

東北大学大学院 理学研究科・生命科学研究科  
理学・生命科学 2 研究科合同シンポジウム 2017  
～新学術領域における学生・若手研究者の連携～

発表要旨集

2017年2月17日(金) 9:00-

理学研究科合同C棟2階

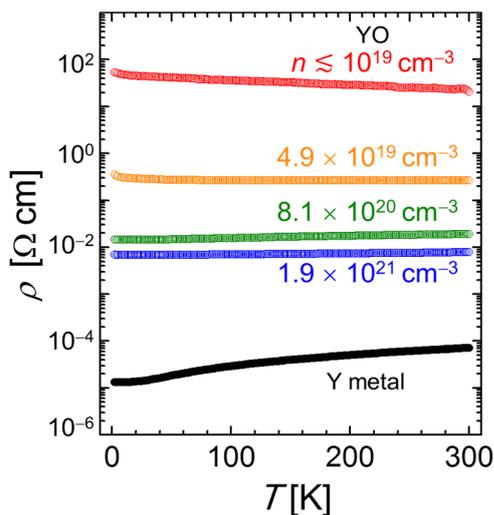
## Synthesis of Solid State Yttrium Monoxide

○Kenichi Kaminaga,<sup>1,2</sup> Ryosuke Sei,<sup>1,2</sup> Kouichi Hayashi,<sup>3</sup> Naohisa Happo,<sup>4</sup> Hiroo Tajiri,<sup>5</sup> Daichi Oka,<sup>1</sup> Tomoteru Fukumura,<sup>1</sup> and Tetsuya Hasegawa<sup>2</sup>

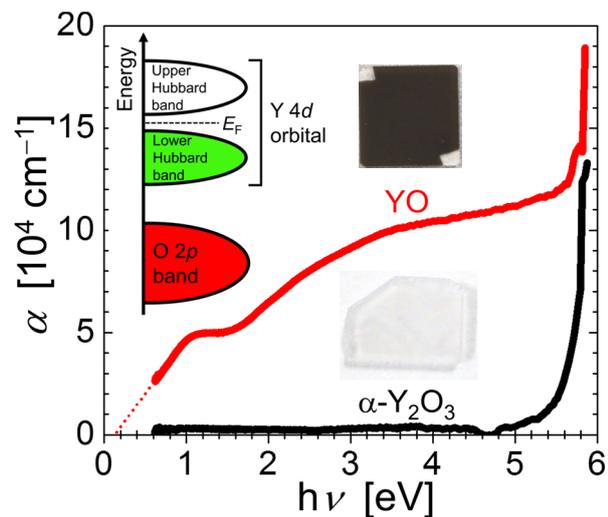
1. Tohoku Univ., 2. The Univ. Tokyo,  
3. Nagoya Institute of Tech., 4. Hiroshima City Univ., 5. JASRI

The most stable rare earth compounds are the oxides because of high reactivity of rare earth metals with oxygen. Rare earth ions in rare earth oxides hold typically the highly stable closed shell trivalent state with the general formula,  $R_2O_3$  [1]. For example, rare earth sesquioxides like  $Y_2O_3$  are known as widegap insulators with high permittivity, and the industrial applications for electronic functional materials have been limited such as insulating layer so far. On the other hand, rare earth monoxides with divalent cations have been rare: YO existed as gaseous phase [2], and only EuO and YbO were thermodynamically stable solid state rock salt monoxides [3].

In this study, solid state rock salt yttrium monoxide, YO, was synthesized in a form of **epitaxial thin film**<sup>\*1</sup> by **pulsed laser deposition method**<sup>\*2</sup> [4]. YO possesses unusual valence of  $Y^{2+}$  ([Kr]  $4d^1$ ). In stark contrast with  $Y_2O_3$ , YO was narrow gap semiconductor with dark-brown color (see inset of Fig. 2). The electrical conductivity was tunable from  $10^{-1}$  to  $10^3 \Omega^{-1}cm^{-1}$  by introducing oxygen vacancies as electron donor (Figure.1). The absorption spectral shape implies the character of **strongly correlated electron materials**<sup>\*3</sup> (Figure.2). YO is expected to serve as an electronic functional material, being different from insulating rare earth sesquioxides. Rare earth monoxides including YO will be new platform of functional rare earth oxides.



**Fig.1**  $\rho$ - $T$  curves of YO films with different carrier density at 300 K.  $\rho$ - $T$  curve for Y film is shown for reference.



**Fig.2** Absorption spectra of YO film and  $\alpha$ - $Y_2O_3$  films.

Insets show schematic band diagram of YO (left) and photographs of YO and  $\alpha$ - $Y_2O_3$  films.

### **Explanation of technical terms**

\*1 **Epitaxial thin film** is a single crystalline thin film grown on a substrate via the lattice match between thin film and substrate.

\*2 **Pulsed laser deposition method** is a physical vapor deposition technique where a high power pulsed laser beam is focused on a target of material inside vacuum chamber to deposit thin film.

\*3 **Strongly correlated electron materials** are compounds, in which the Coulomb repulsion between *d*- or *f*-electron plays a crucial role in their unusual electronic and magnetic properties such as Kondo effect, metal-insulator transition, superconductivity, and colossal magnetoresistance.

### **Reference**

- [1] G. Adachi *et al.*, *Chem. Rev.* **98**, 1479 (1998).
- [2] J. M. Badie *et al.*, *Chem. Phys. Lett.* **364**, 550 (2002).
- [3] J. M. Leger *et al.*, *J. Solid State Chem.* **36**, 261 (1981).
- [4] K. Kaminaga *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 122102 (2016).

## フラーレン超伝導体の電子相図

(東北大学大学院理学研究科 物理学専攻) ○松田 祐貴・平郡 諭・谷垣 勝己

グラファイトやダイヤモンドの同素体である  $C_{60}$  フラーレンは 1985 年に初めて実験的にその存在が実証された[1]。孤立分子の  $C_{60}$  はサッカーボール型の分子構造を持ち、この世界に存在する分子の中で最も高い対称性を示す。また超伝導(\*)は、その応用上のインパクトから物性物理における 1 つの大きなトピックとして研究されてきた。近年の鉄系超伝導体の発見[2]や、高压化における硫化水素の高温超伝導の発見[3]によりますます注目を集めている。フラーレン超伝導体(図 1)は 1991 年に発見された分子性超伝導体であり[4]、分子性物質の中では最高の  $T_c$ (\*)を示すことから盛んに研究されてきた。2008 年には新たな  $C_{60}$  フラーレン超伝導体  $Cs_3C_{60}$  が発見され、常圧下では超伝導を示さず圧力を加えて初めて超伝導が現れる点で、従来のフラーレン超伝導体とは異なる性質を持っている[5]。最近その背景には複雑な電子状態の存在があることが示唆された[6]。電気輸送現象は電子状態を知る上で極めて重要であるが、フラーレン超伝導体を示す強い嫌気性により、これまで詳しく調べられてこなかった。我々は実験的な障壁を克服し、電気輸送特性を系統的に測定することで(図 2)フラーレン超伝導体における電子相図を提案する。

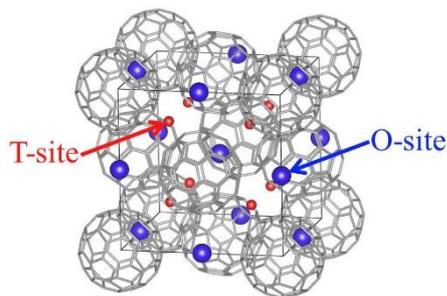


図 1: f.c.c.- $A_3C_{60}$  超伝導体( $A$ :アルカリ金属)の結晶構造。T-site, O-site は空隙で、ここにアルカリ金属が入り込む。

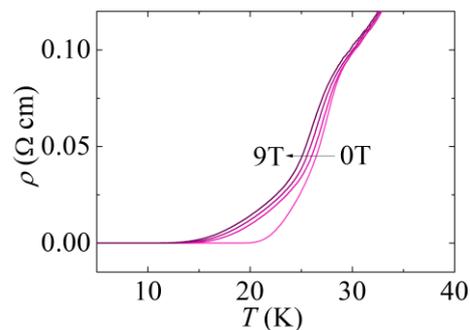


図 2: 超伝導転移近傍における  $Rb_{0.35}Cs_{2.65}C_{60}$  の電気抵抗率温度依存性。

## 専門用語の説明

- ・ 超伝導：ある温度以下で電気抵抗が厳密にゼロになる現象。
- ・  $T_c$ ：超伝導転移温度。この温度以下で超伝導が発現する。

## 参考文献

- [1] H. W. Kroto *et al.*, *Nature* **318**, 162 (1985).
- [2] Y. Kamihara *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296–3297 (2008).
- [3] A. P. Drozdov *et al.*, *Nature* **525**, 73–76 (2015).
- [4] A. F. Hebard *et al.*, *Nature* **350**, 600 (1991).
- [5] A. Y. Ganin *et al.*, *Nat. Mater.* **7**, 367 (2008).
- [6] R. H. Zadik *et al.*, *Sci. Adv.* **1**, e1500059 (2015).

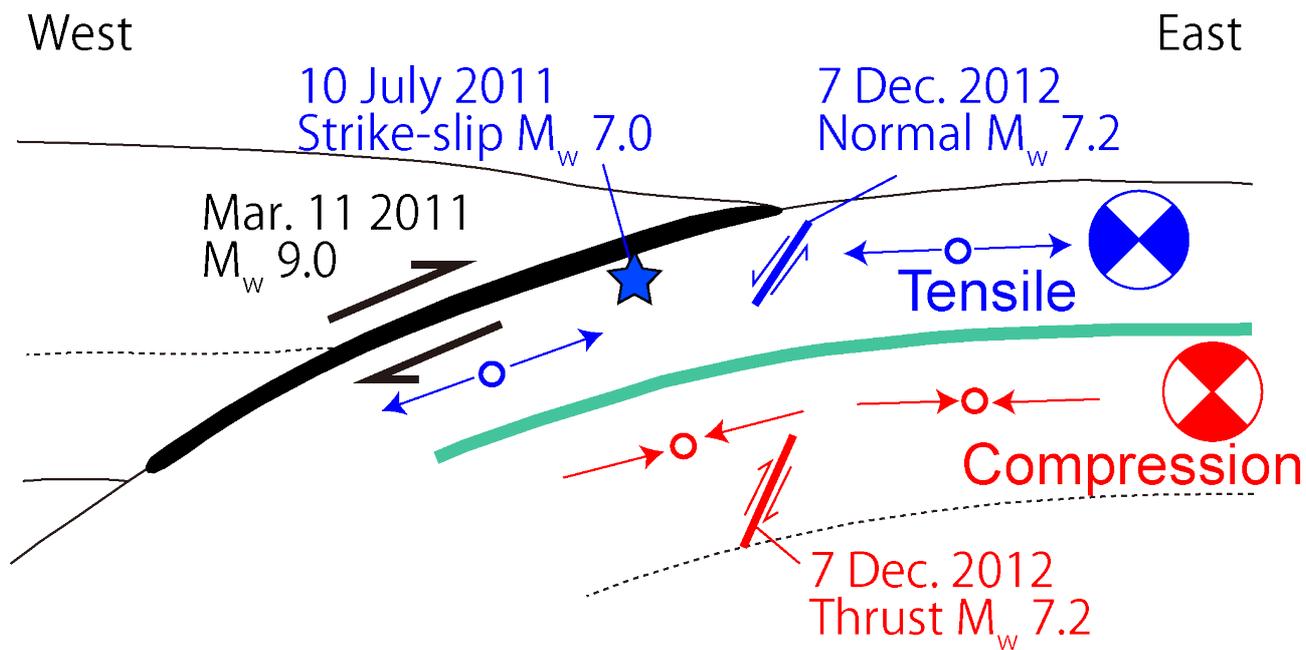
## 近地津波観測による 2011 年東北地方太平洋沖地震 震源域周辺における地震発生過程に関する研究

(東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻) ○久保田達矢・日野亮太・太田雄策・鈴木秀市  
(東京海洋大学学術研究院 海洋環境学部門) 稲津大祐

沖合で起こる地震に伴う津波は、地震による海底地殻変動が海水面を変位させることによって生じる。そのため、その波形を解析することで津波を生じさせた海底地殻変動場、さらには海底下の震源断層の運動(震源断層の面積、すべり量など)を推定できる。東北沖で発生する地震の震源断層モデルの推定について、これまでの多くの解析では沿岸の検潮記録や沿岸から数 10 km 以内の海域に係留された GPS 波浪計による海面高変動記録が用いられてきたが、これらは震央から 100 km 以上離れているため解析対象となる地震は十分な S/N 比の振幅の津波が得られる大規模なもの ( $M > 8$ ) に限られていた。しかし、特に震央に近い海域(数 10 km 以内)において小振幅の津波を高品位で捉えることができた場合にはより小規模な地震の震源モデルの推定が可能になる。また、東北日本沈み込み帯では海洋プレートの太平洋プレートが、北米プレート下に沈み込んでいるが、プレートどうしが接する海溝軸近傍では、太平洋プレートが沈み込み始める際に折り曲げられ、その浅部では東西方向に引張の、深部では圧縮の応力が生じることが知られている (Fig.1) [e.g., 1]。本研究では 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震(東北沖地震,  $M_w 9.0$ )の発生後に沈み込むプレート(スラブ)内部で起こった M7 程度の地震について、震源域の周辺に設置された海底圧力計により得られた津波波形記録から震源断層モデルを推定し、東北沖地震がスラブ内部の応力場に及ぼした影響を詳細に議論した。

2011 年 7 月 10 日に東北沖地震の本震時すべりが特に大きかった領域の近傍のスラブ内で、浅部の東西引張応力に対応する横ずれ断層型の発震機構をもつ地震 ( $M_w 7.0$ ) が発生した。津波波形からこの地震の震源断層モデルを推定したところ、断層下端の深さは、東北沖地震前のスラブ内応力の中立域の深さと同程度であったことから、この周辺におけるスラブ内地震の深さ分布は、東北沖地震の前後では大きく変化しなかったと考えられる [2]。

2012 年 12 月 7 日には日本海溝軸のごく近傍のスラブ内で深い震源を持つ逆断層型地震と浅い震源をもつ正断層型地震がほぼ同時に発生した。この連続する地震イベントについて津波波形解析に基づいて 2 つの地震の破壊過程を分離し、断層モデルを詳細に推定した。2 つの地震の断層の深さ範囲を東北沖地震前の地震活動と比較したところ、2011 年 7 月の地震とは異なり、逆断層、正断層型地震ともに発生する深さ範囲が有意に変化し、ともに深くなっていたことが明らかになった。この地震発生深さの変化の要因として、東北沖地震におけるプレート間固着の解放に伴ってスラブ内の応力場そのものが変化した可能性が考えられる。また、それに加え、東北沖地震後に、海底下のスラブ浅部に発達する断層クラックを通じて震源断層の周辺の間隙に水が流入(間隙流体, pore fluid)し、それによる水圧(間隙水圧, pore pressure)が断層面の法線応力を低下させたことで断層の破壊強度が低下し、より深い場所で地震が起こるようになった可能性も示唆される。



**Figure 1.** 沈み込むスラブの断面とスラブ内での応力場の模式図．スラブの沈み込みに伴う折れ曲がりにより，浅部には水平引張応力（青矢印）が，深部には圧縮応力（赤矢印）が生じ，その応力に対応したメカニズムを持つ地震が発生する．2つの応力場の間には，応力の向きが入れ替わる応力中立面（緑線）が存在する．本研究で解析対象とする地震の位置関係も示した．

### 専門用語の説明

- ・ S/N 比：シグナル（ここでは津波）とノイズ（海洋変動起因の成分など，津波とは関係のない成分）の比．S/N 比が大きいほどデータの信頼度は高い．
- ・ スラブ：海洋プレートのうち，大陸プレートの下に沈み込む（または沈み込んだ）部分のこと．
- ・ 応力：物体内部に考えた仮想的な面を通して及ぼされる単位面積当たりの力（単位は Pa）物体内部での力のかかり具合を示す．震源域のせん断応力（断層面に平行な方向に作用する応力）が断層の破壊強度より大きくなったときに地震が発生する．また断層の破壊強度は法線応力（断層面に垂直な方向の応力）に比例すると考えられている．

### 参考文献

- [1] Gamage, S. S. N., N. Umino, A. Hasegawa, and S. H. Kirby, Offshore double-planned shallow seismic zone in the NE Japan forearc region revealed by sP depth phases recorded by regional networks, *Geophys. J. Int.*, **178**, 195–214, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04048.x, 2009.
- [2] Kubota, T., R. Hino, D. Inazu, Y. Ito, and T. Iinuma, Complicated rupture process of the Mw 7.0 intraslab strike-slip earthquake in the Tohoku region on 10 July 2011 revealed by near-field pressure records, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 9733–9739, doi: 10.1002/2015GL066101, 2015.

## 特異な複素平面代数曲線に対応するトロピカル平面代数曲線について (概要)

東北大学大学院 理学研究科 数学専攻 博士2年 高橋卓大

トロピカル代数上の2変数多項式, つまり

$$\tau(x, y) = \max_{\text{有限}} \{a_{kl} + kx + ly\}, \quad a_{kl} \in \mathbb{R}$$

という形の多項式を考える. このような多項式をトロピカル多項式と呼ぶ.

トロピカル多項式の零点集合に対応するものとして, 集合

$$V(\tau) := \{p \in \mathbb{R}^2; \tau \text{ は } p \text{ で微分不可能}\}$$

を考える. この集合を  $\tau$  の定めるトロピカル曲線と呼ぶ. トロピカル曲線は図1のように区分線形な図形になる.

平面曲線  $X \subset (\mathbb{C}^*)^2 := (\mathbb{C} \setminus \{0\})^2$  に対応するトロピカル曲線を次のように構成する. パラメータ  $t \in \mathbb{R}_{>1}$  に対して, 写像

$$\text{Log}_t : (\mathbb{C}^*)^2 \rightarrow \mathbb{R}^2; (z, w) \mapsto (\log_t |z|, \log_t |w|)$$

による  $X$  の像  $A_t := \text{Log}_t(X) \subset \mathbb{R}^2$  を  $X$  のアメーバという. この  $t \rightarrow \infty$  とした極限  $\lim_{t \rightarrow \infty} A_t$  が存在し, この集合はトロピカル曲線となることが知られている. この極限を  $X$  に対応するトロピカル曲線と呼ぶ.

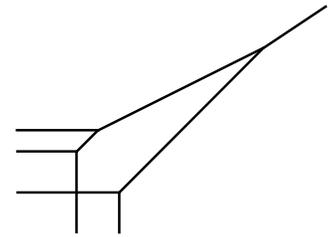


図1 トロピカル曲線の例

各頂点に隣接する辺が3本であるトロピカル曲線を単純なトロピカル曲線と呼ぶことにする. 単純なトロピカル曲線の各頂点  $V$  に対して, 重複度  $m(V)$  を  $m(V) := w_1 w_2 |v_1 \wedge v_2|$  で定める [2]. 但し  $i = 1, 2, 3$  に対し  $v_i$  は  $V$  に隣接する辺の  $V$  を始点とする方向ベクトル,  $w_i$  は各辺の重みと呼ばれる整数 (図2を参照).

特異な平面曲線に対応するようなトロピカル曲線に関して, Mikhalkin[1] では滑らかな平面曲線について, Mikhalkin[2] では  $A_1$  型特異点のみを持つ平面曲線について, Shustin[3] では  $A_2$  型特異点のみを持つ平面曲線について考察されている. 論文 [2, 3] では, これらの結果を応用して代数曲面上の特異曲線の数え上げ問題を偏極トーリック曲面の場合において解決している.

それぞれの結果を単純なトロピカル曲線に制限すると, 重複度3の頂点には  $A_1$  型特異点 [2], 重複度5の頂点には  $A_2$  型特異点 [3] が対応することが分かる.

この結果の  $A_3$  型特異点に対応するものが本講演の主定理である:

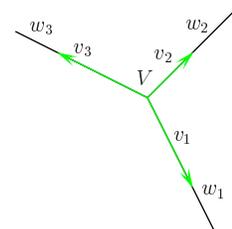


図2 頂点Vの周り

**Theorem.(T.)** 単純なトロピカル曲線の重複度7の頂点は  $A_3$  特異点に対応する.  $\square$

用語の説明.

- 平面 (代数) 曲線 : 2変数多項式  $F(z, w) = \sum_{\text{有限}} c_{ij} z^i w^j$  に対し, 零点集合  $V(F) := \{(z, w) \in (\mathbb{C}^*)^2; F(z, w) = 0\}$  を  $F$  の定める平面 (代数) 曲線と呼ぶ. ここで  $\mathbb{C}^* := \mathbb{C} \setminus \{0\}$ .
- $A_k$  型特異点 : 平面曲線  $C = \{F(z, w) = 0\}$  の部分集合  $\text{Sing}(C) = \{F = F_z = F_w = 0\} \subset C$  の点を特異点という. 特異点が存在しないとき  $C$  は滑らかであるという. 特異点  $p$  の周りで  $C$  が局所的に  $\{(u, v) \in \mathbb{C}^2; u^2 + v^{k+1} = 0\}$  と表せるとき  $p \in C$  は  $A_k$  型特異点であるという.
- トロピカル代数 : 実数全体の集合  $\mathbb{R}$  に加法として  $\max$ , 乗法として  $+$  を与えたもの  $(\mathbb{R}; \max, +)$  をトロピカル代数またはマックスプラス代数という.

### REFERENCES

- [1] G.Mikhalkin, *Decomposition into pair-of-pants for complex algebraic hypersurfaces*, Topology, 43(6) (2004), 1035–1065.
- [2] G.Mikhalkin, *Enumerative tropical algebraic geometry in  $\mathbb{R}^2$* , J. Amer. Math. Soc., 18(2) (2005), 313–377.
- [3] E.Shustin, *A tropical approach to enumerative geometry*, Algebra i Analiz 17(2) (2005), 170–214

TAO Chen

Recently, a new field called *Discrete Differential Geometry* has arisen from the study on discrete mathematical objects. One of the motivation is to find good approximations of the smooth surfaces<sup>[1]</sup>. Another important viewpoint comes from a correspondence between the discrete nets with transformations and the discrete integrable systems<sup>[2]</sup>.

In this talk, we are going to introduce a theory of discrete surfaces on 3-valent graphs<sup>[3]</sup>, which is after the work of Motoko Kotani, Hisashi Naito and Toshiaki Omori. The motivation is to develop a discrete surface theory for a given discrete object without any smooth surface to be approximated. The main part of this talk is to discuss the convergence of discrete surfaces. We provide a method to construct a sequence of discrete surfaces and prove it actually forms a Cauchy sequence in Hausdorff topology. It goes as following:

Let  $X = (V, E)$  be a 3-valent graph and  $\{X_i = (V_i, E_i)\}$  be a sequence such that

$$X = X_0 \subset X_1 \subset X_2 \subset \cdots \subset X_i \subset \cdots$$

where  $X_i$  is the Goldberg-Coxeter subdivision<sup>[4]</sup> of  $X_0$ .

We put

$$F_i : X_i \rightarrow M_i \subset \mathbb{E}^3$$

a discrete harmonic map and satisfies  $F_i|_{V_{i-1}} = F_{i-1}|_{V_{i-1}}$ . Then we obtain a sequence  $\{M_i\}_{i=0}^\infty$  of discrete surfaces.

**Theorem.** *Let  $\{M_i\}_{i=0}^\infty$  be a sequence of discrete surfaces in  $\mathbb{E}^3$  provided by the construction above. Then  $\{M_i\}_{i=0}^\infty$  forms a Cauchy sequence in Hausdorff topology.*

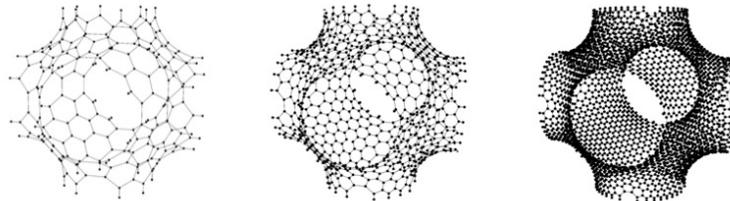


Figure 1: Numerical computations of Mackey Crystal as application

## References

- [1] Pinkall, Ulrich; Polthier, Konrad *Computing discrete minimal surfaces and their conjugates*. Experiment. Math. 2 (1993), no. 1,
- [2] Bobenko, Alexander I ; Suris, Yuri B. *Discrete differential geometry. Integrable structure*. Graduate Studies in Mathematics, 98. American Mathematical Society, Providence, RI, 2008.
- [3] Kotani, Motoko; Naito, Hisashi; Omori, T *A study of discrete surfaces. preprint*.
- [4] Deza, Michel; Dutour Sikirić, Mathieu *Geometry of chemical graphs: polycycles and two-faced maps*. Encyclopedia of Mathematics and its Applications, 119. Cambridge University Press, Cambridge, 2008.

# Large scale structure evolution inferred from quasar clustering at redshift 4 with Subaru Hyper Suprime-Cam wide field imaging.

Wanqiu HE\*<sup>1</sup> and Masayuki AKIYAMA†<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Astronomical Institute, Tohoku University, Aramaki, Aoba, Sendai, Japan 980-8578

January 30, 2017

How structure forms and evolves is one of the biggest unsolved question in astronomy field. Current understanding is that the galaxies which form at the rare density peaks in early universe will evolve into the most massive galaxies at today<sup>[4]</sup>. Such galaxies are assumed to evolve with the central supermassive black hole (SMBH) by merger hypothesis<sup>[2]</sup>. Observation also finds BH mass has a series of scaling relations with host galaxy properties, such as bulge mass, bulge luminosity and velocity dispersion<sup>[3]</sup>. Meanwhile, based on merger hypothesis, quasar will appear at the end of one merger duration when feedback from BH is strong enough to blow away surrounding feed gas<sup>[2]</sup>. Thus quasar may be a good tracer of co-evolution between SMBH and massive galaxies.

Clustering analysis is a good method to investigate quasar association with underlying dark matter and galaxies. Density peaks are predicted to evolve into dark matter halos (DMH)<sup>[5]</sup>, where all mass is gravitationally bound within the region with density 200 times higher than mean universe density  $\rho/\bar{\rho} \sim 200$ . At early time, density peaks are rare which will evolve into massive DMHs. Such massive DMHs are found to cluster more strongly than less massive ones from simulation<sup>[7]</sup>. By connecting clustering of DMHs with galaxies or quasars, it can get a clear picture of large scale structure evolution especially at high redshift. Observation already finds that luminous galaxies will strongly cluster in massive DMHs at high redshift<sup>[1]</sup>. Then where quasars locate at this cosmology picture can help set constraints on structure formalism.

Based on this motivation, we examine the clustering of a sample of 1177 faint  $z \sim 4$  quasars with  $m_i < 23.5$  which are photometrically selected from Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC) S16A wide2 data release which covers around 180 sq.deg. From quasar two point angular auto correlation function (ACF), we estimate a bias factor  $8.68_{-2.26}^{+1.78}$  on scale 18-1015 arcsec with a host dark matter halo (DMH) mass  $1.3 \times 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$ . Since quasar sample are limited, we also attempt to measure the quasar bias factor from quasar-LBG cross correlation (CCF) by constructing a sample of 25407 bright  $z \sim 4$  LBGs with  $m_i < 24.5$  from the same data release. It yields a lower bias factor  $6.01_{-0.85}^{+0.82}$  on scale 10-1000 arcsec. The inferred DMH mass is  $3.9 \times 10^{12} h^{-1} M_{\odot}$ . Comparison with ACF of SDSS bright quasars<sup>[6]</sup> suggests no or weak clustering dependence on quasar luminosity. Meanwhile, CCF is not as strong as expected from quasar ACF. Such discrepancy indicates a weak association between quasars and bright galaxies at massive DMH center.

---

\*email: he.wanqiu@astr.tohoku.ac.jp

†email: akiyama@astr.tohoku.ac.jp

## References

- [1] Allen, P. D. et al. 2005, MNRAS, 360, 1244.
- [2] Hopkins P. F. et al. 2006, ApJS, 163, 1.
- [3] Kormendy, J. & Ho, L. C. 2013, ARAA, 51, 511.
- [4] Mo, Houjun, Frank Van den Bosch, & Simon White. 2010, Galaxy formation and evolution.
- [5] Press, W. H., & Schechter, P. 1974, ApJ, 187, 425.
- [6] Shen, Y. et al. 2009, ApJ, 697, 1656.
- [7] Sheth, R. K., & Tormen, G. 1999, MNRAS, 308, 119.

# O07

## What could the difference in intermolecular interactions between $\text{H}_2\text{S}\cdots\text{H}_2\text{S}$ and $\text{H}_2\text{O}\cdots\text{H}_2\text{O}$ bring about?

(東北大学大学院理学研究科 化学専攻) ○ Dandan Wang · Asuka Fujii

Water,  $\text{H}_2\text{O}$ , is one of the most familiar molecules for human being, and it is also one of the simplest and most stable molecules in the earth environment. Water is a more or less inert molecule, whereas, paradoxically, it possesses exceptionally rich ways to bond to other molecules, and consequently displays very subtle and variable properties.<sup>[1,2]</sup> Therefore, water plays an essential role in biochemical reactions, and water is a vital and necessary condition for life. It has been well known that all the extraordinary properties of water are related to its intermolecular interaction, that is hydrogen bonds (H-bonds). However, it is still a challenge to fully understand the properties of H-bonds in water at the molecule level.

Why water is so special? To answer this simple and fundamental question, comparison between  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{H}_2\text{S}$  would be highly suggestive. Sulfur belongs to the same group (family) as oxygen. Therefore,  $\text{H}_2\text{S}$  should show the common H-bond coordination property with  $\text{H}_2\text{O}$ , whereas the smaller dipole moment and larger polarizability of  $\text{H}_2\text{S}$  suggest different intermolecular interaction properties from those of  $\text{H}_2\text{O}$ . With the aid of IR spectroscopy and quantum chemical calculation, we are able to elaborate intermolecular interaction properties of  $\text{H}_2\text{S}$  from the molecular level viewpoint. In this presentation, we will demonstrate how intermolecular structures different from those of  $\text{H}_2\text{O}$  are formed among  $\text{H}_2\text{S}$  and discuss their physical origins.

[1] D. Eisenberg, W. Kauzmann, *The Structure and Properties of Water* (Oxford University Press, Oxford, 1969)

[2] Y. Maréchal, *The Hydrogen Bond and the Water Molecule* (Elsevier, Amsterdam, 2007)

## One dimensional longitudinal wave velocity and the contact state of fractures: Theoretical and experimental approach

Eranga G. Jayawickrama, Jun Muto, Hiroyuki Nagahama.

Department of Earth Science Tohoku University

eranga.j@dc.tohoku.ac.jp

Details provided by seismic tomography has led to understand the earth's interior and seismic velocity variations have been the key factor in understanding it. Velocity zones within the earth crust discussed as, high and low is of great interest and in order to understand them seismic tomography and experimental studies have been conducted for decades. These experimental studies have shown that the low velocity seismic waves are resulted by fractures in the media. With increasing pressure the fractures are closing and respectively the velocity is increasing. However, the influence of fractures on the velocity is understood, these studies have not been able to give any understanding on the degree of opening or the contact state of fractures. Nagumo (1963) showed that, with increasing pressure the contact state changes as the relative displacement of the contacts are affected. In this study, we have extended this pressure-displacement relationship to a velocity-pressure relationship and discuss the contact state variation inferred from velocity variation with increasing pressure.

A theoretical power law relationship of one dimensional longitudinal wave velocity and pressure is introduced with a pressure exponent, representing the contact state of fractures. For single contacts the pressure exponent,  $\lambda$  takes values of  $1/2$ ,  $1/3$  and  $0$ , for cone, ball and flat contacts respectively. By extending this to multiple contacts, the pressure exponent  $\mu$ , has been deduced as  $2/3$ ,  $3/5$  and  $1/2$  for multiple cone, ball and flat contacts, respectively. The applicability of this theory is tested using a similar empirically derived equation given by Kobayashi and Furuzumi (1977) and previously published experimental data. From the results, we show that the contact state changes form conical contacts, to ball contacts and finally to flat contacts with increasing pressure. The study has shown that, lithology and the porosity are factors controlling the contacts state.

Granite and gabbro shows  $\mu \ll 1/2$  indicating complete closure of fractures while serpentinite is yet to close completely at same pressures (Figure 1). Also, equally low porous rocks of different lithology show different contact states. These indicate that lithology is a major factor controlling the contact state. Further, the change of slopes of the velocity with increasing pressure also can be explained by this theoretical approach and this method has shown that the velocity change

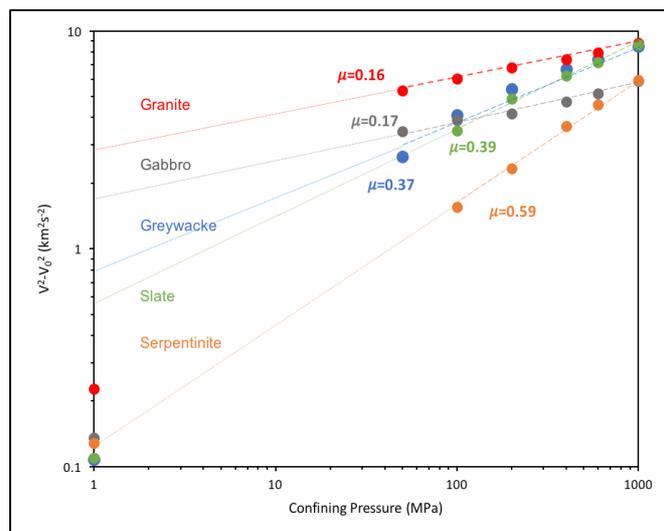


Figure 1. Change of contact state of fractures in different rocks, with increasing pressure.

corresponds to the gradual change of  $\mu$ , essentially between  $2/3$  and  $1/2$ .

As shown from this study, this method is applicable to assess the contact state of fractures in an area of interest. By obtaining velocity data from reflection seismology and seismic tomography the degree of fracture opening or the contact state of fractures can be estimated. Therefore, we believe this method can be used in wide range of applications from shallow depth, exploration geophysics to understanding the lower crustal, low velocity zones.

**Reference:**

Nagumo, S. (1963) On the elastic property of granular media (III) – Static response and stress dependency of deformation coefficient Geophys. Explor. 16:13-20. With English abstract.

Kobayashi, R. and Furuzumi, M. (1977) Study on elastic wave velocity of rocks during failure process in compression. J. Min. Metal. Inst. Japan 93:7-11. With English abstract.

## 偏極ヘリウム 3 標的を用いた三体核力の研究

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻<sup>1</sup>, 東北大学 CYRIC<sup>2</sup>, 理研 仁科センター<sup>3</sup>,  
放医研 重粒子医科学センター<sup>4</sup>, KEK<sup>5</sup>

○渡邊跡武<sup>1</sup>, 和田泰敬<sup>1</sup>, 関口仁子<sup>1</sup>, 三木謙二郎<sup>1</sup>, 秋枝智美<sup>1</sup>, 今紘史<sup>1</sup>,  
中居真之介<sup>1</sup>, 迎智之<sup>1</sup>, 伊藤正俊<sup>2</sup>, 上坂友洋<sup>3</sup>, 涌井崇志<sup>4</sup>, 猪野隆<sup>5</sup>

### 研究背景

物質を構成する原子は、原子核と電子から成り、更にはその原子核は陽子や中性子といった核子によって構成されている。核子間に働く核力を理解し、その核力から核子多体系である原子核を理解することは、原子核物理学における重要な課題の一つである。二つの核子間での相互作用を記述する二体核力に関しては、1990年代に現実的な核力ポテンシャルが完成している。この核力ポテンシャルは、それまでに得られていた計 4000 個以上の膨大な核子-核子散乱実験データを  $\chi^2/N_{\text{data}} \sim 1$  という非常に高精度で再現している。その一方で、核子数が三つ以上の系では、三つの核子間で同時に相互作用が起こる三体核力の効果が現れるということも示唆された。近年、この三体核力が軽い原子核の束縛エネルギーや少数核子系散乱における観測量の記述に重要な役割を持つことが示唆されており、あらゆる原子核および核物質の性質を記述するためにはこの三体核力が必要不可欠であることが分かってきた[1]。

本研究では三体核力の性質を調べるために、陽子-ヘリウム 3 散乱実験における中間エネルギー領域 ( $E/A \gtrsim 60$  MeV) でのヘリウム 3 偏極分解能測定を行う。このエネルギー領域における同散乱系での測定は過去に例が無く、本測定は世界で始めて四核子散乱系における三体核力の定量的議論をもたらすものである。ヘリウム 3 偏極分解能の測定には偏極ヘリウム 3 標的が必要であり、我々のグループはこの偏極ヘリウム 3 標的の開発を行ってきた。

### 偏極ヘリウム 3 標的

我々のグループは上記の偏極ヘリウム 3 標的の開発および改良を行ってきた。ヘリウム 3 の偏極方法としてはスピン交換光ポンピング法 (SEOP) を採用した。これは、円偏光レーザーを用いた光ポンピングによって静磁場中のルビジウム原子を偏極させ、そのルビジウム原子とヘリウム 3 原子核がスピン交換反応をすることにより、ヘリウム 3 原子核を偏極させる方法である。またヘリウム 3 標的の偏極度の測定方法として、高速断熱通過-核磁気共鳴 (AFP-NMR) 法およびルビジウムの電子スピン共鳴 (ESR) 測定を採用した。典型的なヘリウム 3 偏極度はおよそ 20%程度であった。

### 陽子-ヘリウム 3 弾性散乱におけるヘリウム 3 偏極分解能測定

上記の偏極ヘリウム 3 標的を用いて、東北大学サイクロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) において 70 MeV の陽子ビームを用いた陽子-ヘリウム 3 弾性散乱におけるヘリウム 3 偏極分解能測定を行った。図 1 に、本測定における実験のセットアップを示す。イオン源で生成された陽子ビー

ムは AVF サイクロトロンによって加速され、第四ターゲット室まで輸送される。偏極ヘリウム 3 標的は第四ターゲット室に置かれている散乱槽の下流に設置した。その下流に、ビームを止めかつその電流値を測定するためにファラデーカップ (F.C.) を設置した。またビームの入射方向に対して左右それぞれに検出器をいくつかの測定角度に設置し、散乱陽子を検出した。各検出器は薄いプラスチックシンチレータ (~1 mm 厚) を用いた  $\Delta E$  検出器と NaI もしくは厚いプラスチックシンチレータ (~50 mm 厚) を用いた  $E$  検出器から構成される。実験中は AFP-NMR 法によってヘリウム 3 原子核の核スピンの反転およびヘリウム 3 偏極度の測定を行った。ヘリウム 3 原子核の偏極方向の反転前後における散乱陽子の検出数を比較し、その非対称度からヘリウム 3 偏極分解能を求める。また散乱槽内にはターゲットラダーが設置されており、ラダーに厚さ 20  $\mu\text{m}$  のポリエチレンフィルムを取り付けた。ポリエチレンフィルムと衝突した散乱陽子を散乱槽内に設置した検出器で検出し、ビーム強度のモニターを行った。

本測定によって得られた前方散乱角度における典型的なエネルギースペクトルを図 2 に示す。横軸は  $\Delta E$  検出器での散乱陽子のエネルギー損失を表しており、縦軸は  $E$  検出器での散乱陽子のエネルギー損失を示している。図に示したピークがヘリウム 3 と弾性散乱した陽子を検出したものである。実験の結果、ヘリウム 3 原子核の偏極方向の反転前後において明確な散乱陽子の検出数の非対称が得られ、ヘリウム 3 偏極分解能の測定に成功した。

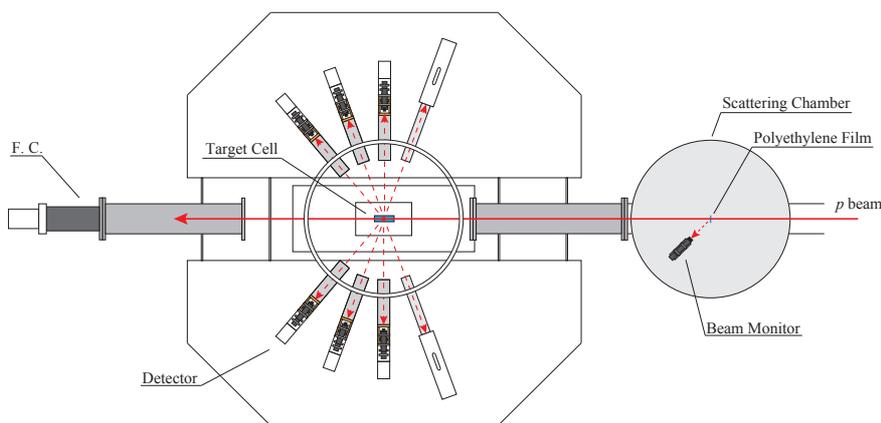


図 1. 陽子-ヘリウム 3 弾性散乱におけるヘリウム 3 偏極分解能測定実験のセットアップ。

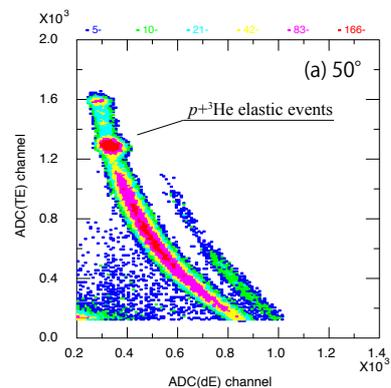


図 2. 典型的な  $E$ - $\Delta E$  検出器におけるエネルギースペクトル。図中の角度の値は検出器の設置角度を示している。

## 専門用語の説明

- ・ 三体核力：三つの核子間で同時に相互作用が起こるような過程の核力。二つの核子でのダイアグラムでは表す事が出来ない。
- ・ 偏極：原子核や電子のスピンの方向が揃っているような状態を示す。

## 参考文献

- [1] See, e.g., K. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. C **65**, 034003 (2002); *ibid.* **89**, 064007 (2014).

## ガン抑制シグナル経路 Hippo pathway の新たな制御機構

(東北大学大学院生命科学研究所 分子生命科学専攻)

○入江和樹、永井友朗、水野健作

個体を構成する細胞は様々な外的環境にさらされており、受容体・イオンチャネル・接着分子などの細胞膜上のタンパク質を介し、外的環境に適応するための細胞内シグナルを活性化させる。特に細胞の増殖は、外的環境に応じて厳密に調節されており、その制御機構は個体における正常な発生及び形態形成や組織・器官の恒常性の維持において必要不可欠であるだけでなく、その破綻はガンを始めとする様々な疾患を引き起こす。Hippo pathway は細胞増殖を制御する進化的に保存されたシグナル伝達経路の一つである。細胞同士の接触による接触阻害や栄養飢餓などの増殖抑制的な環境下において MST キナーゼが活性化され、アダプタータンパク質 SAV1 を介して下流のキナーゼである LATS キナーゼ、NDR キナーゼをリン酸化し、活性化させる。LATS キナーゼ、NDR キナーゼは転写共役因子である YAP/TAZ をリン酸化する。YAP/TAZ は核内で転写因子 TEAD と結合することによって細胞増殖を促進する遺伝子の転写を促進するが、リン酸化されると細胞質タンパク質によって係留され、不活性化される(Yu et al., 2015) (図)。最近になって Hippo signaling の調節機構が多岐にわたることが明らかとなり、YAP/TAZ の活性制御機構は依然未解明な点が多く残されている。

本研究において、私は進化的に保存されたタンパク質 Furry (Fry) が YAP と結合し、リン酸化を促進し、YAP の核内移行を抑制し、その転写活性を負に制御することを明らかにした。Fry は NDR キナーゼと結合し足場として機能することで、極性形成・上皮細胞の形態形成、細胞周期の進行、分裂期紡錘体の安定化に寄与する。しかしながら、Fry の細胞増殖における機能や分子メカニズムの研究はこれまでほとんど行われておらず、Hippo pathway における Fry の機能は不明であった。私は siRNA<sup>1)</sup> や CRISPR/Cas9 システム<sup>2)</sup> を用いて Fry を欠損させることで YAP のリン酸化レベルが低下し、核内へと集積することを見出した。また、Fry は YAP、LATS2、SAV1 といった Hippo pathway を制御する因子と結合することを見出した。さらに、Fry による YAP の制御には Fry の全長が必要であることを明らかにした。以上の研究結果から、Fry が Hippo pathway の新規制御因子であり、細胞の増殖抑制シグナル経路に関与することが明らかになった。

### 専門用語

- 1) 21-25 塩基からなる低分子 2 本鎖 RNA で RNA 干渉機構により遺伝子の発現を抑制する
- 2) DNA2 本鎖を切断してゲノム配列の任意の箇所を削除・置換・挿入することができる遺伝子改変技術

### 参考文献

Yu, F.-X., B. Zhao, and K.-L. Guan. 2015. *Cell*. 163:811–828.

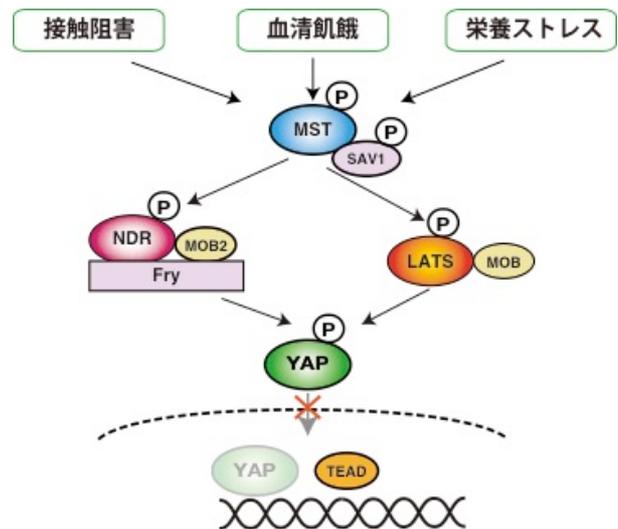


図.Hippo pathway の概略と機能。

Hippo pathway は細胞増殖抑制シグナルであり、接触阻害など増殖抑制環境下で活性化される。Hippo pathway が働くと、YAP はリン酸化されて核外に局在し、転写因子 TEAD と結合できなくなるため、増殖が負に制御される。

## 鉄マンガングラスト中のレアアース元素

(東北大学大学院理学研究科 地学専攻) ○浅見慶志朗・平野直人

深海底の岩石を覆うように存在している鉄マンガングラスト(Fig. 1)は、Fe と Mn の酸化物を主とする化学堆積岩である。Fe-Mn クラストの起源は、Fe や Mn などの成分がマグマ活動近傍の海底熱水からもたらされる熱水起源、マグマ活動とは関係なく海水から直接沈殿する海水起源の2種類がある。海水起源のものは古い海山などに分布しており、形成時に海水中の Co や REE などのレアメタルを濃集させるため、鉱物資源として、または海洋の古環境復元ツールとして注目されている。これまで様々な試料の化学組成が報告され、元素濃度が海域や水深ごとにどのように変化するか調べられてきた。REE 濃度は水深が深くなるにつれて高くなる傾向などが知られている[2]。しかし、Fe-Mn クラストは海山で形成されることが多く、海洋底そのものにはないため、水深 4 km 以浅の事例が多く、より深い場所においてどのような化学組成となるのかは不明瞭であった。

そこで、本研究では東北日本沖と南鳥島沖の水深 5.3~6km に存在するプチスポット火山から採取した Fe-Mn クラストの化学組成を分析した。REE 組成の比較には、砕屑物による希釈の影響を避けるため、濃度ではなく隣り合う REE 同士の比を用いた。

その結果、Fe-Mn クラストの REE 組成の水深に応じた変化が確認された。特に、1 以上の値を示すとされる La/Pr 比は水深に伴い大きく減少し、水深 5km 付近では 1 以下となった(Fig. 2)。一方、Fe-Mn クラストと海水間の REE 分配係数の比は水深によらずほぼ一定であったので、Fe-Mn クラストの REE 組成変化が分配係数の変化でなく、海水の REE 組成変化を反映したものと分かった。

本研究は古い Fe-Mn クラストの REE 組成から過去の海水の REE 組成を復元できる可能性を示唆している。また、Fe-Mn クラストの La/Pr 比は水深と良い相関を示すことから、形成時の水深を知る手掛かりとなるかもしれない。

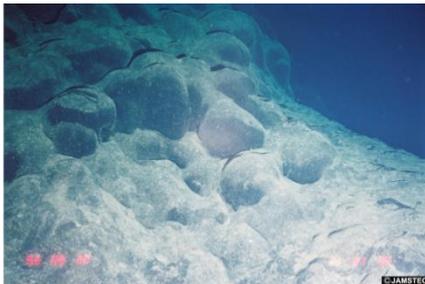
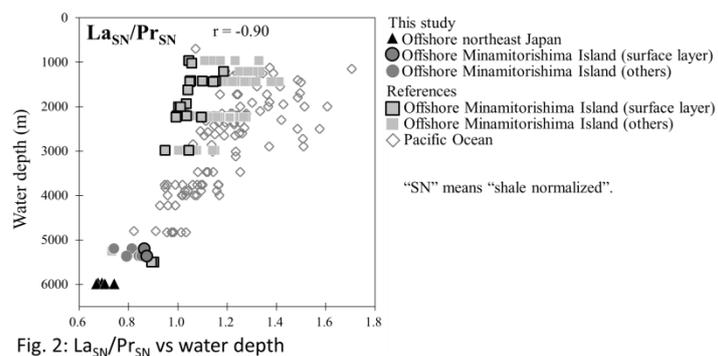


Fig. 1: Fe-Mn crusts

Fig. 2:  $La_{SN}/Pr_{SN}$  vs water depth

## 専門用語の説明

- ・REE：希土類元素。ここではランタノイドを指す。
- ・プチスポット火山：プレート屈曲部に形成される、アセノスフェア起源の単成火山(直径数km)。

## 参考文献

- [1] Hein et al. *Ore Geol. Reviews* 51 (2013): 1-14.  
 [2] De Carlo and McMurtry. *Chem. Geol.* 95.3-4 (1992): 235-250.

## 炭素・水素同位体比分析に基づく 全球における大気中メタン濃度の変動原因の解明

(東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻)

○藤田遼<sup>1</sup>・森本真司<sup>1</sup>・梅澤拓<sup>2</sup>・S. Maksyutov<sup>2</sup>・青木周司<sup>1</sup>・中澤高清<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東北大院理, <sup>2</sup>国立環境研究所

メタン (CH<sub>4</sub>) は二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) に次いで 2 番目に重要な人為起源の温室効果気体である。CH<sub>4</sub> は一分子あたりの温室効果が CO<sub>2</sub> の約 25 倍も大きく、さらに大気中での寿命が短いことから、短期的な削減効果の高い温室効果気体として知られている。産業革命以降の人間活動の増加に伴い、大気中の CH<sub>4</sub> 濃度は急速に上昇し、現在の濃度は当時の約 3 倍の大きさになっている。一方で、1980 年代後半以降に CH<sub>4</sub> 濃度の増加率は全球的な停滞を始め、2000 年代には一時その増加率がほぼゼロになった。その後 2006 年以降は再び濃度の増加傾向が始まっている。これらの特異的な CH<sub>4</sub> 濃度の変動原因は未だ十分には解明されていない[1]。その主な原因としては、CH<sub>4</sub> の放出源の種類・分布およびその強度が非常に多岐にわたっており、それぞれの大気への寄与を分離することが、大気中 CH<sub>4</sub> 濃度のみを観測する通常的手法では困難であることが挙げられる。そこで発表者らは、放出源ごとに異なる値を持つ CH<sub>4</sub> の炭素・水素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta\text{D}$ )<sup>\*注1</sup> の同時高精度観測に基づいて、大気中 CH<sub>4</sub> 濃度の変動に対する各放出源の寄与を分離して解釈するという研究手法に着目した (図 1)。

発表者らは、1980 年代頃から全球にわたり展開している地上基地・航空機・船舶・大気球を用いた大気採取に基づき、大気中の各種温室効果気体の濃度および同位体比の系統的観測を長期的に実施してきた。本講演では、近年における全球的な大気中メタン濃度とその炭素・水素同位体比の同時高精度観測を行い、これまでに得られた長期的な観測データと合わせて解析することで、過去約 20 年規模における全球メタン濃度の変動原因の解明を試みた結果を報告する。さらには、得られたデータを全球気候モデルの一種である大気化学輸送モデルに適用することで、領域ごとのより詳細なメタン放出量の変動を明らかにした結果も合わせて報告する。長期的かつ高精度な大気中メタン濃度およびその炭素・水素同位体比データを用いて、それらを数値モデルに適用して解析を行った研究例は世界でも稀であり、得られる成果の科学的な重要性は大きい。また、大気寿命の短さにより短期的な削減効果が高いメタンについて、本研究により近年の変動原因の理解が深まることは、今後社会全体が気候変動緩和政策を立案していく上で、非常に大きなインパクトをもたらすと考えられる。

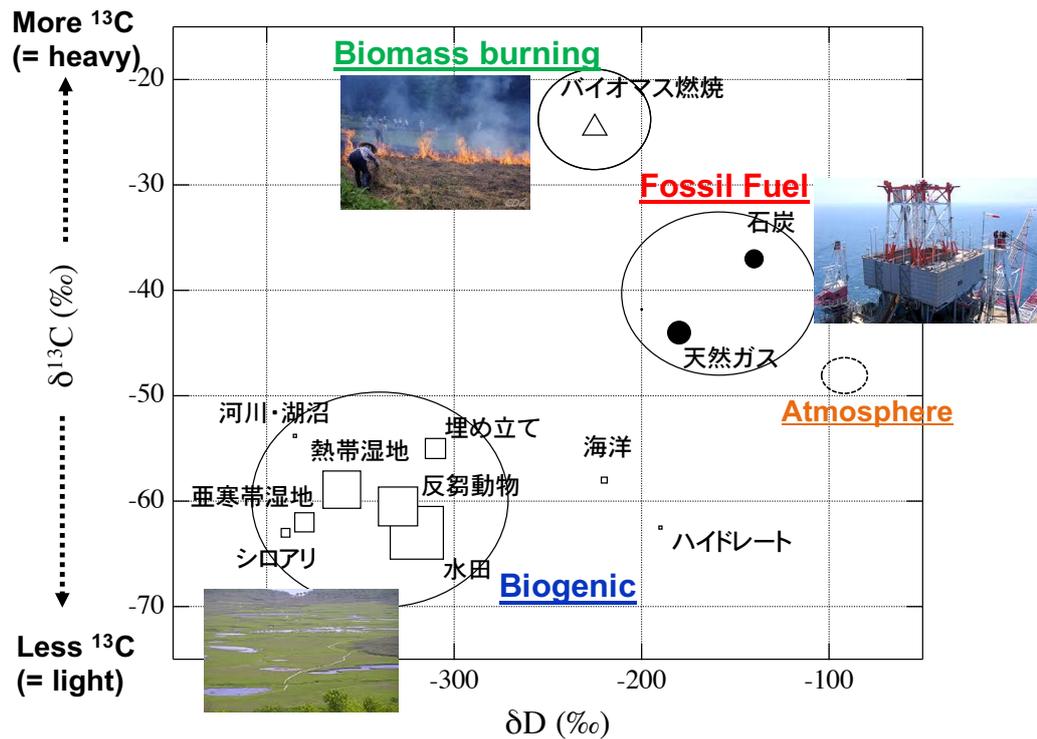


図1 各メタン放出源および現在大気中メタンの $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta\text{D}$ 値の分布  
 記号の大きさはそれぞれの発生源から放出される $\text{CH}_4$ 量の相対的強度（推定値）を表しており、  
 図中の円は3つのカテゴリーに大別した発生源を示す。  
 （Whiticar and Shafer 2007 [2]をもとに作図）

### 専門用語の説明

注1 炭素・水素同位体比

自然界における同位体の存在比を、同位体比という。本研究で用いた $\text{CH}_4$ の安定炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）および水素同位体比（ $\delta\text{D}$ ）は、それぞれ以下の式で定義される。

$$\delta^{13}\text{C}\text{CH}_4 = \left[ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000 \quad \dots (1)$$

$$\delta\text{D} - \text{CH}_4 = \left[ \frac{(\text{D}/^1\text{H})_{\text{sample}}}{(\text{D}/^1\text{H})_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000 \quad \dots (2)$$

これらは、大気試料内（添字 sample）および標準試料内（添字 std）について、自然界の中で存在度の高い $^{12}\text{C}$ 、 $^1\text{H}$ に対する $^{13}\text{C}$ 、 $\text{D}$ が含まれる割合の比を示している。

### 参考文献

[1] Saunio, M. et al. (2016), *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 1–79,  
 doi:10.3334/CDIAC/Global\_Methane\_Budget\_2016.

[2] Whiticar and Schaefer (2007), *Phil. Trans. R. Soc.*, 1793–1828, doi:10.1126/science.218.4572.563.

## 右巻きと左巻きの光の使い方 -光バレートロニクスに向けて-

(東北大学大学院理学研究科 物理学専攻) ○辰巳由樹、ガラムカリ和、齋藤理一郎

我々の住む世界には、多くの光学異性体が存在する。光学異性体とは、物質の組成が同じにもかかわらずお互いに構造を鏡に映した関係になっている2つの立体構造を指す。このような関係は“光”にも見つけることができる。光は電場と磁場がお互い垂直な関係を保って振動しながら進む電磁波である。電場の進み方が図(a)のように螺旋を描きながら進む場合を円偏光と呼ぶ。光の進行方向に対して電場の振動が右回りに回りながら進む場合を右回り円偏光、逆に左回りに進む場合を左回り円偏光と呼び、この両者も光学異性体のようにそれぞれ鏡に映したような関係になっている。このような円偏光を利用して、物質の電子の状態を制御しようという試みがあることを説明したい。固体中の電子は、通常価電子帯と呼ばれるエネルギー帯にいるが、光が照射されてそのエネルギーを得ると、エネルギーの高い伝導帯に移動する。我々が着目する、原子一層分の厚さで構成される原子層物質の中には、**K**点と**K'**点と呼ばれる2つの電子の“居場所”（これをここではバレーと呼ぶ）を持つものがあり、図(b)に示したように右回り円偏光を使うと**K**点の電子、左回り円偏光を使うと**K'**点の電子のみを励起することができる[1]。これを自由にコントロールしようという試みが光バレートロニクスである。バレートロニクスは電流（ジュール熱）の移動を伴わないため、低消費電力のデバイス応用に向けて期待される分野である。我々は、図(c)に示したような遷移金属ダイカルコゲナイドと呼ばれる物質に着目し、電子の光励起のバレー制御に向けた最適条件を、数値計算を用いて定量的に評価した[2]。本発表では、光バレートロニクスの一般的な説明や展望を説明した後、円偏光がバレー選択則を与える原理及び我々の行った数値計算結果に触れる。

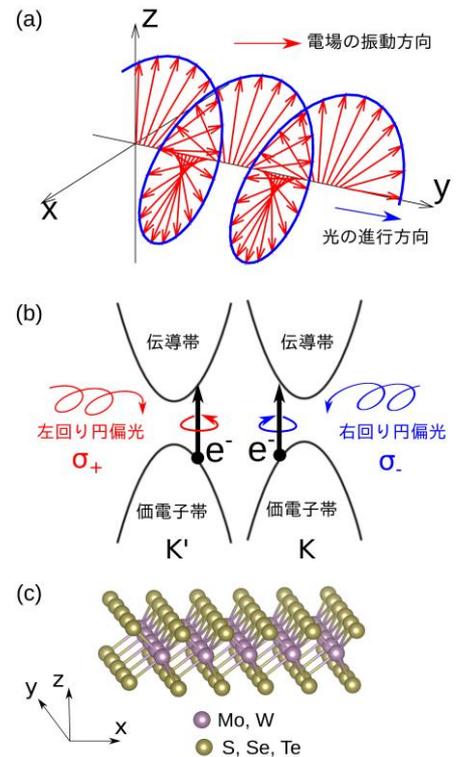


図 (a)円偏光の進む様子。y 軸正方向が光の進行方向。(b)**K**点と**K'**点に対する光遷移選択則の模式図。(c)遷移金属ダイカルコゲナイドの結晶構造。

### 専門用語の説明

- ・バレー：伝導帯(価電子帯)で電子のエネルギーが極小(極大)となるような低エネルギー構造。
- ・遷移金属ダイカルコゲナイド： $\text{MX}_2$ (**M**：遷移金属、**X**：カルコゲン)で表され、六方晶構造をもつ層状物質。**K**点・**K'**点の二つのバレーを持ち、エネルギーギャップが1-2eVの半導体である。

### 参考文献

- [1] T. Cao, *et al.*, Nat. Commun. 3, 387 (2012)  
 [2] Y. Tatsumi, *et al.*, Phys. Rev. B 94, 235408 (2016)

## ポリマーマトリクス中における発光性色素の挙動

(東北大学大学院理学研究科 化学専攻) ○吉岡甲子郎・小野寺恒信・岡田修司・三井正・及川英俊

発光性色素には、その分散状態の違いによって発光挙動が大きく異なる分子が存在する。例えば、ペリレンの溶液（分子分散状態）は 450, 480, 510 nm に発光ピークを示すのに対し、バルク結晶では 600 nm 付近に自己束縛励起子（STE）に由来したブロードな発光スペクトルを観測することができる。加えて、数百 nm 以下のナノ結晶（図 1）では、その結晶サイズに依存して STE 発光ピーク波長が変化することも報告されている [1], [2]。し

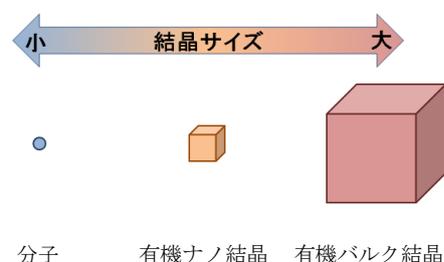


図 1 有機ナノ結晶の概念図

かし、従来のペリレンナノ結晶の作製法である再沈法<sup>[3]</sup>では約 100 nm 以下の結晶を作製することは困難であったため、分子分散状態と有機ナノ結晶を繋ぐサイズ領域は未踏領域であった。そこで、ペリレンとポリマーもしくはモノマーとを混合し、共通溶媒の蒸発や、重合による相分離を利用した析出・ナノ結晶化を試み、ポリマーマトリクス中でのペリレンの分散状態の制御とその光学特性を評価した。

本研究では 2 つの作製方法を試みた。一つは、色素を溶解したモノマーを重合することでマトリクスに対する色素の溶解度を減少させ、もう一方は、色素とポリマーを共通溶媒に溶解した混合液から溶媒を除去して凝集を促す方法である。発光性色素にペリレン、ポリマーにポリスチレンを用いた場合、ナノ結晶とも溶液状態とも異なる発光ピークが 550 ~ 600 nm の波長に現れた（図 2）。この発光ピークは、ペリレンナノ結晶における発光ピーク波長のサイズ依存性から外挿すると、これまでで最も小さいナノ結晶もしくは凝集体に対応することが分かった。我々はこのサイズ領域を“境界領域”と呼び、分子からナノ結晶へ変化する中間の状態と推定している。この領域をさらに解明することで、結晶核発生の過程が理解できるのではないかと考えている。

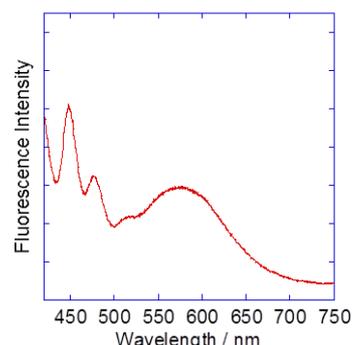


図 2 ポリスチレンマトリクス中のペリレンの蛍光スペクトル ( $\lambda_{ex}=400$  nm)

### 専門用語の説明

- ・ 有機ナノ結晶：バルク結晶と孤立分子の中間のサイズ領域に位置する有機結晶で、数百 nm 以下の結晶サイズ領域で物理化学的性質に結晶サイズ依存性が現れる。

### 参考文献

- [1] H. Oikawa *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, L111 (2003).  
 [2] T. Asahi *et al.*, *Acc. Chem. Res.*, **41**, 1790 (2008).  
 [3] H. Kasai *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, L1132 (1992).

## 光障害時におけるオートファジーを介した葉緑体品質管理とその制御機構の解析

(東北大学大学院生命科学研究科 生態システム生命科学専攻)

○中村 咲耶<sup>1</sup>・泉 正範<sup>1,2,3</sup>・日出間 純<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>東北大院・生命科学、<sup>2</sup>東北大・学際研、<sup>3</sup>JST・さきがけ)

植物は、細胞内の葉緑体で光合成を行い成長する。一方で、葉緑体は太陽光に含まれる紫外線 B (UVB) や過剰な可視光エネルギーによる障害を常に受けている。この「光障害」は、光合成機能の低下、ひいては活性酸素種の発生から細胞機能の破綻にもつながるため、植物の生命維持のためには傷ついた葉緑体成分は適切に除去・修復される必要がある。これまでに活性酸素の消去系や損傷タンパクの分解機構など、主に葉緑体内部で働く複数の葉緑体品質管理機構が報告されている。

オートファジーは、真核生物に保存される細胞内分解系である。栄養飢餓や老化などのシグナルで特に活性化し、小胞オートファゴソームによってオルガネラを含む細胞質成分がリソソームや液胞へ輸送、分解され、構成成分がリサイクルされる。近年では、動物や酵母において損傷オルガネラを選択的に除去する「品質管理」としてのオートファジー機構が報告されている。しかし、植物特有の葉緑体について、オートファジーによる品質管理機構は見出されていなかった。

我々は、シロイヌナズナのオートファジー欠損変異体 (*atg*) が UVB 感受性となることを発見し (図 1)、オートファジーが光障害時の品質管理において何らかの役割を担っている可能性を見出した。共焦点レーザー顕微鏡を用いて葉の細胞を観察すると、強光照射後には液胞内に浮遊する葉緑体 (図 2 右) が頻繁に見られたが、この現象は *atg* では起こらなかった。よって、オートファジーによる葉緑体まるごとの除去「クロロファジー」が光障害時に活性化することが明らかとなった<sup>[1]</sup>。さらに私は、強光障害により異常形態を示す葉緑体 (図 2 中央) が生じ、このような葉緑体がクロロファジーで選択的に除去されることを見出した。以上の結果から、クロロファジーが壊れた葉緑体を選択的に除去することで、葉緑体の品質管理に関わることが示唆された。現在は、この「選択的クロロファジー」の制御誘導メカニズムに焦点を当て、その解明のための分子遺伝学的解析を進めている。

### 専門用語の説明

- ・ 光障害：地表に到達する光の中で最もエネルギーの高い紫外線 B (UVB; 波長 280-320 nm) や、光合成に有効な光 (波長 400-700 nm) の過剰エネルギー (強光) による障害。

### 参考文献

[1] Izumi, Ishida, Nakamura, et al. 2017, *Plant Cell* published online (DOI : <http://dx.doi.org/10.1105/tpc.16.00637>)

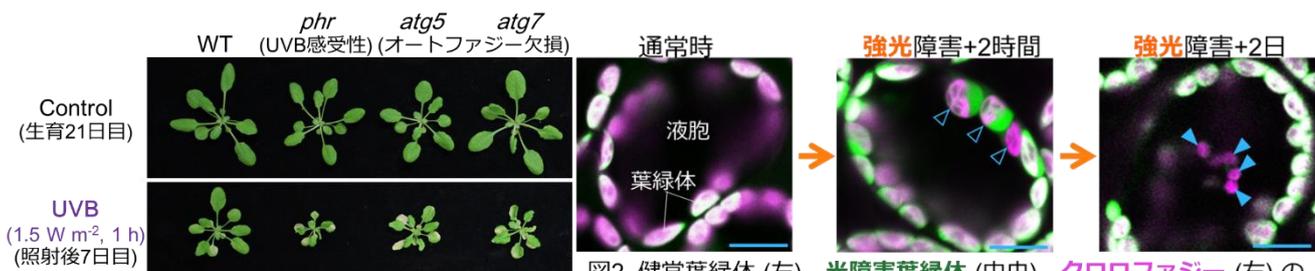


図1. UVB障害時の表現型解析

図2. 健全葉緑体 (左)、光障害葉緑体 (中央)、クロロファジー (右) の共焦点顕微鏡画像

## すばる望遠鏡超広視野カメラの測光観測に基づくミッシングサテライト探査

(東北大学大学院理学研究科 天文学専攻) ○本間大輔

千葉証司 (東北大学)、岡本桜子 (中国科学院 上海天文台)、小宮山裕 (国立天文台)、田中賢幸 (国立天文台)、田中幹人 (東北大学)、石垣美歩 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構)、秋山正幸 (東北大学)、有本信雄 (国立天文台ハワイ観測所)、Jose A. Garmilla (米国・プリンストン大学)、Robert H. Lupton (米国・プリンストン大学)、Michael A. Strauss (米国・プリンストン大学)、古澤久徳 (国立天文台)、宮崎聡 (国立天文台)、村山斉 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構)、西澤淳 (名古屋大学)、高田昌広 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構)、臼田知史 (国立天文台)、Shiang-Yu Wang (台湾中央研究院天文及天体物理研究所)

「我々はなぜ存在するのか」。この根源的な問に対する答えを人類は古来より宇宙に見出し、天文学を発達させてきた。特に、我々の住む天の川銀河の形成史を解明することは、そこに住む住人として向き合うべき永遠の課題であり、日夜研究されている。

こうした先人達のたゆまぬ探究により、宇宙や銀河の構造形成理論はある程度分かってきた。現在、一般的に認知されている銀河形成理論は、小さい銀河が階層的に合体・集積を繰り返して我々の住む天の川銀河のような大きい銀河ができあがるという考え方だ。つまり、宇宙には銀河が数えきれないほどたくさん存在するが、その中でも我々の天の川銀河は大きくて明るい方で、合体・集積前の小さくて暗い銀河(矮小銀河と呼ばれる)が宇宙の銀河の数の大部分を占めている。そのような矮小銀河は、さながら地球の周りを回る月のように、天の川銀河の周りにサテライトとして存在している。

しかし、理論予測によると天の川銀河の周りには数百から数千個の矮小銀河が存在するとされるが(図 1. (a))、実際の観測では現在まで50個程度しか発見されていない(図 1. (b))。この理論と観測結果の食い違いは「ミッシングサテライト問題」と呼ばれていて、銀河天文学において重要な未解決問題である。ミッシングサテライト問題の解決策はいくつか考えられているが、その一つとして、単純に暗くて遠方にある矮小銀河をまだ発見しきれていないだけで、理論予測通りにもっと多くの矮小銀河が存在する可能性が高いという先行研究がある(Tollerud et al.2008[1])。

これをモチベーションにして、東北大学の千葉証司教授を中心とする我々の国際共同研究グループは、すばる望遠鏡を用いてまだ発見しきれていない矮小銀河、つまりミッシングサテライトを探査するプロジェクトを立ち上げた。現在、すばる望遠鏡には世界最高性能の超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) が搭載されている。すばる望遠鏡とこの HSC の組合せにより「深くて広い」観測が可能で、ミッシングサテライト探査に絶大な威力を発揮する。

結果として、初期観測データから新しい矮小銀河「Virgo I」を発見した(図 2; Homma et al.2016[2])。この Virgo I は、今まで発見されている銀河系周辺の矮小銀河の中で 1,2 位を争う暗い矮小銀河であり、すばる/HSC でなければ発見できなかった。今後は、この初期データよりも 10 倍広い天域を観測する予定で、Virgo I のような暗い矮小銀河がさらに見つかることが期待される。そして、このような矮小銀河のさらなる発見は、銀河形成理論とそれを左右する暗黒物質の性質を理解する上で大

変重要になる。

### 参考文献

- [1] Tollerud, E.J., Bullock, J.S., Strigari, L.E., & Willman, B. 2008, *Astrophysical Journal*, 688, 277-289
- [2] Homma, D., Chiba, M., Okamoto, S., et al. 2016, *Astrophysical Journal*, 832, 21
- [3] Kuhlen, M., Diemand, J., Madau, P., & Zemp, M. 2008, *Journal of Physics Conference Series*, 125, 012008

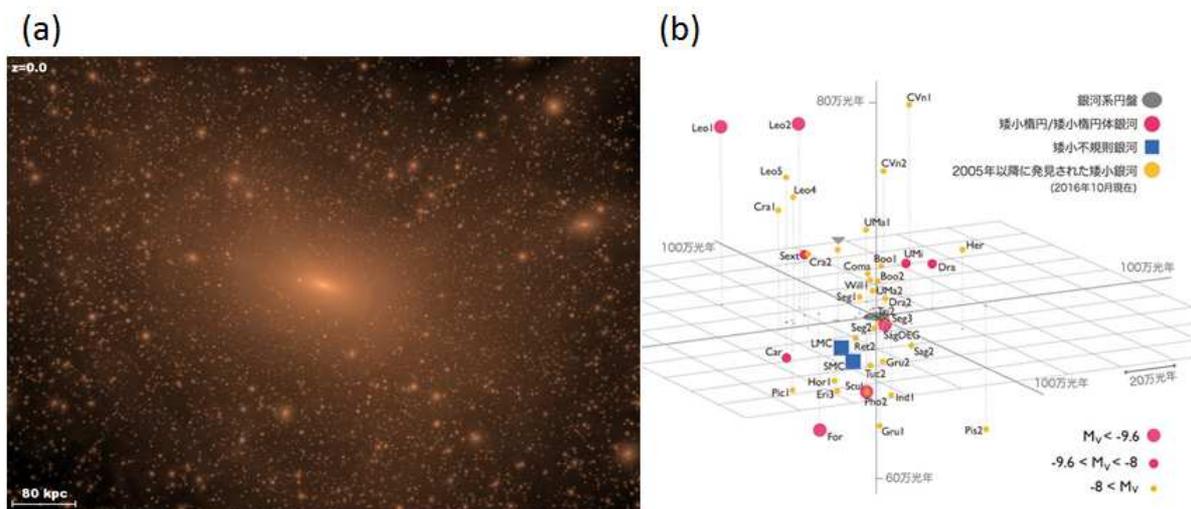


図 1. (a)シミュレーションによる天の川銀河周辺の暗黒物質の分布 (Kuhlen et al.(2008)[3])。中心の大きな塊が天の川銀河で、周りの数百から数千の小さい塊に矮小銀河が存在すると考えられる。(b)天の川銀河周辺に存在する矮小銀河の3次元地図。現在までに約50個の矮小銀河が発見されている。

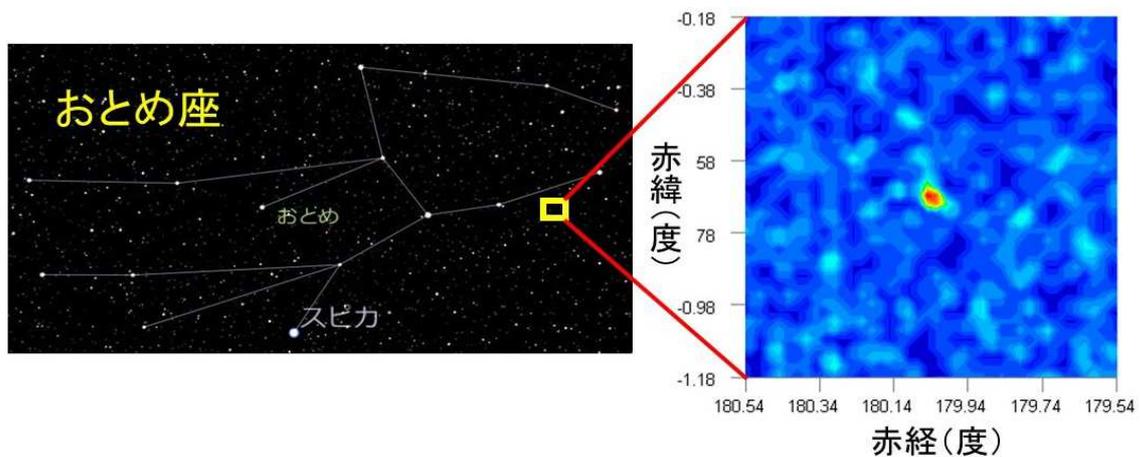


図 2. おとめ座方向に今回発見された新しい衛星銀河 Virgo I の位置 (左)。右図は Virgo I に含まれる恒星の密度分布。青→白→黄→赤となるに従って恒星の密度が高くなっている。

## 磁気圏磁気圏内プラズマ波動による高エネルギー粒子の非線形ピッチ角散乱についての研究

○北原 理弘・加藤雄人

東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻

北欧やアラスカの夜空には、緑色に輝くオーロラがしばしば観測される。オーロラというと、鮮明な光がカーテンのようにひらひらとはためくオーロラ（分散型オーロラ）を想像する方も多いかと思われるが、オーロラ帯の低緯度側に発生するオーロラの中には、ぼんやりと滲んだように見える**拡散型オーロラ**や、数秒から数十秒にわたって明滅を繰り返す**脈動オーロラ**などの様々なタイプのオーロラが存在する(図1)。オーロラは宇宙空間に存在する高エネルギー電子(数 keV-数十 keV)が地磁気の磁力線に沿って降下し、地球大気に衝突することによって酸素原子などが発光する現象であるが、その降下電子の生成プロセスについては様々な研究がなされてきた。近年の観測研究によると、脈動オーロラの明滅周期は、宇宙空間において発生する**ホイッスラーモード・コーラス放射**<sup>\*1</sup>（以下、コーラス放射）と呼ばれるプラズマ波動の発生周期と非常に良い相関があることが明らかとなり、コーラス放射と高エネルギー電子の波動粒子相互作用が脈動オーロラを発生させる降下電子の生成過程の有効な候補の一つと考えられている[2]。コーラス放射（図2）は、地球内部磁気圏<sup>\*2</sup>においてしばしば観測される電波現象であり、サイクロトロン運動する高エネルギー電子と共鳴することによって励起・成長すると考えられている。コーラス放射と共鳴した高エネルギー電子は、エネルギーを失い、**ピッチ角散乱**<sup>\*3</sup>されることが理論的に予測されており、それによりピッチ角散乱された電子が大気に降り注ぐと考えられている。しかしながら、コーラス放射と高エネルギー電子の波動粒子相互作用を直接的に実証した例はない。



図1 分散型オーロラと拡散型オーロラ[1]

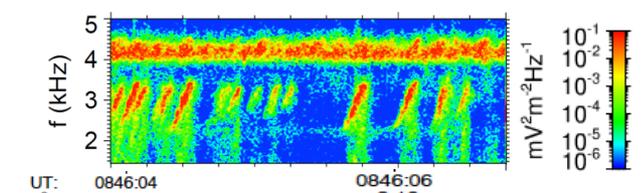


図2 科学衛星によって観測されたコーラス放射の変動電場のダイナミックスペクトル[3]。2秒程度の間に周波数の上昇を伴う離散的な放射が観測されている。

2016年12月20日にJAXA・内之浦宇宙空間観測所より打ち上げられた衛星「あらせ」には、**波動粒子相互作用観測装置(Wave-Particle Interaction Analyzer: WPIA)**と呼ばれる新しいタイプの観測装置が搭載されている。従来、プラズマ波動と高エネルギー粒子の波動粒子相互作用を解析する場合、衛星搭載の粒子計測器が観測したフラックスデータや速度分布関数と、波動計測器によって受信された変動電磁場のスペクトルデータを比較・検討する手法が採用されてきた。一方で、[4]によって提案されたWPIAは、プラズマ波動によって粒子が得る（または失う）エネルギーをジ

ジュール熱として計測する事により[5]、宇宙空間における波動粒子相互作用を直接的且つ定量的に計測するソフトウェア型の観測装置である。あらせ衛星搭載の WPIA では、エネルギー授受を伴う波動粒子相互作用にのみ適用することが想定されてきたが、本研究ではピッチ角散乱型の波動粒子相互作用に適用する解析手法を新たに提案した。加えて、提案した手法をコーラス放射と電子の相互作用を再現したシミュレーション結果に適用することで、手法の有用性を示した[6]。

本研究結果は、脈動オーロラを発生させる降下電子が地球内部磁気圏において散乱される瞬間を捉えられる可能性を示唆するものであり、今後オーロラ粒子生成過程の直接的な解明につながる事が期待される。

## 専門用語の説明

### 【\*1 地球内部磁気圏】

地球近傍の宇宙空間のうち地球半径の約 10 倍以内の領域を指す。地球磁場が双極子磁場で近似されうる領域と定義する場合もある。

### 【\*2 ホイッスラーモード・コーラス放射】

電子サイクロトロン周波数の 0.2–0.8 倍程度の周波数帯（数 kHz 帯）で観測される電波現象。地球内部磁気圏でしばしば観測されるプラズマ波動のひとつで、右回りの円偏波。サイクロトロン運動する高エネルギー電子と共鳴することで励起・成長すると考えられている。

### 【\*3 ピッチ角散乱】

地球内部磁気圏の電子は、地磁気の磁力線に対して巻きつきながら運動し、このときの電子の運動方向と背景の磁力線のなす角をピッチ角とよぶ。磁力線上の磁場の揺らぎ（＝プラズマ波動）と電子が出会うと運動方向が変化するが、この現象を散乱のように扱いピッチ角散乱と呼ぶ。

## 参考文献

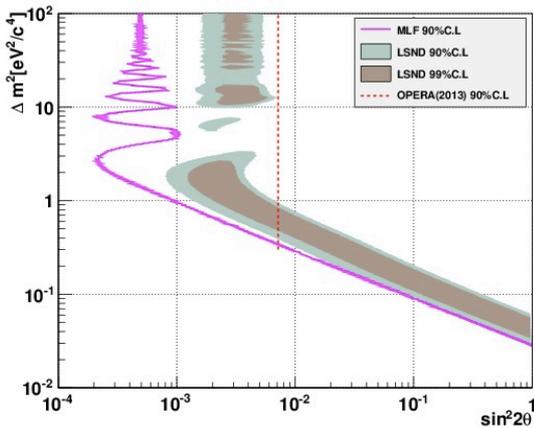
- [1] Newell, P. T., (2010), Atmospheric physics: Chorus keeps the diffuse aurora humming, *Nature*, **467**, 927–928, doi:10.1038/467927a.
- [2] Nishimura et al. (2010), Identifying the driver of pulsating aurora, *Science*, **330**, 81-84.
- [3] Santolik, O., et al. (2008), Frequencies of wave packets of whistler-mode chorus inside its source region: a case study, *Ann. Geophys.*, **26**, 1665–1670.
- [4] Fukuhara et al. (2009), A new instrument for the study of wave-particle interactions in space: One-chip Wave-Particle Interaction Analyzer, *Earth Planets Space*, **61**, 765-778.
- [5] Katoh, Y., et al. (2013), Significance of Wave-Particle Interaction Analyzer for direct measurements of nonlinear wave-particle interactions, *Ann. Geophys.*, **31**, 503–512.
- [6] Kitahara, M., and Y. Katoh (2016), Method for direct detection of pitch angle scattering of energetic electrons caused by whistler mode chorus emissions, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **121**, doi:10.1002/2015JA021902.

## ステライルニュートリノ探索実験 JSNS2 (J-PARC; E56)

(東北大学大学院理学研究科 物理学専攻) ○日野陽太、末包文彦、古田久敬

他 JSNS2 Collaboration

ニュートリノはフレーバー間で振動していることが確認され、その振動パラメータの測定が進んでいる。しかし、現在確かめられているニュートリノの2乗質量差では説明できない振動パターン(ステライルニュートリノ)の存在が LSND 実験以来幾つかの短基線長によるニュートリノ振動実験で示唆されてきた[1],[2]。これらの示唆は、測定誤差の甘さから新物理の証拠として広く認められてはいない。そこで JSNS2 (J-PARC Sterile Neutrino Search at J-PARC Spallation Neutron Source) 実験では J-PARC MLF の中性子源で発生する反ミューニュートリノを用いて、LSND 実験と同じ振動モードである反ミューニュートリノから反電子ニュートリノへの出現モードの振動を観測することで、LSND 実験の結果に対し完全な決着をつけることを目標にしている。



JSNS2 実験では、25t の Gd 入り液体シンチレータ検出器 2 基を用いてニュートリノを検出する。反電子ニュートリノは陽子と反応し逆β崩壊を起こして陽電子と中性子を放出する。この陽電子がニュートリノ信号の先発信号を作り、一方中性子は検出器内で熱化し最終的に Gd 原子核に捕獲され合計約 8MeV のガンマ線を放出し後発信号となる。よってニュートリノはこの先発信号と後発信号の遅延同時(ディレイドコインシデンス)計測を行なうことで同定することができる。

背景事象としては、先発信号・後発信号のそれぞれの選別領域に偶然入り込んでくるような無相関の事象が考えられる。これは主に宇宙線によって作られる中性粒子事象によるものであるが、2014 年の本検出器設置候補地における背景事象測定において先発信号にビーム由来の偶然背景事象であるガンマ線事象の存在が示唆された。そこで 2016 年 5 月から 6 月にかけて、この背景事象を理解するための背景事象測定を行い、宇宙線由来のガンマ線事象より 7 倍多いビーム由来ガンマ線があるという Preliminary な結果を得た。

## 専門用語の説明

- ・ ニュートリノ振動：ニュートリノが他のフレーバーに遷移する現象。
- ・ ステライルニュートリノ：幾つかの振動実験で示唆された弱い相互作用をしない重いニュートリノ。直接検出は困難であるが、ニュートリノ振動を通してその存在を観測することができる。

## 参考文献

- [1] LSND Collaboration, et al, arXiv:nucl-ex/9605001v1  
 [2] MiniBooNE Collaboration, arXiv:0806.4201v1[hep-ex]

## 和周波分光法による物質表面の配向構造解析の理論研究

(東北大学大学院理学研究科 化学専攻) ○齋藤健吾・城塚達也・王琳・森田明弘

【序論】 SFG(和周波発生)分光法は2次の非線形光学過程を利用した界面選択的な振動分光法で、界面分子のミクロな配向構造を解析することができる。界面を理解するうえで分子配向を理解することは非常に重要であり SFG 分光法は界面の種類や環境によらない界面探索手法として注目されている。しかし実験で測定されたスペクトルからは正確な配向構造の解析が困難な場

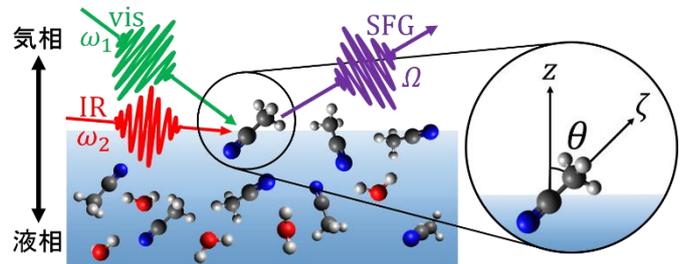


図 1 水/アセトニトリル溶液界面と分子配向の定義

合がある。このような問題は MD(分子動力学)による構造の可視化により解決できる。SFG 分光法による配向解析の例として、水/アセトニトリル( $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_3\text{CN}$ )溶液の気液界面における SFG に着目した。直線状分子のアセトニトリルは分子としての配向が明確で、また CN 伸縮振動や  $\text{CH}_3$  対称伸縮振動など複数の振動から整合性を確認できるという利点がある。本系においては 3 グループによる先行実験が確認されているが、それぞれアセトニトリルの配向構造とその濃度依存性について見解が異なっている<sup>[1][2][3]</sup>。本研究では MD の立場から界面の配向構造を明らかにし、SFG 分光法による配向解析の評価を行った。

【方法】 アセトニトリルのモル分率が 5~100mol%の系を用意し MD シミュレーションを行い、2 次の非線形感受率  $\chi^{(2)}$  とアセトニトリルの分子配向  $\theta$  を計算した。SFG 分光法では 2 次の非線形感受率のテンソル成分の比から配向解析の式を導くことができる。

$$\frac{\chi_{xxz}^{(2)}}{\chi_{zzx}^{(2)}} = \frac{(1+R)\langle \cos \theta \rangle - (1-R)\langle \cos^3 \theta \rangle}{[\langle \cos \theta \rangle - \langle \cos^3 \theta \rangle](1-R)}, \quad \frac{\chi_{zzz}^{(2)}}{\chi_{xxx}^{(2)}} = \frac{2[R\langle \cos \theta \rangle + (1-R)\langle \cos^3 \theta \rangle]}{(1+R)\langle \cos \theta \rangle - (1-R)\langle \cos^3 \theta \rangle} \quad (1)$$

実験では式(1)に次の仮定を適用することで配向解析を行う。

$$\langle \cos^3 \theta \rangle = \langle \cos \theta \rangle^3 = \cos^3 \theta \quad (2)$$

【結果と考察】 各濃度におけるアセトニトリルの平均配向は  $73^\circ \sim 84^\circ$  と界面に対して水平で濃度依存性は小さかった。配向解析について、 $\text{CH}_3$  対称伸縮振動におけるラマンテンソルの異方性のパラメータ  $R$  が 1 より小さいことがわかった。また配向分布がブロードな系に式(2)の仮定を適用することで平均配向を小さく見積もることが示された。

## 専門用語の説明

- ・ SFG : 異なる振動数  $\omega_1, \omega_2$  の光を照射したときに和の振動数  $\Omega = \omega_1 + \omega_2$  の光が放出される現象
- ・ MD : 分子集団の動きを各分子の運動方程式を解くことで再現するシミュレーション手法

## 参考文献

- [1] D. Zhang, J. H. Gutow, K. B. Eisenthal and T. F. Heinz *J. Chem. Phys.* **98**, 5099, (1993) [2] J. Kim, K. C. Chou and G. A. Somorjai *J. Phys. Chem. B* **107**, 1592, (2003) [3] M. J. Shultz, P. Bisson, H. Groenzin and I. Li *J. Chem. Phys.* **133**, 054702, (2010)

タイ国のペルム系より採取された腕足動物化石 *Tyloplecta yangtzeensis* の地球化学滝澤 護<sup>a</sup>・佐藤晋佑<sup>a</sup>・Lapone Techapinyawat<sup>b</sup>・高柳栄子<sup>a</sup>・Thasinee Charoentitirat<sup>c</sup>・浅海竜司<sup>d</sup>・阿部 理<sup>e</sup>・原 英俊<sup>f</sup>・曾根正敏<sup>g</sup>・山本鋼志<sup>e</sup>・井龍康文<sup>a</sup>

a: 東北大, b: タイ石油開発公社, c: チュラロンコン大, d: 琉球大, e: 名古屋大, f: 産総研, g: マラヤ大

近年、人類活動が原因とされる地球温暖化や異常気象などの環境問題が大きく取り上げられている。将来の地球環境を正確に予測するには、過去の地球における気候変動や海洋環境変動を復元し、その因果関係を解明する必要がある。

地球上には、炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) の骨格・殻を有する海棲無脊椎動物が多数生息している (例えば、サンゴ、二枚貝など)。その中には、約5億4500万年前のカンブリア紀前期に出現して以来、現在もなお生息し続けている生物がいる (いわゆる「生きた化石」)。その1つが、本発表の主役を担う「腕足動物」である。炭酸塩生物の骨格・殻には生息域の環境変化が様々な形で記録されている (例えば、成長線、化学組成など)。そのため、それらの生物の化石は過去の環境を記録した古文書として、あらゆる地質時代の古環境復元に用いられてきた。

炭酸塩生物の骨格・殻の炭素・酸素同位体組成 ( $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値)<sup>\*1</sup>は、それぞれ、主に生息当時の海水の溶存無機炭素、塩分および水温を反映するため、過去の海洋環境や気候変動を復元するための代替指標として広く利用されている。特にリンコネラ亜門の腕足動物殻は、陸上でも化学的に安定な低Mg方解石からなるため、続成作用<sup>\*2</sup>を被りにくく、さらに酸素同位体組成について周囲の海水と同位体平衡<sup>\*3</sup>で形成されると報告されたため、その $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値は、過去 (特に古生代) の地球表層環境の復元に多く用いられてきた。しかし、近年の研究により、腕足動物殻には、炭素・酸素同位体組成について同位体平衡で形成される部位とされない部位が存在し、タクサ (分類群) によっても殻内における $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動傾向が異なることが明らかとなった。さらに、従来の研究で得られた一部の腕足動物殻化石の $\delta^{18}\text{O}$ 値からは、生物が生存不可能な水温 ( $>40\text{ }^\circ\text{C}$ ) が計算されることから、これまでの腕足動物殻化石を用いた古環境復元の妥当性に疑問が示されている。この問題は、腕足動物の生理作用や続成作用による化学組成への影響を正確に評価できていないことが原因と考えられる。したがって、今後の研究では、腕足動物殻化石における続成作用の影響を評価するための指標として重要な化学組成や微細構造が、続成作用の進行に伴ってどのように変化したかを正確に把握した上で、殻の $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値を検討する必要がある。そこで本研究では、タイ国のペルム系より採取された腕足動物化石 *Tyloplecta yangtzeensis* の腹殻内側表面における炭素・酸素同位体組成、微量元素元素濃度ならびに殻の微細構造を詳細に検討し、それらの殻内変異と続成作用による化学組成への影響を評価

した。

*T. yangtzeensis*の最大成長軸に沿って切断された腹殻断面の殻構造は、微細構造の観察と $\delta^{13}\text{C}$ 値の変動傾向の違いから、5つの区間（Interval 1～5）に区分された。*T. yangtzeensis*の腹殻内側表面ならびに外側表面の一部には、陸水続成作用の影響による微細構造の破壊と $\delta^{13}\text{C}$ 値の有意な減少が認められた。また、ラミナ状2次層からなる殻頂部（Interval 1）ならびに殻端部（Interval 4とInterval 5）は、Mn/Ca比およびFe/Ca比の増加ならびに $\delta^{18}\text{O}$ 値の減少が認められ、埋没続成作用による化学組成の改変が示唆された。一方、*T. yangtzeensis*のプリズム状3次層（Interval 3）から得られたMn/Ca比およびFe/Ca比はいずれもラミナ状2次層（Interval 1, 4, 5）から得られた値より系統的に値が小さく、 $\delta^{18}\text{O}$ 値は大きかった。これは、プリズム状3次層が、ラミナ状2次層と比べて続成作用による化学組成の改変を被りにくく、初生的な同位体組成が保持されている可能性が高いことを示している。また、*T. yangtzeensis*の $\delta^{13}\text{C}$ 値のプロファイルには、2つの極小値が、Mg/Ca比のプロファイルには、1つの極大値がそれぞれInterval 2に認められた。これは、筋肉痕が存在する部位と一致することから、代謝効果に伴う $\delta^{13}\text{C}$ 値の減少と殻中の有機質由来のMgの濃集が原因と考えられる。

以上のように、*T. yangtzeensis*の腹殻内側表面における $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値のプロファイルは、腕足動物の生理作用と堆積後の続成作用の影響を強く被ったことで複雑な変動を示していた。しかし、本研究のような殻の微細構造ならびに化学組成について詳細な検討を行うことにより、腕足動物殻化石のなかでも、生理作用と続成作用の影響をあまり被っていないと判断され、古環境指標として有用な部位を特定することが可能である。今後こういった研究を重ね、厳選された腕足動物化石の分類群ならびに殻の部位を用いて古環境復元を行うことにより、従来よりも遥かに高精度かつ信頼性の高い古気候・古海洋環境を描き出せると期待される。

#### 【専門用語の解説】

- \*1 炭素・酸素同位体組成 ( $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値) (参考: 川幡徳高 [著] 海洋地球環境学 東京大学出版会)  
一般に同位体組成はそれぞれの元素で存在度が最も大きい同位体に対する比率で表される。同位体比の絶対値よりも物質の同位体比の変動が重要となるため、適当な国際標準試料の同位体組成との偏差を千分率で表した $\delta$ 値 (‰) で通常定義される。例えば、炭酸カルシウムの炭素・酸素同位体組成は、米国サウスカロライナ州のPee Dee層から産するペレムナイト化石 (PDB: Pee Dee Belemnite) の炭素・酸素同位体組成を一般に標準試料とする。
- \*2 続成作用 (diagenesis)  
堆積物が定着してから固結して地層になるまでの物理的及び化学的变化を含む一連の過程のことを指す。炭酸塩生物化石の場合、セメンテーションや再結晶によって、初生的な $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値や金属元素濃度が失われてしまう場合がある。一般に $^{12}\text{C}$ と $^{16}\text{O}$ にそれぞれ富む土壌と天水の影響を強く被る天水続成作用は、炭酸塩の $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値を減少させる。一方、炭素が枯渇し、高温環境になる埋没続成作用は、炭酸塩の $\delta^{18}\text{O}$ 値を減少させる。
- \*3 同位体平衡  
炭酸カルシウムが無機的に沈殿した場合、その $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値は、反応時の熱化学条件 (例えば水温やpHなど) によって決定する。同位体平衡とは、実際にその条件下での化学平衡が成立し、炭酸カルシウムの $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値が期待される値の範囲内であることを指す。したがって、同位体平衡で形成された炭酸カルシウムが得られた場合、その $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値は、形成当時の環境 (水温や無機炭酸塩系) を復元する手がかりとなる。しかし、炭酸塩生物骨格の $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値は、その生物の生理作用 (成長速度の変化や代謝活動) の影響で、同位体平衡で沈殿した場合の炭酸カルシウムの $\delta^{13}\text{C}$ 値・ $\delta^{18}\text{O}$ 値の範囲から外れてしまうことがある。

## 特殊相対論的磁気流体力学に基づく 高密度天体近傍における磁気回転不安定性に関する研究

(東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻) ○荒尾 圭唯

### 背景

ブラックホールに代表される高密度天体周辺において、天体重力に引き寄せられるガスや塵によって降着円盤が形成される。降着円盤に関する問題として、公転運動する物質を中心天体へ降着させるために、物質が持つ角運動量を円盤外縁方向へ輸送する過程が指摘されている。円盤中の角運動量輸送を引き起こす要因として、円盤中で発生する磁気乱流の効果が重要視されている[Shakura and Sunyaev, 1973<sup>[1]</sup>]。磁気乱流を駆動する機構の1つとして、円盤中で生じる磁気回転不安定性<sup>\*1</sup>(Magneto-rotational instability: MRI)の果たす役割が注目されている[Balbus and Hawley, 1991<sup>[2]</sup>]。MRIに関する線形解析の結果から、降着円盤が数回転する間に円盤中の背景磁場が指数関数的に成長することが示されている[Balbus and Hawley, 1991<sup>[2]</sup>; Sano and Miyama, 1999<sup>[3]</sup>]。

**MRI**の線形解析について、中心天体として高密度天体を仮定した解析はまだ行われていない。またブラックホール周辺の大規模な磁場構造の発展に関する磁気流体力学<sup>\*2</sup>(Magneto-hydrodynamics: MHD)シミュレーションを行った Etienne et al. (2012)<sup>[4]</sup>において、相対論的近似が施された非相対論的 MHD に基づく MRI の線形解析結果が用いられている。

### 目的

- ・高密度天体周辺の降着円盤を仮定し、MRIの線形解析を行う。
- ・既に行われたMRIの線形解析結果と比較し、差異を明らかにする。
- ・MRIに対する相対論効果の影響を考察する。

### これまでの成果

準備段階として、高密度天体周辺の降着円盤を考えるべく、円盤回転速度が光速に対して無視できないほど速く回転する降着円盤を仮定し、特殊相対論的効果が考慮された MHD 方程式を設定した。

本研究の成果として、線形化が施された特殊相対論的 MHD 方程式が導出された。また線形化された特殊相対論的 MHD 方程式を用いて、**特殊相対論的 MHD に基づく MRI の分散関係式が導出された**。Sano and Miyama (1999)<sup>[3]</sup>で示された非相対論的 MRI の分散関係式及び本研究により導出された特殊相対論的 MRI の分散関係式の異なる点として、降着円盤中の微小な擾乱の波の周波数  $\omega$  について、前者は  $\omega$  の 6 次式である一方、後者は  $\omega$  の 12 次式である点が指摘された。

### 専門用語の説明

- \*1 磁気回転不安定性：降着円盤中の背景磁場に起因する流体要素間の力学的不安定性
- \*2 磁気流体力学：電磁気的作用が考慮された流体力学

## 参考文献

- [1] Shakura, N. I., and R. A. Sunyaev (1973), Black holes in binary systems. Observational appearance., *A. and A.*, **24**, 337-355.
- [2] Balbus, S. A., and J. F. Hawley (1991), A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. 1. Linear analysis, *Astrophys. J.*, **376**, 214-222, doi:10.1086/170271.
- [3] Sano, T., and S. M. Miyama (1999), Magnetorotational instability in protoplanetary disks. 1. On the global stability of weakly ionized disks with ohmic dissipation., *Astrophys. J.*, **515** (2), 776-786, doi:10.1086/307063.
- [4] Etienne Z. B., V. Paschalidis, and S. L. Shapiro (2012), General-relativistic simulations of black-hole-neutron-star mergers: Effects of tilted magnetic fields, *Phys. Rev. D*, **86** (8), 084026, doi:10.1103/PhysRevD.86.084026.

## ある種の準完全直方体と合同数の関係について

B5SM1015 澁谷弘司

3辺  $x_1, x_2, x_3$  と3つの面上の対角線  $y_1, y_2, y_3$  と体対角線  $z$  が有理数の直方体が存在するかどうかは、まだ解決されていない問題で、完全直方体問題と呼ばれている [1]。ここから、7つの長さのうち任意の6つが整数であるものは存在するか、という問題が考えられる。本論文ではこれを準完全直方体と呼ぶことにする。この問題は3つのケース、 $z, y_3, x_3$  のいずれかの有理性を問わない場合がある。

Narumiya, Shiga による論文 [2] では、 $y_3$  の有理性を問わない準完全直方体が満たす整係数代数方程式が定める射影代数多様体と、合同数に関連する楕円曲線を双有理写像を用いることで、その楕円曲線上の位数無限の2点から、考えている準完全直方体が得られるという関係を示しており、完全直方体問題の解決に1つの進展をもたらしたと見られる。この準完全直方体の性質を興味深いと思ったので、これを紹介する。

**定義 1.**  $y_3$  の有理性を問わない準完全直方体は次の連立方程式を満たす。これを  $A$  とおき、 $\mathbb{Q}$  上の射影空間  $\mathbb{P}^5$  の2次元閉部分多様体と見る。また、 $A$  のアフィン化を  $B$  とおく。  $B$  において、 $X_1 X_2 X_3 = 0$  となるときを自明な解とする。

$$A : \begin{cases} x_2^2 + x_3^2 = y_1^2 \\ x_3^2 + x_1^2 = y_2^2 \\ x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = z^2 \end{cases} \quad B : \begin{cases} X_2^2 + X_3^2 = 1 \\ X_3^2 + X_1^2 = Y_2^2 \\ X_1^2 + 1 = Z^2 \end{cases}$$

**定義 2.**  $N \in \mathbb{N}$  に対し、 $N$  を面積とする有理直角三角形が存在するとき、 $N$  を合同数という。

**命題 3.**  $N$  が合同数  $\Leftrightarrow$  楕円曲線  $E_N : Y^2 = X^3 - N^2 X$  が位数無限の点をもつ。

**定理 4** (Narumiya, Shiga[2]).  $S_3 : \eta^2 = \xi(\xi^2 - 1)\zeta(\zeta^2 - 1)$  とする。ある有理曲線の和の集合  $\Lambda_3$  を除いて、 $S_3$  の有理点の集合と  $B$  の非自明な有理数解の集合の間の対応が存在する。

**定理 5** (Narumiya, Shiga[2]).  $N$  を合同数とし、 $(u_1, v_1), (u_2, v_2)$  をそれぞれ  $E_N$  の位数無限の点とする。

$$(\xi, \eta, \zeta) = \left( \frac{u_1}{N}, \frac{v_1 v_2}{N^3}, \frac{u_2}{N} \right)$$

とおくことで、 $S_3$  の  $\eta \neq 0$  である有理点  $(\xi, \eta, \zeta)$  を得る。逆に、 $S_3$  の任意の  $\eta \neq 0$  である有理点はこの方法で得られる。

## 参考文献

- [1] John Leech, *The rational cuboid revisited*, Amer. Math. Monthly **84** (1977), no. 7, 518–533, DOI 10.2307/2320014. MR0447106
- [2] Norihiko Narumiya and Hironori Shiga, *On certain rational cuboid problems*, Nihonkai Math. J. **12** (2001), no. 1, 75–88. MR1833744

## すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam によるりゅう座矮小楕円体銀河の

### 超広視野探査

○佐々木花<sup>1</sup>・千葉証司<sup>1</sup>・田中幹人<sup>1</sup>・小宮山裕<sup>2</sup>・岡本桜子<sup>3</sup>・石垣美歩<sup>4</sup>・Judy Cohen<sup>5</sup>・Evan Kirby<sup>5</sup>・  
Rosie Wyse<sup>6</sup>

- 1.東北大学大学院理学研究科天文学専攻 2.国立天文台 3.東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構  
4.中国科学院 上海天文台 5.カリフォルニア工科大学 6.ジョンズホプキンス大学

宇宙には、星やガス、暗黒物質からなる大小様々な銀河が存在しており、小さい銀河が衝突合体を繰り返すことでより大きな銀河へと進化していくと考えられている。観測による銀河進化の研究には、今まさに進化中の段階である遠方の銀河に着目する方法と、すでに進化を終えた近傍の古い銀河に着目する方法がある。我々は特に後者の方法に基づいた「銀河考古学」の研究を行っている。

太陽系が属する天の川銀河の周辺には、天の川銀河の重力ポテンシャルにとらわれて軌道運動している衛星銀河が多数存在している。これらの衛星銀河は暗くて小さいため矮小銀河と呼ばれ、太陽系から比較的近い位置に存在するために銀河を構成する星に分離して観測することができる。銀河を構成する星の色等級図を描いて銀河の年齢・金属量を調べると、矮小銀河は古く(年齢 100 億年程度)で金属量が低い星から成っているものが多く進化があまり進んでいないことがわかっている。したがってこのような銀河は誕生した当時の周辺環境やの宇宙の情報、化学組成の情報を残しており、さながら銀河の化石とみなすことができる。「銀河考古学」とは、このような近傍にある化石のような銀河の性質から、銀河誕生当時の周辺環境やそれらが降着してできたと考えられる銀河の古成分などを調べる学問体系であり、近年発展してきた分野である。

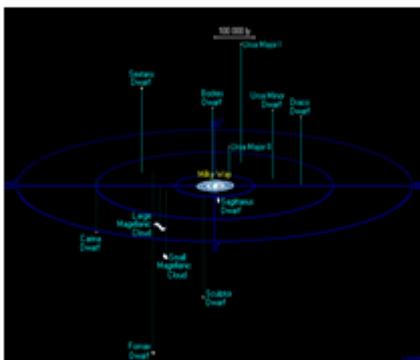
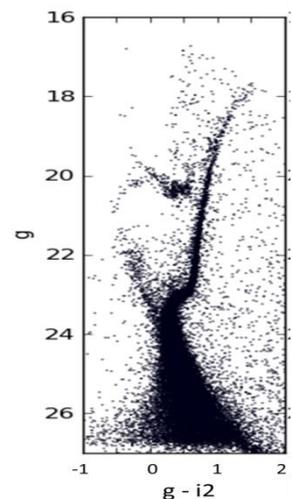


図 1(左) : 太陽から半径 50 万光年以内に存在する衛星銀河の分布図

図 2(右) : 色等級図の例。右上に向かっているのが赤色巨星分枝、水平に伸びているのが水平分枝、右下に向かっているのが主系列星



銀河考古学で用いる矮小銀河は太陽からの距離が近いため天球上に占める面積が大きく、これまでの観測では中心部付近等矮小銀河の一部の観測しかできていなかった。しかし、新しいすばる望遠鏡の観測装置 Hyper Suprime-Cam (HSC) によって一度に観測できる範囲が今までより格段に広く

なり、矮小銀河の全体を観測できるようになった。このため矮小銀河の外側の構造、特に暗黒物質が広がっているハローの構造や、化学組成・星種族等の場所依存性等をより正確に調べられるようになった。また HSC のおかげで非常に暗い星まで観測可能になり、今までの観測では暗く発見できていなかったかもしれない銀河衝突の痕跡や密度超過等の暗い構造を調べることが可能になった。

我々は、この HSC を用いて天の川銀河の衛星銀河の一つのりゅう座矮小楕円体銀河(Draco dSph)の観測を行った。Draco dSph は年齢が 120 億年程度で金属量も低く、現在星形成活動は行われていない。また質量光度比が高いためにダークマターが支配的な系だと考えられている。銀河の色等級図や動径方向の密度分布をから、Draco dSph は非常に広がった系であることが分かった。本発表では、HSC による観測結果およびさらなる観測のためのターゲットセレクションの方法を紹介する。

### 専門用語の説明

- ・ 暗黒物質：電磁波と相互作用しないため観測できないが重力相互作用を及ぼす物質
- ・ 金属量：H, He より原子番号が大きい元素の総称
- ・ 色等級図：縦軸にある波長帯での星の等級、横軸に異なる波長帯の等級差をとり星をプロットした図

### 参考文献

- [1] Ségall, M et al. 2007 ,MNRAS, 375, 831–842
- [2] 千葉 柊司著, 『銀河考古学 (新天文学ライブラリー 第2巻)』, 日本評論社, 2015

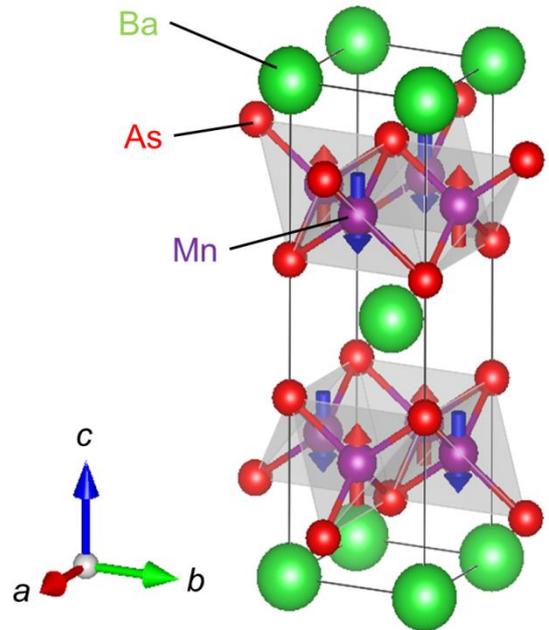
空間反転対称性の破れた反強磁性体  $\text{BaMn}_2\text{As}_2$  における磁気輸送現象東北大院理, 東北大金研<sup>A</sup>

五十嵐 馨, 青山 拓也, 橋詰 和樹, 長谷川 慶直, 江見 知俊

木村 尚次郎<sup>A</sup>, 大串 研也

## [研究背景]

物質が示す物性は、系の対称性から制約を受ける。その対称性の制約の中でも空間反転対称性の有無は重要である。近年見出されているマルチフェロイクス、スピンホール効果などの現象は、空間反転対称性の破れと密接な関係がある。空間反転対称性の破れに起因した現象として電気磁気効果があげられる。この現象は、電場による磁化の誘起または磁場による電気分極の誘起という現象である。これまで電気磁気効果を示す物質として報告されているものは絶縁体であり、金属における電気磁気効果は未開拓である。そこで、我々は空間反転対称性の破れた金属に興味を持ち研究を進めている。その候補物質として $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ に着目している。 $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ は、 $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$ 型の構造(図1)を成しており、空間群は正方晶系の $I4/mmm$ である。また、中性子回折の実験からチェッカーボード型の反強磁性秩序が転移温度 $T_N = 625 \text{ K}$ 以下で生じていることが判明している[1]。空間反転操作で本来結びつく配位環境の異なる四面体サイト上を、空間反転操作で結びつかないアップスピンとダウンスピンが占めているため、磁気秩序によって空間反転対称性が破れている。磁気空間群は $I4/m'mm'$ である。この磁気秩序による空間反転対称性の破れは、電気磁気効果を示す $\text{Cr}_2\text{O}_3$ と共通している。また先行研究により $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ は広い温度領域において金属的な導電性を示すことが判明している[2]。つまり、 $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ は磁気的に空間反転対称性が失われている領域において導電性を示すことから、これまで絶縁体で報告されてきた電気磁気効果を示す物質を導電体に拡張する恰好の対象であることが分かる。しかし、導電性の物質では誘電分極の測定はできないため、金属における空間反転対称性の破れに起因した物性を輸送現象を通して観測することを目的とし研究を進めた。

図 1 :  $\text{BaMn}_2\text{As}_2$  の結晶構造および磁気構造。

## [試料作製および実験手法]

$\text{BaMn}_2\text{As}_2$ 単結晶は、セルフフラックス法により合成した。窒素雰囲気グローブボックス内で、Ba、Mn、Asをモル比が1:5:5になるように秤量し、アルミナ坩堝の中に入れ、石英管で二重封管した。その際、内側の石英管には0.3 atmのArガスを注入し、外側の石英管は真空引きした。焼成プログラムは、室温から1200 °Cまで6時間で昇温し、1200 °Cで6時間保持した後、84時間で1000 °Cまで下げるものである。磁気輸送現象測定には、東北大学金属材料研究所強磁場超電導材料研究セン

ターに設置されている超伝導マグネット(18T-SM、20T-SM)を使用した。一軸回転機構付属のインサートを用いて試料を回転することで、磁気抵抗効果の角度依存性を測定した。温度範囲は5-300 K、磁場範囲は0-17.5 Tである。

#### [実験結果]

本研究で新たに温度40 Kにおいて弱強磁性が発現することが明らかになった。自発磁化は  $1.0 \times 10^{-4} \mu_B / \text{Mn}^{2+}$  である。注目すべき点として、 $\text{BaMn}_2\text{As}_2$  の磁気点群  $4'/m'mm'$  では、電気磁気効果テンソルが対角成分に有限値を持つ。それにより面内への弱強磁性発生に伴い、面内に誘電分極が出現し、正方晶であった結晶構造が直方晶に歪むことが期待される。このような構造変態に起因した伝導現象が磁気抵抗効果の磁場方位依存性で観測された。図2に(100)と(010)からなる面内で磁場を回転させたときの磁気抵抗効果の磁場方位依存性を示す。この結果、高温領域では磁場方位に対する異方性は観測されなかった。しかし、温度40 K以下において磁場方位に対する異方性が低温に向かうにつれ増大した。これは、上述の構造変態により正方晶から直方晶に転移することにより結晶軸の  $a$  軸と  $b$  軸が非等価となり、 $ab$  面内の電気抵抗率が異方的になったと考えられる。

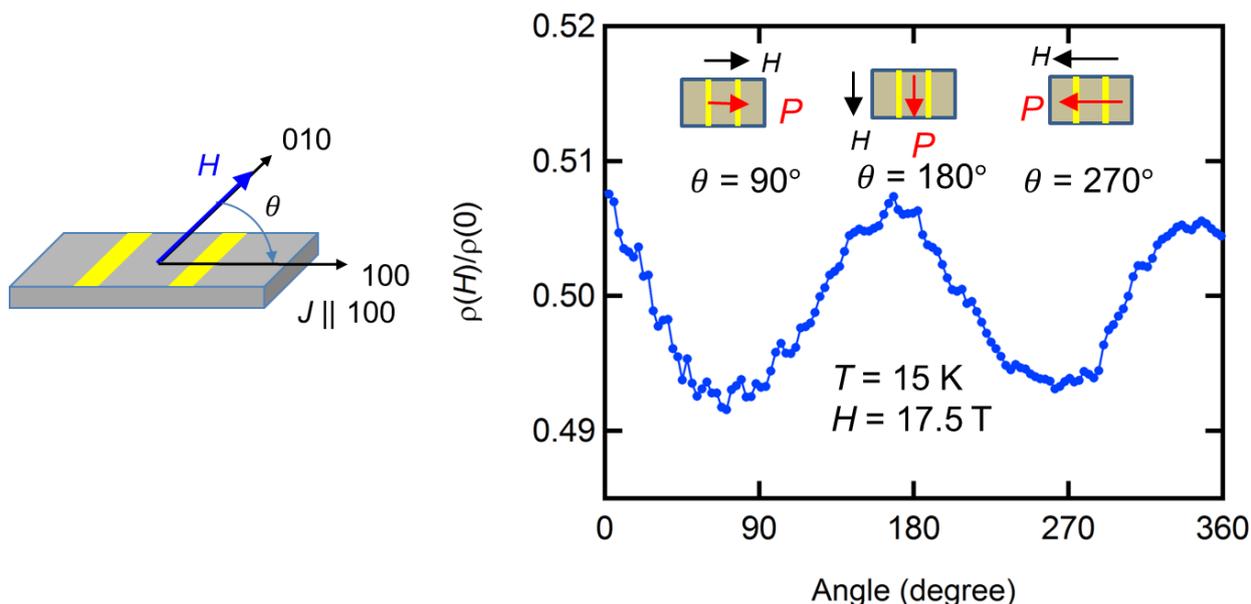


図 2 :  $\text{BaMn}_2\text{As}_2$  における磁気抵抗効果の磁場依存性と実験配置の概略図

#### 専門用語の説明

- ・ 反強磁性：隣り合うスピンの向きがそれぞれ反対方向を向いて整列し、全体として磁気モーメントを持たない物質の磁性を指す。
- ・ 磁気抵抗効果：外部磁場により物質の電気抵抗率が変化する現象である。

#### 参考文献

- [1] Y. Singh, *et al.*, Phys. Rev. B **80**, 100403 (2009).  
 [2] J. An, *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 075120 (2009).

## 高分子イオン水和物の構造研究のための低温イオン移動度質量分析装置の開発

(東北大学大学院理学研究科 化学専攻) ○西結人・矢部謙太・大下慶次郎・美齊津文典

生体内反応においてタンパク質などの高分子は非常に重要な役割を担っている。例えば酵素は、周囲の水分子や金属イオンとの相互作用によって鎖状の分子が立体的に折りたたまれることで高次の構造をもち、高い触媒活性と反応選択性を示すことが知られている[1]。したがって、酵素反応の理解において水分子との相互作用を理解することは重要である。

水和された高分子の構造は、水分子が結合している位置や、水分子の数（水和数）によって異なると考えられる。また水和数が増えるにつれて構造や反応性を含む高分子の物性は水中での性質に近づいていくことが予想され、高分子が水中における物性を発揮するのに必要な水和数にも興味もたれる。広範な水和数をもつ分子を対象にできるため、気相における研究は高分子と水との分子間相互作用を微視的に理解することにつながると期待される[2]。本研究では、水和された高分子イオンの構造を研究することを目的として、低温イオン移動度質量分析装置の開発を行っている。

現在開発している実験装置は、エレクトロスプレーイオン源(ESI)を用いて高分子試料をイオン化し、四重極イオントラップ(QIT)でイオンを蓄積した後に、イオン移動度質量分析を行う設計となっている。現在、水和された高分子イオンの生成条件や、その他の装置条件の最適化を目的として、イオン移動度分析用のドリフトセルを導入せずに、メチレンブルー正イオンの質量分析を行っている(右図)。種々の装置・溶液条件により、水和物イオンのイオン強度が変化することが確認された。

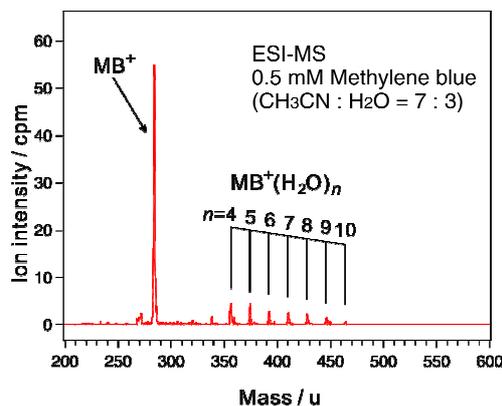


図 エレクトロスプレーイオン源を用いたメチレンブルー水和物正イオンの質量スペクトル

### 専門用語の説明

- ・イオン移動度質量分析：ヘリウムなどの緩衝ガスが充填されたドリフトセルにイオンを導入し、セル内部の電場による加速と緩衝ガスとの衝突による減速の影響を用いて構造を分離する分析手法（気相での電気泳動）をイオン移動度分析という。ドリフトセルを質量分析計と組み合わせることで（イオン移動度質量分析）、イオンの構造と質量を関連付けることができる。
- ・エレクトロスプレーイオン化：高電圧を印加した針先から試料溶液を噴霧し、大気圧下で試料をイオン化する手法。他のイオン化手法に比べて、解離や異性化反応などが起きにくくソフトなイオン化であり、水和物イオンの生成が多数報告されている。

### 参考文献

- [1] M.Grossman et. al., *Nat. Struct. Mol. Biol.* **18**, 1102 (2011).  
[2] S. Lee, et. al., *J. Am. Chem. Soc.* **122**, 9201 (2000).

P09

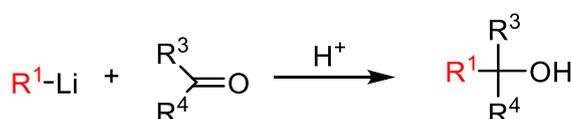
# P10

## ケイ素を含んだ分子パーツとなるジリチオシランの選択的合成

(東北大学大学院理学研究科 化学専攻) ○田村真実・小林聖史・石田真太郎・岩本武明

化学において新たな結合形成は基本的かつ重要な課題であり、現在でも新たな手法の開発は、新物質の合成戦略上、非常に重要である。有機リチウム試薬は有機化学において結合形成反応に用いる一般的な試薬であり、化合物に新たなパーツを組み込む際に用いられる。応用例は極めて広く、化学に限らず薬学、工学など幅広い分野において利用されている。有機リチウム試薬は Scheme 1 に示すようにリチウム原子一つにつき反応点を一つ持つ。

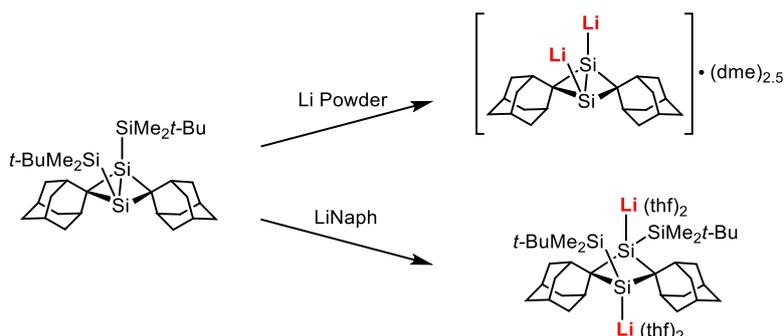
### Scheme 1.



多数の例がある有機リチウム試薬と比べて、ケイ素リチウム試薬の例は相対的に少なく、反応点が二つ存在するジリチオシランについては一度に2つの結合を形成できる点で重要であるが、その報告例は数例のみである。新たなジリチオシランの開発は、新規ケイ素化合物の生成につながる点で重要である。

今回我々は当研究室で開発された 2,3-ジシラビシクロ[1.1.0]ブタン<sup>1</sup>という化学種から反応条件を調節することにより、二種類のジリチオシランの選択的合成に成功した(Scheme 2)。今回合成したジリチオシランを用いることにより通常合成が容易ではない含ケイ素化合物の合成が可能となった。

### Scheme 2.



### 専門用語の説明

- ・ ジリチオシラン：ケイ素—リチウム結合を2つもつ化学種

### 参考文献

[1] Iwamoto, T.; Yin, D.; Kabuto, C.; Kira, M. *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, *123*, 12730.

## 飯縄山および黒姫山における中期更新世以降の火山麓扇状地形成史

(東北大学大学院理学研究科 地学専攻) 湯澤 樹

火山麓扇状地の地形発達史研究は様々な火山体で行われてきた。特に多量の溶岩や火砕流を噴出している時期はそれに起因した火山麓扇状地が形成されることが明らかにされている(大山火山:荒川, 1984; 富士山:田島ほか, 2006)。一方で火山活動の休止期には気候変化を反映した岩屑供給が生じている可能性が指摘されているが(黒木, 1995 など), 火山麓扇状地形成との関係は不明な点が多い。

以上のような視点から本研究では, 火山体の概形を既に完成させ, 休止期に入っている飯縄山および黒姫山を対象とし, 火山麓扇状地の形成過程時期および性質を明らかにする。そして火山麓扇状地と広域的な気候変化との関係を考察する。

対象地域の飯縄山および黒姫山周辺には地形面の対比・編年に有効な示標テフラが多数分布している。特に示標テフラの層序が不明であった飯縄山西方において模式テフラ層序を確立しつつ, 火山麓扇状地の対比・編年を行った。

調査の結果, 火山麓扇状地は約 120 ~ 140 ka の I 面, 約 60 ~ 75 ka の II 面, 約 45 ~ 51 ka の III 面, 晩氷期~完新世の IV 面に区分できることが明らかとなった。II 面は飯縄山において堆積段丘として存在する。III 面は飯縄山において II 面構成層を侵食して形成した fill strath terrath であり, 黒姫山においては strath terrace として存在する。また IV 面も両火山において侵食段丘として存在する。

飯縄山の火山麓扇状地と周辺の河成段丘はテフラ層序から対比が可能である。また中部山岳地域の岩屑供給量の変遷は, 本対象地域と調和的であり, 河成段丘と同様に氷期・間氷期サイクルによって火山麓扇状地が形成された。

亜間氷期の侵食段丘の性質をもつ火山麓扇状地は, 他の成層火山体でも存在しており, 広域的な気候変化によって形成される火山麓扇状地は普遍的に存在する可能性が示唆された。

## 専門用語

火山麓扇状地: 成層火山体中央部の開析谷から放射状にできる緩傾斜で扇形な地形

テフラ: 固体として地表にでる火山噴出物。地形面の年代の推定や同時代の地形面の認定などの示標となる。

## 文献

荒川 宏 (1984): 大山火山北西部における火山麓扇状地の形成. 地理学評論, **57**, 831-855.

黒木貴一 (1995b): 猫魔火山北西麓の火山麓扇状地. 季刊地理学, **47**, 182-202.

田島靖久・宮地直道・井上公夫 (2006): 新富士山の噴火活動に伴う上井出扇状地の発達史.

第四紀研究, **45**, 287-301.

## ひさき/EXCEED で観測されたイオ火山噴火に伴う酸素大気の変動

(東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻)

○古賀 亮一、坂野井健、鍵谷将人、土屋史紀、吉川一郎、吉岡和夫、村上豪、山崎敦、  
木村智樹

木星衛星のひとつであるイオは太陽系の中で火山活動が活発な天体である。イオの大気は主成分が二酸化硫黄で、火山活動と表面が太陽の光で温められて気化する昇華の二種類がある。火山活動と昇華のどちらが大気生成に大きく寄与しているかが問題となっており、本研究ではその理解を目指した。生成された二酸化硫黄は電子衝突や光分離によって解離され、酸素や硫黄原子になる。これらの原子はイオ軌道近くを回っているイオンと衝突することで大気からはじき出され(スパッタリング)、イオの重力圏外へ脱出する。イオの火山活動の時間変動はこれまでイオ起源のナトリウム雲やイオ表面の赤外放射の観測によって報告されてきた。しかし、火山活動に伴うイオ起源粒子の主成分である二酸化酸素やその解離成分である酸素や硫黄原子の変動は未だに観測されていない。2015年の春季にイオの火山活動に伴うナトリウム雲の変動[1]や表面の赤外放射の変動[2]が報告された。私たちはひさき衛星の同時期の観測データを用いてイオ周辺の130.4nm波長における酸素原子発光の変動を解析した。その結果、酸素原子の発光の明るさが通常時に比べて2.5倍ほど明るくなることがわかった。酸素原子発光とナトリウム発光の変動を比べると、火山活動静穏時からピークにかけてはとても良い相関があった。一方、ピークから発光が元の明るさに戻るまでの時間は、ナトリウム雲発光では40日程度かかったのに対し、酸素原子発光のほうは60日かかった。ナトリウム雲の発光は共鳴散乱で光るのに対し、130.4nmの酸素原子発光は共鳴散乱と電子衝突励起の二種類で光るため、酸素原子の発光強度のみ電子温度や密度の変化の影響を受ける。このため、この違いの原因は電子密度や温度の変化が大きかったことが考えられる。よって、酸素原子の変動を主に反映しているのは火山活動静穏時からピークにかけての期間であると推定される。火山活動とナトリウム雲の変動には相関があることが明らかにされている。このことから、昇華で起こる大気量が火山活動で変化しないという前提の元、上記の理由から火山活動静穏時からピークにかけてのみのナトリウムと酸素原子の相関関係から大気の生成における昇華と火山活動の寄与を見積もった。

## 専門用語の説明

- ・ 共鳴散乱：特定の波長の太陽光を原子が選択的に吸収し、再放出する。
- ・ 電子衝突励起：イオ軌道付近を周回する電子が原子と衝突することで励起発光する。

## 参考文献

- [1] Yoneda, M., M. Kagitani, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, S. Okano (2015), Brightening event seen in observations of Jupiter's extended sodium nebula. *Icarus*, 261, 31–33.
- [2] De Kleer, K., I. De Pater (2016), Time Variability of Io's Volcanic Activity from Near-IR Adaptive Optics Observations on 100 Nights in 2013-2015. *Icarus* 280, 378–404.

## 50 ヘルツ磁場がもたらす細胞酸化ストレスの研究

(東北大学大学院理学研究科 物理学専攻) ○中山 希祐

## 研究の背景と目的

近年における、電子機器の著しい使用増加に伴って、低周波磁場(1 - 300 kHz)の健康影響についての関心が増している。環境磁場としての低周波磁場と生体物質との相互作用は、生体が持つ熱エネルギーに比べて低く、またその変動時間は生体内の化学反応速度と比べて遅いため、生体へ影響を与えないと考えられている。その一方で、低周波磁場による生体影響として、いわゆる遺伝毒性が報告されてきた。遺伝毒性の本質はDNA損傷であるが、これは発がん性を誘導するため、生体にとって大きなリスクとなりうる。国際がん研究機関(IARC)は、低周波磁場には発がん性リスクの可能性があることを報告している。一般的に、DNA損傷は放射線、紫外線によって水分子からラジカルが生成されることで起こされることが知られているが、低周波磁場のエネルギーは低く、直接DNA損傷を引き起こすことはできない。

一方、DNA損傷を引き起こす原因の一つとして、酸化ストレスが知られている。この酸化ストレスは多くの場合、ラジカルによって誘導される。磁場のラジカル反応へ与える影響については、地磁気を感じる渡り鳥の研究からSchultenらによって明らかにされてきた。それによると渡り鳥の目の中の青色光受容体が光励起されるとラジカル対が生じる。このラジカル対が再結合するレートに地磁気が影響を与え、その結果としてラジカル対が関与する光受容反応のレートが変化するという可能性が示されてきた。したがって、低周波磁場は酸化ストレスに関与する形でDNA損傷の誘導を促進していることが考えられる。

上に述べたように、DNA損傷には、ラジカル、あるいはより広くは酸化ストレスが関与する。先行研究からラジカルがDNA損傷を誘導する過程に、低周波磁場が影響を与える可能性が疑われている。低周波磁場が生体へ影響を与えるメカニズムは、まだ解明されていないが、Laiらによって、低周波磁場によるDNAの損傷度がラジカル消去剤を用いることで、抑制されることが報告された[1]。この仮説を元にLaiらは、以下の二段階のプロセスを主とする一つの仮説を提唱した。1) DNA損傷を引き起こすラジカルとしてヒドロキシラジカル( $\cdot\text{OH}$ )がある。この $\cdot\text{OH}$ を過酸化水素と二価鉄から生成する反応としてFenton反応が知られているが、低周波磁場はこれを促進する。2)  $\cdot\text{OH}$ はまた脂質の過酸化を通じて一酸化窒素(ラジカル)産生量(NO)を増加させ、これにより誘導される鉄貯蔵タンパク質からの鉄イオン放出がFenton反応をフィードバック的に増強させる。私はこの仮説に興味を持ち、検証することを目指した。

## 実験結果

はじめに、50-Hz磁場が線維芽細胞(Swiss Albino 3T3)のDNA損傷を促進する作用について検証を行った。実験では500- $\mu\text{T}$ 、1000- $\mu\text{T}$ 磁場を2~24時間曝露し、DNA損傷度を comet assay(単一細胞ゲル電気泳動法)によって測定した。その結果、1000- $\mu\text{T}$ 磁場を24時間連続曝露することによってDNA二本鎖切断量が有意に増加した。また、断続波形磁場を18時間曝露することによって、DNA一本鎖切断量が有意に増加した。断続波形を用いて得られた結果は先行研究[2]と類似のものである。これにより、低周波磁場にDNA損傷作用があることが確認された[4]。

前述の結果を受けて、Laiの低周波磁場がDNA損傷を誘導するプロセスの仮説を検証するために、免疫細胞マクロファージ(RAW264)を用いて50-Hz磁場曝露によるNO産生量、DNA損傷度、細胞死を調べた。Laiの研究と異なる点は、LPSによる酸化ストレス誘導を行ったことである。免疫細胞をLPS刺激するとNO合成酵素発現量が増加し、結果的にNO(酸化ストレス源)産生量が増加し、細胞内酸化ストレスも増加することが知られている。このことを利用して、マクロファージへのLPS刺激を行い、その後さらに500- $\mu\text{T}$ 磁場を24時間曝露したのち

に、上記の指標を測定した。その結果、DNA 損傷度とネクロシス(細胞の突発死)は、LPS 刺激によって促進され、50-Hz 磁場曝露によって更に増加した。一方で、50-Hz 磁場曝露によるNO産生量の有意な増加は測定されなかった[3]。したがって、NOによる酸化ストレスは 50-Hz 磁場曝露による DNA 損傷や細胞死の直接原因ではないことが示唆された。

DNA 損傷を引き起こしうる酸化ストレス分子としてNO以外に $O_2$ や $\cdot OH$ 、 $ONOO^-$ がある。このうち $\cdot OH$ と $ONOO^-$ は酸化力が高いことが知られているが、 $\cdot OH$ は DNA 損傷を引き起こすには寿命が短すぎるため、 $ONOO^-$ に着目した。 $ONOO^-$ はNOと $O_2$ の反応によって生成される。そこで、私は $O_2$ 産生量増加経路へ低周波磁場が作用した可能性を考えた。先行研究において、50-Hz 磁場が $O_2$ 産生を促進することが示されている[5]。 $O_2$ は、ミトコンドリアの ATP 合成の過程で、恒常的に放出されている。本研究では、このミトコンドリア膜から生成される $O_2$ に磁場曝露が与える影響に着目し、測定した。その結果、マクロファージへ 500- $\mu T$  磁場を 24 時間曝露することによって、細胞内の $O_2$ 産生量が増加した。次にこの $O_2$ 増加の原因を検討した。ミトコンドリアが機能不全を起こすと膜の中と外の電位差( $\Delta\Phi_m$ )が低下し、放出される $O_2$ は増加する。実際に、 $\Delta\Phi_m$ を測定したところ磁場曝露によって、有意な低下が測定された[6]。一方、ミトコンドリア膜電位差を減少させることが知られている FCCP(イオノフォア)の存在下で測定を行った結果、 $O_2$ 産生量が増加したことから、50-Hz 磁場曝露による  $\Delta\Phi_m$  低下が $O_2$ 産生量を増加させるということが分かった。 $\Delta\Phi_m$  低下によるミトコンドリア機能不全が起こるとアポトーシス(プログラム細胞死)を誘導する。これはミトコンドリアからシトクロム c が放出され、アポトーシスを誘導する酵素カスパーゼを活性化するためである。実際に、50-Hz 磁場曝露によりカスパーゼが活性化される傾向が示された。この結果も 50-Hz 磁場によるミトコンドリア機能不全誘発という考えと矛盾しない。

本研究と先行研究の知見を合わせると、50-Hz 磁場のターゲットの候補としては a)  $O_2$ の産生と除去に関係する酵素(前者として NADPH oxidase、後者として superoxide dismutase が知られている)の活性、b)ミトコンドリア膜における電子伝達系の 2 つが考えられる。前者に関して、50-Hz 磁場が superoxide dismutase の活性を抑制するという報告がある。また後者に関しては、時間的に変動する磁場により膜上に非常に微小ではあるが渦電流が発生する可能性が理論的に指摘されている。これが電子伝達系に影響した可能性が考えられる。しかし、前者に関しては報告が少なく、後者に関しては実験的研究はない。従って、これらの仮説の検証は今後の課題である。

## 結論

本研究から、低周波磁場によるミトコンドリア膜電位差減少によって $O_2$ 生成経路促進にされること、また、遺伝毒性、細胞毒性を誘導することが示された。この結果から、低周波磁場はミトコンドリア膜や $O_2$ 産生を通じて生体へ作用するという仮説を新たに提唱した。

## 参考文献

- [1] Lai, H., & Singh, N. P. (2004). Environ. Health Perspect. 112(6), 687.
- [2] Nakayama, M., Hondou, T., Miyata, H. (2014). In Proceedings of APCC12 p. 012057.
- [3] Ivancsits, S., Pilger, A., Diem, E., Jahn, O., Rüdiger, H. W. (2005). Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen 583(2), 184-18.
- [4] Nakayama, M., Nakamura, A., Hondou, T., Miyata, H. (2016). Int J Radiat Biol 92(10), 583-589.
- [5] Simkó, M., Droste, S., Kriehuber, R., Weiss, D. G. (2001). Eur J Cell Biol 80(8), 562-566.
- [6] Marootpong, P., Maresuke, N., Chihiro, N., Hidetake, M., (2017), Int J Chem (投稿中).

## 呼吸器疾患治療薬ベラプロストの合成

(東北大学大学院理学研究科 化学専攻) ○坂本大輔・梅宮茂伸・河内元希・林雄二郎

有機合成化学では望みの立体の化合物のみを作ることが重要である。とりわけ医薬品となる有機化合物の合成では、立体異性体間において人体に及ぼす影響が異なることがあるため、高度に立体制御可能な合成法が必要である。

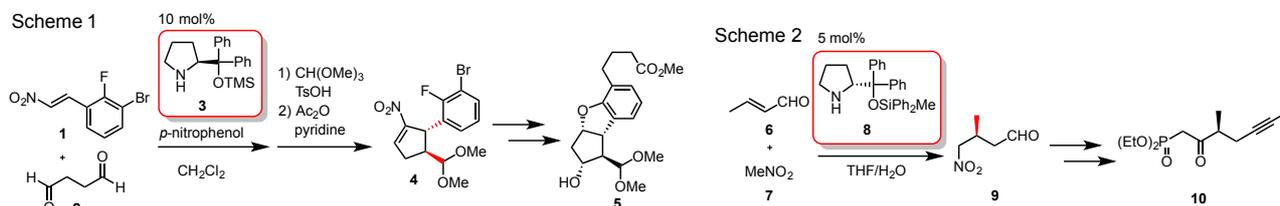
ベラプロスト (**12a-d**) は 4 種類の立体異性体の混合物として合成され市販されている呼吸器疾患治療薬である。人体に対する性質やその強さは 4 種間でそれぞれ異なっており、最も薬として効能のある立体異性体は **12a** であることが知られている。そこで **12a** を選択的に合成することが望まれるが、その様な合成法は開発されていなかった。

立体異性体を選択的に合成する手法の一つに不斉有機触媒を用いる方法がある。不斉有機触媒は水や酸素に安定であるため取り扱いが容易であり、また低毒性であるため、医薬品をはじめとする様々な有機化合物の立体選択的合成において利用されている。我々の研究室では天然から容易に得られるアミノ酸であるプロリンを原料とした有機触媒 (Jørgensen-Hayashi 触媒) を合成し、様々な立体選択的反応に適用している。

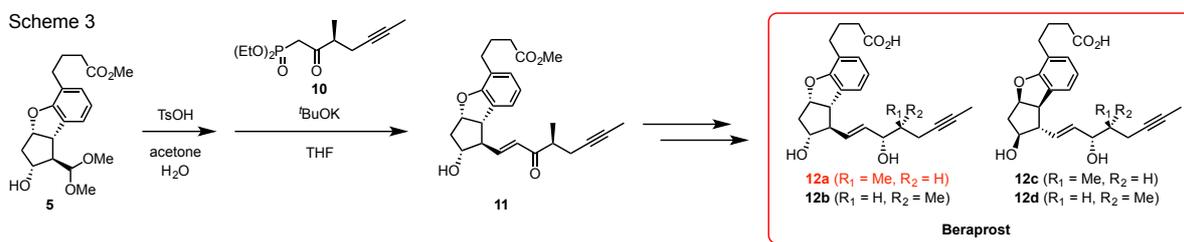
今回、当研究室で開発した不斉有機触媒反応を鍵とする、薬としての効能が最も高いベラプロストの中の **12a** の合成について述べる。

Jørgensen-Hayashi 触媒 **3** 存在下、形式的な不斉 [3+2] 環化付加反応を行い、シクロペンテン **4** を立体選択的に構築した (Scheme 1)。その後、6 回の変換反応を行い **12a** の三環性骨格を有する化合物 **5** を合成した。

また、Jørgensen-Hayashi 触媒 **8** 存在下、クロトンアルデヒド (**6**) とニトロメタン (**7**) の不斉マイケル反応を行い、メチル基を立体選択的に構築した (scheme 2)。その後、5 回の変換にてベラプロストの側鎖となる化合物 **10** を合成した。



合成した三環性化合物 **5** と側鎖 **10** を Horner-Wadsworth-Emmons 反応により連結し、その後 2 回の変換にて **12a** を合成した (scheme 3)。



## 専門用語の説明

- ・立体異性体：分子式と原子のつながり方が同じで、空間的な配置が異なる化合物。ベラプロスト (**12a-d**) のそれぞれは分子式、原子のつながり方が同じであるが、化学結合が紙面上側に伸びるか (太線の結合)、下側に伸びるか (点線の結合) という原子の空間的な配置が異なっており、立体異性の関係にある。

参考文献:[1] Y. Hayashi *et al.*, *Eur. J. Org. Chem.*, **20**, 4320 (2015).

[2] Y. Hayashi *et al.*, *Org. Lett.*, **9**, 5307 (2007).

## 高圧下における鉄中の電子状態から探る鉄ケイ素合金物性

久我柊子<sup>1</sup>・鎌田誠司<sup>1</sup>・前田郁也<sup>1</sup>・鈴木那奈美<sup>1</sup>・平尾直久<sup>2</sup>・鈴木昭夫<sup>1</sup>・大石泰生<sup>2</sup>・中野智志<sup>3</sup>・大谷栄治<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科 地学専攻、<sup>2</sup> Spring-8、<sup>3</sup> 物質・材料研究機構)

地球は地震波の観測の結果から、核、マントル、地殻の層構造をしていると提唱されている (Dziewonski and Anderson, 1981)。地震波観測からの地球核密度の見積もりや隕石学的研究から地球核の主成分は鉄であると考えられている。地震波観測の結果と地球内部の高温高圧条件での実験の結果から、核には鉄に加えて軽元素 (Si, S, O, C, H) を含んだ物質でできているということが示唆されている (e.g., Birch, 1952; Poirier, 1994)。地球のマントルが、地球・惑星の材料物質である CI コンドライト隕石の組成に比べて Si が枯渇していることから、不足している Si が地球核に含まれている可能性が高いと考えられている。したがって鉄ケイ素合金の物性を調べることは地球内核を考える上で重要である。また、鉄や鉄ニッケル合金で、構造転移を含まない電子トポロジー転移 (ETT) が観察されている (Glazyrin et al., 2013)。ETT が起こると  $c/a$ 、アイソマーシフト、デバイ音速の変化が観測されており、地震波速度に影響が出る可能性が考えられる。鉄ケイ素合金についても ETT の存在が示唆されているが、構造、圧縮挙動、磁性については高温高圧条件下で調べられているものの、電子状態については研究例が少ない。そこで、放射光 X 線回折法と放射光メスバウア分光法を用いて鉄ケイ素合金の結晶構造と電子状態について研究した。

本研究では、<sup>57</sup>Fe に富んだ Fe<sub>0.84</sub>Si<sub>0.16</sub> (Fe-8.7wt%Si) を合成し、ダイヤモンドアンビルセル (DAC) を使用し、高圧での鉄ケイ素合金の電子状態を観察した。DAC で常圧から 74 GPa までの条件で結晶構造を観測し、常圧から 62 GPa までの条件で電子状態を観察した。 $c/a$  とアイソマーシフトの値が構造相転移や磁気相転移を伴わずに変化する様子が観測された。また、Fe-2.8wt%Si、Fe-6.1wt%Si と比較するとケイ素量の増加にともない  $c/a$  やアイソマーシフトの値の変化する圧力が高圧側へシフトすることが分かった。鉄や鉄ニッケル合金と同様の現象であれば音速に影響を及ぼす可能性が高く、核物質の組成を決める際に考慮する必要があると考えられる。

### 専門用語の説明

- ・ アイソマーシフト：線源と吸収体間の原子核のエネルギー準位の差。原子核と s 電子の密度分布の環境に依存
- ・ ダイヤモンドアンビルセル：超高圧力を印加する装置
- ・ 電子トポロジー転移：トポロジーの変化に伴って生じる相転移

### 参考文献

[1] Birch, F., 1952, Elasticity and constitution of the Earth's interior, *Journal of Geophysical Research*, 57, 227-286.

[2] Dziewonski, A., Anderson, D. L., 1981, Preliminary reference Earth model, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 297-356

[3] Glazyrin, K., Pourovskii, L.V., Subrovinsky, L., Narygina, O., McCammon, C., Hewener, B., Schunemann, V., Wolny, J., Muffler, K., Chumakov, A. I., Crichton, M., Prakapenka, V. B., Tamadi, F., Ekholm, M., Aichhorn, M., Vildosola, V., Ruban, A. V., Katsnelson, M. I., Abrikosov, I. A., 2013, Importance of Correlation Effects in hcp Iron Revealed by a Pressure-Induced Electronic Topological Transition, *Physical Review Letters*, 110, 117206.

[4] Poirier, J. P., 1994, Light elements in the Earth's outer core: A critical review, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 85, 319-337.

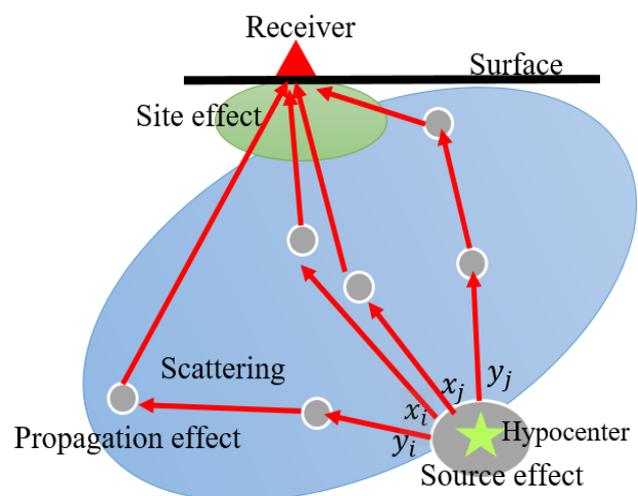
## Source characteristics of explosion earthquakes at Sakurajima volcano using spectral ratio method

Mohammad Hasib, Takeshi Nishimura and Hisashi Nakahara  
Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

The explosion earthquake associated with Vulcanian style eruption, which is characterized by instantaneous emission of volcanic block, ashes, and gases, are frequently observed at Sakurajima volcano. This volcano generates hundred explosions a year with various sizes, from small to large explosion earthquakes, hence analysis of the seismic wave enable us to understand dynamic process of the explosion earthquakes.

Investigation of physical parameters that control the magnitude is necessary to understand the magma process in conduit during Vulcanian eruption. But, systematic analysis of explosions focusing on their magnitudes are few. Previous study clarifies the magnitude of explosion earthquake observed at several volcanoes controlled by the relationship between the peak amplitude of force and source time duration [2]. But, we still do not understand yet clearly what are physical parameters that control the magnitude of explosion at single volcano. In the present study, therefore, we analyze hundreds of explosion earthquakes recorded at Sakurajima volcano using spectral ratio method, that can retrieve the source spectral information without being disturbed by heterogeneous structure [1], to clarify the source spectra differences between large and small explosion earthquakes. Also, we examine the source spectra differences at the initial (direct wave) and later parts (coda waves) of explosion earthquakes, which are excited by initial explosion and continuous ash emissions, respectively.

The observed spectrum is controlled by a product of the source spectrum, propagation factor including attenuation, site spectrum and instrumental response. By applying spectral ratio concept, we retrieve only source information by eliminating the effects of propagation, site and instrument response (see fig. 1). We classify the explosion earthquakes into 4 classes (I, II, III, IV) according to their maximum amplitudes.



**Fig. 1** Schematic illustration for propagation of direct and coda waves.

Then, we calculate spectral amplitude ratios of classes II, III and IV to the smallest class I by shifting time windows every 10 s from the onset to coda waves for several to tens of minutes during Vulcanian eruption.

The scaling relation found for explosion earthquakes at several volcanoes, in which the source time duration and peak amplitude of force are controlled by vent radius under a constant pressure in the conduit [2]. Since the explosion earthquakes at Sakurajima volcano occur at a same crater that does not change its vent radius significantly, the observed spectral amplitude ratio change can be attributed to pressure changes in the conduit.

Our result show amplitude ratios of explosion earthquakes decrease with lapse time. Such changes must reflect the difference of eruption styles during the Vulcanian eruption: direct wave is associated with the initial explosion with strong air-shock and seismic waves, while coda wave is related to continuous ash emissions following the initial explosions. This observation is contrary to the case of volcano-tectonic earthquakes at Sakurajima volcano and tectonic earthquakes in Japan [3], that show similar spectral ratio for direct and coda waves.

#### [Keywords]

**Explosion earthquake:** Explosion earthquake occurs just for short time, so it is quite difficult to distinguish between P and S waves arrival time. Explosion earthquake of Vulcanian type eruption is associated with continuous eruption for several minutes.

**Spectral ratio method:** This method is a powerful tool to understand the source characteristics when many co-located events with a range of sizes are available.

#### [References]

- [1] Mayeda, K.M., and Walter, W.R. (1996) Moment, energy, stress drop, and source spectra of western U.S earthquakes from regional coda envelopes, *J. Geophys. Res.*,101,11,195-11, 208.
- [2] Nishimura, T., and Hamaguchi, H. (1991) Scaling law of volcanic explosion earthquake, *J. Geophys. Res, Lett.* 20, 2479-2482.
- [3] Somei, K., Asano, K., Tomotaka, I., Ken, M. (2014) Source Scaling of Inland Crustal Earthquake Sequences in Japan Using the S-Wave Coda Spectral Ratio Method, *Pure Appl. Geophys.* 171, 2747–2766.

## 周期的なモノドロミーをもつ2次元結び目の分類について (要旨)

B6SD1010 福田 瑞季

トポロジーとは荒っぽくいうと図形や空間の大まかな形を調べる分野である．例えば，マグカップとドーナツは同じものである．大きさや正確な形は異なるものだが，マグカップには取っ手の部分に穴が1つ空いていて，ドーナツにも真ん中に穴が1つ空いている．この“穴が1つ空いている”というのは，大まかな情報ではあるが図形の概形はわかる．その中でも後述する“ひも”の形を研究対象にするのが結び目理論である．結び目理論はトポロジーの中でも近年盛んに研究されている一分野であり，筆者の研究の中心である．

結び目理論では3次元空間内に乱雑に置かれたひもの端点同士をつないだ輪っかについて考える．この輪っかは自由に伸び縮みさせることができるが，切ったり，自身をすり抜ける事はできないものとする．この制限の下で，輪っかの形や性質を調べるのが結び目理論のテーマの1つである．例えばこの2つの結び目は伸び縮みをさせることによってもう一方と同じ形にすることができる．

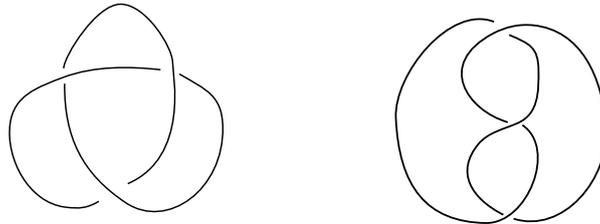


FIGURE 1. 三葉結び目

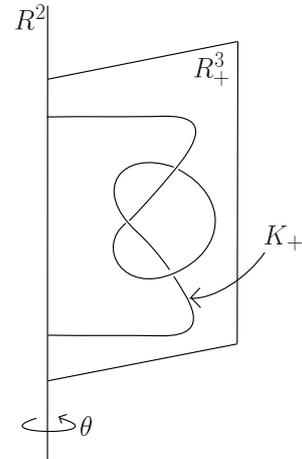
このように，2つの結び目をそれぞれ同じ形にできるとき，2つの結び目  $K$  と  $K'$  の位相型が同じであるという．この関係を  $K \sim K'$  と書くことにする．この位相型によって結び目を分類することを考える．結び目を区別する際に，結び目自体を比較しようとするとは非常に難しい．なぜなら，結び目は自由に変形させてよいため，どれだけ変形して移り合わなくても本当に移り合わないかはわからない．よって，結び目が異なるかどうかの証明にはならないからである．しかし，「結び目が同じであれば外側の空間も同じである」の対偶「外側の空間が異なれば結び目が異なる」によって，結び目の外側の空間を調べることで結び目が異なることが証明できる．結び目は1次元であったが，外側の空間は3次元であり，使える数学の道具が増えるので，結び目そのものを扱うよりも扱いやすい．

筆者は1次元結び目に関連した2次元結び目の分類について特に興味があり，研究を行っている．1次元結び目は3次元空間内にある輪っかであったが，2次元結び目とは4次元空間内にある球面である．この球面も1次元結び目と同様の条件の下で分類を考える．

1次元結び目に関連した2次元結び目の研究では，具体例としてスパン結び目がある．1926年に Artin [1] が以下のように1次元結び目から2次元結び目を構成した． $\mathbb{R}_+^3 = \{(x_1, x_2, x_3) \mid x_3 \geq 0\}$  に適切に埋め込まれた弧  $K_+$  を考える．つまり  $\mathbb{R}_+^3$  内の弧  $K_+$  で，端点が  $\mathbb{R}_+^3 \cap \mathbb{R}^2 = \{(x_1, x_2, x_3) \mid x_3 = 0\}$  内にあるものを考える． $K_+$  を  $\mathbb{R}^2$  内の線分によって端点を結んだものは  $\mathbb{R}_+^3 \subset S^3$  内の結び目である． $0 \leq \theta \leq 2\pi$  に対し

$f_\theta(x_1, x_2, x_3) = (x_1, x_2, x_3 \cos \theta, x_3 \sin \theta)$  で定まる写像  $f_\theta : \mathbb{R}_+^3 \rightarrow \mathbb{R}^4$  による像の和集合  $\{f_\theta(\mathbb{R}_+^3)\}_{0 \leq \theta \leq 2\pi}$  は  $\mathbb{R}^4 \subset S^4$  となり,  $\{f_\theta(K_+)\}_{0 \leq \theta \leq 2\pi}$  は二次元球面となる. この二次元球面  $\{f_\theta(K_+)\}_{0 \leq \theta \leq 2\pi} = K^*$  を  $K$  のスパン結び目という.

上記の例のように, 1次元結び目から2次元結び目を構成する方法は他にも知られている. 特に筆者は, その中で branched twist spin [2, 5] と呼ばれる2次元結び目について研究を行った. Branched twist spin は補空間にファイバー構造を持つ結び目であり, 特に周期的なモノドミーを持つ. また, スパン結び目の一般化になっている.



筆者はこれまでの研究で, 2つの branched twist spin が異なるための十分条件を得ることができた. 本講演ではその結果について紹介する. この条件は, 1次元結び目のアレクサンダー多項式と呼ばれる結び目の不変量を用いて与えることができる.

Hillman と Plotnick [4] によって1次元結び目  $K$  がトーラス結び目, または双曲結び目の場合にはその branched twist spin が非自明な結び目となる条件は与えられている. Branched twist spin が異なるための条件は, 筆者の知る限り今までになく, 初めての結果となる.

今回得られた結果は必要条件であるかがわかっていない. そのため, branched twist spin を完全に分類することはできないが, 1次元結び目のアレクサンダー多項式は簡単に計算で求めることができる. したがって branched twist spin を区別をする際にとっても扱いやすいものである.

#### REFERENCES

- [1] E. Artin, *Zur Isotopie zweidimensionalen Flächen im  $\mathbb{R}^4$* , Abh. Math. Sem. Univ. Hamburg **4** (1926), 47–72.
- [2] R. Fintushel, *Locally smooth circle actions on homotopy 4-spheres*, Duke Math. J. **43** (1976), 63–70.
- [3] C. Gordon and J. Luecke, *Knots are determined by their complements*, J. Amer. Math. Soc. **2**, no. 2 (1989), 371–415.
- [4] J. A. Hillman and S. Plotnick, *Geometrically fibered two-knots*, Math. Ann. **287** (1990) 259–273.
- [5] P. S. Pao, *Non-linear circle actions on the 4-sphere and twisting spun knots*, Topology **17** (1978), 291–296.

## Chemo-Dynamical studies of hot interstellar matter in early type galaxies

(Astronomical Institute) C. Sabrina - Supervisor: Hattori Makoto

Early type galaxies were thought to be gas less system for long time. [Mathews and Backer (1971)] proposed the galactic wind model to explain why gas content in early type galaxies is little. Stars in early type galaxies eject significant fraction of their mass into interstellar space as gas after they exhaust their main sequence lifetime. Expected rate in the past galaxy is higher than the present day data. Since old stellar population composes the early type galaxies, their life times are comparable to the Hubble time [Charlot and Bruzual (1991)]. Therefore, more than  $10^9 M_{\odot}$  of gas was supplied into interstellar space from stellar system during their lifetime. Where does it go? The possibility that they have been converted into stars again is unacceptable since they are little observational signature of recent star formation in early type galaxies. [Mathews and Backer (1971)] considered the heating of the ejected gas by Type Ia supernova. Gravitational binding energy of galaxy is able to be quantified by escape temperature which corresponds escape velocity of the system. Since the temperature of gas heated by Type Ia supernova is higher than escape temperature of galaxies, they concluded that the gas supplied from stellar system is blown away from the galaxy as steady supersonic out flow. They named this flow as the galactic wind.

Einstein X-ray satellite discovered X-ray emission around early type galaxies [Forman, Jones and Tucker Trinchieri and Fabbiano (1985)]. These systems are called hot gaseous halo or hot X-ray halo. Total gas mass of the hot X-ray halo is about  $10^9 - 10^{10} M_{\odot}$  and is comparable to the total amount of gas supplied by stellar mass loss during the lifetime of galaxy. The discovery of the hot X-ray halo has led Paradigm shift of our understanding of interstellar matter in early type galaxies, that is gas supplied by stellar mass loss is not blown away from galaxy as the galactic wind but stored in galactic halo region as hot interstellar matter. One of the main physical reasons why gas expelled from stars are stored in halo region as hot gas is existence of dark matter halo around early type galaxies.

The large scatter observationally found in a plane X-ray luminosity of hot X-ray haloes vs blue luminosity of galaxies has been remained unresolved problem yet. In this studies, we develop numerical code which is able to follow chemical and dynamical evolution of the hot gaseous halo based on the most updated stellar nucleosynthesis models.

### References:

[Mathews and Backer (1971)] Mathews, W.G. and Backer, J., 1971, ApJ, 170, 241

[Charlot and Bruzual (1991)] Bruzual, G.A. and Charlot, S., 1991, ApJ, 367, 126

[Trinchieri and Fabbiano (1985)] Trinchieri, G. and Fabbiano, G., 1985, ApJ, 296, 447

## 連続的標高勾配に沿ったアキノキリンソウ（広義）の遺伝構造の検出

：垂直分布における遺伝的障壁は何か？

（東北大学大学院生命科学研究科 生態システム生命科学専攻）木村拓真・牧雅之

山岳地域では、地理的距離が近いにも関わらず、標高に応じて気温や紫外線量など、植物を取り巻く生育環境が劇的に変化する。そのため、一般的に植物はそれぞれの種ごとに生育に適した標高に分布域が制限されている。その一方で、植物の中には標高により分布域が制限されない種も存在する。キク科アキノキリンソウ（広義）は、日本の各地の山岳地域において、低地から高山帯(0-3000m)にかけて標高に沿って連続的に分布しており、標高に応じた形態的変化が見られる。なぜ、アキノキリンソウ（広義）は幅広い標高に分布しているのだろうか？この分布域獲得のプロセスを明らかにすることができれば、植物の異なる生育環境に対する適応進化機構の解明に役立つと考えられる。そこで本研究では、広域的・局所的スケールでのアキノキリンソウ（広義）の標高間比較を行い、遺伝的背景を明らかにすることで、高山適応のメカニズムに迫ることを目的とした。

まず、中部から北海道の16山系を対象に、同一山系内からそれぞれ低地集団と高山集団を採取し、2種類の異なるDNAマーカーを用いて生物系統地理的解析を行った。その結果、近年急速な分布拡大を経て標高に沿った分布が形成されたことが示唆された。また、各山系の高山-低地集団間では、明瞭な遺伝的分化が検出されず、標高間で遺伝子流動が存在していることが明らかとなった。次に、白馬岳と鳥海山の2山系を対象に、標高に沿った連続的なサンプリングを密に行い、より解像度の高いRAD-seqから得た複数の一塩基多型（SNP）を用いて、標高間での集団遺伝構造を推定した。その結果、両山系ともに森林限界線付近を境に遺伝的構成が大きく変化することが明らかとなった。以上のことから、アキノキリンソウ（広義）は、隣接する標高間で遺伝子流動が存在しているにも関わらず、標高に応じた異なる選択圧が働くことで、高山環境への局所適応が生じていることが示唆された。

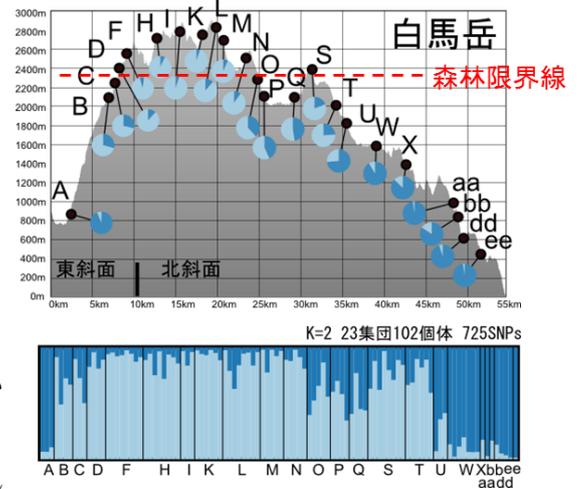


図1.北アルプス白馬岳で見られるアキノキリンソウ（広義）のベイズクラスタリングに基づく各標高間での集団遺伝構造

### 専門用語の説明

**遺伝子流動**：ある集団の遺伝子プールから、別の集団の遺伝子プールへ、移入や交配によって対立遺伝子が移動すること。

**局所適応**：種の分布域において生育環境が局所的に異なる場合、そのような局所的な環境に適応した形質が進化すること。局所適応は種分化をもたらさう重要な過程であると考えられている。



図2.アキノキリンソウ（広義）の形態  
左:高山型 右:低地型

P20

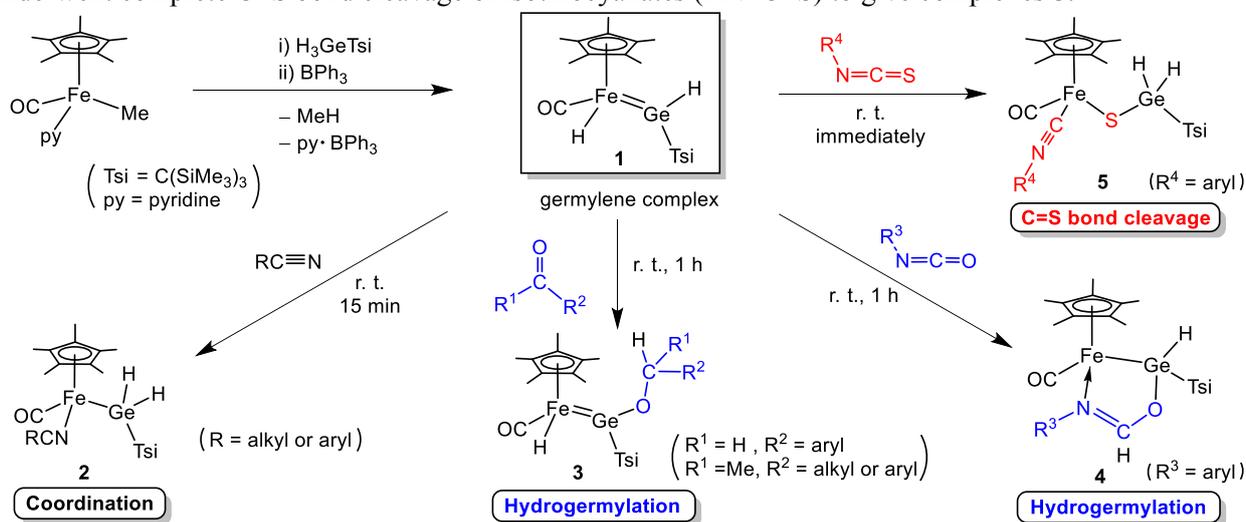
## Reactions of an Iron-Germanium Double Bond Complex with Organic Substrates Having C≡N, C=N, C=O, and C=S Bonds

(Department of Chemistry, Graduate School of Science)

○Tara Prasad Dhungana, Hisako Hashimoto, Hiromi Tobita

**Introduction:** Carbene complexes having metal–carbon double bonds are very important metal complexes that can be widely applied in organic syntheses. The importance of these complexes had been demonstrated by the Nobel prize in 2005 that was given to the researches on the development of *olefin metathesis* reactions catalyzed by carbene complexes.<sup>[1]</sup> Therefore, their heavier analogues of group 14 elements have attracted increasing attention. Indeed, some significant progress has been made to the chemistry of silicon analogues, i.e. silylene complexes, over the last two decades, but the chemistry of germanium analogues, i.e. germylene complexes, are still in the early stage, despite the first germylene complex has been synthesized in 1970's. Because of these backgrounds, we started our research on germylene complexes to clarify their properties.

**Results:** Recently, we have synthesized an iron germylene complex **1** by applying the method developed for the synthesis of a ruthenium silylene complex,<sup>[2]</sup> and found that **1** reacted with various unsaturated organic compounds to give products almost quantitatively in all cases (Scheme 1). Thus, treatment of **1** with nitriles, the C≡N triple-bonded compounds, led to coordination products **2**, while **1** underwent *hydrogermylation* of the C=O double bonds of ketones and aldehydes to give complexes **3**. Complex **1** also reacted with isocyanates (RC=N=O) to give products **4** having a novel five-membered-ring structure. Interestingly, **1** underwent complete C=S bond cleavage of isothiocyanates (RN=C=S) to give complexes **5**.



Scheme 1

### Technical words:

- *Olefin Metathesis*: This is an organic reaction that entails the redistribution of fragments of alkenes (olefins) by the scission and regeneration of carbon-carbon double bonds.
- *Hydrogermylation*: This is a chemical reaction in which hydrogen and germanium atoms of hydrogermanium compounds are added to the unsaturated bonds of organic substrates.

### References:

- [1] For example, see R. H. Grubbs, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, *45*, 3760.  
 [2] M. Ochiai, H. Hashimoto, H. Tobita, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 8192.

## Rheological Turnover of Quartz and K-Feldspar in Felsic Granulites: Implications to Weak Lower Continental Crust

Bhathiya Athurupana<sup>1</sup>, Jun Muto<sup>1</sup>, Jun-ichi Fukuda<sup>1,2</sup>, Hiroyuki Nagahama<sup>1</sup>, Toshiro Nagase<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Earth Science, Tohoku University.

<sup>2</sup> Department of Earth and Planetary Science, Tokyo University.

Quartz and feldspar are key mineral constituents in the granitic continental crust. Their physiochemical stability under a wide range of crustal conditions permits us to use them as rheological indicators. In general, quartz is weaker than feldspar in mid to lower crustal conditions (Handy, 1994). However, we observed rheological turnover of quartz and K-feldspar in quartzofeldspathic gneiss (QFG) samples from Highland Complex of Sri Lanka (Athurupana et al., 2014). The Sri Lankan terrain is a lower crustal exposure of East-African orogenesis, which has undergone granulite facies metamorphism and multi-phase ductile deformation. In details, our samples contain two different sets of quartz and K-feldspar microstructures: (1) large quartz ribbon formation, boudinaging of K-feldspar inclusions in quartz ribbons (Fig. 1a) and the dynamic recrystallization of K-feldspar matrix. The second set: (2) boudinaging of quartz ribbons in K-feldspar matrix (Fig. 1d) and formation of exsolution related microstructures in K-feldspar. Those two sets of microstructures represent two deformation events occurred at different times in the metamorphic history. The first deformation ( $D_1$ ) occurred on the prograde path before peak metamorphism ( $>500-850^\circ\text{C}$ ), and quartz and K-feldspar deformed in a ductile manner. The second set belongs to a subsequent deformation event ( $D_2$ ) to the peak metamorphism and during the retrograde path ( $\sim 720-500^\circ\text{C}$ ) of Sri Lankan terrain.

The K-feldspar boudinaging in quartz during the deformation the prograde path indicate typical rheological contrast, which is observed in most experimental and natural samples. Conversely, quartz boudinaging in K-feldspar matrix indicate rheological turnover, which is simultaneous with retrograde decompression cooling. It means significant ductility enhancement of K-feldspar matrix and strong occurrence of quartz after the  $D_1$ . Exsolution microstructures of K-feldspar are deformation controlled, and the exsolution of K-feldspar enhances dislocation creep, which is assisted by dynamic recovery (dominant dislocations climb and subgrain wall formation). Although K-feldspar and quartz boudins represent two different rheological properties (turnover) in two different deformation events, both boudin microstructures represent necking related separations. It shows boudinaging by diffusion mass transfer aided phase boundary migration in stronger phase. The volume diffusion of K-feldspar inclusions (boudins) was active due to high temperatures and phase mixing. The presence of molecular type water and other types of cationic species in quartz may enhance the volume diffusion at relatively high temperature by changing internal energy thermodynamically. Viscosity contrast of K-feldspar inclusions and quartz is low (close to quartz viscosity) due to the higher rate of volume diffusion. Nevertheless, quartz boudins show much higher viscosity contrast during their formation. This implies the significant weakening of matrix K-feldspar by exsolution. In terms of the bulk rheology, the

existence of weak phase in considerable volume proportion (e.g., >30%) provides significant bulk strength drop in QFG. In our samples, the high volume proportion of quartz and K-feldspar implies significant bulk strength decrease of QFG during the both D<sub>1</sub> and D<sub>2</sub> events. Hence, significant weakening of abundant QFG in lower continental crust provides implication for the weak lower continental crust where the felsic minerals are dominant.

#### Reference

Athurupana, B.M.B., Fukuda, J., Muto, J., Nagahama, H., 2014. Microstructural observation of quartz and K-feldspar in quartzo-feldspathic granulite in Sri Lanka, in: Japan Geoscience Union Meeting 2014. Yokohama, Japan.

Handy, M.R., 1994. Flow laws for rocks containing two non-linear viscous phases: A phenomenological approach. *J. Struct. Geol.* 16, 287–301. doi:10.1016/0191-8141(94)90035-3

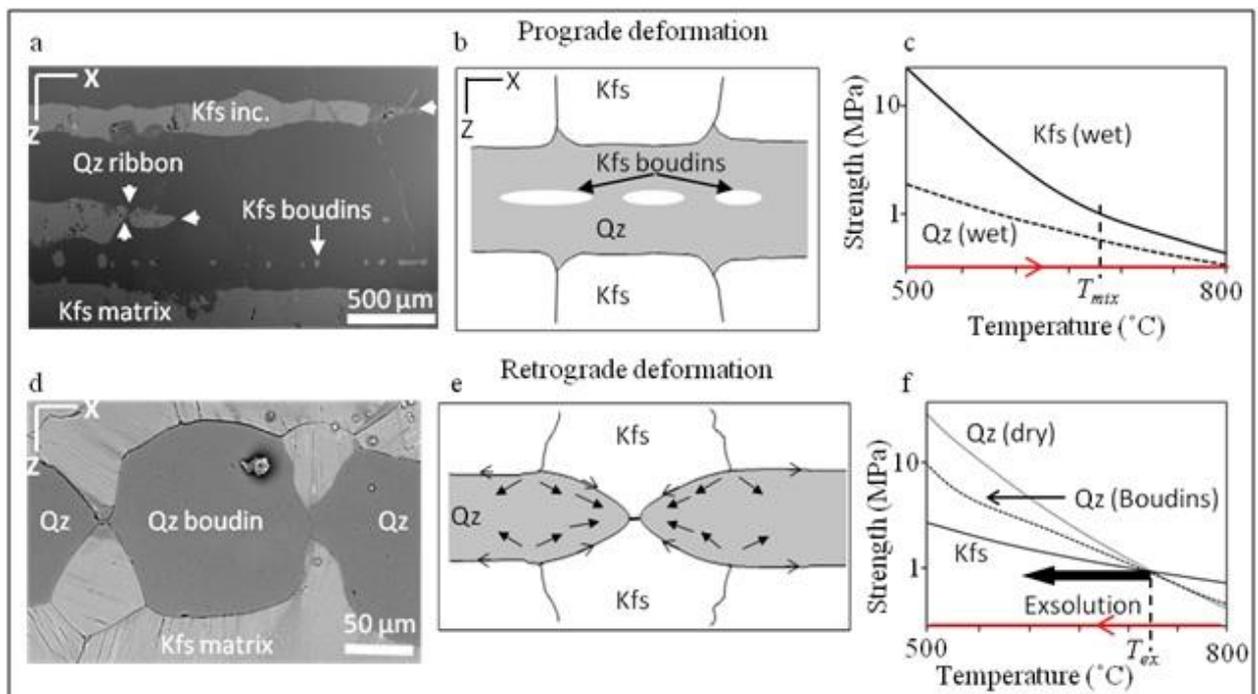


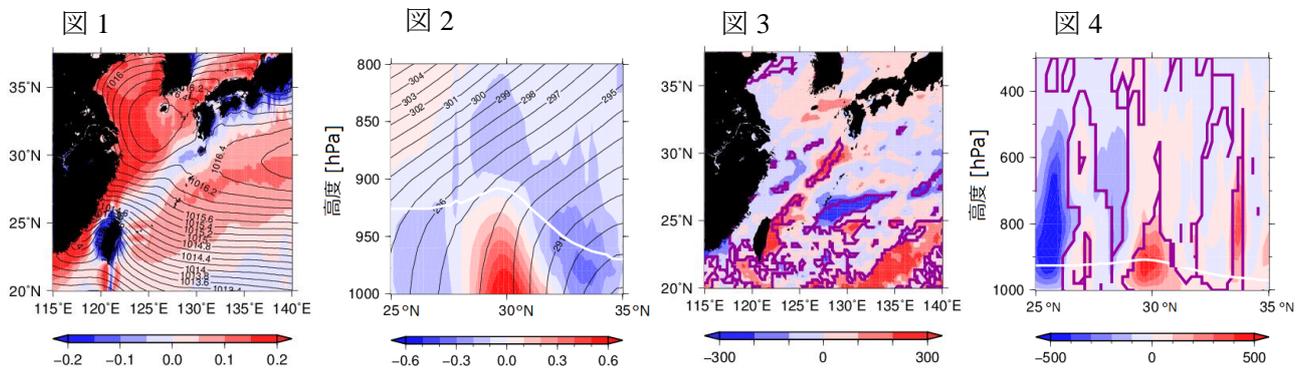
Figure 1. Rheology inferred by K-feldspar and quartz boudinaging. a). BSE image of K-feldspar boudins in quartz ribbons. b). Schematic representation of microstructures. c). Schematic flow strength evolution inferred by K-feldspar boudins and quartz ribbon formation during prograde deformation. d). BSE image of quartz boudins in K-feldspar matrix. e). Schematic representation of quartz boudinaging. Black arrows indicate diffusion and the image dimensions show relative shortening and extension in Z and X direction compare to b. f). Schematic flow strength evolution inferred by quartz boudins in K-feldspar and K-feldspar ductility enhancement during retrograde deformation. Note:  $T_{mix}$ : K-feldspar mixing temperature and  $T_{ex}$ : exsolution temperature.

## 冬季・春季の黒潮および黒潮続流上の海面気圧極小

(東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻) ○木村覚志・杉本周作・須賀利雄

中緯度の西岸境界流上では大気海洋間で多くの熱交換が行われ、海洋が大気境界層および自由大気にまで影響を与えることが明らかになりつつある。例えば、冬季の黒潮続流上では、海面乱流熱フラックスの形で大気に向け膨大な熱が放出され、大気境界層の加熱を通して海面気圧の極小域が形成されることが指摘されている<sup>[1]</sup>。また、春季の黒潮上にも海面気圧極小が分布し、海洋がその形成要因であることが示唆されている<sup>[1]</sup>。さらに、海面気圧極小に向かって海上風が収束することで降水が増加するという報告もある<sup>[2]</sup>。そこで、本研究では、大気再解析データである NCEP CFSR/CFSv2 を用いた統計解析を行うことで、冬季黒潮続流上の海面気圧極小の年々変動および変動要因を明らかにした。また、領域大気モデル実験を実施することで春季黒潮上の海面気圧極小の形成および降水場に果たす黒潮の役割を明らかにした。本ポスター発表では、後者について紹介する。

気象庁非静力学大気モデルを用いて 1998 年から 2010 年までの各 4 月の領域大気モデル実験を行った。その際、大気場への黒潮の影響を明らかにするために、海面境界条件として日別海面水温データ (OISST) を用いて駆動した実験 (CTRL run) と空間的に平滑化した海面水温で駆動した実験 (SMTH run) を行い、比較した。CTRL run より、黒潮上に海面気圧極小が再現され (図 1)、これが黒潮による大気境界層加熱により形成されることが示された (図 2)。次に、黒潮に起因する降水を抽出するために、温帯低気圧が黒潮上を通過する前後 48 時間を除いた温帯低気圧不在期における CTRL run と SMTH run の降水差を調べた。その結果、黒潮上で有意な降水偏差が得られた (図 3)。この降水偏差の原因は、黒潮に起因した大気境界層内の上昇流偏差に伴う水蒸気の鉛直輸送であることがわかった (図 4)。



### 図の説明

- 図 1 CTRL run に基づく海面気圧[等値線; hPa]と、海面気圧極小を抽出するために海面気圧場に対してハイパスフィルタを施した高波数海面気圧[陰影; hPa]を表す。
- 図 2 CTRL run に基づく 129°E 沿いの仮温位[等値線; K]、高波数仮温位[陰影; K]、および大気境界層高度[白線; hPa]を表す。なお、高波数の意味は図 1 と同様。
- 図 3 温帯低気圧不在期の降水偏差[mm] (CTRL-SMTH)。紫線は有意水準 1% で有意な領域を表す。
- 図 4 温帯低気圧不在期の 129°E 沿いの鉛直上向き水蒸気輸送量偏差[mm] (CTRL-SMTH) と大気境界層高度[白線; hPa]を表す。紫線は有意水準 1% で有意な領域を表す。

### 参考文献

- [1] Tanimoto, Y., T. Kanenari, H. Tokinaga, and S.-P. Xie, 2011: Sea level pressure minimum along the Kuroshio and its Extension. *J. Climate*, **24**, 4419–4434.
- [2] Tokinaga, H., Y. Tanimoto, S.-P. Xie, T. Sampe, H. Tomita, and H. Ichikawa, 2009: Ocean frontal effects on the vertical development of clouds over the Northwest Pacific: In situ and satellite observations. *J. Climate*, **22**, 4241–4260.

## ガロア閉包内に与えられた 2 次拡大を持つ 3 次拡大の数え上げ について

B5SM1010      日下 俊一郎

代数体  $K$  と  $[K_q:K] \leq 2$  となる代数体  $K_q$  を固定し,  $K$  上の 3 次拡大体で quadratic resolvent が  $K_q$  かつ, 相対判別式の絶対ノルムが  $X$  以下となるものの同型類の個数の漸近挙動を示すことが目的である. 主定理は Henri Cohen, Anne Morra の結果である.

**定義 1.**  $K$  を代数体,  $L$  を  $K$  の 3 次拡大体,  $L_q$  を  $L/K$  の Galois 閉包とする. このとき  $L/K$  の quadratic resolvent を次で定義する.

- (1)  $L/K$  が Galois 拡大でない場合は,  $L_q/K$  の中間体  $K_q$  で  $[K_q:K] = 2$  を満たす体が唯一存在する. この  $K_q$  を  $L/K$  の quadratic resolvent と定義する.
- (2)  $L/K$  が Galois 拡大の場合は,  $K$  を  $L/K$  の quadratic resolvent と定義する.

**定義 2.**  $K$  を代数体,  $K_q$  を  $[K_q:K] \leq 2$  を満たす代数体とする.  $[L]$  を  $L$  の  $L_q/K$  での同型類とし,  $\mathcal{N}_K$  を  $\mathcal{O}_K$  のイデアルの絶対ノルムとする. このとき  $X > 0$  に対して  $N(K_q/K, X)$  を次で定義する.

$$N(K_q/K, X) = \left\{ [L] \mid \begin{array}{l} [L:K] = 3, \quad \mathcal{N}_K(\mathfrak{d}(L/K)) \leq X \\ \text{quadratic resolvent of } L/K = K_q \end{array} \right\}.$$

**定理 3** (Henri Cohen, Anne Morra).  $K$  を代数体,  $K_q = K(\sqrt{m})$ ,  $K'_q = K(\sqrt{-3m})$  とする. また  $\mathcal{D}$  を  $K'_q/K$  で split する  $\mathcal{O}_K$  の素イデアル全体の集合と定義する. このとき,  $\text{Re}(s) \geq \frac{1}{2}$  を含む領域で正則な関数  $f(s), g(s)$  で  $f(\frac{1}{2}) \neq 0$  を満たすものが存在して次が成り立つ.

$$\Psi(s) := \sum_{[L] \in \mathcal{F}(K_q/K)} \frac{1}{\mathcal{N}_K(\mathfrak{d}(L/K))^s} = f(s) \prod_{p \in \mathcal{D}} \left( 1 + \frac{2}{\mathcal{N}_K(p)^{2s}} \right) + g(s).$$

$\Psi(s)$  に Wiener-Ikehara's Theorem を適用することで次の主定理が得られる.

**定理 4** (Henri Cohen, Anne Morra).  $K$  を代数体,  $K_q = K(\sqrt{m})$ ,  $K'_q = K(\sqrt{-3m})$  とする.

- (1)  $K'_q = K$  を満たす場合,  $K_q/K$  によってのみ定まる定数  $C$  が存在して次が成り立つ.

$$N(K_q/K, X) \sim C\sqrt{X} \log X.$$

- (2)  $K'_q \neq K$  を満たす場合,  $K_q/K$  によってのみ定まる定数  $C$  が存在して次が成り立つ.

$$N(K_q/K, X) \sim C\sqrt{X}.$$

ここで定数  $C$  はいずれの場合も,  $\mathcal{D}$  の元を走る Euler 積の特殊値,  $\zeta_{K'_q}(s)$  の  $s = 1$  での留数などを用いて表される.

## GroundBIRD 望遠鏡の磁気シールドの考察

(東北大学大学院理学研究科 天文学専攻<sup>1</sup>・高工研<sup>2</sup>・理研<sup>3</sup>・天文台<sup>4</sup>・コリア大<sup>5</sup>・東大理<sup>6</sup>・埼玉大<sup>7</sup>・IBS<sup>8</sup>・総研大<sup>9</sup>・筑波大<sup>10</sup>)○沓間弘樹<sup>1</sup>・石塚光<sup>9</sup>・内田智久<sup>2</sup>・大谷知行<sup>3</sup>・小栗秀悟<sup>2</sup>・木内健司<sup>3</sup>・古谷野凌<sup>7</sup>・鈴木惇也<sup>2</sup>・関本裕太郎<sup>4</sup>・瀬本宗久<sup>7</sup>・田井野徹<sup>7</sup>・田島治<sup>7</sup>・JihoonChoi<sup>8</sup>・ThusharaDamayanthi<sup>5</sup>・富田望<sup>6</sup>・永井誠<sup>10</sup>・長崎岳人<sup>3</sup>・羽澄昌史<sup>2</sup>・服部誠<sup>1</sup>・菘輪眞<sup>6</sup>・美馬覚<sup>3</sup>・吉田光宏<sup>2</sup>・KyungminLee<sup>5</sup>, EunilWon<sup>5</sup>

## 【背景と目的】

宇宙マイクロ波背景放射（CMB）偏光Bモード観測実験GroundBIRD は、地上から広い観測領域で高感度測定を達成し、インフレーションの解明を目指す。GroundBIRD に搭載する超伝導検出器MKID を駆動するには地磁気の影響を十分に抑制する必要がある。現在、磁気シミュレーションや実測実験により最適な磁気シールドの設定を模索している。

## 【方法】

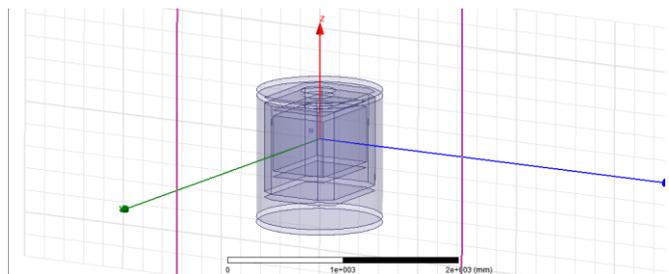
磁気シールド材として「MS-FR」というものを使用する。磁場シミュレーションソフト「Maxwell」を使用してさまざまな設定を試験し最適なものを検討した。まずソフトの性能を確認するため透磁率が一定の球殻と無限円筒をシミュレーション上で再現し解析解と比較した。次に実際に磁気シールドを円筒状にして地磁気の方に置いたときの中心の磁場を測定し、同じ状況をシミュレーション上で再現し比較した。最後に実際のGroundBIRD の設定をシミュレーション上で再現しMKID を置く位置での磁場の大きさを測定し、磁気シールドを巻く枚数について検討した。

## 【結果】

現段階で磁場シールドをGroundBIRD の4K, 40K, 300K シールドにそれぞれ15枚を巻いた時に24dB程度のシールド効果が期待されることが分かった。

## 【展望】

現状では目標としている30dB以上のシールド効果が得られていないため、それを達成するためのセットアップを検討していく。



## 参考文献

- [1] Kenneth L. Kaiser, "ELECTROMAGNETIC SHIELDING": Boca Raton, London, New York, CRC Press, 2006, p76, p79  
 [2] J.D. ジャクソン著, 西田稔訳 "JACKSON 電磁気学(上)": 第3版, 京都市, 吉岡書店, 2002, p282-p284

## 線虫 *C. elegans* とその姉妹種 *C. sp. 34* の比較解析による 個体サイズの制御メカニズムの解明

(東北大学大学院 生命科学研究科 生命機能科学専攻)

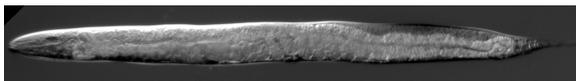
○津山 研二・杉本 亜砂子

生物の個体サイズの制御メカニズムは発生生物学の古典的かつ重要な研究テーマである。個体サイズを操作できれば、新しい園芸品種の確立や家畜のサイズ増加による食料生産の向上をもたらすことができる。そのため、個体サイズ制御メカニズムを解明するためにさまざまなモデル生物を用いた関連遺伝子の探索やその機能解析が精力的に進められているが<sup>1</sup>、その全貌の解明にはいたっていない。これはサイズ制御の解析に適したモデル生物が存在しなかったためであると考えた。

そこで私は個体サイズ制御メカニズムの解析のモデルとして線虫 *C. elegans* を選択した。*C. elegans* は個体差がほとんど無いため変異による僅かな差も検出可能であり、これまでに多くの個体サイズの変異体が取得されている。また *C. elegans* の比較対象として、近年石垣島で発見された新種の線虫 *C. sp. 34* を用いた。これまでの解析で、*C. sp. 34* は *C. elegans* の最も近縁な種であることが明らかになった。しかし ***C. sp. 34*** は *C. elegans* の約2倍の体長をもち(図1)、他の近縁線虫でも類を見ないほど大きい。つまりこの二種はわずかなゲノムの違いによって大きく体長が異なるため、個体サイズの制御メカニズム解析に適したモデルであると考え、比較解析を行った。

これまでの解析において、この二種は細胞の数に大きな差はなく、*C. sp. 34* は各細胞が大きいことによって個体サイズが大きいことが示唆された。また、*C. sp. 34* は幼虫から成虫へ成長する際に *C. elegans* よりも大きくなることが明らかになった。今後はこの過程においてどのような遺伝子の制御によってサイズ差が生じるかの解明を目指す。

*C. elegans*



*C. sp. 34*

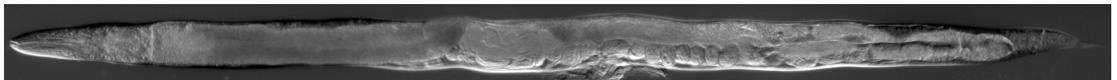


図1 *C. sp. 34*は*C. elegans*の約二倍大きい

### 専門用語の説明

### 参考文献

- [1] Shingleton A., 2005, *BMC biology*

水素終端 Si(111)-(1×1)表面上の Ag クラスターの成長と量子サイズ効果

東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻

永田 龍太郎, 姜 正敏, 川本 絵里奈, 川口 諒, 江口 豊明, 須藤 彰三

近年、電子デバイスの高性能化に向けて高集積化・微細化が急速に進み、原子・分子レベルでの構造制御が必要となってきた。1981年に走査トンネル顕微鏡(scanning tunneling microscope: STM)が開発され、表面の形態を原子レベルの空間分解能で観察することが可能になった。これをきっかけとして固体表面の原子スケールでの研究に火がつき、現在ではシリコン(Si)をはじめとした半導体表面上に形成したナノスケールの構造体に関するSTMを用いた研究が盛んに行われるようになった。ナノスケール構造では、量子サイズ効果により、バルクでは見られない様々な特異的現象が発現する。金属薄膜の場合、膜厚がフェルミ波長程度に薄くなると、エネルギー的に安定な膜厚が離散化することが知られている。しかしながら、その詳細に関しては未解明な部分が多くある。例えば、(111)面が積層した銀(Ag)薄膜に対しては、理論的に予測される安定膜厚が計算手法法によって異なっている[1]のに加え、実験的には2原子層高さが安定構造であるとの報告もあり[2]、未だ統一的な結論が得られていない。水素終端 Si(111)-(1×1) [H:Si(111)-(1×1)]表面上においてもAg薄膜は(111)面が基板表面と平行になるように配向して島状に成長するが、ごく最近、当研究室の姜らは、同表面上におけるAg薄膜の成長様式が蒸着速度に依存して大きく変化し、従来の1/100程度以下まで遅くすると、薄膜の結晶性及び配向性が著しく向上するとともに、厚さ8原子層で特異的に安定化することを発見した[3]。そこで、本研究では、H:Si(111)-(1×1)表面上におけるAg薄膜の初期過程成長を、STMを用いた原子スケールでの観察を通して、安定構造の形成に至る過程を追跡し、本系における量子サイズ効果の発現を検証することを目的とした。

試料は、大気中で化学溶液処理にて作製した H:Si(111)-(1×1) 基板を真空槽に導入し、超高真空環境下 ( $< 2 \times 10^{-8}$  Pa) で、室温に保持した基板表面上に Ag を蒸着速度  $1.2 \times 10^{-4}$  ML/s で蒸着することにより作製した。ここで、1 ML は Ag(111) 面の単原子層(monolayer) における原子密度であり、 $1 \text{ ML} = 1.38 \times 10^{15} \text{ atoms/cm}^2$  である。STM 観察は全て超高真空環境下で室温にて行った。図1(左)は、蒸着量 0.1 ML、0.5 ML、1 ML における STM 像である。姜らによる 2

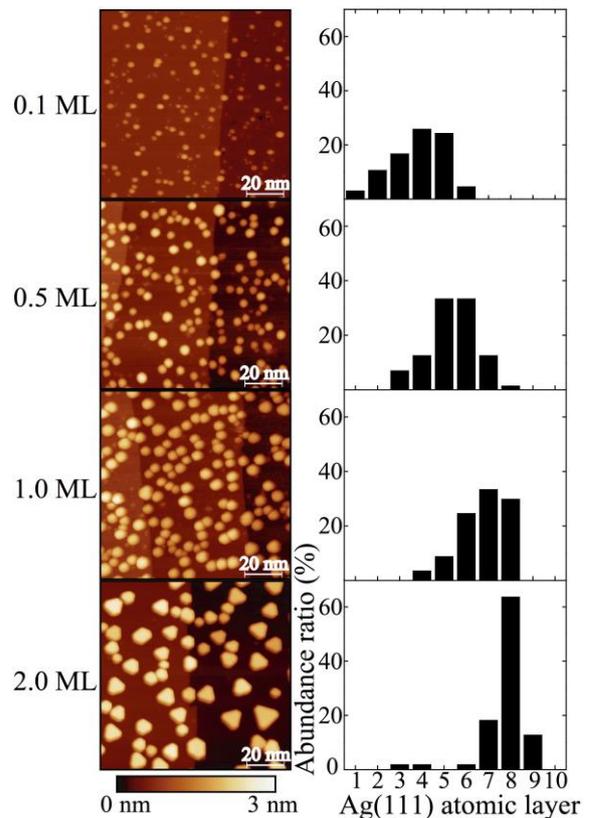


図1:水素終端 Si(111)-(1×1)表面上における Ag クラスターの形態 (左) と高さ分布 (右) の蒸着量依存性

ML での結果[3]も合わせて示している。表面上に形成された Ag クラスターの粒径が、Ag 蒸着に伴って大きくなっているのが見て取れる。各表面における Ag クラスターの高さ分布を、Ag(111)原子層単位 (=0.236 nm) に換算して示したものが図 1 (右) である。蒸着量が増すにつれてクラスターが高くなっており、三次元的に成長していることが分かるが、興味深いことに、分布の広がり徐々狭くなっていき、2 ML では 8 原子層高さのクラスターが大半を占め、それ以外のものはほとんど観測されなくなった。これらの結果は、Ag クラスターの成長が、ギブス・トムソン効果に従う古典的な核形成と核成長の段階を経て、量子サイズ効果が顕著となって安定構造を形成する、いわゆる electronic growth へと移行する段階を観察しているものと考えられ、本講演では、その詳細について議論する。

### 専門用語の説明

- ・走査トンネル顕微鏡 (STM) : 先端を鋭く尖らせた金属探針を試料表面から 1 nm 程度の距離にまで近づけ、その時に量子力学的効果によって流れる電流 (トンネル電流) が一定になるように探針-試料間の距離を制御しながら走査することで、試料表面の凹凸を画像化する顕微鏡。高い空間分解能を持ち、原子一個単位での観察が可能である。
- ・フェルミ波長 : 金属中において最も高いエネルギー準位 (フェルミ準位) にある電子の波長 (Ag の場合、 $\lambda_{\text{EF}} = 0.5206 \text{ nm}$ )。金属の物性を決める重要なパラメーターの一つ。
- ・量子サイズ効果 : 物質が電子の波長 (数十 nm 以下) 程度にまで小さくなった時に、物質中の電子のエネルギー準位が離散化することによって生じる、バルクでは見られない効果。
- ・ギブス・トムソン効果 : 外向きに凸の表面は平らな表面に比べ高い内部圧力をもつため、曲率が大きくなるほど表面の蒸気圧が高くなる (融点が下がる) 効果。系の全自由エネルギーをバルク及び表面の自由エネルギーを用いて表し、結晶の核形成・成長を古典的に記述する際に用いることができる。

### 参考文献

- [1] Y. Han et al., Phys. Rev. B. **80**, 155404 (2009).
- [2] B. Ünal et al., Phys. Rev. B. **81**, 85411 (2010).
- [3] 姜 正敏, 東北大学理学研究科博士論文 (審査中) .

## 福島第一原発事故被災動物の歯に記録された放射性 Sr の取り込み量の評価

(東北大院・理 化学専攻\*1、東北大病院\*2、東北大院・歯\*3、東北大・災害研\*4、  
量研機構\*5・岩手大・農\*6、東北大院・農\*7、東北大・高教機構\*8、東京医大\*9)

○小荒井一真<sup>1</sup>・木野康志<sup>1</sup>・西山純平<sup>1</sup>・高橋温<sup>2</sup>・鈴木敏彦<sup>3,4</sup>・清水良央<sup>3</sup>・  
千葉美麗<sup>3</sup>・小坂健<sup>3,4</sup>・佐々木啓一<sup>3</sup>・漆原佑介<sup>5</sup>・福田智一<sup>6</sup>・磯貝恵美子<sup>7</sup>  
・岡壽崇<sup>1,8</sup>・関根勉<sup>1,8</sup>・福本学<sup>9</sup>・篠田壽<sup>3</sup>

東北大学は東日本大震災からの復興プロジェクトの1つとして「被災動物の包括的線量評価事業」を立ち上げた。この事業は、福島第一原発周辺の旧警戒区域において事故後から数百献体に及ぶ被災動物（ウシ、ブタ等）や野生動物（サル、ネズミ）を採取し、その放射線被ばくの影響を調査することを目的としている。現在までに本事業は、ウシ体内中の放射性核種の測定 [1, 2]、経世代での遺伝影響 [3]、血しょう成分の被ばく影響 [4] について報告している。この事業内で我々の研究室は、放射能測定を担当している。放射能測定は被災動物の被ばく線量評価につながるため、本プロジェクトにおいて最も重要な役割を持つ。

発表者は本プロジェクト内で、ウシの歯中の放射性 Sr の測定 [1] と環境中の放射能汚染の調査 [5] を行っている。放射性 Sr の中でも Sr-90 は物理学的半減期、生物学的半減期が共に長く、長期の被ばく影響が懸念されている。しかし、純  $\beta$  線放出核種の Sr-90 は定量には煩雑な化学分離が必要である。そのため、福島原発事故によって放出された Sr-90 に関する報告数は、 $\gamma$  線を放出する Cs-137 などの核種に比べ少ない。歯や骨は主構成成分が Ca であり、Ca と Sr は共にアルカリ土類金属同士であるため、Sr-90 は歯や骨に蓄積することが知られている。特に、歯の基質への Ca の沈着は形成時期に行われ、形成後は Ca が沈着しない。そのため、形成時期に Ca と共に歯に取り込まれた Sr-90 は、形成後も歯に残存する。つまり、歯は形成時期の周辺環境の汚染状況を記録している。そこで、我々は歯に注目し福島事故後の動物への Sr-90 の取り込み状況の解明をしている。これまで延 125 本の福島事故の被災ウシの歯の分析を系統的に行い、未測定の試料の測定を順次行っている。これは世界的にも例がない。今回の発表では、この中でウシから採取された歯についての知見を発表する。

ウシの歯は歯種により固有な形成時期を持つ。したがって、ウシの歯それぞれの Sr-90 を比較することで、異なる時期のウシの環境中からの Sr-90 取り込みの情報を得ることができる。種毎の Sr-90 の比較から、環境中の Sr-90 が沈着後、拡散していたことが実証された。

Sr-90 を測定した歯は福島第一原発から 5 km の地点で採取されたウシ 2 頭（共に生後 7 ヶ月）から得たものである。Sr-90 の放射能は Sr を化学的に単離した後に定量した。また、Sr-90 だけでなく天然に広く存在する安定 Sr も ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析装置）により定量した。

これまでの研究で「歯ごとの測定の結果は、ウシが福島事故由来の Sr-90 を取り込んでいたこと」を明らかにした。福島事故由来の Sr-90 が生体内に取り込まれたという知見は、これが初めてである。「事故後に形成された歯は、環境中から動物への Sr-90 取り込みの指標となること、歯を用い

ることで、福島事故によって放出された Sr-90 の環境汚染の評価も行うことが可能であることが示された。」ことを実証した。

ここで、上記の一例として以下のことをあげる。図 1 は歯種ごとの Sr-90 比放射能を示す。9 本の歯種は採取時の年齢と X 線写真から形成開始時期が早かったものから順に 1~9 番の番号を割り当てた。1~4 番は乳歯を含む事故前に形成が開始した歯である。これらの歯は事故前の汚染のない環境で形成されたため、比放射能が低かった。これらの歯に含まれる Sr-90 は、福島事故由来ではなく、過去の大気圏内核実験由来のものであると考えられる。

一方で 5~9 番の事故後に形成された歯は、事故後の汚染された環境中で形成された。そのため、事故後の歯の比放射能は事故前に形成された歯よりも高い値であった。これらのウシ 2 頭は、事故後約 1 年 4 ヶ月汚染地域に生息していた。事故後の歯の比放射能より、この期間ウシは事故由来の Sr-90 取り込み続けていた。すなわち、事故によって沈着した Sr-90 が環境中に拡散していたことが明らかになった。

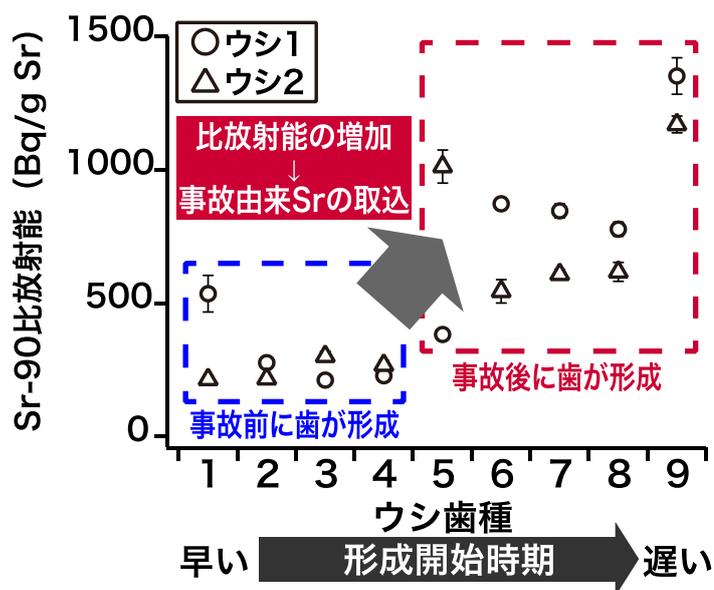


図 1. ウシ歯ごとの Sr-90 比放射能の変化

### 専門用語の説明

- ・ Sr-90 : Sr の放射性同位体であり、ウランの主要な核分裂生成物。半減期が 28.8 年であり、原子炉内に蓄積している。また、過去の大気圏内核実験でも多量の Sr-90 が生成され、現在も環境中に存在している。生体内で骨や歯に蓄積する。娘核種の Y-90 が高エネルギーの  $\beta$  線を放出するため、骨髄への長期の内部被ばくが懸念される。

- ・ Sr-90 比放射能 : ここでは、安定 Sr の重量 (kg) あたりの Sr-90 放射能 (Bq) とする。生体は同位体を識別することがないため、比放射能を追跡することにより環境中での Sr-90 の動態を知ることができる。

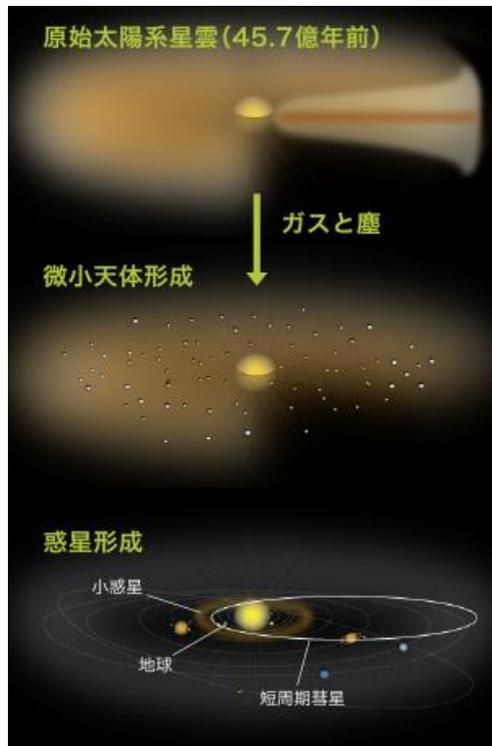
### 参考文献

- [1] K. Koarai *et al.*, *Sci. Rep.*, 6, 24077 (2016).
- [2] T. Fukuda *et al.*, *PLoS ONE*, 8, e54312 (2013).
- [3] H. Yamashiro *et al.*, *Sci. Rep.*, 3, 2850 (2013).
- [4] Y. Urushihara *et al.*, *PLoS ONE*, 11 e0155069 (2016).
- [5] K. Koarai *et al.*, *Proceedings of the 17<sup>th</sup> Workshop on Environmental Radioactivity*, 122-127 (2016).

## コンドリュール再現実験を通じたコンドリュール形成環境の推定

(東北大学大学院理学研究科 地学専攻) ○ 簗輪 諒吾

### [研究背景]



コンドリュールとは始原的な隕石であるコンドライトと呼ばれる隕石に含まれる直径1mm程度の大きさの球状物質である。コンドリュールは太陽系形成初期の約46億年前に原始惑星系円盤中でガスから凝縮したダストが急加熱・急冷却されて形成したことが知られている。しかし、その加熱メカニズムや冷却過程について詳細は不明である。[1]

また、コンドリュールは多様な結晶組織を持っており、部分熔融を経験して形成されたとされる **Porphyrific** コンドリュールと全熔融を経験して形成されたとされる **Nonporphyritic** コンドリュールに大きく分類できる。これらの結晶組織の違いはコンドリュール前駆体物質の化学組成や加熱冷却過程、形成環境を反映していると考えられている。そのためコンドリュールの形成過程をより詳細に知るためにコンドリュールの再現実験が行われてきた。特に **Nonporphyritic** コンドリュールに分類される

**Barred Olivine** コンドリュールや **Radial Pyroxene** コンド

リュールは特徴的な結晶組織を持っていることから数々の再現実験が行われてきた。[2, 3, 4] 本研究では **Barred Olivine** コンドリュールと **Radial Pyroxene** コンドリュールの2種類のコンドリュールの再現実験をガスジェット浮遊法と呼ばれる手法を用いてメルトを浮遊させながら、非接触環境からの結晶化させる実験を行った。この最新成果について報告する。

### [結果・考察]

ガスジェット浮遊法を用いた非接触環境からのメルトの均質核形成による結晶化は隕石中のコンドリュールの化学組成を模擬した組成においては困難であるということが分かった。このことから隕石中のコンドリュールが結晶ほぼ全て結晶化していることから、コンドリュール形成時に結晶化を促すような存在が必要なことが示唆された。また、浮遊しているメルトにダストを衝突させ結晶化させたものの結晶組織を観察したところ、実際のコンドリュールに似ている結晶組織を再現することが出来た。これらの実験により求められた各条件から原始惑星系円盤内のコンドリュール形成環境を推定することが可能であると考えられる。

### 参考文献

- [1] Grossman, J. N. 1988, Formation of chondrules, in *Meteorites and the Early Solar System*, edited by J. F. Kerridge and M. S. Matthews, pp. 680–696, Univ. of Ariz. Press, Tucson.

- [2] Hewins, R. H., and P. M. Radomsky 1990, Temperature conditions for chondrule formation, *Meteoritics*, 25, 309–318.
- [3] Tsuchiyama, A. et al., 2004, Experimental reproduction of classic barred olivine chondrules: Open-system behavior of chondrule formation, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 68, 653–672,
- [4] Nagashima, K. et al., 2008, Critical cooling rates for glass formation in levitated  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ - $\text{MgSiO}_3$  chondrule melts, *J. Min. Petr. Sci.*, 103, 204–208,

## Influence of tropical climate on wintertime

### East Asian cold air outbreaks

Muhammad Rais Abdillah, Yuki Kanno, and Toshiki Iwasaki

Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

m.rais.a@dc.tohoku.ac.jp

Cold air outbreak (CAO) events often cause severe damages to human activities. CAO events are characterized by strong equatorward wind and sudden drop of temperatures, which in turn significantly alter the weather with a time scale of 1 week or less (Shoji *et al.*, 2014). Frequency of CAO events is associated with changes in monsoon intensity and climate anomaly. East Asian CAO events are known to be vigorous because of very active winter monsoon system. The CAOs harm densely populated region of East Asia. Therefore, it is of great importance to understand the variability of East Asian CAOs.

We measure East Asian CAO intensity based on equatorward cold air mass flux below a threshold potential temperature level  $\theta_T = 280$  K at 45°N latitude (Iwasaki *et al.*, 2014; Shoji *et al.*, 2014). Potential temperature level is a very useful baseline to denote air mass circulation during an adiabatic process. Using an Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis in 56 years, we reveal two prominent patterns of equatorward mass flux in East Asia which represent two major pathways of East Asian CAOs (Abdillah *et al.*, 2017). Both are defined as East Asian western CAO (W-CAO) and eastern CAO (E-CAO). W-CAO is greatly affected by Siberian High pressure system and brings cold air to inland East Asia. On the other hand, E-CAO is strongly driven by Aleutian Low pressure system and gives impact mainly over northwestern Pacific.

East Asian CAOs have significant correlations with tropical climate variability, especially those related to El Niño Southern Oscillation (ENSO) (Abdillah *et al.*, 2017). ENSO is the strongest interannual oceanic oscillation usually monitored by sea surface temperature (SST) variation over tropical central-eastern Pacific. ENSO greatly controls tropical atmospheric convection and circulation over Indo-Pacific. These large disturbances influence atmospheric condition in remote extratropical areas. Therefore, ENSO is known to have global-scale impacts. There are two phases of ENSO: El Niño (warm SST) and La Niña (cold SST) phases. During La Niña, W-CAO is

observed to be stronger than normal, indicating more frequent cold flows. On the other hand, it turns out that E-CAO is more intense during El Niño. Interactions between ENSO and East Asian CAOs are explained by dynamical poleward Rossby waves excited by ENSO-induced convection anomalies over the tropical region. In case of La Niña and El Niño, positive convection anomaly appears over the Maritime Continent (i.e., around Indonesia) and central Pacific, respectively.

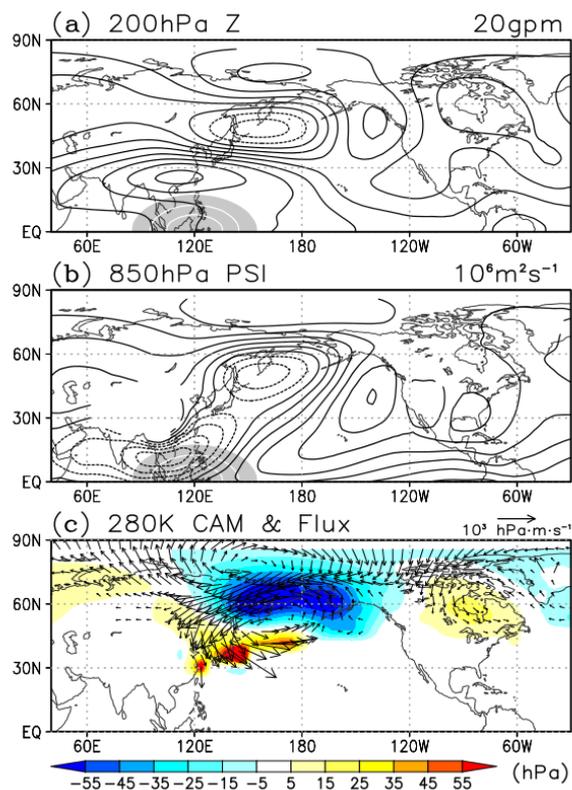


Fig. 1 Atmospheric responses simulated by an idealized heating over the Maritime Continent (denoted by grey shaded areas). (a), (b), and (c) show anomalous 200 hPa geopotential height (interval 20 gpm), 850 hPa streamfunction (interval  $10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ), and cold air mass (shaded) and flux (vector) below  $\theta_T=280 \text{ K}$ , respectively.

To demonstrate the ENSO impact, we conduct experiments using an atmospheric model by prescribed tropical forcing. Figure 1 exhibits the resulting atmospheric response forced by convection over the Maritime Continent. Wave-like structure of anomalous circulation is detected over extratropical region (Figs. 1a and 1b). In northwestern Pacific, upper-level negative geopotential height anomaly exists and indicates cyclonic formation (Fig. 1a). The vertical structure is barotropic which strengthens low-level equatorward mass flux in East Asia (Figs. 1b and 1c). The enhanced equatorward flux indicates W-CAO type. Similar mechanism is applied for E-CAO type when central Pacific convection is prescribed in the model.

#### Reference:

- Abdillah, M., Y. Kanno, and T. Iwasaki, 2017: Tropical-extratropical interactions associated with East Asian cold air outbreaks. Part 1: Interannual variability. *J. Climate*. doi:10.1175/JCLI-D-16-0152.1, in press.
- Iwasaki, T., T. Shoji, Y. Kanno, M. Sawada, M. Ujiie, K. Takaya, and M. Ujiie, 2014: Isentropic Analysis of Polar Cold Airmass Streams in the Northern Hemispheric Winter. *J. Atmos. Sci.*, 71, 2230–2243, doi:10.1175/JAS-D-13-058.1.
- Shoji, T., Y. Kanno, T. Iwasaki, and K. Takaya, 2014: An isentropic analysis of the temporal evolution of East Asian cold air outbreaks. *J. Clim.*, 27, 9337–9348, doi:10.1175/JCLI-D-14-00307.1.

集合  $X$  が距離  $d_X$  と測度  $\mu_X$  を備えているとき、三つ組  $(X, d_X, \mu_X)$  を測度距離空間という。M. Gromov は測度の集中現象を考察し、測度距離空間の枠組みにおいて、種々の概念や不変量を考案した [1]。Gromov の定義した不変量の一つにオブザーバブル直径がある。これは測度の集中現象において、測度距離空間の集中の度合いを表す重要な不変量である。以下、完備可分な距離とボレル確率測度を備えた測度距離空間を mm-空間と呼ぶ。 $\kappa$ -オブザーバブル直径は mm-空間に対してパーシャル直径を用いて以下のように定義される。

**定義 1** (パーシャル直径).  $X$  を mm-空間とする。実数  $\alpha \in [0, 1]$  に対し、パーシャル直径  $\text{diam}(X; \alpha) = \text{diam}(\mu_X; \alpha)$  を以下で定義する。

$$\text{diam}(X; \alpha) := \inf\{\text{diam } A \mid \mu_X(A) \geq \alpha, A \in \mathcal{B}_X\}.$$

ここで  $A \neq \emptyset$  のとき  $\text{diam } A := \sup_{x, y \in X} d_X(x, y)$ ,  $\text{diam } \emptyset := 0$  と定義する。

**定義 2** ( $\kappa$ -オブザーバブル直径).  $(X, d_X, \mu_X)$  を mm-空間とする。  $\kappa \in [0, 1]$  に対して、 $X$  の  $\kappa$ -オブザーバブル直径  $\text{ObsDiam}(X; -\kappa)$  を以下で定義する。

$$\text{ObsDiam}(X; -\kappa) := \sup\{\text{diam}(f_*\mu_X; 1 - \kappa) \mid f: X \rightarrow \mathbb{R} \text{ は } 1\text{-リプシッツ写像}\}.$$

パーシャル直径と  $\kappa$ -オブザーバブル直径は共に mm-同型の下で不変量になっている。1-メジャーメント  $\mathcal{M}(X; 1) := \{f_*\mu_X \mid f: X \rightarrow \mathbb{R} \text{ } 1\text{-リプシッツ}\}$  により、 $\kappa$ -オブザーバブル直径は以下のように表すことができる。

$$\text{ObsDiam}(X; -\kappa) = \sup_{\mu \in \mathcal{M}(X; 1)} \text{diam}(\mu; 1 - \kappa).$$

今回、この 1-メジャーメントをリプシッツ順序というものをを用いて考察した。リプシッツ順序  $\prec$  は mm-空間同士を比較する順序関係である。特に 1-メジャーメント  $\mathcal{M}(X; 1)$  の元はリプシッツ順序によって比較できるが、具体的な mm-空間  $X$  に対して  $\mathcal{M}(X; 1)$  の最大元はどうなるかという問題を考えた。その結果  $X$  が  $n$  次元単位球面  $S^n(1)$  のときに以下の定理が得られた。

**定理 3.** 一点からの距離関数による押し出し測度は  $\mathcal{M}(S^n(1); 1)$  の最大元である。

この定理は Lévy の等周不等式を用いて証明した。 $\kappa$ -オブザーバブル直径とパーシャル直径はリプシッツ順序に関して単調増加である。すなわち特にパーシャル直径に関して述べると  $X \prec Y$  ならば  $\text{diam}(X; 1 - \kappa) \leq \text{diam}(Y; 1 - \kappa)$  が成り立つ。よって、 $\mathcal{M}(X; 1)$  のリプシッツ順序に関する最大元が求まれば、 $X$  の  $\kappa$ -オブザーバブル直径はその最大元のパーシャル直径として正確に求められる。これは 1-メジャーメントの最大元を考察するモチベーションとなっている。また、 $n$  次元実射影空間  $\mathbb{R}P^n$  において以下の定理が得られた。

**定理 4.**  $n \geq 2$  とする。 $\mathcal{M}(\mathbb{R}P^n; 1)$  の元で一点からの距離関数による押し出し測度と比較不可能な測度が存在する。

この測度は具体的に構成した。比較不可能であることはある不変量を導入することで示した。さらに、3次元実射影空間  $\mathbb{R}P^3$  においては、1点からの距離関数を  $\xi$ 、極大な測地線からの距離関数を  $\zeta$  としたとき以下の定理が成り立つ。

**定理 5.** 任意の  $\kappa \in [0, 1]$  において

$$\text{diam}(\xi_*\mu_{\mathbb{R}P^3}; 1 - \kappa) \leq \text{diam}(\zeta_*\mu_{\mathbb{R}P^3}; 1 - \kappa)$$

が成り立つ。等号成立は  $\kappa = 0, 1$  のときのみである。

**定理 6.** 二つの mm-空間  $(\mathbb{R}, \xi_*\mu_{\mathbb{R}P^3})$ ,  $(\mathbb{R}, \zeta_*\mu_{\mathbb{R}P^3})$  はリプシッツ順序において比較不可能である。

定理 5 は  $\kappa$ -オブザーバブル直径の下からの評価において  $\xi_*\mu_{\mathbb{R}P^3}$  よりも  $\zeta_*\mu_{\mathbb{R}P^3}$  のパーシャル直径の方がよりよい評価を与えることを示している。 $\mathbb{R}P^3$  の等周不等式と  $\zeta_*\mu_{\mathbb{R}P^3}$  の対称性からもっともよい評価を与えるのは  $\zeta_*\mu_{\mathbb{R}P^3}$  である予想しているが、定理 6 より  $\zeta_*\mu_{\mathbb{R}P^3}$  は  $\mathcal{M}(\mathbb{R}P^3; 1)$  の最大元ではないことが分かる。

## 参考文献

- [1] M. Gromov, *Metric structures for Riemannian and non-Riemannian spaces*, Reprint of the 2001 English edition, Modern Birkhäuser Classics, Birkhäuser Boston, Inc., Boston, MA, 2007. Based on the 1981 French original; With appendices by M. Katz, P. Pansu and S. Semmes; Translated from the French by Sean Michael Bates.

## Detail Characterization of Directly Imaged Exoplanet in Subaru Telescope using High Contrast and High Dispersion Spectroscopy Instrument (IRCS+AO188)

(Tohoku University, Graduate School of Science Astronomical Institute)

Stevanus Kristianto Nugroho

We simulate spectroscopy characterization of directly imaged exoplanet atmosphere using IRCS (R~20,000)+AO188 in 8.2 m Subaru telescope. We took archived data from SMOKA (Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso-Archive) in K-band (1.97-2.47 micron) as the stellar spectrum template. The exoplanet spectrum was created to mimic thermal emission of Beta Pictoris b then Doppler shifted at 15 km/s to make sure that the exoplanet absorption lines are well separated from telluric and stellar lines. The planet to star contrast ( $F_p/F_s$ ) and the separation were varied to explore the capability of doing 5 sigma detection. The stellar and telluric lines were removed using the SVD (Singular Value Decomposition) technique. The exoplanet spectrum was recovered with cross correlation method. For 9.4 hours of exposure time, the planet signal was recovered at 5 sigma for  $F_p/F_s \sim 2.5e-5$  at  $\sim 0.35''$  from the host star and  $2.5e-4$  at  $\sim 0.15''$ . This observation can still be improved by using coronagraph, better instruments (e.g IRD+SCEAO) and more sophisticated telluric+starlight removal algorithm. It will be a great companion to characterize directly image exoplanets that will be found by TMT, E-ELT, WFIRST and JWST.

Keywords: exoplanet, atmosphere, high dispersion spectroscopy, high contrast, characterization

### references

- [1] Baraffe, I. et al. 2003, A&A, 402, 701
- [2] Brogi, M. et al. 2012, Nature, 486, 502-504
- [3] de Kok et al. 2013, A&A, 554A, 82D
- [4] Kawahara et al. 2014, ApJS. 212, 27
- [5] Lockwood, A. et al. 2014, Ap.J, 783, L29
- [6] Snellen et al. 2010, Nature, 465, 1049
- [7] Snellen et al. 2014, Nature, 509, 63-65

ミヤコグサとの相互作用に關与する根粒菌のⅢ型分泌エフェクターの解析

(東北大学大学院生命科学研究科 生態システム生命科学専攻)

○日下部 翔平<sup>1</sup>、金子 貴一<sup>2</sup>、安田 美智子<sup>3</sup>、三輪 大樹<sup>3</sup>、岡崎 伸<sup>3</sup>、佐藤 修正<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東北大・院生命、<sup>2</sup>京産大・総合生命、<sup>3</sup>東京農工大・院農

根粒菌はマメ科植物の根に根粒形成を誘導し、宿主から炭素源を受け取る代わりに、窒素固定により窒素源を宿主に提供する。この共生窒素固定の過程では、フラボノイドや Nod ファクター<sup>1</sup>等の分子を介した相互作用が、相互認識において重要な役割を持っている(図.1)。これまで、根粒の形成は宿主が根粒菌の Nod ファクターを受容できるか、できないかにより決定づけられると考えられてきた。しかし近年、根粒菌の持つⅢ型分泌系<sup>2</sup>(Type 3 secretion system : T3SS)も、相互認識において重要な役割を持つことが報告されて

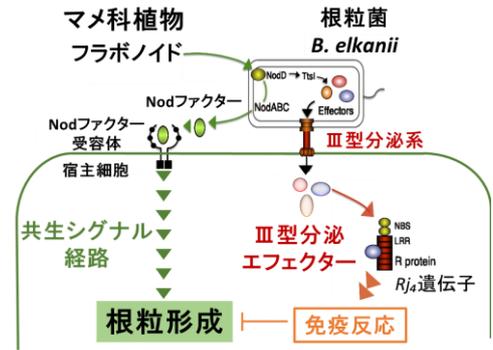


図.1 T3SS を介した相互作用のモデル

いる[1,2]。ダイズをはじめ、広い宿主域を持つ根粒菌 *Bradyrhizobium elkanii* USDA61 株(以下 USDA61 株)は、特定のダイズ系統に根粒を形成できないことが知られており[3]、T3SS 破壊株を用いた解析から、この現象には T3SS を介したエフェクターの導入による免疫反応が関与することが明らかとなった(図.1)[1]。この特徴的な相互作用は、新規な根粒形成の調節機構として着目されているが、宿主に免疫反応を誘導するエフェクターも同定されておらず、そのメカニズムについては不明な点が多い。そこで、USDA61 株と宿主細胞の相互作用メカニズムの解明を加速する目的で、マメ科のモデル植物として実験系の整備が進められているミヤコグサ(*Lotus japonicus*)に対して USDA61 株の接種を試みた。その結果、ミヤコグサ実験系統の Gifu 系統では根粒が形成されなかったのに対し、*Lotus burttii* では無効根粒が形成され、MG-20 系統では有効根粒が形成された。さらに、この系統間差は T3SS により導入されるエフェクターに対する免疫反応の程度の差に起因していることが示唆され(根粒菌侵入阻害、根粒成熟阻害)、リソースの充実したミヤコグサを用いた系で、T3SS を介した相互作用の解析が可能であることが示された。そこで本研究では、ミヤコグサに免疫反応を誘導する USDA61 株のエフェクターを同定するため、網羅的なエフェクターの同定と、同定されたエフェクター候補タンパク質の機能解析を行った。

USDA61 株で T3SS 依存的に分泌されるエフェクターの網羅的な解析を行った結果、10 種類のエフェクター候補が検出された。検出されたエフェクター候補タンパク質の機能を確認するため、対応する遺伝子を破壊した遺伝子破壊株を作成し、3 つのミヤコグサ実験系統に対する接種実験を行った結果、根粒菌の宿主への侵入阻害反応を誘導するエフェクターが同定された。

<sup>1</sup>Nod ファクター：宿主に根粒形成を誘導する根粒菌のシグナル物質。フラボノイドの検知により分泌が活性化される。  
<sup>2</sup>Ⅲ型分泌系：主に病原菌が病原因子を打ち込むために用いるタンパク質分泌系。多くの根粒菌にも保存されている。

参考文献

[1] Okazaki et al., *FEMS Microbiol Lett*, 295: 88-95, (2009) [2] Okazaki et al., *PNAS*. 110: 17131-36, (2013)  
 [3] Vest and Caldwell, *Crop Sci*. 12:692-693 (1972)

## z 展開法による核子形状因子の解析

(東北大学大学院理学研究科 物理専攻) ○塚本 夏基・佐々木 勝一

陽子の大きさは古くから関心を持たれている話題であり、最近ではミューオンが水素に束縛されたミュオニック水素のラムシフトより極めて高い精度で陽子の電荷半径を測ることに成功し [1]、同時によく知られていた電荷半径とは  $7\sigma$  もの齟齬が認められた。

陽子の大きさはこれまで電子陽子 (ep) 散乱や水素原子のラムシフトによって矛盾することなく見積もられてきた。そのため  $7\sigma$  の食い違いは大きな驚きを持って迎えられ、ミューオンが絡んでいることも手伝い、 $g-2$  の問題とともに標準理論を越えた物理との関連を期待する向きもある。しかし、特に ep 散乱ではこれまでのデータからミュオニック水素で得られた電荷半径を説明できる可能性もまた示唆されており [2]、目下必要とされているのは既存の実験の疑う余地のない再解析、あるいは再実験である。

ep 散乱から得られるのは形状因子と呼ばれる、“チャージ”の密度をフーリエ変換した運動量移行の関数である。電氣的な形状因子は電荷密度をフーリエ変換したものに相当し、そのため運動量移行が 0 の点での傾きが電荷半径(電荷分布の平均自乗半径)にそのまま対応し、これを求めることは形状因子の運動量移行に対する依存性の当てはめ問題に帰着する。だが、この当てはめ問題から電荷半径を評価することは容易ではなく、当てはめのモデルによっても大きく揺らぐことが言及されている [3]。

我々は 2010 年の Mainz の実験データ [4] を対象として ep 散乱の合理的な解析法を求めて再考した。この実験データは  $0.004\text{GeV}^2$  ほどの小さい運動量移行も含んだ全 1422 点のデータであり、今現在もっとも理想的なものである。本発表ではこのデータより電荷半径を評価するとともにさらに高精度に電荷半径を求めるためにどのようなデータが必要となるかを示したい。

## 専門用語の説明

- ・ 形状因子：陽子などが大きさを持つことによる点粒子からの補正。
- ・ 標準理論：電弱統一理論や強い相互作用を含む、現在の素粒子論の根幹をなす模型。
- ・ 運動量移行：粒子の散乱前後で受け渡される運動量の大きさ。ローレンツ不変量。

## 参考文献

- [1] R. Pohl *et al.*, Nature 466, 213-217 (2010).
- [2] I. T. Lorenz *et al.*, Phys. Rev. D 91, 014023 (2015).
- [3] E. Kraus *et al.*, Phys. Rev. C 90, 045206 (2014).
- [4] J. C. Bernauer, Ph.D. thesis, Johannes Gutenberg-Universitt, Mainz, 2010.

## DNA 損傷の反応動力学シミュレーション:熱による鎖切断の分子論

東北大学大学院 理学研究科 化学専攻 数理化学研究室

○及川 啓太、菱沼 直樹、岡田 朝彦、菅野 学、河野 裕彦

生体内で重要な遺伝情報を担うデオキシリボ核酸 (DNA) は、光や放射線の照射によって損傷を受けることが知られている。その過程には、光が直接 DNA に当たって損傷を及ぼす直接作用と、周りの溶媒に当たって発生した活性酸素種や電子が損傷を及ぼす間接作用がある。損傷の種類には核酸塩基の脱離や酸化、二量体化、また DNA 鎖切断などがあり、これらはがん等の原因となりうる。多くの先行研究から、真空中において DNA の切断し易い部位は図 1 の①~③である<sup>[1,2]</sup>と示唆された。しかし、これらの研究では生体内 DNA の周囲に存在する水やカウンターカチオンの影響を考慮できておらず、溶媒存在下の DNA 鎖切断について詳細に調べる必要がある。鎖切断に着目すると、二本鎖 DNA のうち 1 本の鎖だけが切断される一本鎖切断と、2 本とも切断される二本鎖切断がある。近年行われた実験<sup>[3]</sup>では、間接作用の鎖切断において OH ラジカルの与える影響が支配的であり、修復することが難しい二本鎖切断も起こりうる結論づけられた。ところが、OH ラジカルの衝突を抑制しても一本鎖切断は起こっており、これは熱の効果による切断であると示唆している。しかし、その詳細な機構は明らかでない。本研究では、水やカウンターカチオンに囲まれた DNA に熱を与えた際の鎖の安定性について調べる。また、実験<sup>[3]</sup>で示唆された熱の効果による切断について、詳細な分子論的機構を解明する。

計算は、密度汎関数強束縛 (DFTB) 法を用いて DFTB+パッケージで行った。計算対象として、少量の水とカウンターカチオンを含む X 線結晶構造 (モデル 1、図 2) <sup>[4]</sup>や、十分な水分子に囲まれた短鎖 DNA (モデル 2) を用いた。動力学計算では、1000 K を超える高温または常温を想定して熱を与え、切断が起こるまでシミュレーションを行った。

図 2 のモデル 1 の場合、優先的に図 1 中③の切断が起こり、 $\text{Na}^+$ が切断に大きく関与していることが分かった。まず DNA の負電荷を中和するため、 $\text{Na}^+$ はリン酸基に接近する。その後、 $\text{Na}^+$ とリン酸基が中間体を形成することで P-O 結合の解離エネルギーが低下し、③の切断が起こり易くなったと考えられる。生体内に存在する他のカチオンでも同様の効果が確認できた。

モデル 2 の場合、水和されたカチオンが脱水和してリン酸基に接近するまでに多くのエネルギーを要する。そのため、同じ温度・時間スケールでは③の切断が起こりにくくなった。図 1 中②の切断も見られたが、その場合カチオンは関与していなかった。今後は、四重鎖等の特異な DNA の安定性について調べ、塩基の酸化や二量体化等、他の損傷についても分子論的機構を明らかにしていく。

## 専門用語の説明

- ・反応動力学：分子レベルから結合の組み替え (化学反応) を詳細に解析する方法
- ・DFTB 法：密度汎関数法 (DFT) と Tight-Binding 法を組み合わせ、経験的パラメータを用いた計算手法

## 参考文献

- [1] L. Zhu et al., *J. Am. Chem. Soc.* **117**, 6048 (1995).      [2] Y. Zheng et al., *J. Am. Chem. Soc.* **127**, 16592 (2005).  
 [3] A. K. Dharmadhikari et al., *PRL* **112**, 138105 (2014).      [4] X. Shui et al., *Biochemistry* **37**, 8341 (1998).

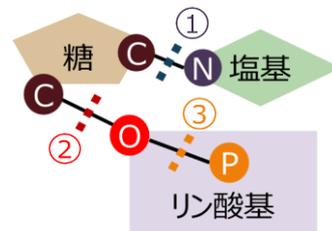


図 1 先行研究から示唆された DNA の切断部位 (①は塩基脱離、②と③は鎖切断)

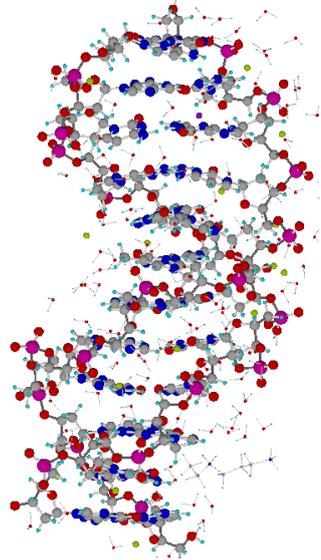


図 2 計算に用いた DNA 鎖 (モデル 1)

### ・はじめに

2014年11月、糸魚川-静岡構造線活断層帯北端部に位置する神城断層の活動によって長野県北部の地震 (Mjma 6.7) が発生した。神城断層は約20 kmの長さを持つ東上がりの逆断層であり、南接する松本盆地東縁断層帯と同時に活動してM7クラスの地震を引き起こすとされていた。しかし2014年の地震は想定より一回り小さい規模の地震であり、神城断層の一部のみが活動したため、2014年の地震が神城断層の固有地震であるのかが問題となっている。そこで本研究では、地震前後の航空測量データを用いて地震時の地殻変動量を算出し、断層変位地形の編年、累積変位量の計測を行うことで神城断層の平均活動間隔を求めた。

### ・地震前後の航空測量データに基づく2014年地震時の地殻変動量

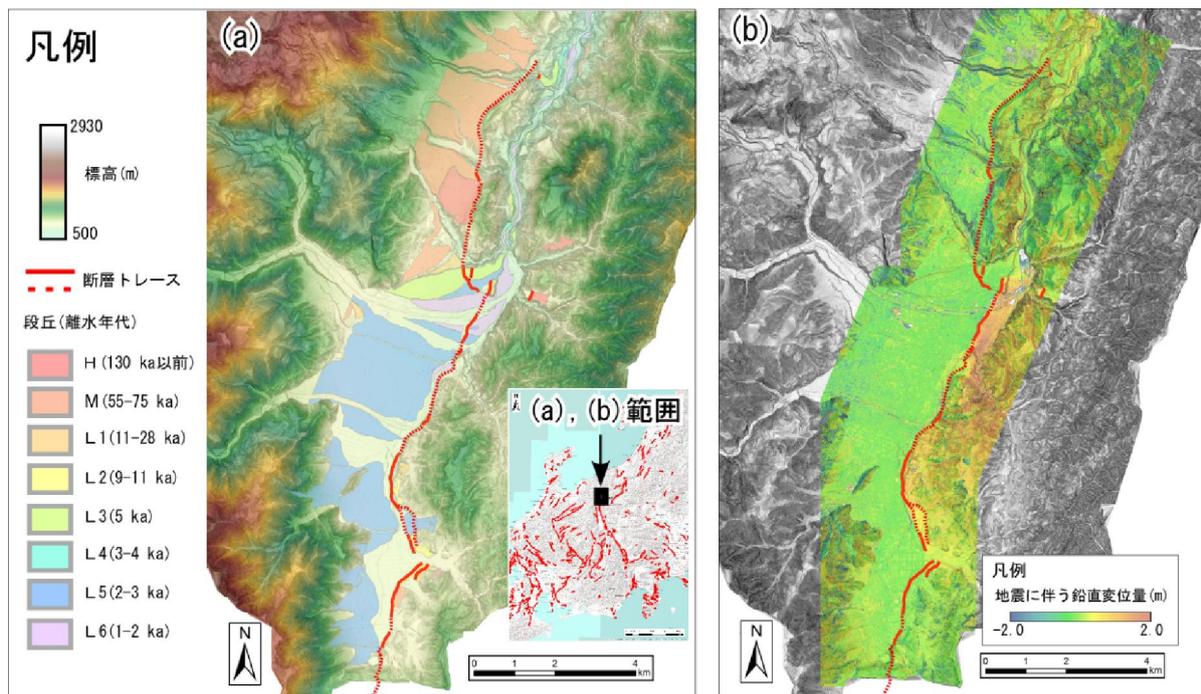
航空測量データを基に神城断層周辺の標高値を取得し、地震後の標高値から地震前の標高値を取り除くことで地震時に生じた地殻変動の鉛直変位量分布を求めた。その結果、地震に伴う地殻変動は南北方向の約9 kmの区間において2か所のピークが見られ、実測値と概ね一致する値が得られた。

### ・断層変位地形の編年、累積変位量の計測

空中写真判読、現地踏査により神城断層周辺の地形を分類・編年し、累積変位量を計測した。また、計測した累積変位量と地形面の年代から神城断層の平均変位速度を求めた。

### ・神城断層の平均活動間隔

地震時の鉛直変位量と平均変位速度を基に神城断層の平均活動間隔を求めた結果、252~769年で地表地震断層を生じる規模の地震を繰り返してきている可能性があることがわかった。地震後に行われた掘削調査では、神城断層の1回前の活動は1714年であったとされており、数百年という短い間隔で活動を繰り返してきたことが示唆される。しかし、南北に隣接する区間の断層変位地形は2014年と同じような地震の繰り返しでは説明できないため、今後は隣接する区間の地震活動についても併せて検討する必要がある。



(a) 神城断層周辺の地形分類図

(b) 地震時鉛直変位量分布図

## 電子の三角関係が生み出す新しい秩序と揺らぎ

(東北大学大学院理学研究科 物理専攻) ○伊藤拓哉・柴田尚和

物性物理において現在盛んに研究されている系として、幾何学的フラストレーションを持つ系がある。幾何学的フラストレーションを持つ系とは、系の持つ格子の構造によって、自明な安定配置が存在しなくなる系のことである。例として、各頂点に1個ずつ電子が配置された三角形を考える。電子の持つスピンは↑または↓の2状態をとるが、パウリの排他原理によってスピンの向きが反平行な方が電子の飛び移りによるエネルギー利得を得られることから、電子のスピンの間には互いに反平行になろうとする相互作用(反強磁性相互作用)が働く。このとき三角形には幾何学的フラストレーションが生じる。すなわち、この三角形において最もエネルギーが低い状態を作るために、隣り合うスピンの向きが反平行になるようにスピンを配置しようとする、図1のように、あるスピンについては↑と↓のどちらを選んでも隣り合うスピンの片方と平行になってしまい、エネルギーが上昇してしまう。系が持つこのような“三角関係”のために、実際の基底状態としては、図2に示すような、各頂点のスピンの向きが互いに妥協し、120度ずつ傾きながら配置される状態が実現する。このスピンの傾け方には、右回りに傾けるか、左回りに傾けるかという2パターンが存在し、この自由度をカイラリティ自由度と呼ぶ。孤立した三角形においては、右回り、左回りのいずれもエネルギー的に等しいが、三角形が複数存在し、相互作用している系では、カイラリティ自由度同士にも相互作用が生じてくる。そのような系の一つが、本研究で扱う捻じれた三角スピントラップ(図3)である。この系は、三角形が捻じれながら鎖状に連結したモデルであり、三角形の頂点のスピンの向きは、三角形内の相互作用 $J_{\perp}$ (図3の赤い相互作用)及び、三角形を繋ぐ相互作用 $J_{\parallel}$ (図3の黒い相互作用)によって反強磁性的に連結している。本研究の目的は、この捻じれた三角スピントラップにおいて、スピンの傾け方に起因する特異な自由度であるカイラリティが、実験的に測定可能な物理量にどのような影響を及ぼすか調べることである。図4に、本研究で得られた $J_{\parallel}/J_{\perp} = 0.05, h_z/J_{\perp} = 1.00$ における捻じれた三角スピントラップの比熱(赤)、帯磁率(緑)及び、解析的に求められたカイラリティ自由度による有効モデルの比熱(青)を示す。低温で帯磁率が消失しているにもかかわらず、系の比熱がカイラリティ自由度だけで構成した有効モデルの比熱を再現することから、比熱の測定によってカイラリティ自由度を実験的に観測可能であることが分かった。この低温比熱の振る舞いは、朝永-Luttinger 液体と呼ばれる臨界状態の出現を反映しており、系が持つ“三角関係”が生んだ特異な自由度であるカイラリティが、量子的な揺らぎによって特異な(準)秩序を形成することが理解できる。

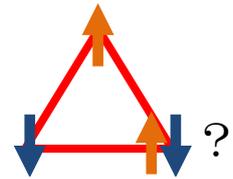


図1: 三角形上のスピン配置

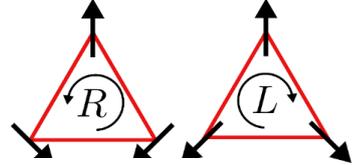


図2: 三角形の基底状態

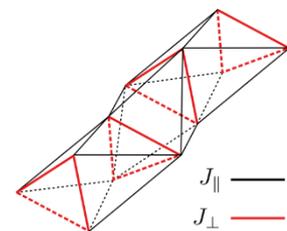


図3: 捻じれた三角スピントラップ

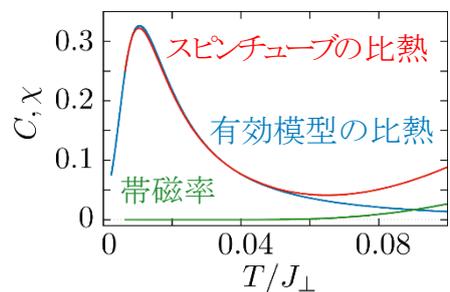


図4: 磁場中におけるスピントラップの比熱

図4に、本研究で得られた $J_{\parallel}/J_{\perp} = 0.05, h_z/J_{\perp} = 1.00$ における捻じれた三角スピントラップの比熱(赤)、帯磁率(緑)及び、解析的に求められたカイラリティ自由度による有効モデルの比熱(青)を示す。低温で帯磁率が消失しているにもかかわらず、系の比熱がカイラリティ自由度だけで構成した有効モデルの比熱を再現することから、比熱の測定によってカイラリティ自由度を実験的に観測可能であることが分かった。この低温比熱の振る舞いは、朝永-Luttinger 液体と呼ばれる臨界状態の出現を反映しており、系が持つ“三角関係”が生んだ特異な自由度であるカイラリティが、量子的な揺らぎによって特異な(準)秩序を形成することが理解できる。

### 専門用語の説明

- ・スピン：電子が持つ(自転に対応する)角運動量自由度。物質の磁性に重要な役割を果たす。
- ・パウリの排他原理：2つ以上の電子が全く同じ電子状態をとることができないという原理。
- ・朝永-Luttinger 液体：相関が冪減衰するなどの臨界的な性質を示す次元量子系特有の状態。

## Two dimensional nucleation of colloidal crystals on the substrates with depletion attraction

(東北大学大学院理学研究科 化学専攻)

○Suxia Guo, Jun Nozawa, Haruhiko Koizumi, Junpei Okada, Satoshi Uda

Crystallization on substrates with foreign particles is almost common in reality. Understanding nucleation process on the substrates is, therefore, critically important in fields including metallurgy, physics, biology and so on. However, nucleation kinetics remains unclear due to the limitations of eligible experimental evidence. Colloidal crystals have been used as a good model for studying such a phase transition. In this study, two-dimensional nucleation of colloidal crystals on the substrates with depletion attraction is investigated at single particle resolution.

Crystallization of colloids was induced by the depletion attraction. Green fluorescent polystyrene particles of 500 nm were used. Sodium polyacrylate was added in the solution as depletant to generate attractive interaction, and the concentration is 0.14 g/L. Nucleation process was monitored by an optical microscope. Area fraction ( $\phi_{\text{area}}$ ) is introduced to represent concentration of colloidal particles, which is defined as area occupied by particles divided by area of substrate.

Regarding the embryo with single layer, colloidal particles crystallize when the number of particles in an embryo exceeds the critical number ( $N^*=35$ ), while the embryos disappear if the particle number is less than the critical number (Fig. 1 I, II). However, embryos with two layers grow even if the particle number is smaller than the critical value for single layer (Fig. 1 III, IV). The critical numbers at various area fractions were obtained (Fig. 2). The shaded area represents the particle number larger than the critical value for single layer. Critical particle numbers for two layers are smaller than that for single layer, indicating that the second layer of the embryos promote nucleation with less driving force.

We explain this phenomenon by evaluating Gibbs free energy change,  $\Delta G$ , of the nucleation process for single and two layers. To calculate  $\Delta G$ , surface free energy and line tension are obtained experimentally based on classical nucleation theory (CNT) equation. The calculation results suggest that  $\Delta G$  of two layers is smaller than that in critical single nucleus.

専門用語 1 : CNT determines  $\Delta G$  of nucleation process as  $\Delta G = 4\pi r^2 \Delta\gamma - \frac{4\pi r^3}{3} \cdot \Delta\mu$  ( $r$  is the radius of nucleus,  $\Delta\gamma$  is surface free energy,  $\Delta\mu$  is chemical potential difference between solid and liquid), which composes of two competing terms: gain of bulk energy and loss of surface free energy.

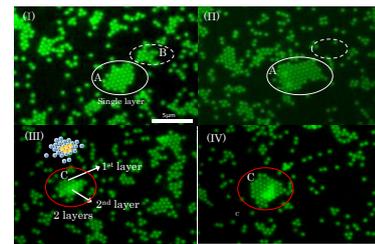


Figure 1 Snapshots of nucleation process of colloidal crystal on the substrates: embryo A grows up, B disappears in images (I) and (II), embryo C with 2 layers grows up in images (III) and (IV)

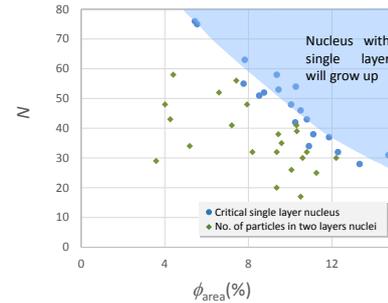


Figure 2 Maximum numbers of particles in the embryo that will disappear at different  $\phi_{\text{area}}$  in single layer nucleus (in blue circle) and that for two layers nuclei (in green rhombus).

## 地球深部岩石からの流体分離実験：粒成長と流体組成の効果

(東北大学大学院理学研究科 地学専攻) ○藤田和果奈・中村美千彦

【背景】沈み込むスラブからの脱水や部分溶融体からのメルトの分離過程など、地球内部岩石ではメルトや水といった流体の移動が普遍的に起こっている。流体移動を駆動する代表的な力は重力による岩石の変形（圧密）であるが(e. g. McKenzie 1984<sup>1</sup>)、小さな空間スケール（ $\sim 1\text{ m}$ ）では重力よりも界面張力が卓越することが知られている(Takei & Majumder 2009<sup>2</sup>)。なぜならば、界面張力が岩石の微細組織の形成過程を支配しており、岩石の組織形成が流体分布・移動に直接影響を与えるからである。しかしながら、組織形成が流体分離過程にどのように影響するかは分かっていない。

## 【着眼点】

1. 多結晶体岩石には系の界面エネルギーを極小化する流体量が存在し(Jurewicz and Watson 1985<sup>3</sup>)、過剰な流体は外部へ吐出されることが示唆されているが、そのメカニズムは分かっていない。
2. 結晶粒成長は岩石総粒界の移動現象であるため間隙流体の再配置を伴うが、その流体分離への効果はこれまで十分に検討されてこなかった。



結晶粒成長の流体分布への寄与に着目し、初期流体量と固液二面角 ( $60^\circ > \theta$  と  $60^\circ < \theta$  に大別) を変化させて石英多結晶体—CHO 流体系の焼結実験を行った。

【結果】二面角の大きさによって異なるスケールで流体分離が起こっていることが分かった。この違いは多結晶体中の粒間流路ネットワークの有無によるものと考えられる。これら二つの異なる流体吐出しメカニズムは、重力による流体分離の仕方を決める重要な過程であることが予想される。

$60^\circ > \theta$  : カプセルの高温端に過剰な流体が吐き出され、流体プールを形成していた

(**Capsule-scale fluid expulsion**)。これはカプセル内部の温度勾配によって流体中のシリカの溶解度勾配が生じ、溶解度が高い側から低い側へのシリカの輸送が起こったためであると考えられる (Chemical compaction)。

$60^\circ < \theta$  : 流体は石英多結晶体内部により小規模な流体ポケットを形成した(**Grain-scale fluid expulsion**)。これは粒成長によって小径粒子が選択的に消滅した結果、間隙流体の合体・再配置が起こったためであると考えられる。さらに、粒成長下では多角形充填の幾何学的制約から小径粒子がネットワークを形成していることが分かった。したがってこのようなネットワークが消滅する場合、流体ポケットが互いに連結し合い、流路ネットワークがない場合にも高い浸透率を持ちうるということが分かった。

#### 【専門用語の説明】

結晶粒成長：系の界面エネルギーを減少させるため、相対的に大きな結晶粒子が小さな結晶粒子を消費し平均粒径が増大していく現象。

固液二面角：固-固界面張力と固-液界面張力の釣り合いで決定される角度。60°を閾値に粒間流路ネットワークの有無が決まる。

#### 【参考文献】

[1] McKenzie. (1984). The generation and compaction of partially molten rock. *Journal of Petrology*, 25, 713-765.

[2] Takei and Majumder. (2009). A generalized formulation of interfacial tension driven fluid migration with dissolution/precipitation. *Earth and Planetary Science Letters*, 288, 138-148.

[3] Jurewicz SR and Watson EB. (1985). The distribution of partial melt in a granitic system: The application of liquid phase sintering theory. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 49, 1109-1121.

## 時空間スムージングカーネル法による地震活動の遡及的予測—平成 28 年熊本地震への適用—

(東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻) 大久保祐一

地震被害軽減のためには、将来起こりえる大地震の規模や頻度を的確に予測することが重要である。大規模地震の予知・予測に向けた取り組みの 1 つとして、膨大な震源データから地震活動を記述する統計モデルが提案され、遡及的な予測 (retrospective forecast) と検証が行われてきた。また、予測能力の再現性や客観性、透明性、自動化を担保する準リアルタイムな検証実験も進行中である (CSEP, Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability)。

このような統計的な予測モデルのなかで、広く適用されているのが経験則である改良大森公式に基づいた ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence) モデル (Ogata, 1988) である。しかしながら、ETAS モデルは改良大森公式が適用できない群発地震活動などへの当てはまりは必ずしも良くない。そこで、Helmstetter and Werner (2014) は時空間スムージングによって地震活動を記述するカーネルモデルを考案した。カーネルモデルは経験則を用いないため、ETAS モデルが記述できない地震活動をも柔軟に記述できるが、過去に検証が行われたのはカリフォルニアの地震活動のみである。そのため、本研究ではカーネルモデルを平成 28 年熊本地震 (2016 年 4 月 16 日, M7.3) 前後の地震活動に適用し、ETAS モデルとの比較を通じてカーネルモデルの予測性能の検証を行った。

平成 28 年熊本地震は 1990 年代以降に日本で発生した同規模 (M7 程度) の地震活動と比較して、地震の続発や震源域の拡大が顕著であり、改良大森公式が適用できなかった。そのため、ETAS モデルでは地震の続発や震源域の拡大に対応できず、過小評価が目立った。一方、カーネルモデルには ETAS モデルほどの過小評価は見られず、観測結果と整合的であった。

このように、カーネルモデルは地震活動の様子を柔軟に記述することができる。そのため、統計モデルとして大地震の予測への貢献が期待できる。しかし、カーネルモデルの適用と検証事例は未だに少なく、実用化のためにはさらなる検証が必要である。

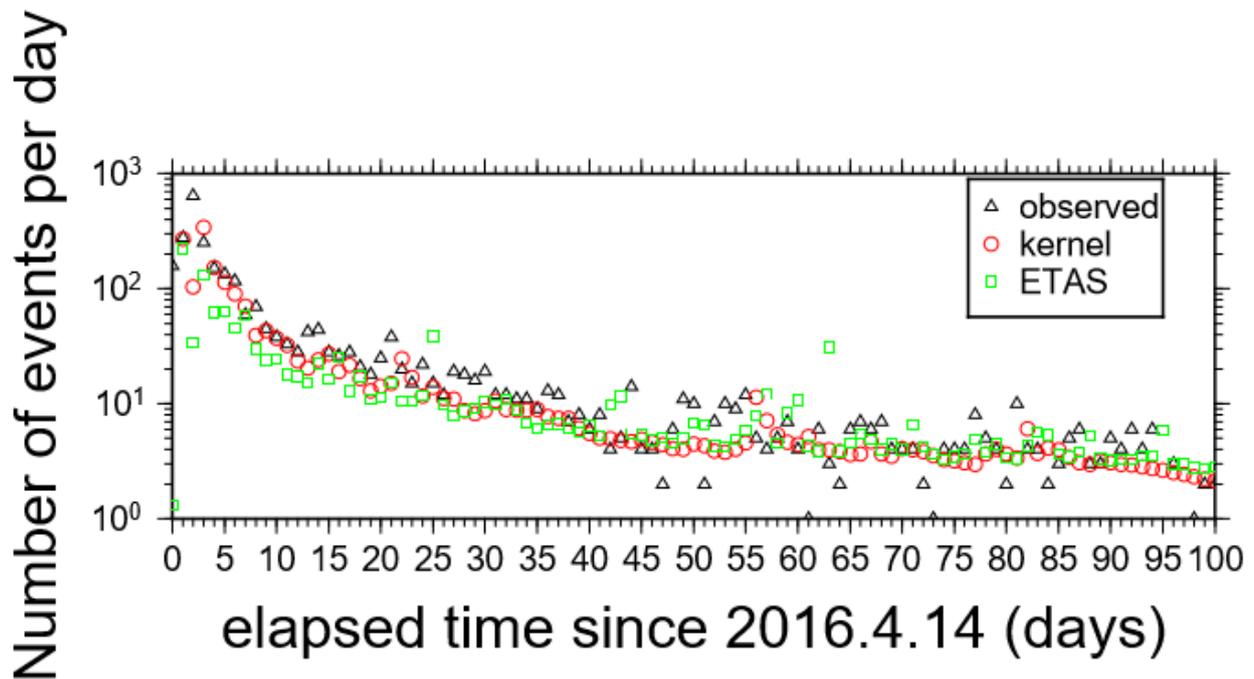
### 専門用語の説明

改良大森公式：余震の時間減衰を表した経験則。ある地震から時間  $t$  経過後の単位時間当たりの余震数  $N$  は以下の式で表される。

$$N = K / (t + c)^p \quad (K, c, p \text{ は定数})$$

ETAS モデル：すべての地震が余震をもつという前提のもと、改良大森公式をすべての地震に適用し地震活動を記述する統計モデル。

群発地震：断続的に地震が多発する地震活動であり、改良大森公式に従った減衰の経過を辿らない。



図：2016年4月14日から2016年7月23日の熊本県周辺での1日当たりの地震発生数の予測結果（深さ30km以浅，M2.3以上）

#### 参考文献

Helmstetter, A., and M. J. Werner (2014), Adaptive smoothing of seismicity in time, space, and magnitude for time-dependent earthquake forecasts for California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **104**(2), 809–822, doi: 10.1785/0120130105.

Ogata, Y. (1988), Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *J. AM. Stat. Assoc.*, **83**, 9-27.

# 仮想トールス結び目の仮想結び目解消数について (要旨)

東北大学大学院理学研究科数学専攻 柳 宏和

本発表の目標は、標準的なトールス結び目のいくつかの交差を仮想交差にして得られる仮想トールス結び目における仮想結び目解消数の決定である。

仮想結び目とは Kauffman により導入された、結び目理論を拡張した概念である [3]。結び目の量子不変量の研究において、ガウス図式という図式が扱われるが、ガウス図式のうち結び目図式に対応しないものが存在するため、それらの結び目図式として実現するために、仮想交差をもつ仮想結び目図式が導入された (図 1 を参照)。Kauffman はさらに仮想ライデマイスター移動を導入することで、仮想結び目図式の同値類を定義し、それがガウス図式の観点から必要とされる諸性質をみたすことを記した。この同値類のことを仮想結び目という。

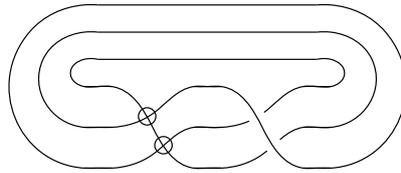


図 1 仮想結び目の例:  $VT_{3,2}^1$

仮想結び目  $K$  の仮想結び目解消数  $\text{vu}(K)$  とは、仮想結び目  $K$  を自明な結び目に変形するまでの交差交換の最小数である。一般に、古典的な結び目は交差交換を行うことで自明な結び目に変形できるが知られているが、すべての仮想結び目が交差交換を行うことで自明な結び目に変形できるとは限らない。また、古典的な結び目は交差の数の半分以下の回数の交差交換を行うことで自明な結び目に変形できることが知られているが、仮想結び目の場合は未解決になっている。2008 年に Byberi と Chernov は 1 橋結び目の仮想橋指数について研究を行った [1]。最近の研究では Kaur と 鎌田, 河内, Prabhakar が一般結び目解消数という概念を導入し、仮想  $(2, p)$  トールス結び目の一般結び目解消数の決定を行った [2]。

まず、標準的なトールス結び目及び、仮想トールス結び目の定義を述べる。

定義 1. 互いに素な自然数  $p$  と  $q$  に対して、 $S^3$  に標準的に埋め込まれたトールス上をロンジチュード方向に  $p$  回、メリディアン方向に  $q$  回まわった単純閉曲線を  $(p, q)$ -トールス結び目という。

定義 2.  $(p, q)$ -トールス結び目図式 ( $p$  と  $q$  は互いに素な自然数) のいくつかの交差を仮想交差にした図式を仮想トールス結び目という。また、 $(p, q)$ -トールス結び目図式において上を通る紐 (*overstrand*) を  $a_1, a_2, \dots, a_q$  とする。  $a_1, a_2, \dots, a_n$  ( $n = 1, \dots, q$ ) 上の交差を全て仮想交差に

した図式を  $VT_{p,q}^n$  で表す .

図 1 は仮想トールス結び目  $VT_{3,2}^1$  の図式である .

本論文では , あるクラスの仮想トールス結び目の仮想結び目解消数に関する以下の結果を示した .

主定理 1 (Y.). 仮想トールス結び目  $VT_{p,q}^1$  に対して

$$\text{vu}(VT_{p,q}^1) = \frac{(p-1)(q-1)}{2}$$

が成り立つ . 主定理 1 の証明の手法は , 不変量  $P(K)$  を用いて下からの評価を与え , ライデマイスター移動及び交差交換を用いて上からの評価を行う . また , より一般の仮想トールス結び目  $VT_{p,q}^n$  に対して , 仮想結び目解消数の下からの評価を得た .

主定理 2 (Y.).  $(p, q)$ -トールス結び目図式 ( $p, q, n \in \mathbb{N}$  に対して ,  $p$  と  $q$  ,  $p$  と  $n$  は共に互いに素) において連続する  $n$  本の上を通る紐の交差を仮想交差にした仮想トールス結び目  $VT_{p,q}^n$  に対して

$$\text{vu}(VT_{p,q}^n) \geq \frac{(p-1)(q-n)}{2}$$

が成り立つ .

主定理 1 により得られた仮想トールス結び目  $VT_{p,q}^1$  の仮想結び目解消数は 1993 年に Kronheimer と Mrowka によって示された古典的なトールス結び目における結び目解消数と一致している . また , 主定理 2 より , これらの仮想トールス結び目については , 自明な結び目にするためには交差の数の半分以上の回数 of 交差交換が必要である .

本論文では , さらに  $p, q$  が  $p \leq 8$  の仮想トールス結び目  $VT_{p,q}^2$  ,  $VT_{p,q}^3$  に関して ,  $VT_{8,5}^2$  のとき以外について , その仮想結び目解消数は決定した . 証明の手法は , 不変量  $P(K)$  または主定理 2 を用いて下からの評価を行い , ライデマイスター移動及び交差交換を用いて上からの評価を行う .  $VT_{8,5}^2$  の仮想結び目解消数は , 9 であると予想されるがまだできていない .

## 参考文献

- [1] E. Byberi and V. Chernov , *Virtual bridge number one knots*, Commun. Contemp. Math. **10** (2008), 1013-1021.
- [2] K.Kaur and S.Kamada and A.Kawauchi and M.Prabhakar, *Generalized unknotting numbers of virtual knot*, preprint.
- [3] L.H. Kauffman, *Introduction to Virtual Knot Theory*, J. Knot Theory Ramifications **21** (2012), no. 13, 1240007, 37 pp.

## Wolf-Rayet 星の食連星探査

(東北大学大学院理学研究科 天文学専攻) 小野里宏樹

### 1. 背景 | 従来の大質量星の進化モデル ~Conti Scenario~

質量が太陽の 8 倍以上の恒星は大質量星、それ以下の恒星は中小質量星と呼ばれる。太陽は中小質量星の代表で、寿命は約百億年と長く、その最後は白色矮星として静かに終わると考えられている。一方、大質量星は寿命が数百万年と短命であるが、その一生の最期に起こす超新星爆発は宇宙空間に大量の重元素を放出して宇宙の元素組成を変えていく。このため、大質量星の進化は宇宙の進化の観点からも強い関心を抱かれている。

1960 年代に紫外線での観測の発展により、大質量星からは強い放射圧によって多量のガスが吹き出していることが明らかになった。Conti (1975) [1] は観測された質量放出をもとに、大質量星の進化モデルを提唱した。このモデルは主系列星から進化後の Wolf-Rayet (WR) 星まで広い範囲の大質量星の特徴を上手く説明できることから Conti Scenario と名付けられ、大質量星の進化を理解する標準的枠組みとなった (図 1)。

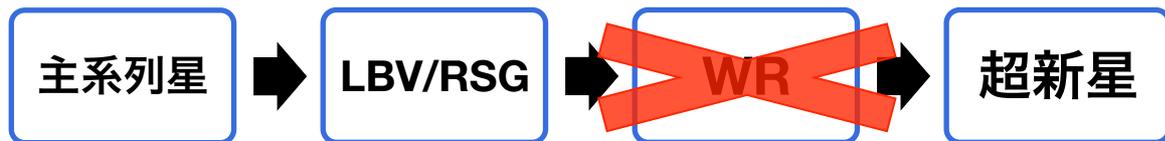


図 1. 従来考えられてきた大質量星の進化のシナリオ (Conti Scenario)。近年のモデル計算、および観測から放射圧では強い質量放出を生み出せず、WR 星が形成できないことが問題となっている。

### 2. 問題点 | 不足している質量放出率

ところが、最近のモデル計算、および観測から放射圧ではそれほど強い質量放出を生み出せないことがわかってきた (Fullerton et al. 2006 [2], Bouret et al. 2005 [3])。特に深刻なのは、放射圧駆動型の恒星風モデルでは、外層を十分に吹き飛ばすことができず、WR 星が形成されないという問題である。しかしながら、WR 星が多数観測されているために強い質量放出は必要不可欠である。

### 3. 解決方法 | 近接連星? LBV や RSG?

上記の不足している質量放出率を補う方法として現在二つのメカニズムが考えられている。一つは、近接連星系の中の重力相互作用による質量のはぎ取り、もう一つは、大質量星が主系列星の段階を終えた後の LBV や RSG の段階での多量の質量放出である。LBV の段階は非常に明るいために放射圧が強く、自身を支えられなくなり、大きな爆発を起こすことがあり、それにより多量の質量が放出される。これら二つのメカニズムには現在、観測による決定的な証拠が得られていないため、決着が付いていない。

#### 4. 研究方法 | 大質量星進化における近接連星の影響の統計的評価

---

本研究では、二つのメカニズムのうち近接連星系の重力相互作用による質量のはぎ取りに注目した。近接連星系の場合、一方の恒星が他方の恒星を隠す現象が見られることがあり、食と呼ばれる。このとき、連星系が暗く見えるので、恒星が一つに見える場合でも連星であることがわかる。本研究では、南アフリカの IRSF 望遠鏡を用いて多数の WR 星の明るさを長期間にわたり観測し、その明るさの変化から食の検出を試みた。多数の WR 星を観測することにより、一般に連星率が高いと考えられているが、統計的な研究がまだ不十分である WR 星の連星について、統計的な議論ができるデータを提供することができる。

#### 5. 観測結果 | 近接連星の質量のはぎ取りは重要でない?

---

2年間にわたる観測では、食を起こしている WR 星をほとんど発見できなかった。地球から観測した時の公転運動の軌道の角度や伴星との大きさの比によっては近接連星であっても食が検出できない天体がある。しかしながら、WR 星を形成する主要因が近接連星系の中の重力相互作用であれば食が多数検出されるはずであり、現時点で得られている結果はこの機構が WR 星の形成の主要因でないことを示唆する。

#### 専門用語の説明

- ・ 主系列星：中心部で水素の核融合反応を起こすことにより発生したエネルギーが重力とつりあっている天体。安定した段階で、宇宙の大部分の恒星がこの段階にある。太陽も主系列星の一つである。
- ・ LBV：Luminous Blue Variable という天体。大質量星が主系列星の段階を終えた後に到達すると考えられている。宇宙で最も明るい恒星の種類の一つである。非常に明るいために放射圧が重力よりも強くなり不安定になり、大きな爆発が見られることもある。
- ・ RSG：Red Supergiant。赤色超巨星。大質量星の中でも軽い方の天体が主系列の段階を終えた後に到達すると考えられている。外層が非常に大きく膨らみ、半径が太陽の数百倍にもなっていると考えられている。
- ・ WR：Wolf-Rayet 星。大質量星の進化が進み、自身の水素外層を吹き飛ばして中心核がむき出しになった天体であると考えられている。Wolf と Rayet は発見者の名前である。

#### 参考文献

- [1] Conti, P. S. 1975, Mem. Soc. Roy. Sci. Liege, 9, 193
- [2] Fullerton A. W., Massa D. L. & Prinja R. K., 2006, ApJ, 637, 1025
- [3] Bouret J. C., Lanz T., & Hillier D. J., 2005, A&A, 438, 301

## 小胞輸送制御因子 Rab35 は Centaurin-β2 との結合を介して神経突起伸長を制御する

(東北大学大学院生命科学研究科 生命機能科学専攻) ○衛藤貫・福田光則

神経突起とは神経細胞に特有に見られるケーブル状の構造で、神経細胞はこの構造を利用して周囲の神経細胞とネットワークを形成し、情報処理回路を構築している。従って、神経細胞ネットワークの構築に不可欠な神経突起を伸ばす現象（神経突起伸長）の分子機構を理解することは極めて重要な研究課題である。神経突起伸長の過程では細胞膜の表面積が大きく拡大するため、細胞体からの脂質膜の供給、すなわち小胞輸送が不可欠と考えられる（図1中央）。低分子量 G 蛋白質 Rab は小胞輸送を制御する分子スイッチとして機能し、全ての真核生物に保存されている。Rab は活性化状態（GTP 結合型）と不活性化状態（GDP 結合型）の二つの構造を取り、活性化状態の時にエフェクターと呼ばれる特異的結合因子を呼び寄せることで、小胞輸送を制御する。Rab は哺乳動物において約 60 種類存在しており、様々なタイプの小胞輸送を制御すると考えられている。しかしその種類数の多さ故に、未だ機能未知のものも多数存在し、神経突起伸長への関与も十分に検討されていなかった。そこで私は、60 種全ての Rab の中から神経突起伸長に最も重要な役割を果たす Rab の同定とその機能解析をテーマに研究に取り組んだ。これまでの網羅的なノックダウン解析で、Rab35 を欠損させた細胞で神経突起伸長が最も強く抑制されることを見出した。さらに、神経突起伸長時に Rab35 と共に働くエフェクター分子の同定とその機能解析にも着手した。その結果、Rab35 とエフェクター分子である centaurin-β2 との結合が神経突起伸長において不可欠であることが明らかになった。

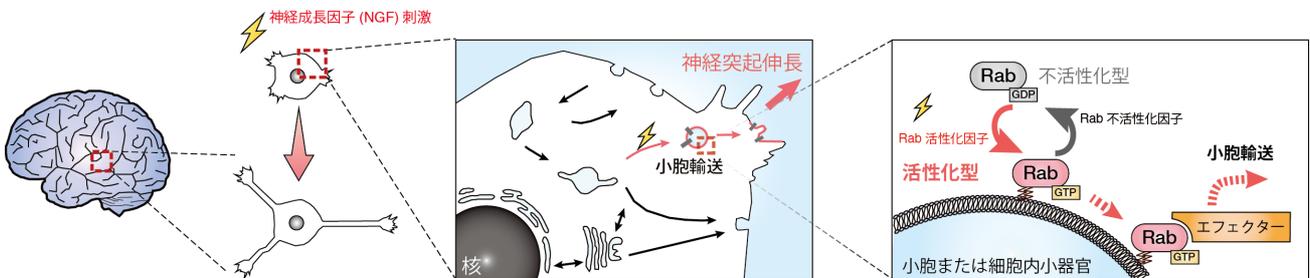


図1 神経突起伸長を制御する小胞輸送とその制御因子 Rab

### 専門用語の説明

- ・ 細胞膜：細胞の内外を隔てる生体膜（両親媒性のリン脂質二重膜）
- ・ ノックダウン：細胞内に存在する特定のタンパク質を減少させる手法。

### 参考文献

- [1] **Etoh, K.** & Fukuda, M. Structure-function analyses of the small GTPase Rab35 and its effector protein centaurin-β2/ACAP2 during neurite outgrowth of PC12 cells. *J. Biol. Chem.* 290:9064-9074 (2015)