

Mon. Sep 5, 2022

oral room 2

symposium | S2. [Symposium]Geology in the Anthropocene: Frontiers in boundary studies on age and material

[2oral213-27] S2. [Symposium]Geology in the Anthropocene: Frontiers in boundary studies on age and material

Chair: Yukio Isozaki, Hodaka Kawahata, Azumi KUROYANAGI  
1:30 PM - 5:45 PM oral room 2 (Build. 14, 101)

[S2-O-1] The Earth's environment in the Anthropocene, corresponding to a geochronologic boundary – Can geoscience contribute to society?  
\*Hodaka Kawahata<sup>1</sup> (1. Faculty of Science and Engineering, Waseda University, AORI, the University of Tokyo)

1:30 PM - 1:45 PM

[S2-O-2] Contributions of Academic research for social activity

\*Hiroshi Nishi<sup>1</sup> (1. Fukui Prefectural University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S2-O-3] Contribution of geology to the society: Perspective from hazard and disaster researches

\*Kazuhisa Goto<sup>1</sup> (1. The University of Tokyo)

2:00 PM - 2:15 PM

[S2-O-4] Importance of water quality monitoring for usage of aquifer thermal storage systems in large cities -case studies in Osaka Plain

\*Harue Masuda<sup>1</sup>, Masaki Nakao<sup>1</sup>, Yasuhiro Nakaso<sup>1</sup>, Linri Cui<sup>2</sup>, Shinji Mihara<sup>2</sup>, Koichi Hashimoto<sup>3</sup> (1. Osaka Metropolitan University, 2. Mitsubishi Heavy Industries Thermal Systems, 3. Environment Bureau, Osaka City)

2:15 PM - 2:30 PM

[S2-O-5] Marine biodiversity in the Anthropocene

\*Moriaki YASUHARA<sup>1</sup> (1. The University of Hong Kong)

2:30 PM - 2:45 PM

[S2-O-6] The future global environment contributed by geology: ocean acidification and foraminifera

\*Azumi KUROYANAGI<sup>1</sup> (1. Tohoku Univ.)

2:45 PM - 3:00 PM

[2oral213-27-7add] Break

3:00 PM - 3:15 PM

[S2-O-7] “Boundary” studies in geology: Now and then

\*Yukio Isozaki<sup>1</sup> (1. University of Tokyo)

3:15 PM - 3:30 PM

[S2-O-8] A boundary study in making discrimination diagrams for detrital zircon

\*Yusuke SAWAKI<sup>1</sup> (1. The University of Tokyo)

3:30 PM - 3:45 PM

[S2-O-9] Boundaries in metamorphism, the scale conundrum

\*Tatsuki Tsujimori<sup>1</sup> (1. Tohoku University)

3:45 PM - 4:00 PM

[S2-O-10] Tipping point of water and carbon cycles in the Earth's interior

\*Ikuo Katayama<sup>1</sup> (1. Hiroshima University)

4:00 PM - 4:15 PM

[S2-O-11] Fluid-rock boundaries: Dynamic petrology coupled with reaction and fracturing

\*Masaaki Uno<sup>1</sup> (1. Tohoku University)

4:15 PM - 4:30 PM

[S2-O-12] Energy aspect of the oxidation of ocean-atmosphere

\*Masafumi Saitoh<sup>1</sup> (1. The University of Tokyo)

4:30 PM - 4:45 PM

[S2-O-13] Temporal variations in extraterrestrial <sup>3</sup>He flux across the Permian/Triassic boundary: Toward a cross-disciplinary approach in earth and planetary sciences

\*Tetsuji Onoue<sup>1</sup>, Naoto Takahata<sup>2</sup>, Katsuhito Soda<sup>3</sup>, Yuji Sano<sup>3</sup>, Yukio Isozaki<sup>2</sup> (1. Kyushu Univ., 2. Univ. Tokyo, 3. Kochi Univ.)

4:45 PM - 5:00 PM

[S2-O-14] Current Status of Geologic Age Boundary Determination in the Pleistocene

\*Makoto Okada<sup>1</sup> (1. Ibaraki University)

5:00 PM - 5:15 PM

[S2-O-15] The Anthropocene and river deltas

\*Yoshiki SAITO<sup>1</sup> (1. Shimane University)

5:15 PM - 5:30 PM

---

 symposium | S2. [Symposium]Geology in the Anthropocene: Frontiers in boundary studies on age and material

## [2oral213-27] S2. [Symposium]Geology in the Anthropocene: Frontiers in boundary studies on age and material

Chiar:Yukio Isozaki, Hodaka Kawahata, Azumi KUROYANAGI

 Mon. Sep 5, 2022 1:30 PM - 5:45 PM oral room 2 (Build. 14, 101)
 

---

- [S2-O-1] The Earth's environment in the Anthropocene, corresponding to a geochronologic boundary – Can geoscience contribute to society ?  
 \*Hodaka Kawahata<sup>1</sup> (1. Faculty of Science and Engineering, Waseda University, AORI, the University of Tokyo)  
 1:30 PM - 1:45 PM
- [S2-O-2] Contributions of Academic research for social activity  
 \*Hiroshi Nishi<sup>1</sup> (1. Fukui Prefectural University)  
 1:45 PM - 2:00 PM
- [S2-O-3] Contribution of geology to the society: Perspective from hazard and disaster researches  
 \*Kazuhisa Goto<sup>1</sup> (1. The University of Tokyo)  
 2:00 PM - 2:15 PM
- [S2-O-4] Importance of water quality monitoring for usage of aquifer thermal storage systems in large cities -case studies in Osaka Plain  
 \*Harue Masuda<sup>1</sup>, Masaki Nakao<sup>1</sup>, Yasuhiro Nakaso<sup>1</sup>, Linri Cui<sup>2</sup>, Shinji Mihara<sup>2</sup>, Koichi Hashimoto<sup>3</sup> (1. Osaka Metropolitan University, 2. Mitsubishi Heavy Industries Thermal Systems, 3. Environment Bureau, Osaka City)  
 2:15 PM - 2:30 PM
- [S2-O-5] Marine biodiversity in the Anthropocene  
 \*Moriaki YASUHARA<sup>1</sup> (1. The University of Hong Kong)  
 2:30 PM - 2:45 PM
- [S2-O-6] The future global environment contributed by geology: ocean acidification and foraminifera  
 \*Azumi KUROYANAGI<sup>1</sup> (1. Tohoku Univ.)  
 2:45 PM - 3:00 PM
- [2oral213-27-7add] Break  
 3:00 PM - 3:15 PM
- [S2-O-7] “Boundary” studies in geology: Now and then  
 \*Yukio Isozaki<sup>1</sup> (1. University of Tokyo)  
 3:15 PM - 3:30 PM
- [S2-O-8] A boundary study in making discrimination diagrams for detrital zircon  
 \*Yusuke SAWAKI<sup>1</sup> (1. The University of Tokyo)  
 3:30 PM - 3:45 PM
- [S2-O-9] Boundaries in metamorphism, the scale conundrum  
 \*Tatsuki Tsujimori<sup>1</sup> (1. Tohoku University)  
 3:45 PM - 4:00 PM

- [S2-O-10] Tipping point of water and carbon cycles in the Earth's interior  
\*Ikuo Katayama<sup>1</sup> (1. Hiroshima University)  
4:00 PM - 4:15 PM
- [S2-O-11] Fluid-rock boundaries: Dynamic petrology coupled with reaction and fracturing  
\*Masaaki Uno<sup>1</sup> (1. Tohoku University)  
4:15 PM - 4:30 PM
- [S2-O-12] Energy aspect of the oxidation of ocean-atmosphere  
\*Masafumi Saitoh<sup>1</sup> (1. The University of Tokyo)  
4:30 PM - 4:45 PM
- [S2-O-13] Temporal variations in extraterrestrial <sup>3</sup>He flux across the Permian/Triassic boundary: Toward a cross-disciplinary approach in earth and planetary sciences  
\*Tetsuji Onoue<sup>1</sup>, Naoto Takahata<sup>2</sup>, Katsuhito Soda<sup>3</sup>, Yuji Sano<sup>3</sup>, Yukio Isozaki<sup>2</sup> (1. Kyushu Univ., 2. Univ. Tokyo, 3. Kochi Univ.)  
4:45 PM - 5:00 PM
- [S2-O-14] Current Status of Geologic Age Boundary Determination in the Pleistocene  
\*Makoto Okada<sup>1</sup> (1. Ibaraki University)  
5:00 PM - 5:15 PM
- [S2-O-15] The Anthropocene and river deltas  
\*Yoshiki SAITO<sup>1</sup> (1. Shimane University)  
5:15 PM - 5:30 PM

# The Earth's environment in the Anthropocene, corresponding to a geochronologic boundary –Can geoscience contribute to society ?

\*Hodaka Kawahata<sup>1</sup>

1. Faculty of Science and Engineering, Waseda University, AORI, the University of Tokyo

人類は現在78億人となり、地球の隅々までホモ・サピエンスであふれるようになった。人類は地球上のバイオマス量のわずか0.01%を占めるのみだが、人工物を作り続けてきた。その結果、その総重量は2020年に地球上のバイオマス総重量を超えた。20年後には倍になると推定されている。

地球表層環境システムには緩衝機能が備わっている。しかし、人間活動がその閾値に近づいたために、その機能が発揮できない場面が顕著になりつつある。その代表的事例が人為起源の二酸化炭素放出に伴う「双子の悪魔」と呼ばれる脅威である。これまで地球表層環境に放出された人為起源二酸化炭素の約70%が大気中に残存し地球温暖化がもたらされ、約30%が海水中に吸収され、今世紀後半に海洋酸性化が顕在化する見通しである。すなわち、大気中の二酸化炭素濃度 ( $pCO_2$ ) が $>550ppm$ となると炭酸塩に不飽和の海水が極域に出現し、同海域の生物起源炭酸塩が溶解する事態となる。

一方、白亜紀の $pCO_2$ は現在の2倍以上の $>1,000ppm$ であったが、フランスやイタリアや世界の大洋で、石灰岩が大量に堆積した。この事実は $pCO_2$ が海洋酸性化の第一要因でないことを示している。陸地の風化によるアルカリ度の供給による「海水の中和」は地球環境の代表的緩衝機能である (Yamamura et al., 2007)。しかし、これが機能するには数十万年以上の持続時間が必要となる。

逆に、5500万年前の暁新世/始新世 (P/E) 境界には深刻な海洋酸性化が起こり、深海底に生息する底棲有孔虫の約半分が絶滅した。原因は、メタンハイドレートの大規模崩壊の可能性が高い。大気中でも海水中でも酸素存在下ではメタンは数年以内に二酸化炭素となる。当時のハイドレート崩壊は約1万年間継続し、大量の二酸化炭素が地球表層環境に放出された。この二酸化炭素流量は現代の人為起源の放出速度の1/30程度だったので、当時の1万年間は現代の300年間に相当する。

P/E境界や現代 (人新世) の場合には、二酸化炭素が環境に放出される流量があまりに高いので、大陸の化学風化で海水を中和できない。地球惑星科学の観点より考察すると、海洋酸性化の最重要支配因子は高 $pCO_2$ ではなく、環境変化速度であると結論できる。「現代の地球環境の最大の問題は速すぎる変化速度である」と一般化できる事象が他にもある。

今後の酸性化の推定をわかりやすく理解するために、P/E境界の堆積物カラムに将来の推定状況を対比して示す (図参照)。2050年前後に南極や北極海域の一部に炭酸塩に不飽和の海水が出現する。これらの海水は密度が高いため2100年に深海に沈みこみ、海底の堆積物の溶解が始まる。太平洋では、底層水は北進し、炭酸塩の溶解が進行する。「カーボンニュートラル2050」が実施されても、途上国での化石燃料は増大し、2050年には現在より消費が増加するという現実的で説得力のある予測がある。海洋酸性化は、脱炭素社会が確立されれば、炭酸塩含有量が低下するものの図中の薄茶色の状態で停止する。しかし、脱炭素化に失敗すれば、炭酸塩はすべて溶解し、堆積物は暗黒色の状態に到達する。

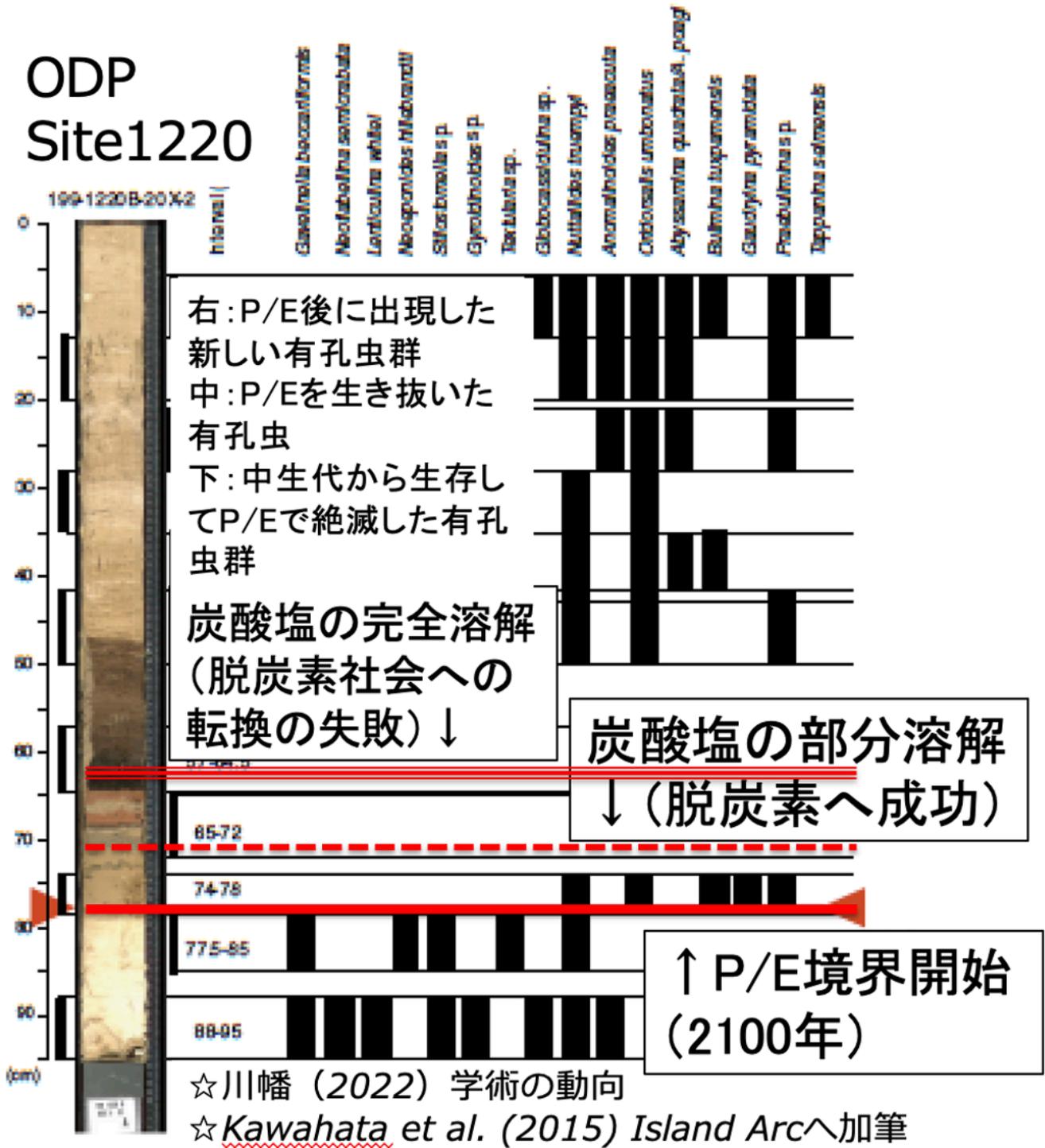
IPCCによれば、現在より平均気温がさらに $0.9^{\circ}C$ 上昇すると、2100年にはサンゴ礁生態系の99%が地球上より消失する。人新世の環境は人類にとって初体験なので、人新世の社会がどこに向かうのかを予測することは難しい。研究者はその専門性を生かして、さまざまな条件に対応して未来を推定することができる。国民あるいは全人類が最終判断をくだす時に役立つよう、その推定シナリオを社会に提示することが研究者の使命と考える。

引用文献 : Yamamura, M. et al. (2007) *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254, 477-491.

Kawahata, H. et al. (2015) *Island Arc*, doi:10.1111/iar.12106.

川幡穂高 (2022) 学術の動向, 27巻2, 26-30.

Keywords: Anthropocene, Geochronologic boundary, Ocean acidification, Carbon dioxide, Global warming



# Contributions of Academic research for social activity

\*Hiroshi Nishi<sup>1</sup>

## 1. Fukui Prefectural University

地球環境の問題は、既に20世紀中盤から大きな社会問題として取り上げられ、1972年にはローマ・クラブから「成長の限界」の報告書が公表された。この報告では、今後人口増加や環境汚染などの傾向が続けば、100年以内に地球上の成長は限界に達するというのがその内容であり、残すところ50年あまりでこの報告の結論が出る時代になってきた。その後も森林破壊、異常気象、オゾンホールの破壊などの問題が次々に取り上げられ、世界全体で取り組まないとこれらの問題が解決できない状況となっている。そのため、国連はミレニアム開発目標（MDGs, 2000年9月）やSDGs（持続可能な開発目標, 2015年9月）と国際的な目標を続けて提案した。このうちSDGsは国連サミットで採択され、国連加盟193ヶ国が2016年から2030年の15年間で達成するために掲げた目標で、17の大きな目標とそれらを達成するための具体的な169のターゲットで構成されている。日本の産業界でもSDGsを念頭におき、経営に取り込む方針を打ち出す企業も多くなっている。一方、学術研究は幅広い知的創造の活動で、真理の探究という知的欲求に根ざし、新しい法則や原理の発見、新しい知識や技術の体系化、先端的な学問分野の開拓などを旨とするものである。そこから生まれる学術研究の成果は、人類の知的共有財産として文化の知的側面を形成するとともに、応用化や技術化を通して日常生活を豊かにする役割を果たし、人類社会の発展の基盤を形成するものと提言されている。すなわち、学術研究は真理や技術の探究だけではなく、その専門的な知識と研究成果を社会の繁栄に寄与させることを常に意識しておくことが責務であり、学術研究に対する社会的要請の中から研究課題を新たに見出し、貢献を積極的に果たせるようにすることが必要である。そのため、学術会議でもSDGsやゼロ・カーボンのような国際的な社会問題に対する発信や貢献が強く求められている。地質学は災害、資源、環境の分野に広く関連し、社会の基盤を支える分野である。特に日本では変動帯やモンスーン気候下にあり、平野が少なく山地が多い地形であるため、多くの災害が引き起こされてきた。そのため自然災害に関しては、これまで多くの重要な社会貢献を果たしてきたといえる。一方、その時間概念の長さから工学や農学の分野に比べると、災害関連以外の分野における地質学の貢献への社会の理解が弱かったように思われる。また、フューチャーアースやIPCCといった国際プロジェクトは常に文理融合を基礎にして行われるようになっており、自然界を探る学術研究も社会科学との結びつきを意識しないと受け入れられない時代になってきた。今回、「人新世」という時間尺度が議論されるようになったのも、産業革命以後の約200年間に人類がもたらした森林破壊や気候変動の影響はあまりに大きく、人類社会が第四紀以降という地球史の括りでは足りないという学術的な認識が強くなってきたためである。地球温暖化の問題も、人類がかつてのシアノバクテリアのように大きく地球環境の改変を劇的に行っているという認識と、その改変が我々の生活を阻害するような環境への改悪を引き起こすという懸念からであろう。持続可能という言葉には、未来の人類のカタストロフィを起こしたくないという願いが込められている。われわれ地質学者も社会の要請や期待を強く意識し、それに対応できる学問体制を作らなければならない時代に来ている。そのためにも、「人新世」の問題にも関与する必要性は大きいのではないだろうか。また、近年、学術界は文理融合の方針が大きく打ち出されている。「人新世」は、フューチャーアースと同様にわれわれ地質学が文理融合で議論できる課題であることも重要な点であると思われる。

文献：ドネラ H. メドウス, 1972, 成長の限界—ローマクラブ「人類の危機」レポート, ダイヤモンド社

Keywords: Academic activity, Social contribution, Anthropocene, SDGs

# Contribution of geology to the society: Perspective from hazard and disaster researches

\*Kazuhisa Goto<sup>1</sup>

## 1. The University of Tokyo

地球科学的には、災害は大気圏や海洋圏等で発生した自然現象が、人間圏の一部または全体に及ぼす影響と捉えることができる。そのため、明確に定義されているわけではないものの、災害研究の対象は本質的には人間圏の成立以降に限られる。

災害を議論する際に、英語ではハザード (hazard: 災害を引き起こしうる自然現象を指し、その大きさを外力とも呼ぶ) とディザスター (disaster: ハザードが発生した結果として生じる被害 (災害)) を使い分けるが、日本語ではこのような明確な用語の区別はない。ハザードの理解は災害研究の根幹をなしており、過去の事象の理解が不可欠であるから、歴史学や考古学等とともに地質学が大きく貢献できる部分である。災害研究の主たる対象範囲が人間圏の成立以降だとしても、ハザードはそれ以前から地球史を通じて繰り返し発生しており、将来にわたって発生する可能性もあることから、地質時代にまで遡ってハザードの理解を深めることが重要である。一方でディザスターは、ハザードの規模だけではなく、それを受ける人間社会の脆弱性も考慮する必要がある。ハザード自体の発生は制御できなくても、対象となるハザードを適切に理解して対策を講じ、人間社会の側の脆弱性を低減させることができれば全体の被害を軽減できる。ここに、工学や社会学あるいは行政の役割がある。

ここで防災の考え方をもう少し深めたい。ハザードは、一般的には規模が大きいものほど発生頻度は低くなる。河田 (2003) によれば、ある規模・頻度のハザードを計画外力として防災上は設定し、それに対しては被害抑止を目的とした様々な施策が講じられる。しかしながら、それを上回る規模のハザードの発生は低頻度ながら否定できず、これらに対しては防災教育等を行って被害軽減を図ることになる。ただし、それをも上回る巨大ハザードが発生する可能性も否定できず、河田 (2003) はこれを“防災の限界”としている。このように、防災の観点からは小規模かつ高頻度のハザードの側に基点が定められ、段階を追って対応策が定められる。そして、ハザードに対し、いくつかの境界線を設定することで、防災が成り立っていることがわかる。さて、この考え方で問題となるのは、どの規模のハザードまでを想定し、対策の対象とするのかという点である。特に2011年東日本大震災以降、計画外力や防災の限界と考えていたハザード規模の設定を全体的に引き上げる動きがみられる。ただし、どのような種類と規模のハザードが、どの程度の確率で起きうるのかを高い精度で把握できているとは言いがたく、また“防災の限界”として扱うハザード規模についてもコンセンサスが得られているわけでもない。ここに、地質学が担うべき役割があると考えている。

地質学は、地球史の全体像を数億年や数千万年など様々な時間スケールを変化させて把握しつつ、特定の気候・環境変動やイベントに注目して、さらに時間・空間解像度を高めて事象をより詳しく理解しようとする。これは、高頻度から低頻度の順にハザードを評価する防災的思考とは逆の考え方とも言える。全球凍結や巨大隕石衝突等、一般には防災の対象としないような超巨大かつ低頻度のハザードを含む、地球上で起きうるあらゆる規模・頻度のハザードを認識できる可能性があることは、災害研究における地質学の強みであると言える。そのため、近い将来に現実的に起きうるハザードを含め規模・頻度ともに高精度で予測することで、防災対策にも大きく貢献できると考えられる。ただし、高精度の予測が十分に行えているとは言いがたく、さらなる知見の集積や技術開発が不可欠である。

## 引用

河田恵昭：防災学講座，第4巻，40（2003）

Keywords: Disaster, Boundary

## Importance of water quality monitoring for usage of aquifer thermal storage systems in large cities -case studies in Osaka Plain

\*Harue Masuda<sup>1</sup>, Masaki Nakao<sup>1</sup>, Yasuhiro Nakaso<sup>1</sup>, Linri Cui<sup>2</sup>, Shinji Mihara<sup>2</sup>, Koichi Hashimoto<sup>3</sup>

1. Osaka Metropolitan University, 2. Mitsubishi Heavy Industries Thermal Systems, 3. Environment Bureau, Osaka City

地中熱は環境負荷の少ない再生可能熱エネルギーである。中でも、地下水を熱媒体として用い、大規模化が可能であるATES（帯水層蓄熱: Aquifer Thermal Energy Storage）は、欧米で先行して普及している<sup>1)</sup>。一方で、国内では、エネルギー対策への効果が大きいと期待される大都市の多くが、地盤沈下対策のために地下水利用が制限されている海岸平野に立地するため、普及が進まない。ATESでは、冬期に冷却された地下水を夏期の冷房に用い、加温・還水された地下水を冬期の暖房に用いるという循環型の使用（オープンループ）が一般的である。この循環を効率よく行うためには、1) 熱循環の観点からは、停滞的な地下水域であることが好ましく、2) 井戸管理の観点からは、目詰まり事故を誘発する流量や水質変化が起こらないことが好ましい。私たちは、これら2点を水質の観点から評価する方法を確立するために、大阪市と神戸市の沿岸部に設置された施設において、継続的に水質分析を行ってきた。本報告では、それらの結果に基づいて、ATES運用における水質監視の重要性を紹介したい。

大阪市（舞洲の公共施設）では、Dg-2（第2被圧帯水層）とDg-3（第3被圧帯水層）を貫き、パッカーで遮水した井戸（熱源井A・B）を用いてATESを設置した。ATESは2020年5月に冷房用として供用が開始された。10月から2ヶ月間の休止期間を置いて、12月23日に暖房を開始した。この時、Dg-3の地下水は熱源井Aで揚水し熱源井Bに還水、Dg-2の地下水を熱源井Bで揚水し熱源井Aに還水していたが、2021年2月9日に熱源井AのDg-2のストレーナー部分に目詰まりが発生した。事故前後で、酸化還元電位・溶存酸素・溶存鉄濃度のみに変化が見られたことから、大気が配管に流入することによって、井戸と配管内部が一時的に好気的環境となり、溶存鉄が酸化・沈澱したことが明らかであった。また、目詰まり事故発生2週間前には沈殿が始まっていたと推定された。さらに、この事故に伴って、熱源井A内部でDg-2の地下水がDg-3へ流入し、本来は淡水であったDg-3の地下水に高濃度の塩水（海水の10分の1程度）が混入することとなった。事故後は井戸を使用しない状態で放置し、7月27日に採水・水質分析を行ったところ、井戸～配管で還元反応が進行し、目詰まり状況が改善されていた。そのことから、冷房運転を開始した。井戸内部での還元反応はその後も進行し、10月には鉄は溶解して沈澱は見られなくなった。以上のことから、井戸と配管を大気と遮断して放置しておくことで、自然的に還元状態が回復したことが明らかであった。特に、夏期の気温上昇に伴って配管内の生物活動が活発化することにより還元反応が促進されたと推定された。停滞的かつ還元的な状態で溶存鉄を多く含む水質の地下水を用いたATESでは、還元的環境を保つことが、井戸運用では必須である。また、水質の異なる複数の帯水層を貫く井戸を用いる場合には、地下水混合が起こらないように十分配慮しなければならない。

神戸市に設置されたATESでは、Dg-2の地下水を冷暖房に用いている。運用開始後3年以上経過するが、目詰まり事故は発生していない。しかし、地下水水質の季節変動が観測されており、春期に酸水酸化鉄の安定領域近くまで酸化還元電位が上昇する現象が観察される。この時、わずかではあるが、地下水中に懸濁物が観察される。塩化物イオン濃度の変動も伴うことから、帯水層内で異なる水質を持つ2種類の地下水が自然的要因によって混合割合を変えて井戸内に流入することを示している。このことは、帯水層に貯留した熱が自然的に失われる可能性があることを示唆している。水質分析結果から、熱エネルギーの損失が許容範囲を評価できる可能性がある。

地中熱利用において、地下水質は軽視されがちであるが、ATES施設の適正管理の一環として水質監視を運用開始前から行うことが望ましい。ATES設置による環境影響評価に関する研究は少ない<sup>2)</sup>。しかし、遠隔地や近隣の異なる帯水層への環境影響評価の観点からも水質監視をすることが望まれる。

引用文献： 1) Fleuchaus, P., et al, 2018. Renewable and Sustainable Energy Reviews 94, 861–876; 2)

Sommer, W.T., et al., 2014. Hydrogeol J 22, 263–279.

Keywords: Renewable energy, ATEs (Aquifer Thermal Energy Storage), Redox reaction, stacking of well screen, effective utilization of groundwater

# Marine biodiversity in the Anthropocene

\*Moriaki YASUHARA<sup>1</sup>

## 1. The University of Hong Kong

海洋における人新世の気候変動の影響は陸域における暴風雨や山火事のようにはっきりとは目に付かないかもしれない。しかし、海水の温度、酸性度、酸素含有量の少しの変化が海洋生物に大きな影響を与えうる。種によっては移動することによってこのような変化に対応するが、移動能力の低い生物は変化に適応するかさもなければ絶滅する。このような異なる気候変動への対応を無数の種がとることにより近い将来、例えば数世紀先、の生物群集・生物多様性の構造が決定される。しかし、断片的な歴史資料や長くとも20年程度に限られる生物学的なモニタリングからこのような過去、現在、未来の生物多様性・生物群集構造の趨勢や気候変動との関わりを理解することは非常に難しい。そこで、一つのアプローチとして、堆積物コア中の化石記録を過去の生態系を見、将来に備えるための「タイムマシン」として使うことが挙げられる (Yasuhara et al., 2020a; Yasuhara and Deutsch, 2022)。このような方向性の研究を生物学的な観測データ・研究と比較することにより、海洋の温暖化がドミノ効果的な種の高緯度方向への移動を引き起こしていることがわかってきた。つまり、海洋温暖化と溶存酸素量の低下により、熱帯域の種は過剰な高水温とそれに伴う低酸素環境を避け中緯度域に移動し、中緯度域の種はさらに高緯度に移動する、そして極域の種は逃げ場がなく絶滅するかもしれない (Yasuhara and Deutsch, 2022)。この結果、熱帯域の多様性は低下し、中緯度域にピークを持つ二峰性の多様性の緯度勾配が発達する (Yasuhara et al., 2020b)。極域の多様性は低緯度域からの種の流入によって高められるが、極域の固有種は高い絶滅リスクにさらされる。このような大規模な生物多様性・群集構造の再編成はすでに最終氷期以降の温暖化期、つまり、産業革命以前から始まっており、人新世の二酸化炭素排出により加速している。熱帯域の海水温は現在すでに海洋生物にとって高すぎるレベルにあり、熱帯域の種多様性の低下が生物学的な観測データからもすでに検出されている。近い将来のさらなる人為的温暖化は熱帯の生物多様性がかつて過去数百万年間無かったレベルまで低下させるかもしれない (Yasuhara et al., 2020b)。

## 参考文献

Yasuhara, M., Huang, H.-H.M.Š, Hull, P., Rillo, M.C., Condamine, F.L., Tittensor, D.P., Kučera, M., Costello, M.J., Finnegan, S., O' Dea, A., Hong, Y., Bonebrake, T.C., McKenzie, N.R., Doi, H., Wei, C.-L., Kubota, Y., Saupe, E.E., 2020a. Time machine biology: Cross-timescale integration of ecology, evolution, and oceanography. *Oceanography*: 33(2), 16–28.

Yasuhara, M., Wei, C.-L., Kucera, M., Costello, M.J., Tittensor, D.P., Kiessling, W., Bonebrake, T.C., Tabor, C.R., Feng, R., Baselga, A., Kretschmer, K., Kusumoto, B., Kubota, Y., 2020b. Past and future decline of tropical pelagic biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*: 117, 12891–12896.

Yasuhara, M., Deutsch, C. A., 2022. Paleobiology provides glimpses of future ocean: Fossil records from tropical oceans predict biodiversity loss in a warmer world. *Science*: 375 (6576), 25–26.

# The future global environment contributed by geology: ocean acidification and foraminifera

\*Azumi KUROYANAGI<sup>1</sup>

1. Tohoku Univ.

人類活動起源による大気中の二酸化炭素濃度の増大により、海洋酸性化が急激に進行している。産業革命以降、pHは既に0.1以上低下しており、今世紀末までに海水pHは現在の8.05 (SWS)から8.0 (SSP1)~7.7 (SSP5)以下まで減少することが予想されている (IPCC, 2021)。この海水のpH低下により、炭酸カルシウムの飽和度が減少するため、海洋の炭素固定を担う石灰化生物にとって、多大な脅威となることが様々な研究結果より指摘されている (Kawahata et al., 2019)。さらに、温暖化による海水温上昇により、共生藻の光合成が阻害されるなど、その影響はさらに加速されることが予想される (Kroeker et al., 2013)。

地質学において有孔虫は、年代決定に用いられるとともに、炭酸塩の殻に生息当時の環境を記録するため、環境推定にも広く用いられている。現在の海洋において、浮遊性有孔虫は外洋炭酸塩生産の23-56%、海洋表層から海底への炭素フラックスの32-80%を担う (Schiebel, 2002)。そのため、有孔虫の炭酸塩殻生産量が環境によりどのように変化するかを検証することは、将来の地球上の炭素循環や炭素収支を考える上で、重要である。

将来の海洋酸性化が有孔虫の炭酸塩殻形成に及ぼす影響を検証するため、サンゴ礁棲大型底生有孔虫を異なるpH環境下で10週間飼育した。飼育に用いたのは、無性生殖後の *Amphisorus kudakajimensis* の122個体で、アラゴナイトより溶解しやすいHigh-Mg calciteの殻を形成する。飼育の結果、検証された pH 7.7- 8.3 (NBS scale) の範囲では、石灰化率は、pHの減少とともに低下する傾向を示した。よって産業革命以降、自然界では既に有孔虫石灰化量が減少していることを示唆している。一方で、pH 7.9 (pH 7.74, SWS) までの範囲であれば、現在の石灰化レベルを維持可能であるが、日常的にpH 7.7 (pH 7.54, SWS)付近まで下降した場合には、サンゴ礁域の大型底生有孔虫にとって大きな打撃を受けることになる可能性が大きい (Kuroyanagi et al., 2009)。炭酸塩殻への詳細な影響についてさらに検証するため、マイクロX線CTを用いて、1 μm以下の解像度で前述の有孔虫殻の体積を測定した。その結果、pHの減少に伴い、有孔虫殻の体積および密度の両方が減少していることが明らかになった。つまり、pHが7.7 (NBS scale)まで減少した場合、体積と密度はそれぞれ35%および15%減少し、殻重量としては45%と半減することが明らかとなった (Kuroyanagi et al., 2021)。また前述の通り、海洋酸性化とともに海洋温暖化も重要な懸念事項となっている。将来の水温上昇への影響を検証するため、水温を変化させた飼育実験では、殻の体積は変化する一方で、密度は変化しないことが明らかとなった (Kinoshita et al., 2021)。飼育水温が、最適水温である25°Cから、29°Cへ上昇すると大型底生有孔虫 *Sorites orbiculus* の殻重量は28%低下した。以上から、IPCCのSSP5では、海洋酸性化と温暖化により、世界の海洋の中で最も感受性の低いとされる熱帯域でも、今世紀末にはサンゴ礁有孔虫の炭酸塩生産量 (現在の年間炭酸塩生産量; 4300万トン) に大きな影響を与えることが示唆される。これらの飼育実験結果に加え、地質時代のPETMのような、急激な海洋酸性化や温暖化の時期に起きた生物応答は、これからの地球環境予測の貴重な判断材料となる。地質学的データを基に、今後の地球環境変遷についての考察を深めていくことが期待される。

## References

- Kawahata et al.(2019) *Prog Earth Planet Sci.* **6**, 5  
Kinoshita et al.(2021) *Mar. Micropaleontol.* **163**, 101960  
Kroeker et al. (2010) *Ecology Letters* **13**,1419-1434  
Kuroyanagi. et al. (2009) *Mar. Micropaleontol.* **73**, 190-195  
Kuroyanagi et al. (2021) *Scientific Reports* **11**, 19988  
Schiebel (2002) *Global Biogeochemical Cycles* **16**, 1065

Keywords: ocean acidification, foraminifera, warming

3:00 PM - 3:15 PM (Mon. Sep 5, 2022 1:30 PM - 5:45 PM oral room 2)

[2oral213-27-7add] Break

## “Boundary” studies in geology: Now and then

\*Yukio Isozaki<sup>1</sup>

1. University of Tokyo

地質学は、地球に産する多様な岩石や地層の記載と分類を基礎として発展してきた。特に岩石・地層・化石などの物質研究を通して、さまざまな地質単元が識別され、異なる単元間の境界が注視されてきた。とくに、断層、不整合、あるいはマグマの貫入面などの明瞭な物質境界についてその形成過程が考察され、基本的な地質学的概念が導かれた。これらは「相接する花崗岩と礫岩との境界」という単純な記載以上に、各々の物質境界に新たな科学的意義を付加された古典的例である。さらに、より広い時空間の理解のためにさまざまな地質学的な抽象概念が認識されるようになり、地質年代の区分や古生物地理区の識別のために境界が想定され、また造山運動という長時間に及ぶ地質過程についても空間的な境界や変動時階の時間的な境界が議論されるようになった。このように地球表層に産する様々な物質単元とそれらに由来する抽象概念について、地質学者は200年以上研究し続けてきたわけだが、常に「境界」の認識とその意義付けに異常な注目を注いできたと言えなくもない。基本的に200年前から同じ場所にはほぼ同じ岩石・地層が分布するが、最近の半世紀には、ほぼ全ての岩石・地層がプレートテクトニクスの視点から記述、分類、そして説明されている。特に近年では目覚ましい技術革新の恩恵のもと、かつては観察不能だったマイクロあるいはマクロの世界の詳細が詳らかになり、地質学者に認識できる時空間が大きく拡大した。「境界」認識における時間・空間分解能や記述精度の飛躍的な向上は目覚ましい。さらに、研究対象は地球以外にも及ぶようになり、月や隕石はもとより、火星や金星、さらに太陽系外の惑星もが地質学の研究対象とみなされるに至った。このような大変化が起きている現在においても、「境界」研究が地質学において重要であることに変わりはない。特に、肉眼で見え、また指し示せる具体的な「物質境界」のみならず、視覚では認識できない抽象概念においても「境界」の認識と定義が不可欠で、結局それらがこれまでの研究においても新たな探索の契機となってきたように思われる。地質学における境界認識・解釈は多くの研究者にとって、古くて新しい重要な問題であると言えるだろう。今回のシンポジウムでは、ご招待した多方面・多分野の俊英達によって最先端研究課題における「境界」問題についての話題が提供され、鋭い議論がなされることを期待する。演者自身が関わった「境界」研究の対象を整理してみると、層状チャート中のコノドント化石帯境界に始まり、異なる付加体間（地体構造）の境界、古海洋の遠洋深海でのredox境界、古海洋での炭素固定モードの境界、古地磁気の逆転パタンの境界、堆積盆地の後背地変遷の境界、大量絶滅原因の階層性、東アジアの地体区分などなど、多様な事象について固有の難問に悩み続けてきた記憶がよみがえる。それでも、難問山積みの「境界」問題にこそ地質学の醍醐味があると考えたい。

Keywords: geology, material boundary, abstract concept, cutting-edge research, perspective

# A boundary study in making discrimination diagrams for detrital zircon

\*Yusuke SAWAKI<sup>1</sup>

## 1. The University of Tokyo

花崗岩は惑星地球を特徴づける岩石の一つであり、その成因を明らかにするために数多の研究が為されてきた。上部大陸地殻は概ね花崗岩質であるとされるが、大陸形成史の解明において碎屑性ジルコンが2000年代以降注目を集めている。砂岩中に含まれる碎屑性ジルコンの大半は花崗岩由来であり、その年代頻度分布から、過去には花崗岩形成時期にいくつかのピークがある事が明らかになってきた(Rino et al., 2008)。これに加えて、ジルコンを供給した母岩組成などに関する情報も得る事ができれば、大陸形成史の理解がさらに深まると期待できる。花崗岩を分類する方法は多々あるが、本研究では花崗岩をI-, S-, M-, A-型に分類する方法に着目し、各型に含まれるジルコンの化学組成を調べ、母岩の違いを反映する元素の特定を行い、ジルコンの母岩推定図の作成を試みている。この判別図を作成するにあたって、2度の境界問題に直面する。1度目は母岩をどのような基準に沿ってI-, S-, M-, A型に分けるかであり、2度目は得られたデータから判別図を作成する際、どこに境界を引くかである。最初に提案されたI-, S型は、オーストラリア・ラクラン褶曲帯に露出する花崗岩のうち、堆積岩の寄与が少ないものと多いものに対して使われたのがその始まりである(Chappell and White, 1974; White and Chappell, 1977)。その中では花崗岩の構成鉱物(Ca角閃石-白雲母)、Na濃度、Al濃度、Sr同位体比や捕獲岩等が分類時に重視され、これを多くの研究者が他の岩体にも適用した。その際、両型にまたがる性質を示す花崗岩も存在し、その都度分類指標の見直しが繰り返され(Chappell and White, 2001)、一般化されたような印象を受ける。1979年にM-, A型が追加された(Loisell & Wones, 1979; White, 1979)後も、各型の特徴は洗練されつつあるものの、一つの花崗岩が複数の型の性質を示してしまう問題は解消されていない。そのような状況下において、本研究ではアルカリ岩をA型に分類し、非アルカリ岩をSr同位体比に基づいてM-, I-, S型に分類した。その際重視したことは結晶分化による影響を受けにくい指標である。

上記分類に基づいてジルコンの化学組成を眺めた時、NbもしくはTaとCe濃度に基づいて、上記4型中のジルコンが上手くわかれる事が明らかになった。想定されるメカニズムは以下のとおりである。A型ではマグマ中でのジルコン晶出が早いために、上記元素が他の鉱物に吸収される前にジルコンに分配されるために濃度が高くなる。反対にS型ではマグマ中でのジルコン晶出が遅く、先に上記元素が他の副次鉱物に吸収されてしまうためにジルコン中濃度が低くなる。M-, I型中のジルコンはA型とS型の中間に位置する。M型とI型で若干のNb及びTa濃度に違いが見られ、それは母岩が取り込んだ堆積岩量を反映していると思われる。メカニズムが想定されつつも互いに領域が重複している部分も存在し、明確な境界線を引くことは難しい。現状は確立頻度分布を用いて統計学的に境界を引いているがその妥当性については再検討の余地が残る。

境界を定めるとき、数字で分けるのが簡便であって、分ける事自体には議論の余地はさほどなくなるが、数値そのものにそれほどの意味を込められない事が多い。一方であまりに意味を持たせた境界を用いると、その適用範囲に対して議論の余地が生じる。いつ何時も使える完璧な境界は存在しないため、その時々目的に応じた使い分けが大事だと思われる。

[引用文献] Rino et al., (2008) *Gondwana Research*, **14**(1-2), 51-72. Chappell and White, (1974) *Pacific Geol.*, **8**, 173-174. White and Chappell, (1977) *Tectonophysics*, **43**(1-2), 7-22. Chappell and White, (2001) *Australian journal of earth sciences*, **48**(4), 489-499. Loisell & Wones, (1979) *GSA Abstracts with Programs*, **11**, 468. White, (1979) *GSA Abstracts with Programs*, **11**, 539.

Keywords: Granite, Zircon, Trace elements

## Boundaries in metamorphism, the scale conundrum

\*Tatsuki Tsujimori<sup>1</sup>

1. Tohoku University

「地質学は物質境界、時間境界、さらに抽象概念としての境界など多様な境界の認定とその意味を考察してきた学問分野である」——変成岩と変成帯、そして変成作用を取り扱う研究者の多くも、多様な物質境界と時間境界の解釈に明け暮れてきたのかもしれない。例えば、古典的な変成岩岩石学のアイソグラッドの概念は、変成帯に記録された見かけの温度構造の地理空間情報の視覚的な表現の1つである。高圧変成帯ではアイソグラッドの情報を元に、スラブ深部の物質の熱構造が議論されてきた。また、変成岩の年代と構造の大きな不連続性は変成帯の境界を定義し、造山帯の発達機構と造山運動サイクルを解釈するための1つの重要な標識の役割を果たしてきた。地理空間のなかで明瞭な境界線を認定することではじめて、変成帯の研究がプレート収束域の様々な物理現象について地質学的制約条件を与えることに役に立ってきたといえる。ところが、変成作用に関するさまざまな境界は、時間と空間スケールの問題を無視することができない。今日、科学とテクノロジーの進歩によって、変成岩の記載がナノスケールまで迫れるようになり、化学組成のような高次元データも大きく変数が増えてきたものの、我々は未だに変成帯の空間的な連続性を定めることに苦勞し、ある標本に含まれる変成鉱物の斑状変晶1つが成長に要した時間や速度を十分に制約できていない。本講演では変成作用に関する境界の歴史を振り返りつつ、スラブ-マントルウェッジ境界の地質学的な手法に基づく物質境界研究の話題を提供したい。

定常的な海洋プレート沈み込み帯において、前弧域マントルウェッジ深部はスラブとディカップリングしており、比較的低温の状態で蛇紋岩化したかんらん岩が滞留していると考えられている。しかし、蛇紋岩を直接年代測定できないため、前弧域マントルウェッジ深部がどの程度のタイムスケールで滞留できるのか分かっていない。前弧域マントルウェッジ深部で形成する特殊な高圧変成岩としてひすい輝石岩が存在する。最近著者らの研究チームは前弧域マントルウェッジ深部で形成するひすい輝石岩を見直すことで前弧域マントルウェッジ深部の静的な状態のタイムスケールの束縛に取り組んでいる。例えば、西南日本では約2億年間、前弧域マントルウェッジ深部で蛇紋岩化したマントルかんらん岩と静的な状態を経験し、スラブ由来の高圧変成岩が取り込まれて蛇紋岩メランジュを形成するタイミングで新しい交代作用を経験したことを見出した。現状で前弧域マントルウェッジ深部は高圧変成帯の上昇のような非定常的な地質イベントが起こらない限り、静的な状態を2億年近く保てる可能性があると考えている。

Keywords: Metamorphic rocks and metamorphism, Scale conundrum, Slab-mantle wedge boundaries, Boundaries in metamorphism

# Tipping point of water and carbon cycles in the Earth' s interior

\*Ikuo Katayama<sup>1</sup>

1. Hiroshima University

地球史を通じて安定的な表層環境がこれまで維持されてきたのは、地球内部での水と炭素循環の動的な平衡が維持されてきたからである (e.g., Tajika and Matsui, 1992; Kasting and Holm, 1992)。とくに炭素循環は、ウォーカーフィードバックにより表層での気候の安定化に寄与し、40億年以上ものあいだ地球が水惑星として存在する大きな要因となったと考えられる。炭素は、火山による脱ガスにより地球内部から放出される一方、海洋プレートに取り込まれた堆積物の沈み込みによって地球内部へと運び込まれる。この地球内部での炭素の放出と吸収の動的平衡が成立すること、そして地球史を通じた太陽放射の変化に対応することで地球表層での安定的な環境が維持されてきた。しかし、物質循環の駆動力である地球内部の熱源は地球史を通じて減少し続けており、プレートテクトニクスの抑制や停止によって未来の地球ではこの動的平衡が破綻する可能性が高い。現在の地球においても、温度低下によりプレートの脆性領域が広がるなど、動的平衡が破綻する兆候が見え始めていると考えられる。近年の地球物理観測では、海溝付近のプレートが折れ曲がるアウターライズ領域において、引張場での断層形成により海水がマントルまで浸透している証拠が数多く報告されている (e.g., Grevemeyer et al. 2018)。マントルと炭素が高い親和性をもつことから、そのような断層沿いでは炭酸マグネシウムの形成など海水中の炭素がマントルへ固定化されると予想される。その場合、従来想定されていた以上の多量の炭素が地球内部へと取り去られることで、現在の地球においてもすでに炭素循環の動的平衡が破綻しているのかもしれない。これまで地球システムとしての物質循環と自己調整機構によって安定的な表層環境が維持されてきたが、現在は大きな転換期を迎えており、不可逆で不安定な状態に移行していると考えられる。本講演では、最新の地球物理観測や実験データに基づいてこの仮説を検証するとともに、地球システムでの水と炭素の動的平衡が破綻する場合にどのような地球環境変動が待ち受けているかについて議論したい。

Grevemeyer, I., Ranero, C., and Ivandic, M. (2018) Structure of oceanic crust and serpentinization at subduction trenches. *Geosphere* 14, 395–418.

Kasting, J. and Holm, N. (1992) What determines the volume of the oceans? *Earth Planet. Sci. Lett.* 109, 507–515.

Tajika, E. and Matsui, T. (1992) Evolution of terrestrial proto-CO<sub>2</sub> atmosphere coupled with thermal history of the earth. *Earth Planet. Sci. Lett.* 113, 251–266.

Keywords: Earth' s interior, Water cycle, Carbon cycle, Dynamic equilibrium, Environment

# Fluid-rock boundaries: Dynamic petrology coupled with reaction and fracturing

\*Masaaki Uno<sup>1</sup>

## 1. Tohoku University

岩石と水の境界は、地震発生やマグマ生成など地球内部の動的な現象の現場である。従来、変成岩や深成岩などの完晶質の岩石は静的な場で、百万年スケールで温度と圧力に応じて静々と反応するというイメージが主流であった。しかしながら近年、岩石と水の境界である反応帯や鉱物脈では、数百年から数年、さらには数時間程度のかなり短時間の破壊や流体移動、反応輸送現象を読み解くことが出来るようになってきた(e.g., John et al., 2013; Beinlich et al., 2020 Nature Geoscience).

例えば、地殻深部で形成された高温変成岩中の鉱物脈は10時間程度の短時間の流体活動を記録しており、火山下の深部低周波地震や群発地震など現在進行中の地球物理現象と比較できるようになってきた(Mindaleva, Uno et al., 2020 Lithos). また、かんらん岩とH<sub>2</sub>OやCO<sub>2</sub>との反応は、体積膨張を伴うため、破壊や変形を引き起こす。最新の室内実験では、かんらん岩と水の反応組織（メッシュ組織）は、反応によって岩石が破壊して、水の流れや反応が加速された結果、形成された組織であることがわかってきた(Uno et al., 2022 PNAS).

また、地質学において岩石と水の反応は、多くの場合、反応後の物質しか手に入らず、反応前の物質は分からない、そのため反応プロセスが分からない、ということがよくある。近年の地球化学と機械学習の発展によって、反応前の物質（＝原岩）の化学組成を、反応後の岩石の化学組成から復元出来るようになってきた(Matsuno, Uno et al., 2022 Sci. Rep.).

鉱物脈をみてあなたは何年でできたと思うだろうか？蛇紋岩のメッシュ組織からどんな反応プロセスを想像するだろうか？変質した玄武岩からもとの岩石を想像できるだろうか？時間と空間の限界に挑戦する、岩石-水反応の動的な描像をお伝えしたい。

### 【引用文献】

John et al. (2012) Nature Geoscience, 5, 489–492.

Beinlich et al. (2020) Nature Geoscience, 13, 307–311. Mindaleva, Uno et al. (2020) Lithos, 372–373, 105521.

Uno et al. (2022) Proceedings of the National Academy of Sciences, 119 (3) e2110776118.

Matsuno, Uno et al. (2022) Scientific Reports, 12 (1) 1385.

Keywords: fluid-rock reactions, duration of fluid activities, crustal fracturing, permeability, geochemical machine-learning

# Energy aspect of the oxidation of ocean-atmosphere

\*Masafumi Saitoh<sup>1</sup>

## 1. The University of Tokyo

好気性細菌や後生動物が行う好気呼吸に不可欠な分子酸素は、シアノバクテリアやこれに由来する葉緑体が行う酸素発生型光合成によって生成し、地球史における地球と生命の共進化の象徴として理解されてきた (Lyons et al., 2014など)。大気海洋の酸化史については数多の先行研究の集積があり、この中で重要な役割を担ってきた酸素発生型光合成はシアノバクテリアの誕生とともに開始されたと考えられている。この開始時期の推定には幅があるが、地質記録からは約30-27億年前と考えられている (Planavsky et al., 2014など)。光合成の本質は、標準状態にて安定な二酸化炭素と水からより不安定な有機物と分子酸素の対をつくることによって、太陽エネルギーの一部を化学エネルギーとして保存することである。好気呼吸では、有機物と分子酸素の間の酸化還元反応を行うことによってこのエネルギーを解放し、その一部を使ってATPを合成する。化石燃料の燃焼も同様で、解放されたエネルギーの一部を車や蒸気機関車の運動エネルギーや電気的なエネルギーに変換している。このようにして解放されたエネルギーは、地球表層のエネルギー循環に取り込まれ、最終的には赤外線として宇宙空間へ放射される。

エネルギーという観点からみると、大気海洋の酸化史とは、光合成によって地球史を通じて保存されてきた太陽エネルギーの「一つの側面」と理解される。現在の大気には20.95%の分子酸素が含まれるが、これはすなわち、地球史を通じて（少なくとも）これに相当する量の有機物が埋没し、そしてこれに相当する量の太陽エネルギーが地球に保存されてきたということに他ならない。しかしこれまでに、具体的にどれほどの量の太陽エネルギーが光合成を介して地球に保存されてきたかを定量的に見積もった例は多くない。

そこで本発表ではこちらを試みる。すなわち、現在の地球の大気海洋に存在する分子酸素に相当する量として、どれほどの太陽エネルギーがこれまでに光合成を介して保存されてきたかを近似的に見積もる。このために二つの量を算出する。1つ目は、光合成を介して単位モルあたりの反応で保存される化学エネルギーの量である。こちらは光合成で生成される有機物をグルコースと仮定し、この燃焼熱に基づいて近似的に算出する。2つ目は、現在の大気海洋に存在する分子酸素の総量である。大気海洋（およびオゾン層）に存在する分子酸素（相当）量からは、大気が分子酸素の主要なリザーバーであることが分かるが、この大気海洋間の偏った分子酸素の分配はヘンリーの法則によって部分的に理解される。以上に基づいて、現在の地球の大気海洋に存在する分子酸素に相当する量として、これまでに光合成を介して保存されてきたエネルギーの総量を見積もる。この見積もりはいくつかの仮定を含む近似的なものであるが、この量の大きな感覚をつかむために、現在の地球表層における太陽エネルギーの年間の収支との比較を行う。

また大気海洋に存在する分子酸素の総量からは、これに相当する形で地球史を通じて埋没してきた有機炭素の総量も見積もられる。こちらと、現存する化石燃料の確認埋蔵量や (Friedlingstein et al., 2022など)、岩石圏に存在するケロジェンの総量の推定値などとの比較から (Falkowski et al., 2000など)、有機物の埋没の歴史について考察する。本発表は、大気海洋の酸化史という古くから注目されてきたトピックについて、最新の話題を提供するものではないが、そのエネルギーという側面に光を当てようとする試みである。

## 引用文献

Lyons et al. (2014) *Nature*, 506, 307-315.

Planavsky et al. (2014) *Nature Geosci.*, 7, 283-286.

Friedlingstein et al. (2022) *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 1917-2005.

Falkowski et al. (2000) *Science*, 290, 291-296.

Keywords: the ocean-atmosphere system, redox history, oxygenic photosynthesis, energy

## Temporal variations in extraterrestrial $^3\text{He}$ flux across the Permian/Triassic boundary: Toward a cross-disciplinary approach in earth and planetary sciences

\*Tetsuji Onoue<sup>1</sup>, Naoto Takahata<sup>2</sup>, Katsuhito Soda<sup>3</sup>, Yuji Sano<sup>3</sup>, Yukio Isozaki<sup>2</sup>

1. Kyushu Univ., 2. Univ. Tokyo, 3. Kochi Univ.

日本の付加体中に含まれる中生代の層状チャートは、陸源砕屑物の到達しないパンサラサ海遠洋域で長期間堆積した記録を持つ。一般に層状チャートは、以下の6つの起源物質を構成要素とする混合物とみなすことができる。すなわち、(1) 放散虫などの生物起源物質、(2) 大陸起源物質、(3) 火山性物質、(4) 海水から無機的に沈殿した鉄-マンガン酸化物、(5) 熱水起源物質、(6) 宇宙塵などの地球外物質である。従来の研究では、化学組成分析や微化石年代をもとに上記(1)～(5)の構成要素の寄与率や期間を求めることで、高い時間解像度での古海洋環境の復元が行われてきた。一方、上記(6)については、白金族元素濃度とオスミウム同位体分析による研究や、ヘリウム(He)同位体分析[1]による地球外物質流入に関する研究が近年始まっている。このうち、He同位体( $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ )分析については、層状チャート堆積期間(ペルム紀～ジュラ紀)の地球外物質流入量の変動を連続的に復元することが可能であり、これらの物質流入が地球環境に与えた影響や、太陽系の物質進化史を解読するといった新しい研究展開も期待できる。本発表では、このHe同位体分析について、美濃帯のペルム系～下部三畳系層状チャートを対象とした最近の研究結果を中心に紹介する。

研究対象は、美濃山地西部舟伏山地域の美濃帯ペルム系上部グアダルピアン(キャピタニアン)～下部三畳系層状チャートである[1, 2]。He同位体分析は、(1) バルク分析、(2) バルク試料の段階加熱分析、(3) 酸処理試料を用いた段階加熱分析を行なった。

検討の結果、バルク分析で得られた $^3\text{He}$ 濃度は、ペルム紀キャピタニアンからチャンシンジアンにかけて増加する傾向がみられた。またペルム紀/三畳紀境界より上位層では、 $^3\text{He}$ 濃度は急激に低下した。He同位体比( $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比)は、0.3～0.8 Raの値をとり、全体としては検討セクションの下部から上部に向かって緩やかに低下する傾向がみられた。試料の段階加熱分析では、750-950℃の抽出温度で最も高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が得られた。さらにHF-HCl酸処理したものを段階加熱した結果、750-950℃の抽出温度で、地球外物質に特徴的な100 Raを超える $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比も検出された[1]。

本研究の結果、試料中の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が地殻岩石中でのHeの生成比(0.02 Ra)より高い値を示すこと、また地球外 $^3\text{He}$ のホスト鉱物の分解温度である750-950℃の抽出温度において、高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を示すことから、検討した試料に含まれる $^3\text{He}$ は、主に地球外起源であることが示された。 $^3\text{He}$ 濃度および $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比から地球外由来の $^3\text{He}$ 濃度の変動を見積もると、キャピタニアンからチャンシンジアンにかけて増加傾向にあることが明らかになった。この地球外 $^3\text{He}$ 濃度の増加については、地球への宇宙塵流入量増加のほかにも、堆積速度の低下によっても説明できるため、今後は美濃帯のペルム系層状チャートを通じた堆積速度との比較検討が必要である。一方、堆積速度が求められているチャンシンジアンの層状チャート[1]について地球外 $^3\text{He}$ フラックスを計算すると、ペルム紀末の約50万年間は、フラックスが前の時代に比べて約4倍増加したことが明らかになった。地球外物質流入量の増加期間には、ペルム紀放散虫化石種の絶滅が知られていることから、今後は地球外物質の大規模な流入が地球環境に与えた影響について、詳しく検討を進める必要がある。

引用文献 [1] Onoue, T. et al. 2019. *PEPS*, **6**, 18; 高畑ほか, 2019. 地学雑誌, **128**, 667-679. [2] Onoue, T. et al. 2021. *Front. Earth Sci*, **8**, 685.

Keywords: Permian, Triassic, He isotope, bedded chert, Interplanetary dust particle

# Current Status of Geologic Age Boundary Determination in the Pleistocene

\*Makoto Okada<sup>1</sup>

1. Ibaraki University

GSSPは、陸上地質においてグローバルな地層の対比を行うための基準となることから、示準化石（多くは海洋プランクトン化石）を豊富に含む必要がある。すなわち、陸上で見られる海成層であることが条件だ。ここではグローバルな変動を捉えている必要があるため、地磁気の極性や海洋酸素同位体比もしくはそれに類似するグローバルな変動記録を保持することが必須となる。チバニアンGSSPの批准で話題となった下部-中部更新統境界では、最後の地磁気逆転である松山-ブルン境界(MBB)が基底層位の目安とされた。そして実際のGSSPは千葉セクションにおいてほぼ唯一の視認可能な層である白尾火山灰層(Byk-E)の下面に設置された(Suganuma et al., 2021)。Byk-E層は質の高い古地磁気記録で示されるMBB層位より約1.1m下位に挟在しており、基底層位の目安であるMBBとの関係性も明確である。海洋微化石記録および詳細な酸素同位体変動記録も得られており、グローバル対比の基準としての責を十分に果たしうる。さらにByk-E層の堆積年代は、放射年代測定および酸素同位体変動記録を用いた天文年代較正という2つの独立した手法から求められており、信頼性の高い境界年代も提供した。

一方、第四系（更新統）の基底層位は、その目安がガウス-松山地磁気逆転境界(GMB)とされており、シチリア島モンテ・サン・ニコラセクションのジェラシアンGSSPによって定義されている(Rio et al., 1998)。実際のGSSPは、ニコラ層と呼ばれる腐泥層と直上を覆うマール層との境界面に設置された。地中海周辺域では、北半球高緯度夏の日射量が最大となるタイミングでモンスーン強度が上昇し、降水量が増えることで地中海の密度成層が強化され海底に腐泥層が堆積したとされている。このため、露頭面で観察される腐泥層を数えるだけで歳差運動周期のカウントが可能になる上、ある程度の同時性も保証される。このため腐泥層は地中海周辺域において噴火周期が決まっている広域テフラ層の役割を担ってきた。ところが、モンテ・サン・ニコラセクションでは古地磁気記録の報告が少なく、ニコラ層とGMBとの関係性も層厚にして数mの範囲の誤差を含むなど明瞭ではない。さらに浮遊性有孔虫の産出はあるものの、酸素同位体記録が未だに得られていない。現状では他地域で得られた酸素同位体記録と腐泥層との関係を用いて、ニコラ層はMIS（海洋同位体ステージ）104に、直上のマール層はMIS103に対比されている状態であり、第四紀開始年代も含めジェラシアンGSSPによる定義は、極めて間接的な情報をもとになされたといえる。この他、更新統にはかつて更新統の基底を定義したカラブリアンGSSPがある。GSSPは南イタリア・ヴリカセクションの腐泥層である“e”層上面に設置され、現地でも得られた酸素同位体記録よりMIS63/64境界に対比されている(Cita et al., 2012)。しかしGSSP層位の8m上位で見られるオルドバイ正磁極帯上限境界の古地磁気記録は、続成作用の影響を大きく受け境界位置の特定が困難とされる(Roberts et al., 2010)。

上記で述べたように地中海周辺域における腐泥層は地域内対比を行う上で大変有用である一方、古地磁気記録や酸素同位体記録などといったグローバル層序対比に必要な情報が欠如しがちである問題を抱えている。さらに腐泥層堆積のタイミングを日射量ピークと合致させるという年代較正手法についても、その仮定が少しでも崩れると、同様の手法で年代決定された新第三系における多くのGSSPの年代値が影響を受けることになる。こうした問題を回避し地質年代の信頼性を向上させる上で、微化石・古地磁気・酸素同位体など各種のグローバル層序対比に必要な記録を保持した地層の解析が極めて有用といえる。チバニアンGSSPを擁する上総層群を始め、房総半島にはこれらの記録を保持した鮮新統～更新統の地層群が広く分布しており、地質年代研究への貢献が期待される。

参考文献：

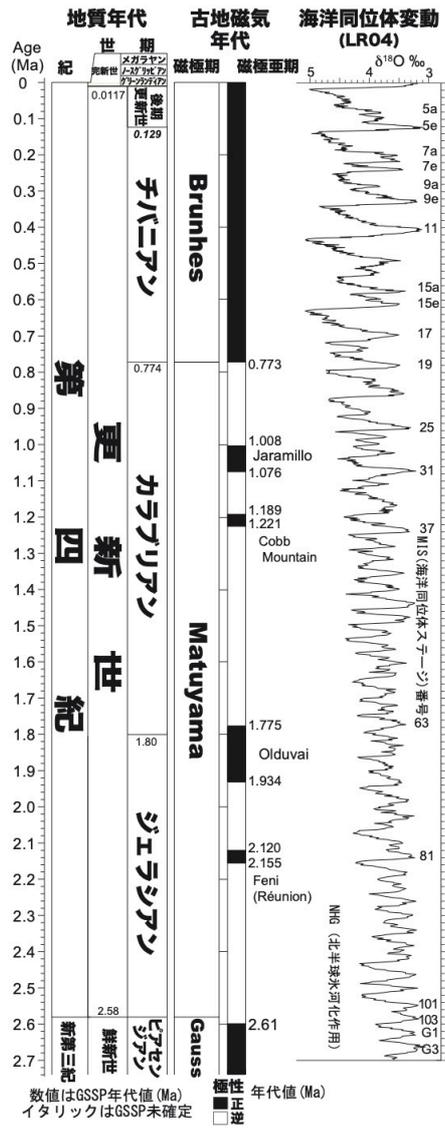
Cita et al. 2012, Episodes 35, 388-397

Roberts et al. 2010, EPSL 292, 98-111

Suganuma et al. 2021, Episodes 44, 317-347

Rio et al. 1998, Episodes 21, 82-87

Keywords: Quaternary, Pleistocene, GSSP, Chibanian, Gelasian



第四紀における地質年代図 (Gradstein et al., 2020より)

# The Anthropocene and river deltas

\*Yoshiki SAITO<sup>1</sup>

## 1. Shimane University

国際科学会議（International Council for Scientific Union: ICSU）が1987年から実施してきた地球圏・生物圏国際協同研究（International Geosphere-Biosphere Programme: IGBP）は、10年が経過した1998年から2003年に、第1期の総括と第2期に向けたコアプロジェクトの再構築を行った。2000年に行われたメキシコでの会議で、副議長のクルッツェン(Paul Jozef Crutzen)は、人間活動は地球や大気に大きな影響を与えており、もはや過去11700年間の完新世ではないことから、突発的にAnthropoceneと発した。18世紀後半以降を人類の時代を意味するAnthropoceneとした（Crutzen and Stoermer, 2000）が、以下に述べる作業部会では1950年頃を完新世と人新世の境界として作業が行われている。

地質年代や地層や時代の名称である地質系統は、国際地質科学連合（IUGS）において定められている。人新世については、国際地質科学連合の国際層序委員会（International Committee on Stratigraphy）の第四紀層序小委員会（Subcommittee on Quaternary Stratigraphy）において、人新世作業部会（Anthropocene Working Group）が2009年に設置され、提案に向けた検討が行われている。IGBPの提案以降、人新世は広く用いられるようになり、地質学的な検討が必要であることからロンドン地質学会が中心となり、作業部会の設立に至っている。人新世作業部会では、人新世は、地質系統のランクでは、世・統が望ましいこと、完新世と人新世の境界は、大加速（Great acceleration）が始まる時期であり、また地球規模で同期した識別が可能である放射性核種がマーカーとして認められる1950年頃をターゲットに、GSSP（Global Boundary Stratotype Section and Point：国際境界模式層断面とポイント）の提案に向けた準備が行われている。現在候補地からの提案の基礎となる資料の準備が行われており、2022年末までに人新世作業部会で投票が行われ、GSSPの候補地が選考される予定である。選ばれた候補地と副模式地は論文として取りまとめられ、第四紀層序小委員会で投票が行われる、6割以上の賛成が得られた場合に、上位の委員会に提案される。今回の提案は、完新世を2分し、人新世を設けることの提案と、GSSP候補地の提案の2つから構成される見込みである。

一方、人類と地球との関係を示した人新世という言葉は、人文社会科学、経済学、哲学など、様々な分野で用いられるようになった。地質学における人新世と最も異なる点は、地質学では地質時代の境界であることから人新世の始まりは世界で同じ時間である必要があること、地域による違いが無い基準が求められることである。人類の影響は地域によって異なり、どのような対象をみるかによっても異なる。それらが始まった年代に同期性はない。人新世が正式に地質時代として認められた場合には、用語の使い方が分野によって異なることを注意する必要がある。

人類が地球環境を大きく変化させ、地球環境は限界に達している（Planetary boundary）と認識され、持続的な地球環境との関係が求められ、SDGsのような行動計画が推進されている。沿岸環境においても1950年以降に急激な変化が世界で起こっている。世界で5億人以上が住み、食物の生産、商工業に大きな役割を担っているデルタは、IPCCの第4次評価報告書で最も脆弱な地域として示された。デルタの問題は、多くは陸域における様々な人間活動に起因するものだが、今後はこれらの変化に加えて地球規模の海面上昇などの影響が加わり、より広域にまた大規模な悪影響が懸念されている。特に脆弱な途上国における沿岸環境をいかにして保全し、持続的に利活用してゆくか、知識や取り組みの共有と国際的な連携が求められている。

Crutzen, P.J. and Stoermer, E.F., 2000. The “Anthropocene”. Global Change Newsletter 41, 17-18.

Keywords: Anthropocene, river delta, coastal environment, human activity