

1B01

(Invited)

高 CO₂・気候変動下の大気－水田間の窒素交換

○林健太郎，常田岳志，長谷川利拡
(農業環境技術研究所)

背景と目的： 大気－陸面境界は窒素循環の重要なインターフェースであり，多様な化学種が多様な過程を通じて大気と陸域を行き来する．二酸化炭素濃度の増加（高 CO₂）や気候変動などの環境変動は窒素，炭素，水などの循環に影響を及ぼす．これらの影響の相互作用はさらなる攪乱をもたらし，その未知は将来予測に大きな不確実性を与える．我々の研究は，イネ生育や水田の炭素・窒素循環の環境変動応答の解明および持続可能なコメ生産に資する適用・緩和技術の開発を目的とする．本発表では，大気－水田間の窒素交換過程に絞り，研究の現状と今後の展開への期待を述べる．

対象過程と化学種： 大気－水田間の窒素交換のうち，大気から水田に入る主な過程は生物的窒素固定（BNF）と窒素沈着であり，水田から大気に発生する主な過程は脱窒（硝化も一部関与）とアンモニア揮散である（図 1，関連化学種を含む）．農耕地は反応性窒素（分子窒素 N₂を除く窒素化合物，Nr）の大気発生源として寄与が大きい¹⁾．なお，作物残渣の野焼きを行う場合にも多様なガス・粒子が発生する²⁾．

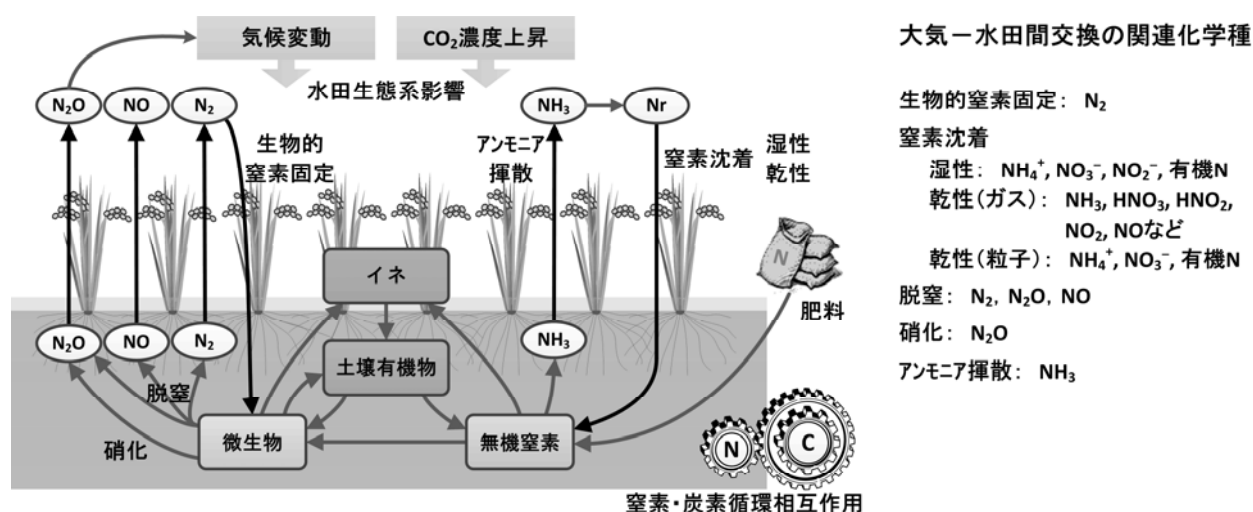


図 1 大気－水田間の主な窒素交換過程と関連化学種

開放系大気 CO₂ 増加 (FACE) 実験： 単独条件の影響メカニズム解明には室内実験が適しているものの，様々な条件が常に変化しつつ影響を及ぼし合う現実世界で起きていることの実態解明も必要である．FACE（開放系大気 CO₂ 増加）は実規模フィールドで高 CO₂ 条件を作り出す環境操作実験である．農業環境技術研究所が運用する「つくばみらい FACE 実験施設」³⁾では，水稻の単作（冬季は休閑）を行い，高 CO₂に加えて，水稻品種，窒素施肥，および温度といった条件の複合影響の解明を進めている．

大気－水田間の窒素交換研究の現状と今後の期待： 水田の BNF は大きい。イネ根を排除して現地培養した土壌の表層 0–1cm の栽培期間中の BNF は、施肥量の約 60%に相当する約 45 kg N ha⁻¹であった⁴⁾。これは正味の単生 BNF に相当し、高 CO₂ の影響は不明瞭であった。一方、イネ根はアセチレン還元能 (ARA) に影響することが示唆されており⁵⁾、高 CO₂ はイネを介して協同 BNF に影響しうる。窒素安定同位体 (¹⁵N) ラベルは BNF の定量に有用なものの、実圃場において ¹⁵N ラベルを行うのは困難である。そこで、N₂ フラックスの測定による BNF の定量に期待する。ただし、大気組成 78%を占める N₂ の存在下でそのフラックス測定を行うのは相当なチャレンジである。

窒素沈着のうち、降水を捕集すれば測れる湿性沈着は実態を把握しやすい。しかし、多くの Nr が関与する乾性沈着の測定は容易ではない。つくばみらい FACE では目的成分をフィルターに捕集して週平均濃度を測定し、濃度勾配法により乾性沈着（厳密には沈着と発生との差）フラックスを求めた。長い平均化時間がフラックス計算値に及ぼす誤差を低減するために昼夜を区分した⁶⁾。フラックスの大きさで特に重要な成分は NH₃ > NH₄ 粒子 ≒ NO₃ 粒子であった。乾性沈着を精度よく把握するには、多成分のガス・粒子の大気濃度を高時間解像度で連続測定可能な濃度計の開発が望まれる。特に乾性沈着と揮散双方のフラックスが大きい NH₃ の実態解明は窒素交換の理解を深めるだろう。

湛水して嫌気条件となる水田では脱窒が N₂ まで進みやすいとされるものの、水分条件により脱窒の中間産物あるいは硝化の副産物の N₂O が発生する⁷⁾、つくばみらい FACE では、乾燥条件で硝化由来、湿潤条件で脱窒由来の N₂O の生成が確認された⁸⁾。硝化・脱窒において大気発生に関わる物質は N₂, N₂O, NO に絞られるが、これらの生成・消費には他の Nr も含めた微生物活動が決定的に重要な役割を果たしている。植物－土壌－微生物系の N₂O 生成・消費と環境変動応答の解明が必要である。

水面（土壌面）とイネのどちらも水田から大気への NH₃ 揮散の経路となる^{9,10)}。NH₃ 揮散の主な原因は窒素肥料の施肥である。つくばみらい FACE では水面からの揮散抑制に効果のある緩効性肥料の全層施肥を行っている。また、イネは他の作物と比べて NH₃ 補償点が小さく、NH₃ 揮散を起こしにくい植物である¹¹⁾。しかし、つくばみらい FACE では栽培期間の昼間に NH₃ 揮散が起きており⁶⁾、その原因究明が課題である。

謝辞： 本研究は JSPS 科研費 22248026, 26252061 の助成を受けたものである。つくばみらい FACE は農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」により運用されている。共同研究者と研究支援者に謝意を表す。

引用文献： 1) Hayashi and Yan (2010) *Soil Sci. Plant Nutr.* 56:2-18; 2) Hayashi et al. (2014) *Atmos. Environ.* 95:36-44; 3) <http://www.niaes.affrc.go.jp/outline/face/index.html>; 4) Hayashi et al. (2014) *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 98:57-69; 5) 林ほか (2014) 日本土壌肥科学雑誌 85:268-273; 6) Hayashi et al. (2013) *Atmos. Environ.* 79:462-471; 7) Hayashi et al. (2015) *Soil Sci. Plant Nutr.* 61:2-33; 8) Yano et al. (2014) *Soil Biol. Biochem.* 70:66-78; 9) Hayashi et al. (2008) *Sci. Tot. Environ.* 390:485-494; 10) Hayashi et al. (2011) *Agric. Ecosyst. Environ.* 144:117-123; 11) Miyazawa et al. (2014) *Plant Cell Physiol.* 55:1582-1591.

Atmosphere–rice paddy nitrogen exchange under the elevated CO₂ levels and climate change

*K. Hayashi¹, T. Tokida¹, and T. Hasegawa¹ (¹Natl. Inst. Agro-Environ. Sci.)

1B02

富栄養湖沼手賀沼の表面水二酸化炭素分布と その変動要因

○葛西眞由子¹、時枝隆之¹、谷口雄哉^{1,2}、伊波はるな¹、
中山典子³、小菅瞭吾¹

(¹ 気象大学校、² 名瀬測候所、³ 東大大気海洋研)

有機物生産のための無機炭素を大気中の二酸化炭素の吸収によりまかなっているならば、その水圏は大気二酸化炭素の除去源ということになる。しかし、Cole ら(1994)は、多くの湖沼の表面水二酸化炭素は大気に対して過飽和、すなわち多くの湖沼は大気二酸化炭素の供給源として働いていることを示した。では、より生物生産性の高まった富栄養化した湖沼でも他の湖沼同様に大気に二酸化炭素を放出しているのだろうか？本講演では、日本を代表する富栄養湖沼千葉県手賀沼(4km²)において表面水二酸化炭素を通年で観測することにより、この湖沼が大気二酸化炭素の供給源なのか、あるいは除去源なのかという問いに答える。さらに、表面水二酸化炭素分圧の変動性とその変動要因について報告する。

手賀沼湖内に設けた 20 の観測点で、2013 年 4 月から 2015 年 5 月までに実施した計 15 回の観測における表面水二酸化炭素分圧は、430～14,000 μatm の間にあり(平均二酸化炭素分圧は 3,600 μatm)、観測したすべての表面水二酸化炭素分圧は大気二酸化炭素分圧(約 400 μatm)を上回っていた。すなわち、手賀沼もまた大気二酸化炭素の供給源としての強いポテンシャルを有している。手賀沼全体から大気へ放出された二酸化炭素は、2013 年と 2014 年でそれぞれ 730Mg 炭素と 540Mg 炭素と見積もられた。ここで計算された二酸化炭素放出速度(160g 炭素/m²/年)は、Raymond ら(2013)が報告した世界の湖沼からの平均放出速度(76g 炭素/m²/年)の 2 倍に相当する。

表面水二酸化炭素分圧は、岸から離れた湖中央部よりも岸寄りの観測点の方が高くなる傾向がみられた。特に河口付近や植生などにより水の滞りやすい観測点で高い二酸化炭素分圧が観測された。秋季から冬季にかけて高くなる季節性もまた観測された。観測された二酸化炭素分圧の時空間的な変動は、水温や pH の変動との関係は弱く、溶存無機炭素濃度(全炭酸濃度)の変動に大きく依存していた。

湖内の全炭酸の収支バランスから、湖内での高い生物生産のために消費される無機炭素(4,800Mg 炭素/年)は、湖水内での生物による有機物の分解(2,600Mg 炭素/年)、河川から(2,200Mg 炭素/年)、そして堆積物から(1,900Mg 炭素/年)の供給により支えられていた。

Variability in partial pressure of CO₂ in eutrophic lake, Lake Tega

*M. Kasai¹, T. Tokieda¹, Y. Taniguchi^{1,2}, H. Inami¹, N. Nakayama³ and R. Kosuge¹

(¹Meteorological College, JMA, ²Naze Weather Station, JMA, ³AORI, Univ. Tokyo)

1B03

種々の大気試料中 N_2O の isotopocule 比測定用自動前処理装置の開発

○豊田 栄¹、吉田 尚弘^{1,2}

(¹ 東工大院総理工、² 東工大地球生命研)

一酸化二窒素 (N_2O) は対流圏では CO_2 の約 220 倍の放射効率をもつ温室効果気体、成層圏では CFC の全廃後最も重要なオゾン層破壊物質として知られている。全球平均濃度は 2011 年現在で約 324 ppb (nmol mol^{-1})であり、 0.73 ppb yr^{-1} で増加している (IPCC, 2013)。 N_2O は非対称の分子構造 (NNO) をもつため、分子内の ^{15}N 分布も考慮すると種々の同位体を含む分子種 (isotopocule) が存在する。これら isotopocule の $^{14}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ に対する存在比は N_2O の起源や生成・消滅過程の進行度に応じて変動することから、全球収支や生成・消滅機構の推定に有効な指標である。

大気試料中 N_2O の isotopocule 比をガスクロマトグラフ-安定同位体比質量分析計 (GC-IRMS) で測定する際には、少なくとも 1 nmol の N_2O が必要であること、 CO_2 による質量干渉を受けやすいことなどから、低温濃縮および精製が不可欠で煩雑な操作を要する。この前処理を自動化した測定法がこれまでに数例報告されているが、試料の一部を一定流速で流しながら前処理装置に導入あるいは試料の全量を導入する方法が用いられているため、試料量が限られている場合や試料圧力が大気圧以下の場合、あるいは試料の一部のみを分析に供したい場合には測定が困難である。そこで本研究では、種々の大気試料の一部を定量的に真空ラインに導入し、 N_2O の低温濃縮、精製を行って GC-IRMS に導入する一連の前処理を自動で行う装置を開発した (図 1)。試料容器の脱着と容器バルブの開閉以外の操作は、LabVIEW™でプログラム制御された空気圧駆動の開閉バルブ、電動の切り替えバルブ、液体窒素供給装置、デューワー昇降装置等によって行われる。1 試料の分析所要時間は最短 40 分、 N_2O 4 nmol を含む大気試料 (約 300 mL) を分析した場合の $\delta^{15}\text{N}^{\text{bulk}}$ ($^{14}\text{N}^{15}\text{N}^{16}\text{O}$ および $^{15}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ の存在比の平均)、 $\delta^{18}\text{O}$ ($^{14}\text{N}^{14}\text{N}^{18}\text{O}$ の存在比)、SP ($^{14}\text{N}^{15}\text{N}^{16}\text{O}$ および $^{15}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ の存在比の差) の精度 (1σ , $n = 3$)はそれぞれ $<0.1\text{‰}$ 、 $<0.2\text{‰}$ 、 $<0.5\text{‰}$ で、これまで演者らが手動で行っていた方法と比べて改善された。

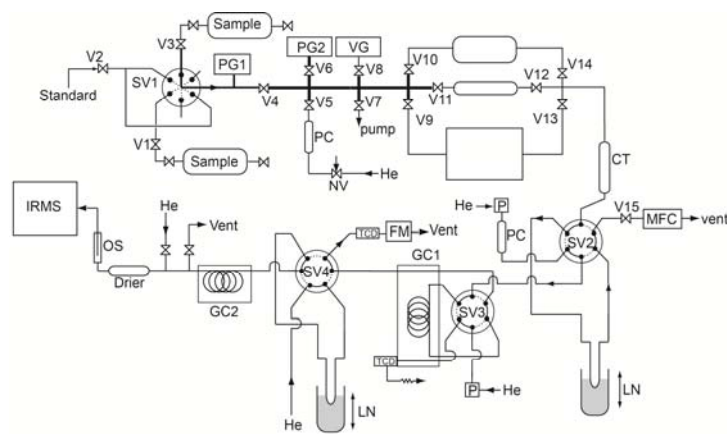


図 1. 本研究で開発した N_2O isotopocule 比測定用自動前処理装置および GC-IRMS の概略

Development of automated preparation system for isotopocule analysis of N_2O in various type of air samples

*S. Toyoda¹ and N. Yoshida^{1,2} (¹Insterdisciplinary Grad. Sch. of Sci. & Eng., Tokyo Tech., ²Earth-Life Sci. Inst., Tokyo Tech.)

1B04

さまざまな大気環境における塩素消失に関わる化学反応の推定

○坂田昂平¹、坂口綾²、為則雄祐³、高橋嘉夫⁴

(¹広島大院・理、²筑波大・数理、³JASRI、⁴東京大院・理)

【はじめに】海塩粒子と微量気体との反応は大気中にハロゲン化合物を放出し、極域の対流圏オゾン(O₃)の消失反応をはじめとする、さまざまな反応の引き金となる (Finlayson-Pitts, 2003; Faxon and Allen, 2013)。海塩粒子と硝酸や硫酸の反応により生成する塩酸や臭化水素酸は O₃ 消失にあまり寄与しないが、一方でヒドロキシルラジカル(OH・)や五酸化二窒素(N₂O₅)などとの反応により生成する反応性ハロゲンは O₃ 消失に寄与する (Simpson et al., 2015)。しかし、異なる大気条件において、どの反応が卓越するのか、という点に関しては不明瞭な部分がある (秋元、2014)。そこで、本研究ではさまざまな大気条件で採取したエアロゾルに対して、塩素の消失量とナトリウム (Na) 化学種を同定し、ハロゲン化合物の主な放出源である反応の推定を試みた。

【試料採取・分析手法】都市大気は東広島市において粒径を 7 分画して採取した (2012 年 9 月-2014 年 2 月)。海洋大気は白鳳丸研究航海 (GEOTRACES、KH-12-4: 北太平洋、KH-14-6: 南半球の西部太平洋、南極海) にて採取した。主要イオン濃度は、イオンクロマトグラフィー法で、Na 化学種は X 線吸収微細構造 (XAFS) 法を用いて決定した。

【結果・考察】東広島市において、XAFS 法で決定した粗大粒子中の硝酸 Na 濃度は、Cl/Na 比から算出した塩素消失量とほぼ等しかった。このことから塩素消失は硝酸や N₂O₅ との反応により生じていると考えられる。北太平洋上のエアロゾルでは、塩素消失の全てを硝酸と硫酸との反応で説明することができず、エアロゾルに硝酸塩や硫酸塩を付加しない OH・や O₃ との反応も生じていると考えられる。この海域における、塩酸と反応性塩素の放出割合は平均すると 4:6 程度であった。また、南半球における西部太平洋や南極海においては、主要イオン濃度、XAFS 解析ともに、海塩粒子と硝酸、硫酸、有機酸との反応の痕跡は無かった。しかし、エアロゾル中の Cl/Na 比は海水より 10%程度低いことから、OH・や O₃ との反応が生じていると考えられる。

これら地域の反応過程の違いを比較した結果、人為起源の影響が大きいほど (東広島 > 北太平洋 > 南半球)、塩素消失の全体に対する OH・や O₃ との反応の寄与が小さくなる傾向が見られた。今後、より詳細に主要な反応を決めることで、海塩粒子から放出されるハロゲン化学種や、その量比を明らかにできると期待される。

Estimation of the dominant reaction for chlorine depletion under various atmospheric conditions
*K. Sakata¹, A. Sakaguchi², Y. Tamenori³, Y. Takahashi⁴ (Graduate School of Science, Hiroshima Univ., ²Graduate School of Pure and Applied Sciences, Univ. of Tsukuba, ³JASRI, ⁴Graduate School of Science, the Univ. of Tokyo)

エアロゾル中の人為起源鉄の著しく低い安定同位体比に基づく海洋表層への人為起源鉄の寄与の評価

○栗栖美菜子¹、宮原彩²、山川庸芝明¹、宮本千尋¹、坂田昂平²、飯塚毅¹、植松光夫³、高橋嘉夫¹

(¹東京大・院理、²広島大・院理、³東京大・大気海洋研)

高栄養塩・低クロロフィル(HNLC)海域における生物一次生産の制限要因として溶存鉄の不足が挙げられる(例えば、Martin and Fitzwater, 1988)。その中で、海洋への鉄供給源の1つとして重要視されているのがエアロゾルであり、特に人為起源エアロゾル中の鉄(Fe)は自然起源の鉄と比べて水への溶解度が高いとして注目されている(Takahashi et al., 2013)。人為起源鉄について、鉄安定同位体比($\delta^{56}\text{Fe}(\text{‰}) = 1000 \times [({}^{56}\text{Fe}/{}^{54}\text{Fe})_{\text{試料}} / ({}^{56}\text{Fe}/{}^{54}\text{Fe})_{\text{STD}} - 1]$)の観点からなされた研究は少ないが、地球表層での鉄循環を調べる上で重要である。Mead et al. (2013)は人為起源エアロゾル(微細粒子)中の鉄が自然起源(粗大粒子)中の鉄よりも低い $\delta^{56}\text{Fe}$ を持つことを示唆しているが、2つの起源の $\delta^{56}\text{Fe}$ の差が測定誤差の範囲内にあり、エアロゾル中の鉄を起源ごとに明確に区別できていない。そこで本研究では粒径を7分画して採取したエアロゾルに対して、 $\delta^{56}\text{Fe}$ と化学種(起源や溶解性と関連)の2つの視点から分析を行い、自然起源と人為起源の鉄の化学種や $\delta^{56}\text{Fe}$ の差を明確にし、さらに海洋表層への影響評価を行うことを目的とした。

鉄化学種はX線吸収微細構造(XAFS)解析を行い決定した。粒径分画エアロゾルの鉄安定同位体比は、陰イオン交換樹脂で鉄を単離した後、多重検出器型誘導結合プラズマ質量分析計(MC-ICP-MS, Neptune Plus)で測定した。

XAFS解析の結果から、粗大粒子側ほどケイ酸塩鉱物であるbiotiteの割合が増え、微小粒子側ほど酸化鉄であるhematiteの割合が増える傾向が見られた。これは微小粒子側の鉄が燃焼過程由来であることを示唆している。また、鉄安定同位体比の分析を行った結果、全分解試料は、粗大粒子側では地殻物質に近い $\delta^{56}\text{Fe}$ 値(+0.20‰前後)を示したが、微小粒子側では-0.5~-2‰程度と、Mead et al. (2013)による人為起源鉄の報告値よりも低い値を示した。夏の微小粒子側を模擬雨水で抽出し、鉄の安定同位体比を測定した結果、環境試料の報告値の中で最も低い-3.9‰を示した。また、この値は燃焼過程での速度論的同位体効果により低くなることが示唆された。多段の粒径分画により自然起源エアロゾルの影響を少なくし、より純粋な人為起源鉄の安定同位体比を決定できた。

本研究で、正確な人為起源鉄の $\delta^{56}\text{Fe}$ 値を得たことは、HNLC海域などの海洋に供給される様々な起源の鉄の寄与を推定する上で重要である。例えば、Conway and John (2014)では、北部大西洋中の溶存鉄の起源を推定しているが、本研究で得た人為起源エアロゾル中の鉄の安定同位体比を考慮した場合、その鉄の起源推定の結果は修正を要する可能性がある。エアロゾルも含めたHNLC海域の鉄の収支には、人為起源エアロゾルの $\delta^{56}\text{Fe}$ 値を用いた考察が今後重要になると期待される。

Remarkably Low Isotopic Ratio of Iron in Anthropogenic Aerosols and Evaluation of its Contribution to the Surface Ocean

*Minako Kurisu,¹ Aya Miyahara,² Yoshiaki Yamakawa,¹ Chihiro Miyamoto,¹ Kohei Sakata,² Tsuyoshi Iizuka,¹ Mitsuo Uematsu,¹ Yoshio Takahashi¹ (¹Graduate School of Science, Univ. of Tokyo, ²Graduate School of Science, Hiroshima Univ., ³Atomosphere and Ocean Research Institute, Univ. of Tokyo)

○岩本洋子^{1,2}・持田陸宏¹・Sandric C. Y. Leong^{3,4}・石坂丞二⁴(¹ 名大院環境、² 東京理科大学理学部第一部、³ National University of Singapore、⁴ 名大水循環セ)

近年、海洋大気中の雲凝結核として、海面に生じた泡の破裂（飛沫）から生成するエアロゾル（Primary Marine Aerosol; PMA）が注目されている。海洋表層には生物活動によって生成される有機物が存在するため、PMA の化学組成は元の海水とは異なり、特に直径 1 μm 以下の微小な粒径範囲で有機物に富むことが報告されている。有機物はエアロゾル粒子の成長・蒸発過程に影響を与え、PMA の雲凝結核能を変化させるため、その化学的特徴を明らかにすることは重要である。本研究では、植物プランクトンを培養した海水を用いたエアロゾル生成実験を行い、質量分析計を用いて有機エアロゾルの質量スペクトルを取得した。

粒子生成実験には、プリムネシオ藻 *Isochrysis galbana* を f/2 培地でバッチ培養した海水を用いた。円筒形のガラス製ボトルに海水 6 L を入れ、ボトル内に設置したガラスボールフィルタに乾燥空気を吹き込んで気泡を発生させた。水面の飛沫によって生成した粒子を拡散ドライヤに通して除湿し、サブミクロン領域の粒子に含まれる有機物の質量濃度と質量スペクトルを時間飛行分離型エアロゾル質量分析計（High Resolution Time of Flight Aerosol Mass spectrometry; HR-ToF-AMS）により計測した。また、生成したエアロゾルの総質量濃度は、同時に計測した個数粒径分布より見積もった。

生成したエアロゾルに含まれる有機物の質量割合は、プランクトン量の増加と共に増加し、植物プランクトン起源の有機物が PMA の化学組成に寄与することを確認できた。有機物の質量割合は 0.4%～25% と見積もられ、先行研究と比較すると小さい値であった。有機エアロゾルの質量スペクトルの解析から、全有機物に占める炭化水素系有機物の割合は 38% と見積もられ、実大気で観測される有機エアロゾルと比較して、酸化の進んでいない有機物の寄与が大きいことがわかった。また、炭化水素系有機物のうち、特に質量電荷比 (m/z) = 27, 41, 55 のスペクトル強度が大きいことがわかった。これらはアルケンやシクロアルケンを含む $\text{C}_n\text{H}_{2n-1}$ グループの有機物に特徴的なスペクトルである。発表では、植物プランクトン量を変化させたときに見られる質量スペクトルの違いについても紹介する。

Chemical characteristics of primary marine aerosols II –mass spectral analysis of organics

*Y. Iwamoto^{1,2}, M. Mochida¹, S. C. Leong^{3,4}, J. Ishizaka⁴ (¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ²Faculty of Science Division I, Tokyo University of Science, ³National University of Singapore, ⁴HyARC, Nagoya University)

1B07

富士北麓カラマツ林内におけるテルペン類由来 シュウ酸エアロゾルの生成

○望月智貴¹、宮崎雄三¹、河村公隆¹、小野かおり¹、和田龍一²、
高橋善幸³、三枝信子³、谷晃⁴

(¹北大低温研、²帝京科学大、³国環研、⁴静岡県大)

【はじめに】 有機エアロゾルの主要な成分の一つであるシュウ酸の生成経路として、植生から放出されるテルペン類の大気中でオゾンや OH ラジカルとの反応がある。シュウ酸は水に溶けやすく大気中の水分を容易にとりこむため高い凝結核活性を持ち、雲の形成や降水など地球レベルでの放射収支や水循環に影響すると考えられる。本研究は、森林植生から放出されたテルペン類由来のシュウ酸エアロゾルを生成する支配要因を明らかにすることを目的とした。

【方法】 2012 年 7 月に富士北麓カラマツ林の樹冠直下でテルペン類濃度、シュウ酸濃度、O₃ 濃度、イソプレンと α -ピネン由来の二次有機エアロゾル (SOA) トレーサー濃度を同時に測定した。テルペン類はミニポンプで採取管に採取し、加熱脱着装置付き GC-MS で分析した。大気エアロゾルはハイボリュームサンプラーを用いて石英フィルターに捕集した。シュウ酸はフィルターの一部を Milli-Q 水で抽出後、濃縮・誘導体化後に GC-FID で分析した。イソプレンと α -ピネン由来 SOA トレーサーはジクロロメタン/メタノール(2:1)溶液で抽出後、トリメチルシリル化し、GC-MS で分析した。O₃ 濃度は O₃ 測定器で連続測定した。エアロゾル中の無機イオン (硫酸イオン) をイオンクロマトグラフで測定した。

【結果および考察】

テルペン類の中で、イソプレンは 23% (林床のオンダから放出)、 α -ピネンが 44% (カラマツの葉と林床から放出) を占めた。イソプレン濃度、シュウ酸濃度、イソプレン SOA トレーサー (2-メチルテトラオール: 2-MTLs) 濃度、 α -ピネン SOA トレーサー (3-メチルブタントリカルボン酸: 3-MBTCA) 濃度は日中に高くなり、 α -ピネン濃度は朝夕に高くなる明瞭な日変動を示した (図 1)。シュウ酸濃度は O₃ 濃度、イソプレンと α -ピネン SOA トレーサー濃度と有意な正相関があった ($r^2 > 0.56$)。これらの結果より、テルペン類からシュウ酸の生成はサンプリング時間 (3 時間) 内で速やかに進行していることが観測より示唆された。さらに、シュウ酸濃度は硫酸イオン濃度と有意な正の相関があり ($r^2 = 0.50$)、テルペン類の酸化によるシュウ酸生成過程においてエアロゾル酸性度の関与が示唆された。

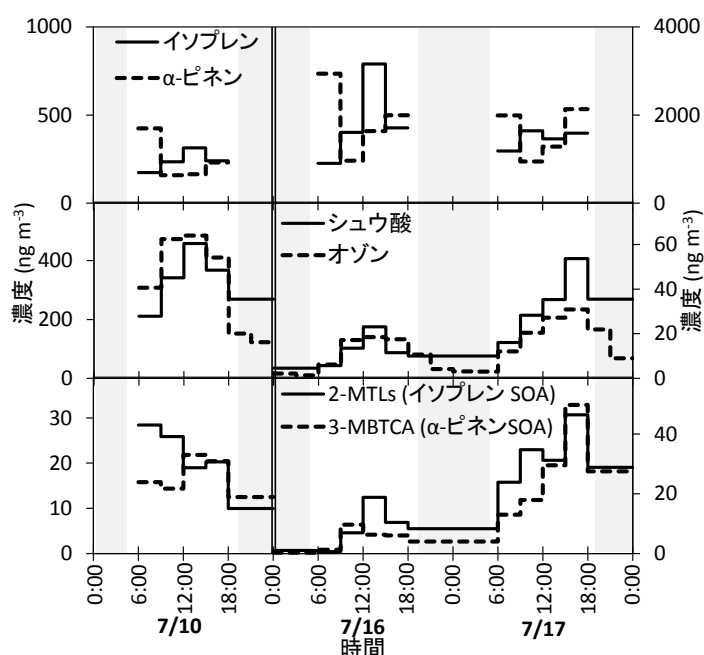


図 1. テルペン類、シュウ酸、オゾン、イソプレンと α -ピネン SOA 濃度の日変化。灰色は夜間を示す。

Formation of oxalic acid from biogenic volatile organic compounds in a *Larix kaempferi* forest

*T. Mochizuki¹, Y. Miyazaki¹, K. Kawamura¹, K. Ono¹, R. Wada², Y. Takahashi³, N. Saigusa³ and A. Tani²
(¹ILTS Hokkaido University, ²Teikyo Univ. Sci., ³NIES, ⁴Univ. Shizuoka)

1B08

冷温帯林における窒素付加による植生起源二次有機エアロゾル生成への影響

○宮崎雄三¹、川上裕美¹、竹内友美¹、河村公隆¹、中路達郎²、日浦勉²

(¹北海道大学低温科学研究所、²北海道大学北方生物圏フィールド科学センター)

大気から森林生態系への反応性の高い窒素の沈着は土壌-植物システムにおける窒素循環の変化を介して、森林植生からの大気エアロゾル生成量を変化させることが予想される。本研究では、窒素制限下にある落葉広葉樹林において群落レベルで人工的に窒素を散布し、数か月・年スケールでの植生起源二次有機エアロゾル (Secondary Organic Aerosol: SOA) 質量生成への影響を評価することを目的とした。観測実験は北海道大学苫小牧演習林のフラックスタワーにおいて、2012年4月から粒径別エアロゾル試料の採取を約1週間毎に継続して行っている。2013年の春・夏、及び2014年の春に単年当たり 100 kgN ha^{-1} の窒素 (尿素) をフラックスタワー周囲約9 ha に人工散布し、窒素施肥後の植生起源 SOA 質量への影響を施肥後の1年目と2年目において評価した。施肥効果以外の影響を除外して解析するため、施肥区から約5 km 離れた施肥を行っていない区域 (対照区) においても、エアロゾル試料の連続採取を施肥区と同様に行った。植生起源 SOA 生成に対する窒素施肥の影響としてエアロゾル中のイソプレン酸化生成物と α -ピネン酸化生成物を GC/MS で分析し、質量濃度比の変化を評価した。

イソプレン酸化生成物である2-メチルテトラールは3年間において、気温と光強度に依存するイソプレン放出量を反映し、夏季 (7-8月) に濃度極大を示す明瞭な季節変化を示した。窒素施肥の前後で2-メチルテトラールの質量濃度比は有意な変化は見られず、イソプレン由来の SOA 生成への影響は小さいことが示唆された。一方、 α -ピネンの初期酸化生成物であるピン酸は春と落葉期の秋季 (10月) に質量濃度増加を示す季節変化を示した。窒素施肥の前後で施肥区でのピン酸質量比は秋季に有意な増加を示し (~30%)、この増加は林床付近の α -ピネンの放出増加に起因することが示唆された。窒素施肥によって影響を受けた α -ピネンの放出源としてキャノピー内の根/落葉/土壌が示唆されたが、SOA 生成への影響の観点から窒素付加による土壌内窒素成分等の変化との対応についても議論する。

Impact of nitrogen fertilization on the formation of biogenic secondary organic aerosol in a cool-temperate forest

*Y. Miyazaki¹, H. Kawakami¹, T. Takeuchi¹, K. Kawamura¹, T. Nakaji², and T. Hiura² (¹Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ., ²Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido Univ.)

1B09

箱根山大涌谷火山ガスに含まれる水蒸気および水素ガスの同位体比変動

○大場武¹, 谷口無我¹, 高木健太¹, 左合正和¹, 池谷康祐², 角皆潤²

(¹東海大学理学部化学科, ²名古屋大学大学院環境学研究科)

2014 年に多数の犠牲者を出した御嶽山の噴火は、地震観測と地殻変動観測だけでは水蒸気噴火・爆発の予知が難しいことを我々に改めて認識させた。水蒸気噴火・爆発の駆動力は熱水リザーバの爆発であり、熱水リザーバから放出される揮発性成分の一部は、火山ガスの成分を構成する。よって火山ガスは、水蒸気噴火・爆発の予知および経過予測をする上で本質的に重要な研究対象と言える。

箱根山では 2015 年 4 月下旬から群発地震が頻発し、神奈川県温泉地学研究所の観測によると、5 月 15 日には一日あたり 500 回に達する地震が観測された。その後、活動はやや低下し、6 月は地震の回数も 50 回程度に低下した（6 月 20 日の 210 回を除く）。しかし、6 月 29 日に火山性地震が再び頻発し、気象庁の観測によると火山性微動も観測された。翌 30 日には大涌谷に新しい火口が出現し、噴煙には泥が混ざっていたので気象庁は小規模な水蒸気噴火が発生したと発表した。

著者らは、2013 年 5 月からほぼ毎月、大涌谷の二地点「定点」と「新噴気」で火山ガスを採取し、化学組成および安定同位体比の変動を調べてきた。定点で採取した噴気に含まれる水蒸気の δD は 2014 年 11 月から 2015 年 1 月まで、-51‰付近で安定していたが、同年 2 月から低下し始め、同年 4 月 24 日には-67‰に下落した。この二日後に群発地震が発生し始め、 δD は 5 月 8 日に-56‰、6 月 2 日には-52‰まで回復した。水蒸気同位体比の時間変化は、シーリングによりマグマ性水蒸気が一時的にマグマの近傍で蓄積し、2015 年 4 月下旬に急激に解放された可能性を示唆している。一方、定点の噴気に含まれる H_2 ガスの δD は、2013 年 7 月から 2014 年 9 月まで(Period-1)、-627~-615‰と比較的狭い範囲に限定されていたが、2014 年 10 月から 12 月の期間 (Period-2)、-675~-654‰の範囲に急激に低下した。2015 年 1 月には-625‰まで回復し、2015 年 2 月以降 (Period-3) は、-607‰以上の高い値を維持している。Period-1, -2, -3 の H_2 ガス同位体比と水蒸気の同位体比を組み合わせる計算される同位体交換反応平衡温度の範囲はそれぞれ、99~109℃、63~78℃、115~144℃であった。群発地震発生約 2 ヶ月前から熱水系の温度が上昇していた可能性がある。Period-2 において噴気の出口温度は水の沸点に近いので、80℃以下の見かけ平衡温度は水蒸気との同位体交換平衡のみでは説明がつかない。例えば、 SO_2 との反応、 $SO_2 + 3H_2 \rightarrow H_2S + 2H_2O$ が非平衡的に起き、 δD の高い H_2 ガスが H_2S や H_2O に取り込まれ、残された H_2 ガスの同位体比が異常に低下したのかも知れない。

Variable isotopic composition of water vapor and H_2 in the fumarolic gases at Owakudani geothermal area on Hakone volcano, Japan

*T. Ohba¹, M. Yaguchi¹, K. Takagi¹, M. Sago¹, K. Ikeya², U. Tsunogai² (¹Dep.Chem.School Sci. Tokai Univ., ²Grad. School Environ. Studies Nagoya Univ.)

1B10

噴煙の安定同位体組成を利用した 桜島火山の遠隔噴気温度測定

○角皆 潤¹、程 林¹、池谷康祐¹、小松大祐¹、中川書子¹、
篠原宏志²

(¹名大院環境学、²産総研)

〈はじめに〉 火山の噴気温度の絶対値やその時間変化は、火山活動に関する重要な指標となる。しかし、活火山の噴気孔における直接測定は危険を伴う上に、実現が難しいことが多い。また赤外放射を利用した遠隔測定は、観測距離が 100 m を超えると著しく確度が低下し、また火山灰で視界が遮られると測定不能になる。そこで筆者らは、噴気ガス中に多量に含まれている水素分子 (H_2) と主成分である水蒸気 (H_2O) の間の水素同位体 (^1H および D) 交換反応の平衡同位体分別係数が温度の関数となることに着目し、噴煙 (プルーム) 中の H_2 の $\text{D}/^1\text{H}$ 比から噴気中の H_2 の $\text{D}/^1\text{H}$ 比を推定し、これを温度に換算する遠隔温度測定法 (HIRETS 法) を考案した (Fig. 1; Tsunogai et al., 2011)。これまで、樽前山 (HIRETS 温度 = 590 °C) や阿蘇中岳 (同 900 °C 前後)、薩摩硫黄 (同 810 °C) と言った、噴気孔から 100 m 前後の距離までアクセス可能な活火山で、噴気温度の遠隔測定を実現してきた。しかし、桜島のように火口から半径 2 km 以内に立ち入ることの出来ない火山でプルーム試料を採取するには、大気中を飛行して試料を採取する必要がある。そこで本研究では、セスナ機を用いて桜島のプルーム試料の採取を行い、HIRETS 法を利用した噴気温度遠隔測定に挑戦した。

〈試料採取〉 2014 年度内に計 3 回の試料採取を実施した。火口から風下側に 3 km 前後離れた場所で、高度 800 m から 1900 m 付近に流れて来るプルームの断面を横切るようなフライトを繰り返した。フライト中は、不活性チューブ経由で機外の大気をキャビン内に取り込んだ。そして SO_2 濃度が極大を示す時を狙って流路の途中に取り付けたガラス製真空容器を開放し、試料を採取した。

〈結果・考察〉 プルーム試料中の H_2 の δD 値から求めた噴気 H_2 の δD 値は、2014 年 9 月の場合で $-135 \pm 13 \text{ ‰}$ (vs. VSMOW) となった。これは噴気温度に換算すると $1050 \pm 120 \text{ °C}$ に相当し、桜島の火山岩の融点か、それをも上回る可能性のある高温であった。桜島では、マグマが噴火口のごく近傍まで上昇して来ている可能性が高い。

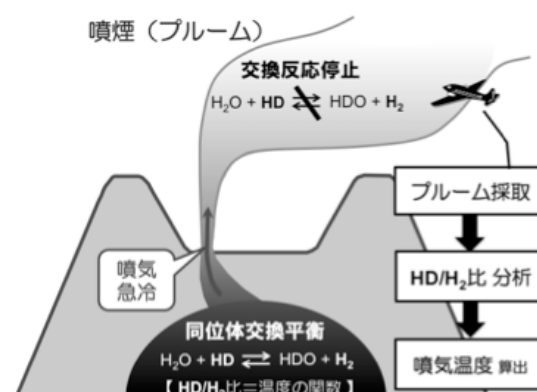


Fig.1 HIRETS 法の噴気温度測定原理。

Remote determinations on the temperatures of fumaroles: Sakurajima volcano, Japan

*U. Tsunogai¹, L. Cheng¹, K. Ikeya¹, D.D. Komatsu¹, F. Nakagawa¹, and H. Shinohara²
(¹Nagoya Univ., ²AIST)

1B11

マントル捕獲岩のハロゲン組成にみられる マントルメタソマティズムの影響

○小林真大¹、角野浩史¹、長尾敬介¹、Ray Burgess²、石丸聡子³、
荒井章司⁴、芳川雅子⁵、川本竜彦⁵、熊谷仁孝⁵、小林哲夫⁶、
中村美千彦⁷、高橋栄一⁸

(¹東京大、²マンチェスター大、³熊本大、⁴金沢大、⁵京都大、
⁶鹿児島大、⁷東北大、⁸東京工業大)

ハロゲンはマントルへと沈み込んだ水のよいトレーサーになると期待されている。また、ハロゲンは large-ion lithophile 元素の輸送に大きく関与していることが実験的に示唆されている[1]。これらのような性質から、ハロゲンはスラブ起源流体の中でもっとも重要な元素の1つである。スラブの直上で水に富む流体を捕獲したマントルウェッジかんらん岩のハロゲンの組成は、Iに富んだ海底堆積物中の間隙水によく似ていることが報告されている[2]。本研究では、スラブ起源流体による影響がマントルのどこまで及んでいるかを明らかにするため、マントルへ供給されたスラブ起源流体が持つ情報を最もよく保存していると期待されるマントル捕獲岩のハロゲン組成を調べた。

マントル捕獲岩は、アジア東縁の沈み込み帯で産出した試料(カムチャツカ半島・アバチャ、フィリピン・ピナツボ、東北日本・一ノ目湯)とプレート内の火山活動で産出した試料(中央ヨーロッパ・アイフェル、北アメリカ・サン・カルロス及びキルボーン・ホール)を用いた。また、捕獲岩ではないが北海道・幌満かんらん岩体のかんらん岩も用いた。マントル物質中のハロゲンは極微量で通常の実験が困難であるため、原子炉で試料に中性子を照射してハロゲンを特定の希ガス同位体へと変換し、高感度希ガス同位体分析を行うことにより定量した[3]。

火山フロントと幌満では、海底堆積物中の間隙水によく似た高い I/Cl 比と比較的一定な Br/Cl 比を示し、間隙水の沈み込みの影響が火山フロント直下に強く及んでいることが示唆された。背弧側では、ハロゲン濃度は低いが、間隙水的な組成が一部みられ、これはその沈み込みの影響が背弧側にも及んでいることを示唆する。プレート内では I/Cl、Br/Cl 比が、MORB から推定されているマントルの組成を端成分とする共通の相関関係を示し、沈み込み帯とは関与した流体の起源や機構が異なるメタソマティズムによりマントル的な組成から元素分別したと考えられる。

[1] Kawamoto et al. (2014) EPS. [2] Sumino et al. (2010) EPSL. [3] e.g. Johnson et al. (2000) GCA.

Mantle metasomatism inferred from halogen systematics of mantle xenoliths

*M. Kobayashi¹, H. Sumino¹, K. Nagao¹, R. Burgess², S. Ishimaru³, S. Arai⁴, M. Yoshikawa⁵,
T. Kawamoto⁵, Y. Kumagai⁵, T. Kobayashi⁶, M. Nakamura⁷ and E. Takahashi⁸ (¹Univ. Tokyo,
²Univ. Manchester, ³Kumamoto Univ., ⁴Kanazawa Univ., ⁵Kyoto Univ., ⁶Kagoshima Univ.,
⁷Tohoku Univ., ⁸Tokyo Tech.)

1B12

ドロマイト質石灰岩中のカルサイト部分とドロマイト部分の微量元素含有量の検討

○外山浩太郎、寺門靖高

(神戸大学 人間発達環境学研究科)

【はじめに】 石灰岩は、主にカルサイト(CaCO_3)から構成されているが、一部、ドロマイト($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)を含むものが存在している。多くの場合、ドロマイトは、もともと存在していたカルサイトからドロマイト化作用により二次的に形成され则认为られているが、ドロマイト化のメカニズムについては不明な点が多い。そこで、本研究では、ドロマイト質石灰岩中のカルサイト部分とドロマイト部分の微量元素に関するデータを別々に求めて、ドロマイト化のメカニズムを検討した。

【実験方法】 粉末状にしたドロマイト質石灰岩を 0.5 M 酢酸を用いて、短時間(1~5 分)処理し、カルサイト部分を溶解し、その残渣を 0.5 M 酢酸(あるいは塩酸)の長時間(5~24 時間)の処理によりドロマイト部分を溶解した。溶解したカルサイトとドロマイト量は、溶液中の Ca と Mg 濃度や液量などから算出し、カルサイト部分とドロマイト部分の微量元素含有量を計算した。

【結果・考察】 Ba、Sr は、ドロマイト部分よりもカルサイト部分で高い濃度を示し、Mn、Fe、Zn 濃度は、ドロマイト部分で高くなる傾向を示す。また、P 濃度は、塩酸溶解したサンプルのみ高い値を示し、酢酸溶解したものは検出限界以下であった。

Sr や Ba は、イオン半径が Ca よりも大きく、イオン半径の小さい Mg よりも Ca と置換しやすく、カルサイト中に多く含まれるとされる。一方、Mn、Fe や Zn は、イオン半径が Mg と似ているため、ドロマイト中に、多く置換していると考えられる。P については、塩酸に溶解し、酢酸に溶解しないアパタイトがサンプルに含まれていた可能性が考えられる。

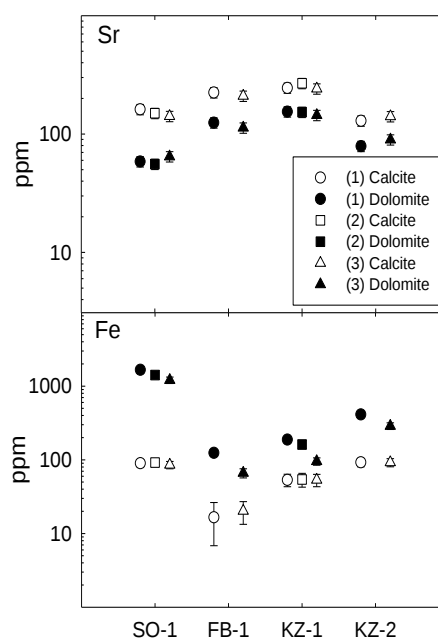


図1 石灰岩中のカルサイトとドロマイトの Sr と Fe 濃度

(SO-1、FB-1、KZ-1、KZ-2 は、サンプル名)

Trace elements in the calcite and dolomite fractions for the dolomitic limestones.

*K. Toyama, Y. Terakado (Graduate School of Human Development and Environment, Kobe Univ.)

○板野敬太¹、飯塚毅¹、
(¹ 東京大学 地球惑星科学専攻)

希土類元素のリン酸塩鉱物であるモナザイトは、Th, U も含み、U-Th-Pb 系の閉止温度は 800℃ 超えることが実験・天然試料から分かっており (e.g., Cherniak et al., 2004; McFarlen and Harrison, 2006), 地質年代系として火成岩や変成岩において幅広く用いられている。また、モナザイトの特徴として、鉛の拡散速度は非常に遅いにも関わらず、低変成度の変成条件でも年代のリセットが起きることが指摘されている。これらは、流体存在下での溶解・析出 (Kelly et al., 2012) や、応力下での結晶の塑性変形による再結晶化 (Erikson et al., 2015) の年代を新たに記録していることが明らかになってきた。したがって、得られる年代がどのようなイベントの年代であるかという解釈は重要であり、岩石・鉱物組織とともに元素組成などから制約を与えることが必要となってくる。

近年、LA-ICP-MS の普及に伴い、濃度の低い重希土類元素を含めた希土類元素全て測定したデータが報告され始めている。変成岩中の斑状変晶包有物や石基内のモナザイトの微量元素組成変化と形成過程については考察されているが、温度圧力履歴・バルク組成の異なる岩石に含まれる様々な起源のモナザイトとその微量元素組成の関係性については未だ明らかになっていない。

そこで、本研究ではモナザイト微量元素組成と形成環境の関係性を明らかにすることを目的とし、形成環境が十分理解されている変成岩中のモナザイトや、様々な起源を含む川砂中の碎屑性モナザイトの微量元素組成を比較する。特に、重希土類元素の枯渇度・Eu の負異常・Th/U 比に着目すると、モナザイトは複雑な内部構造をもつことが知られているのと同様に、同じ温度圧力履歴を経験した一つの岩石中に含まれるモナザイトでも、周囲の組織や内部構造内で組成のバリエーションをもつことが確認された。しかしながら、その値の不均質性を超えて、鉱物組み合わせとその量比が異なる岩石中のモナザイトは異なる微量元素組成分布を示す。このことから、モナザイト成長時に共存する鉱物の成長・崩壊が微量元素組成を支配し、各微量元素を選択的に取り込む鉱物 (長石・石榴石・ジルコン) の存在量がモナザイト微量元素組成に影響していることが示唆された。したがって、モナザイト微量元素組成はどのような鉱物と共成長し、それら鉱物の量比はどうであったかという形成環境を制約する指標となり得る。

Trace element constraints on monazite formation conditions

*K. Itano¹, T. Iizuka¹ (¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo.)

1B14

後期更新世ジルコンのウラントリウム-鉛年代測定法の開発と評価

○坂田周平¹、岩野英樹²、檀原徹²、平田岳史¹

(¹京都大学大学院理学研究科、²京都フィッション・トラック)

火成岩中に普遍的に含まれるジルコンとウラン系列を用いた放射年代測定法を組み合わせた研究テーマの一つとして、比較的高い閉鎖温度(900°C、1Maの条件で10nm程度の拡散; Cherniak and Watson, 2001, *Chem. Geol.*, 172, 5-24)を利用した高温におけるマグマプロセスの年代学的研究が挙げられる(Schmitt, 2011, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 39, 321-349)。一方で、地表で見られる最大のマグマ活動である火山噴火は $10^0 \sim 10^5$ 年のスケールで発生するため、火山噴火とマグマ中における鉱物晶出の関連性を放射年代学的に調べるためには、少なくとも数万年程度の時間分解能が必要となる。この高時間分解能を達成するため伝統的にはウラン系列非平衡年代測定法が盛んに用いられてきた(例えば Bacon and Lowenstern, 2005, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233, 277-293)が、非平衡年代測定法は適用可能な年代に限界があり(<0.4 Ma)、適用年代範囲が広いウラントリウム-鉛(U-Th-Pb)法をより若いジルコン試料(<0.4 Ma)に適用する手法が注目され始めている(Simon et al., 2008, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 266, 182-194)。しかしながら、ジルコン U-Th-Pb 法において数万年の精度および確度を達成するためには、ジルコン晶出時の初生放射非平衡の影響を正確に補正することが必須であり(Ludwig, *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 5, 663-667, 1977; Wendt and Carl, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 73, 278-284, 1981)、演者らは非平衡補正を化学組成分析と放射性同位体分析の二つのアプローチから比較・検討し、信頼性の高い年代決定手法を導入した。

新しく開発した年代測定法の評価のため、本研究では島根県三瓶火山の噴出物のうち、放射性炭素年代測定法・カリウム-アルゴン法・フィッション・トラック法等によって噴出年代のわかった三瓶木次(SK: 約10万年)・三瓶大田(SOd: 約6万年)・三瓶池田(SI: 約4万年)の三つのテフラより分離したジルコン粒子に対してレーザーアブレーションICP質量分析法を用いてU-Th-Pb年代測定を行った。その結果、粒子年代値は同一試料の中でも数万年程度の変動を示し、その中で最も若い年代値と噴出年代が一致した。すなわち得られた年代値がジルコン結晶の晶出タイミングを記録していると解釈され、テフラ中のジルコンからマグマ活動の時間変化が見えてきたことを意味する。

将来の研究展開としては、ジルコン粒子の大量分析から得られる年代スペクトルと化学組成情報を組み合わせることで、高温領域(<900°C)におけるマグマの物理化学的・時間的な進化を定量的に評価することが可能になると期待される。

Development and evaluation of uranium-thorium-lead dating method for late Pleistocene zircon

*S. Sakata¹, H. Iwano², T. Danhara², T. Hirata¹ (¹Kyoto Univ., ²Kyoto Fission-Track Co. Ltd.)

ジルコンは, U-Th-Pb 系列を用いた年代分析で幅広く応用されている鉱物である. その特徴として, U-Pb 法の閉鎖温度が 900°C 以上¹⁾と高く, 壊変系列の閉鎖系が保持されやすく, 正確な年代情報を提供すると考えられている点が挙げられる. もう一つの特徴が, ^{238}U - ^{206}Pb と ^{235}U - ^{207}Pb の二つの独立した壊変系列により, 閉鎖系の検証が可能な点である²⁾. 近年, 閉鎖系が保たれず, しかも通常の鉛が損失する場合とは異なり鉛が濃集する現象が報告されており, このような現象はリバーズディスコーディアと呼ばれている³⁾. Kusiak らは SIMS によるイメージング結果より, μm スケールで鉛の不均質な分布が観察されることを報告している⁴⁾. 一方で, そのような μm スケールの不均質な分布はないとする先行研究も存在する⁵⁾. リムからコアに至るジルコン全面において Pb, U の分布を測定し, 結晶内部の閉鎖系が成立しているかを調べることが, リバーズディスコーディアの研究において重要である. しかし, 数 μm の空間分解能で二次元のジルコン全面の Pb, U の同位体比を調べた先行研究はない. そこで本発表では, レーザーアブレーション試料導入法を組み合わせた ICP 質量分析法 (LA-ICPMS 法) を用いたスポット分析により, ジルコン表面全体の同位体比分布を水平方向, 深さ方向共に数 μm スケールの高空間分解能で測定した結果を報告する.

高空間分解能の測定には, レーザーの口径を小さくし, ショット数を少なくすることが必要である. このため, 多重検出器型 ICPMS (MC-IPMS) を導入した. これにより, 信号強度の低下を補い, かつ同位体比測定の精度の向上が可能である. 検出感度の増大を目的とし, 6 個の高感度イオン検出器 (5 個のマルチプライヤー及び 1 個のデイリー検出器) を用いて計測した. 各同位体の検出器への割り当ては, ^{202}Hg (IC), ^{204}Pb (IC), ^{206}Pb (D), ^{207}Pb (IC), ^{208}Pb (IC), ^{235}U (IC) となっている. Pb/U 比の補正には, 天然ジルコンの Nancy 91500⁶⁾を用いた. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比の補正には, 標準ガラス NIST SRM 610 を用いた. レーザーアブレーションシステムは New Wave Research 193 (Fremont, CA, USA) を使い, サンプリング深さの低減にも注意を払った. 本実験では, クレーター直径 5 μm , 分析深さ 5 μm で年代測定を行い, さらにジルコン全面のマッピング分析をおこなった. 本発表では, リバーズディスコーディアが観測されたジルコン粒子に対して年代マッピング分析を行い, 二次的な鉛移動の有無を検証する.

[1] Cherniak and Watson, *Chem. Geol.* 172(1), 5-24, 2001 ; [2] Wetherill, *Trans. Am. Geophys. Union* 37, 320-326, 1956 ; [3] William et al., *Contrib. mineral. petrol.* 88, 322-327, 1984 ; [4] Kusiak et al., *Geology* 41(3), 291-294, 2013 ; [5] Valley et al., *Nat Geosci.* 7(3), 219-223, 2014 ; [6] Wiedenbeck et al., *Geostand. Newsl.* 19, 1-23, 1995.

Mapping Analysis of U-Pb age from Single Zircon Crystal using Laser Ablation-ICP-MS

*K. Hattori¹, S. Sakata¹, S. Yamamoto², and T. Hirata¹ (¹Kyoto Univ., ²Tokyo Univ.)

1B16

凝灰岩のジルコン U-Pb 年代による付加体層序の検討 - 屋久島の四万十累層群を例として -

○安間 了¹、折橋裕二²

(¹筑波大学生命環境系、²東京大学地震研究所)

屋久島の外周部に分布する四万十累層群は、付加体の構造をよく保存しているものの、島中央部に貫入した直径 25 km の花崗岩によって焼かれており、付加体層序の検討に頻繁に用いられる微化石がよく保存されていない。このため、従来地層の姿勢と上下判定から西側上位の層序が踏襲されてきた。このため四万十累層群にふくまれる凝灰岩からジルコンを分離し、U-Pb 年代を決定することによって付加体層序の検討をおこなった。この結果、島の東部でおよそ 30 Ma の、西部でおよそ 55 Ma の堆積年代を得た。新たに得られた結果は、西側により古い付加ブロックがあり、東に向かって新たな付加体が成長したことを示し、従来の知見を刷新することができた。42 Ma には層厚が 100 m にも達する厚い凝灰岩層をもたらすような巨大噴火があったようである。凝灰岩は精度よく年代を決定できるので、これに基づいた堆積物層序の再検討は、従来の付加体地質学の精度をより高めることが期待される。

Accretionary prism stratigraphy deduced from zircon U-Pb ages of tuffaceous horizons – a case study from the Shimanto supergroup exposed in Yakushima -

*R. Anma¹ and Y. Orihashi² (¹Faculty Life & Environ. Sci. Univ. Tsukuba, ²Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo)

1B17

九州地方における，西南日本外帯，中期中新世花崗岩類のマグマ活動史の全容解明：LA-ICPMS U-Pb 年代測定による制約

○折橋裕二¹，新正裕尚²，安間 了³

(¹ 東大地震研，² 東京経大経営，³ 筑波大院)

西南日本外帯（以下，外帯）には，中期中新世の花崗岩類が広範囲に点在して分布している．その活動期の前後では 1) フィリピンプレートにおける四国海盆の拡大 (26 – 15 Ma) (Okino et al., 1997) と，直後のユーラシアプレートへの沈み込みの開始，2) 時計周りの回転運動を伴う日本海拡大 (約 15 Ma までに休止) (Otofiji et al., 1991)，の 2 つの非定常的なテクトニック・イベントが起こっている．これらイベントが同花崗岩類のマグマ成因に密接に関連していることは，先行研究において，多くの研究者が指摘している．一方，同花崗岩類のマグマ成因については，中田・高橋 (1978) による同花崗岩類の広域的な全岩化学組成の類似性が指摘されて以降，若いスラブ (四国海盆) の沈み込みに伴うスラブ融解なのか，成因不明のマグマ貫入が熱源となる下部地殻融解か，またはそれ以外か，統一した見解は得られていない．その大きな原因は，前述した複合的なテクトニック・イベントが数百万年と言う極めて短期間に起こったにも関わらず，これまでの 30 年間で蓄積された同花崗岩類の放射年代値の精度がすでにこのテーマの議論に追いついていないものが多くあるためである．そこで，本研究では，九州地方南部において，外帯花崗岩類が分布する屋久島，種子島，南大隅，尾鈴山，高隈山，村所，野間峠，金峰山，柴尾山，日置，赤仁田，熊ヶ岳，市房山，大崩山及び甕島の 15 貫入岩体から採取した 22 試料について，LA-ICPMS 分析法による高精度 U-Pb 年代測定を行い，同花崗岩質マグマ活動史を明らかにした．

各貫入岩体から得られた U-Pb 年代値は 15.6 Ma から 9.9 Ma の年代幅を持ち，15.6 – 13.5 Ma の主要活動期 (14 貫入岩体) と 10.3 – 9.9 Ma の甕島のみに見られる活動期の 2 期に区分され，両者には約 3 m. y. の休止期が新たに見いだされた．主要活動期は 15.6 Ma の種子島・屋久島に産する石英斑岩岩脈の活動で始まり，14.6 – 14.1 Ma に最大ピークを持ち，13.7 – 13.5 Ma の柴尾山を構成する花崗岩岩体の活動で終焉する．このことから，1) 九州地方に分布する外帯花崗岩類は約 2 m. y. という短期間の活動で生成され，これまでに想定された活動期 (約 8 m. y.) よりも短期間であった，2) 甕島の貫入岩体は外帯花崗岩類とは別の要因による活動である，ことが新たに見いだされた．

今回得られた 15 貫入岩体の U-Pb 年代値と南海トラフからの直線距離の関係は，一部分散はするものの，明瞭な負の相関を示し，これら花崗岩質マグマの成因がフィリピン海プレートの沈み込みによる北進と関連していることが示唆される．本講演では，これらの結果に基づき，九州地方に分布する中期中新世外帯花崗岩類の新しい成因モデルについて提唱する予定である．

Elucidation of whole Mid-Miocene granitic magmatism of the outer zone of southwestern Japan, Kyushu province: Constraint from LA-ICPMS U-Pb age determination

○Y. Orihashi¹, Shinjoe² and R. Anma³ (¹Univ. Tokyo, ²Tokyo Keizai Univ., ³Tsukuba Univ.)

1B18

かつて「新期」「古期」と呼ばれていた花崗岩類の貫入年代差
—東北日本、阿武隈地域—

○昆 慶明¹、江島 輝美¹、森田 沙綾香¹、高木 哲一¹

(¹産業技術総合研究所、地質調査総合センター)

阿武隈花崗岩は環太平洋地域に代表的な白亜紀大規模花崗岩体のひとつであり、その形成史は白亜紀火成活動を解明するうえで重要である。これまで、阿武隈花崗岩体の形成史について多くの先行研究が行われてきた (e.g. Sendo, 1958; Kubo et al., 2003)。岩相および露頭観察による貫入関係から、この地域の岩石は斑レイ岩が最も古く、斑レイ岩や変成岩類に貫入する「古期」花崗岩、そして古期花崗岩に貫入する「新期」花崗岩があると考えられてきた。しかしながら、これまで得られてきた黒雲母 K-Ar 年代や角閃石 Ar-Ar 年代に於いて、有意な年代差は報告されていない (Takagi & Kamei, 2008)。

そこで、我々は花崗岩、斑レイ岩試料からジルコンを分離し、その U-Pb 年代測定を行う事で、マグマの貫入時期を正確に評価した。その結果、斑レイ岩の貫入は周囲の花崗岩と同時期である事、新期- 古期花崗岩に有意な年代差が無い事、阿武隈地域の東から西にかけて貫入年代が若くなる傾向がある事、が明らかになった (Kon and Takagi, 2012; Kon et al, 2015)。

References

- Kamei, A. and Takagi, T. (2003) J. Geological Society of Japan, 109, 234-251.
Kubo, K. et al. (2003) Geol. map of Japan 1:200,000, Fukushima. GSJ, AIST.
Kon, Y. and Takagi, T. (2012) J. Mineral Petrol Sc. 107, 183–191.
Kon, Y. Ejima, T., Morita, S. and Takagi, T. (2015) J. Mineral Petrol Sc. 110, 145-149.
Sendo, T. (1958) The Science Reports of the Tohoku Univ., series 3, 6, 57-167.
Takagi, T. and Kamei, A. (2008) J. Mineral. and Petrol. Sci., 103, 307-317.

Spatial U-Pb age distribution of plutonic rocks in the central Abukuma Plateau, northeastern Japan Arc

*Y. Kon¹, T. Ejima¹, and T. Takagi¹ (¹Geological Survey of Japan, AIST)

○高地吉一¹、折橋裕二²、山本鋼志³、大藤 茂¹(¹ 富山大学大学院理工学教育部、² 東京大学地震研究所、³ 名古屋大学環境学研究科)

ジルコンは、初生的にはマグマから晶出することが多い鉱物で、閉鎖温度が約 900°C と高い。また、変質や摩耗にも強いいため、侵食・運搬・堆積を繰り返し、変成作用を被っても晶出年代を維持する。砕屑性ジルコンとは、変成・非変成を問わず砕屑岩中に多数含まれるジルコンのことである。砕屑性ジルコン年代から推定されるのは(1)堆積年代、(2)後背地の2点である。Okawa et al. (2013)は、このことを用いて南部北上帯の後背地・堆積場の推定を行った。しかしながら Okawa et al. (2013)が行った後背地推定は、砕屑性ジルコンの年代分布のピーク位置やパターンが視覚的に似ているという定性的な根拠のみであり、特にデボン系については、後背地のコンパイルについても不十分である。また、Okawa et al. (2013)のみならず、砕屑性ジルコン年代を用いた後背地解析を定量的に行った事例は、Choi et al. (2013)や Burrett et al. (2014)などがあるが、日本列島の後背地解析については、現時点では行われていない。

そこで本研究では、後背地の火成ジルコンの年代分布コンパイルを十分行った後、南部北上帯デボン系および、南部北上帯・デボン系と砕屑性ジルコン年代分布パターンが類似する(高地ほか、2013 JPGU) 三郡変成帯・蓮華変成岩類(以下、蓮華変成岩類と略記)の後背地・堆積場を、砕屑性ジルコン年代分布および Kolmogorov-Smirnoff 検定(以下、K-S 検定と略記)を用いて定量的な拘束を試みた。

K-S 検定は、2つの母集団 A,B があつたとき、母集団 B が母集団 A から派生した母集団であるか否かを検定する統計学的手法である(Guynn et al., 2010)。K-S 検定の実施については、Guynn et al. (2010)の手法に従った。蓮華変成岩類の砕屑性ジルコン年代分布は、東京大学地震研究所および名古屋大学環境学研究科設置の LA-ICPMS (UP-213 + Plasma Quad3, NWR-213 + Agilent 7700x) を使用して測定した。後背地の火成ジルコンのコンパイルは、 Gondwana 大陸北東部周辺に位置していたとされる、オーストラリア、東南極、北・南中国地塊を対象に行った。特にオーストラリアについては、6つのエリア(北西部、西部、南西部、北東部、東部、南東部)ごとのコンパイルも行った。

コンパイル結果、測定結果を用いて K-S 検定を行った結果、南部北上帯デボン系および蓮華変成岩類の砕屑性ジルコン年代分布は、オーストラリア南東部(当時の Gondwana 大陸北東部縁辺)と一致し、他とは一致しないことがわかった。この結果より、南部北上帯デボン系および蓮華変成岩類の後背地・堆積場は、Okawa et al. (2013)が示した位置(Gondwana 大陸北西部)よりも東側にあつたと推定される。

Experiment of provenance analysis for the Renge metamorphic rocks of the Sangun Metamorphic Belt in Southwest Japan used K-S test and detrital zircon age spectra.

*Y. Kouchi¹, Y. Orihashi², K. Yamamoto³ and S. Otoh¹ (1 Univ. Toyama, 2 ERI, Univ. Tokyo, 3 Nagoya Univ.)

1B20

初期太古代ジルコンの U-Pb 年代と包有物の ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代

○山本伸次¹、小宮剛¹ 越田溪子¹、兵藤博信²、佐藤佳子³、熊谷英憲³、渋谷岳造³、下條将徳⁴、坂田周平⁵、平田岳史⁵

(¹東大、²岡山理大、³JAMSTEC、⁴JOGMEC、⁵京大)

約 40 億年より古い地球岩石は残存していないため、この時代は“冥王代”と呼ばれ、地球科学における暗黒の時代とされる。これまでに、西オーストラリア・ジャックヒルズ表成岩体に産する変礫岩からは、約 30–44 億年前の U-Pb 年代を示す碎屑性ジルコンが報告されており、ジルコンに含まれる包有物に注目した研究が行われてきた (e.g. Hopkins et al., 2008)。包有物として、石英・カリ長石・白雲母・黒雲母・角閃石・アパタイト等の存在から、ホストのジルコンは花崗岩質地殻に由来しプレートテクトニクスが駆動していた証拠と考えられてきたが (Harrison, 2009)、一方で、碎屑性ジルコンに含まれる包有物は二次的な変成・変質作用を被っており、初生的な情報は保持していないとする研究がある (Rasmussen et al., 2011; Nutman et al., 2014)。

本研究では、U-Pb 系と比べ熱に対し鋭敏である K-Ar 系の挙動を探ることで、冥王代～初期太古代ジルコン中の包有物年代について検討することを目的とし、地球最古の岩石として知られるカナダ・アカスタ地域 (~40.3 億年; Bowring & Williams, 1999) およびラブラドル地域 (~39.6 億年; Shimojo et al., *submitted*) に産する花崗岩質片麻岩からジルコンを分離し、単粒子および複数粒子の段階加熱による $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代分析およびジルコン中に含まれる包有物の相同定を行った。中性子未照射のジルコンを段階加熱したところ多くの粒子では、 ^{40}Ar は 1000–1100°C を越えた領域で多量に放出された。そこでそれらジルコン単粒子を中性子照射し $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 測定を行ったところ、全体の 70% を超える高温フラクションで、ラブラドルのジルコンからは 43.9 ± 3.4 億年、アカスタのジルコンからは 21.4 ± 1.7 億年という値が得られた (兵藤他, 2015 連合大会; 佐藤他, 2015 連合大会)。一般に、ジルコン結晶中に K は含まれないため、これら放射起源 Ar の放出はジルコン中の包有物の寄与が考えられる。段階加熱によりジルコン粒子は最終的に全溶解に近い状態であるため詳細は不明であるが、段階加熱の Ar 同位体比により包有物中の雲母等の含カリウム鉱物の寄与として推定される。そこで、ジルコン中の包有物種類および存在頻度を明らかにするため、分離されたジルコン 50 粒子 (非段階加熱) を顕微ラマンおよび SEM-EDS を用いて包有物分析をおこなった結果、カリ長石・白雲母などの他に、顕微鏡観察からは流体やメルト包有物とみられる相も確認された。年代誤差は大きいものの、ラブラドル・ジルコンでは U-Pb 年代と同様の Ar-Ar 年代 (約 40 億年) が得られ、アカスタ・ジルコンでは Wopmay 造山作用 (~19 億年) に対応する約 20 億年の値が得られたことは興味深い。本発表では、これらジルコンから得られた年代学的・鉱物学的・地質学的な意義について議論する。

Comparison of U-Pb dating of early Archean zircons and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating for their inclusions

*S. Yamamoto¹, T. Komiya¹, H. Hyodo², K. Sato³, H. Kumagai³, T. Shibuya³, M. Shimojo⁴, S. Sakata⁵, and T. Hirata⁵ (¹The Univ. of Tokyo, ²Okayama Univ. of Science, ³JAMSTEC, ⁴JOGMEC, ⁵Kyoto Univ.)

1B21

(Keynote)

タングステン同位体から探る地球初期進化

○賞雅朝子^{1,2}、中井俊一²、飯塚毅³

(¹ 放射線医学総合研究所、² 東京大学地震研究所、³ 東京大学理学系研究科)

地球の形成過程にはいくつかのモデルが提唱されているが、地球形成の最終段階でジャイアントインパクトを経験し、月が形成され、マグマオーシャンが形成されたというのが広く受け入れられているモデルの一つである。このような集積過程を経て、最終的に金属鉄からなるコアと珪酸塩からなるマントル-地殻に分化したとされている。このコアとマントル-地殻の分化過程や、その後のコアとマントルの再平衡・相互作用について、タングステン同位体を用いた地球化学的な観点からの研究を紹介する。

タングステンは質量数が 180,182,183,184,186 の 5 つの安定同位体を持つ親鉄性元素である。¹⁸²W は短寿命核種 ¹⁸²Hf の β 壊変 (半減期 890 万年) により存在量が変化し、太陽系初期のイベントに対して数万年～数十万年スケールの年代指標となる同位体の一つである。Hf-W は両元素とも、難揮発性元素であることから、惑星の集積過程において、コンドライトと惑星全体では同様のタングステン同位体進化が予測される。さらに親元素の Hf は親石性元素で、娘元素の W は親鉄性元素であることから、特に金属鉄-珪酸塩の分離のタイミング、コア形成の年代測定に応用されてきた。地球の集積過程で親鉄性の W がコアに入り、親石性の Hf がマントルにとどまり、¹⁸²Hf による放射壊変でマントル中の ¹⁸²W の存在量は増加、コア中の ¹⁸²W はマントルよりも低くなる。

タングステン同位体によるコア形成の年代測定は、コア物質の直接採取は難しいため、地殻-マントル物質 (珪酸塩) とコンドライト (=Bulk Earth) あるいは月の試料の測定によりコア形成過程や年代が推定されている。一般的に ¹⁸²W 同位体は原子数の分析が難しいため、¹⁸²W/¹⁸⁴W 同位体比を測定する。同位体比の変動は W 同位体標準溶液試料 (NIST SRM-3163) からの一万分率偏差 ε 値で表される (式 1)。

$$\epsilon W = \left(\frac{\frac{{}^{182}\text{W}}{{}^{184}\text{W}}_{\text{sample}}}{{}^{182}\text{W}}{{}^{184}\text{W}}_{\text{SRM3163}}} - 1 \right) \times 10000 \quad \text{式 1}$$

この標準溶液試料は現在の上部マントルの ¹⁸²W/¹⁸⁴W 同位体比と ±0.3 ε 一致しており、コンドライトよりも 1.9 ε 高い (Lee and Halliday, 1996; Klein et al., 2002; Scersten et al., 2004; Irisawa and Hirata, 2006; Takamasa et al., 2009)。そして、地球の現在の地殻岩石試料とコンドライトの同位体組成の差に基づいて、コア形成の年代は陽系形成後 3000 万年から一億年に進んだと解釈されてきた (Yin et al., 2002, Jacobsen et al., 2005, Touboul et al., 2007, Halliday 2008, Klein et al., 2009 など)。

2010 年ごろまでの N-TIMS や MC-ICP-MS による分析精度は、誤差が $\sim 0.3 \epsilon$ であった。しかし近年、質量分析機器の発展や分離方法の開発とともに、分析精度が飛躍的に向上し、同位体比の変動は百万分率偏差 μ で報告がされるようになった (Touboul et al., 2011, 2012)。そして超高精度のタングステン同位体分析は、地球初期のタングステン同位体進化や不均質の可能性を評価するために太古代初期の岩石試料 (イスア岩体など) に応用された。それまで太古代初期の岩石試料からは誤差範囲 ($\pm 0.3 \epsilon$) を超える同位体異常は検出されていなかったが (Moynier et al., 2010; Iizuka et al., 2010)、地球初期地殻の試料について行った最近の高精度分析で、28 億年前のコマチアイトに最大で $+0.20 \epsilon = 20 \mu^{182}\text{W}$ (ロシア Kostomuksha 地域、Touboul et al., 2012) の変動があることが明らかになった。

これらのタングステン同位体の変動については、超親鉄性元素 (HSE) の白金族元素のマントル中含量や、 ^{142}Nd 同位体の不均質などと合わせて議論がされ、太古代試料のタングステン同位体異常の原因としてレイトベニア・コア-マントル相互作用・地殻-マントルの分化などが提唱されている。また、太古代マントルが現在のマントルと異なるタングステン同位体組成をもっていた場合、コア形成年代の見積もりの再評価が必要となる。従来は、コア形成年代に使われている W 同位体比はコンドライトの -1.9ϵ と現在のマントルを代表する 0ϵ であるが、Touboul らの $+0.2 \epsilon$ を用いて、コア形成年代を計算すると、従来の見積もりと比較して 100 万年ほど若い年代が得られる。

発表では、最近明らかになった太古代岩石試料中のタングステン同位体変動から示唆される地球初期進化について中心に議論する。

参考文献

- | | |
|--|--|
| Halliday 2008, Philosophical Transactions of the Royal Society A 366, 4163–4181. | Academy of Sciences of the United States of America, 107, 10810–10814. |
| Iizuka et al., 2010 Earth and Planetary Science Letters, 291, 189–200. | Shersten et al. 2004 Nature, 427, 234–237. |
| Irisawa and Hirata, 2006 Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 21, 1387–1395. | Takamasa et al., 2009 Chemical Geology, 260, 37–46. |
| Jacobsen et al., 2005, Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 33, 531–570. | Touboul et al., 2007, Nature 450, 1206–1209. |
| Klein et al., 2002 Nature, 418, 952–955. | Touboul et al., 2012 International Journal of Mass Spectrometry, 309, 109–117. |
| Klein et al., 2009 Geochimica et Cosmochimica Acta 73 (2009) 5150–5188 | Touboul et al. 2012 Science, 335, 1065–1069. |
| Lee and Halliday, 1996 Science, 274, 876–1879. | Yin et al., 2002 Nature, 418, 949–952. |
| Monier et al., 2010 Proceedings of National | |

Tungsten isotope constraints on the early Earth's evolution

*A. Takamasa^{1,2}, S. Nakai², T. Iizuka³ (¹ National Institute of Radiological Science, ² ERI, Univ. Tokyo, ³ Univ. Tokyo)

地球深部、特に地球外核の化学組成を知ることは、地球及び太陽系の形成史並びに地磁気の起源を理解する上で重要である。しかし、人類はいまだマントルの直接サンプリングにすら成功しておらず、火成活動によって地表面に現れた鉱物の分析からは、外核の化学組成についての情報を直接得ることはできない。

一方、近年のレーザー加熱ダイヤモンドアンビル装置を用いた高压実験の目覚ましい進歩により、地球深部の温度圧力条件を実験室中で再現することが可能となり、地球内外核の化学組成に制限を与えている。しかし、地球深部と同じ温度圧力条件下で、地球深部と同じ弾性波速度を再現する化学組成モデルは複数存在しうするため、高压実験だけから地球内外核の化学組成を決定するのは困難である。

上述のように、地球外核の化学組成を知る手掛かりは限られているのが現状である。我々は、地球科学上の重要課題である、地球深部の化学組成の測定のための、新しい手法を考案したので、ここに報告する。

ニュートリノは W.Pauli によって 1930 年に予言され、1956 年に発見された素粒子である(Cowan et al., 1956)。ニュートリノは反応断面積が小さい、言い換えると物質貫通能力が高いため、地球を容易に貫通することができる。また、ニュートリノには3つの種類があり、それぞれ電子型、ミュー型、タウ型と名付けられている。ニュートリノは、ニュートリノ振動という、他の素粒子に無い特異な性質を持っている(Pontecorvo, 1957)。ニュートリノ振動とは、ニュートリノの種類が時間と共に別の種類のニュートリノに変化する現象のことを指す。例えば、生成された際はミュー型ニュートリノであったものが、電子型ニュートリノとして検出される、等である。変化する確率は、ニュートリノの混合角、質量、そして周囲の電子数密度によって一意に決まり、混合角や質量は他の実験から測定できるため、この確率を精度よく測定することによって、物体の電子数密度を測定することができる。

ニュートリノは大気中で絶えず生成されており、光を除くと、地表面で最も数の多い素粒子である。従って、大気中で生成され、地球を貫通したニュートリノを測定することで、地球深部の電子数密度を測定することが可能となる。地球内部の物質密度は、地震波や地球の自由振動の測定等から、精度よく決まっている(Dziewonski and Anderson, 1981)。物質密度と電子数密度の比は、質量数と原子番号の比(Z/A)に等しいため、ニュートリノの測定から、地球深部の平均化学組成を得ることができる。

ニュートリノは反応断面積が小さいため、その測定は困難ではあるものの、既に多くの実験が稼働している。我が国が誇るスーパーカミオカンデ(Fukuda et al., 1998)やカム

ランド(Araki et al., 2005)、南極にある IceCube(Ahrens et al., 2004)等が有名であるが、現存の実験では、地球深部の化学組成を測定することはできない。スーパーカミオカンデでは統計精度が足りないため、カムランドや IceCube では感度のあるエネルギー領域が異なるためである。地球深部の化学組成測定に必要となるのは、10 億電子ボルトから 100 億電子ボルトの間の、大気中で生成されたニュートリノを、十分な感度で測定することのできる装置である。今日現在、ハイパーカミオカンデ(Abe et al., 2015)、PINGU(The IceCube-PINGU Collaboration, 2014)、ORCA(Katz et al., 2014)等、次世代のニュートリノ観測実験が複数計画されており、それらを用いることで、近い将来に地球深部の平均化学組成を測定することが可能となる。次世代のニュートリノ観測装置では、地球の外核は鉛や岩石ではない、という大ざっぱな測定しかできないが、それを足がかりに、化学組成測定に特化したニュートリノ観測装置を用いれば、水素の含有量を 0.1%、酸素の含有量を 1%の精度で測定することが可能となる。同時に、既存の化学組成モデルを弁別することも可能となる。

本講演では、ニュートリノ振動を用いた地球深部の化学組成測定という、新たな学問領域を紹介し、次いで、次世代や将来のニュートリノ観測装置を用いた場合の、外核の化学組成測定の感度について述べる。

1. Cowan, C. L., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W. & McGuire, A. D. Detection of the Free Neutrino: a Confirmation. *Science* **124**, 103–4 (1956).
2. Pontecorvo, B. Mesonium and anti-mesonium. *Sov.Phys.JETP* **6**, 429 (1957).
3. Dziewonski, A. & Anderson, D. Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **25**, 297–356 (1981).
4. Fukuda, Y. et al. Measurement of a small atmospheric ν_μ/ν_e ratio. *Phys. Lett. B* **433**, 9–18 (1998).
5. Araki, T. et al. Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with Kam-LAND. *Nature* **436**, 499–503 (2005).
6. Ahrens, J. et al. Sensitivity of the IceCube detector to astrophysical sources of high energy muon neutrinos. *Astropart. Phys.* **20**, 507–532 (2004).
7. Abe, K., et al. "Physics potential of a long-baseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande." *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2015): 053C02.
8. The IceCube-PINGU Collaboration. Letter of Intent: The Precision IceCube Next Generation Upgrade (PINGU). Preprint arXiv:1401.2046 (2014).
9. Katz, U.F. for the KM3NeT Collaboration. The ORCA Option for KM3NeT. Preprint arXiv:1402.1022 (2014).

Chemical composition measurement of the deep earth using neutrino oscillations

*A. Taketa¹, C. Rott² (¹Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo, ²Sungkyunkwan Univ.)