

腕足動物殻の Sr/Ca 比は過去の海洋における炭酸系の指標となりうるか

○西尾拓哉^a・高柳栄子^a・浅海竜司^a・新城竜一^b・井龍康文^a

東北大学大学院理学研究科地学専攻^a，琉球大学理学部物質地球科学科^b

炭酸塩骨格・殻の同位体組成・金属元素濃度は、測器記録のない時代の海洋環境変化を読み解くための重要な代替指標として位置づけられ、多くの古気候・古海洋環境の復元に用いられている[1]。本研究で対象としている腕足動物は、方解石の殻を2枚もつ海棲無脊椎動物で、「生きた化石」の1つである。従来、腕足動物化石の炭素・酸素同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値) は顕生代の海洋環境変化を描き出すための最適なツールとして注目されてきた[2]。一方で、腕足動物の殻に少量取り込まれる金属元素の挙動やその要因は十分に明らかにされていない。そこで本研究では、殻の金属元素濃度の変動が何に起因しているのかを明らかにするため、誘導結合プラズマ質量分析計を用いて腕足動物（3属4種）の殻の金属元素濃度を μm オーダーで分析し、分析結果と殻の $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値、腕足動物の生態因子、生息域周囲の環境因子との詳細な比較を行った。その結果、殻の $\delta^{13}\text{C}$ 値と Sr/Ca 比との間には強い負の相関関係が認められ、その変動の位相がよく一致していることが明らかになった（図1）。殻の $\delta^{13}\text{C}$ 値が海水中的炭酸系化学種 ($\text{H}_2\text{CO}_3 \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{CO}_3^{2-}$) の存在度 (pH と関係) と密接に関係している点と、有孔虫殻の Sr/Ca 比と炭酸イオン濃度 ($[\text{CO}_3^{2-}]$) に正の相関関係が見出されている点を考慮すると、本研究で得られた両者の関係は、殻形成時の $[\text{CO}_3^{2-}]$ に起因している可能性が示唆される。そこで、本研究では、腕足動物殻の $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{18}\text{O}$ 値から独自の方法でそれぞれ pH と溶存無機炭素濃度を見積もり、同時空間面で殻形成時の母液の $[\text{CO}_3^{2-}]$ と殻の Sr/Ca 比の直接対比を試みた。両者の間には有意な正の相関関係が認められたが、一方で、殻の一部には Sr が過剰に取り込まれていることも明らかになった。今後、結晶成長や殻形成場の石灰化母液の化学組成の動態（特に Sr の挙動）をさらに検討することにより、殻の Sr/Ca 比を信頼性の高い海水の炭酸系の指標として確立できると期待される。

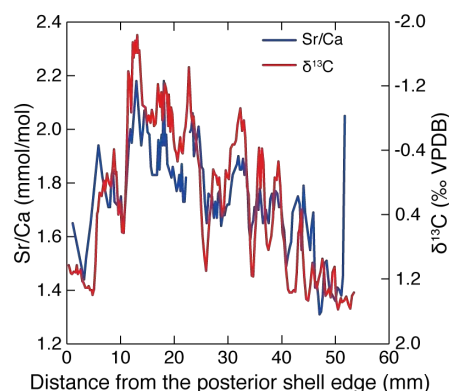


図1 腕足動物殻の $\delta^{13}\text{C}$ と Sr/Ca 比との関係

専門用語の説明

- ・代替指標：過去の環境因子（例えば、水温・塩分など）に読み替えることが可能な指標。
- ・顕生代：約5億4100万年前～現在に相当する地質時代区分のこと。
- ・有孔虫：原生動物の1種で、微小な石灰質の殻をもつ動物プランクトン。

参考文献

- [1] Prokoph *et al.*, 2008, *Earth Sci. Rev.* **87**, 113–133
 [2] Veizer *et al.*, 2015, *Earth Sci. Rev.* **146**, 92–104

すばる望遠鏡による重力崩壊型超新星の光度分布

松田将大（東北大学）

田中雅臣（東北大学）、守屋堯（国立天文台）、安田直樹、鈴木尚孝、高橋一郎、諸隈智貴、姜継安（東京大学）、富永望（甲南大学）、他 HSC transient WG

東北大学大学院理学研究科天文学専攻

1929年に発表された「ハッブル＝ルメートルの法則」は、「遠くにある天体の後退速度 v が、その天体までの距離 D に比例している」というものであり、我々の宇宙が等方的に膨張していることを示す法則として宇宙物理学の発展に大きく寄与した。

この法則を発見する際に利用されたのが超新星である。超新星とは、星の進化の最後の爆発現象であり、宇宙で最も明るい天体現象の1つである。超新星の種類によっては、そのメカニズムからピーク時の明るさがよく分かっている。従来は遠くの天体までの距離を測る方法が限られていたが、明るさの分かっている超新星の、真の明るさと地球から見た明るさを比べることで天体までの距離 D を正確に計算することが可能になった。距離指標としての超新星は天文学において重要な役割を持つ。

しかし、超新星にも多様な種類があり、その分類や明るさ、メカニズムなどがまだまだ完全には理解されていないのが現状である。まだ解明されていないことの1つとして今回私達が調べているのが、重力崩壊型超新星という種類の超新星の光度分布（明るさごとのヒストグラム）である。

今回すばる望遠鏡を使って行われた HSC-SSP transinet survey という大規模観測では過去にない視野の広さと視力によって、大量の超新星候補を観測することに成功している。私達はそのデータの中から重力崩壊型超新星と思われる天体のセレクションを行い、光度分布を調べることで、宇宙ではどのような明るさの超新星がどのくらい発生しているのかという割合を算出した。この調査によって超新星の明るさやメカニズムへの理解が深まることで、宇宙物理学全体への貢献につながると考えている。



参考文献

<https://hsc.mtk.nao.ac.jp/ssp/><https://arxiv.org/pdf/1904.09697.pdf>

アフィン量子群の普遍 R 行列の積公式による壁越え公式の導出

菅原優 (東北大学大学院理学研究科数学専攻)

1 研究の背景および目的

Dimofte, Gukov, Soibelman らは, 超弦理論の文脈で現れる refined BPS invariant と呼ばれる量の挙動を記述する壁越え公式を具体的に書き下すことによって, 次に示すような「有限積 = 無限積」という形の恒等式を発見した [1].

$$\begin{aligned} U_{2,-1}U_{0,1} &= (U_{0,1}U_{2,1}U_{4,1}\dots)\mathbb{E}(-qx_1^2)^{-1}\mathbb{E}(-q^{-1}x_1^2)^{-1}(\dots U_{6,-1}U_{4,-1}U_{2,-1}), \\ U_{1,-1}U_{1,0}U_{0,1} &= (U_{0,1}U_{1,1}U_{2,1}U_{3,1}\dots)U_{1,0}^2\mathbb{E}(-qx_1^2)^{-1}\mathbb{E}(-q^{-1}x_1^2)^{-1}(\dots U_{3,-1}U_{2,-1}U_{1,-1}), \\ U_{1,-1}^2U_{0,1}^2 &= (U_{0,1}^2U_{1,1}^2U_{2,1}^2U_{3,1}^2\dots)U_{1,0}^4\mathbb{E}(-qx_1^2)^{-1}\mathbb{E}(-q^{-1}x_1^2)^{-1}(\dots U_{3,-1}^2U_{2,-1}^2U_{1,-1}^2). \end{aligned}$$

ただし q はパラメータ, x_1, x_2 は $x_1x_2 = q^2x_2x_1$ を満たす非可換な文字であり, $\mathbb{E}(x) := \prod_{m=0}^{\infty}(1+q^{2m+1}x)^{-1}$ は量子二重対数と呼ばれる. また $U_{m,n} := \mathbb{E}(q^{-mn}x_1^mx_2^n)$ とおいた.

Dimofte らは物理学的な考察からこれらを発見したが, 数学的な証明は与えられていなかった. 本研究の目的は, これらの恒等式を数学的に導出し, さらに壁越え公式の背景にある数学的構造を明らかにすることである.

2 恒等式の導出法

研究の結果, アフィン量子群の普遍 R 行列と呼ばれる元の積公式と一意性から, 上に挙げた恒等式を全て代数的に導出できることがわかった [3]. 普遍 R 行列は, 凸順序と呼ばれる正ルートたちの間の順序ごとに定まる具体的な無限積表示をもつことが示されており [2], 凸順序をとりかえるごとに異なる積表示が得られ, さらに普遍 R 行列が一意的な元であることから等式が成立する. 凸順序を適切に選び, さらに適切な表現による普遍 R 行列の像を計算することによって冒頭の恒等式がそれぞれ得られた.

凸順序は無数に存在するため, 凸順序や表現を変えることでさらに異なる恒等式も構成できると考えられる. 一方, 壁越え公式が量子群の普遍 R 行列で記述されることは全く明らかではなく, その理由を解明することは今後の課題である.

参考文献

- [1] T. Dimofte, S. Gukov, Y. Soibelman. *Quantum Wall Crossing in $N=2$ Gauge Theories*, Lett. Math. Phys. **95** (2011) 1-25, arXiv:0912.1346.
- [2] K. Ito. *A new description of convex bases of PBW type for untwisted quantum affine algebras*, Hiroshima Math. J. **40** (2010), 133-183.
- [3] M. Sugawara. *Convex bases for affine quantum groups and its application for quantum dilogarithm identities*, 京都大学数理解析研究所講究録, **2139** (2019).

発光増強を指向した酸化チタン-有機色素ハイブリッド ナノ構造体の作製

○柳田 拓也¹・小野寺 恒信²・Sato Rodrigo³・武田 良彦³・及川 英俊²

東北大学大学院理学研究科化学専攻¹

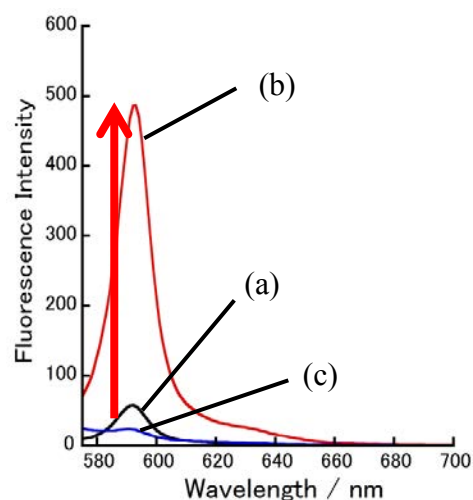
東北大学多元物質科学研究所² 物質・材料研究機構³

[序論]

様々な物質は一般的に我々が目にする大きさの固体（バルク）と比べて、ナノ粒子では異なる光学的、電子的な性質を有する事が知られている。金属ナノ粒子（NPs）についても同様であり、金属 NPs に光が入射すると光電場によって自由電子の集団振動による分極が誘起され、ナノ粒子表面の極近傍に近接場と呼ばれる光エネルギーが濃縮された増強場を生じる。この特性を用いて発光体の蛍光増強に関する研究が広く行われおり、2つの蛍光増強メカニズムが報告されている。（1）近接場による発光体の励起確率の増加（2）本来は熱などによって損失される発光体の励起エネルギーが、発光体から金属 NPs に移動して蛍光として放出されることによる蛍光増強である[1]。しかし、金属 NPs は可視域にドローデ吸収を有しているため、必ずエネルギー損失を生じてしまう欠点がある。そこで、可視域で無色透明な高屈折率材料である酸化チタンナノ粒子(TiO₂ NPs)に着目した。更に、この2つの蛍光増強プロセスを同時に発現するためには発光体の吸収・蛍光スペクトルおよび TiO₂ NPs の散乱スペクトルを全て重ね合わせる必要があるが、一般的な発光体は吸収ピークと発光ピークが離れている。そこで、吸収ピークと発光ピークが近いことで知られている J-会合体に着目した。本研究では TiO₂ NPs の散乱ピークと J-会合体の吸収、発光ピーク位置をチューニングすることで金属 NPs 以上の蛍光増強を指向した[2]。

[実験、結果と考察]

ガラス基板上に TiO₂ NPs 水分散液を滴下・乾燥させた後、0.1 mM J-会合体水分散液を滴下・乾燥させることでハイブリッド薄膜試料（J-会合体 / TiO₂ 薄膜）とした。J-会合体 / TiO₂ 薄膜において10倍程度の蛍光増強が確認された。励起光が TiO₂ NPs の内部に侵入し多重散乱されることで、ある特定波長が共鳴的に増強される。その結果、近接場が形成されたことが主要因だと考えられる。一方で、TiO₂ NPs をシリカコーティングした場合、J-会合体が近接場領域から遮蔽されたため発光増強が発現しなかったことから、近接場による発光増強が示唆される。



J-会合体薄膜 (a)、J-会合体 / TiO₂ 薄膜 (b)、J-会合体 / silica-coated TiO₂ 薄膜 (c) の蛍光スペクトル

[1] *Part. Part. Syst. Charact.*, 34, 1700528, 2017.

[2] *Methods Appl. Fluoresc.*, 6, 012001, 2018.

偏光分光観測で探る超高輝度超新星の爆発形状とエネルギー源

齋藤 晟

東北大学大学院理学研究科天文学専攻

質量が太陽の8倍程度以上の重い星は、その一生の最後に超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こして明るく輝く。その明るさは銀河1つ分にも匹敵する程であり、そのエネルギー源は ^{56}Ni の放射性崩壊だと考えられている。近年多くの観測により、超高輝度超新星と呼ばれる通常の超新星より10倍から100倍程度明るい超新星が多数見つかった。そのエネルギーは ^{56}Ni の放射性崩壊では説明できないことがわかっており、それを説明するためにいくつかのモデルが提唱されている。モデルによっては爆発の形状が球対称から大きく外れることが予想されるため、超高輝度超新星の形を知ることは重要である。銀河系¹の外にある超新星のほとんどは空間的に分解することができない（撮像観測²では点源として観測される）ため、形を見るためには偏光観測を行わなければならない。

今回、すばる望遠鏡のFaint Object Camera and Spectrograph (FOCAS)を用いて、明るさのピークから約200日後の水素を持たない超高輝度超新星 SN 2017egm の偏光分光観測を行った。我々はそのデータを解析し、SN 2017egm の波長ごとの偏光度を求めた。

初期では SN 2017egm は偏光をほとんど持っておらず（図1の左図；Bose et al. 2018）、このことは超新星の外層はほぼ球対称の構造をしていることを示している。一方で、後期では偏光が現れ（図1の右図）、このことから超新星の内側は非球対称の構造を持っていることが示唆される。以上より、超高輝度超新星は内側に非球対称の構造を生むエネルギー源を持つ爆発であると考えられる。

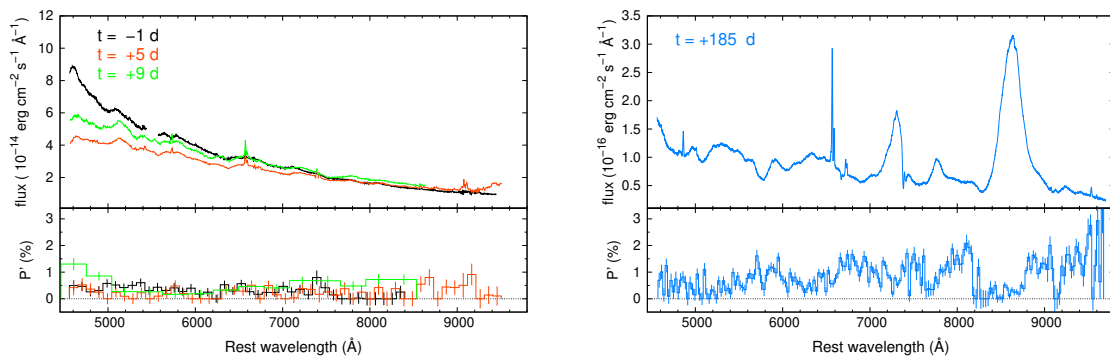


図1: SN 2017egm の超新星起因の偏光度。P' はデバイアスされた偏光度を表す。左図: 明るさのピークから -1, +5, +9 日後（それぞれ黒、オレンジ、黄緑）での SN 2017egm のスペクトル（上図）と偏光度（下図）。Bose et al. 2018 から引用。右図: 明るさのピークから +185 日後の SN 2017egm のスペクトル（上図）と偏光度（下図）。

専門用語の説明

¹ 銀河系: 我々のいる銀河。天の川銀河。

² 撮像観測: 大きさ、形状、明るさなどを調べることを目標として天体の画像を取得する観測方法。

参考文献

Bose, S., Dong, S., Pastorello, A., et al. 2018, ApJ, 853, 57

極低温・強磁場顕微鏡による窒化ガリウム中不純物の可視化

○神山 晃範¹・小島 一信²・秩父 重英²・遊佐 剛^{1,3}

¹ 東北大学大学院理学研究科物理学専攻

² 東北大学多元物質科学研究所

³ 東北大学スピントロニクス学術連携

半導体物理学の発展により、我々の生活は応用デバイスに支えられるものとなった。中でも窒化ガリウム (GaN) を応用した青色発光ダイオードの発明が2014年にノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい。GaNは3.4 eVのバンドギャップエネルギー(光の波長換算で ~ 360 nm)を有し、広く用いられているシリコンなど他の半導体と比べて高い値を有している。そのため、耐電圧性に優れたパワーデバイスや、近紫外付近の光源の材料として注目を浴びている。GaNは一般的に結晶成長が難しく、他の半導体と比べて良結晶性・高純度な単結晶を得るのが難しい。特に酸素不純物(O)の濃度の制御は困難で、GaN結晶成長における一大テーマと認識されている。GaN中のOは、形成エネルギーの関係によりGa欠損などの結晶欠陥を招く[1]。これらの欠陥は半導体内部に深いエネルギー準位を形成するため、電気デバイスの耐電圧性を悪化させ、光デバイスでは設計波長とは異なる黄色発光を促すといった弊害をもたらす。GaN中のO濃度は結晶成長面に依存して2桁以上変化し得ることが知られている[2]。これまでに、検出限界との兼ね合いから高濃度もしくはマクロな空間スケールの研究が多く報告されてきた。

今回我々は極低温・強磁場下で動作するフォトルミネッセンス(PL)顕微鏡を用いて、低濃度・ミクロな視点から酸素の取り込みメカニズムの解明を試みた。半導体の評価手法の1つであるPLは、半導体内部のエネルギー準位の情報を伴って生じる発光現象である。温度4 Kにおいて、GaNのPLスペクトルは不純物関連の発光が支配的となり、水素原子近似の基で強磁場PLスペクトルを解析すると不純物の種類を特定できる(図1(a))。低不純物濃度GaN試料を用いてPL強度の空間分布を測定した結果、数度の成長面の傾斜がO濃度の増加に寄与することが分かった(図1(b,c))。発表では発光解析の詳細やSi不純物との競合関係、二次イオン質量分析(SIMS)による定量値との比較なども行う。

[1] J. Neugebauer *et al*, Appl. Phys. Lett. **69**, 503 (1996).

[2] S. C. Cruz *et al*, Jour. Crys. Grow. **311**, 3817 (2009).

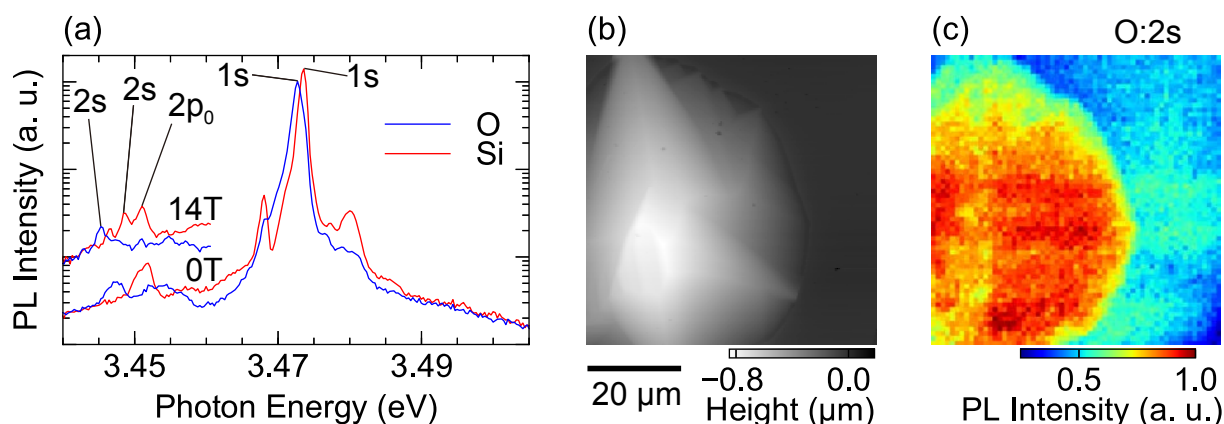


図 1: GaN 試料の (a)PL スペクトル (b) 原子間力顕微鏡像 (c) 酸素関連の PL 分布。

栽培キノコにおける放射性セシウム移行の研究

○田巻廣明^a・木野康志^a・奥津賢一^a・山下琢磨^{a,b}・関根勉^{a,b}

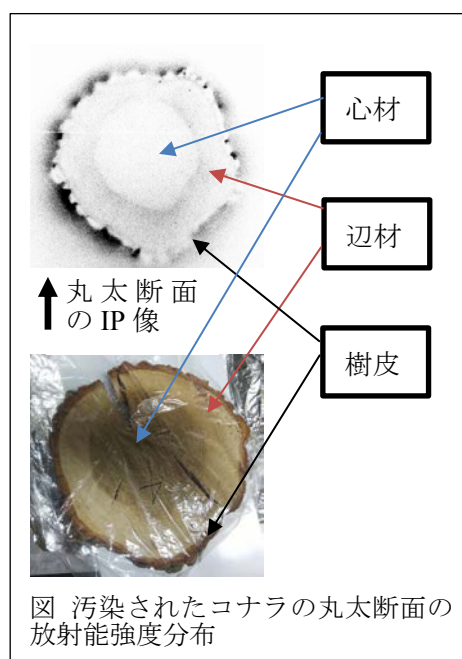
板橋康弘^c・中島丈博^c・郡山慎一^c・木村栄一^c・鳴原隆^c

東北大学大学院理学研究科化学専攻^a 東北大学高教機構^b (株)キノックス^c

【諸言】福島第一原子力発電所事故により、放射性セシウム（主に¹³⁷Cs、半減期 30.2 年）が環境中に放出され、福島県を中心に広範囲が汚染された。山林に沈着した¹³⁷Cs は農林業に現在も影響を与えている。福島県はキノコ栽培に適した木材の一大産地であり、消費者が安心できるキノコ生産のためには、木材から子実体への¹³⁷Cs の移行低減や、移行過程の理解が求められる。我々は、キノコの培地となる木材中での¹³⁷Cs の化学状態や、キノコのカリウム・セシウム吸収メカニズムに着目し、培地から子実体への¹³⁷Cs 移行の解明を目指している[1]。本研究では、¹³⁷Cs により汚染された広葉樹から木質の異なる培地を作成し、子実体への移行挙動における放射性 Cs と安定 Cs（¹³³Cs）の違いを明らかにした。

【実験】¹³⁷Cs に汚染された木材を木質によって分離し、キノコ栽培用の培地を調製した。キノコはキノックス標準栽培法[2]に基づき厳密に管理された環境下で栽培した。¹³⁷Cs が放出するγ線を高純度 Ge 半導体検出器で測定することで、試料中の¹³⁷Cs を定量した。また、¹³³Cs は誘導結合プラズマ質量分析器を用いて定量した。木材中の Cs の化学状態を、洗浄実験により分析した。

【結果・考察】図に示すように、汚染されたコナラの丸太断面の放射能強度分布は、樹皮・辺材・心材によって異なることがわかった。心材と辺材それぞれで作成した培地からナメコへの¹³⁷Cs の移行率は、心材よりも辺材で大きいことが明らかになった。¹³³Cs の移行率は心材と辺材で差が小さかったことから、放射性 Cs と安定 Cs で化学状態が異なると推測された。¹³⁷Cs は原発事故により放出され雨等と一緒に沈着したものであるが、¹³³Cs は天然に存在しているため、¹³⁷Cs が木材中で平衡状態に達していない可能性がある。洗浄試験の結果、木材に含まれる



¹³⁷Cs のうち水に可溶な画分の割合は心材より辺材の方が高い傾向が見られた。移行率の大小と合わせて考えると、子実体に移行する¹³⁷Cs の大部分が水に可溶な¹³⁷Cs であることが予想される。また抽出液のクロマトグラフィーの結果から、これら水溶性の¹³⁷Cs は完全に電離したイオンではなく、有機物等と結合した状態であることが示唆されている。現在はこれらの情報をもとに、キノコに取り込まれやすい¹³⁷Cs の形態を明らかにすることを目指して研究を進めている。

参考文献

[1]田巻廣明, 木野康志, 村野井友, 板橋康弘, 中島丈博, 郡山慎一, 木村栄一, 鳴原隆 *KEK Proceedings 2019*, 2, 120 (2019)

[2] <http://www.kinokkusu.co.jp/saibai/saibai.html>

Quantitative imaging analysis of labile Zn^{2+} in intracellular organelles via the development of hybrid fluorescent probe

○ Rong Liu¹, Toshiyuki Kowada^{1, 2, 3}, Tomomi Watanabe¹, Toshitaka Matsui^{1, 2, 3}, Shin Mizukami^{1, 2, 3}

¹Graduate School of Life Sciences, ²IMRAM, ³Graduate School of Science, Tohoku University

[Introduction] Zinc is the second most abundant element in the human body, which plays many essential physiological roles such as catalytic cofactor, protein structure component, and signaling mediator. Most Zn^{2+} are strongly bound to metalloproteins, which explains the reason why the total concentration of intracellular Zn^{2+} is at μM level, whereas the free Zn^{2+} concentration is at a much lower level (pM–nM).¹ This equilibrium is accurately regulated under physiological condition, and its disruption will lead to serious diseases.²

One of the commonly used strategies to visualize metal ion dynamics in living cells is microscopic imaging using fluorescent probes, which possess several merits such as high sensitivity, high spatial resolution, and less-invasiveness to cells. Fluorescent probes are generally classified into two types: small-molecule-based and protein-based probes. However, because both types of the probes have the specific disadvantages, little localization ability for small-molecule-based probes and susceptibility to oxidative environment and/or pH variation for protein-based probes, the exact Zn^{2+} concentrations in the organelles have still not reached a consensus.

In this study, in order to achieve real-time monitoring and accurately quantitative mapping of labile Zn^{2+} in each organelle, HaloTag protein-labeling technology was utilized to localize the small-molecule probe to the target organelles. An aminocoumarin was chosen here as the fluorophore because of its advantageous properties such as small molecular weight, neutral charge, less sensitivity toward pH. Based on the coumarin structure, ZnDA-1H ($K_d = 238 \text{ nM}$) has been developed and quantification of labile Zn^{2+} concentration in the Golgi apparatus was achieved. However, in order to monitor labile Zn^{2+} in other organelles, where the concentrations of labile Zn^{2+} are expected to be lower, fluorescence probes with higher affinity are needed.

[Result] ZnDA-2H ($K_d = 6.0 \text{ nM}$), and ZnDA-3H ($K_d = 0.16 \text{ nM}$) were synthesized via changing the chelator part of ZnDA-1H. The quantum yields of both probes in the presence or absence of Zn^{2+} were investigated at various pH (5.5–8.0). Both probes showed Zn^{2+} -responsive fluorescence enhancement in physiological pH range, which suggests that they are suitable to be applied to intraorganellar Zn^{2+} imaging. Comparing the photophysical properties of two probes, ZnDA-3H showed larger fluorescence enhancement by Zn^{2+} binding. By co-staining with organelle markers, it was assessed that ZnDA probes were selectively localized in the target organelles through the labeling to HaloTag proteins. Furthermore, the time-lapse imaging showed that ZnDA-3H was appropriate for the detection of the labile Zn^{2+} in the ER, nucleus, and cytosol.

[Technical term]:

- Fluorescence: when excited by a certain wavelength of light, the molecule will absorb the light, resulting in a loss of some of the absorbed energy, along with emission at a higher wavelength, and finally return to the ground state. Through fluorescence, the analyte can be detected and visualized by microscopy.
- HaloTag protein-labeling technology: The small-molecule having a HaloTag ligand can specifically form a covalent bond to a HaloTag protein. This technology are widely used for fluorescence labeling of a protein of interest.
- Dissociation constant (K_d): $K_d = \frac{[L][M]}{[LM]}$, where [L] is the concentration of ligand, [M] is the concentration of metal ion. Lower K_d value means higher affinity to metal ion.

[References]

- 1) E.L. Que, D.W. Domaille, C.J. Chang, *Chem. Rev.* **2008**, *108*, 1517–1549.
- 2) W. Maret, *Exp. Gerontol.* **2008**, *43*, 363–369.

GNSS による震源断層モデルおよびその不確実性の即時推定に関する研究

○大野圭太郎・太田雄策

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

巨大地震の地震規模とその断層面の広がり の正確な把握は、津波即時予測の観点からきわめて重要である。そうした観点から、国土地理院と東北大学は共同で、リアルタイム GNSS 解析システム (REGARD) の開発を進めている。同システムは GNSS (全地球測位システム) による永久変位から震源断層モデルを即時的に推定するものであり、単一矩形断層モデル (1 枚の長方形型の有限断層で震源を表したモデル) とすべり分布モデル (プレート境界面上での断層すべりの空間分布を表したモデル) の 2 種類の推定システムが実装されている。REGARD によって推定された結果は現在、気象庁の津波警報発表時の参考情報として使用されている他、内閣府の防災情報システムの一機能である津波浸水被害推計システムの入力断層モデルとしても活用されている。一方で、REGARD では推定する断層モデルの誤差評価が困難という課題が存在する。プレート境界におけるすべり分布モデルの推定は、すべりの空間分布が滑らかであるという拘束条件 (平滑化) を課した上ですべりを推定しているため、得られる誤差は平滑化パラメータの与え方で大きく変わりうる。こうした震源断層モデルの推定不確実性は、それをもとに計算される津波の予測精度に影響を与える。

このような背景のもと本研究では、リアルタイム GNSS データにもとづく震源断層モデル即時推定における推定不確実性の定量評価を目的とし、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) を用いた新しい断層モデル推定手法の開発およびその性能評価を、上述の 2 つのモデルについて行った。さらに、定量化された震源断層モデルの不確実性を活用する応用例として、それが津波浸水予測にどのような影響を与えうるかについて検討を行った。また、そうした津波浸水予測の不確実性をリアルタイムで抽出する方法について新しい手法の開発を行った。本講演ではそのうち、すべり分布モデルについての結果を示す。

まず、より効率的に MCMC によるすべり分布の推定を実現するために「段階的全分割アルゴリズム」の開発を行った。同アルゴリズムでは、大まかなすべり分布の特徴を粗いグリッドサイズで推定し、その結果を活用しつつ断層を細分化していくことで、効率的に未知パラメータの探索を行う。同アルゴリズムを、1707 年宝永地震を模したすべり分布 (Mw 8.75) のシミュレーションデータへの適用した結果、推定の誤差が沖合に位置する小断層ほど大きくなることが定量化され、陸上 GNSS からプレート境界すべりを推定する際の不確実性を示すことに成功した。次に、定量化された震源断層モデルの不確実性をどのように津波予測へ応用可能かについて、高知県高知市を対象とした津波浸水を行ったところ、断層モデルが持つ不確実性が津波浸水という災害誘因に対して影響を与えうることを端的に示した。最後に、将来的に多数の津波浸水計算がリアルタイムで実施できることを想定し、教師なし機械学習 (k-means 法) を用いて大別されたシナリオそれぞれで津波浸水計算を行うことで、津波浸水の危険性がどの程度各地域にあるかを定量的に示す「リアルタイム津波浸水危険度マップ」を提案した。

本研究の結果は、近地津波予測へ不確実性情報を付加するための一手段となる可能性がある。さらに得られた津波浸水リスクの情報を真に活用していくためには、災害誘因の観点だけでなく、受け手側である社会が必要としていることの理解を進めるとともに、より使いやすい情報にその内容を昇華させる必要がある。

細胞競合による癌細胞排除における RhoGEF, Solo の機能解析

鹿子嶋克彦・山下和成^{1,2}・水野健作²・藤田恭之³・大橋一正^{1,2}東北大学大学院理学研究科化学専攻¹東北大学大学院生命科学研究科専攻²北海道大学遺伝子病制御研究所分子腫瘍分野³

上皮細胞集団が極性化して形成するシート内において、形質転換した変異細胞が出現すると、その細胞は周囲の正常細胞との相互作用によって上皮シートから追い出されることが発見された。この変異細胞排除機構は、がん抑制のための防御機構となり得ることが証明され、細胞競合の一つの形態として注目されている。現在までに、変異細胞排除に関わる因子がいくつか同定され、アクチン骨格や中間径フィラメントの重要性が示されてきた。

Ras などのがん遺伝子による形質転換は、細胞の運動性や形態に変化を引き起こす。この時、周囲の正常細胞がその力学的変化を感知して細胞骨格を再構築することで変異細胞の排除を行っていることが予想される。しかし、この細胞競合における機械的力を感知し制御する分子機構は不明な点が多く残されている。当研究室ではこれまで Solo という Rho-GEF に着目し、細胞間への張力の負荷による RhoA の活性化及びアクチン骨格の強化に必要であること、また、中間径フィラメントの keratin-8/keratin-18(K8/K18)繊維と結合して K8/K18 ネットワーク形成に寄与することを明らかにしてきた。これらの知見から Solo は変異細胞の排出において変異細胞からの刺激と下流の中間径フィラメント及びアクチン骨格の変化を仲介する分子として機能する可能性が示唆された。

本研究では腎臓上皮の MDCK 細胞(正常細胞)とテトラサイクリン依存的に GFP-RasV12 を発現させる MDCK 細胞株をモザイク状に播種し、変異体 Ras の発現を誘導することで変異体 Ras 発現細胞(変異細胞)が頂端側へ排出されるという実験系を用いて研究を行った。

この系において、正常細胞側で Solo の発現抑制を行ったところ、変異細胞の排除は優位に減少し、また、先行研究により知られている変異細胞に隣接する正常細胞における K8/K18 の集積が減弱している様子が観察された。これらの結果から変異細胞の排除には、正常細胞側に Solo が必要であり、中間径フィラメント集積の上流因子として機能していることが示唆された。変異細胞排出時の変異細胞周辺の張力の変化についても検討する予定である。

専門用語の説明

- 細胞競合：性質の異なる 2 種類の細胞集団が接触した状態において、片方の細胞集団が他方の細胞集団を細胞死などによって排除する現象

参考文献

- [1] Y Fujita et al .2009. *nature cell biology* 11.460-7
- [2] Y Fujita et al.2014.*nature communications* 31.5:4428

曲率次元条件を通して見る有向グラフの極限

竹内 秀

東北大学大学院理学研究科数学専攻

本発表では, 次の問題を考える:

問題. 図 1 のような有向グラフを考える. ここで, 有向グラフとは, 頂点 (図 1 では v_0, v_1, v_2) と辺 (図 1 では各頂点を結ぶ矢印) と重さ (図 1 では各辺ごとに設けられた非負実数 $w_{01}, w_{10}, w_{02}, w_{20}, x, y$) により構成される “図形” である.

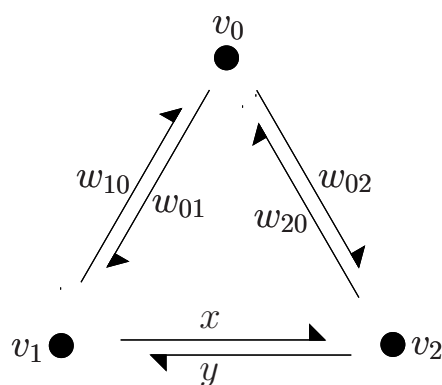


図 1

図 1 の有向グラフにおいて, x と y が正の無限大に発散するとき, この有向グラフはどんな有向グラフに “近づく” べきか?

□

有向グラフは, 現実世界において様々な形で現れる対象である. 例えば, 電気回路は, 導線を辺とし, 重さをコンダクタンス (抵抗の逆数) とみなすことにより, 一つの有向グラフとみなすことができる. この考え方に関する応用としては, 電気回路における電位を求めるとラプラス方程式を解くことが同値になる, というものが挙げられる. このほかにも, 有向グラフはネットワーク理論や神経細胞学にも表れる対象である.

本発表の目的は, 微分幾何学の分野において非常に重要な概念である「曲率」を用いることで, この問題に対する一つの答えを与えることである. 時間があれば, 頂点数が 4 以上の場合の問題についての答えを紹介したい.

参考文献

- [1] 熊谷隆, 確率論, 共立出版 (2003).
- [2] 砂田利一, 分割の幾何学, 日本評論社 (2000).

太陽系始原物質の探索：小惑星に飛来した外来物質の研究

○高橋実樹^a・中村智樹^a・渋谷岳造^b・Michael Zolensky^c

東北大学大学院理学研究科地学専攻^a

海洋研究開発機構(JAMSTEC)^b・NASA/JSC^c

初期太陽系の進化プロセスを解明する手段として、小惑星からもたらされる隕石は重要な情報を保持している。太陽系の初期進化の理解は、始原隕石の物質研究や、はやぶさ2などのサンプルリターン探査計画で進んでいる。一方で、実際に具体的な理解が進んでいるのは太陽系の中心部のみであり、それより外側の太陽系の大部分の領域の理解は大きく遅れている。太陽系の外側領域の始原物質は、構成物質が細粒でとても脆く、地球に飛来する際の大気圏突入の衝撃で破壊されてしまう。そのため、これらの天体の物質は、微小な塵（惑星間塵：多くは $<100\mu\text{m}$ ）として地上へ飛来する。塵はとても小さいため、精密な化学分析ができず、そこから得られる情報は限られている。一部の隕石には、他天体由来と思われる物質（DIs: Dark inclusions）が含まれており、その物質中の鉱物・化学・同位体組成の研究が行われてきた（e.g. [1-3]）。DIsは地球に比べて重力の小さい小惑星に飛来した隕石（多くは $>1\text{cm}$ ）であるため、着陸時の衝撃が小さい。また、小惑星物質に内包された状態で地球へ飛来するため、地球大気への突入時の影響も少なく、細粒で脆い物質でも破壊されずに入手することができる。本研究ではDIsの物質科学的研究から、外惑星領域における微小天体形成プロセスに強い制約を与えることを目的としている。

本研究で用いた NWA2900 炭素質隕石に含まれる DI の大きさは約 $1.0\times 2.5\text{cm}$ の楕円形である。DI はコンドリュールを含んでおらず、主に olivine, magnetite, diopside, plagioclase, spinel の5つの鉱物で構成され、特徴的な diopside の脈状組織が DI 全体に広がっている。物質科学的な特徴から、脈状組織は高温で形成されたことが考えられ、全岩化学・鉱物組成から水熱反応による熱力学計算を行ったところ、 800°C 以上の高温で形成されたことが示唆された。このような高温の水熱変成を経験した炭素質隕石はこれまで発見されていない。さらに形成年代を制約したところ、コンドリュール形成前の太陽系初期に DI が集積したと考えられる。本研究から、太陽系初期にスノーラインより外側で高温の水熱変成が起こっていた含水始原天体が存在していたことが示唆された。

専門用語の説明

- ・コンドリュール：ケイ酸塩鉱物を主成分とした $0.1\sim$ 数 mm 程度の大きさの球状の物質。これを含むものをコンドライト隕石と呼ぶ。

参考文献

[1]Kojima and Tomeoka, 1994, [2]Zolensky et al., 2003, [3]Greenwood et al., 2015

Development of silicon pixel vertex detectors for future collider experiments

李韜瀚^a・幅淳二^{a,b}・石川明正^b・坪山透^b

東北大学大学院理学研究科物理学専攻^a

高エネルギー加速器研究機構^b

1. 研究背景

Belle II 実験はつくば市高エネ研にある素粒子加速器実験で、2019 年に物理の測定が始まり、新物理の探索が進んでいる。2019 年 12 月に瞬間ルミノシティが $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ に達成した、そして、数年後のアップグレードでは今の輝度の 5 倍が考えられている。

2. 研究目的

Belle II の最内層にピクセルバーテックス検出器 (PXD) がある。この PXD はシリコンピクセルセンサーを使い、B 中間子の崩壊点を測定するという役割されている。そのため、ピクセルセンサーの位置分解能及び Belle II に対応した早い読み出し速度などの性能が必要されている。現在の Belle II の PXD では、DEPFET という技術のピクセルセンサーが搭載されている。

3. 研究内容

Belle II アップグレードによる輝度の向上とともに、崩壊点検出器最内層のバックグラウンドは 113MHz/cm^2 と予想され、この環境下で十分低い占有率かつ良い崩壊点分解能を持つピクセル検出器を開発しなければならない。我々 SOI グループでは、SOI という半導体センサーの技術を用い、Belle II アップグレードに向けてピクセルセンサーの開発を発足した。

Belle II の環境においてどのような性能の検出器が必要であるかについて、Geant4 シミュレーションを用い、ピクセル検出器に必要な性能を研究した。その結果に基づき、SOI 技術を用いた検出器のコンセプトの開発および設計を行っている (図 1)。本発表では、Belle II アップグレードに向けたピクセルバーテックス検出器の開発進捗を報告する。

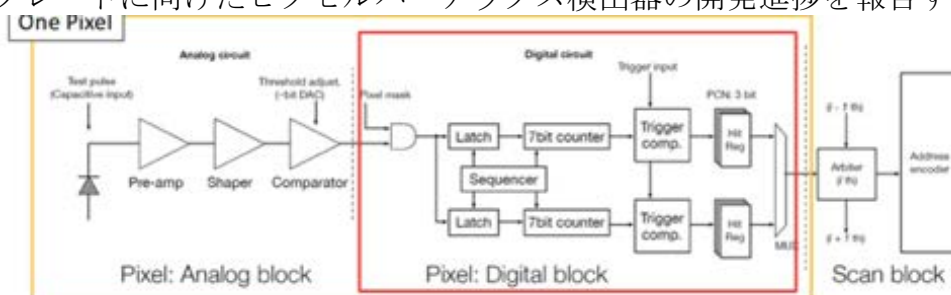


図 1. Belle II アップグレードに向けた SOI ピクセル検出器の回路コンセプト

参考文献

- [1]. 東北大学修士論文. 2019 年. 李韜瀚.
- [2]. Belle II TDR.

海底間音響測距を用いたプレート境界断層の直接観測

○山本龍典^a, 木戸元之^b, 日野亮太^a, 本荘千枝^a, 太田雄策^a, 小平秀一^c, 中村恭之^c

(a: 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, b: 東北大学災害科学国際研究所,

c: 海洋研究開発機構海域地震火山部門)

内部変形や間欠的な変動のあるプレート境界の挙動を明らかにするには、その場での直接計測が必要である。プレート境界では巨大地震が頻発しているが、ほとんどは GNSS や InSAR 等の宇宙測位技術が適用できない海底に存在するため、近傍での観測には海底測地観測が必要となってくる。本研究では、海底測地観測の中でも、断層等の局所的な運動を直接捉えることができる海底間音響測距 (DPR) を用いて、プレート境界の挙動を明らかにした。DPR は、海底に設置した機器同士の間で音波の送受信を定期的に行い、その走時データと海中音速から基線長を算出することで、基線上の局所的変動を検出する手法である。本研究では、トルコ共和国北部の北アナトリア断層と、東北沖の日本海溝で実施した。

トルコ北部を横断する北アナトリア断層 (NAF) は、アナトリアプレートとユーラシアプレートの境界で、歴史的に M7~8 クラスの地震が頻発している。イスタンブールの南では、NAF はマルマラ海の下に位置しており、そのすべりの様子は不明である。この地域では、過去 100 年又は 250 年、M7 以上の地震は発生しておらず、約 25 mm/yr のブロック相対運動速度のうち、どの程度のすべりが欠損しているかは次の地震の規模を予測する上で不可欠な情報である。本研究では、マルマラ海の西部で DPR 観測を 2.5 年に渡り実施し、北アナトリア断層のすべり速度を調べたところ、 10.7 ± 4.7 mm/yr の右横ずれすべりが求められた^[1]。これは、ブロック相対運動速度の半分程度の値である。

東北沖の太平洋プレートと北米プレートの収束境界である日本海溝では、2011 年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）後、余効変動が発生していることが複数の測地学的研究から明らかになっている。本研究では、宮城県沖と福島県沖で海溝を跨いだ観測を実施し、プレート境界浅部余効すべりの実測を目指した。宮城県沖では、2013-2016 年に短縮速度が 0.02 ± 0.17 cm/yr と有意な短縮は見られなかった。DPR 観測の近傍のプレート境界掘削調査や反射法地震探査では、地震時すべりが海溝軸まで抜けていたとしている。これらのことから、宮城県沖のプレート境界浅部では、地震時に一気にすべり、地震後はすべりが生じていないと推測される。

一方福島県沖では、2017-2018 年の 1 年間観測を行った。DPR 観測の 1 基線からは 3.8 ± 0.8 cm/yr の短縮速度が求められた。加えて、福島県沖では、DPR を応用した新しい観測手法の開発と実証も行った。DPR は、局所的変形を精密かつ連続的に捉えることに長けているが、音響信号が地形等により阻まれやすいという欠点がある。そこで、DPR 観測の中央付近に海中に浮かべた音響中継機を介する間接音響測距 (IPR) という手法を新たに採用した。この手法を用いて、福島県沖の DPR と同じ地点で観測を実施し、 3.7 ± 1.1 cm/yr の短縮速度が得られ、DPR 観測と遜色ない精度での観測が可能であるということが示された。福島県沖では、やや陸よりの海底測地観測点で収束速度以上の海向きのレートが得られており、この間での弾性変形では説明ができないことから、分岐断層ですべりを担っていると見られる。

参考文献

- [1] Yamamoto, R., *et al.* (2019): Seafloor geodesy revealed partial creep of the North Anatolian Fault submerged in the Sea of Marmara, *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 1268–1275, doi:10.1029/2018GL080984

ヒメツリガネゴケのTAWAWAI遺伝子に着目した、 植物幹細胞制御機構の進化発生学的研究

○秦有輝^a・檜本悟史^a・日渡祐二^b・経塚淳子^a

東北大学大学院生命科学研究科^a

宮城大学食産業学群^b

多能性幹細胞は、様々な細胞種を生み出す能力をもち、植物と動物いずれの発生においても重要な役割を果たす。植物においては、発生が進むにつれて幹細胞が多能性を失う動物の場合と異なり、茎や根の先端に生涯にわたって多能性幹細胞が維持され、葉などの新しい器官を作り続ける。したがって、多能性幹細胞の長期的な維持は、植物に特徴的な発生戦略であり、根を張った場所から動くことのできない植物が、多くの枝を広げて盛んに成長するための基盤となるメカニズムである。このため、植物の幹細胞維持メカニズムが盛んに研究され、多くの制御因子が同定されてきた。

幹細胞は分裂した後に一方を特定の細胞種に分化させ、もう一方を幹細胞のままにとどめておくという、異なる（非対称な）細胞運命を誘導するメカニズムを通じて維持される。被子植物のメリステムは多数の幹細胞が層状に配置され、複雑な構造をしているため、どのようにして非対称な細胞運命を確立しているのかはまだよくわかっていない。

そこで本研究では、コケ植物のメリステムに注目した。コケ植物のメリステムは被子植物とは異なり、頂端幹細胞と呼ばれる単一の多能性幹細胞をもつ（Fig. 1）。頂端幹細胞から派生した細胞（メロファイト）は直ちに葉や茎を作る組織へと分化を開始する。したがって、頂端幹細胞では毎回の細胞分裂において、非対称な細胞運命が確立される過程を詳細に観察することができる。

我々の研究グループでは、これまでに被子植物とコケ植物の両方で幹細胞制御に関わる転写因子TAW1 (TAWAWAI)を見出した[1][2]。頂端幹細胞の維持メカニズムに迫るため、TAW1に注目し、頂端幹細胞の解析に適したモデル植物としてヒメツリガネゴケを用いTAW1の機能を解析した。

ヒメツリガネゴケのメリステムにおいて、TAW1の発現場所を調べると、頂端幹細胞では発現しておらず、頂端幹細胞から派生したメロファイトで発現し始めることがわかった。次にTAW1の機能を阻害すると、メロファイトが正常に葉や茎を形成できず、代わりに高頻度で異所的な幹細胞を形成するとともに、頂端幹細胞が分裂を停止した。以上のことから、TAW1はメロファイトで発現し、分化や細胞運命の決定を促進する一方で、TAW1が発現していない頂端幹細胞に対しても何らかの細胞間シグナルを介して作用し、頂端幹細胞の維持に機能していると考えられる。

今後はTAW1の下流因子の同定や、頂端幹細胞あるいはメロファイトで機能する他の遺伝子群の同定などを通じ、植物幹細胞の非対称分裂の基本原則の理解につながるとともに、幹細胞の人為的な調節を通じた農作物の改良などにも貢献するものと期待される。

参考文献

[1] Yoshida et al. 2009 *PNAS* [2] Naramoto et al. 2019 *PLOS biology*

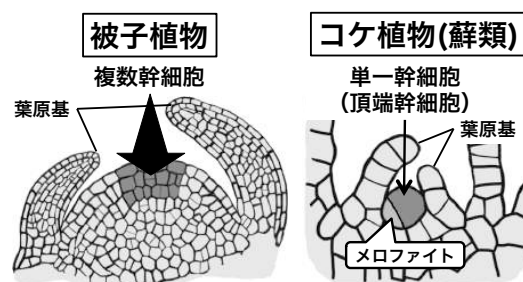


Fig. 1 被子植物とコケ植物のメリステムの構造

SCRIT 電子スペクトロメーターの3次元磁場測定

和宇慶ひかり¹

¹ 東北大学 電子光理学研究センター

原子核には天然に存在する「安定核」、それぞれ特有の寿命で崩壊する「不安定核」がある。不安定核は理論的に存在が予想されるものも含めて全核種の約97%を占めており、その形状や構造は安定核の常識では説明がつかないものが多く存在することが明らかになってきている。これまで、原子核の内部構造の基礎は主に安定核標的を用いた電子弾性散乱実験によって築かれてきたが、短寿命不安定核標的ではまだ実現されていない。不安定核の内部構造の解明は、原子核の内部構造を統一的に理解する原子核モデルの確立に必須であり、原子核分野の最重要研究課題の一つである。さらにこのような不安定核特有の性質は、超新星爆発や中性子星合体での重元素合成過程に大きく影響すると考えられているため、天体核物理分野においても、不安定核の内部構造研究は非常に重要なものである。原子核構造の研究にとって最重要物理量である電荷密度分布は、陽子の波動関数の重ね合わせで表される。電子散乱はその電荷密度分布を精密に測定できる唯一の手法である。しかし、通常、電子散乱実験は多数の標的数(粒子数 $\sim 10^{20}$ 個)が必要なため、生成困難でかつ直ちに崩壊してしまう短寿命不安定核標的を用いた電子散乱実験は、いまだ実現されていない。

世界初の電子散乱による不安定核の電荷密度分布を決定するために SCRIT (Self-Confining Radioactive-ion Isotope Target) 法 [1] が開発され、これまでに安定核標的 ^{132}Xe 標的を用いた検証実験によって、ごく少数の標的(粒子数 $\sim 10^8$ 個)での原子核の電荷密度分布の決定可能であることが実証されてきた [2]。

SCRIT 実験に使用する電子スペクトロメーター WiSES (Window-frame Spectrometer for Electron Scattering) は散乱電子の散乱角、運動量を精度よく測定することができ、原子核の電荷密度分布の決定には欠かせない重要な検出器である。弾性散乱実験では弾性散乱と 1 MeV 程度の励起状態を識別する必要がある、WiSES の要求運動量分解能は $\Delta p/p \sim 10^{-3}$ である。はしかし、現状では WiSES はその要求を満たしていないことが明らかになっている。本研究では WiSES の要求運動量分解を満たしていない原因として、計算磁場が WiSES 内部の磁場分布の実体を正しく反映していない可能性を考え、WiSES 電磁石の3次元磁場測定を行った。

本講演では、SCRIT 電子スペクトロメーターの3次元磁場測定とその結果について報告する。

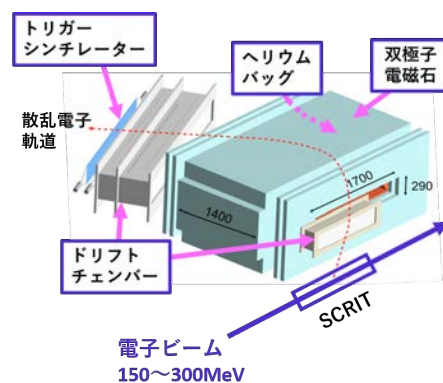


図 1: WiSES 概略図

参考文献

- [1] M. Wakasugi *et al.*, Nucl. Inst. Meth., **317B** (2013) 668-673.
- [2] K. Tsukada *et al.*, Phys. Rev. Lett., **118** (2017) 262501.

三次元多様体の量子不変量と位相的場の理論

森 祥仁

東北大学大学院理学研究科数学専攻

量子不変量とは量子群を使って構成される不変量であり、数理論理学との関連において興味深い対象である。三次元多様体の量子不変量のうち最も興味深いものの一つとして WRT 不変量が挙げられる。WRT 不変量は結び目の最重要な多項式不変量である Jones 多項式の一般化であるという点で注目に値する。WRT 不変量は半単純な不変量で、位相的場の理論へ拡張されている。

位相的場の理論は空間の計量によらない場の理論である。数学的には、「曲面と境界付き多様体からなる圏」から「ベクトル空間と線形写像からなる圏」への関手として定式化されている。位相的場の理論の応用として写像類群の射影表現の構成がある。特に、トーラスの写像類群 $MCG(T^2) \cong SL(2, \mathbb{Z})$ の表現は WRT 不変量を共形場理論と関連づけるという点で重要である。

F. Costantino, N. Geer, B. Patureau-Mirand は WRT 不変量を精密化して、非半単純な不変量を構成した [1]。本稿ではこの不変量を CGP 不変量と呼ぶ。

主結果は次の通りである。

定理 0.1. 上下の境界が連結である様な、コンパクトで向き付け可能な三次元多様体 M を考える。 Λ を添字集合とする。

1. CGP 不変量は上記の条件を満たす M に対して位相的場の理論 Z^λ に拡張される。
2. また、添字に関して直和したもの $Z = \bigoplus_\lambda Z^\lambda$ も位相的場の理論である。

定理 0.2. Z を CGP 不変量による位相的場の理論とする。 Z は半直積 $H^1(T^2; \mathbb{C}/2\mathbb{Z}) \rtimes MCG(T^2)$ の明示的な射影表現を与える。ただし $MCG(T^2)$ はトーラスの写像類群で $MCG(T^2) \cong SL(2, \mathbb{Z})$ が知られている。

定理 0.2 では非負整数 r を決めるごとに表現が一つ定まる。例えば $r = 3$ の場合、生成元 $s, t \in SL(2, \mathbb{Z})$ に対応する行列はそれぞれ

$$\begin{bmatrix} q^{(\alpha-2)(-\beta-2)} & q^{(\alpha-2)(-\beta)} & q^{(\alpha-2)(-\beta+2)} \\ q^{(\alpha)(-\beta-2)} & q^{(\alpha)(-\beta)} & q^{(\alpha)(-\beta+2)} \\ q^{(\alpha+2)(-\beta-2)} & q^{(\alpha+2)(-\beta)} & q^{(\alpha+2)(-\beta+2)} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} q^{-\frac{(\alpha-2)^2-4}{2}} & 0 & 0 \\ 0 & q^{-\frac{(\alpha)^2-4}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & q^{-\frac{(\alpha+2)^2-4}{2}} \end{bmatrix}$$

で与えられる。ただし $\omega \in H^1(T^2; \mathbb{C}/2\mathbb{Z})$ で、 α, β は ω から定まる複素数である。

WRT 不変量による位相的場の理論からは $MCG(T^2) \cong SL(2, \mathbb{Z})$ の射影表現が得られていた。コホモロジー付きの射影表現が得られている点で先行研究の精密化にあたる結果が得られたと言える。

参考文献

- [1] F. Costantino, N. Geer, B. Patureau-Mirand, *Quantum invariants of 3-manifolds via link surgery presentations and non-semi-simple categories*, J. Topol. 7 (2014), no. 4, 1005-1053.

エダアシクラゲ触手における再生メカニズムの細胞生物学的解析

○富士田壮佑、倉永英里奈、中嶋悠一郎

東北大学大学院生命科学研究科 生態発生適応科学専攻 組織形成分野

【背景・目的】

損傷した組織を修復および再生する能力の程度は、生物種によって異なることが知られている。再生能力の高い生物を用いて再生の仕組みを研究することによって、ヒトを含む再生能力の低い動物へ器官レベルの再生を促進するヒントを得ることが期待できる。

ヒドラやクラゲを含む刺胞動物は二胚葉性のシンプルな体の構造や神経系を持ち、触手をはじめとした器官や全身レベルの再生が可能である。中でもクラゲ類は有性生殖するメデューサと無性生殖を行うポリプと

いう2つの成体ステージから成る(図1)。遊泳するメデューサは、固着するポリプに比べて複雑な神経系や筋肉を備えているが、明確な寿命を示すという特徴をもつ。近年、刺胞動物の再生メカニズムが細胞や分子レベルで解明されはじめ、再生における細胞増殖の有無や幹細胞の寄与、そして分子機構が刺胞動物内でも多様化していることが示唆されてきている。しかしながら、これまでの研究はヒドラやイ

ソギンチャクといったポリプ型を中心に展開されてきたこともあり、クラゲ類、とりわけメデューサ個体における再生メカニズムはほとんど明らかでない。そこで本研究では、研究室での系統の維持が容易であるエダアシクラゲ(*Cladonema pacificum*)を再生研究モデルとして確立し、メデューサ個体における触手再生メカニズムの細胞レベルでの理解を目指した。

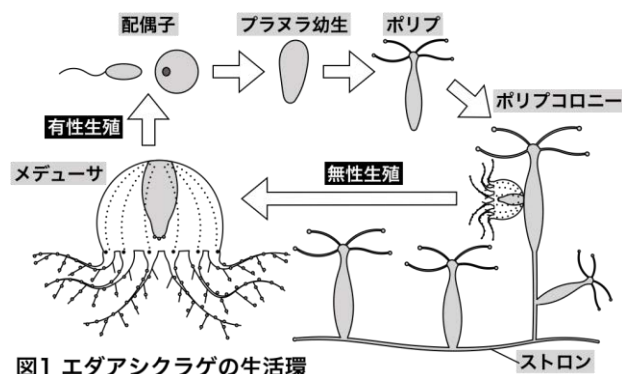


図1 エダアシクラゲの生活環

【結果・考察】

細胞生物学的な実験から、メデューサ個体において増殖細胞は体中に分布し、特に触手のbulb(触手基部の膨らんでいる部位)に局在していることが明らかになった。また、触手の再生において損傷の程度が小さい場合には残存する細胞が増殖し再生する一方で、損傷の程度が大きい場合には隣接する組織からの細胞の移動に関わることが明らかになった。このことから、エダアシクラゲの触手の再生は、損傷の程度によって2つの様式が存在することが示唆された。さらに、損傷の程度に関わらず再生部位の先端に必ず刺胞の塊

（刺胞瘤）が形成されたことから、刺胞細胞の触手再生におけるリーダー的役割を果たしている可能性が考えられる。刺胞動物における刺胞細胞の再生への寄与は未だ報告がなく、刺胞細胞の新しい役割の発見になることが期待される。

これらの結果の一部を以下の論文にて報告した。

発表論文：Fujita S.,Kuranaga E.,Nakajima Y.(2019) PeerJ 7:e7579. doi:10.7717/peerj.7579

微小地震活動を用いた地震発生を促進する物理過程の推定 —2017 年鹿児島湾の地震活動の例—

○松本圭晶・吉田圭佑・松澤暢・長谷川昭
東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

地震の発生要因として、断層上のせん断応力の増加と断層強度の低下などをあげることができる。断層面上の急激なせん断応力の変化の要因としては、地震間の相互作用の他に、ゆっくりとしたすべり現象である、非地震性滑り等の存在が考えられている。断層強度を低下させる要因としては、熱水の動きに伴った間隙水圧の増加等が考えられている。地震の発生機構の理解のためには、地球内部の非地震性すべりの発生や流体の移動などの非地震過程についての情報が非常に重要である。非地震過程は、微小地震活動の発生も促進させるため、微小地震活動の震源位置などの情報は非地震過程の信号を検出するための重要な手掛かりとなり得る。

2017 年 7 月 11 日 11:56 (JST) に、鹿児島湾の深さ約 10 km を震源とする M 5.3 の地震が発生した。本震震源の周辺では、前年の 2016 年 12 月頃を境に地震活動が活発化していたことがわかっている。この地震活動は、火山フロント上に位置する鹿児島湾で発生しており、流体などの非地震過程が関与した可能性が考えられる。本研究では、鹿児島湾南部周辺領域で発生した地震活動について、波形相関を用いた精密な震源再決定を行い、震源分布の時空間変化を詳細に調べた。

高精度な震源分布を得ることを目的に、Double-Difference 震源決定法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を用いて、対象の地震活動の震源位置を精密に再決定した。データには、波形の類似性を利用することにより高精度に推定した、大量な到達時刻差データを使用した。震源再決定により、気象庁一元化カタログの震源では誤差により雲状にばらついてみえていた震源が、複数枚の面上に集中して分布する結果が得られた。この震源の面状分布は、断層構造を反映していることを示唆する。

さらに、前駆的活動の震源は、時間と共に面上を広がるような震源 migration の特徴を明瞭に示した。このことは、前駆的活動の発生に非地震過程が関与した可能性を支持する。余震の震源も複数枚の面状構造に集中しており、その発生場所が時間とともに浅い方から深い方へ移動する傾向がみられた。また、この期間の余震活動には、群発的な地震活動が含まれていることが分かった。更に、余震活動期間には、震源域深部よりも浅部の V_p/V_s が大きい傾向が得られた。これらの結果は、本震発生後に、熱水などの流体が深部から浅部へと移動し地震活動を生じさせたことを示唆する。

上記の結果は、本研究の研究対象である鹿児島湾の地震活動の発生の背後に、流体の移動や非地震性すべりの伝播等の非地震過程が存在し、地震活動様式に大きな影響を与えたことを示唆する。同様の解析を様々な地域・地震活動において行うことにより、地球内部で発生する非地震過程への理解を深めることができると考えられる。

専門用語の説明

震源 migration: 震源が時間とともに移動する性質。地下で発生した、非地震性滑りや流体の移動等のゆっくりとした物理過程を反映していると考えられている。

参考文献

- [1] Waldhauser, F., & Ellsworth, W. L. (2000). A Double-difference Earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), 1353–1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>

三次元トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ 薄膜における

熱電特性の膜厚依存性

永田一将^A, 松下ステファン悠^A, Kim Khuong Huynh^B, 谷垣勝己^{A, B}
 東北大院理^A, 東北大 AIMR^B

3次元トポロジカル絶縁体(3D-TI)は、ディラック電子と呼ばれる状態が形成する特異な表面状態が盛んに研究されている。ディラック電子系とは、物質中での電子が図1(a)に示したような状態で存在しており、図1(b)に示した一般的な半導体とは大きく異なるような状態を持つ物質である。電子の状態は抵抗値等の輸送現象の根源であるため、特殊な電子の状態からは他では見られない輸送特性が現れるため、革新的な新規デバイス等への応用が期待され、近年盛んに研究がされている。この特殊な電子の状態を、熱電変換材料への応用できるという理論予測がなされている[1]。その研究では、3D-TIを超薄膜化(数 nm)する事で、熱電変換における変換効率の指標である性能指数 ZT ($=\sigma S^2 T / \kappa$, σ : 電気伝導度, S : ゼーベック係数, T : 温度, κ : 熱伝導度)が今までの最高値よりも100倍近い値を取り得ると予測している。もしこれが実現されれば、現在主流の火力発電の変換効率を超え得るような非常に大きな値である。しかし、実験的なくつかの問題点から、この理論予測を実験的に考察した結果はまだ存在しない。そのため、本研究では熱電特性の測定に適した3D-TIである $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ を用いて、理論予測の実験的な検証とその起源の解明を目的として、実験と考察を行った。

図2に熱電変換効率の指標である ZT の分子にあたる σS^2 の室温での膜厚依存性を示す。5~14 nmの薄膜では値に大きな変化は見られないが、4 nmの薄膜では4倍程度増大している事がわかる。4 nmという膜厚は、文献[1]で予測された超薄膜の領域と一致する領域である事から、理論の予測通りに超薄膜化により熱電特性が上昇する事が分かった。ポスターでは、4 nmと5~14 nmでの電子の状態の違いを先行研究を交えながら紹介し、それに伴う熱電特性の増大の物理的な起源と現状の問題点を含むその今後の展望について議論する。

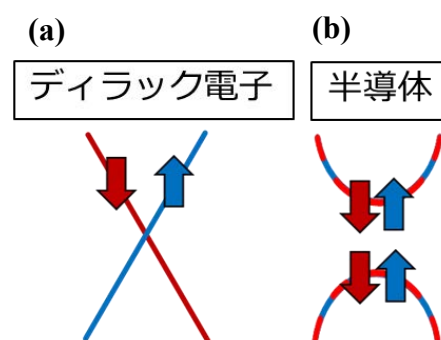


図1 (a) ディラック電子の電子状態
 (b) 一般の半導体の電子状態

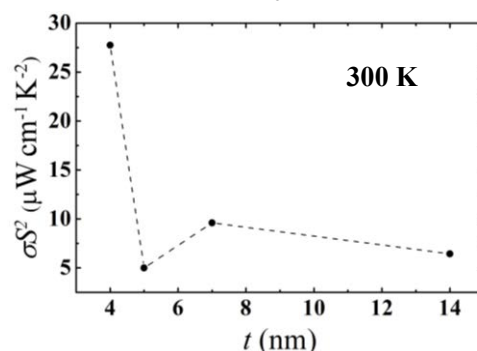


図2 室温での σS^2 の膜厚依存性

[1] H. Osterhage, et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 123117 (2014).

Synthesis and characterization of enantiopure 2-(2-ethylhexyl)dinaphthothienothiophenes

○Kenta Sumitomo ^a, Kohsuke Kawabata ^{a, b}, Kazuo Takimiya ^{a, b}

Department of Chemistry, Graduate School of Science Tohoku University ^a

RIKEN Center for Emergent Matter Science ^b

Organic semiconducting molecules are promising materials for electronics. One of the advantages of organic material is the cost effectiveness in device fabrication through solution-processes.

2-Ethylhexyl group is a chiral branching alkyl group, which has been widely used to increase the solubility of organic semiconducting molecules and enable solution-processes. Usually, the stereochemistry of 2-ethylhexyl substituents in organic semiconducting molecules is not controlled thus resulting in a mixture of stereoisomers. Such mixture may have reduced order of the molecular arrangement and/or structural defects in the solid state compared with pure isomers.

2-(2-ethylhexyl)dinaphthothienothiophene is a high mobility p-type semiconducting molecule with solution processability [1]. In this study, we controlled stereochemistry of 2-ethylhexyl group in 2-(2-ethylhexyl)dinaphthothienothiophene (Fig. 1). We investigated the effect of the stereochemistry on the crystal structure and solid-state properties by X-ray diffraction, atomic force microscope, and differential scanning calorimetry, and also fabricated field-effect transistors.

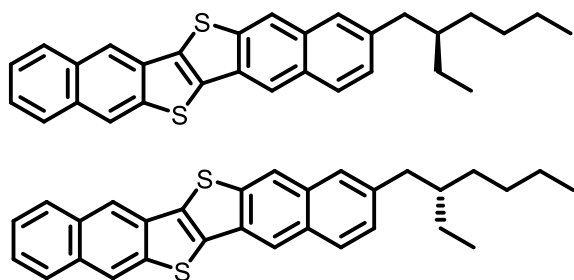


Fig. 1. 2-(2-Ethylhexyl)dinaphthothienothiophene

References

[1] M. Sawamoto, M.-J. Kang, E. Miyazaki, H. Sugino, I. Osaka, K. Takimiya, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, 8, 6, 3810-3824.

Technical Terms

chiral: if something is chiral, it is not superimposable on its mirror image.

if a molecule is chiral, there are stereochemically different isomers

女川層にみられるドロマイトの起源と成因に関する研究

○石垣暁正^a・高柳栄子^a・若木重行^b・山本鋼志^c・千代延俊^d・井龍康文^a

東北大学大学院理学研究科地学専攻^a

国立研究開発法人海洋研究開発機構^b

名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻^c

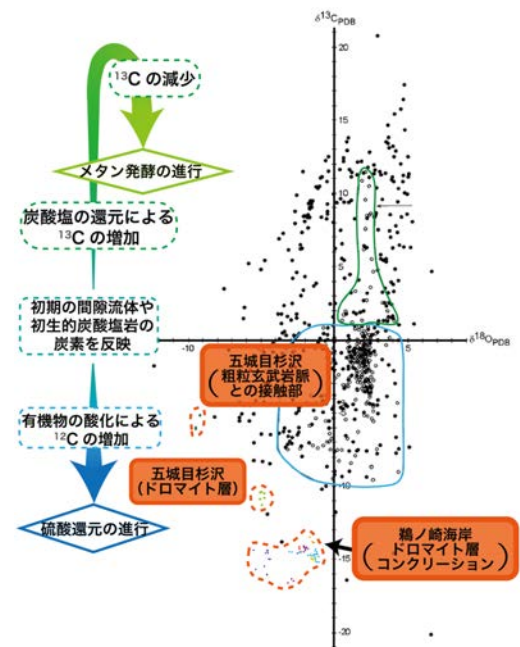
秋田大学大学院国際資源学研究科資源地球科学専攻^d

秋田地域の中新統女川層から産するドロマイト $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ の起源と成因を明らかにすることを目的として、岩石学的・鉱物学的・地球化学的検討を行った。ドロマイトは三方晶系の炭酸塩鉱物で、大部分は石灰岩が堆積後に変質して（ドロマイト化作用を被って）形成されたものであるが、海水から直接晶出したものや、有機物の分解に伴って形成されるものなど、その成因は多様である。

女川層は、中期中新世から後期中新世（1300～600 万年前）の海成層で、秋田平野から男鹿半島にかけて広く分布する。同層は、主にハードシェールと呼ばれる硬質頁岩から構成され、有機炭素を多く含む。女川層は秋田油ガス田の貯留岩となっており、近年、タイトオイル開発技術の適用対象として注目されている。このように、長く研究と産業の対象とされてきた女川層であるが、同層に含まれるドロマイトをはじめとする炭酸塩鉱物の起源と成因は詳しく検討されてこなかった。

そこで、男鹿半島南岸の鵜ノ崎海岸および五城目杉沢地域から、産状の異なるドロマイト試料を採取し（前者はドロマイト層・コンクリーションから、後者は粗粒玄武岩脈との接触部から採取）、地球化学的検討を行った。

ドロマイト層・コンクリーション中では、ドロマイト結晶は密に組み合わさっており、結晶間隙にはフランボイドパイライトが認められる。また、炭素同位体比は著しく低い（約-15‰）。これに対し、粗粒玄武岩脈との接触部のドロマイトでは、自形の結晶が散在する。また、相対的に低い酸素同位体比、低い Sr 同位体比、高い Mn・Fe 含有量を示した。これらの結果から、ドロマイト層・コンクリーションのドロマイトは、堆積時またはその直後に、硫酸還元帯において形成されたと結論される。一方、粗粒玄武岩脈との接触部のドロマイトは、岩脈貫入時の接触変成作用により形成、もしくは熱水から晶出した可能性が高い。



図：ドロマイトの炭素酸素同位体組成

Efficient Second Harmonic Generation from Double Resonant Au Metasurfaces

Y.B. Habibullah and T. Ishihara

Department of Chemistry, Tohoku University

Department of Physics, Graduate School of science, Tohoku University

It has been demonstrated that Second Harmonic Generation from plasmonic metasurfaces can be estimated by evaluating an overlapping integral of fundamental and SHG fields on the structure [1-4]. Dependence on structure parameters shows that information on linear response is not enough to predict nonlinear response. Survey for the best design for efficient nonlinear response is required. According to the nonlinear scattering theory (NST), amplitude of SHG is estimated using the following integral:

$$E_{ijj}^{\text{SHG}} \propto \int E_{n,i}^{2\omega}(\mathbf{r}) \chi_{\text{nnn}}^{(2)} E_{n,j}^{\omega}(\mathbf{r}) E_{n,j}^{\omega}(\mathbf{r}) dS \quad i, j = x, y$$

where E_{ijj}^{SHG} is the SHG field amplitude with polarization i for excitation with polarization j .

$\chi_{\text{nnn}}^{(2)}$ is the all normal component of local nonlinear susceptibility at the surface, and $E_{j,n}^{\omega}(\mathbf{r})$ is the field at the surface excited by fundamental wave with polarization j , and $E_{i,n}^{2\omega}(\mathbf{r})$ is the field at the surface hypothetically excited by a second harmonic wave propagating from detector position, which gives a projection of nonlinear polarization to the SHG far field. The subscript n means that the electric fields in the integrand are normal components to the surface of the nanostructure. We consider only transmitted SHG from Au metasurfaces for normal incidence excitation in this work. The implementation of NST was carried out using commercial software COMSOL multi-physics. Simulation results shows that metasurfaces may satisfy double resonance, meaning that fundamental and SH frequency can fall into resonance simultaneously, showing enhancement at the expected frequency only for some selected metasurfaces. The reason for selectivity is attributed to mode matching/mismatching of the field enhancement at the double resonance. This shows double resonant metasurfaces is a necessity but not enough to guarantee efficient SHG. Careful design that maximizes mode overlap is required to guarantee efficient generation of SHG in the far field.

References

1. K. O'Brien et al. Nat. Mater. 14, 379–383 (2015).
2. J. Butet and O. J. F. Martin, J. Opt. Soc. Am. B. 33, A8 (2016).
3. Y. B. Habibullah, K. Iwata and T. Ishihara, Optical Society B 36, 1166-1175 (2019).
4. Y. B. Habibullah, K Iwata and T. Ishihara, Journal of Physics: Conference Series 1220 (1), 012059 (2019).

Effect of interface electric field on ionic species segregation during the growth of LiNbO₃

○Qilin Shi, Chihiro Koyama^a, Jun Nozawa, Satoshi Uda

Department of Chemistry, Tohoku University

JAXA^a

LiNbO₃ (LN) crystals have attracted much attention as they can be applied to various devices such as nonlinear optical devices, which is owing to their excellent optical properties. To obtain a high quality crystal with uniform composition, we try to dope a certain amount of MgO to the LN with 50mol% Nb₂O₅ (Li₂O:Nb₂O₅:MgO=45.3:50.0:4.7mol%) which enables it to be stoichiometric and congruent simultaneously (denoted as cs-MgO:LN). It is expected that no segregation of any ionic species takes place during growth of the cs-MgO:LN. Since the equilibrium partitioning coefficient, k_0 , is unity for all constituent species, we regards the cs-MgO:LN as the true congruent material.

However, the segregation of ionic species is observed during the growth of the cs-MgO:LN crystal by micro-pulling down (μ -PD) technique (Fig. 1). Because the high temperature gradient near the solid-liquid interface induces an interface electric field (Seebeck effect) and Mg²⁺ is driven away from interface. This demonstrates that the interface electric field, E , has a significant effect on transport and partitioning of ionic solutes, which converts the k_0 into the field-modified equilibrium partitioning coefficient, k_{E0} .

This work investigates the partitioning of ionic species between two types of congruent LNs under various electric field conditions. An external current has been injected into the solid-liquid interface to control the intrinsic electric field that consists of Seebeck-driven electric field and crystallization electromotive force (c-EMF) induced by the segregation of ionic species. For the true congruent cs-MgO:LN in Fig. 2(a), it is found that a unique value of current (-0.1mA , $\Delta\phi_{EMF}=0$) exists where the intrinsic electric field is totally compensated. Since the interface electric field becomes zero, k_{E0} recovers to $k_0(=1)$ in this situation. In contrast, for the conventional congruent c-ZnO:LN in Fig. 2(b), even if c-EMF becomes zero, the solute segregation still occurs, which is suggested by non-unity k_{E0} value. This demonstrates that k_0 s for each ionic species in conventional LNs are not unity and the zero-EMF means the net positive charge happens to equal the net negative charge. It has thus been confirmed that only true congruent material, such as cs-MgO:LN, has the k_0 of unity for all constituent species under no electric field.

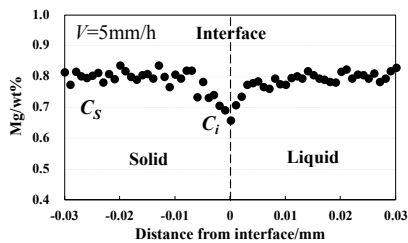


Fig. 1 Mg distribution of in the solid and liquid near the interface.

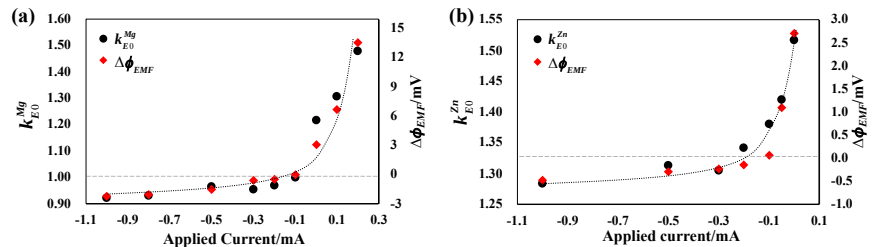


Fig. 2 Variation of k_{E0} and c-EMF as a function of applied current for (a) cs-MgO:LN and (b) c-ZnO:LN at the growth rate of 5mm/h.

Technical Terms

k_{E0} has two expressions. One is $k_0 V / (V - V^*)$ where V is the growth rate, V^* is the E -driven velocity. The other is C_s / C_i where C_s is the solute concentration in the solid and C_i is the concentration near the interface.

$\mathbb{P}^1(\mathbb{C}) \setminus \{4 \text{ 点}\}$ のあるアーベル被覆の周期と regulator について

○常盤裕太¹

¹ 東北大学大学院理学研究科数学専攻

筆者の考察対象は, Fermat 曲線 $F_N : x^N + y^N = 1$ の類似である,

$$C_N : \begin{cases} x^N + y^N = \lambda_1 \\ x^N + z^N = \lambda_2 \end{cases}, \quad (\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{C}, \lambda_1 \neq \lambda_2)$$

と定義される代数曲線である. 筆者は, C_N に関する周期格子と, C_N から定まるスーパー楕円曲線 $E_N : Y^N = f(X) := X^3 + X^2 - X$ の regulator を計算した. Fermat 曲線の周期格子や regulator は, ベータ関数の特殊値で表される [1, 2] 一方, C_N の周期格子の一部と E_N の regulator は, Gauss の超幾何関数の特殊値を用いて表すことができた.

定理 1 (常盤). $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{C}$ と $\xi \in \mathbb{C} \setminus \{0, 1\}$ に対して,

$$I_{\alpha, \beta, \gamma}(\xi) := \int_0^1 u^{\alpha-1} (1-u)^{\beta-1} (1-\xi u)^{\gamma-1} du$$

とおくとき, $\lambda_2 = \zeta_6 \lambda_1$ かつ $-2\pi/3 < \text{Arg}(\lambda_1) \leq \pi/3$ を満たす代数曲線 C_N の周期格子は, 各 $0 \leq i, j, k \leq N-1$ に対して定まる次の $3N^3$ 個のベクトル

$$(\dots, \zeta^{ri+sj+tk} (1-\zeta^r)(1-\zeta^s) \frac{1}{N} \lambda_1^{\frac{r+s}{N}-1} \lambda_2^{\frac{t}{N}-1} I_{\frac{r}{N}, \frac{s}{N}, \frac{t}{N}} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right), \dots),$$

$$(\dots, \zeta^{ri+sj+tk} (1-\zeta^r)(1-\zeta^t) \frac{1}{N} \lambda_1^{\frac{s}{N}-1} \lambda_2^{\frac{r+t}{N}-1} I_{\frac{r}{N}, \frac{t}{N}, \frac{s}{N}} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right), \dots),$$

$$(\dots, \zeta^{ri+sj+tk} (1-\zeta^s)(1-\zeta^t) \frac{1}{N} \lambda_1^{\frac{r}{N}-1} (\lambda_1 - \lambda_2)^{\frac{s}{N}-1} (\lambda_2 - \lambda_1)^{\frac{t}{N}} I_{\frac{s}{N}, \frac{t}{N}, \frac{r}{N}} \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right), \dots)$$

によって生成される. 特に, $s+t > N$ ならば, $I_{\frac{r}{N}, \frac{s}{N}, \frac{t}{N}}(\lambda_1/\lambda_2)$ と $I_{\frac{r}{N}, \frac{t}{N}, \frac{s}{N}}(\lambda_2/\lambda_1)$ が, また $r+t > N$ ならば, $I_{\frac{s}{N}, \frac{t}{N}, \frac{r}{N}}(1 - \lambda_2/\lambda_1)$ が Gauss の超幾何関数の特殊値で表される.

スーパー楕円曲線 E_N の K 群の元 $\{1-Y, X\}^2$ と $\gamma(t) := (t, \sqrt[N]{f(t)})$ ($t \in [0, 1]$) を用いて定義される $\delta := \gamma - \bar{\gamma}$ ($\bar{\gamma}$ は γ の複素共役) に関する regulator を計算すると次が得られた.

定理 2 (常盤). スーパー楕円曲線 E_N の K 群の元 $\{1-Y, X\}^2$ の regulator は

$$\text{reg}_{E_N}(\{1-Y, X\}^2)(\delta) = -\frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \lambda_2^{\frac{k}{N}} \sin \frac{\pi k}{N} B\left(\frac{k}{N}, \frac{k}{N} + 1\right) {}_2F_1\left(-\frac{k}{N}, \frac{k}{N}; \frac{2k}{N} + 1; \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)$$

となる. また, $\text{reg}_{E_N}(\{1-Y, X\}^2)(\delta) \neq 0$ である.

参考文献

- [1] D. Rohrlich, *The periods of the Fermat curve, Appendix to B. Gross*, Invent. Math. **45** (1978), 193–211.
- [2] R. Ross, *K₂ of Fermat curves and values of L-functions.*, C. R. Acad. Sci. Paris Sér. I Math. **312** (1991), 1–5.

ヒト細胞小胞体関連機能の低下を鋭敏に検出するレポーターの開発と応用

八巻 聡¹、河野憲二²、稲葉謙次¹、門倉 広¹

1：東北大学大学院生命科学研究科分子化学生物学専攻

2：奈良先端科学技術大学院大学研究推進機構（奈良先端大・研究推進機構）

ジスルフィド結合形成は多くの分泌タンパク質にとって立体構造形成上、重要な反応ステップである。大腸菌ではジスルフィド結合形成能力の低下や分泌タンパク質をペリプラズムに輸送する活性の低下に伴い β -ガラクトシダーゼを発現する極めて鋭敏なレポーターが開発・利用されている(1)。我々はヒト細胞小胞体で機能する同様の系を開発するために、蛍ルシフェラーゼに多数のシステインを導入し、更に KDEL 配列を付加したもの(FLuc*)に Calreticulin 由来のシグナル配列を連結した、融合タンパク質 (Cal-FLuc*) を作成した。本タンパク質を発現する HeLa 細胞では、1)小胞体内で FLuc*内にジスルフィド結合が形成され、その活性が著しく減少すること、2) DTT 存在下で培養すると、FLuc*活性が顕著に上昇すること、3) ジスルフィド結合を導入する酵素である PDI と、これを再酸化する Ero1 α をノックダウンすると FLuc*活性が上昇したことから、本タンパク質は小胞体内のジスルフィド結合形成能力の低下を検出するレポーターとして機能し得ることが判明した(図 1)。

さらに、本レポーターの特質を理解するため、分泌タンパク質の小胞体への輸送に必要な Sec61 α あるいは SRP54 をノックダウンし、その影響を調べたところ、どちらの場合においても FLuc*活性の上昇が認められた(図 1)。また、ヒト免疫不全ウイルスの増殖阻害剤 CADA は、CD4 のシグナル配列に結合し、CD4 の小胞体への局在化を阻害する作用を持つが(2)、このような薬剤の探索に FLuc*が

利用できるかを検証するため、CD4 のシグナル配列の下流に FLuc*を連結し HeLa 細胞で発現させたところ、培地中への CADA の投与に応答して FLuc*の活性が上昇した。よって、FLuc*融合タンパク質はジスルフィド結合形成能力の低下だけでなく、小胞体への局在化活性の低下に対する鋭敏なレポーターとしても機能し、シグナル配列特異的な小胞体局在化阻害剤の探索に利用し得ることが示唆された。

本研究によって、本レポーターシステムは、ジスルフィド結合形成阻害、及び小胞体への局在阻害に対して鋭敏なレポーターであることが分かった。また、疾病の原因となる細胞表面タンパク質のシグナル配列に結合し、その生合成を抑制する化合物は、有用な治療薬となる可能性があるが、そのような薬剤の探索に本レポーターシステムが使用できることを示唆する知見を得た。

・参考文献

1) Kadokura et al. Science 303: 534-7 (2004); 2) Vermeire et al. PLoS Biol e1002011 (2014)

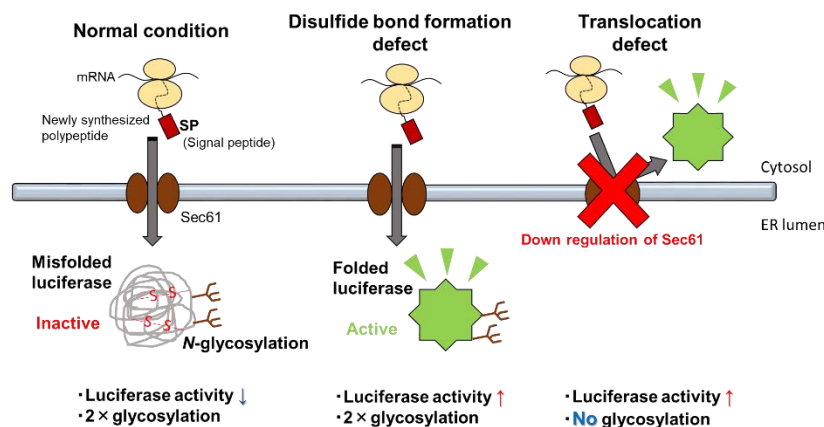


図1 レポーターの特質

ALMA で探る原始銀河団の環境効果

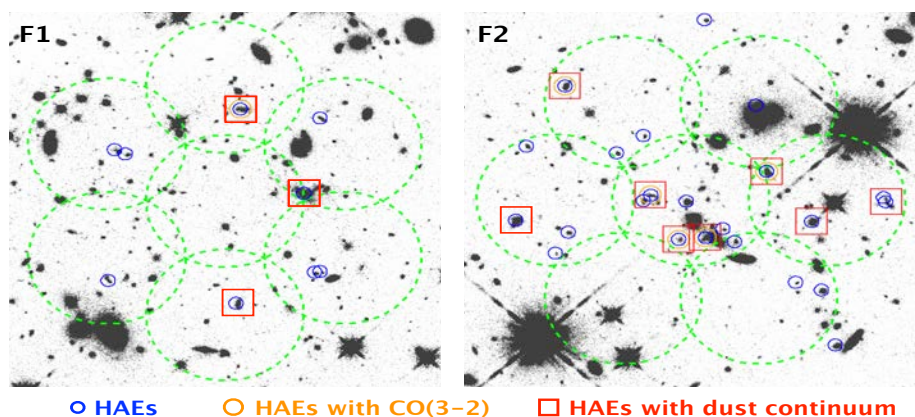
青山 皓平

児玉 忠恭(東北大) 鈴木智子(東北大)

東北大学大学院理学研究科天文学専攻

周囲の環境の違いが銀河の進化にどう影響するかを調べることは、銀河進化を考える上で非常に重要である。例えば近傍宇宙においては、密度の高い領域では古い楕円銀河が、密度の低い領域では若い渦巻き銀河が支配的であるということがよく知られている。このような銀河の棲み分けがいつどのようにして生じたのかを明らかにするためには、まさに銀河形成が盛んに行われていた時代($z \sim 2$)に遡ってその時代の異なる環境に属する銀河を調べる必要がある。この時代の銀河を調べるためには、可視近赤外線観測に加えて、ダストに包まれた星形成銀河を捉える sub-mm の観測が不可欠である。

そこで、我々は $z=2.5$ の原始銀河団 USS1558 に対して ALMA Band-6 による深いダスト連続光の観測を行った。この領域は ALMA Band-3 で CO(3-2) 輝線を狙った観測が行われているのに加えて、可視から中間赤外線までの多波長の撮像データがある。CASA と呼ばれるソフトウェアを用いた解析の結果、先行研究で CO(3-2) が検出されているメンバー銀河に加えて、より低質量のメンバー銀河からダスト連続光を検出した。本研究で検出した 11 個のメンバー銀河に対して、ガス質量の割合や星形成効率といった物理量が環境にどう依存しているのかについて、フィールド領域と比較し、調べたのでその結果を報告する



図：原始銀河団内の二つの領域（F1, F2）での検出された星形成銀河（HAEs）の分布

参考文献

- [1] Scoville, N et al. 2016, ApJ, 820, 83
- [2] Tadaki, K et al. 2019, PASJ, 71, 40

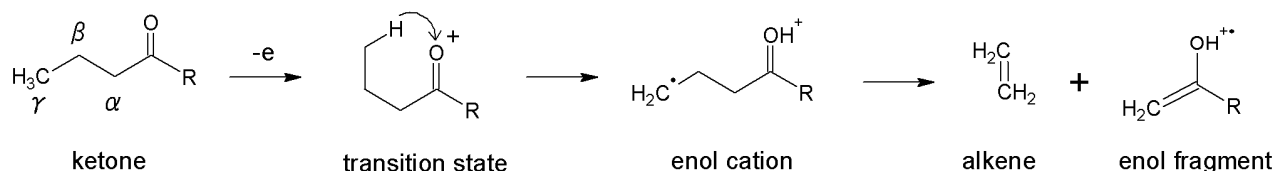
赤外分光によるペンタノンイオンにおける マクラファティ転位の観測

○安本凌・松田欣之・藤井朱鳥

東北大学大学院理学研究科化学専攻

マクラファティ転位は、 γ 位の炭素原子(C_γ)が水素原子と結合しているケトンなどのカルボニル化合物のイオン化過程において、特異的に観測される解離反応である。スキーム 1 に示すように、この反応ではケトン分子のイオン化後、6 員環構造の遷移状態を経て水素原子がカルボニル基に転位することにより、エノール正イオンへの異性化が起きる。更に、これからアルケンが解離し、エノール解離生成物が観測される[1]。これまでマクラファティ転位について、数多くの質量分析的研究が行われてきたが、エノール正イオンの観測を含め、分光学的手法を用いた研究はほとんど行われていない。

本研究では、 $C_\gamma H$ 結合を持つ最も単純なケトンである 2-ペンタノン(スキーム 1 において、 $R=CH_3$)を対象として、赤外分光研究(分子振動の観測)を行った。



Scheme 1

図 1(a)は、超音速ジェット中の中性の 2-ペンタノンの赤外スペクトルである。中性のスペクトルには、CH 伸縮振動のみが観測される。図 1(b)に、光イオン化された 2-ペンタノンの赤外スペクトルを示す。CH 伸縮振動に加え、新たに OH 伸縮振動が観測された。この結果は、2-ペンタノンの光イオン化において、アルキル基の水素原子がカルボニル酸素に移動したことを示す。このように 2-ペンタノンの光イオン化において、マクラファティ転位におけるエノール正イオンの分光学的観測に成功した。

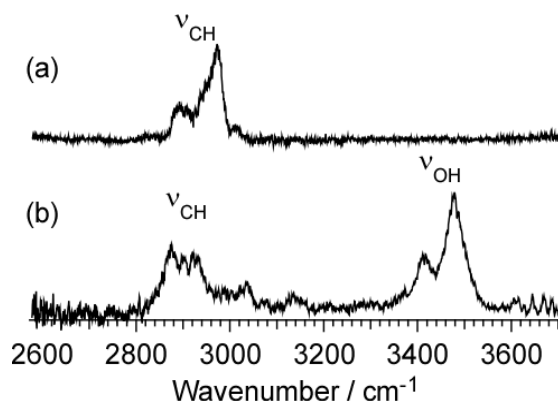


図 1: (a)中性、(b)正イオン状態のペンタノンの赤外スペクトル

この異性化反応経路について、理論的な反応経路探索の計算も行っている。これらの結果を合わせて、2-ペンタノンのイオン化誘起異性化反応について議論する。

参考文献 [1] McLafferty, *Anal. Chem.* 1959, **31**, 1, 82-87

格子 QCD による陽子・中性子の構造の研究

○塚本夏基¹・青木保通²・石川健一³・藏増嘉伸⁴・新谷栄悟²・佐々木勝一¹・山崎剛⁵¹ 東北大学大学院理学研究科物理学専攻² 理化学研究所計算科学研究センター³ 広島大学大学院理学研究科物理学専攻⁴ 筑波大学計算科学研究センター⁵ 筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻

ラザフォードが陽子を発見した 100 年前から今日まで、陽子の構造に関する研究は絶え間なく続いている。半世紀以上前には陽子の構成要素であるクォークが提唱され、陽子の内部構造についてはクォークの理論よりすべて演繹されるかのように見えたが、クォークの理論はその特異な性質により我々に核子の静的な性質についての解析的な計算を許さない。この問題においての処方箋は数値シミュレーション、とくに格子 (Lattice) 化された時空間でクォークの力学 (QCD) を扱う Lattice QCD と呼ばれるものである。この計算にはモンテカルロ法を使うために理論計算であるのに統計的な誤差が存在するという特徴がある。シミュレーションにおいてはモデル化した際の本来の理論のズレが付きものであり、大抵の場合、その系統的な誤差と統計的な誤差はトレードオフの関係にある。そのため現実的なセットアップでのシミュレーションはこれまで困難であり、そのためか、陽子の半径などの量は過小評価される傾向にあった。しかし、ごく最近になって現実的なセットアップでのシミュレーションが可能になり、その中で PACS Collaboration [1, 2] の結果は高い精度で陽子の構造に関する量を再現することに成功した。本研究においてはこの研究から一歩進めてまだ実験では測ることのできない量についての研究を行う。専門的な言葉を使うとスカラー型、テンソル型の結合定数と呼ばれるものであるが、これらは電荷の用に陽子の特徴づける重要でありながら、これまで実験的にはほとんど知られることのなかった量である。

A 専門用語の説明

- 陽子: 中性子とともに原子核を構成する粒子。+e の電荷をもつ。

参考文献

- [1] K. I. Ishikawa *et al.*, Phys. Rev. D **98**, 074510 (2018), [1807.03974].
- [2] E. Shintani, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki and T. Yamazaki, Phys. Rev. D **99**, 014510 (2019), [1811.07292].

有界平均振動関数の空間における Navier–Stokes 方程式の弱解の正則性

青木 基記

東北大学大学院理学研究科数学専攻 修士 2 年

本発表では非圧縮性粘性流体の運動を記述する Navier–Stokes 方程式の弱解の正則性について考察する. 空間次元 d を 3 あるいは 4 とする. 方程式は次の形で表される:

$$\begin{cases} \partial_t u - \Delta u + (u \cdot \nabla)u + \nabla p = 0, & t > 0, x \in \mathbb{R}^d, \\ \operatorname{div} u = 0, & t > 0, x \in \mathbb{R}^d, \\ u|_{t=0} = u_0(x), & x \in \mathbb{R}^d. \end{cases}$$

ここで u, p はそれぞれ流体の速度場と圧力を表す未知関数とし, u_0 は与えられた初期速度場とする. 方程式の初期値問題を考察する上で, 次の関数空間と弱解を定義する.

$$L_\sigma^2 := \left\{ u : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R} \mid \|u\|_{L^2} := \left(\int_{\mathbb{R}^d} |u(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} < \infty, \operatorname{div} u = 0 \right\},$$

$$H_\sigma^1 := \{ u : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R} \mid u, \nabla u \in L^2, \operatorname{div} u = 0 \}.$$

定義. $T > 0, u_0 \in L_\sigma^2$ とする. u が以下の条件を満たす時, 時刻 $(0, T)$ 上の Navier–Stokes 方程式の弱解であるという:

1. u がエネルギークラス $C_w([0, T]; L_\sigma^2) \cap L^2(0, T'; H_\sigma^1)$ ($T' < T$) に属する.
2. 任意の $0 \leq t < T$ と $\phi \in H^1(0, t; H_\sigma^1)$ に対して, 次が成立する:

$$\int_0^t \{ \langle -u, \partial_t \phi \rangle + \langle \nabla u, \nabla \phi \rangle + \langle (u \cdot \nabla)u, \phi \rangle \} d\tau = -\langle u(t), \phi(t) \rangle + \langle u_0, \phi(0) \rangle.$$

Leray [2], Hopf [1] によってエネルギー不等式

$$\|u(t)\|_2^2 + 2 \int_0^t \|\nabla u\|_2^2 d\tau \leq \|u_0\|_2^2$$

を満たす弱解の存在が知られている. しかし弱解のエネルギークラスにおける一意正則性は未解決問題である. 次の結果を証明した.

定理. $0 < T < \infty, u_0 \in L_\sigma^2$ とする. $(0, T)$ 上の Navier–Stokes 方程式の弱解 u が

$$\sup_{0 < t \leq T} t^{\frac{1}{2}} \|u\|_{BMO} < \infty$$

を満たす時,

$$\sup_{0 < t \leq T} t^{\frac{1}{2}} \|\nabla u\| < \infty$$

が成り立ち, u は滑らかな解になる.

参考文献

- [1] E. Hopf, Math. Nachr. **4** (1951), 213–231.
- [2] J. Leray, Acta Math. **63** (1934), no. 1, 193–248.

Evolution of atmospheric composition on early Mars

○Ryosuke Yagi¹, Naoki Terada¹, Shungo Koyama¹, Takeshi Kuroda¹, Hiromu Nakagawa¹, Isao Murata¹, Yasumasa Kasaba¹

1. Department of Geophysics, Tohoku University

The purpose of this study is to investigate the evolution of atmospheric composition in the early Martian atmosphere. Not only hydrogen and oxygen escapes but also carbon escape to space is considered in this study for two reasons. The first reason is that thermal escape of atomic carbon could be stronger than atomic oxygen on early Mars. The early Martian atmosphere was exposed to stronger Sun' EUV and FUV radiations than today. The escape parameter, defined as the ratio of the gravitational potential to kinetic energy at a given altitude, could be small enough to allow massive escapes of these species under such strong radiations. For example, the escape parameter of atomic carbon in the Martian atmosphere was estimated 0.75 times smaller than that of atomic oxygen, and because of an efficient dissociation of CO the densities of these species at the exobase level were comparable at 4.1 Gyr ago (Tian et al., 2009). Hence, we consider that on early Mars, thermal escape of atomic carbon could be stronger than atomic oxygen. The second reason is the discovery of the concentration of Mn in Gale Crater by Curiosity, which suggests that the early Martian atmosphere could have several mbar or more of O partial pressure (Noda et al., 2019). Previous 1-D photochemical models that considered hydrogen and oxygen escapes on current Mars suggested that the O partial pressure could increase only up to 10 bar (e.g., Chaffin et al., 2017). This is because the atmosphere self-regulates the loss of hydrogen and oxygen to 2:1 (McElroy, 1972), which limits the imbalance between the hydrogen and oxygen escapes and hence prevents a massive oxygen buildup in the atmosphere. In this study, we consider atomic carbon escape as an agent to accumulate O in the atmosphere. To investigate this effect, we use a 1-D photochemical model of the early Martian atmosphere that takes into account atomic carbon escape. In this presentation, we will show the influence of the atomic carbon escape to the evolution of O partial pressure left behind in the early Martian atmosphere.

参考文献

- [1] Chaffin, M., Deighan, J., Schneider, N. et al., Elevated atmospheric escape of atomic hydrogen from Mars induced by high-altitude water, *Nature Geoscience* volume 10, pages 174–178, doi:10.1038/NGEO2887
- [2] McElroy, M. B., and T. M. Donahue (1972), Stability of the Martian atmosphere, *Science*, 177, 986–988.
- [3] Noda, N., Imamura, S., Sekine, Y., Kurisu, M., Fukushi, K., Terada, N., et al. (2019). Highly oxidizing aqueous environments on early Mars inferred from scavenging pattern of trace metals on manganese oxides. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 1282–1295. <https://doi.org/10.1029/2018JE005892>
- [4] Tian, Feng, James F. Kasting, Stanley C. Solomon, 2009, Thermal escape of carbon from the early Martian atmosphere, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 36, L02205, doi:10.1029/2008GL036513

熱浴との相互作用は量子アニーリングを加速するか？

押山広樹¹・鈴木正²・柴田尚和¹

¹ 東北大学大学院理学研究科物理学専攻

² 埼玉医科大学医学部物理学教室

膨大なデータを扱う機械学習による問題解決が様々な分野で成功を収めていることが象徴するように、“計算処理能力”の価値は高まり続けている。しかしながら、半導体チップを用いた古典的計算機の性能は、その基本素子であるトランジスタの大きさが原子のスケールに近づきつつあるため、発展に限界が見え始めている。このような背景の下で、量子力学的な動作原理に基づく計算アルゴリズムを現実の量子系において実行することで古典的計算機の限界を超えた計算性能を獲得することを目指す研究が盛んに行われている。量子アニーリングはそのような計算アルゴリズムのひとつであり、組み合わせ最適化問題を高速に解くことを狙いとしている。組み合わせ最適化問題とは膨大な変数の組み合わせの中から与えられた条件に合致するものを探し出す問題であり、交通渋滞の緩和や配送の最適化といった社会課題において現れる。量子アニーリングにおいては、最適化条件をエネルギー関数として表現し、変数の組み合わせを量子系の状態に対応させる。そして、エネルギーを最小化する状態（すなわち組み合わせ最適化問題の解）を量子ゆらぎを利用して探索する。この量子アニーリングを現実の量子系を用いて実装したデバイスが開発され注目を集めている [1]。しかし、現実の量子系は必然的にそれに接する外界、すなわち熱浴と相互作用するので、その効果を理解することは、デバイスの正しい性能評価を行う上で重要である。外界との相互作用は一般には系の量子ゆらぎを奪うため量子アニーリングには不利であると考えられているが、熱ゆらぎが最適解の探索を助けるのではないかという予測も唱えられている。外界と相互作用する量子系の理論的取り扱いの難しさが原因ではっきりとした結論は得られていない。

本研究では、量子アニーリングにおける熱浴の効果を理解することを目的として、熱浴と相互作用する量子系を解析する準厳密な数値解析手法を開発し、シミュレーションを行った。その結果、量子アニーリングの性能、すなわちエネルギーの最も低い状態を見つける確率は、熱浴との相互作用が無い場合と比べると熱励起が原因で低下してしまうことを確認した。また、アニーリング中の量子ゆらぎが小さくなりすぎない程度の適切な相互作用強度領域においては、熱浴との相互作用は低エネルギー状態への緩和を助けるため、相互作用強度を強めた方が性能低下が抑えられることを示した。

参考文献

- [1] M. W. Johnson et al, Nature **473**, 194 (2011)

湖岸段丘から見出された北海道東部屈斜路カルデラ内における地殻変動

○三條竜平・大月義徳
東北大学大学院理学研究科地学専攻

1. 緒言

カルデラは火山噴火に際して、あるいはその直後に形成される陥没地形である[1]。カルデラを含む火山地域においては、地下のマグマの動きに関連した地殻変動がしばしば生じる。北海道東部に位置する屈斜路カルデラにおいてもそのような地殻変動が報告されているが[2]、人工衛星を用いた観測結果であるため、極めて短期間の変動しか明らかにされていない。火山の活動期間は数十万年に及ぶこともあり、火山活動の履歴を明らかにし今後の活動予測を行ううえで、より長期間での地殻変動を明らかにする必要がある。このような長期にわたる地殻変動のトレーサーとして頻繁に用いられるのが段丘であり、屈斜路カルデラ内でも屈斜路湖岸に段丘の存在が確認されている[3]。そこで本研究ではこれら湖岸段丘の編年と高度変化の追跡を行い、長期の地殻変動を解明することを目的とする。

2. 手法

段丘を用いた地殻変動速度の算出は、地殻変動による段丘の変形量を段丘の形成年代で除して行われる。段丘の変形量は、同一段丘の高度変化から求めた。形成年代については、段丘を被覆している火山噴出物の年代から推定した。

3. 結果・考察

屈斜路カルデラ周辺では、計 10 の段丘面が見出されたが、ここでは段丘面 I と II の 2 つに注目した(表 1)。段丘面を被覆するテフラの年代などから、I は 2 万～2 万 3000 年前に、II は 7600 年前に形成されたことが分かった。また、変形量

表 1 段丘の変形量と速度

	段丘面 I	段丘面 II
変形量(m)	50	15
形成年代(×1000年前)	20～23	7.6
変形速度(m/1000年)	2.2～2.5	2.0

は I が 50 m、II が 15 m であった。したがって I と II の変形速度はそれぞれ 2.2～2.5 m/1000 年、2.0 m/1000 年である。段丘の変形速度は屈斜路湖東岸のアトサヌプリ火山周辺で大きくなっており、2 m/1000 年を超えている。同火山周辺では人工衛星の観測や、地下の地質構造からも地殻変動が確認されている[2, 4]。このように地質学的時間スケールと測地学的時間スケールのいずれにおいても地殻変動の存在が示されていることから、今後も地下のマグマの動きに関連した地殻変動が生じることが予想される。

4. 結論

屈斜路カルデラ周辺において段丘の高度変化から地殻変動を推定した結果、2 m/1000 年を上回る顕著な地殻変動が見出された。この傾向は人工衛星による観測や地質構造と整合的であり、今後も同様の地殻変動が生じる可能性が考えられる。

文献

- [1] Cole, J. W., Milner, D. M. and Spinks, K. D. (2005) : Calderas and caldera structures: a review. *Earth-Science Reviews*, **69**, 1-26.
- [2] 藤原 智・矢来博司・小林知勝・飛田幹男・村上 亮・西村卓也 (2018) : 3 世代にわたる日本の人工衛星によって見出された 1993 年から 2016 年にかけての屈斜路カルデラ内アトサヌプリ火山群の地殻変動. 国土地理院時報, **130**, 37-49.
- [3] 堀江正治 (1956) : 屈斜路湖岸段丘と地殻運動. 地質学雑誌, **62**, 156-157.
- [4] 八幡正弘 (1989) : 屈斜路カルデラー基盤構造とカルデラ形成との関連についての検討一. 地団研専報, **36**, 191-208.

初代星形成における磁場の熱進化への影響

定成健児エリック

大向一行（東北大）、松本倫明（法政大）、杉村和幸（メリーランド大）

東北大学大学院理学研究科天文学専攻

光を発するような天体がまだ存在しない130億年前ごろの初期宇宙にはじめて星（初代星）が誕生することで、宇宙全体の電離および金属汚染が進行し、それを機に星団や銀河などのような天体が形成された。このことから初代星は宇宙全体の進化を理解する上で非常に重要な天体である。初代星は遠方の天体であるため直接の観測は困難である。したがって初代星形成の研究は数値シミュレーションを用いて行われる。

星形成が行われるガス雲は一般に磁気をおびている。この磁場にはガス雲から角運動量を引き抜くという星形成にとって重要な働きがある。これまでの初代星形成の研究では宇宙初期の磁場は天体形成に影響がないほど小さいものとして扱われており、磁場は考慮されてこなかった。しかしながら近年、初期宇宙でも十分な大きさをもつ磁場が存在し得る可能性が示唆されてきた。このことから初代星についても磁場が形成過程にあたえる影響について考えた磁気流体シミュレーションが必要となってくる。磁場を考慮した初代星形成のシミュレーションはすでにMachida et al.2008 によって行われているが、この計算はエネルギー式を解く代わりにバロトロピックな関係を用いている点で問題がある。このような計算では衝撃加熱を再現できず、またローレンツ力による収縮の遅れに伴う熱進化の変化も反映させることができない。

そこで、本研究は冷却過程と非平衡化学反応を考慮しつつエネルギー式を整合的に解いた3次元磁気流体シミュレーションを用いて、始原ガス雲の高密度コアから原始星が形成されるまでの収縮期について調べた。本ポスターではバロトロピック仮定を用いた従来の計算方法と比較しながら今回のシミュレーション結果について報告する。特に衝撃加熱や磁気圧による収縮の遅れが熱進化にあたえる影響について調べ、それらの影響が初代星の性質にどのように影響を与えるかを議論する。

専門用語の説明

- ・ バロトロピック関係：圧力が密度のみに依存する関係。
- ・ 原始星：誕生して間もない星のことで、その後周辺にあるガス降着で成長する。
- ・ 始原ガス：宇宙初期に存在していた水素とヘリウムのみで構成されるガス。

参考文献[1] Machida M.N., Matsumoto T., Inutsuka S., 2008, ApJ, 685, 690

原子核番号0の Λ ハイパー核探索実験

板橋浩介

東北大学大学院理学研究科物理学専攻

我々の身の回りに存在する水や植物等の全ての物質は原子核・電子の集合体である。その原子核は陽子・中性子から構成され、更に陽子・中性子は3つのクォークから構成されている(図1)。全部で6種類あるクォークの組み合わせによってバリオン¹の電荷と性質が決まり、これまで100種類以上のバリオン粒子が確認されている。

歴史的にバリオン間の相互作用はバリオン同士の散乱実験を通して理解されてきた。散乱実験とは2つのバリオンを衝突させ、どの角度にどの程度散乱するかを示す散乱断面積を観測する実験である。しかし、陽子、中性子の次に軽い Λ 粒子²と核子間の散乱実験は、 Λ 粒子の寿命が非常に短い(崩壊まで約 10^{-10} 秒)ことから難しい。

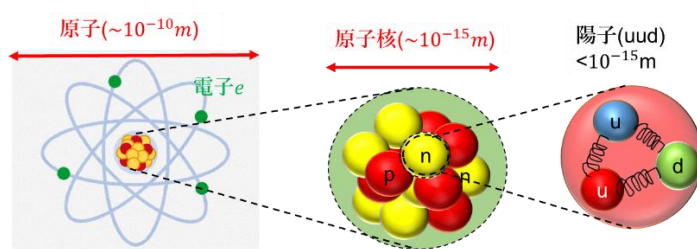


図1 原子核の大きさと比較図

・nn Λ の存否問題

nn Λ 原子核は2つの中性子と Λ 粒子からなる原子番号0の原子核である。nn Λ 原子は中性子原子核であり、その構造を研究することによって Λ -n相互作用を理解することができる貴重な研究対象である。しかし電荷を持たないnn Λ 原子核は安定状態として存在し得るのかは自明ではない。同じ三体系の中性子核(nnn)は存在しないとされており、nn Λ 原子核も同様に存在しない(非束縛状態)とされている[1]。一方、2013年ドイツのGSIがnn Λ の束縛状態と考えられるイベントを観測した[2]。しかし、この実験では十分な精度が無いことからnn Λ の状態を断定できてなく、世界中でnn Λ 原子核の存否について議論が続いている。

そこで我々の研究グループは実験的にnn Λ 原子核の存否を確定するためにアメリカのジェファソン研究所(JLab Hall A)(図2)において”nn Λ 探索実験”を行い、データ取得に成功した。現在世界初となる電荷0の原子核発見となることを期待し、解析を進めています。

専門用語の説明

1. バリオン : クォーク3つから構成された粒子。陽子、中性子もバリオンの一種である。
2. Λ 粒子 : uds クォークで構成された電荷0のバリオンの一種。

参考文献

[1] E. Hiyama et al., Phys. Rev. C 89, 061302(R) (2014)

[2] C. Rappold et al., (HypHI Collaboration), Phys. Rev. C 88, 041001(R) (2013).

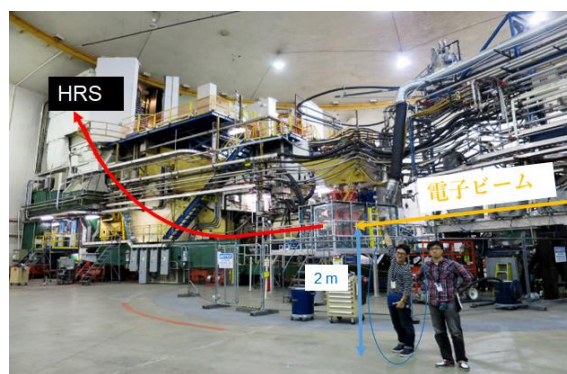


図2 JLab 実験ホール(Hall A)。写真左奥の磁気スペクトロメータ(HRS)は散乱した電子の運動量測定を行う(青●内は本人)。

Quantum Chemical Calculation for Metal Complex: Structural Optimization of a Macrocyclic Supramolecule

○Dapeng Zhang¹, Naoki Kishimoto¹, Ryosuke Miyake²

Department of Chemistry, Tohoku University¹

Department of Chemistry, Ochanomizu University²

The 728 atoms-contained macrocyclic metal complex has found to self-assemble through hexacoordinate bonding between 14 Ni atoms and 14 flexible tripeptide ligands, which are derived from the monodentate, bidentate and tridentate binding of the -NH₂ and -CO moieties.^[1] Herein, the macrocyclic supramolecule has been investigating by quantum chemical calculation: the Global Reaction Route Mapping (GRRM) method^[2] has been used to the structural optimization under the semiempirical molecular orbital methods.

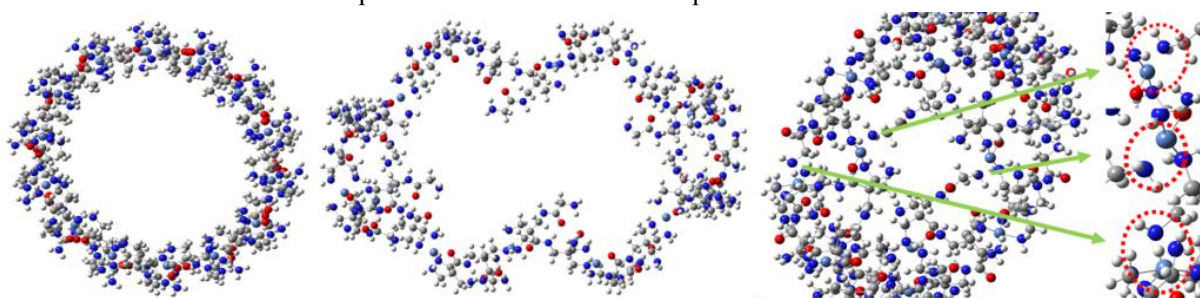


Fig 1. Left: Experimental structure (728 atoms, ca. 30 Å diameter); Middle: A calculated structure of optimization with charge/spins +28/1 (ca. 46 Å diameter); Right: A calculated structure of optimization with charge/spins 0/1.

The AFIR method^[3] has been utilized for further optimization, considering the Coulomb forces between each adjacent nickel atoms. By comparing the differences in diameter, diagonal/horizontal distance, and the hexacoordination, we have confirmed that a more considerable force may lead to a compact structure. Besides, it is necessary to provide horizontal forces and diagonal forces separately due to the hardness of diagonal-distance control. In recent studies, the binding forces between the terminate N of tripeptide and Ni have been applied to control the monodentate coordination. (Fig. 2) Detailed results will be shown in the poster.

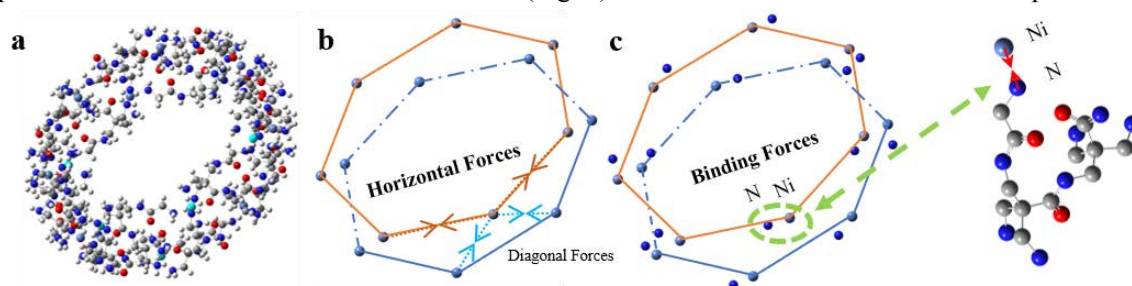


Fig 2. **a**: Experimental structure; **b**: Horizontal and diagonal forces induced separately; **c**: Binding forces of Ni-N applied to control the single coordination.

References

- [1] R. Miyake, A. Ando, M. Ueno, T. Muraoka. *J. Am. Chem. Soc.*, 2019, **141**, 8675-8679.
- [2] S. Maeda, Y. Harabuchi, Y. Sumiya, M. Takagi, K. Suzuki, M. Hatanaka, Y. Osada, T. Taketsugu, K. Morokuma, K. Ohno, GRRM17, see http://iqce.jp/GRRM/index_e.shtml.
- [3] S. Maeda, K. Ohno, K. Morokuma, Systematic exploration of the mechanism of chemical reactions: the global reaction route mapping (GRRM) strategy using the ADDF and AFIR methods, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013, **15**, 3683-3701.

異極鉱 $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ における圧力誘起型の超周期構造のその場観察○岡本 啓太郎^a東北大学大学院理学研究科地学専攻^a

異極鉱 (hemimorphite) $\text{Zn}_4[\text{Si}_2\text{O}_7](\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ は、主に亜鉛鉱床の二次鉱物として産出する。配位四面体 $[\text{SiO}_4 \text{ \& \& } \text{ZnO}_3(\text{OH})]$ が頂点を共有することで、三次元の網目構造を形成しており、その隙間に c 軸と並行なチャンネルが存在する。その内部の水分子と OH 基は、水素結合及び共有結合による鎖を形成している。異極鉱は約 100 K まで冷却すると、水素原子の熱振動抑制に起因する構造相転移を生じる[1]。一方で、異極鉱は六個の配位四面体で構成される二次構造単位(SBU)が回転することで、約 2.8 GPa を境界とする圧力誘起相転移 ($Imm2 \rightarrow Pnn2$)を生じるが、この時にチャンネルの断面積が狭まるため内部の水素結合が途切れる[2]。この様に、異極鉱は冷却と加圧によってそれぞれ異なる機構の構造相転移を生じる。低温下($5 < T < 300$ K)における異極鉱は熱容量測定で氷に類似した挙動を示すが[1]、高圧条件下でも氷のように複雑な構造変化を生じるのかを調べるため、2.8 GPa 付近の圧力領域でその場観察単結晶 X 線回折実験を行った。構造変化が微小な場合には、回折線の測定において高い S/N 比が要求されるため、放射光線源を用いた。

その結果、低温相転移とは異なる形態の衛星反射が新たに 2 通り観測された。中国産試料に対する実験では、2.8 GPa の相転移で新たに出現する回折ピーク付近に衛星反射が観測され、 b 軸方向に約 8.4 倍周期の変調構造が認められた。一方メキシコ産試料では、2.8 GPa より低い圧力で衛星反射のみが出現し、 b 軸方向に約 9.3 倍周期の変調構造が認められた。中国産試料に対する 3.01 GPa での構造解析の結果、一部の酸素席の温度因子が高い異方性を示した($R = 7.12\%$)。従って衛星反射が出現する際、高圧相転移のメカニズムである SBU の回転角及びチャンネルの断面積が、 $[010]$ 方向に変動している。変調構造の周期や出現するタイミングの差は、化学組成など試料の特性ではなく、加圧速度などに応じて出現する準安定な状態を捉えている可能性がある。

異極鉱のように高い含水量を示す鉱物中の水素原子は、構造中のアニオンに束縛されているため、氷に近い状態と言える。こうした内部に「氷」を含む鉱物に対し、氷の複雑な相図と対応付けつつ高圧相のその場観察を行うことで、低温下における構造変化との比較や、地下深部など高圧領域で生じる現象の理解に繋がる。

参考文献

- [1] Libowitzky and Rossman (1997) *Eur. J. Min.*, **9**, 803-810.
- [2] Seryotkin and Bakakin (2011) *Phys. Chem. Min.*, **37**, 689-684.
- [3] Geiger and Dachs (2009) *Am. Min.*, **94**, 634-637.

液液界面でのイオン対形成の微視的機構

○小泉 愛^a・田原 寛文^a・平野 智倫^a・森田 明弘^{a, b}東北大学大学院理学研究科化学専攻^a, 京都大・ESICB^b

油水界面での物質輸送は分離・抽出、化学センサー、生体膜など多くの分野で基本的かつ重要な現象である。本研究では分子動力学（MD）シミュレーションを用いた自由エネルギー解析によって分子分解能で界面現象を解明した結果を紹介する。

相間移動触媒（PTC）は油水界面で親水性イオンの輸送を促進することが知られており、そのようなイオン輸送過程は Facilitated ion transfer (FIT) という。この現象について、Laforge らは電場をかけた系において F⁻などの親水性イオンに対して極微量の疎水性対イオンが界面輸送を劇的に促進

することを報告し[1]、界面での局所的なイオン対形成が界面移動を触媒する”Shuttling mechanism”（図1）を提唱している。本研究では F⁻-THA⁺（tetrahexylammonium）の系における水/dichloromethane 界面での FIT について界面からの距離 z とイオン対間距離 r

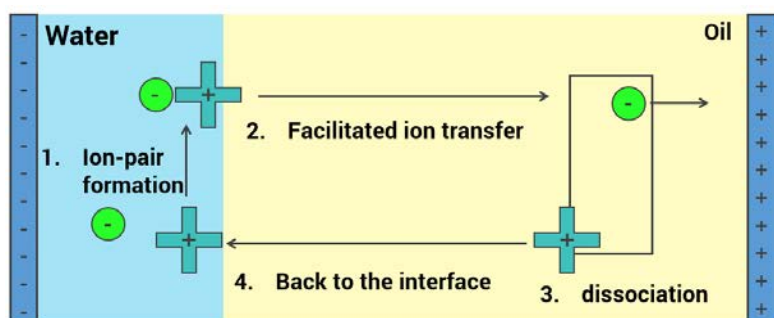


Fig 1. Shuttling mechanism

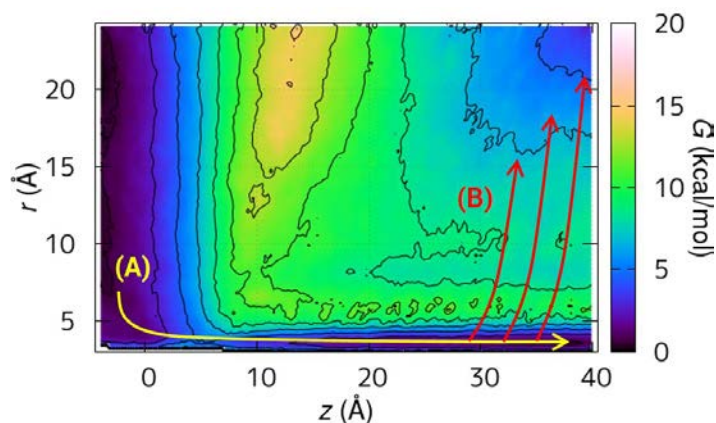


Fig 2. 2-D free energy surface $G^{(2)}(z, r)$ for F⁻ transport with THA⁺ under the electric field $E_z = 0.2$ V/nm. The contour lines are drawn with 2 kcal/mol interval.

の二次元自由エネルギー面を計算し（図2）、イオン輸送の機構が (A)FIT と (B)油相でイオン対解離の二段階で起こることを分子レベルで明らかにした。また実験では輸送が促進されない F⁻-TBA⁺

（tetrabutylammonium）の系も計算し、イオン対を形成した時の油相での安定化が大きい場合に Shuttle が起こることを明らかにした。[2]

[1] Laforge, F. O. et al. *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, 128, 15019-15025

[2] Koizumi A. et al. submitted for publication.

First Principles Study of the Spin-Orbit Interaction in Solids

○栗田謙亮・是常隆

東北大学大学院理学研究科物理学専攻

現代社会においてエレクトロニクスは非常に広く浸透した技術である。エレクトロニクスでは、電子が持つ電荷の性質に注目し、その電荷を制御することで様々な機能が生み出されてきた。一方で、電子はスピンと呼ばれる性質も持っており、このスピンと電荷の両方を制御しようとする分野はスピントロニクスと呼ばれている。スピントロニクス分野では、近年スピン軌道相互作用 (Spin-Orbit Interaction 以下 SOI)^{注1} と呼ばれる相互作用が注目されている。それは、SOI が電子の軌道とスピンを結びつけるという特異な効果を持ち、スピンホール効果^{注1} や異常ホール効果^{注1} というようなスピントロニクス分野で重要な現象において本質的な役割を果たすことが明らかになったためである。

このような背景から、SOIの性質を深く理解することは重要である。特に固体中でのSOIの強さは極めて重要な物理量であり、物質設計を目指す上ではその制御が欠かせない。しかし、SOIの強さに関する性質は原子ではよく分かっているものの[1]、固体になるとその性質は完全には理解されていない。そこで、本研究の目的を原子でのSOIの性質が固体中でもSOIで成立するのか調べることにした。特に価数が多いほどSOIは強くなるという原子での性質に注目する。

価数依存性を調べるため、Snの価数が変わるような様々な化合物 Sn_xM_y (M は任意の元素) で Sn のスピン軌道相互作用の強さ λ を第一原理計算^{注4} で計算した。その結果、同じ構造・同じ体積の場合には、価数が多いほど λ が大きいという価数依存性が固体中でも成立することを明らかにした。しかし、構造や体積が異なる場合には、単に価数だけで λ が決まるわけではないということが分かった。加えて、構造や体積や価数という全ての効果を取り込んだ物理量としては、電子軌道の広がり度で λ をよく説明できることが分かった。

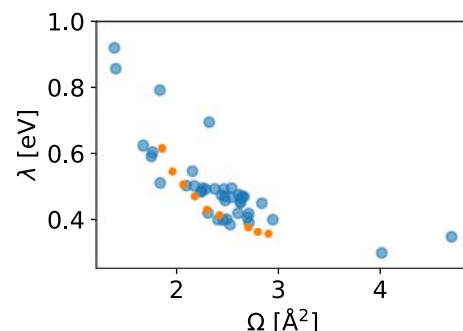


図 1: Sn を含む化合物 (49 個) に対する、Sn の軌道の広がり度とスピン軌道相互作用の強さの関係

専門用語の説明

注1 スピン軌道相互作用：電子のスピンと電子の軌道との間の相互作用のこと。

注2 スピンホール効果：SOIによって電流からスピン流が生成される現象。

注3 異常ホール効果：電流と磁化の両方に直交する方向に起電力が現れる現象。

注4 第一原理計算：経験的なパラメーターを用いずにバンド計算する手法。

参考文献

[1] Y. Yanase, H. Harima, 固体物理 46 (2011) 229

Gaia データを用いた銀河の構造解析

佐藤元太

東北大学大学院理学研究科天文学専攻

本研究では、天の川銀河(MW)の星々の観測データを用いて、銀河内での天体の軌道計算を行った。銀河の力学的特徴や空間分布には、その銀河の時間進化の痕跡やダークマター(DM)の分布の手掛かりが残されている。つまり、銀河の構造を正確に再現・解析することは、宇宙スケールの構造の時間発展や、DM の正体に迫ることに繋がるのである。本研究の最終的な目的はこの DM の正体の追求であるが、ここではその第一段階として最も近い銀河、MW のデータを用いて軌道計算が正しく行えるかを確認した。

観測データとしては Gaia DR2 のデータを使用し、その中で太陽近傍の星データのみを抽出して使用した。モデル構築には AGAMA ソフトウェア[1]を利用し、Schwarzschild 法[2]と呼ばれる手法でモデル化を行った。モデル構築において、MW のモデルとしては McMillan(2017)[3]が構築したモデルを採用した。

観測データは図 1 のように、太陽近傍に集中した天体のみを用いた。ここから MW 全体をモデル化して軌道計算を行うと、図 2 のような軌道を得られた。

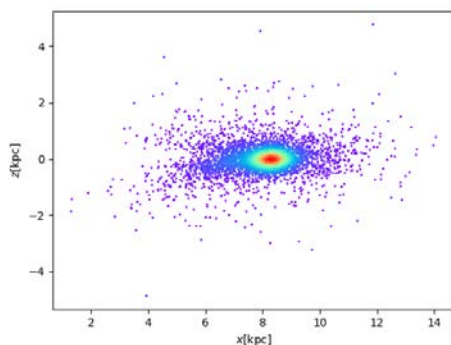


図 1: 使用した観測データ

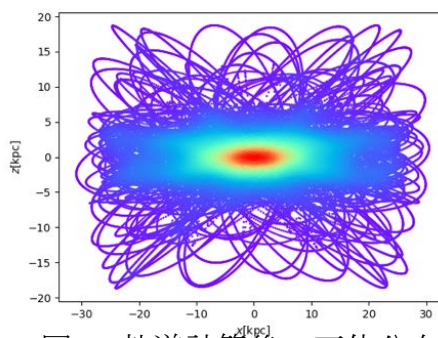


図 2: 軌道計算後の天体分布

専門用語の説明

・ Schwarzschild 法：銀河モデルを構築する手法の 1 つ。銀河の観測データと理論モデルを比較し、データとモデルが最も適合するように天体軌道の重みやモデルパラメータを決定することで、銀河の力学的構造を明らかにする。

参考文献

- [1] Vasiliev E. and Valluri M. 2019, eprint arXiv 1909.03119
- [2] Schwarzschild M., 1979, ApJ, Part1, 232, 236
- [3] McMillan P. J., 2017, MNRAS, 465, 76

Stability of atmospheric redox states of early Mars inferred from time response of the regulation of H and O losses

○Shungo Koyama^a, Naoki Terada^a, Hiromu Nakagawa^a, Takeshi Kuroda^a

Department of Geophysics, Tohoku University^a

Atmospheric losses including escapes to space and depositions to the surface play an essential role in the evolution of the Martian surface environment. Especially, a ratio of total losses of hydrogen and oxygen from the atmosphere is crucial to determine its atmospheric redox state. In the condition that H and O losses originate from H₂O, an atmospheric redox state remains the same if the ratio is 2:1, otherwise it is driven into oxidizing or reducing. It was shown by [1] that Jeans escape flux of H and H₂ and nonthermal escape flux of O were regulated to be in the ratio of 2:1 in a converged model of present-day Mars, which is called “self-regulation”. Whether or not the self-regulation works in real atmospheres depends on its timescales, but time responses of the self-regulation are not well understood in different atmospheric conditions.

Here we study time responses of the self-regulation in different atmospheric conditions and discuss the stability of atmospheric redox states. We use a 1D time-dependent photochemical model for various atmospheric conditions and parameters, such as atmospheric CO₂ pressure, surface temperature and O escape rate.

We find that the self-regulation works over various timescales ranging from tens of thousands of years to more than 100 million years for different atmospheres. In addition, the mechanisms of the self-regulation depend on atmospheric redox states. First mechanism is the same as the one explained by [2], which tends to work in weakly-oxidizing or weakly-reducing atmospheres in a way that H escape changes to reach the regulated state following a change in H₂ transportation from the lower to upper atmosphere. This timescale is relatively short and is determined by O₂ content in the atmosphere. Second one is likely to work in reducing atmospheres over a relatively long timescale. The regulation occurs dominantly by changes in deposition fluxes of oxidants such as H₂O₂, and its timescale is controlled by CO content in the atmosphere. These results imply that weakly-reducing or weakly-oxidizing atmospheres are relatively stable, while reducing atmospheres are easily influenced by external factors such as a change in stellar EUV flux.

Finally, we briefly discuss possible atmospheric redox states of early Mars.

▪ Technical Terms

Redox states: a balance between reducing and oxidizing species

Jeans escape: classical thermal escape mechanism

▪ References

[1] McElroy and Donahue. (1972), doi: <https://doi.org/10.1126/science.177.4053.986>

[2] Liu and Donahue. (1976), doi: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(76\)90035-X](https://doi.org/10.1016/0019-1035(76)90035-X)

地域間流動モデリングにおける介在機会の新たな定式化

○小坪将輝¹・中谷友樹²

¹東北大学理学部地圏環境科学科, ²東北大学大学院環境科学研究科

緒言

放射モデル[1]は地域間の流動量を予測・説明する空間的相互作用モデルの 1 種であり、発着地間の間に介在する他の着地郡の規模の総量(介在機会)に基づいて流動量を予測する。このモデルは米国における種々の流動に対し、重力モデル等の古典的なモデルよりも優れた予測精度を示したが、他地域の流動データを用いた後続の研究ではむしろ古典的なモデルよりも全体的な適合度で劣っていた[2]。しかし、放射モデルは遠距離の移動の予測に優れた性能を示すことが確認され、短距離のそれに劣ることが問題と指摘されてきた[3]。そこで本研究では放射モデルの短距離の予測精度を改善するために、介在機会項に距離の曖昧さを導入しその有効性を評価した。

方法

本研究では式(1)-(3)に示すように距離の曖昧さを考慮した介在機会を定式化した。この介在機会を用いた放射モデルによる予測精度を日本の通勤流動等のデータを利用して評価し、他のモデルとの比較を行った。モデルの予測精度は先行研究[3]に習い Sørensen-Dice coefficient(SDC)を用いて評価した。この指標は大きな値ほど予測精度が高いことを示す。

$$F_{ij} = \sum_{k \neq i,j}^n P_k I(d_{ij} > d_{ik}) + \sum_{k \neq i,j}^n w_{ijk}(d_{ij}, d_{ik}) P_k I(d_{ij} \leq d_{ik}) \quad (1)$$

$$w_{ijk}(d_{ij}, d_{ik}) = \exp\left\{-\frac{\ln 2}{\mu}(d_{ik} - d_{ij})\right\} \quad (2)$$

$$w_{ijk}(d_{ij}, d_{ik}) = \left(\frac{d_{ij}}{d_{ik}}\right)^v \quad (3)$$

F_{ij} : 新たに定式化した介在機会, n : 着地の総数, k : 発地*i*から近い順に並べた地域のインデックス(ランク), P_k : k 番目に近い地域の人口, d_{ij} : i から着地*j*までの距離, $I(d_{ij} > d_{ik})$: $d_{ij} > d_{ik}$ で1、それ以外で0をとる指標変数, $w_{ijk}(d_{ij}, d_{ik})$: 着地より遠い地域の影響を考慮するカーネル関数, μ, v : パラメーター

結果

日本の通勤流動に対しては、式(2)において $\mu=5.0$ を用いる場合に最も高い SDC が得られた。図1に観測値とモデルによる予測値を用いた移動距離分布を示す。新たな介在機会の導入によってオリジナルの放射モデルよりも高い予測精度が達成され、とくに近距離の移動において精度が向上していることが確認された。

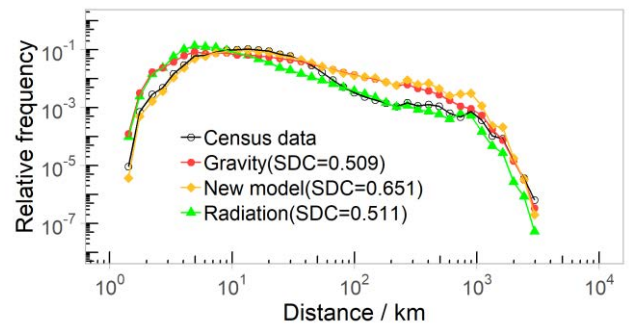


図1. 観測値と予測値による移動距離分布

参考文献

[1] F. Simini et al., *Nature*, **484**, 96(2012), [2] M. Lenormand et al., *J. Transp. Geogr.*, **51**, 158(2016), [3] A.P. Masucci et al., *PHYS. REV. E*, **88**, 022812(2013)

Cahn–Hilliard 方程式系における解の漸近挙動

千葉 智史, 岡部 真也 (東北大学大学院理学研究科数学専攻)

本講演の目的は Cahn–Hilliard 方程式系に対する初期値境界値問題の解の漸近挙動を考察することである。本研究では空間多次元の場合についても考察を行っているが、その解析の本質的なアイデアを説明するために、本稿では次の空間 1 次元の場合について詳しく述べることにする：

$$(CHS) \quad \begin{cases} u_t = -(u_{xx} + u - u^3 - 3u\tilde{u}^2)_{xx} & \text{in } \mathbb{R} \times (0, \infty), \\ \tilde{u}_t = -(\tilde{u}_{xx} + \tilde{u} - \tilde{u}^3 - 3u^2\tilde{u})_{xx} & \text{in } \mathbb{R} \times (0, \infty), \\ u(x, t) \rightarrow 1, \quad \tilde{u}(x, t) \rightarrow 0, & \text{as } x \rightarrow \infty, \\ u(x, t) \rightarrow 0, \quad \tilde{u}(x, t) \rightarrow 1, & \text{as } x \rightarrow -\infty, \\ u(\cdot, 0) = u_0(\cdot), \quad \tilde{u}(\cdot, 0) = \tilde{u}_0(\cdot), & \text{in } \mathbb{R}. \end{cases}$$

$(u, \tilde{u})$ が方程式系 (CHS) の解であるとき、以下のエネルギー汎関数 E は非増加となる：

$$E(u, \tilde{u}) := \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2}(u_x^2 + \tilde{u}_x^2) + W(u, \tilde{u}) \right] dx \quad \text{with} \quad W(u, \tilde{u}) := \frac{(u^2 + \tilde{u}^2 - 1)^2}{4} + u^2\tilde{u}^2.$$

ここで、 W はポテンシャル項を表す。一方、特別な Gross–Pitaevskii 方程式系を考えたとき、その解は (CHS) の定常問題の解となる。この特別な Gross–Pitaevskii 方程式系は次のような解を持つことが知られている ([1])：

$$v(x) = \frac{1 + \tanh(\frac{x}{\sqrt{2}})}{2}, \quad \tilde{v}(x) = \frac{1 - \tanh(\frac{x}{\sqrt{2}})}{2}.$$

この定常解 $(v, \tilde{v})$ は、適切な条件のもとでエネルギー汎関数 E の最小化元となる。これらの事実から、適当な $(u_0, \tilde{u}_0)$ を取るとき、(CHS) の時間大域解 $(u, \tilde{u})$ が存在し次が成り立つと予想することは自然である：

$$(\dagger) \quad u(\cdot, t) \rightarrow v(\cdot), \quad \tilde{u}(\cdot, t) \rightarrow \tilde{v}(\cdot), \quad \text{as } t \rightarrow \infty.$$

本研究では、 $(\dagger)$ のように振る舞う時間大域解が存在するための初期値の条件について考察を与え、その結果、(CHS) の時間大域解 $(u, \tilde{u})$ が定常解 $(v, \tilde{v})$ に収束する過程が以下の 2 つの要素から成ることを示した：

- 解 $(u, \tilde{u})$ の形状が定常解 $(v, \tilde{v})$ の形状に近づくオーダーは $t^{-\frac{1}{2}}$ である；
- 解 $(u, \tilde{u})$ の位置が定常解 $(v, \tilde{v})$ の位置に近づくオーダーは $t^{-\frac{1}{4}}$ である。

物理的な意味 方程式系 (CHS) の定常問題は、Bose–Einstein 凝縮を記述する Gross–Pitaevskii 方程式系を含む。本研究で得られた収束速度は適切な意味で“最良”であることが期待されるため、方程式系 (CHS) は Gross–Pitaevskii 方程式系に対する最適な近似を与えると予想される。また、方程式系 (CHS) は、Spinodal 分解を記述する Cahn–Hilliard 方程式の一般化である。特に本研究の結果は、Cahn–Hilliard 方程式に関する先行研究 [2] の (CHS) への一般化に相当する。方程式系 (CHS) 自体は何かの物理現象を記述しているといった事実は存在しないが、先に述べた事実から、方程式系 (CHS) は Bose–Einstein 凝縮や Spinodal 分解に関連した物理現象を記述する方程式として、何かしらの物理的な意味を持つことも期待される。

解析のアイデア 問題 (CHS) に関する解析は、遷移層の有無によって区別される 2 種類の初期値境界条件付 Cahn–Hilliard 方程式に関する解析に帰着される。各問題はいずれも非線形問題であるにもかかわらず、それらの間に重ね合わせの原理に類する線形的相互関係を導出したことが本研究における解析の本質的なアイデアである。

参考文献

- [1] A. Farina, B. Sciunzi and N. Soave, *Monotonicity and rigidity of solutions to some elliptic systems with uniform limits*, 2017, to appear in Communications in Contemporary Mathematics.
- [2] F. Otto and M. G. Westdickenberg, *Relaxation to equilibrium in the one-dimensional Cahn–Hilliard equation*, SIAM J. Math. Anal. **46** (2014), 720–756.

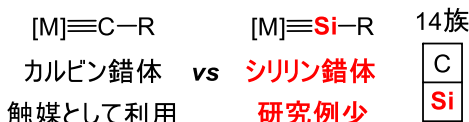
金属-ケイ素三重結合をもつクロム錯体の合成と性質

○松岡正紘^a・橋本久子^a・大野稜真^b・松尾司^b・飛田博実^a

東北大学大学院理学研究科化学専攻^a, 近畿大学大学院総合理工学研究科物質系工学専攻^b

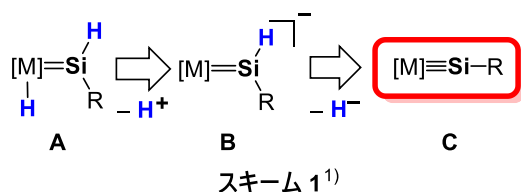
遷移金属と炭素との間に直接結合を有する有機金属錯体は、様々な有機合成反応の触媒となる重要な分子性金属化合物である。中でも遷移金属と炭素との間に三重結合を持つカルビン錯体は、例えば、アルキンメタセシス反応^{*1}の触媒等の有用な有機合成試薬として広く用いられている。この炭素を同じ14族の高周期元素であるケイ素に置き替えたシリリン錯体も、同様の特異な反応性を有する重要な化学種と考えられるが、その研究例はいまだ少ない。

<金属-14族元素三重結合錯体>

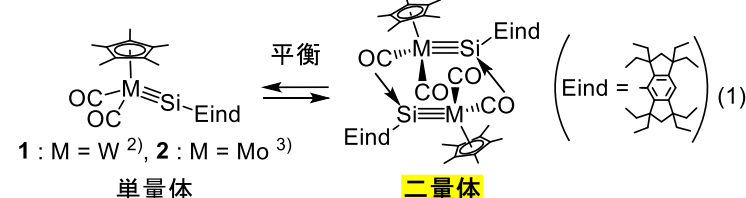


当研究室では最近、ヒドリド(ヒドロシリレン)錯体 **A** から段階的に H^+ および H^- を引き抜くことにより、アニオン性シリレン錯体 **B** を経由して、シリリン錯体 **C** を合成する方法を開発した(スキーム 1)¹⁾。この方法を用いて、ケイ素上にかさ高い置換基である Eind 基をもつタングステンやモリブデンのシリリン錯体 **1**, **2** が合成されている^{2, 3)}。錯体 **1**, **2** は、溶液中では単量体と二量体の平衡混合物であるが、結晶状態では二量体としてのみ存在する(式 1)。

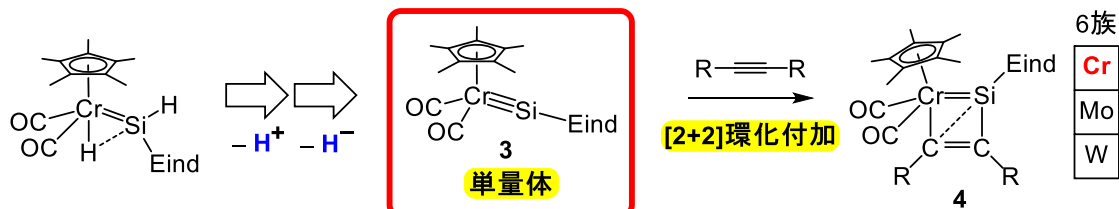
<当研究室で開発したシリリン錯体の合成法>



<これまでの研究(M = W, Moの場合)>



本研究では、タングステンやモリブデンと同じ6族で、周期表で上に位置し原子サイズが小さいクロムを用いて、中性のクロムシリリン錯体として初めてとなる錯体 **3** の合成に成功した。この **3** は **1** や **2** と異なり、溶液および結晶状態の両方で単量体として存在することを証明した。また、アルキンとの反応により、四員環骨格をもつ[2+2]環化付加生成物 **4** を単離し、その結晶構造を明らかにした。この四員環錯体 **4** の単離は、アルキンメタセシス反応のケイ素版の開発に向けて、その基礎的知見を与える重要な成果である。本発表ではその詳細について報告する。



スキーム 2

^{*1} アルキンメタセシス反応：金属触媒の作用で、2分子のアルキンから炭素-炭素三重結合の切断、生成を経て新しい2分子のアルキンが生成する反応。

1) T. Fukuda, T. Yoshimoto, H. Hashimoto, H. Tobita, *Organometallics* **2016**, 35, 921; 2) T. Yoshimoto, H. Hashimoto, N. Hayakawa, T. Matsuo, H. Tobita, *Organometallics* **2016**, 35, 3444; 3) K. Watanabe, H. Hashimoto, N. Hayakawa, T. Matsuo, H. Tobita, *The 67th Conference of Japan Society of Coordination Chemistry*, **2017**, 1Da-07.

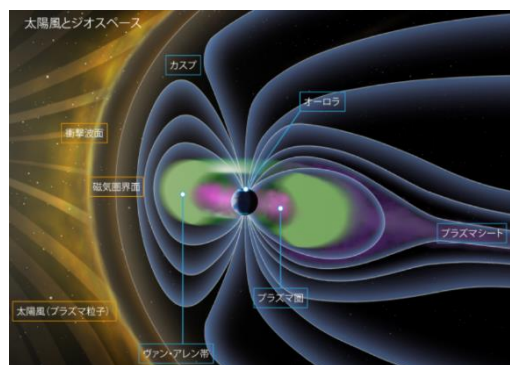
地球磁気圏におけるコヒーレントなホイッスラーモード波動による 低ピッチ角電子の散乱

石澤元気¹、加藤雄人¹、北原理弘¹、熊本篤志¹、木村智樹^{1,2}、川面洋平^{1,2}

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻¹

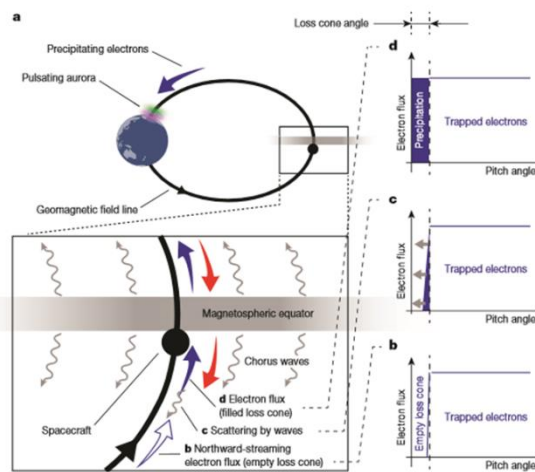
東北大学学際科学フロンティア研究所²

地球はダイポール状の固有磁場を有し、太陽風の影響を受けて、その磁気圏構造をダイナミクスに変化させている。それによって発生する大規模な電場構造に影響され磁気圏尾部にたまったプラズマは断熱不変量を保存しながら地球に向かって対流を起こす。その影響でプラズマ圏の境界付近ではプラズマの速度分布に異方性が生じ、それを種としてプラズマ波動が発生する。発生したプラズマ波動は背景磁場の強さやプラズマの密度によって決まる分散関係に従って伝搬していく。さらにプラズマ波動は粒子の運動の様子を変え、大気へ降り込ませる事でオーロラを発生させたり、粒子にエネルギーを与えることで粒子の加速を引き起こしている。これらの現象を波動粒子相互作用と呼び、放射線帯の形成等に深く関係しておりその物理プロセスは長く研究されてきた。



引用 <http://www.isas.jaxa.jp/topics/000838.html>

2016年に打ち上げられた衛星、「あらせ」による観測でホイッスラーモードのプラズマ波動とロスコーン分布が対応していることが明かになった[1]。従来この原因は準線形理論による拡散によって理解されてきた。しかし低ピッチ角電子はホイッスラーモードのプラズマ波動にトラップされるとロスコーンから離れる方向に散乱されることが Kitahara and Katoh (2019)[2]によるテスト粒子計算で示唆されており、観測を説明する物理プロセスは十分に明らかになっていない。そこで本研究では電子を大気へ降り込ませる物理プロセスを解明するため、Kitahara and Katoh (2019)のコードを用いて、プラズマ波動の



[Kasahara et al. 2018]

振幅変調の影響を考えた。磁気赤道における背景磁場の $0.01\% \sim 0.1\%$ までの振幅の変調を伴う、周波数 $0.30\Omega_{ce}$ のコヒーレントなホイッスラーモード波動を用いてシミュレーションを行った結果、周波数変調を伴った波動の方が電子を効果的にロスコーンに落とし得る事が分かった。本研究を通じて惑星にも応用可能なプラズマ波動と粒子の相互作用の統合的な理解につなげたいと考えている。

[1] Kasahara, S et al (2018) <https://doi.org/10.1038/nature25505>

[2] Kitahara, M. & Katoh, Y (2019) <https://doi.org/10.1029/2019JA026493>

補償光学におけるTip-Tilt成分補正の評価

M1 飯塚悠太

東北大学理学研究科天文学専攻

地上にある大口径望遠鏡の分解能は、大気の流れの影響により大幅に低下してしまう。これは、補償光学システム(Adaptive Optics System : AOSs)を使用することによって大幅に改善することができ、現在、世界のあらゆる大口径望遠鏡で AO を組み込むことが必須となっている。

大気ゆらぎにより広がってしまった星像を補正するのは波面補正素子であるが、それを有効に行うためには 画角内の星の位置を固定する必要がある。その役割を担うのが Tip-Tilt Mirror(TTM) であり、本研究では 制御工学の観点から TTM の性能評価をおこなう。

参考文献：

- [1] John W. Hardy 『Adaptive Optics for Astronomical Telescopes』
- [2] 南裕樹 『Pythonによる制御工学入門』
- [3] 加藤隆 『制御工学 テキスト』

Petrological Constraints on the Magma Fragmentation Pressure of the Fuji Hoei Eruption

– Implications for the Dynamics of Basaltic Plinian Eruptions

○Kyungmin Kim,¹ Michihiko Nakamura,¹ Tomofumi Kozono,² and Mitsuhiro Yoshimoto³

Volcanic eruptions are of various types, from effusive to explosive, due to differences in magmatic and eruptive conditions. Generally, basaltic magma is likely to erupt effusively (non-explosively) due to its low viscosity and efficient gas escape, which makes it unable to develop overpressure in the bubble. However, explosive basaltic Plinian eruption* cases were observed in the 122 BC Etna eruption (Italy) and the AD 1886 Tarawera eruption (New Zealand). Relatively weak but also explosive Basaltic sub-Plinian eruptions were also observed in disparate parts of the world, including Japan, as in the Fuji Hoei eruption (AD 1707) and the recent Izu-Oshima eruption (AD 1986). The eruption dynamics and fragmentation* mechanism of basaltic Plinian eruptions have been controversial topics in volcanology.

This study focuses on the eruptive conditions of the basaltic Plinian and sub-Plinian eruption in the example of Fuji Hoei eruption. Petrological analyses of Fuji Hoei scoriae have resulted in microlite* contents of 51% to 60%, which can increase the apparent viscosity of Hoei magma several orders of magnitude over the melt viscosity. Most of the crystal phase (~90%) is composed of plagioclase, and the presence of olivine, augite, and Fe-Ti oxide implies a final equilibrium pressure (P), temperature (T), and oxygen fugacity* (fO_2) condition. We performed high-temperature experiments to observe the crystallization and chemical equilibrium between the melt and microlite in Fuji Hoei scoriae to constrain the final equilibrium P-T- fO_2 condition. The results show that the final equilibrium condition of the Fuji Hoei eruption was 1080 degree C - 6MPa – NNO +1.0~1.5. Possible magma evolution pathways during the ascent pathway and conduit geometry can be investigated with the input values of the petrological constraints of crystallinity, initial water contents, and the final equilibrium pressure and temperature.

1. Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Japan
2. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Japan
3. Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefecture Government, Japan

*Plinian eruption: Explosive type of volcanic eruption accompanied by columns of volcanic debris and hot gases ejected high into the stratosphere

*Fragmentation: Phenomenon in which magma is broken into fragments in an explosive eruption

*Microlite: Micro-meter-sized mineral

*Oxygen Fugacity: Partial pressure of oxygen in a certain environment

キタエフスピン液体候補物質 α -RuCl₃ における超高速スピンドYNAMIX

天野辰哉^A, 赤嶺勇人^A, 大橋拓純^A, 川上洋平^A, 伊藤弘毅^A, 今野克哉^A, 長谷川慶直^A, 佐々木宏也^A, 青山拓也^A, 今井良宗^A, 大串研也^A, 若林裕助^A, 米満賢治^B, 岩井伸一郎^A

東北大学大学院理学研究科物理学専攻^A

中央大学理工学部物理学科^B

強磁性体や反強磁性体などの磁性体において、磁気秩序を光で検出・制御しようとする試みは長年にわたって研究の対象とされてきた(図(a))。反強磁性体物質においては、円偏光の励起光を照射することによって、超高速(≤ 100 fs)な磁化とコヒーレントなスピン歳差運動が誘起されることが報告されている[1]。しかし、これらの研究の対象物質は、ニッケル酸化物や希土類酸化物など少数に限られている。

最近、2次元のハニカム格子構造をもつモット絶縁体 α -RuCl₃ (図(b))が、量子スピン液体(基底状態)やマヨラナフェルミオン(励起状態)の存在が予想されるスピン模型(キタエフ模型)の候補物質として注目を集めている。 α -RuCl₃ は $T_N \sim 7$ K 以下で zig-zag 型の反強磁性秩序を示すものの、キタエフ相互作用によって引き起こされる特異な応答が観測されている[2]。本研究では、円偏光のフェムト秒パルスの照射下で光の偏光回転角を測定することにより、 α -RuCl₃ の超高速スピンドYNAMIXを調べた。

図(c)に、反強磁性相($T = 4$ K)において測定した、2つの異なる円偏光励起パルス(σ^+ : 右回り, σ^- : 左回り円偏光)を照射後の偏光回転角の時間発展を示す。図に示すように、励起光のヘリシティ(σ^+ , σ^-)に応じて、偏光回転の方向が反転した瞬時応答(< 100 fs)が観測される。本発表では、偏光回転の温度依存性やプローブ光の偏光依存性から、 T_N 以下の反強磁性相に加えて、 T_N 以上のスピン液体相におけるスピンドYNAMIXについて議論する。

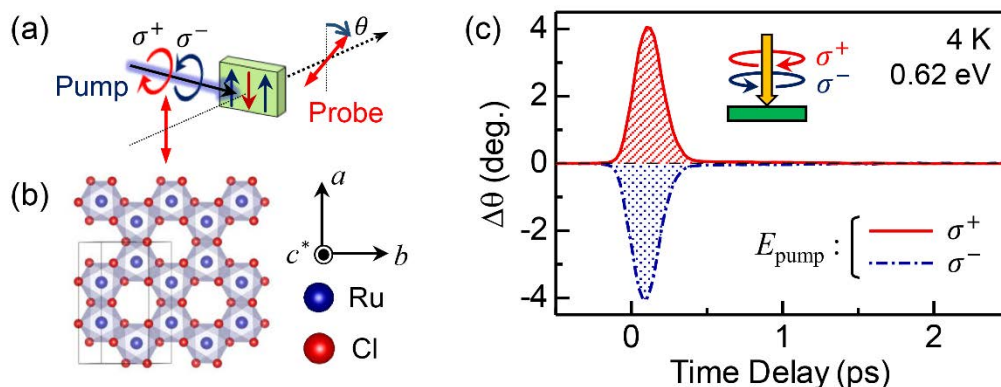


図 (a) 光による磁気秩序の検出と制御の模式図、(b) α -RuCl₃ の結晶構造、(c) 偏光回転角の時間発展; 励起エネルギー: 0.89 eV, プローブ光: $E \parallel a$ -axis

参考文献: [1] Němec *et al.*, Nature Phys. **14**, 229 (2018).

[2] Kasahara *et al.*, Nature **559**, 227 (2018).

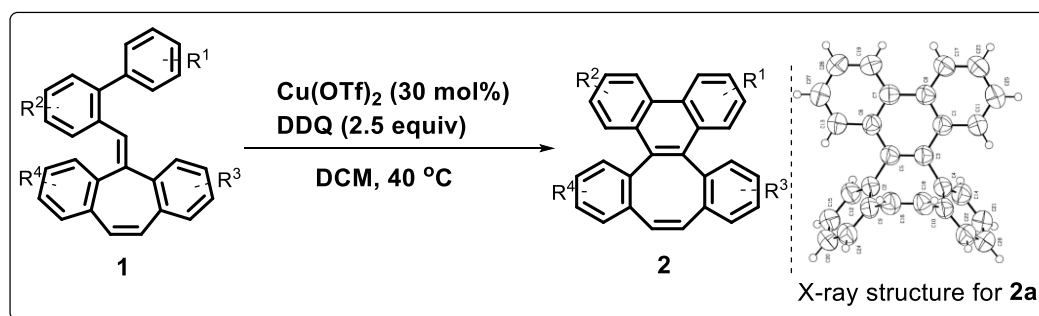
Oxidative Ring Expansion for Synthesis of 8-Membered Ring-fused π -Conjugated Polycycles

○ Lu Yang, Tienan Jin, Masahiro Terada

Department of Chemistry, Tohoku University

π -Conjugated polycycles embedding with an eight-membered cyclooctatetraene (COT) moiety, such as various tetraphenylenes and dibenzocyclooctatetraenes are interesting molecules from both synthetical and theoretical viewpoints due to the nonplanar tub-shaped geometry of COT.^[1] Importantly, these polycycles can act as new COT ligands for transition metal complexes and host molecules for dynamic molecular recognition. Although a few synthetic methods such as double Wittig reaction and Ni-catalyzed [2+2+2+2] cycloaddition of diynes for constructing benzo-annulated COT-polycycles have been reported,^[2] new synthetic methods for the construction of novel π -extended COT-polycycles are still highly desirable. Recently, we have developed a new oxidative ring expansion reaction to generate dibenzo[*g,p*]chrysenes (DBC)s, which provides an efficient strategy for the construction of highly π -extended polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs).^[3]

Herein, we report a highly efficient single electron oxidative ring expansion for a new series of dibenzocyclooctaphenanthrenes (DBCOPs) embedding with eight- and six-membered ring. The biphenyl-tethered 5-methylene-5*H*-dibenzo[*a,d*][7]annulene (**1**) treated by Cu(OTf)₂ and DDQ, affording the corresponding eight-membered ring-fused π -extended polycycle DBCOP (**2**) in good yields (37%-80%). The saddle-shaped structure of **2a** (R¹, R², R³, R⁴ = H) was determined by X-ray crystallography analysis.



References

- [1] T. Nishiuchi, Y. Kuwatani, T. Nishinaga, M. Iyoda, *Chem. Eur. J.* **2009**, *15*, 6838. [2] a) Y.-M. Man, T. C. W. Mak, H. N. C. Wong, *J. Org. Chem.* **1990**, *55*, 3214. b) P. A. Wender, A. B. Lesser, L. E. Sirois, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 2736. [3] X. Zhang, Z. Xu, W. Si, K. Oniwa, M. Bao, Y. Yamamoto, T. Jin, *Nat. Commun.* **2017**, *8*, 15073.

魚類の胸ビレ骨格の多様性とそれを生じたメカニズムの解明

○田中祥貴・阿部玄武・田村宏治

東北大学大学院生命科学研究科生態発生適応科学専攻動物発生分野

脊椎動物は体幹部の前方に1対、後方に1対存在する合計2対の付属肢を有している。そのうちかつて水中から陸上へと進出した脊椎動物（両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類）が四肢を持つのに対し、魚類は四肢の起源である2対の対ビレを持っている。対ビレは四肢動物の前肢に相当する胸ビレ（図1）、そして後肢に相当する腹ビレのことを指す。これらは魚類が水中における動きをコントロールするために重要な働きを果たす他、その形を進化の過程で変容させることにより、海底での歩行（ホウボウ）や海面で飛び出した後の滑空（トビウオ）、さらには吸盤として岩肌に張り付く（ダンゴウオ）などの多様な機能を備えることが知られている。

魚類の胸ビレ骨格は3つの領域に分けることができる。体幹部に近い位置に存在し、肩に接続する基部担鰭骨（proximal radial : PR）、基部担鰭骨の末端に接続する粒状の骨格である先端部担鰭骨（distal radial : DR）、そして先端部担鰭骨に接続し、胸ビレの大部分を支える骨格となる鰭条骨（fin ray : FR）である（[1]：図2）。

本研究では様々な魚類の胸ビレ骨格の観察、およびモデル生物であるゼブラフィッシュの発生過程の観察を通じて、多種多様な胸ビレ骨格の形態を網羅的に説明することができる反応拡散方程式によるモデルの確立を目指している。このようなモデルを確立することにより、現存する魚類の胸ビレ骨格を導き出せるだけでなく、胸ビレから前肢に代表されるようなより大規模な形態の進化[2]や将来生じ得る胸ビレ骨格の形態進化を予測することが可能になるかどうかを議論したい。

参考文献

[1] : Hamada H, Uemoto T and Tanaka Y, et al. “Pattern of fin rays along the antero-posterior axis based on their connection to distal radials (2019)”

[2] : Wood TWP and Nakamura T. “Problems in Fish-to-Tetrapod Transition: Genetic Expeditions Into Old Specimens (2018)”

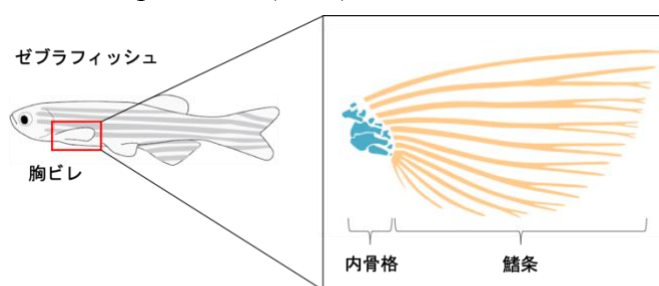


図1：ゼブラフィッシュの胸ビレ骨格とその概略

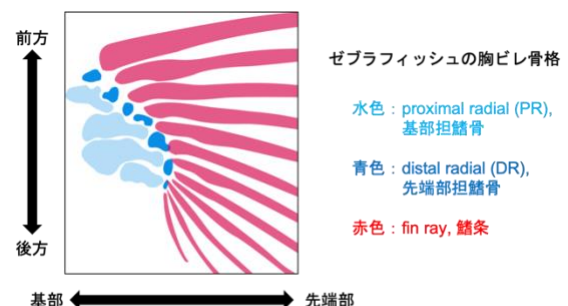


図2：条鰭類の胸ビレ骨格における3つの領域

造山帯に産する蛇紋岩のホウ素同位体のシステマティクス

○山田千夏・辻森樹^a・常青^b・木村純一^b

東北大学大学院理学研究科地学専攻

東北大学東北アジア研究センター^a

国立研究開発法人海洋研究開発機構^b

【研究背景・目的】 大陸プレートの下に海洋プレートが沈み込む場所(沈み込み帯：図 1)では、海洋プレート(スラブ)が地球内部に沈み込む際に脱水反応が起き、島弧火山下のマントルに水を放出する。この水がマントルに加わることで形成される“蛇紋岩”

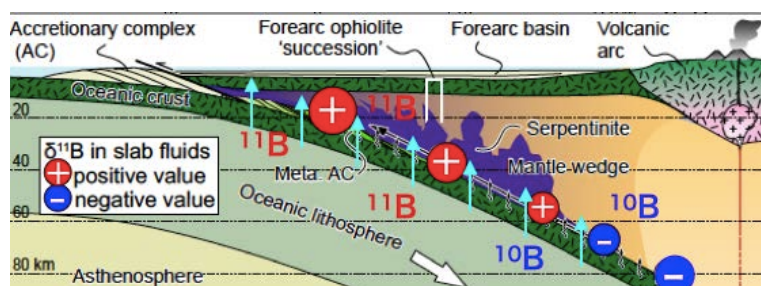


図 1 沈み込み帯におけるホウ素同位体の挙動

は、幅広い温度圧力条件で安定に存在できるため、水や元素を地球深部まで運ぶ重要な役割を担う[例えば 1,2]。そのため、沈み込み帯における蛇紋岩の形成環境や化学的特徴を知することは地球規模の物質循環を理解する鍵となる。しかし、蛇紋岩は単調な見た目や鉱物組合せであるため、一度地表に露出する形成場の判別が難しいという問題点がある。そこで、本研究では流体に移動しやすく、流体に関わる過程で同位体分別が起きやすいホウ素(^{10}B ・ ^{11}B)とその同位体比($\delta^{11}\text{B}$)に注目した。沈み込み帯の前弧域として代表的なカリフォルニア沿岸地域[3]、新潟県・糸魚川-青海地域[4]、岡山県・大佐山地域に産する蛇紋岩の局所ホウ素同位体分析を行い、沈み込み帯における蛇紋岩形成環境と B の挙動や蛇紋岩化に寄与した流体の起源を理解することを目的として研究を進めている。

【結果】 蛇紋岩の産状によって B 同位体組成の特徴は大きく二つに分けられる。① 低 $\delta^{11}\text{B}$ 値(^{10}B -rich)+蛇紋岩と共に高圧変成岩(地下深部の高圧環境を経験した岩石)を産するもの、② 高 $\delta^{11}\text{B}$ 値(^{11}B -rich)+高圧環境の証拠のない蛇紋岩である。これは ^{11}B が選択的に流体へ取り込まれることが関係する。初めに沈み込むスラブから放出される水には優先的に ^{11}B が移動し、より深部で放出される水は相対的に ^{10}B に富むため、その水の組成が蛇紋岩に反映されていると考えられる(図 1)。以上より、蛇紋岩の B 同位体組成は沈み込み帯における形成環境の指標となることが明らかになった。

【参考文献】 [1] Ulmer and Trommsdorff, 1995. *Science*, 268, 858–861. [2] Deschamps et al., 2013. *Lithos*, 178, 96–127. [3] Yamada et al., 2019a. *Lithos*, 334, 180–189. [4] Yamada et al., 2019b. *Journal of Mineralogical and Petrological Science*, 114, 290–295.

地質記録に基づく日本海溝南部の古津波規模の再検討

(Numerical study for magnitude of paleotsunami events of southern part of Japan Trench from geological records)

○檜垣 北斗

東北大学大学院理学研究科地学専攻

2011 年東北地方太平洋沖地震・津波を受け、津波堆積物を利用して過去の津波履歴を復元し、その規模と頻度を将来の津波リスク評価に役立てる試みが社会的にも注目されるようになった。日本海溝中部や北部に面した太平洋沿岸域では数多くの津波堆積物調査が行われ、過去数千年間の既往津波について規模や頻度の推定が試みられている[1]。一方、日本海溝南部の津波を対象とした研究は、沿岸部の都市化により堆積物の記録に乏しく、日本海溝南部を波源とする津波の規模と頻度については歴史記録・地質記録を用いた更なる検討が必要とされている。

日本海溝南部を波源とする津波に関しては、千葉県銚子市内の小畑池において、1677 年延宝房総沖津波をはじめ、過去 3000 年間に 3 回の日本海溝南部の巨大津波イベントによる津波堆積物が報告されている[2]。それによると、各津波堆積物の層厚や粒径にはそれぞれ異なる特徴があることが報告されており、これは、津波の規模を制約するうえで重要な要素となる可能性がある。一方、日本海溝南部の津波波源については、既往の津波の歴史史料や地質記録から推定される津波痕跡高を基に数値的検討が試みられている[3]。しかし、いずれの研究も津波の浸水計算による評価にとどまっており、津波による土砂移動過程は考慮されていない。

本発表では、非線形長波理論の有限差分法による数値モデルと組み合わせた土砂移動モデルを小畑池の津波堆積物に適用し、日本海溝南部の各津波イベントについて波源断層の制約を行う。今回は、各津波堆積物の粒径を考慮し、2 種類の粒径（中粒砂、粗粒砂）を使用して挙動を解析した。

土砂移動計算の解析結果は、津波堆積物の層厚が、粒径や断層の滑り量の変化を敏感に反映し、層厚に関わらず、日本海溝南部の各津波イベントの断層規模はほぼ同一であることを明らかにした。本結果は、過去の津波による津波堆積物の有無や層厚、粒径が、詳細な歴史記録が存在しない歴史/先史時代の津波の波源断層パラメータの推定に有効な制約を与えることができる可能性を示唆する。

参考文献

- [1] 澤井祐紀, 2017, 東北地方太平洋側における古津波堆積物の研究. 地質雑, **123**, 819-830.
- [2] 檜垣北斗, 2018, 千葉県銚子市の過去 2000 年間の古津波履歴. 東北大学理学部地圏環境科学科卒業論文, 54p.
- [3] Yanagisawa, H., Goto, K., Sugawara, D., Kanamaru, K., Iwamoto, N. and Takamori, Y., 2016, Tsunami earthquake can occur elsewhere along the Japan trench—Historical and geological evidence for the 1677 earthquake and tsunami. J. Geophys. Res. Solid Earth, **121**, 3504–3516.

Epitaxial Growth of Bismuth Oxide and Oxyhalides Thin Films with Mist CVD at Atmospheric Pressure

○Zaichun Sun,^a Daichi Oka,^a Tomoteru Fukumura^{a,b}

^aDepartment of Chemistry, Graduate of Science, Tohoku University

^bAdvanced Institute for Materials Research & Core Research Cluster, Tohoku University

Bismuth oxides and oxyhalides are semiconductors promising for electrical and optical applications [1,2]. For example, metastable β -Bi₂O₃ with a tunnel-like crystal structure shows excellent photocatalytic activity [3], while layered BiOX ($X = \text{Cl, Br, I}$) has a tunable bandgap from 1.8 to 3.3 eV depending on the halogen composition, enabling to harvest light from visible to ultraviolet region [2]. Although single crystals are necessary to investigate their physical properties and full potential, only polycrystals and nanocrystals have been reported for β -Bi₂O₃ and BiOX due to the volatility of bismuth. Thin film epitaxy is a good approach to tackle this issue, where single crystal thin films are grown on suitable template substrates at relatively low temperature. In this study, we grew epitaxial thin films of β -Bi₂O₃ and BiOX and investigated their physical properties.

β -Bi₂O₃ and BiOX epitaxial thin films were grown by mist chemical vapor deposition (CVD), which is a facile solution process at ambient pressure (Fig. 1). N,N-dimethylformamide solution of precursors was nebulized into microscale mists and transferred onto the heated substrates by N₂ gas. While β -Bi₂O₃ thin film was grown on α -Al₂O₃ (0001) substrate from bismuth (III) 2-ethylhexanoate, BiOX thin films were grown on SrTiO₃ (100) substrates from corresponding BiX₃.

Both β -Bi₂O₃ and BiOX epitaxial thin films with high crystallinity were successfully grown at optimum conditions. Although β -Bi₂O₃ thin film easily aggregated at high growth temperatures, the flat thin films were obtained by two-step crystallization in solid phase [4]. On the other hand, atomically flat surface reflecting the layered structure was observed for the BiOX epitaxial thin films. Detail properties are to be investigated on the high-quality epitaxial films.

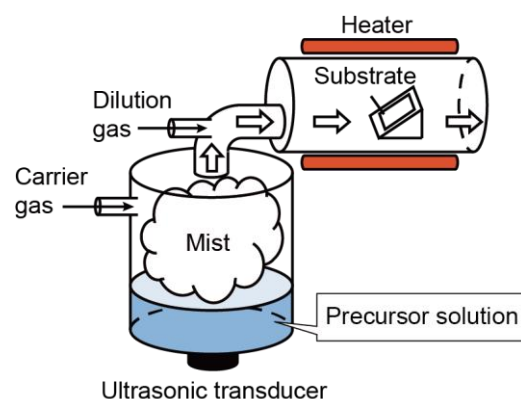


Fig. 1. Schematic image of mist CVD

Reference: [1] *Bismuth-Containing Compounds* ed. by H. Li and Z. Wang (Springer, 2013). [2] S. Swetha *et al.*, *ChemSusChem* **2017**, 10, 3001. [3] H. Cheng *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2010**, 12, 15468. [4] Z. Sun *et al.*, *Cryst. Growth Des.* **2019**, 19, 7170.

Y75273 LL3 コンドライトに含まれる 多層コンドリュールリムの形成プロセス

○橋本幸菜・中村智樹・松本恵^a

東北大学大学院理学研究科地学専攻^a

【研究背景】

地球に多く飛来するコンドライト隕石は、コンドリュール、CAI、それらの隙間を埋めるマトリクスで構成されている。コンドリュールは、mm サイズの球粒状のケイ酸塩鉱物で、コンドライトに集積する前に前駆物質が星雲中で短時間の加熱を受け冷却し形成したと考えられている。コンドリュールはしばしば細粒の物質からなるリムに囲まれており、その成因として主に2説が提唱されている。一つ目は星雲中でコンドリュール表面にダストが集積して形成したとする説^[1]、二つ目は隕石母天体で形成したとする説^[2]である。母天体説は、コンドリュールが隕石母天体に集積したのち、インパクトによって破碎され再集積し、コンドリュールの周りに残ったマトリクスの付着物がリムとして残るとする説である。この二説は未だ論争中である。個々のコンドリュールリムの詳細な研究は、星雲及び隕石母天体での複雑な固体物質進化過程を理解するうえで重要である。これまでコンドリュールリムの先行研究で観察された隕石の多くは、集積後に熱変成や水質変成を受け集積時の情報が失われている。そこで本研究では、二次的な変成作用の影響が極めて小さい Y75273 隕石のコンドリュールリムについての詳細な観察・組成分析を行い、リムの起源や形成環境について考察を行った。

【結果・考察】

Y75273 隕石では、5層のリムを持つコンドリュールが一つ、1層のリムを持つコンドリュールが多数観察された。多層リムを鉱物の相対存在度、粒径、組成等で 1-5th layer に分類を行った。1-4th layer は、コンドリュールを滑らかに囲む溶融・冷却を経験したような明瞭な境界が観察され、各レイヤーの鉱物組み合わせは類似していたが構成鉱物の存在比は異なっていた。このことから、多層リムは鉱物の存在比が異なるダストがコンドリュール表面に付着し、星雲中で浮遊した状態で加熱を受けて形成した可能性が高い。また、5th layer と単層リムはどちらも不規則な表面形状をしており、1-4th layer とは異なる化学組成を持つことから、両者は同一物質で隕石母天体が破碎される際にコンドリュールの周りに残ったマトリクスの付着物であると考えられる。以上のことより、星雲説と母天体説の両者が本サンプルの多層コンドリュールリムの形成に関与していることが示唆された。

【参考文献】

- [1] Metzler K., Bischoff A., and Stöffler D. (1992) *Geochimica Cosmochimica. Acta*, 56, 2873–2897.
- [2] Tomeoka K. and Ohnishi I. (2015) *Geochimica Cosmochimica. Acta*, 164, 543–555.

マカクザル内側前頭皮質の機能解剖学 —扁桃体及び側坐核への投射解析

Rintaro Yoshino^a, Kei Kimura^b, Soushi Tanabe^b, Kenichi Inoue^b, Ken-ichiro Tsutui^a

東北大学生命科学研究科脳神経システム分野^a

京都大学霊長類研究所統合脳システム分野^b

霊長類の内側前頭皮質はブロードマン脳領野の 10, 14 野および前部帯状皮質の 24, 25, 32 野によって構成されており、認知および情動プロセスの制御に深く関与していることが知られている。また情動処理において、内側前頭皮質は異なる機能をもつ複数の領域に分けることができると考えられている。そこで今回我々は、これらの異なる機能的特徴をもつ領域には、解剖学的にどのような違いが存在するのかを調べるため、情動処理において特に報酬情報と罰情報に重要とされる腹側線条体(側坐核) および扁桃体の内側前頭皮質との結合関係に着目した。

これまでのマカクザルを用いたトレーシング実験によってまた内側前頭皮質のうち、前部帯状皮質は特に側坐核と扁桃体に神経投射を送っていることが明らかになった。しかしながら、使用された化学トレーサーの性能などの問題から、各ブロードマン領域間の違いは分からなかった。そこで今回我々は側坐核と扁桃体を同時に対象とした逆行性神経トレーシング実験を行い、内側前頭皮質の標識細胞の分布を解析することで側坐核投射領域および扁桃体投射領域を同時に比較した。この実験で用いた京都大学霊長類研究所の開発した AAV ベクターは少量の注入でも十分な量の蛍光タンパク質による標識を得ることができ、発現量を等しくすることによって同一個体内でも側坐核投射領域と扁桃体投射領域が比較可能である。

本研究では異なる蛍光タンパク質(AcGFP あるいは mK02)をエンコードした上述の AAV ベクターをマカクザルの同側の側坐核と扁桃体にそれぞれ注入し、その後免疫抗体染色法を用いて細胞構築に基づき領域分けを行いそれぞれの領域について標識細胞の総数および密度を調べた。内側前頭皮質の各領域について細胞密度を計算したところ、側坐核投射細胞は 32 野、14 野および 25 野で高かったのに対し、扁桃体投射細胞は 14 野および 25 野、24c 野で高かった。これらの標識細胞は基本的に深層に分布していたが、24a、32 は表層にも側坐核投射細胞がみられ、25 野、14 野尾部では表層に扁桃体及び側坐核投射細胞が観察された。二重標識細胞の細胞分布について解析したところ、二重標識細胞は 25 野尾側部および 14 野尾側部にのみ局在していた。

本研究の結果、前部帯状皮質の膝前部と膝下部で高密度の標識細胞が観察された。特に膝前部において報酬など正の情動情報と関係の深い側坐核と結合が強く、一方膝下部は負の情動情報と関係の深い扁桃体はと強く結合しており、特に膝下部の尾部では二重標識細胞が比較的多く観察された。また膝下部内部において、背側部は側坐核にのみ投射するのに対し、腹側部は扁桃体と側坐核両方にも投射していた。これらの結果から、内側前頭皮質は前頭葉における情動的認知機能の制御を行う主要な領域であると考えられる。

機械学習の分子ダイナミクスへの応用： ～レーザー誘起の分子3次元整列制御～

○難波 知太郎・大槻 幸義^a

東北大学大学院理学研究科化学専攻^a

【序】「分子の向き」を揃えること（分子整列）ができれば分子座標系での観測や操作が可能になる。立体化学の観点からの重要性はもちろんのこと、化学変化を分子構造の実時間変化としてとらえる「分子動画」においても基盤の技術である。レーザーパルスは強電場を正確なタイミングで分子に印加できるため分子整列制御には最も有効であると考えられている。しかし、分子は一般に非対称コマで近似されるため、3つの回転軸を揃える必要があり、レーザーパルス（偏光）の方向やタイミングに関しては議論が分かれている。この疑問に答えるために、我々は量子最適制御シミュレーションを用いて、互いに直交する直線偏光パルス列が分子の3次元整列に最適であることを報告した[1]。更に、最適化に伴う大きな計算コストを回避するため[2]に①典型的な条件の下での最適化、②効果的なパルスパラメータの抽出、③パラメータの機械学習によるスクリーニング・最適化、という実用的な制御スキームを提案している。本研究では特に③のステップに着目し、非対称コマ分子である SO_2 を例に、機械学習を用いて少ない計算回数（約 1/10 程度）で様々な温度での3次元整列度合いを予測する。

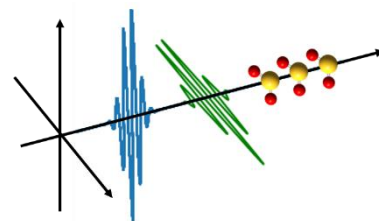


図1 互いに直交する
ダブルパルスの模式図

【結果・考察】最適化の結果を踏まえ、互いに直交するダブルパルス(図1)を仮定する。2つのパルスの時間幅を 80 fs、全フルエンスを 1.0 J/cm^2 に固定すると、パルスパラメータは遅延時間とフルエンス割合の2つとなる。横軸を遅延時間（120 点）、縦軸をフルエンス割合（50 点）として3次元整列度合いをプロットしたもの（図2の最大値分布図）は各温度における制御機構を俯瞰的に表す。機械学習を用いることで、1 K の最大値分布図においては、600 点(全体の 1/10)から分布図を再現できた。また、4つの回転温度の結果を訓練データとし、1~10 K の各温度に対しても同様の分布図を作成した。その結果、初期熱分布の状態数が 12（約 1.6 K、図2）を超えると最適なパルス遅延時間が大きく変化することを見出した。

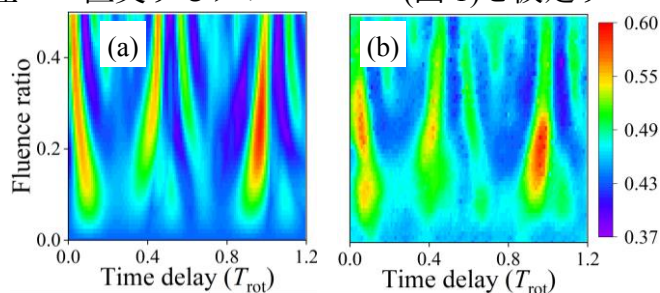


図2 1.6 K における最大値分布図 (a)計算によって得られた分布図 (b)機械学習によって再現された分布図

[1] M. Yoshida, N. Takemoto, Y. Ohtsuki, Phys. Rev. A 98, 053434 (2018).

[2] Y. Ohtsuki, T. Namba, J. Chem. Phys. 151, 164107 (2019).

人口減少社会における都市圏の空間構造の定量的分析

○清水遼^a・磯田弦^b・関根良平^c・中谷友樹^c

東北大学理学部地圏環境科学科^a

東北大学大学院理学研究科地学専攻^b

東北大学大学院環境科学研究科先端環境創成学専攻^c

日本は今世紀に入り人口減少社会に転じ、農村地域に限らず、多くの都市圏においても人口が減少傾向にある。そのような中、生活関連基盤の維持等をはかるため集約型都市構造(コンパクトシティ)を基本とする国土形成が提唱されるようになった。実際、多くの都市圏において郊外市町村よりも中心都市に人口が相対的に集中する傾向にあるといわれている[1]。一方で、人口減少と関連し、空き家、空き地の増加にみられる都市の低密度化「都市のスポンジ化」や、郊外地域における無秩序な都市開発「スプロール現象」の継続も指摘されている[2]。本研究では、中心部と郊外部で構成される109の大都市雇用圏[3]を対象に、人口動態と市街地の評価をクロス集計することによって都市圏の空間構造変化による分類を行った。また、低密度化やスプロールといった都市内に現れる空間特性を定量化し、各類型にみられる一般的な傾向について検討した。

空間構造変化による類型化の結果、人口は中心部に集中しているにも関わらず、郊外では市街地の面的拡大が継続しているといった空間構造の「ミスマッチ」が起こっているとされる「c型」に最も多く分類された(図1)。そして、都市圏の空間特性に関する指標群を算出することで、このような「ミスマッチ」は、形態的なスプロール化や空き家率の増加にみられるスポンジ化を同時にもたらし、行政サービスの効率化を阻害していることが示唆された。市街地の低密度化が進む都市圏ではこの傾向が特に強くなる。

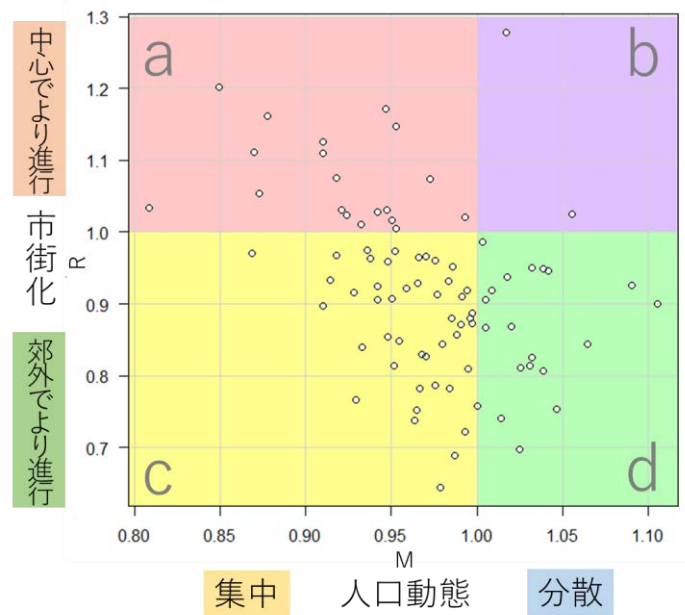


図1 市街地拡大都市圏の空間構造指標による散布図

参考文献

- [1] 神田兵庫 2019. 人口減少下における日本の都市構造の変遷. 東北大学大学院理学研究科修士論文.
- [2] 清水裕之 2015. 標準地域3次メッシュを用いた日本の国土の土地利用の変化と人口・世帯変化の観察と類型化—都市的土地利用に着目して—. 都市計画論文集 50-1: 107-117.
- [3] 金本良嗣・徳岡一幸 2002. 日本の都市圏設定基準. 応用地域学研究 7: 1-15.

マントル地球ニュートリノ直接観測に向けた
海洋底反ニュートリノ検出器の研究開発

酒井汰一^{A,B}, 井上邦雄^B, 渡辺寛子^B, William McDonough^{C,D}

上木賢太^E, 阿部なつ江^E, 櫻井紀旭^E, 許正憲^E, 荒木英一郎^E, 笠谷貴史^E, 吉田弘^E

東北大学理学部物理学科^A 東北大学ニュートリノ科学研究センター^B, 東北大学理学研究科^C,
メリーランド大学^D, 海洋研究開発機構^E

地球内放射性物質(^{238}U , ^{232}Th 等)起源の反電子ニュートリノ^{※1}(地球ニュートリノ)の観測は、放射性物質質量やその崩壊による発熱量に焼き直すことができ、地球ダイナミクスを司る地球内熱量の理解に重要な観測量を与えることができる。2005 年の KamLAND^{※2}による世界初観測以降、観測精度の向上により地球科学的知見が得られるレベルに達している。しかし、現在稼働中、計画中の大陸上の検出器では観測されるニュートリノの約 70%が地殻由来の反ニュートリノであり、より深く謎の多いマントルの情報を得ることは難しい。(図 1)

海洋底反ニュートリノ検出器(Ocean Bottom Detector)は、地殻がより薄く U,Th の密度の小さい海洋で観測することによりマントル由来の地球ニュートリノの直接観測を目指すアイデアであり、地球深部の内部構造の解明に不可欠な観測値を与えることが期待される。また、大陸上の検出器の主要なバックグラウンド源である原子炉から離れることができ、移動式のため多地点で観測できるといった独自の特徴がある。

海底で観測するアイデアは 15 年前にハワイ大学を中心に Hanohano という検出器として発案されたが、検出器の実現には至らなかった。(図 2)しかし 2019 年より

東北大と海洋研究開発機構の共同研究がスタートし、大型研究

の実現に向けて動き出した。最終目標である 10-50kt の検出器に向けて現在は 10t のプロトタイプ検出器のデザインを進めている。プロトタイプ検出器では、必要技術のデモンストレーションや海中環境の測定を行う。本講演ではシミュレーションに基づいた検出器デザインについて発表する。

※1 ニュートリノ：素粒子の一種。極端に軽く電荷を持たない。

※2 KamLAND：東北大学ニュートリノ科学センターが主導する反電子ニュートリノ検出器

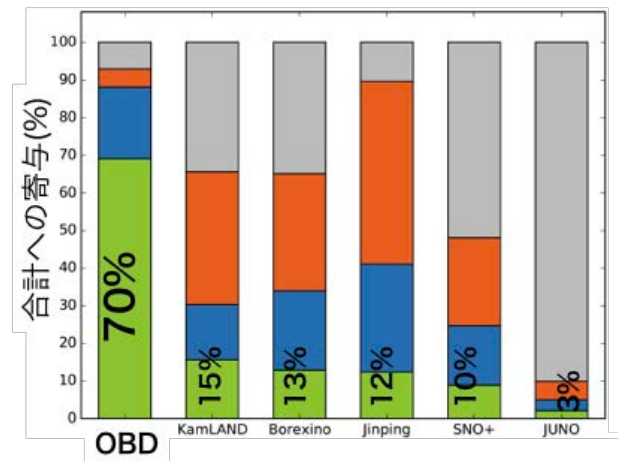


図 1 各検出器の各発生源の占める割合

灰色：原子炉ニュートリノ

オレンジ：500km 以内の地殻

青：その他の地殻

緑：マントル地球ニュートリノ

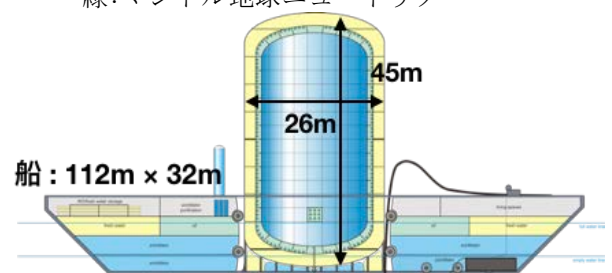


図 2 Hanohano のデザイン

多数の胚珠を受精できる花粉散布のモデル解析： 散布する花粉数と交配相手数どちらを増やすか？

○長谷川拓也・牧野崇司・酒井聡樹（東北大・院・生命科学）

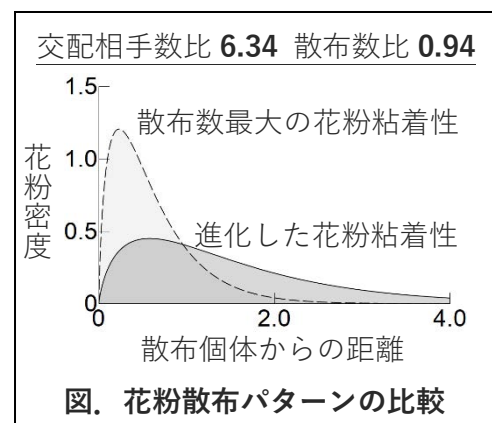
はじめに

花粉は動物や風、水に乗って運ばれ、運がよければ他花の柱頭にたどり着く。このような花粉散布の結果、植物の交配は極めて乱婚的である。動物媒花を持つ植物1個体が交配する相手の数は2から20以上にもなるという。それでは、植物は集団中の他個体にどのように花粉を分配するように進化するのだろうか。他個体に届ける花粉の総数を増やすことはもちろん重要だろう。しかしながら、その花粉をどのように分配するのか（すなわち、少数の相手それぞれに多数の花粉を届けるのか、多数の相手それぞれに少しずつ花粉を届けるのか）ということも、花粉親として次世代に残せる子の数に影響するのではないかな。

本研究では動物媒植物が交配相手の数を制御する戦略として、花粉粘着性に着目した。動物媒の花粉の中には表面に棘や粘着物質を持つものが知られる。これらの量的な変異が、花粉のポリネーター（送粉動物）への付着性（以下、花粉粘着性）に違いをもたらす。本研究では、数理モデルを用いた解析を行い、単に散布される花粉数を最大化する花粉粘着性が進化するのか、それとも散布数を犠牲にしてでも交配相手を増加・減少させる花粉粘着性が進化するのかを調べた。

主な結果と考察

- 粘着性の高い花粉ほど遠くまで散布され、多数の交配相手に少しずつ届けられた。
- 散布される花粉数を犠牲にしてでも交配相手を増やす花粉粘着性（散布される花粉数を最大化する花粉粘着性よりも高い花粉粘着性）が進化した [図]。
- ☆ 多数の交配相手に少しずつ届けられる花粉が進化するのは、送粉先の各花において、自分の花粉同士が有限の胚珠を巡って激しい競争をするのを避けるためである。そのため、植物はより多くの他個体に花粉を届ける戦略を進化させていると考えられる。



モデルの概要

ある粘着性の花粉を生産する野生型が占める集団を考える。そこに野生型とは異なる粘着性の花粉を生産する突然変異型を発生させる。続いて、ランダムウォークするポリネーターに集団内で採餌させる。粘着性の高い花粉ほど生産数は少ないが、訪花時にポリネーターに持ち出されやすく、持ち出された花粉は体表から離れにくい。全花粉の散布終了後、各花で胚珠を巡る花粉間競争が起きる。野生型花粉と突然変異型花粉が集団中で受精した種子数を比較して、どんな突然変異型の侵入も許さない野生型の花粉粘着性を求めた。

臨界点が1つある多項式の Misiurewicz パラメータの 満たす多項式

中山 拓実

東北大学大学院理学研究科数学専攻

数論的力学系とは、学問としての力学系で扱われる概念や考察対象、道具について、その数論的な側面や性質を研究する学問である。力学系の目標の1つは軌道の情報から力学系の情報を記述することであり、数論的力学系といった場合、取り扱われるトピックは多岐にわたっている。

本研究では1つの多項式に注目してその力学的、数論的な性質を考察する。写像を1つとして力学系の研究を行う場合、よく研究されているものに射影空間の多項式写像 $f_{c,d}(z) = z^d + c$ がある。以下、 $f_{c,d}^k$ は $f_{c,d}$ の k 回反復合成写像を表すものとする。 $f_{c,d}(z) = z^d + c$ の臨界点 $z = 0$ が真に前周期点となる、すなわち、ある自然数 m, n が存在して $f_{c,d}^{m+n}(0) = f_{c,d}^m(0)$ となるとき、そのようなパラメータ c を *Misiurewicz point* と呼ぶ。

Misiurewicz point は力学系において種々に研究されている対象であり、複素力学系では Mandelbrot 集合と関連がある。Mandelbrot 集合とは $f_{c,2}(z) = z^2 + c$ について $f_{c,2}^n(0)$ が $n \rightarrow \infty$ で有界となるような c の集合であり、Misiurewicz point との関連として、例えば Misiurewicz point はすべて Mandelbrot 集合の境界に含まれ、かつ境界で稠密であることが知られている。

数論的力学系においては、Misiurewicz point が真に満たす多項式 $G_{c,d}(m, n)$ が B. Hutz 及び A. Towsley により示されており ([2], Theorem 1.1.), その既約性が V. Goksel により研究されている ([1], Theorem 1.3, Corollary 1.1.).

$f_{c,d}(z) = z^d + c$ を、同じく $z = 0$ を臨界点にもつ多項式写像 $f_a(z) = az^d + 1$ に置き換えたとき、Misiurewicz point に対応するパラメータ a を *Misiurewicz パラメータ* という。本研究では Misiurewicz パラメータを与える多項式 $G_{f_a,d}(m, n)$ を定義し、その根 a における f_a による 0 の軌道の性質を得た。次はそれら定理の一部である。

定理 1 (主定理 2 の系). $G_{f_a,d}(m, n)$ は次の場合

- (1) $m \neq 0$ かつ $n = 1$ かつ $d = 2$ のとき.
- (2) $m \neq 0$ かつ $n = 2$ かつ d が素数のとき.

において $\mathbb{Q}$ 上既約である。

参考文献

- [1] V. Goksel, *On the orbit of a post-critically finite polynomial of the form $z^d + c$* , preprint (2019), arXiv:1806.01208v3,
- [2] B. Hutz and A. Towsley, *Misiurewicz points for polynomial maps and transversality*, New York Journal of Mathematics **21** (2015), 297–319, 1076-9803/2015,

Stochastic Axion Dark Matter in Axion Landscape

○中川 翔太・高橋 史宜・Wen Yin ^a

東北大学大学院理学研究科物理学専攻

Department of Physics, KAIST ^a

最近の観測結果によると、ダークマター (DM) は現在の宇宙のエネルギー密度のおよそ4分の1を占めている。その存在自体は様々な観測により確立しており、いくつかの性質が明らかになっている。DMは電氣的に中性であり、相互作用が弱く非常に安定である。また、宇宙の構造形成においては、主要な重力源として重要な役割を果たす。しかし、このような性質を満たす粒子は素粒子標準模型には存在しておらず、DMの正体は未解明である。

素粒子標準模型を超えた物理の1つである、弦理論により存在が予想されるDM候補としてアクシオンがある。アクシオンはスピン0のボーズ粒子であり、他の素粒子との相互作用が非常に弱い。弦理論から様々な質量を持った複数のアクシオンが生じる可能性が示唆されており、複雑なポテンシャルが形成される場合がある。これをAxion Landscapeという。

本研究では、Axion Landscape上でアクシオンがDMとなる可能性を調べた。既知のDM量を説明する必要があるため、アクシオン存在量の計算が重要である。アクシオン存在量は、ポテンシャルの形状と初期振幅に依存する。DMの安定性からアクシオンは非常に軽い必要がある。すなわち、極小値付近の曲率が小さなポテンシャルを持つアクシオンを考える。また、アクシオンはポテンシャルの極小値周りを、ある初期振幅で振動することでDMとなる。従って、存在量は振動の初期振幅に依存する。従来の研究ではアクシオンはランダムに位置すると考えて、初期振幅を与えることが多かった。一方で本研究では、インフレーション中の量子揺らぎによってアクシオンが確率的に振る舞う描像 [1] を採用し、初期振幅の評価を行う。

以上のセットアップに基づくと、従来のモデルに比べて重いアクシオンが可能となる。そのため、アクシオンと光子との相互作用を仮定すると、崩壊して光子を放出する。X線/ γ 線背景放射[†]の内、同定されていない寄与にその痕跡が含まれている可能性がある。現在までにその痕跡は発見されていないが、AMEGOなどの将来観測によってピークが見つかればアクシオンの質量が明らかになる可能性があり、素粒子物理及び宇宙物理の発展に大きく貢献する。

† 専門用語の説明

- ・インフレーション：ビッグバン宇宙論の問題を解決するために導入された、宇宙初期の加速膨張。現在の観測事実と矛盾しないため、現代宇宙論の理論的基礎となっている。
- ・X線/ γ 線背景放射：全天からほぼ等方に降り注いでいるX線/ γ 線。その大部分はクェーサーなどの活動銀河核から生じると考えられている。

参考文献

- [1] F. Takahashi, W. Yin, A. H. Guth, Phys. Rev. D 98, 015042 (2018)