

【特別推進研究】

理工系（数物系科学）



研究課題名 拡張テレスコープアレイ実験—最高エネルギー宇宙線で
 解明する近傍極限宇宙

東京大学・宇宙線研究所・准教授

さがわ ひろゆき
 佐川 宏行

研究課題番号： 15H05693 研究者番号： 80178590
 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】

北半球最大規模の宇宙線望遠鏡テレスコープアレイ(TA)は、2008年から5年間の観測によって、 5.7×10^{19} の19乗電子ボルト(E_{cutoff})以上の最高エネルギー宇宙線の到来方向が大熊座付近の特定の領域に集中するホットスポットの兆候を見出した。また、最高エネルギー宇宙線の発生源が地球から約2億光年以内の近傍に限られることを示す、宇宙線の到来頻度の急激な減少を E_{cutoff} 以上で観測した。これらは、最高エネルギー宇宙線の起源天体を近傍の宇宙で確定できる可能性を示す世界で初めての観測結果である。本研究ではTAの観測面積を4倍に拡張して観測事象取得ペースを加速することにより、最高エネルギー宇宙線による近傍の極限宇宙の解明を目指す。

【研究の方法】

超高エネルギー宇宙線が大気中に入射した際に膨大な二次粒子群が発生し、直径約10キロメートルに

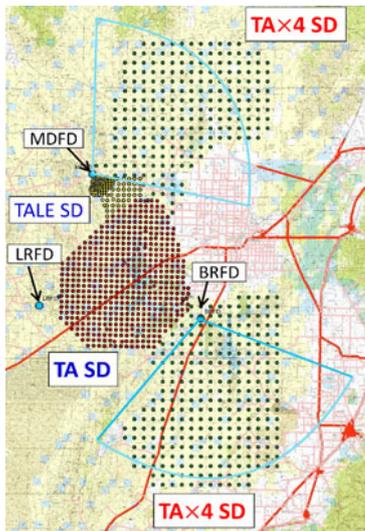


図1 TA×4の配置図

わたって地表に降り注ぐ。現TAでは、米国ユタ州に、面積が3平方メートルのプラスチックシンチレータ検出器507台を1.2キロメートル間隔で基盤の目状に配置して約700平方キロメートルの地表をカバーし、降り注ぐ二次粒子を直接観測する。この特別推進研究では、2.08キロメートル間隔で500台の検出器をTAの北東と南東に追加設置し、TAを合わせて、観測面積を約4倍の3000平方キロメートルにする。

最高エネルギー宇宙線を高統計で検出し、北天のサーベイを行い、宇宙線のエネルギー毎の頻度と粒子種の測定と合わせて、最高エネルギー宇宙線の到来方向の測定からその起源天体を同定する。これにより最高エネルギー宇宙線を生む宇宙の極限現象・極限天体の研究を推進する。

【期待される成果と意義】

これまでのデータと合わせて、研究期間内に現TAの19年分に相当する約300例の最高エネルギー宇宙線を観測できる見込みである。これによって、ホットスポットを確実に確認し、スポット内の詳細な構造を調べ、その起源を探る。また、他の到来方向に過剰スポットがあるかを探索し、近傍の銀河分布や活動的銀河などの相関を調べる。また複数の宇宙線が一か所から到来するような点源の探索を行う。最高エネルギー領域の宇宙線の頻度・到来方向の異方性・粒子種を詳細に測定して、その発生・伝播機構を明らかにする。さらに、超高エネルギーガンマ線・ニュートリノを探索することによって、それらの発生機構と、最高エネルギー領域の宇宙線頻度の急激な減少との関係を探る。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- “The cosmic-ray energy spectrum observed with the surface detector of the Telescope Array experiment”, T. Abu-Zayyad et al., *Astrophys. J.*, 768:L1 (5pp), 2013.
- “Indications of intermediate-scale anisotropy of cosmic rays with energy greater than 57 EeV in the northern sky measured with the surface detector of the Telescope Array experiment”, R.U. Abbasi et al., *Astrophys. J.*, 790:L21 (5pp), 2014.

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
 447,100千円

【ホームページ等】

<http://www.icrr-tokyo.ac.jp/~hsagawa/TAx4/>
hsagawa@icrr.u-tokyo.ac.jp



研究課題名 星間水素の精密定量による新たな星間物質像の構築

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

ふくい やすお
福井 康雄

研究課題番号：15H05694 研究者番号：30135298

研究分野：天文学

キーワード：星間水素、星間ダスト、ガンマ線、バリオン、NANTEN2

【研究の背景・目的】

星間物質、特に主成分である水素の精密な定量は、天文学の長年の重要課題である。星形成の場である星間分子雲は温度が低いために、主成分である水素分子 H_2 の放射が励起されず、直接観測できないために精密定量が困難であった。 H_2 のかわりに微量成分である一酸化炭素分子 CO の波長 2.6 mm の電波強度から H_2 の量を推定する手法が通常用いられるが、その精度はファクター2程度が限界とされる。一方、ガンマ線観測は、中性水素原子 HI と CO によっては説明がつかない星間物質「ダークガス」が存在し、その正体は大きな謎とされてきた。

申請者らは、2014 年、宇宙背景放射プランク衛星によるサブミリ波のダスト放射を利用して、精密に水素原子 HI 及び分子 H_2 を定量する手法を見いだした。この新手法は、プランク衛星の 4 バンドのデータから導出されたダストの温度 T_d ごとに同様に導出された 353 GHz の光学的深さ τ_{353} と HI の強度の比較 (図 1) から、ガスダスト比を一樣として HI の光学的厚みを求め、ほぼ 10 % の精度で水素の定量を実現した。このような精密定量は従来の限界を大きく打開し、宇宙における星間物質を精密に捉え、星形成はもとより多岐の課題に波及すると予想される。

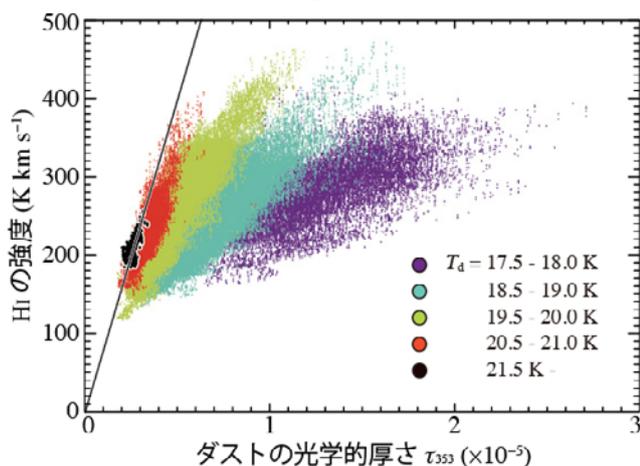


図1: プランク衛星によるダストの光学的深さ τ_{353} と、 HI の強度の比較。カラーは、ダストの温度を示す。

【研究の方法】

本研究の具体的な課題は次のとおりである。南米チリに設置した申請者らの独自の 4 メートルサブミリ波望遠鏡 NANTEN2 による CO 分子雲広域観測を実施する。本研究ではこの観測に用いる新多ビーム受信機を開発し、115 GHz においては広域観測の効率を 6

倍増する。本観測はこれまでカバーされてこなかった高銀緯を広く高分解能で観測することにポイントがある。また、特に「ダストの光学的厚みが CO と HI の境界に相当する部分」について高感度観測を実施し、「原子分子転移層」を特定する。また、既存の HI アーカイブデータに加えて現在進行中の GASKAP 計画 (2016 年より本観測開始予定) にメンバーとして参加し高角度分解能の HI 観測を行う。

【期待される成果と意義】

本研究の目標は、星間の水素原子と水素分子の物理状態と運動を徹底して解明し、星間雲についての理解を飛躍的に向上させることにある。水素は宇宙でもっとも支配的なバリオンの存在形態であり、その精密定量のインパクトは星間物質の物理・化学から、銀河における星形成史、水素分子形成、宇宙線の定量と起源等に大きな波及効果が予想される。星間物質の飛躍的な理解を実現することは学術的に高い価値があり、我が国の星間物質研究をさらに革新させるために急務である。この成果は、ALMA 望遠鏡他の最新鋭装置や TMT などによる今後の我が国の宇宙研究に強い競争力をもたらすと期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

“HI, CO, and Planck/IRAS Dust Properties in the High Latitude Cloud Complex, MBM 53, 54, 55 and HLCG 92-35. Possible Evidence for an Optically Thick HI Envelope around the CO Clouds”, Fukui, Y., Yamamoto, H., Tachihara, K. et al. ApJ, 796, 59–69, 2014
 “Optically Thick HI Dominant in the Local Interstellar Medium: An Alternative Interpretation to “Dark Gas””, Fukui, Y., Yamamoto, H., Tachihara, K., Sano, H. et al. ApJ, 798, 6–20, 2015

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度–31 年度
424,200 千円

【ホームページ等】

<http://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/ae/>
(名古屋大学 天体物理学研究室)

【特別推進研究】

理工系（数物系科学）



研究課題名 太陽系始原物質の3次元構造から探る宇宙・太陽系における固体物質の生成・進化モデル

京都大学・大学院理学研究科・教授 つちやま あきら
土山 明

研究課題番号：15H05695 研究者番号：90180017

研究分野：数物系科学、地球惑星科学、岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：地球惑星物質、凝縮、宇宙風化、はやぶさ2

【研究の背景・目的】

宇宙において物質がどのように生成され、どのように進化してきたか、我々の地球を作った物質の究極のルーツは未だよくわかっていない。理論・天文観測モデルによると、赤色巨星などの進化末期の恒星の周りで高温ガスの凝縮により固体微粒子が生成され、星間空間で粒子線照射により変成（宇宙風化）を受け、星間ガスとともに集まって太陽系が形成されたと考えられているが（図1）、その実証はされていない。一方、太陽系形成時からほとんど変化を受けていない始原物質である彗星塵や隕石の中に、先太陽系由来の微粒子の存在が明らかにされ、太陽系だけでなく先太陽系での固体生成や変成過程の物質科学的研究が可能になりつつある。また、本研究で着目する物質の3次元構造（図2）は、微小・微量な試料から形成・進化履歴を読み解く鍵となる新たな情報源である。

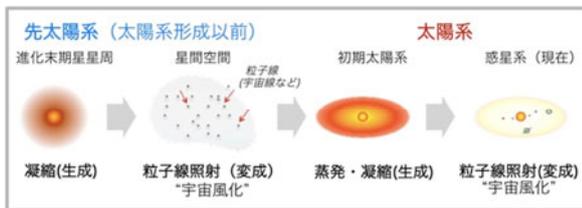


図1 宇宙における固体生成と進化

本研究の目的は、太陽系始原物質の3次元構造分析とその構造を再現する条件を実験的に調べることにより、先太陽系と太陽系という2つの異なった環境における物質の生成・変成過程を物質科学的に実証し、宇宙・太陽系における固体物質の生成・進化モデルを物質科学的に構築することにある。

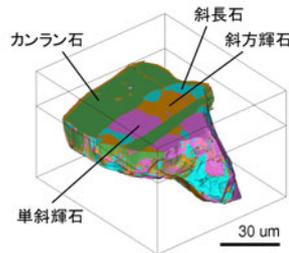


図2 はやぶさ粒子の3次元構造（上半分を切断）

【研究の方法】

①固体微粒子の生成：太陽系の固体原材料物質である可能性が指摘されている彗星塵中の GEMS と呼ばれる金属鉄・硫化鉄ナノ粒子を含む非晶質珪酸塩微粒子（図3）の3次元構造分析と、高周波誘導熱プラズマ装置を用いた凝縮の再現実験を組み合わせることにより、その生成条件と起源を明らかにする。
②固体微粒子の変成：小惑星探査機「はやぶさ」が

採取した粒子など宇宙風化を受けた試料と宇宙線や太陽風照射を模擬した粒子線照射実験生成物の3次元構造を比較し、宇宙風化による変成条件を決め、星間空間での宇宙風化の役割を明らかにする。③彗星塵や隕石（炭素質コンドライト）の無機物（鉱物）だけでなく有機物や水を含めた3次元構造を求め、太陽系始原物質の生成と進化過程を明らかにする。④上記研究を進めるために、cmから原子に至るマルチスケールでの3次元構造分析手法を開発する。

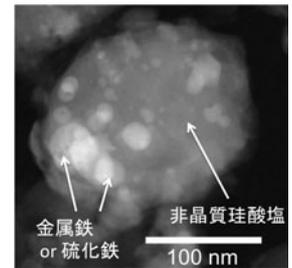


図3 彗星塵中の GEMS の2次元像（STEM/HAADF 像）

【期待される成果と意義】

先太陽系から太陽系までの固体物質の生成と変成過程が連続的に理解される。とくに、天文観測だけではわからない宇宙固体物質形成環境が明らかになり、理論的・観測的に予測されていた星間宇宙風化が実証される。太陽系の歴史が実証的に太陽系形成前にまで拡張できるとともに、太陽系原材料物質の特定により、地球や惑星形成の初期条件が与えられる。

また、2020年「はやぶさ2」計画（JAXA）により、2023年「OSIRIS-REx」計画（NASA）により地球に帰還予定の小惑星起源サンプル分析について、本研究で得た分析手法とサイエンスの知見がただちに役立つ。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・A. Tsuchiyama, M. Uesugi, T. Matsushima, et al., Three-dimensional structure of Hayabusa samples: Origin and evolution of Itokawa regolith. *Science*, 333, 1125-1128 (2011)
- ・A. Tsuchiyama, Asteroid Itokawa: A source of ordinary chondrites and a laboratory for surface processes. *Elements*, 10, 45-50 (2014)

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
394,900千円

【ホームページ等】

<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-min/>

【特別推進研究】

理工系（化学）



研究課題名 サブフェムト秒分子イメージング

東京大学・大学院理学系研究科・教授

やまのうち かおる
山内 薫

研究課題番号：15H05696 研究者番号：40182597

研究分野：基礎化学、物理化学

キーワード：超高速化学、反応動力学

【研究の背景・目的】

近年の超短パルス光発生技術の進歩により、5 fs 程度の極超短レーザーパルスの発生が可能となり、10 fs 以内に動く分子内の水素原子移動など、分子内の特徴ある超高速過程が明らかにされてきた。しかし、光励起の時間内に起こる分子内の電荷移動過程や、その電荷移動に伴って誘起される水素原子の集団的分子内移動を実時間観測するためには、5 fs の時間分解能では不十分である。現在、1 fs 以下のサブフェムト秒領域の時間領域で進行する化学過程を観測することは、超高速化学分野における最大の課題となっている。

本研究では、独自に発展させてきた実験技術と量子動力学理論に基づいて、「5 fs の壁を破り、サブフェムト秒領域の時間分解能で、分子内電荷移動過程と、それに伴う分子の幾何学的構造変化を観測し、瞬時的電子励起過程(10 as)から分子内の化学結合の切断や組み換え(100 fs)に至るサブフェムト秒～フェムト秒領域の分子ダイナミクスを明らかにする」ことを目的とする。

【研究の方法】(図1参照)

有機分子が光励起されると同時に、その幾何学的構造を時々刻々変化させる初期過程を、サブフェムト秒(50 as - 1 fs)領域の時間分解能で実時間観測する。そして、その観測と理論解析に基づいて、分子内の電子群の光への応答が、分子内の軽い原子(主として水素原子)の運動を如何に誘起し、さらには、他の原子を含めた運動を促し、化学結合の切断や組み換えに至るかを明らかにする。

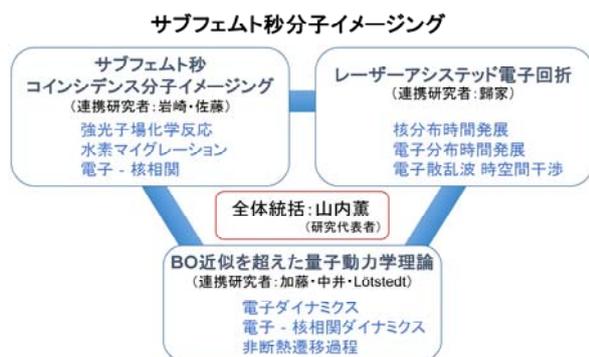


図1 研究組織図

そのために、(1)瞬間的に分子内の電子を剥ぎ取り多価イオン化し、生成する光電子と原子・分子フラグメントイオンの運動量観測から親分子の幾何学的構造を決定する手法(コインシデンス分子イメージング法)、および、(2)分子の瞬時的構造を撮影する電子回折法(レーザーアシステッド電子回折法)を開発する。そして、光励起の過程内に起こる分子内の電荷移動や、それに伴って誘起される有機分子内の超高速水素移動の機構を、Born-Oppenheimer (BO)近似を超えた理論を構築することによって明らかにする。

【期待される成果と意義】

コインシデンス分子イメージング法によって、光照射に伴って電子状態が励起される初期過程とともに、その後、核が運動して化学結合の切断や組み換えに至る過程が解明される。また、レーザーアシステッド電子回折法によって、分子内の電荷分布の時間変化、および、分子内の核配置が変化する様子がサブフェムト秒の時間分解能で可視化される。さらに、非断熱理論を発展させることによって、サブフェムト秒領域での電子運動と核運動の相関を理論的に取り扱い、その相関が計測データにどのように反映されるかを明らかにする。

これらの実験・理論の両面からの研究を推進することによって、「電子と核の両者を同時に扱わなければならない時間領域」の分子ダイナミクスの理解が深まり、フェムト秒領域の化学過程の運命を支配する「サブフェムト秒領域の電子と核の相関ダイナミクス」が明らかとなる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・栗原和枝, 河野裕彦, 福村裕史, 山内 薫 編,
“CSJ カレントレビュー 18 強光子場の化学—
分子の超高速ダイナミクス,” pp. 1-28, 65-76,
98-102 (化学同人, 2015).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度—31 年度
399,600 千円

【ホームページ等】

<http://www.yamanouchi-lab.org/index.html>
kaoru@chem.s.u-tokyo.ac.jp

【特別推進研究】

理工系（化学）



研究課題名 光・電磁波に相関する相転移物質の創成と新機能

東京大学・大学院理学系研究科・教授 おおこし しんいち
大越 慎一

研究課題番号：15H05697 研究者番号：10280801

研究分野：化学

キーワード：光、電磁波、相転移、物性化学

【研究の背景・目的】

強磁性相転移、強誘電相転移、金属-絶縁体転移、スピン相転移、電荷移動相転移などを示す相転移物質は、基礎物性ととも様々な電子デバイス、記録デバイスなどの現代社会の基盤を支える重要な材料である。一方、紫外・可視光からラジオ波におよぶ光・電磁波は、いろいろな形式で物質と相関するが、その波長・周波数により、励起する量子状態(電子状態、振動状態、回転状態、マグノン状態、スピン状態など)は異なる。本研究では、基礎化学、物性化学および合成化学の立場から、従来では実現できなかったような光・電磁波に応答する相転移物質を創成し、次世代デバイスや環境・エネルギー問題に資する新機能性に関する研究を推進することを目的とする。また、電磁波の磁場成分を利用して、磁気双極子励起の光学現象の実現を目指すことで、これまで物質研究がなされていなかったミリ波領域で応答する物質に着目し、“ミリ波材料科学”という学問領域を拓くことも目的としている。

【研究の方法】

本研究では、光エネルギーにより相転移を誘起するという視点から、種々の光学的、電気的および磁気的機能性を付与した三次元ネットワーク金属錯体および金属酸化物を合成し、光誘起相転移を引き起こすことで、ドラスティックな色相変化やイオン伝導性、強誘電性および強磁性の室温光スイッチングを実現する。また、電磁波の波の性質に着目して、空間反転対称性が破れたキラル磁性体、焦電性磁性体などの電気分極と磁気分極が共存する物質系において、光や電流、電場といった外場で、非線形磁気光学効果を瞬時にスイッチングする現象の観測をめざす。加えて、外部刺激で応答する金属-半導体転移を示す物質群を発掘する。

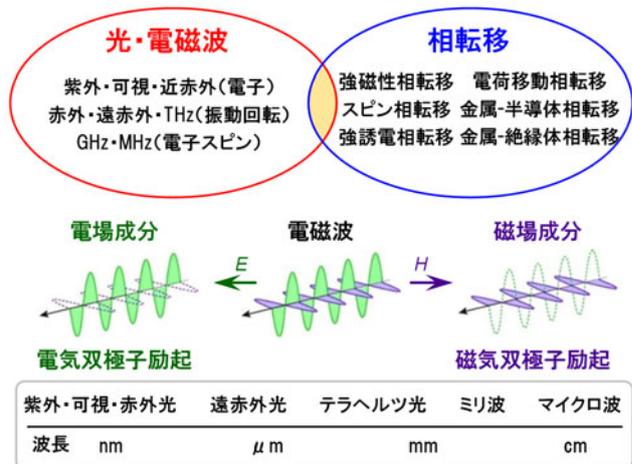
一方、ミリ波領域では電磁波の磁場成分による磁気双極子励起により、回転角や楕円率が変化する。これを利用して、回転角および回転性能指数の向上を念頭に、マグノン励起を通じて、高性能ミリ波ファラデー効果を実現する。具体的には、金属/絶縁体ナノ粒子に関して、ミリ波性能を担っているコヒーレントマグノンと格子振動との結合を研究し、回転性能指数に関して検討する。

【期待される成果と意義】

本研究により、光・電磁波と相転移物質の相関とい

う観点からの物質設計の新しい開発指針が得られると共に、種々の光誘起相転移現象を実現し、磁性分野、フォトニクス分野および酸化物半導体分野において、外部刺激応答機能に関する重要な知見を与えると期待される。また、物質科学には従来なかった“ミリ波材料科学”という新基軸の学術分野を構築できると期待している。

光・電磁波に相関する相転移物質の創成と新機能



【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- "90-degree optical switching of output second-harmonic light in chiral photomagnet", S. Ohkoshi et al., **Nature Photonics**, 8, 65 (2014).
- "Hard magnetic ferrite with a gigantic coercivity and high frequency millimetre wave rotation", A. Namai et al., **Nature Communications**, 3, 1035 (2012).
- "Synthesis of a metal oxide with a room-temperature photoreversible phase transition", S. Ohkoshi et al., **Nature Chemistry**, 2, 539 (2010).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度－31 年度
374,700 千円

【ホームページ等】

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

【特別推進研究】

理工系（化学）



研究課題名 水を溶媒として活用する有機化学の革新

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

研究課題番号：15H05698 研究者番号：50195781

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。これは、疎水性の高い有機物を溶かすには有機溶媒が必要なこと、有機金属種などの高活性試薬や中間体が水に不安定であることから明らかである。一方、環境調和型で持続可能な未来社会では、有害な有機溶媒の使用は限りなくゼロに近付けるのが理想である。本研究では水溶媒を中心とする新しい有機化学の実現を図り、従来の有機化学では説明することのできない水溶媒中での特異な事象を発見し、それを体系的化することを目指す。また、本研究を通して水溶媒中で育まれてきた、生命の神秘にも通ずる新たな知見を得たいと考えている。本研究課題の下地となっているこれまでの研究、特に、「水の中でこそ機能する化学」、水中で特異的に進行する反応や選択性、触媒に着目した研究は既存の概念にとらわれない先進性と独創性を有する重要な成果であると国際的にも高い評価を得ている。これまでの研究成果を踏まえ、それらをさらに飛躍的に前進させることは、科学立国としての我が国の立場や競争力を強化する上で欠かすことはできないと考えている。

【研究の方法】

本研究では5項目のサブテーマ、(1) 水中で有効に機能する触媒の開発、(2) 水中での有機反応の反応機構、特に触媒反応における水の機能解明、(3) 水中で有機反応を解析するための新分析法の開発、(4) 水中で機能する人工酵素触媒の創成及び生体反応への応用、(5) 水溶媒を用いる工業プロセスのための基礎研究、を設定し、これらを並行・連携して押し進めることにより、水を中心とする新しい有機化学を体系的かつ相補的に推進していく。

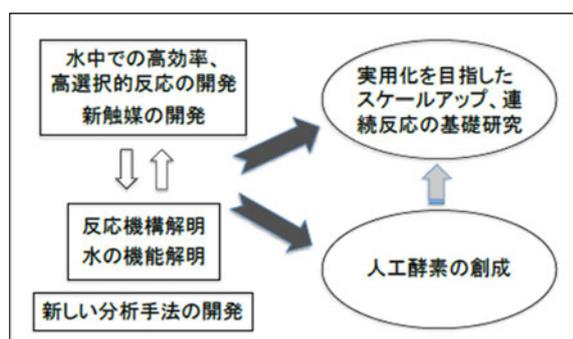


図1 全体構想図

【期待される成果と意義】

有機溶媒の代わりに水溶媒を用いる本研究は、他の有機化学研究とは一線を画する。「水の中でこそ機能する化学」、特に、水中で特異的に進行する反応や選択性、触媒の研究は、有機化学の新展開に相応しいものであると国際的にも高い評価を得ている。本研究の目的である、これまで人類が築き上げてきた有機溶媒を中心とする有機化学とは異なる、新しい有機化学の普遍化、体系化は、人類の抱える様々な問題の突破口となる可能性を秘めており、その学術的意義は極めて大きいと考えられる。例えば、従来の有機化学との合成化学的な相補性に加え、環境面、経済面、安全面から期待される、本研究の産業への波及効果・インパクトは明らかである。

本研究では、これまでに得られてきた水溶媒中での研究成果を基盤として、更なる飛躍的な進捗が期待される。殊に、有機溶媒中で体系化されてきた一般的な有機化学の理論では説明のできない事象を集積、編纂していくことは、学術、産業界双方にて「化学合成」の在り方に関するパラダイムシフトを誘起するきっかけとなることが予想され、知見の飛躍的拡張と、それらを基にした革新的な理論構築が期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Chiral Copper(II)-Catalyzed Enantioselective Boron Conjugate Additions to α,β -Unsaturated Carbonyl Compounds in Water, S. Kobayashi, P. Xu, T. Endo, M. Ueno, T. Kitanosono, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51**, 12763 (2012).
- The New World of Organic Reactions in Water, S. Kobayashi, *Pure Appl. Chem.*, **85**, 1089 (2013).
- Chemistry-Based Design of the Simplest Metalloenzyme-Like Catalyst That Works Efficiently in Water, T. Kitanosono, S. Kobayashi, *Chem. Asian J.*, **10**, 133 (2015).

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
421,200千円

【ホームページ等】

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

【特別推進研究】

理工系（工学）



研究課題名 スピン軌道エンジニアリング

東北大学・大学院工学研究科・教授 につた じゅんさく
新田 淳作

研究課題番号：15H05699 研究者番号：00393778

研究分野：総合理工

キーワード：スピントロニクス

【研究の背景・目的】

スピン軌道相互作用は電場中を電子スピンの運動することにより、電場が磁場に変換される相対論的効果である。スピン軌道相互作用を用いることにより磁場を一切用いることなく電氣的にスピンを生成・制御・検出することが可能になってきた。最近では半導体のみならず磁性体、金属、トポロジカル絶縁体など広範囲な分野に電場制御可能なスピン軌道相互作用の概念が導入されスピンの関与する新しい現象が発見されている。異種材料のヘテロ界面や表面には強い電場とバンド構造の変調によりスピン軌道相互作用が増強・変調され優れたスピン機能と新奇物性が創製される可能性がある。本研究の目的は、半導体、金属、磁性体、絶縁体またはこれら異種材料ヘテロ構造界面のスピン軌道相互作用に起因したスピン機能の開拓と電場操作スピントロニクスの分野を開拓することにある。

【研究の方法】

(1) スピンオービトロニクス

電氣的スピン生成・制御・検出スピン要素技術と永久スピン旋回状態によるスピン長距離輸送を統合することによりスピン機能デバイス化を進める。

(2) 巨大Rashba効果の電場操作開拓

金属/(スピン軌道相互作用の強い重金属)ヘテロ構造や重金属/半導体ヘテロ構造では、半導体ヘテロ構造に比べて、1桁以上大きな巨大Rashba効果が角度分解光電子分光により観測されている。弱反局在など伝導測定によるスピン軌道相互作用の起源解明と電場制御を実現し電場操作全金属スピントランジスタの可能性を追求する

(3) 新奇スピン依存電磁場生成

スピン軌道相互作用の空間・時間変化はスピンの働く非可換なゲージ場としてスピン依存磁場、スピン依存電場を生み出す。一方、実験的には未開拓の領域であり相対論的量子力学効果の基本原理解明と新奇スピン機能の開拓を図る。

【期待される成果と意義】

スピンは主に磁場により制御されてきたため、空間的(局所的)、時間的高速な操作ができない。このためスピンを新たな情報担体とするには電場によるスピン操作が不可欠である。相対論的な効果であるスピン軌道相互作用は電場によるスピン操作を可能にするとともに省電力で新たなスピン機能をもたらす。このスピン軌道相互作用の概念は、様々な学問領域、材料の枠を越えて普遍的な効果として認識さ

れつつある。「スピン軌道エンジニアリング」は半導体、金属、磁性体、絶縁体といった従来の材料の枠組みを超えた新しい分野の開拓と省電力スピントロニクスのイノベーションに繋がる。

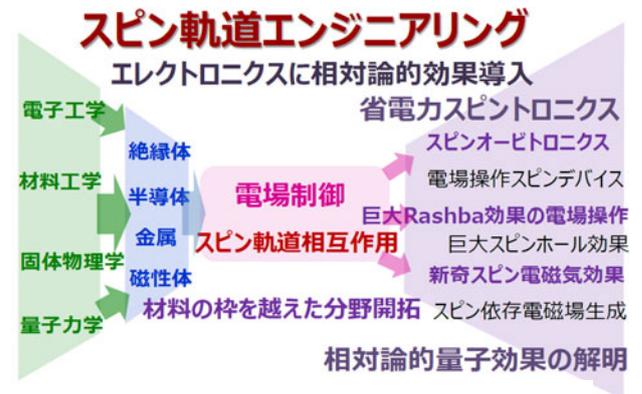


図1. スピン軌道エンジニアリングの概念図

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- “Direct determination of spin-orbit interaction coefficients and realization of the persistent spin helix symmetry”, A. Sasaki, S. Nonaka, Y. Kunihashi, M. Kohda, T. Bauernfeind, T. Dollinger, K. Richter, and J. Nitta, *Nature Nanotechnology* **9**, 703-709 (2014)
- “Manipulation of mobile spin coherence using magnetic-field-free electron spin resonance”, H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh, M. Kohda, J. Nitta, P. V. Santos, and T. Sogawa, *Nature Physics* **9**, 280-283 (2013)
- “Control of the spin geometric phase in semiconductor rings”, F. Nagasawa, D. Frustaglia, H. Saarikoski, K. Richter, and J. Nitta, *Nature Communications* **4**, 2526-1-7, (2013)

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
445,800千円

【ホームページ等】

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~kotaib/nitta@material.tohoku.ac.jp>



研究課題名 量子ドット-ナノ共振器多重量子結合系における固体量子電気力学探究と新ナノ光源創成

東京大学・生産技術研究所・教授 **あらかわ やすひこ**
荒川 泰彦

研究課題番号：15H05700 研究者番号：30134638

研究分野：量子ナノデバイス工学

キーワード：量子ドット、フォトニック結晶、共振器量子電気力学、半導体レーザ

【研究の背景・目的】

光と物質の相互作用の探究は、学術的重要性にとどまらず、それを基礎とする光デバイスに革新をもたらす源泉である。なかでも、光共振器中の光子と物質の量子力学的相互作用を扱う共振器量子電気力学(Cavity Quantum Electrodynamics, CQED)は、量子光学の深化、レーザ性能の追求を図る上で特に重要な学術領域である。

本研究では、半導体チップ上に形成された量子ドットとフォトニック結晶ナノ共振器を舞台として固体 CQED を探求し、その未踏領域の開拓を目指す。特に、有限少数個の量子ドットとナノ共振器との結合系に対して新たな制御技術を創出することにより、複数の量子が関わりあう多重量子結合系 CQED を追求する。さらにその学術の深化を基礎として、有限少数個量子ドットレーザを中心とする革新的ナノ光源創成のための基盤科学技術の構築を図る。

【研究の方法】

これまで培ってきた量子ドット形成技術およびフォトニック結晶ナノ共振器作製技術を基礎とし、それらを極限まで洗練することで、飛躍的に高品質な量子ドット-ナノ共振器結合系の実現を目指す。同時に、量子ドットの位置や個数の検出・制御およびナノ共振器の多重化に取り組むことで、高度に制御された多重量子結合系の作製技術構築を図る。

また、固体 CQED の探究を実験・理論の両面から進める。特に、極めて強い量子ドット-共振器光子結合に起因する単一光子レベル非線形光学現象およびそれに基づく多光子相関状態の形成や、多量子系における協同現象などに着目した研究を展開する。理論解析においても新たに統計力学的手法を取り入れつつ、多重量子系の新機能開拓を目指す。

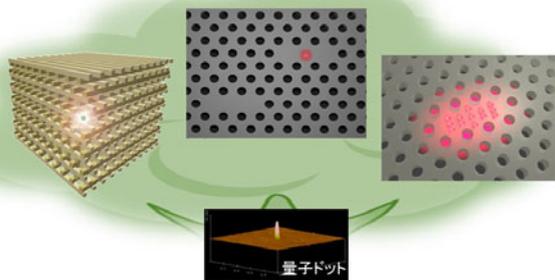


図1 実現を目指す量子ドット CQED 系の概念図

一方、有限少数個量子ドットレーザを中心とした極限的量子ドット光源の開発にも意欲的に取り組む。系の位相緩和などに着目し、その制御を行うことで、レーザ特性の向上を検討する。加えて、高集積性・スピン自由度を有しかつ高温・電流注入動作が可能といった量子ドット系の特徴を最大限活かすことで、高機能な量子ナノ光源の創出を図るとともに、多重量子系の創発的現象を活かした新ナノ光源創出にも挑戦する。

【期待される成果と意義】

本研究の推進により、極限的に高品質な系で発現する量子ドット CQED の物理が明らかになるとともに、多重量子結合系での興味深い現象の観測が可能となり、固体 CQED 研究における新たなパラダイムをもたらすものと期待できる。これは量子ドット系にとどまらず、CQED 全体の学理構築に資するものと考えられる。

また本研究で取り組む極限量子ドット光源開発は、将来の超低消費電力・超小型光源のための基盤技術構築へ貢献するものと考えられる。このような革新的ナノ光源技術は、CPS(Cyber Physical Systems)が浸透する将来の情報社会において、高感度センシング素子など IoT(Internet of Things)のベースとなる科学技術に大いに寄与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】

- ・ M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota, and Y. Arakawa: Laser oscillation in a strongly coupled single quantum dot nanocavity system, *Nat. Phys.*, **6**, 279–283 (2010).
- ・ Y. Arakawa, S. Iwamoto, M. Nomura, A. Tandraechanurat and Y. Ota: Cavity Quantum Electrodynamics and Lasing Oscillation in Single Quantum Dot-Photonic Crystal Nanocavity Coupled Systems, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **18**, 1818–1829 (2012).

【研究期間と研究経費】

平成 27 年度－31 年度
399,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.qdot.iis.u-tokyo.ac.jp/>
arakawa@iis.u-tokyo.ac.jp

【特別推進研究】

理工系（工学）



研究課題名 新材料・新界面統合設計戦略に基づく革新的エネルギー貯蔵システムの構築

東京大学・大学院工学系研究科・教授

やまだ あつお
山田 淳夫

研究課題番号：15H05701 研究者番号：30359690

研究分野：工学

キーワード：2次電池

【研究の背景・目的】

持続可能、永続可能社会への移行の緊急性に対する問題意識は広く社会に浸透しており、その実現に不可欠な次世代のエネルギー貯蔵変換デバイスの開発が強く望まれています。特に、自動車用途や電力貯蔵用途を中心とした高機能大型2次電池への期待は極めて大きいものがあります。

現状の2次電池技術においては、機能電極材料の選択岐が数種類に限定されており、これらに適合する機能電解液材料の選択岐はさらに限定され、ほぼ1種類が20年以上に渡って固定して使用され続けている状況です。

本研究では、機能材料群とそれらの間の形成される機能界面の多様性を実態ベースで一気に拡大した上で、俯瞰的・システマ的思考を融合してデバイスとしての全体最適化を行います。

【研究の方法】

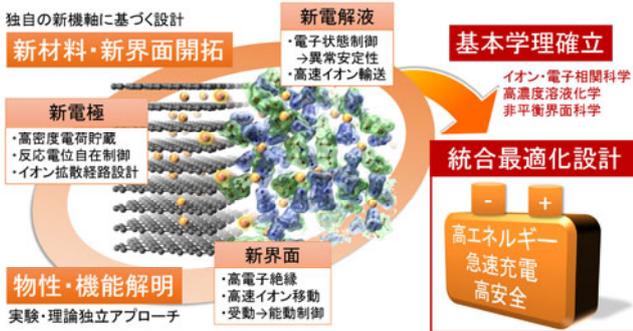


図1 研究の全体像

具体的検討事項は大きく(a)新規インターカレーションホスト材料の探索、(b)新規イオン吸着ホスト材料の探索、(c)新基軸に基づく電解液材料の探索、(d)相界面形成機構解析及び能動制御手法確立、(e)新規高機能エネルギー貯蔵システム創製、の五つに添った形で明確に整理・集約します。あくまでも新基軸に基づく新規機能材料と新規機能相界面に対する視点を中心におき、材料の組み合わせにより劇的に変化する電気化学特性とを体系的に関連づけることにより、材料探索、現象の理解の深化、界面の能動的制御、新奇デバイス構築による応用展開をシームレスに行います。

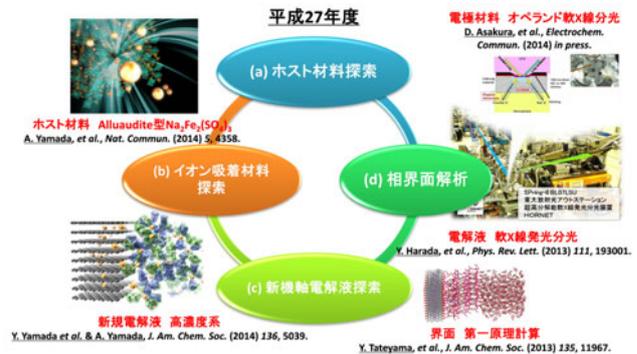


図2 具体的方法論

【期待される成果と意義】

2次電池を構成する機能材料群が一気に多様化するだけでなく、機能を発現するための反応の基本学理の包括化と深化、体系化が行われます。さらには、確立された学理を拠り所として対象の俯瞰が進み、機能相界面の能動制御やデバイスシステムとしての最適化を通じて蓄電池が大幅にエネルギー密度化・高速反応化され、大型用途への本格展開を視野に入れることが現実性を帯びてきます。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Nature Comm., 5, 4358 (2014)
- Nature Comm., 6, 6544 (2015)
- J. Am. Chem. Soc., 136, 5039 (2014)
- Adv. Energy Mater., 2, 841 (2012)

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
437,100千円

【ホームページ等】

<http://yamada-lab.t.u-tokyo.ac.jp>
yamada@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp

【特別推進研究】

理工系（工学）



研究課題名 スピンオービトロニクス of 学理構築とデバイス展開

京都大学・化学研究所・教授

おの てるお
小野 輝男

研究課題番号：15H05702 研究者番号：90296749

研究分野：総理工

キーワード：スピンドバイス

【研究の背景・目的】

ノーベル賞受賞となった巨大磁気抵抗効果の発見以降、スピンと電荷の2つの自由度を利用するスピントロニクスが急速に発展してきた。巨大磁気抵抗効果がハードディスクの読み取りヘッドに利用され、トンネル磁気抵抗効果を利用した不揮発性磁気メモリが開発されるなど、スピントロニクスは基礎現象の発見と理解がイノベーションに直結する魅力的な研究分野である。

研究代表者は、基盤研究(S)「新規スピンドイナミクスデバイスの研究(H23-27)」の当初目的を達成するのみならず、以下の研究開始時には予期されなかった成果をあげることができた。

- (1) スピンホールトルクによる磁壁駆動 (Appl. Phys. Exp. 7 (2014) 053006)
- (2) 電界による磁性制御・磁壁移動速度制御 (Nature Mater. 10 (2011) 853; Nat. Commun. 3 (2012) 888)
- (3) 磁気コア運動に伴うスピン起電力の検出 (Nat. Commun. 3 (2012) 845)
- (4) スピン流による反強磁性体の励起 (Appl. Phys. Lett. 106 (2015) 162406)

これらの現象の共通起源は「スピン軌道相互作用」である。そこで、スピン軌道相互作用を利用してスピントロニクスに軌道という新たな自由度を加えることが可能なのではないかという着想に至った。基盤研究(S)で見いだした新規現象をシーズとして、「スピンオービトロニクス」という新しい学理を構築し、革新的デバイスイノベーションへ展開することが本研究の目的である。

【研究の方法】

本研究の目的は、スピンと軌道の相互作用に基づく効果を積極的に利用して、新物質・新機能を創成するスピントロニクスという分野を開拓し、革新的デバイスのイノベーションへ展開することである。この目的達成のために、具体的研究テーマとして以下の2つを設定する。

- (1) スピン軌道相互作用を利用した物質探索
- (2) スピン軌道相互作用を利用した新規スピン操作手法の研究

本研究で注目する物理であるジャロシンスキー守谷相互作用、スピンホール効果、ラッシュバ効果などは、反転対称性のない系において発現するものである。したがって、原子層単位の高度な薄膜形成技術を基に、物質A/物質B/物質Cのような反転対称性のない積層構造やその超格子に注目した物質探索を行う。このような原子層単位の構造体に対しては、

第一原理計算による物性予言が可能と考えられ、物質デザインと実験を組み合わせることで研究を推進する。

【期待される成果と意義】

スピントロニクスという新分野の学理が構築される点が最も大きな意義である。さらに、将来の革新的デバイスに必用とされる新規物質と新規なスピン操作手法が確立されることによって、革新的デバイスイノベーションへの展開が期待される。これまで第一原理計算による物質デザインという概念は存在したものの、具体的成功例は極めて少ないと言わざるを得ない。本研究で、比較的単純な構造を対象とするスピントロニクスにおいて、第一原理計算による物質デザインの有用性を実証することは、他分野への波及効果を含めて、大きな意義があると考えられる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- D. Chiba, S. Fukami, K. Shimamura, N. Ishiwata, K. Kobayashi, T. Ono, “Electrical control of the ferromagnetic phase transition in cobalt at room temperature”, Nature Materials 10, 853 (2011).
- T. Moriyama, S. Takei, M. Nagata, Y. Yoshimura, N. Matsuzaki, T. Terashima, Y. Tserkovnyak, T. Ono, “Anti-damping spin transfer torque through epitaxial nickel oxide”, Appl. Phys. Lett. 106, 162406 (2015).

【研究期間と研究経費】

平成27年度～31年度
432,500千円

【ホームページ等】

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