードによる誘導ブリルアン散乱と直交偏波光が示すブラッグ反射の両周波数シフトの温度と歪への依存性が異符号であることを見出した。本原理により、世界初の温度/歪高精度・同時・分布計測を実現し(図1)、理論的性能限界も明確化する。また、BOCDA 法に新測定原理を導入して全歪分布の高速測定も実現する。

自然散乱を活用して被測定光ファイバの一端から入射した光のみで歪分布センシングを実現する

独自の BOCDR 法では、既に時間領域法を数桁凌ぐ測定速度と空間分解能を実現した。本研究では歪精度の向上を図り、理論的性能限界を明確化する。誘導散乱の発生に必要なポンプ・プローブ両光を時分割発生させる低価格化 BOCDA 技術においては、その高速測定機能をさらに進化させる。

約 10cm の長尺光ファイバグレーティング内のブラッグ波長変化を「光相関領域法」で分布測定する独自技術では、長尺 FBG を光ファイバに沿って多点配置する新たな構成を提案・実現する。

上記の光ファイバ神経網技術を航空機用カーボンファイバ樹脂や鉄骨構造等を実装し、「進化した痛みの分かる材料・構造」を実現する。これら新たな光ファイバ神経網によって、交通、土木、通信等の分野において、各種の社会基盤の安全・安心を高めるとともに、その稼働年月の延伸にも寄与することで持続可能社会の実現にも貢献する。

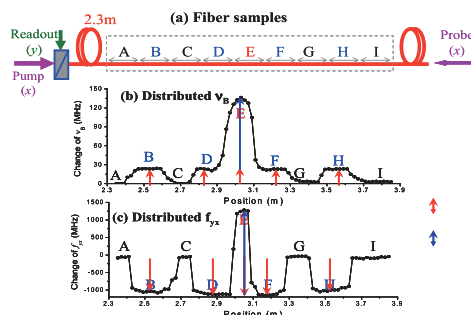


図1 温度/歪高精度・同時・分布計測の基礎実験

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- W. Zou, Z. He and K. Hotate, "Correlation-based distributed measurement of dynamic grating spectrum generated by stimulated Brillouin scattering in a polarization-maintaining optical fiber," Opt. Lett., vol. 34, pp. 1126-1128, 2009.
- K. Hotate and K. Kajiwara, "Proposal and experimental verification of Bragg wavelength distribution measurement within a long-length FBG by synthesis of optical coherence function," Opt. Exp., vol. 16, pp. 7881- 7887, 2008.

【研究期間と研究経費】

平成21年度-25年度

156,800千円

ホームページ等

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



研究課題名 海溝型連発大地震も視野に入れた我が国沿岸域の耐震性再評価と地盤強化技術の検討

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

の だ としひろ
野 田 利 弘

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤防災

【研究の背景・目的】

阪神淡路大震災以降、強震動観測網の充実等、集中的な地震研究投資が奏功して、特に我が国沿岸域における地震危険度評価は、格段に精密を極めてきた。しかし、これに応えるべき対地震の地盤工学は、地震学のこの急速な進歩に十分追いついてはいない。だから、海溝型巨大地震の特性も視野に入れた、粘土や砂の互層からなる自然堆積地盤とその上の中間土からなる人工島や埋立地、盛土など、地盤と(土)構造物システムの地震中～地震後の地震応答解析と地盤強化技術は、むしろこれからの課題と言ってもよいのではないか。本研究課題の目的は、自然堆積(沖積/洪積)粘土～砂互層地盤および中間土からなる人工地盤の精密な弾塑性プロファイルの記述を基礎に、来るべき海溝型の、しかも連発で来るとも言われる地震も視野に入れて、自然・人工地盤とその上の護岸や盛土、建物基礎、各種埋設施設の地震中および地震後の耐震性を、新技術を駆使して評価し、強化必要箇所を抽出して各種地盤強化技術の効果を検証することである。

【研究の方法】

名大地盤力学研究室で開発した水～土骨格連成有限変形理論に基づく有限要素コード *GEOASIA* は、自然堆積粘土や砂、そして細粒分を多く含む中間土までを一貫して記述する弾塑性構成式

(SYS カムクレイモデル)を基礎に (All Soils), 変形から破壊までを (All States), 動的・静的を問わずあらゆる外力条件のもとで (All Round) 統合的に解析する新技術である。図1は捨石マウンド式護岸を有する海上埋立人工地盤の解析事例である。地震中の安定問題だけでなく、地震後の変形挙動までを一貫して解析し、耐震強化ポイントを適切に抽出できる点に主たる特徴がある。

本研究課題では、①中間土・特殊土を含む各種土材料を用いて各種室内試験を実施し、この解析コードが搭載するSYSカムクレイモデルの(更なる)検証と高度化を行うとともに、解析コードの高速化・大容量化を進める。②官・民との協力体制を取りつつ、複数の具体的問題を取り上げて耐震性を再評価する。これに基づき、耐震化のための工法原理または設計原理を見直し、人工島や埋立地盤からなる沿岸域に依拠せざるを得ない我が国の耐震化手法の開発に寄与する。③本研究課題を通じて解析技術をマスターするための教育プロ

グラムを提供し、耐震地盤工学に精通した解析技術者の育成を行う。

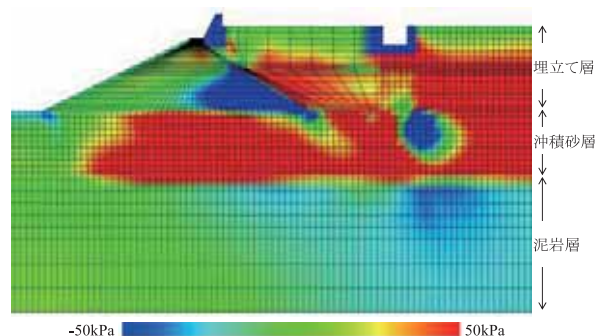


図1 埋立地盤—護岸系の地震応答解析結果 (地震直後の過剰間隙水圧分布)

【期待される成果と意義】

本研究課題を通して期待される成果と意義は以下の通りである。

- ・ 解析対象とする土材料を問わず、地震中の安定問題から地震後の変形挙動までを一貫して解くことのできる計算技術の確立と普及。
- ・ 各種地盤強化手法が耐震性向上に及ぼす効果の明瞭な算出などを通じた、耐震地盤工学の学問分野における進展。
- ・ 当該新技術を有する技術者の育成。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M., Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 48(6), 771-790, 2008.
- ・ Asaoka A. and Noda, T., All soils all states all round geo-analysis integration, *International Workshop on Constitutive Modelling - Development, Implementation, Evaluation, and Application*, 11-27, 2007.

【研究期間と研究経費】

平成21年度～25年度

68,600千円

ホームページ等

http://jglobal.jst.go.jp/detail.php?JGLOBAL_ID=200901016948299943&t=1&d=1&q=1000162445



研究課題名 「混ぜない」、「集めない」をコンセプトとした資源回収型排水処理技術の開発と評価

北海道大学・大学院工学研究科・教授

ふなみず なおゆき
船水 尚行

研究分野：土木環境システム

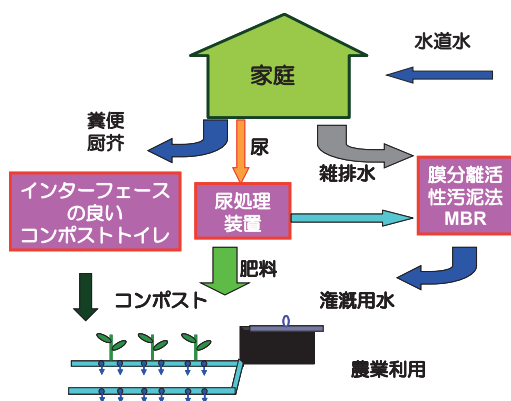
キーワード：水と衛生，排水分離，分散型，水循環，国際貢献

【研究の背景・目的】

開発途上国にあつては貧困の撲滅を目指したミレニアム開発目標の達成は国際社会が総力をあげて取り組むべき最優先の課題である。特に、「水/サンテーション」問題は世界の緊急な課題である。また、先進国においても日本の里山地域のように人口密度がそれほど高くない地域では、従来型のシステムは効率的ではなく、自然共生型で資源循環を実現する持続可能なシステムが必要とされている。

持続可能な排水処理は資源回収/排水再利用と処理の効率化，微量汚染物質の管理を同時に満たす必要がある。このために、「混ぜない」，「集めない」というコンセプトを適用した新しい排水処理体系を提案している。すなわち，家庭からの排水について，糞便，尿，雑排水を発生源で分離し，これら分離したものについて資源回収/排水再利用と目的とした処理を行うものである。

本研究では，(1)途上国農村モデル，(2)途上国スラム等都市域モデル，ならびに，(3)先進国における自然共生型資源循環排水処理モデルの3つを提唱し，これらのシステムに必要な(a)要素技術(糞便，尿，雑排水を対象とした処理技術)，(b)要素技術のシステム化ならびに，循環型社会における必須要件である(c)微量汚染物質評価法を開発することを目的とする。



自然共生型資源循環排水処理モデル(里山モデル)

「集めない」，「混ぜない」排水処理システムの利点：提案システムを水系や土壌系の汚染，資源循環，ならびに健康リスクなどの多くの観点から整理すると：(1)し尿の輸送に水を用いないことから，水消費量を減少させ，水需要構造を転換することができる；(2)し尿に多く含まれる栄養塩類を水循環過程から分離でき，水質保全効果をもつ；(3)し尿は安定な有機物源(コンポスト)に変換され，コンポスト内に保持されてい

る栄養塩を農業利用できる；(4)し尿に多く含まれる微量有害化学物質(ホルモン類，医薬品残渣)を水循環系から分離できる；(5)病原性微生物・有害物質が水循環系から分離されることにより，水利用に伴う健康リスクを低減する；(6)処理すべき雑排水量が減少し，処理装置のサイズが小さくなり，運転コストも低減。また，栄養塩のレベルも低下する；(7)雑排水処理水の再利用が可能となる；(8)パイプを必要としない

【研究の方法】

本申請では(1)要素技術開発→(2)システム化と実証実験→(3)システム評価→(1)要素技術開発という技術のイノベーションのサイクルを意識し，サイクルを最低1回まわすことを計画する。要素技術として(1)廉価でかつランニングコストの負担が少ないコンポスト型トイレ，(2)ヒューマンインターフェースの良い省エネルギー型コンポストトイレ，(3)雑排水を分離処理/処理水再利用する自然処理システム，(4)雑排水を処理する膜分離活性汚泥法の適用法の確立，(5)尿からリン資源の回収と微量汚染物質の処理を同時に行う尿の処理システムの開発を行う。実証実験をインドネシア，秩父で実施する。

【期待される成果と意義】

本申請の考え方は，先進国，途上国を問わずその国々に適した技術として今後重要性が増すと考えられる。特に発展途上国では，新たに社会基盤施設を整備する状況にあり，新しいサンテーション技術が取り入れられる可能性もある。システムの性能評価とこれらのシステムを支える要素技術の科学的に確かな検討結果が，サンテーション施設をはじめとする社会基盤施設整備計画の意思決定グループに大きなインパクトを与え，パラダイムシフトの機会となると考える。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Lopez Zavala Miguel Angel, Naoyuki Funamizu and Tetsuo Takakuwa: Onsite Wastewater Differentiable Treatment System: Modeling Approach, Water Science and Technology Vol.46, No.6-7, pp.317-324 (2002)
- Shinya Hotta and Naoyuki Funamizu: Biodegradability of fecal nitrogen in composting process, Bioresource Technology, vol.98, Issue:17, pp.3412-3414, 2007
- 船水尚行:分散型サンテーションと資源循環，監訳(技報堂，東京，2005)

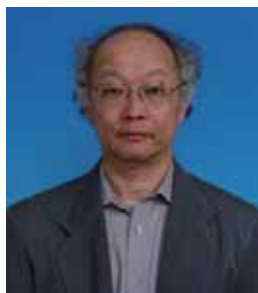
【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

83,100千円

ホームページ等

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



研究課題名 中近東・北アフリカにおけるビザンティン建築遺産の記録、保存、公開に関する研究

筑波大学・人間総合科学研究科・教授 ひだか けんいちろう
日高 健一郎

研究分野：工学

キーワード：建築史、保存・再生、文化財・文化遺産

【研究の背景・目的】

本研究は、中近東および北アフリカに残存するビザンティン時代の主要遺跡を対象に、ビザンティン建築の形成をみたユスティニアヌス1世時代(6世紀)の東ローマ(ビザンティン)帝国版図に対応した、以下5領域で研究を行う。基礎研究領域、考古学領域、保存・修復領域、工学領域、活用・公開領域。また、これらの研究を総合化し、I)古代から中世への建築的変容およびビザンティン建築の成立・波及を記述する、II)ローマ建築偏重を再検討し、建築遺産の重層的保護の基盤を整え、III)保存・修復計画を作成し、建築遺産の公開活用への指針を提示するとともに、IV)他の途上国に対しても有効となる建築遺産保護学際研究の枠組み事例の構築を上位目標としている。

【研究の方法】

「基礎研究領域」では、1)3Dレーザースキャナーにより対象を効率的に実測する。2)ビザンティン建築史に関する文献研究を行なう。3)スポリア研究では過去の発掘調査報告の精査、修復前の古写真のデジタル化を実施。4)各国の世界遺産申請書、イコモスの評価書などの各種文書の収集・分析。5)散乱する破損部材、崩壊部材の計測によるアナスティローシス(部材再配置)を検討、過去の修復評価のための基礎資料とする。

「考古学領域」では、1)ビザンティン時代の遺構の実測・発掘を実施、プトレmais遺跡の「城塞教会堂」の内部の表土除去、外溝の発掘を行う。2)3Dレーザースキャナーによる遺跡・遺物の記録を行い、保存処置を提示する。3)研究対象の将来的な遺跡の公開・活用プランを作成する。

「保存・修復領域」では1)遺跡・部材の破損状況を調査し、その原因の解明とアナスティローシスの記録と評価を行う。2)物性試験では、石およびレンガの物性値を測定し、水分・塩分濃度の変化についてシミュレーションを行う。

「工学研究領域」では、1)風向、風速、温湿度、CO、NO_x、SO_x、雨量、PH、日射量を計測し、風向風速とNO_x、SO_x濃度との相関等を分析する。また雨季の酸性雨についても検討する。2)保存・修復班、評価・活用班と共に、防護フェンスの配置、常緑樹の配置、日除けや覆いの設置、閉環境での

通風・換気等に向けた提案を行う。3)構造分析では、形状測定、常時微動計測データにもとづき、6面体ソリッド要素、4面体ソリッド要素による弾塑性有限要素解析を進める。また、常時微動モニタリングにより動的特性の変化と構造の劣化の関係を構造解析の視点から分析する。

「評価・公開領域」では、各領域の総合化を試みつつ、各遺跡のマネージメント・プランを作成する。現地調査では、サイト・ミュージアムの博物館機能調査を行い、整備指針の基礎データとする。

【期待される成果と意義】

1. ローマ期の遺構を偏重する旧宗主国(フランス、イタリア)の考古学研究は、旧支配地域ごとに個別に進められてきたが、本研究により、地中海の南北を含む広い視野と地域的広がりにおいて、高精度の実測値を伴うビザンティン建築史の体系的記述の基盤が形成される。

2. 一方で放置され、他方では過剰、粗雑、安易な修復が行われてきた対象遺産を最新技術によって評定し、環境条件を考慮した保存・修復および活用・公開指針と管理計画が当該国とユネスコに対して提示される。イスラム圏における先行文化遺産の再評価を促すこの成果は、他の地域に適用できる普遍的方法論としての意義を持つ。

3. わが国による国外文化遺産保護支援の基盤形成に貢献できる研究であり、既往の貢献・交流が少ない地域に対する学術的国際貢献としてわが国のプレゼンスを高める意義を持つ。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

日高健一郎、佐藤達生編『ハギア・ソフィア大聖堂学術調査報告書』中央公論美術出版刊 2004年8月所収の以下の論文ほか。

- ・Tatsuki Sato; Kenichiro Hidaka, "Deformation of the Main Dome", (和訳つき「中央ドームの変形」)、pp.67-91、2004年
- ・Kenichiro Hidaka; Tatsuki Sato, "Eastern semidome", (和訳つき「東側半ドーム」)、pp.111-114、2004年

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度
141,500千円



研究課題名 無機エレクトライドの領域開拓：
物質探索、機能設計、応用展開

東京工業大学・フロンティア研究センター・教授 **ほその ひでお**
細野 秀雄

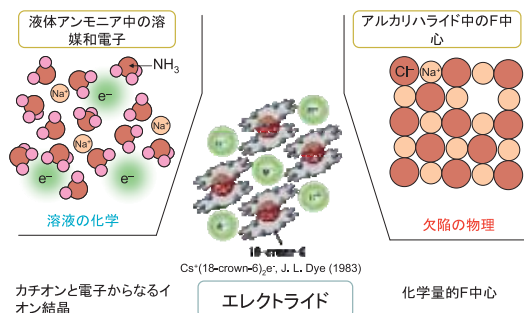
研究分野：工学、材料工学、無機材料・物性、機能性セラミックス

キーワード：エレクトライド、無機固体材料、機能開拓

【研究の背景・目的】

(目的)エレクトライド(電子化物)とは電子がアニオンの代わりに果たす結晶の総称である。申請者らは2003年に、この物質の発見以来最大の課題であった室温・空气中で安定なエレクトライドを初めて実現し、2004年にはその大量合成法を開発した。これらによってエレクトライドの物性科学の研究と応用の基盤が初めて揃った。本提案ではこれらの成果を基盤に、無機エレクトライドの新物質系の探索、光・電子・化学機能の探索とそれらの応用展開を検討し、材料科学に新しい領域を拓くことを目的とする。

エレクトライドとは？



(学術的背景) 電子物性は電子によって支配される。18世紀にイギリスのDavy 卿は、液体アンモニア中にアルカリ金属を溶解することで溶媒和電子の生成に成功し、液体金属としての研究が開始された。しかしながら、固体状態でこれを実現することは暫く不可能であった。1983年にこれを実現したのが、ミシガン大学のJames Dye 博士であり、彼はアルカリイオンと強固な包接錯体を形成するクラウンエーテルを用いることで、電子がアニオンとして働く結晶であるエレクトライドを得る事に成功した。エレクトライドは興味深い電子物性が期待されることから発表とともに多くの興味を集めたが、低温(最高でも-40℃以下。通常は-100℃以下)でしかも不活性雰囲気中でのみ安定であったため物性研究は殆んど進んでいないのが現状である。

【研究の方法】

- ① C12A7 エレクトライドのバルク電子物性と電子デバイスの試作
金属-絶縁体転移、金属-超伝導転移

電子デバイスとしては、高電界で酸素イオンと電子の交換に起因する抵抗変化メモリ素子を試作。

- ② C12A7 エレクトライド表面電子・化学機能探索
表面構造の解明、局所仕事関数測定、電子放出特性、ショットキー障壁の制御、エレクトライド薄膜の有機EL の電子注入層としての応用、化学反応(水溶液中での還元、カップリング反応、CO / NO の還元反応)

- ③ アモルファスエレクトライドの合成の試み

アモルファスで室温・空气中で安定なエレクトライドが実現できれば、ガラスやプラスチック基板上に薄膜を形成することが可能となり、応用分野が一気に拡大すると期待される。

- ④ 新しい安定な無機エレクトライドの合成

ナノサイズのかご型構造やチャンネル構造を有し、酸化物としての生成自由エネルギーの大きな無機結晶を対象に、化学的処理によるエレクトライドの合成を試みる。

【期待される成果と意義】

固体の中の溶媒和電子ともいふべき「電子化物」の科学と応用という物質科学の新領域が開けることが期待できる。また、資源的に豊富だが、これまで電子機能の発現とは縁遠かった典型金属酸化物の秘められた可能性を検討するという意義がある。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ 細野秀雄、神谷利夫、透明金属が拓く驚異の世界、サイエンスアイ新書、ソフトバンク(2006)。
- ・ S.Matsuishi, Y.Toda, M. Miyakawa, K. Hayashi, T.Kamiya, M. Hirano, I.Tanaka, and H.Hosono, High-density electron anions in a nano-porous single crystal: $[Ca_{24}Al_{28}O_{64}]^{4+}(4e^-)$, *Science* **301**, 626-629 (2003).
- ・ M.Miyakawa, S.W. Kim, M. Hirano, Y. Kohama, H. Kawaji, T. Atake, H. Ikegami, K. Kono, and H. Hosono: Superconductivity in an Inorganic Electride $12CaO \cdot 7Al_2O_3 \cdot e^-$; *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 7270-7271 (2007).

【研究期間と研究経費】

平成21年度-25年度

148,700千円

ホームページ等

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



研究課題名 次世代型耐熱材料としての複相金属間化合物の用途展開のための基盤学問体系構築

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授 たかすぎ たかゆき
高杉 隆幸

研究分野：材料工学

キーワード：高温材料

【研究の背景・目的】

地球温暖化を引き起こしている CO₂ 削減のためには熱変換システム装置や高温製造装置のエネルギー効率の向上が必要であり、新規な耐熱材料の開発が求められている。研究者等は、最密充填結晶構造 (GCP) に属する Ni₃X 型金属間化合物相同土を複相化することで高温強度と延性を兼備する新規耐熱合金開発のコンセプトを生み出し、高温材料として優れた特性を発現する基本成分と組織を創製した。

本研究では、優れた結晶整合性と微細組織を有する L1₂ 相 (Ni₃Al)–D0₂₂ 相 (Ni₃V) 擬 2 元系合金 (図 1) に重点を置いて研究を行う。まず、合金設計、微細組織形成機構、相・組織安定性、高温力学特性とその変形機構解明等の基礎研究、続いて、酸化特性さらには腐食特性等の耐環境特性について、加えて、数種の次世代型耐熱部材・部品の製造を企業との連携により試行し、用途展開のための道を拓くことを目的とする。

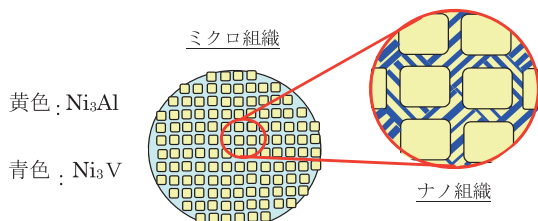


図 1 超微細 2 重複相組織の概念図

【研究の方法】

- 合金設計と組織創製および組織安定性の解明
各種合金成分における相関係の把握、構成相の同定、固溶限の決定に基づき、状態図の構築を行い、組織形成の概要を把握し、構成相間の結晶整合性と微細組織を有する合金設計と組織制御を行う。並行して、計算状態図の構築を押し進める。
- 高温力学および耐環境特性の解明
各種の高温力学試験を行う。これらの試験を通じて、高温度域で高強度、高延性、高クリープ寿命を兼備する合金を抽出する。続いて、高温大気中での酸化特性ならびに各種溶液中での腐食特性評価とその機構解明を行い、力学特性と耐環境特性とのバランスに富む合金の開発を行う。
- 製造・加工技術、用途展開
企業との連携研究により、素材製造法、2 次加工法の確立を行う。汎用製造・加工法により、ジェット・エンジンタービン・ブレード、硬質・高

融点金属用摩擦攪拌接合用ツール、高温特殊環境用締結部材、超耐熱特殊環境用軸受部材開発を行い、次世代型耐熱材料としての道筋をつける。

【期待される成果と意義】

- 学問的成果
金属・合金あるいはセラミックスに加えて第 3 の新素材と呼ばれている金属間化合物に耐熱材料としての市民権を与えることになる。既存合金系を包含する新規な合金設計と組織制御法を構築することができる。ヒエラルキー組織からなる合金の力学的・結晶学的・組織学的研究に関する新しい学問領域を先導することができる。
- 社会的意義
諸産業装置において高温操業・長時間運転が可能となり、エネルギー変換効率の向上と省エネルギーがもたらされ、それにより、地球温暖化ガス排出量を削減することができる。既存金属産業技術体系の踏襲と既存製造・加工装置の利用により、安価にして大量に供給することが可能となる。部材の長寿命化やメンテナンスの不要化により、製造装置の信頼性の確保がなされ、安心・安全な装置産業社会を作ることができる。さらには、新規な耐熱材料関連産業の創出および既存産業の構造改革・技術革新をもたらすことができる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ S. Shibuya, Y. Kaneno, M. Yoshida and T. Takasugi, Dual multi-phase intermetallic alloys composed of geometrically close-packed Ni₃X (X:Al, Ti and V) type structures – II. Mechanical properties, Acta Materialia, 54, 861-870 (2006).
- ・ S. Shibuya, Y. Kaneno, M. Yoshida, T. Shishido and T. Takasugi, Mechanical Properties of dual multi-phase single-crystal intermetallic alloy composed of geometrically close packed Ni₃X (X: Al and V) type structures, Intermetallics, 15, 119-127 (2007).

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 – 24 年度

79,500 千円

ホームページ等

http://www.eng.osakafu-u.ac.jp/Japanese/02senko/materi_group/group05.htm



研究課題名 ウェーハ等価薄膜太陽電池の直接製造を可能とする
メゾプラズマ次世代シーメンス法開発

東京大学・大学院工学系研究科・教授 よしだ とよのぶ
吉田 豊信

研究分野：材料工学

キーワード：プラズマ処理、太陽電池

【研究の背景・目的】

エネルギー・環境問題に対応する高性能太陽電池製造技術開発の世界的要請を受けて、革新的高純度シリコン原料製造に向けた新機軸展開が精力的に進められている。特に、現行のシーメンス法は高純度シリコン原料製造法としてある意味では完成された技術ではあるが、原理的に反応率は高々30%を越えず、また基体加熱電力コストが高いなどの欠点もある。近年、種々の改良シーメンス法が検討されているが、何れも SiHCl_3 の水素還元過程を流動床や炉壁を利用した反応表面積向上により不均化反応の効率化を図ったものでしかなく、著しい需要拡大が予測される太陽電池開発に対応するためには、この反応率を飛躍的に向上させる技術に期待が寄せられている。

ここに我々が 10 年来継続展開して来た熱プラズマと低圧プラズマの中間に位置する新規メゾプラズマの、熱・イオン衝撃が抑制された環境下での高速輸送の特徴に着目すれば、高フラックス励起水素原子の利用により、シーメンス法の速度論的限界を新たな反応パスによって収率を高められる可能性が見えてくる。他方、メゾプラズマ CVD による高品質エピタキシャル薄膜の高速成長も実証しており、これら技術の統合により、ウェーハ等価品質の薄膜を高速で直接製造しうる画期的な太陽電池製造技術の可能性が顕わとなる。

以上を背景に、本研究では、メゾプラズマ環境下での SiHCl_3 の励起水素原子高効率還元を特徴とした高品質 Si 薄膜の直接堆積を可能とする次世代製造技術開発を目指し、Si 結晶太陽電池の将来展開基盤技術確立の一端を担う事を目的とする。

【研究の方法】

「メゾプラズマ次世代シーメンス法」の中核を成す要素技術は、 SiHCl_3 の励起水素原子による高効率還元と、高品質 Si 薄膜の直接高速堆積とに大別され、この技術確立に向けて追求すべき学術的課題は、メゾプラズマフロー理解の深化に基づく水素原子の有効利用とメゾプラズマ/基板相互作用に基づく高速シリコンエピタキシー制御となる。以上より、段階的研究項目として、1)メゾプラズマ CVD 装置基本設計、2)メゾプラズマフロー制御、3)動的プロセス制御に基づく高速・高品質化、4)次世代シーメンス法提案を設定し、各項目を材料プロセス工学的指標(収率、品質、速度)に注視しつつ、プラズマ流体と薄膜・結晶成長の視点より、以下の研究フローに基づき進める。

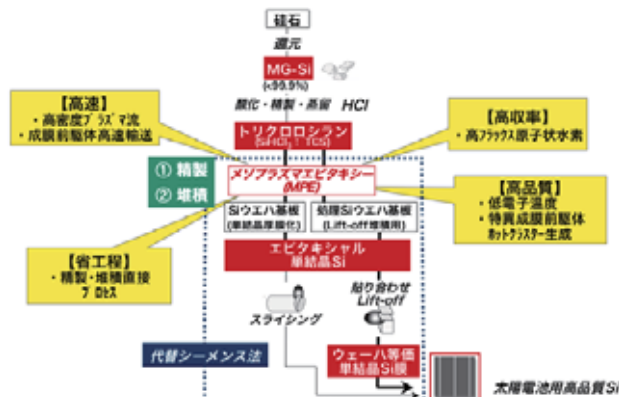


図 本研究フローの概念図

【期待される成果と意義】

SiH_4 を原料としたメゾプラズマ CVD によって最速 1000nm/s の Si 多結晶膜堆積、並びに 70nm/s 程度の高堆積速度でのエピタキシャル膜の低温堆積を先行研究により既の実証している。また、メゾプラズマ条件下では低圧プロセスに比して3桁程度高い水素フラックスが予測される。従って、メゾプラズマの利用により高効率還元と同時に単結晶に近い Si 膜が得られる可能性が高く、リフトオフ技術の導入により幾つかのプロセスを省き SiHCl_3 から直接太陽電池を製造しうることとなり、産業的観点からも研究の意義は極めて大きい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- J. M. A. Diaz, M. Kambara, T. Yoshida, Detection of nanoclusters by x-ray scattering during silicon film deposition by mesoplasma chemical vapor deposition, J. Appl. Phys., 201 (2008) 013536-5.
- J. M. A. Diaz, M. Sawayanagi, M. Kambara, and T. Yoshida, Electrical properties of thick epitaxial silicon films deposited at high rates and low temperatures by mesoplasma chemical vapor deposition, Jpn. J. Appl. Phys., 46(8A), (2007) 5315-5317.

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 - 24 年度

124,000 千円

ホームページ等

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

【基盤研究(S)】

理工系(工学Ⅱ)



研究課題名 ペタフロップス級計算機に向けた次世代 CFD の研究開発

東北大学・大学院工学研究科・教授 なかはし かずひろ
中橋 和博

研究分野：総合工学

キーワード：航空宇宙流体力学

【研究の背景・目的】

本研究は、開発が進むペタフロップス級のスーパーコンピュータを念頭に、その能力を最大限に活かす次世代 CFD (数値流体力学) とその応用技術を開発することを主目的とする。

航空関連の CFD の発展には過去に二度のブレイクスルーがあった。一つ目は 70 年代に開発された境界適合構造格子であり、遷音速翼型の高性能化に寄与した。二つ二つ目は 90 年代の非構造格子で、航空機全機の空力解析・設計が飛躍的に進展した。

しかし、現行の主流である非構造格子 CFD は空間精度の不足が課題であり、かつ近未来の大規模計算時には格子生成や後処理の負荷がボトルネックとなることが予想され、CFD に新たにブレイクスルーが求められている。



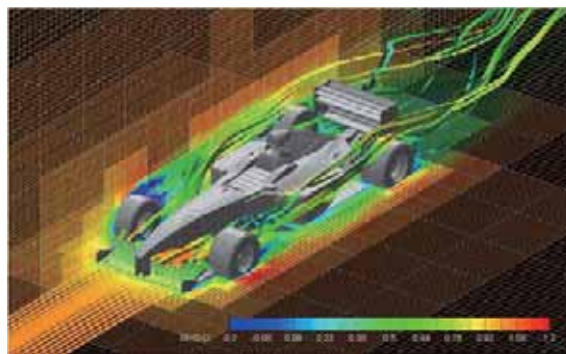
CFD の進展

本研究は、ペタフロップス級計算機開発および将来の更なる計算機性能の向上を念頭に、等方直交格子をベースとする次世代 CFD アルゴリズムを世界に先駆けて構築し、同時に空力形状最適化や空力騒音低減等への応用研究を加速して、シミュレーション技術の高度化を通じて航空機をはじめとする流体機械の高性能化と環境適合化に資することを目的とする。

【研究の方法】

本研究では、次世代スーパーコンピュータの能力を可能な限り引き出すために等方等間隔直交格子をベースとする CFD の構築を目指す。従来の直交格子の問題点を解決し且つ大規模並列計算機での利用を念頭に、キューブ状計算領域を積み上げる Building-Cube Method(BCM)をコアとする

CFD ソフトである。このアプローチにより、従来の非構造格子 CFD では半日から数日要していた格子生成を数分にまで短縮する。また、基本となる直交格子ソルバーでの高精度化を図り、キューブ構造による大規模並列計算やデータ圧縮での後処理の負荷も大幅に低減する。



2 億点格子による大規模計算

【期待される成果と意義】

航空機空力解析は離着陸時などの非巡航時の精度良い空力解析が現行 CFD では困難であり、その解決が期待される。また、航空機の脚のような複雑形状からの空力音源解析にも有効であろう。形状表現の自由度が高まることで物体変形・移動問題も扱い易くなり、最適設計の応用範囲を拡大する。航空 CFD の Grand Challenge とも言われる飛行試験模擬 (Digital Flight) も計算機性能の向上により将来には実現するであろう。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- T. Ishida, S. Takahashi, K. Nakahashi, "Efficient and Robust Cartesian Mesh Generation for Building-Cube Method", *J. of Computational Science and Technology*, Vol.2, No.4, 435-446, 2008.
- S. Takahashi, T. Ishida, K. Nakahashi, H. Kobayashi, K. Okabe, Y. Shimomura, T. Soga, A. Musa, "Study of High Resolution Incompressible Flow Simulation Based on Cartesian Mesh", *AIAA 2009-563, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Jan. 2009.

【研究期間と研究経費】

平成 21 年度 - 25 年度

164,800 千円

ホームページ等

[http:// www.ad.mech.tohoku.ac.jp/](http://www.ad.mech.tohoku.ac.jp/)

基盤研究(S)



研究課題名 ヘリコン源を用いた先進的無電極プラズマロケットエンジンの研究開発

九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授

しのはら しゅんじろう
篠原 俊二郎

研究分野：航空宇宙工学、プラズマ科学

キーワード：推進・エンジン、プラズマ応用、航空宇宙流体力学

【研究の背景・目的】

電気推進ロケットエンジンとは、太陽電池エネルギー等を用いて推進剤を電離（即ち、プラズマ化）し、電氣的に噴射するロケットエンジンです。通常の化学推進ロケットエンジンに比べると格段に燃費が良く、宇宙船がひとたび宇宙空間に出た後で用いるロケットエンジンとして大きな期待が寄せられています。実際、小惑星探査機「はやぶさ」で電気推進ロケットエンジンの一種であるイオンエンジンが使われ大きな成果を上げました。ところが、従来使われてきているものには大きな欠点があります。高密度プラズマと直接接触する電極群があるため、それらの損耗で寿命が決まってしまうのです。従って、電気推進ロケットエンジンの究極の姿は、オール無電極（プラズマ粒子を直接授受する電極を持たないという意味）でプラズマを生成・加速することです。

本研究では、将来の着実な宇宙航行計画に資するため（図1を参照）、本研究グループがこれまでに修得した知見を集大成し、高効率で損耗箇所の無い、原理的に無限寿命の“先進的無電極”プラズマロケットエンジンを完成させ、その工学的体系化を目指します。



図1 先進的無電極プラズマロケットエンジンを搭載する宇宙船のイメージの一例。

【研究の方法】

噴射されるプラズマが直接エンジン容器と触れないようにするため、若干の磁場を使います。磁場中での高効率プラズマ生成法としてヘリコン波と呼ばれるプラズマ波動を用いる方法が知られています。本研究グループのメンバーにはこの分野のエキスパートがいます。我々の目指す先進的無電極プラズマロケットエンジンでは、プラズマ生成部に“ヘリコン源”を用います。ロケットエン

ジン用にまずヘリコン源の最適化を行います。

我々は既に6種類の異なる無電極（と言っても絶縁体の容器外に設置されたアンテナは用いますが）プラズマ加速法を提案しており、その内の2種類については原理実証実験も済ませています。これら種々の無電極加速法について同時進行的に実験を進め、理論・計算機シミュレーション等との比較検討を通して最適化を行いつつ、性能評価をし、最適な手法を選択して行きます。具体的な推進性能目標は、噴射速度 40 km/s で推進効率 50% 以上です。最終的には、異なるエンジン寸法に対応できるようなエンジンバリエーション設計まで実施し将来の実用化に備えることとなります。

【期待される成果と意義】

超長寿命のプラズマロケットエンジンを実現することにより、これまで数年であった衛星や惑星間探査機の寿命を飛躍的に延ばすことができ、今まで考えられなかったような超長期宇宙ミッションが可能となり、真の意味での“宇宙船”構築に貢献できるでしょう。宇宙空間プラズマを吸い込みつつ噴射するタイプのロケットエンジンへの道も拓け、将来の惑星・恒星間旅行への夢も実現へ向かうでしょう。本研究のスピンオフとして、半導体製造や先進的ゴミ処理施設で使用されるプラズマ装置の寿命問題に対しても“オール無電極”という明快なソリューションを与えることができるでしょう。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ S. Shinohara, *et al.*: Development of High-Density Helicon Plasma Sources and Their Applications, *Phys. Plasmas* **16**, 057104 1-10 (2009).
- ・ K. Toki, *et al.*: Compact Helicon Source Experiments for Electrodeless Electromagnetic Thruster, *Proc. 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* (Cincinnati, Ohio, 2007) AIAA-2007-5260.

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

160,700千円

ホームページ等

<http://zone.aees.kyushu-u.ac.jp/~sinohara/Homepage/shinohara.html>
sinohara@aees.kyushu-u.ac.jp



研究課題名 縦渦導入型広帯域スクラムジェットの研究

宇宙航空研究開発機・構宇宙輸送ミッション本部・主任研究員 須浪 徹治

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：スクラムジェットエンジン，超音速燃焼，縦渦，乱流，極超音速輸送機，宇宙輸送機

【研究の背景・目的】

飛行マッハ数4~15程度での極超音速飛行が可能な将来の極超音速輸送機・宇宙輸送機の推進器として，エンジン可変部の少ない単一形態で広いマッハ数にわたって高性能作動可能な「広帯域スクラムジェット」が期待され，その基盤技術・システムの開発が急務となっている。

本研究は，スクラムジェットエンジンの性能の鍵となる超音速混合燃焼の独自技術である縦渦導入型燃焼器（図1）と空気取入口（インレット）を組合せた「縦渦導入型広帯域スクラムジェット」というエンジンシステムを創案し，極超音速推進性能の飛躍的向上を目的として行われるものであり，「縦渦導入型広帯域スクラムジェット」に関し，下記(A)~(C)の課題に取り組む。

- (A) 基盤技術の高度化，
- (B) 要素・システム設計とプロトタイプを試作
- (C) 性能評価

【研究の方法】

研究体制は，研究代表者を含めスクラムジェット研究に携わってきたJAXA，大阪府立大学，東北大学，慶応義塾大学の研究者に加え，研究代表者らとスクラムジェットの共同研究を行ってきた仏ONERA(フランス航空研究所)，独DLR(ドイツ航空宇宙センター)の研究者から構成する。また，大学院学生等の参加も積極的に受け入れ，若手研究者の育成にも寄与する。

課題(A)では，エンジン性能を決定的に支配するインレット，燃焼器要素の基盤技術を確立する。インレット設計・評価ツール構築，縦渦を利用した混合燃焼促進制御手法の高度化，着火・保炎・燃焼制御，混合燃焼過程の解明，境界層制御に関し，実験的，数值的，理論的研究を行う。

課題(B)では，(A)で得られた知見に基づき，スクラムジェットの広帯域化に必要なインレット，燃焼器要素，全体システムの設計手法を確立し，具体的形状設計に進む。広いマッハ数範囲における性能が格段に優れたエンジンの設計を目指す。

課題(C)では，広帯域スクラムジェットとしての要素・全体システムの性能評価と技術課題の抽出を行い，その結果を上記(A),(B)へフィードバックする。

【期待される成果と意義】

スクラムジェットの価値は広い飛行マッハ数範

囲を通して高効率作動可能とすることで格段に高くなるが，このような「広帯域スクラムジェット」は世界的に未確立の極めて革新的な技術である。本研究により基盤技術を格段に向上してシステム統合し，「縦渦導入型広帯域スクラムジェット」という独自コンセプトを実現させることにより，これをターボジェットやロケットと併用・複合化してミッションに応じた柔軟な極超音速輸送・宇宙輸送システムの構築が可能となる。これにより，本分野で我が国が世界をリード可能な高い国際競争力の獲得とともに，輸送・学術分野にとどまらず幅広い分野への波及効果が期待される。

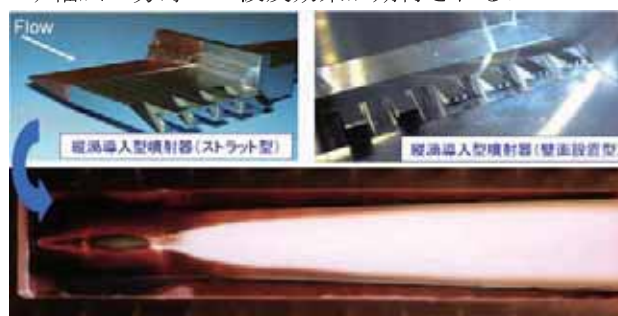


図1 縦渦導入型燃料噴射器（ストラット型，壁面設置型）と超音速燃焼炎（同ストラットによる）

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・Sunami, T., Wendt, M. N. and Nishioka, M., "Supersonic Mixing and Combustion Control Using Streamwise Vortices," AIAA Paper 98-3271, 1998.
- ・Sunami, T., et al., "Mixing and Combustion Control Strategies for Efficient Scramjet Operation in Wide Range of Flight Mach Numbers," AIAA 2002-5116, 2002.
- ・Sunami, T., et al., "Effects of Streamwise Vortices on Scramjet Combustion at Mach 8-15 Flight Enthalpies - An Experimental Study in HIEST," ISABE 2005-1028, 2005.
- ・須浪 他., "縦渦導入型スクラムジェットのマッハ8燃焼実験 - 高温衝撃風洞によるマッハ8燃焼実験," 日本航空宇宙学会誌, Vol.53, No. 621, 467-481, 2005.

【研究期間と研究経費】

平成21年度 - 25年度
116,800千円
ホームページ等
<http://www.jaxa.jp>
sunami.tetsuji@jaxa.jp



研究課題名 低域混成波による球状トカマクプラズマの電流駆動

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授 たかせ ゆういち
高瀬 雄一

研究分野： 核融合学

キーワード： 炉心プラズマ

【研究の背景・目的】

トカマク型プラズマ閉じ込め装置では、プラズマ中に流れる電流（プラズマ電流）が不可欠である。プラズマ電流は通常、トーラス中心部に位置するCSと呼ばれるコイルで駆動される。CSを用いずにトカマクを運転できれば、トカマク核融合炉の小型化による経済性向上が実現可能となる。これは、トーラス中心部のスペースが限られている球状トカマク（ST）では、核融合炉の成否に関わる最重要課題である。電子サイクロトロン波（ECW）による低プラズマ電流のST配位形成は、東京大学のTST-2装置等で既に実証されている。本研究では、これに低域混成波（LHW）による電流駆動を加え、プラズマ電流を増加させることを目指す。これを実証できれば、ST型核融合炉の実現性が格段と高まる。

【研究の方法】

実験には東京大学現有のTST-2球状トカマク装置および周波数200MHz、出力400kWの高周波発生装置を用いる。本研究は江尻晶准教授および永島芳彦助教と協力して進める。本研究ではまずLHW励起に関する研究を複数のアンテナを用い、段階的に進める。これらの実験結果の比較より、プラズマ加熱により自発的に発生する圧力駆動電流と、波動が電子の速度分布関数を非対称に変形させることによる直接的な駆動電流とを分離する。また、速波励起と遅波励起の比較よりモード変換に関する情報が得られ、LHW直接励起の必要性を判断できる。さらに複数の方法による波動の同時多点計測、電子の速度分布関数の計測、磁気計測に基づくプラズマ平衡の再構成、プラズマの温度・密度分布計測等の結果を総合して、電流駆動



TST-2 球状トカマクと LHW 入射装置（左側）

の物理機構を明らかにする。また、これら実験結果を世界最高水準の波動解析コードTORICLHの計算結果や、非線形現象であるパラメトリック崩壊過程の計算結果と対比し、波動物理および波動・粒子相互作用の解明に資する。

【期待される成果と意義】

トカマクではLHWによる電流駆動は効率が最も高く、プラズマ電流の増加も実証されているが、STプラズマは極めて高い比誘電率をもつため、LHWによる電流駆動は不可能と考えられてきた。しかし、ECWにより生成されたプラズマは密度が低く、比誘電率も1程度であるため、この密度を保ったままプラズマ電流を増加できる可能性は十分高い。このような実験は世界的にも例がなく、ユニークな独創性の高い成果が期待できる。ST核融合炉において、プラズマ生成および高自発電流を利用した非誘導法による定常燃焼維持には目途が立っていると考えられるが、プラズマ生成から定常燃焼維持までどう繋ぐかが最大の課題となっている。LHWにより、ECWに比べ高効率のプラズマ電流増加が実現できれば、この懸念事項の払拭に大きく貢献でき、更に通常トカマク型核融合炉の大幅な経済性向上も期待できるようになるため、意義は極めて大きい。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Takase, T. Fukuda, X. Gao, M. Gryaznevich, et al, "Plasma current start-up, ramp-up, and achievement of advanced tokamak plasmas without the use of ohmic heating solenoid in JT-60U," J. Plasma Fusion Res. **78**, 719-721 (2002).
- Y. Takase, A. Ejiri, S. Shiraiwa, Y. Adachi, et al., "Plasma current start-up experiments without the central solenoid in the TST-2 spherical tokamak," Nucl. Fusion **46**, S598-S602 (2006).

【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

74,100千円

ホームページ等

http://fusion.k.u-tokyo.ac.jp/research/kakenhi_h21.html

takasle@k.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 次世代アト秒・フェムト秒パルスラジオリシスに関する研究

大阪大学・産業科学研究所・教授

よしだ よういち
吉田 陽一

研究分野: 工学

キーワード: パルスラジオリシス、量子ビーム誘起高速反応、短パルス電子ビーム、時間分解吸収分光

【研究の背景・目的】

フェムト秒・アト秒時間領域における量子ビーム誘起反応・現象の解明は、新しい物質の創製や新しいテクノロジーの開発にとって極めて重要である。短時間電子線パルスと分析光レーザーパルスを組み合わせたパルスラジオリシス法は、量子ビーム誘起現象を直接的に測定する手法であり、これまでにピコ秒及びサブピコ秒時間領域での放射線化学初期過程や量子ビーム誘起現象の解明に大きく貢献してきた。

本研究では、1フェムト秒以下の電子線パルスを発生し、アト秒・フェムト秒時間分解能を有する次世代パルスラジオリシスシステムを開発する。そのために、ダブルデッカー電子ビーム、等価速度分光法等の新しい手法を実用化する。この新システムを用いて、量子ビーム誘起現象をアト秒・フェムト秒時間領域で測定することにより、量子ビーム誘起反応初期過程の全貌の解明を目指す。

【研究の方法】

本研究については、サブフェムト秒・アト秒電子線パルスの発生からフェムト秒・アト秒パルスラジオリシスの構築、量子ビーム誘起高速現象の測定まで5年間計画しており、①サブフェムト秒・アト秒電子線パルスの生成と計測手法を確立する。②ダブルデッカー電子ビームパルスラジオリシス(図1)を開発し、励起パルスと分析光パルスの時間ジッターによる時間分解能劣化の問題を解決する新規なパルスラジオリシス法を確立する。③等価速度分光法を利用したサブフェムト秒時間分解能を持つパルスラジオリシスを実現し、量子ビーム誘起現象のフェムト秒・アト秒時間領域における実時間追跡手法を確立する。

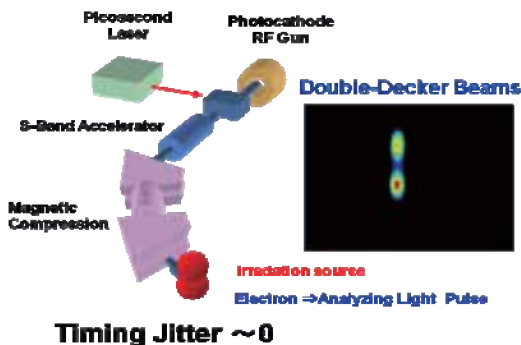


図1 ダブルデッカー電子ビーム加速器

【期待される成果と意義】

次世代の極低エミッタンス・短パルス電子ビームを得ることが可能となり、さまざまな先端的な加速器科学やビーム物理への新展開が期待できる。また、本提案したダブルデッカー電子ビーム法と等価速度分光法は、全く新しい概念の測定法である。次世代のフェムト秒やアト秒の時間分解分光が可能となる。

これにより、①フェムト秒・アト秒時間領域での実時間追跡の実現、②量子ビーム誘起現象に対する本質的理解の達成、という、極めて独創的内容を有する学術的成果が達成でき、新規機能性材料創製への指針、量子ビーム誘起物理化学研究へのブレーク・スルー、環境・エネルギー・医療・ナノテクノロジー関連物質・材料の開発と分析への展開を期待できる(図2)。

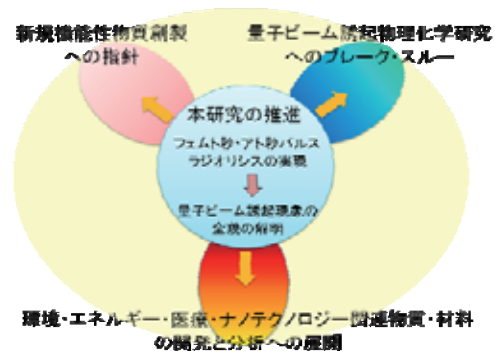


図2 期待される成果と波及効果

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- J. Yang, T. Kondoh, K. Norizawa, Y. Yoshida, S. Tagawa, "Breaking Time-Resolution Limits in Pulse Radiolysis", Radiat. Phys. Chem., in press (2009).
- A. Ogata, T. Kondoh, J. Yang, A. Yoshida, Y. Yoshida, LWFA of Atto-Second Bunches for Pulse Radiolysis, Int. J. Modern. Phys. 21, 447-458 (2007).

【研究期間と研究経費】

平成21年度-25年度

161,300千円

ホームページ等

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/project-s/project-j.htm>