

研究課題名 特殊ペプチド・擬天然物創薬の命題への挑戦



東京大学・大学院理学系研究科・教授

すが ひろあき
菅 裕明

研究課題番号： 20H05618 研究者番号：00361668

キーワード： 特殊ペプチド、擬天然物、中分子、創薬、薬剤探索

【研究の背景・目的】

製薬業界で用いられる「Lipinski rule of 5」は、長きにわたり人類が発見、開発してきた経口性有機小分子の化学構造から導き出された「統計的」経験則である。一方、シクロスポリン A に代表される天然物由来の薬剤は、この上記則が当てはまらない分子でありながら経口剤として開発できた。しかし、天然物は主に抗菌性・細胞毒性をもつ化合物として微生物で産生分泌される物質であり、細胞内ヒト標的タンパク質に高い特異性と結合力をもった化合物として発見できるか否かは偶然に依存せざるを得ない。一方で、申請者が開発した RaPID システムを用いれば、標的タンパク質に高い生理活性と特異性をもった特殊ペプチドを高確率で発見できる。しかし、有機小分子薬剤や天然物のように膜透過性をもつ特殊ペプチドを獲得することは偶然に依存せざるを得なかった。

本特別推進研究計画では、このジレンマを解決すること研究の最大の目標に定める。すなわち、細胞膜透過性を向上させるべく新技術による次世代型特殊ペプチド・擬天然物ライブラリーの構築と細胞内標的タンパク質に対する迅速な活性種探索を行うと同時に、それらの細胞膜透過性、小腸吸収性に対する検討と活性種の統計的・理論的な解析を進める。最終的には「中分子の膜透過性経験則」を導き出し、中分子創薬に新たなパラダイムシフトを起こす。

【研究の方法】

本特別推進研究計画では、これまで申請者が研究室を主宰してきた約 20 年にわたる「特殊ペプチド創薬」研究に区切りを付けるべく、やり残された挑戦的な研究に絞り目標を定め、それらを集大成させる。具体的には、下記の 4 つの研究方法で推進する。

- (1) 細胞膜透過を有する特殊ペプチドの構造膜透過性相関検討による探索基盤の確立
- (2) β 体、 γ 体アミノ酸含有特殊ペプチドライブラリーの翻訳合成と生理活性種探索
- (3) 翻訳後酵素修飾された擬天然物ライブラリーの創製と生理活性種探索
- (4) 特殊ペプチドおよび擬天然物の細胞膜透過性と腸間膜透過性の研究

【期待される成果と意義】

本研究計画では、これまで申請者の研究室で培ってきた遺伝暗号リプログラミングの技術を駆使し、つい最近まで翻訳導入が難しかった β アミノ酸、 γ

アミノ酸を含む特殊ペプチドライブラリーを合成し、RaPID システムで標的タンパク質に強力に結合する特殊ペプチド活性種を迅速探索する新たな挑戦を計画している。また、修飾後酵素により作製した擬天然物ライブラリーを用いて活性種を発見する新たな試みも提案している。これらのライブラリーはこれまでの特殊ペプチドライブラリーよりも高い確率で膜透過性物質を発見できる可能性があり、本計画では発見された化合物の構造活性相関解析から膜透過性の特徴を抽出して、ライブラリーデザインにフィードバックし、さらに膜透過性の優れた分子を発見していく計画である。したがって、ここで得られる研究の成果は、これからの中分子医薬品開発における研究プラットフォームになり、アカデミアはもちろんのこと産業界にも大きなインパクトを与える研究となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Ribosomal synthesis and de novo discovery of bioactive foldamer peptides containing cyclic β -amino acids; T. Katoh; T. Sengoku; K. Hirata; K. Ogata; H. Suga* **Nature Chemistry**, (2020) DOI: 10.1038/s41557-020-0525-1
- Promiscuous enzymes cooperate at the substrate level en route to lactazole A; A.A. Vinogradov; M. Shimomura; N. Kano; Y. Goto; H. Onaka, H. Suga* **Journal of the American Chemical Society**, in press (2020) DOI: 10.1021/jacs.0c05541
- Introduction to Thiopeptides: Biological Activity, Biosynthesis, and Strategies for Functional Reprogramming; A.A. Vinogradov; H. Suga* **Cell Chemical Biology**, Accepted article (2020) DOI: 10.1016/j.chembiol.2020.07.003
- Ribosomal Elongation of Cyclic γ -Amino Acids using a Reprogrammed Genetic Code; T. Katoh; H. Suga* **Journal of American Chemical Society**, 142, 4965-4969 (2020) DOI: 10.1021/jacs.9b12280

【研究期間と研究経費】

令和 2 年度－6 年度 485,800 千円

【ホームページ等】

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

【特別推進研究】

理工系



研究課題名 非平衡ソフトマター・アモルファス物質の物性解明への力学的自己組織化からの挑戦

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・客員共同研究員

たなか はじめ
田中 肇

研究課題番号： 20H05619 研究者番号：60159019

キーワード： ソフトマター、アモルファス物質、力学的自己組織化

【研究の背景・目的】

ソフトマター、アモルファス物質に代表される周期構造を持たない物質は、結晶とは大きく異なる特異な力学的性質（弾性、降伏・破壊挙動、成型加工性）、熱的性質（比熱、熱伝導特性）を持ち、様々な分野で人類に大きく貢献してきた。これまでの不規則系の構造の研究は、粒子の重心配置構造を軸に行われてきたが、いまだにその構造的特徴は未解明であり、混沌とした状態が続いている。そのため、構造・物性相関の基礎的理解は、結晶に比べ大きく遅れている。我々は、この問題の解決の鍵は、「一見動きがなく固体的に見える構造においても、非平衡状態においては、運動量保存則が系の状態の決定に深く関わっている」点にあると確信するに至った。そこで、従来のアプローチを大きく転換し、「系全体にパーコレートした力学的ネットワークの自己組織化」という全く新しい運動学的視点から、熱力学的・運動学的アプローチを融合することで、ガラスやゲルに代表される非平衡な固体状態にある物質の構造的特徴、さらには、これらの物質が示す普遍的かつ特異な力学的・熱的物性発現の物理的機構の解明に挑戦する。

【研究の方法】

(1) **ソフトマターの力学的自己組織化**：コロイド分散系の相分離ならびにゲル化について、3次元共焦点顕微鏡による一粒子分解能観察と、流体効果を取り入れたシミュレーションとの直接比較を行うことにより、ソフトマターの力学的自己組織化の背後にある普遍的な物理的原理の解明を目指す。

(2) **力学的トポロジーと流動・破壊**：流動下でコロイド・粉体粒子が形成する力鎖のネットワークのトポロジーと流れの関係に着目して、コロイド分散系の非線形レオロジー（シア・シニング、シックニング現象）に、従来と異なる新たな視点から迫る。

(3) **相互作用ネットワークトポロジーに基づくアモルファス物質の物性解明**：結晶は熱力学的にも力学的にも平衡状態にあり、その固体性は構造のもつ周期性によって維持されている。一方、ガラスは熱力学的には非平衡状態にあり、構造に周期性はない。したがって、非晶質固体の構造の固さの起源となる自己組織化の原理が何であるのかは、謎に包まれてきた。我々は、アモルファス物質の固体化は、構造の力学的自己組織化の帰結であるという考え方の下に、アモルファス物質の示す特異な物性の解明を目指す。具体的には、非晶質固体中の空間的な力学的ネットワークの特性を、実験・シミュレーションにより明らか

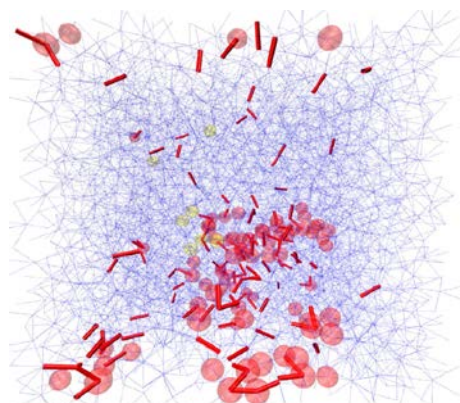


図 力学的ネットワークと不安定化時の粒子運動

にすることで、アモルファス物質特有の弾性発現の機構、破壊機構、さらには、低温における熱伝導や比熱の異常などの長年の未解明問題に挑戦する。

【期待される成果と意義】

非周期構造を持つ材料の最大の特徴は、その特異な力学物性（変形・破壊特性を含む）にある。我々は、力の伝達経路のトポロジーこそが、その物性を支配する最大の構造的因子であると考えている。そこで、これまで考えられてこなかった非周期構造材料の構造化における熱力学的因子と運動学的力学因子の協奏という観点から、構造・物性相関の解明を目指す。これにより、非周期構造材料にまつわる長年の未解明問題の物理的理解の深化がはかれるとともに、不規則構造を持つ高機能材料の開発に新しい潮流をもたらすことができると期待している。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T Yanagishima, J Russo, H Tanaka, Common mechanism of thermodynamic and mechanical origin for ageing and crystallization of glasses, *Nature Communications* **8**, 15954 (2017).
- ・ H Tsurusawa, M Leocmach, J Russo, H Tanaka, Direct link between mechanical stability in gels and percolation of isostatic particles, *Science Advances* **5**, eaav6090 (2019).

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 373,900千円

【ホームページ等】

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

【特別推進研究】

理工系



研究課題名 フェアリー化合物の科学とその応用展開

静岡大学・グリーン科学技術研究所・教授

かわぎし ひろかず

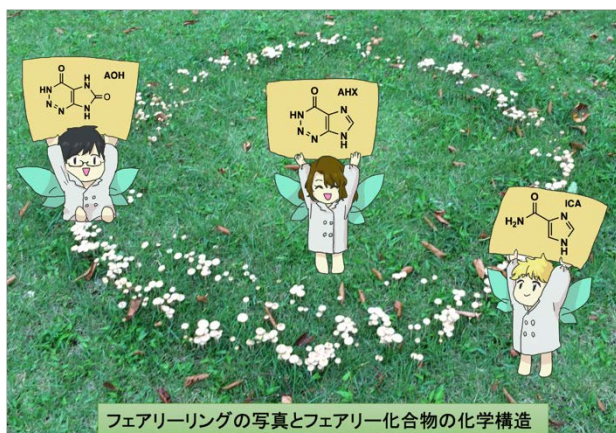
河岸 洋和

研究課題番号： 20H05620 研究者番号：70183283

キーワード： フェアリーリング, フェアリー化合物, 植物ホルモン, キノコ, 天然物化学

【研究の背景・目的】

芝が輪状に周囲より繁茂あるいは生育抑制され、後にキノコが発生する現象を「フェアリーリング(妖精の輪)」という。研究代表者らは、この現象を惹起する2つの物質、2-azahypoxanthine (AHX) とimidazole-4-carboxamide (ICA) をフェアリーリングを引き起こすキノコから得、AHXの植物中での代謝産物2-aza-8-oxohypoxanthine (AOH) をイネから発見した。その後、これらの物質群は植物に普遍的に内生していることがわかり、圃場試験においては農作物の収量を大幅に増加させた。これら3種の化合物(フェアリー化合物、fairy chemicals と総称、FCs と略称)はプリン代謝経路上で生合成されることが明らかになっている。本研究では、この生合成・代謝経路の全容を解明し、あらゆる植物そして菌類に共通な新しいプリン代謝経路を明らかにする。また、植物とキノコを用いてFCsのシグナル因子・受容体解明とそれらの生合成酵素欠損株の作出等によって、活性発現分子機構を明らかにする。以上の検討によってFCsが新しい植物と菌類のホルモンであることを証明する。加えて、農業への実用化を目指し、作物の栽培実験を通して効果と作用機構を検討し、さらに有機合成化学によってより高活性で安全なFCs誘導体を創製する。



・フェアリー化合物の新しい植物ホルモンとしての証明
・フェアリー化合物の農業への実用化への基礎の構築

図1 本研究の全体構想

【研究の方法】

以下に概要を箇条書きにする。

1. FCsの新「植物・菌類ホルモン」としての証明
 - 1.1. FCsのさらなる代謝産物の単離、構造決定を行い、生合成経路の地図を広げる。
 - 1.2. FCsが生理活性を示すシグナル因子、受容体を探索し同定する。イネやシロイヌナズナを用いて、同定されたシグナル因子、受容体の生合成欠損株の作出によって、シグナル伝達経路を解明する。
2. FCの農業分野等での実用化のための基礎研究
 - 2.1. FCsが劣悪環境(高温・低温・乾燥・高塩濃度等)への耐性を植物に付与する分子機構を解明する。
 - 2.2. 有機合成化学によって、より活性が高くより安全なFCs誘導体を創製する。

【期待される成果と意義】

旺文社生物学事典では植物ホルモンは7種とされている。しかし、我が国で発見されたホルモンはジベレリンのみである。FCsが新しいホルモンと認知されれば、我が国オリジナルの2番目の植物ホルモンとなる。また、本研究によってFCsによるイネ、小麦、ジャガイモなどの主食系作物の収量増加効果の分子機構が明らかになれば、FCsの農業への実用化の道を拓くことになるであろう。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

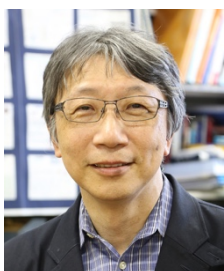
- ・ Choi, J-H., Fushimi, K., Abe, N., Tanaka, H., Maeda, S., Morita, A., Hara, M., Motohashi, R., Matsunaga, J., Eguchi, Y., Ishigaki, N., Hashizume, D., Koshino, H., and Kawagishi, H., Disclosure of the “fairy” of fairy-ring forming fungus *Lepista sordida*, *ChemBioChem*, 11, 1373-1377 (2010)
- ・ 河岸洋和, フェアリー化合物は植物ホルモンか?, 植物の生長調節, 52, 78-84 (2017)
- ・ Kawagishi, H., Are fairy chemicals a new family of plant hormones?, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, 95, 29-38 (2019).

【研究期間と研究経費】

令和2年度ー6年度 474,500千円

【ホームページ等】

<https://www.agr.shizuoka.ac.jp/c/biochem/index.html>
kawagishi.hirokazu@shizuoka.ac.jp



研究課題名 分子性強等方性構造の化学構築と機能開拓

名古屋大学・理学研究科・教授

あわが くに
阿波賀 邦夫

研究課題番号： 20H05621 研究者番号：10202772

キーワード： 強等方性構造、幾何学的トポロジー、バンドフィリング制御

【研究の背景・目的】

近年、グラフ理論によって炭素の新しい同素体「 K_4 炭素」が提案された。この K_4 炭素は、炭素同素体としてよく知られているダイヤモンド、グラフェンとともに、幾何学において「強等方性」と呼ばれる性質をもっている。これらは、その構造トポロジーを反映した極めて特異なバンド構造を有しており、もしそのフェルミ準位を自由制御できれば、Dirac 電子系を人工構築できる。しかしながら、これを炭素同素体で実現することは不可能に近い。そこで我々は、炭素同素体の結晶構造、つまり強等方性格子をもつ分子結晶でつくる着想を得た。このような分子性強等方格子には、炭素同素体にはない巨大内部空間や Flat Band、酸化還元能などの電子機能が期待される。本研究では、分子性強等方構造の合理的な構築を達成した上で、電気化学的バンドフィリング制御法を確立し、強等方性トポロジーに起因する多彩な電子・スピン機能を引き出し、電子とイオン輸送の協奏する固体電気化学機能を開拓する。

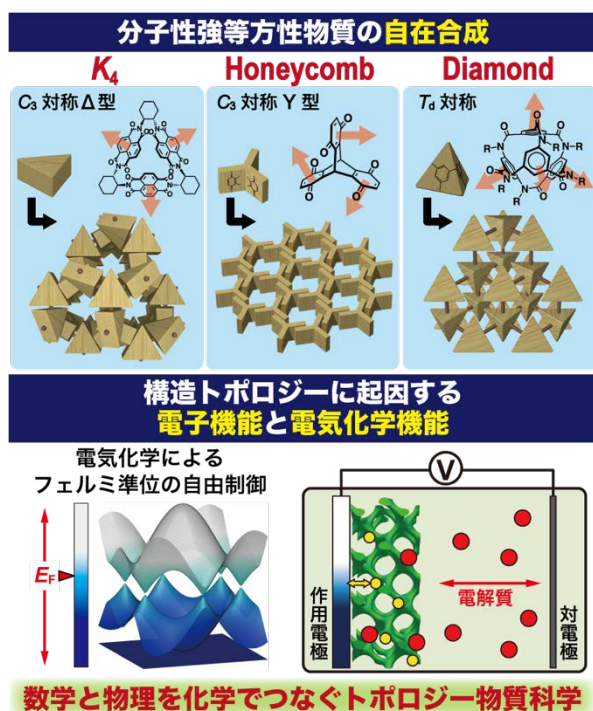


図1 本研究のコンセプト

【研究の方法】

本研究の目的を達成するために、以下の「つくる」「ひきだす」「てらす」の3戦略を立てた。

1. 【つくる】分子性強等方性物質の自在合成

炭素同素体の素構造は、 sp^2 あるいは sp^3 炭素のような C_3 あるいは T_d 対称性をもつ。そこでこの対称性を取り入れた分子によって合理的に構築する。

2. 【ひきだす】電気化学的バンドフィリング制御

分子性強等方性物質のバンド構造は、Dirac cone や Flat Band のような特異なバンド分散を必然的に有する。これらの実験的証拠を得た後、分子性強等方性物質がもつ酸化還元能と巨大内部空間を利用して、固体電気化学反応によるフェルミ準位の自在制御を試みる。

3. 【てらす】Operando 計測システム

我々は、X線吸収スペクトル測定や粉末X線回折、SQUID 磁気測定において、固体電気化学反応下、試料を系外に取り出すことなく計測可能な Operando 計測システムを実装している。やみくもに進むのではなく、これらによって足元を照らしながら研究を進める。

【期待される成果と意義】

本研究では、「強等方性」の数学と物理を化学の力によって繋ぐことにより、トポロジー物質科学の一翼を担う新学術の確立を目指す。具体的には、上記の方法論によって、世界に先駆けて Dirac Cone ならびに Flat Band の自在構築論を確立する。この上で、物性化学の夢と言っても過言ではないバンドフィリング制御の技術を確立し、特異な電子系を自在に創出する。さらに、分子性強等方構造の巨大ポーラス構造を利用し、電子とイオン協奏効果を演出して、既存の蓄電デバイスを凌駕する特性を得る。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ A. Mizuno, Y. Shuku, M. M. Matsushita, M. Tsuchiizu, Y. Hara, N. Wada, Y. Shimizu, and K. Awaga, "3D Spin-Liquid State in an Organic Hyperkagome Lattice of Mott Dimers", *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 057201 (2017).
- ・ A. Mizuno, Y. Shuku, and K. Awaga, "Recent Developments in Molecular Spin Gyroid Research", *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **92**, 1068-1093 (2019).

【研究期間と研究経費】

令和2年度－6年度 426,500千円

【ホームページ等】

<http://advmat.chem.nagoya-u.ac.jp>
awaga.kunio@b.mbox.nagoya-u.ac.jp



研究課題名 発光シンセサイザー：究極の発光デバイス創成を目指して

京都大学・工学研究科・教授
かわかみ よういち
川上 養一

研究課題番号： 20H05622 研究者番号：30214604

キーワード： 発光シンセサイザー，半導体3次元構造，次世代フォトニクス

【研究の背景・目的】

近年の窒化物半導体の研究進展はめざましく、InGaN 量子井戸を活性層とする極めて高い効率の青色発光ダイオード (LED) が実用化されている。しかしながら、高電流注入で発光効率の低下する「Droop」現象、活性層の In 組成を増加させた緑色 LED の効率低下といった「Green-gap」問題、活性層の Al 組成を増加させた深紫外 AlGaIn 系 LED の効率低下といった「UV-threshold」問題は未解決であり、高効率・多波長発光制御は次世代の照明応用のために克服すべき重要な課題と位置づけられている。

本研究は、半導体 3 次元構造による発光波長の合成、分極制御・プラズモニクス効果などによる高効率発光に着目し、任意の波長の光を高い輻射再結合確率で発光させる新機能素子 (発光シンセサイザー) の開発を目指す。このことにより、任意の演色性を可能とする究極のテーラーメイド照明光源や高度な加工・環境センシングに求められる深紫外多波長光源を実現する。さらに、光源の多波長・高速スイッチングによる光空間無線通信 (Li-Fi; Light Fidelity) を実証し、次世代通信システムへの基盤を確立する。

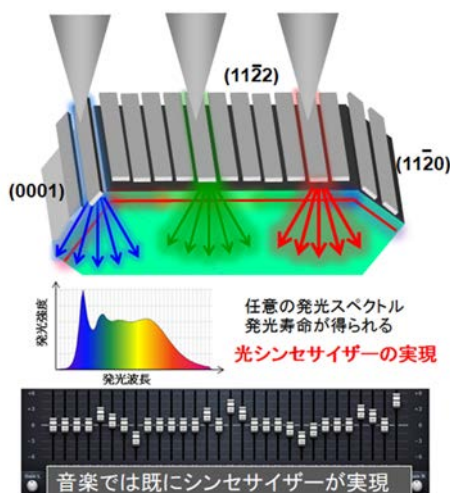


図1 目的とする発光シンセサイザーの概念図

【研究の方法】

3次元 InGaIn (AlGaIn) 構造の多波長制御と高効率発光にむけて、マイクロスケールのポテンシャル揺らぎとナノスケールのポテンシャル揺らぎのそれぞれに分けて取り組んで行くことが有効である。すなわち、前者は 3 次元構造における混晶組成や分極効果の違いによる多波長化に、後者はナノスケールで

の小さな空間階層でのポテンシャル揺らぎによる励起子の局在化を誘起しうるため、高効率化に寄与する。さらに、励起子の分極・局在制御のみならず、励起子からプラズモンへの素励起移動を活用し、発光遷移確率の増強を目指す。このことにより、発光波長の制御、発光効率の増大、発光スイッチ速度の高速化を実現する。

【期待される成果と意義】

発光シンセサイザーによるスペクトル合成が進化すると、図2に示すようにサーカディアンリズムや色温度・演色性の嗜好などに応じて多色発光 LED の発光スペクトルをチューニングするテーラーメイド照明という応用分野が創成される。さらに、深紫外フォトニクス、光高速通信への波及効果も大きい。

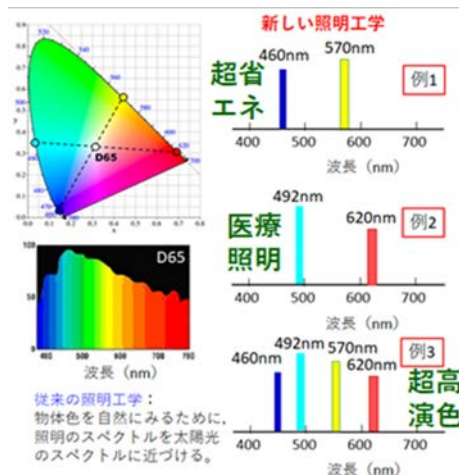


図2 テーラーメイド照明のスペクトル合成例

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

・ Y. Matsuda, M. Funato, and Y. Kawakami, “Polychromatic emission from polar-plane-free faceted InGaIn quantum wells with high radiative recombination probabilities”, *Appl. Phys. Exp.* **10**, 071003/1-4 (2017).

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 431,500千円

【ホームページ等】

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

【特別推進研究】

理工系



研究課題名 非平衡合成による多元素ナノ合金の創製

京都大学・理学研究科・教授

きたがわ ひろし

北川 宏

研究課題番号： 20H05623 研究者番号：90234244

キーワード： 多元素ナノ合金、ハイエントロピー、非平衡プロセス、触媒

【研究の背景・目的】

本研究では、多元素ハイエントロピー効果により、多くの元素種を固溶化させることで、新しいナノ固溶合金を開発すると共に、革新的な触媒機能の創成を行います。研究代表者が独自に開発した、超臨界ソルボサーマル連続フロー合成法により、多種元素を原子レベルで融合させ、新元素、新物質、新材料の探索を徹底的に行います。具体的にはこれまで誰も成功していない、1) 貴金属多元素からなるハイエントロピー固溶ナノ合金の作製、2) 貴金属-卑金属の多元素からなるハイエントロピー固溶ナノ合金、3) 貴金属-卑金属-軽元素の多元素からなるハイエントロピー固溶ナノ合金の作製に挑戦します。さらに、プロセス・インフォマティクス適用により、一貫貫型の革新的プロセス開発を行います。本研究開発により、人間の経験知からでは獲得出来ない、個々の触媒反応に関する「元素の特徴・特性」を機械学習を通して知り得るものと期待されます。

【研究の方法】

非平衡合成、ナノサイズ化、水素プロセス、ソルボサーマル連続フロー合成などの手法を駆使した固溶ナノ合金化技術の確立を徹底的に行います。これまで研究代表者は、ナノサイズ化と非平衡合成の手法を用いることで、バルク状態では決して混じり合うことのない金属元素同士を原子レベルで混合させる研究開発を行ってきました。しかしながら、金属原料溶液の噴霧スプレーにより金属イオンを還元させる手法では、還元スピードの上昇には限界があり、還元性が大きく異なる金属イオン種を瞬時に同時還元させることは難しく、均一に混和させることには成功していませんでした。そこで、水熱反応およびソルボサーマル反応を用いた超高速還元連続合成法（ソルボサーマル連続フロー合成法）を適用することで、超臨界・亜臨界における非平衡状態による固溶合金化技術の確立を行います。ソルボサーマル合成法とは、高温または高圧の溶媒（または超臨界流体）を用いて固体を合成する方法であり、溶媒が水の場合は水熱合成と呼ばれます。この手法を用いると、様々な金属イオンが溶けている溶媒を瞬時に超臨界・亜臨界流体に移行させ、高温・高圧下で各金属イオンを瞬時に金属原子に還元・合金化し、瞬時に室温に冷却させて1 nm級の固溶合金を合成することが出来る手法です。セリアなどの金属酸化物を除き、合金ナノ粒子の合成に関しては数年前までは例が無く、研究代表者が

これまで世界をリードしてきました。研究代表者が独自に開発したソルボサーマル連続フロー合成法の特長は、1) 40 MPa、450°Cまでの加圧・加熱可能、2) エタノールでも300°Cまで還元剤として使用可能、3) エタノール10%まで水希釈しても金属イオンを還元できる、4) 3液混合可能、5) 固溶ナノ合金の安定合成・量産化が可能であるという点にあります。

【期待される成果と意義】

非平衡超臨界・亜臨界ソルボサーマル連続フロー反応プロセスを用いることによって、任意の元素を好きなだけ選び、それらを任意の割合で原子レベルにて混ぜ合わせる事がほぼ可能になることが期待されます。しかし、自由自在性が高まると任意性も格段に高まります。2元素や3元素の合金の組み合わせなら、物質化学者としての物質勘も通用することがありますが、多元系となるともはや経験則は通用しなくなります。そこで、プロセス・インフォマティクスの活用が不可欠となります。超臨界・亜臨界ソルボサーマル連続フロー合成装置を用いて、データ駆動型プロセス開発を実施します。装置の限界性能を極限まで広げ、合成失敗作も学習させることによって、マテリアルズ・インフォマティクスや人間の思考の常識を越える一貫貫型の材料開発が可能になるものと期待されます。この非常識とも言える機械学習により、人間の経験知では知り得ない、個々の触媒反応に関する「各元素の特徴・特性」が浮かび上がるものと期待されます。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Platinum-group-metal High-entropy-alloy Nanoparticles, D. Wu, K. Kusada, T. Yamamoto, T. Toriyama, S. Matsumura, S. Kawaguchi, Y. Kubota, H. Kitagawa, *J. Am. Chem. Soc.*, 142, 32, 13833-13838 (2020).
- New Aspects of Platinum Group Metal-based Solid-solution Alloy Nanoparticles: Binary to High-entropy Alloys, K. Kusada, D. Wu, H. Kitagawa, *Chemistry - A European Journal*, 26, 5105-5130 (2020).

【研究期間と研究経費】

令和2年度～6年度 486,100千円

【ホームページ等】

http://kuchem.kyoto-u.ac.jp/osscc/j_index.html
kitagawa@kuchem.kyoto-u.ac.jp

研究課題名 JSNS2 実験による J-PARC 物質生命科学研究所施設ニュートリノ研究の発展と展開



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

まるやま たかすみ

丸山 和純

研究課題番号： 20H05624 研究者番号：80375401

キーワード： ニュートリノ、ステライルニュートリノ、液体シンチレータ検出器

【研究の背景・目的】

ニュートリノ振動は、2015年に梶田氏とMcDonald氏がノーベル賞を受賞し、脚光を浴びた。これは、ニュートリノがその飛行距離とエネルギーに依存して型（電子、ミュー、タウ、ステライル）を変える現象で、本研究は、未解決の「型変化の中に少量のステライルが含まれるか？」という問題を高い確度で探る。

ステライル型は弱い相互作用をしないニュートリノであり、素粒子標準理論で説明出来ない。ステライル型の存在が確定できれば、大きく定説が覆される。

ステライル型は弱い相互作用を行わないため、その存在の確認は他のニュートリノとの振動を通じてなされる。いくつかの実験でその存在が示唆されているが、決定的な証拠はない状況で、決定的な検証が急務である。現在、その検証に向け、世界でいくつかの実験が行われている。本研究は感度強化を行い、国際競争に勝ち、世界の実験の中で最速で結果を出す。

また、感度強化の一環として行う研究を通じ、物質・生命科学実験施設（MLF）の施設能力向上も狙う。

【研究の方法】

JSNS2 実験のセットアップを図1に示す。J-PARC MLF 3階に既に存在する、水銀標的から24m基線の50トン液体シンチレータ検出器に加え、新規に36m

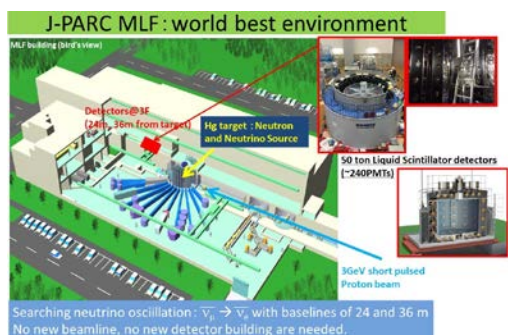


図1：JSNS2 実験のセットアップ

地点に同じ検出器を作製し、追加設置する。水銀標的で生成される大量の反ミュー型ニュートリノが液体シンチレータ検出器で検出されるまでの間、数10mで振動を起こし、反電子型に振動するかどうかを探る。データ取得中の現行検出器に、追加で新検出器を設置し、飛行距離の差による振動と背景事象の違いをより理解し、感度強化することが可能となる。

他、高速中性子背景事象の除去能力が高い液シンへの改良、電子回路の改良、水銀標的前の陽子ビーム最終段収束改良、水銀標的でのニュートリノ親粒子または中性子の生成断面積の精密測定などを行い、ステライルニュートリノ探索の感度強化とともに、別物理の遂行、施設能力向上を展開する。

【期待される成果と意義】

図2で本研究によるJSNS2 実験の感度強化を示す。横軸が反ミュー型が反電子型へ振動する割合で、縦軸が第4質量固有値と他の固有値の差の2乗を表す。斜線部は本研究の予想探索感度であり、水色・

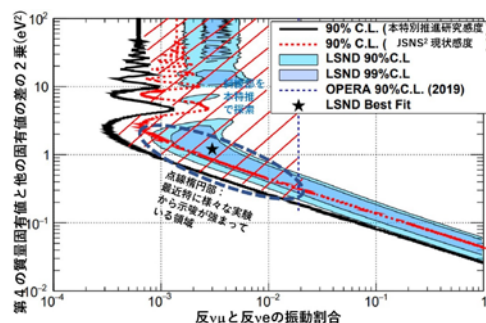


図2：JSNS2 実験の本特別推進による感度強化

青色の部分が先駆実験でステライルが存在する場合の振動の示唆領域である。先駆実験示唆領域について完全な結論を出すことが可能であり、赤の点線で示した現行JSNS2 実験の感度を大きく向上できる。特に、最近示唆が強い領域（図中点線楕円部）に対する感度が強化される。

他、前述の施設能力の向上も行う。更に水銀標的内で別途K中間子2体崩壊で生成される236 MeV単色エネルギーと物質の散乱断面積測定も行う。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ S. Ajimura et al, arXiv:1705.08629 (技術設計書)
- ・ M. Harada et al, arXiv:1310.1437 (実験提案書)

【研究期間と研究経費】

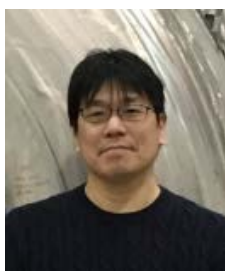
令和2年度～6年度 474,500千円

【ホームページ等】

<https://research.kek.jp/group/mlfnu>

【特別推進研究】

理工系



研究課題名 ミュオン異常磁気能率・電気双極子能率の超精密測定

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

みべ つとむ

三部 勉

研究課題番号： 20H05625 研究者番号：80536938

キーワード： ミュオン、異常磁気能率、電気双極子能率、超精密測定

【研究の背景・目的】

多くの実験事実と、数学的な整合性を基盤に築き上げられた素粒子標準理論は、様々な素粒子現象を定量的に説明する極めて堅牢な理論である。しかしながら、近年の研究により必然的に素粒子標準理論を超える新しい物理法則（新物理）の存在が要請される。ミュオン異常磁気能率($g-2$ あるいは a_μ)は素粒子標準理論よりも大きな値を持つことが示唆されており、新しい測定が求められている。本研究ではJ-PARCの大強度陽子ビームの特徴を最大限に生かし、新しい実験技術と組み合わせることにより、従来とは異なる研究手法により $g-2$ および電気双極子能率(EDM)の超精密測定を行い、素粒子標準理論と比較することで新物理の存在に迫る。

ミュオン $g-2$ や EDM は未知粒子や相互作用の効果が顕著に現れ得る物理量である。ミュオン $g-2$ は、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)で540ppbの相対精度で測定され、標準理論の予想から誤差の3倍以上大きな値を持つと報告された(図1)。標準理論の計算はそれに用いる過去の膨大なデータによって与えられており、他のデータと無矛盾に標準理論の計算を疑うことはできない。一方、このような精度で $g-2$ を測定したのは唯一 BNLの先行実験のみであり、独立な検証が必要である。本研究では、ミュオンを冷却・加速することにより世界初の低エミッタンスビームを実現し、3次元らせん入射・コンパクト蓄積磁石・高安定度飛跡検出器を用いて従来と全く違う手法を用いた超精密測定を行う。これにより $g-2$ に新物理の効果が見えているのかに決着をつけるとともに、EDM を世界最高精度で探索することが目的である。

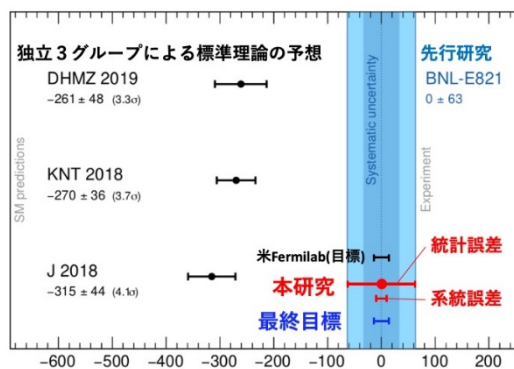


図1 ミュオン $g-2$ の理論予想と実験値の差

【研究の方法】

ミュオンビームは陽子加速器からのビームが標的に原子核反応を起こしてパイオンを生成し、その崩壊により生じるミュオンを捕獲・輸送することにより得られる。これらの過程でビームエミッタンス(位相空間体積)は大きく広がる(1,000 $\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$)ため、高輝度なビームを得ることができない。従来研究ではビームに起因する系統誤差が支配的であった。本研究では、ミュオンを冷却・加速することにより得られる低エミッタンス(1 $\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$)のビームを生成し、これを抜本的に解決する。すなわち、従来は不可能であった高効率入射・収束電場の排除・高い磁場一様性・陽電子飛跡の完全再構成を実現し、従来の系統誤差要因を完全に払拭する。

【期待される成果と意義】

研究期間内に、新しい測定手法を実証し、実験データの収集を開始する。実験装置の準備・調整の後、データ収集を行い、 $g-2$ を統計精度 450 ppb (先行実験と同程度)、系統誤差 70 ppb 以下(先行実験の1/4)で測定し $g-2$ のズレの有無に決着をつけるとともに、EDM を $1.5 \times 10^{-21} \text{e} \cdot \text{cm}$ の感度(先行実験の100倍)で探索する。

現在、BNLの実験機器をフェルミ国立研究所(Fermilab)に移設し、従来と同じ手法で統計精度を100 ppbに改善する実験が行われている。一方、異なる方法で検証できるのは本研究のみであり、研究の意義はFermilabの結果に左右されない。本研究で新手法による測定装置が完成し、目標精度が達成できれば、将来は従来手法の限界(100 ppb)を超えた世界最高精度の実験が可能となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ M. Abe, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053C02 (2019).
- ・ T. Aoyama, et al., arXiv:2006.04822 (KEK Preprint 2020-5) (2020).

【研究期間と研究経費】

令和2年度～7年度 489,400千円

【ホームページ等】

<http://g-2.kek.jp>
tsutomu.mibe@kek.jp