

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02143

研究課題名(和文)水月湖と日本海の精密対比：ダンスガード・オシュガーイベントの原因論をめざして

研究課題名(英文)Precise correlation between Lake Suigetsu and the Sea of Japan: towards understanding of mechanisms of D-0 events.

研究代表者

中川 毅 (Nakagawa, Takeshi)

立命館大学・総合科学技術研究機構・教授

研究者番号：20332190

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,800,000円

研究成果の概要(和文)：若狭湾から新たに採取した連続堆積物コアWB6と、水月湖の年縞堆積物コアSG06に対して火山灰分析と放射性炭素年代測定をおこない、両者を精密に対比することをこころみた。若狭湾コアに対しては有機炭素量と堆積物の明度、および有孔虫の化学組成分析をおこなった。また、水月湖のコアに対しては花粉分析と火山灰分析を実施した。

分析の結果、日本海の海水温と水月湖周辺の陸上の両方から、いわゆるダンスガード＝オシュガーサイクルに対応すると思われる、1000年オーダーの変動が確認された。ただし、変動の振幅は陸上においてはきわめて小さかった。また、最終氷期の最寒冷期は1.7～2万年前ごろに限定されていた。

研究成果の概要(英文)：A newly obtained sediment core from Wakasa Bay, the Sea of Japan (WB) and the annually laminated SG06 core from Lake Suigetsu were analysed for tephra layers and radiocarbon dates, in an attempt to establish precise correlate between those cores. The WB6 core was then analysed for TOC, surface reflectance and foraminifera chemistry. The SG06 core was analysed for pollen and cryptotephra chemistry.

Reconstructed marine and terrestrial environments exhibited millennial-scale oscillations that are most likely counterparts of D-0 events in Greenland. However, the amplitude of the oscillations in the terrestrial environment was much attenuated. The coldest phase of the last glacial was limited to ca. 17-20 ka, which does not correspond to both timing and duration of the minima at the Greenland.

研究分野：古気候学、地質年代学

キーワード：気候変動 水月湖 日本海 高精度対比 火山灰

1. 研究開始当初の背景

気候変動のメカニズムを探るための方法として、堆積物試料を用いた古気候復元はひとつの主流を形成している。とくに近年、同位体分析の技術革新などにより、高品質・高分解能の古気候データが効率的に生産されるようになってきている (Wang et al. 2005; Steffensen et al. 2008 など)。

いっぽう、気候変動を地域ごとに復元するだけでなく、変動のメカニズムにまで迫ろうとする場合には、異なる地域の間で変動の時間的な前後関係を見きわめる必要がある。だが、古気候データを本当の意味で厳密に対比することは容易でない。たとえばグリーンランドの氷床コアの年代軸は、年層の計数によって独立に作られたものであるため、他の地点とは互換性がない (Svensson et al. 2008)。中国の葫芦洞 (Hulu Cave) との間で気候変動の同時性を主張する研究も存在するが (Wang et al. 2001) 対比が気候変動のパターン合わせに依存しているため、これは本質的には循環論である。

有名なカリヤコ海盆の年縞堆積物の年代軸も、古気候データを中国の葫芦洞 (Hulu Cave) にチューニングすることで成り立っているため、変動の前後関係の議論には使えない (Hughen et al. 2004)。また海洋堆積物の年代決定法として広範に用いられる酸素同位体ステージも、軌道強制力に対する氷床の応答時間の仮説を含んでおり、そのままタイミングの比較に用いることはできない。

すなわち、グリーンランドと南極 (Blunier et al. 1998; 2001; EPICA Community Members 2008)、グリーンランドと樹木年輪 (Muscheler et al. 2008) などごく一部の例外を除けば、世界で「代表的」とされる古気候記録のほとんどは、じつは厳密には対比されていないのである。

以上のような現状に対し、近年福井県水月湖の年縞堆積物がブレイクスルーを提供した。水月湖の堆積物には、5万年におよぶ年縞の計数と1000点近い放射性炭素年代により、世界最高水準の時間軸が与えられている。また予察的な実験によれば、水月湖の堆積物には平均500年に一枚程度のマイクロテフラ (肉眼では確認できない火山灰層) が含まれており、これを分析すれば周辺地域との詳細な対比が可能である。さらに、共に放射線生成核種である¹⁴Cと¹⁰Beの濃度変化パターンを比較することでグリーンランドと、また¹⁴Cウィグルマッチングにより葫芦洞と、それぞれ精密に対比が可能である。しかも、水月湖年縞堆積物は花粉分析によって定量的な気候復元が可能であるため (Nakagawa et al. 2003; 2006) 気候変動のタイミング比較の対象としては理想的である。

いっぽう日本海の堆積物は、水月湖と地理的に近く、またグリーンランドのいわゆるダンスガード・オシュガー (D-O) サイクルに

酷似した変動を明暗の互層として記録している (Tada et al. 1999)。これらの変動が、北大西洋に見られるD-Oサイクルと密接にリンクしていることは間違いないと思われるが、詳細なタイミング比較にもとづいた因果関係の検証はまだなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、水月湖と日本海の両方で古気候復元を実施し、両者を火山灰によって精密に対比することで、D-Oイベントがどこで最初に始まり、どのような経路で伝播していったかに迫ることをめざした。

水月湖の堆積物試料のうち3万年前から2万年前までに相当する部分は、いわゆるAT火山灰 (3万年前に噴出) からの再堆積の影響が強すぎるために、マイクロテフラを抽出・同定することが困難である。またD-Oイベントの絶対数も多くない。このため本研究では、水月湖の高精度年代目盛りが使い、かつ急激な気候変動を多く含む1万6000年前~1万年前の晩氷期、および5万年前~3万年前の時代のみを対象とした。この時代について、水月湖では花粉分析による気候復元、日本海では有孔虫のMg/Ca分析による古水温復元、さらに両者についてマイクロテフラ分析を実施することを計画した。復元された水月湖と日本海の気候変動パターンを、マイクロテフラによって詳細に対比することで、i)陸上の気温と日本海の表面水温の変動の時間的な前後関係を復元し、かつii)日本海に見られるD-Oイベント様の変動に対して、水月湖の年代目盛りにもとづく絶対年代を与えることをめざした。

上述のように、水月湖はグリーンランドや葫芦洞と、また日本海の明暗互層は風成塵の濃度ならびに黄河・揚子江集水域の降水量と対比されている。水月湖と日本海が対比されることで、これらの地域も共通の対比ネットワークの中に位置づけることが期待された。

3. 研究の方法

若狭湾沖海底堆積物の採取

2015年6月30日から7月10日の11日間、海洋研究開発機構の研究船がいれい KR15-10次航海にて日本海若狭湾沖の計9地点にて海底堆積物を採取した。本研究では明暗互層が発達し、連続的に堆積したWB6コアを用いた。

年代モデルの作成

若狭湾WB6コアの年代モデルは、16層準から採取した、浮遊性有孔虫の放射性炭素年代によって構築した。分析は米国のウッズホール海洋研究所NOSAMSに依頼した。得られた放射性炭素年代は、Marine13補正曲線 (Reimer et al., 2013) を使用して暦年代に変換した。ローカルリザーバー効果はR=0とした。また、コア深度388.4cmで始良丹沢 (AT) テフラが確認されており、その年

代を水月湖の年縞年代に基づき 30,009 年とした (Smith et al., 2013)。

全有機炭素分析

2 cm 間隔にスライスした若狭湾の堆積物試料をメノウ乳鉢で粉碎した、試料を試験管に移し重量を測定した。塩酸を用いて無機炭素を除去し、中和した後に再度粉碎して、粉末試料を錫カプセルに包んで元素分析計にて分析を行った。

浮遊性有孔虫殻の化学組成

1 cm 間隔にスライスした若狭湾の堆積物試料を開口 63 μm の篩上で水洗し、残渣を 40 μm のオープンで一晩乾燥させた。乾燥試料を 250-355 μm の篩にかけて浮遊性有孔虫殻 100 個体を目安に拾い出した。有孔虫殻は、2 枚のスライドガラスを用いて粉碎した後、顕微鏡下で可能な限り堆積物などの不純物を取り除き、筆を用いて均質化した。均質化された試料をマイクロチューブへ移し、超音波洗浄を施して同位体分析を行った。微量元素分析にはさらに化学処理にて粘土鉱物、金属酸化物、有機物等の除去を行った。

花粉分析

1cm 間隔にスライスした堆積物試料に対し、塩酸処理、水酸化カリウム処理、塩化亜鉛溶液による重液分離、アセトリシス処理をほどこした後、400 倍の光学顕微鏡で化石花粉の同定と計数をおこなった。同定は、Gotanda et al. 2002 によって気候をよく反映すると認定された 32 木本分類群の総数が 400 個体に達するまで実施した。全サンプルをランダム順に分析して、しだいに分析間隔を詰めていった。研究終了時の平均分析間隔は、およそ 3cm であった。花粉分析の結果は、いわゆるモダンアナログ法 (Nakagawa et al. 2002) によって年平均気温に変換した。

火山灰分析

水月湖と若狭湾の両方のコアについて、1cm 間隔にスライスしたサンプルに 25 ミクロンのメッシュ処理をほどこした後、重液分離によって火山ガラスを抽出し (Turney 1998) 顕微鏡観察によっておおまかな記載と同定をおこなった。その後、オックスフォード大学の波長分散型電子顕微鏡 (WDS-EPM) と、ダブリンのトリニティーカレッジのレーザーアブレーション質量分析計 (LA-ICP-MS) を用いて、主要元素と微量元素の両方について分析を実施した。また、九州から北海道までの各地の給源のテフラについても、同様の分析を実施した。

4. 研究成果

有機炭素含有量と堆積物の明度

有機炭素含有量の値は約 1.2-2.8 % の間を変動した。この変動は堆積物の L^* の変動と類似しており、 L^* の値が高いほど有機炭素含有量は低いことが確認された。 L^* と有機炭素含

有量の決定係数は 0.70 となり非常に高い相関関係にあることがわかった (図 1)。このことから、KR15-10 WB6 堆積物コアにおいても先行研究で述べられているように、 L^* の変動は主に有機炭素含有量を反映していることが明らかになった。

浮遊性有孔虫殻の化学組成

浮遊性有孔虫殻の酸素同位体比の値は約 2.4-3.5 ‰ の間を変動しており、その変動パターンは全有機炭素含有量変動とよく似ている。Mg/Ca から復元された水温は、32-48 ka の間は約 3.5-7.8 $^{\circ}\text{C}$ であった (図 3)。また、Mg/Ca 復元水温と酸素同位体比の変動は概ね一致していた。本研究の浮遊性有孔虫殻が水温のみを反映していると仮定すると、酸素同位体比から推測される水温の振幅は約 4.5 $^{\circ}\text{C}$ となり、Mg/Ca によって求められた水温振幅 (約 4.3 $^{\circ}\text{C}$) とほぼ一致した。

花粉分析

グリーンランドや葫芦洞の水期に特徴的に見られる、1000 年スケールの気候の不安定性が、水月湖で復元された気温においても認められた (図 2)。ただし変動の振幅はきわめて小さく、その点では低緯度地域や南半球に見られる気候変動パターンにむしろ近いとも言える結果になった。また、いわゆる最終氷期最盛期は、1.6~2 万年前ごろの、数千年間にとどまった。

火山灰分析

主として大山と三瓶を給源とする、多数の火山灰層が認定された (図 3)。とくに重要な点として、従来は一つの大規模噴火であると考えられていた給源の火山灰層が、水月湖では一定の時間間隔 (数年~数十年) を置いた二つあるいはそれ以上のテフラ層に分かれている場合が多数みとめられた。このことは、災害の規模と頻度という観点、また層序の対比精度という観点からもきわめて重要な発見である。

また、完新世の堆積物を用いた予備実験の

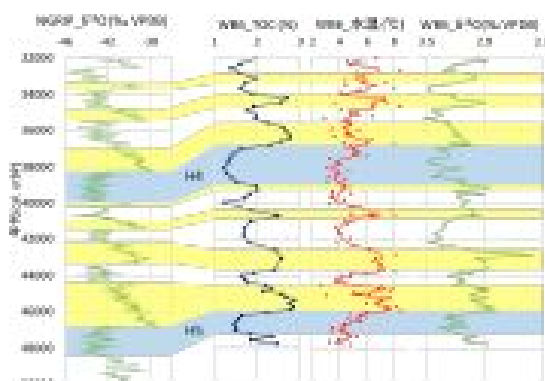


図 1: 若狭湾 WB6 コアの分析結果。いわゆる D-O サイクルに対応する変動がみとめられる (高解像度の図は論文で発表する)。

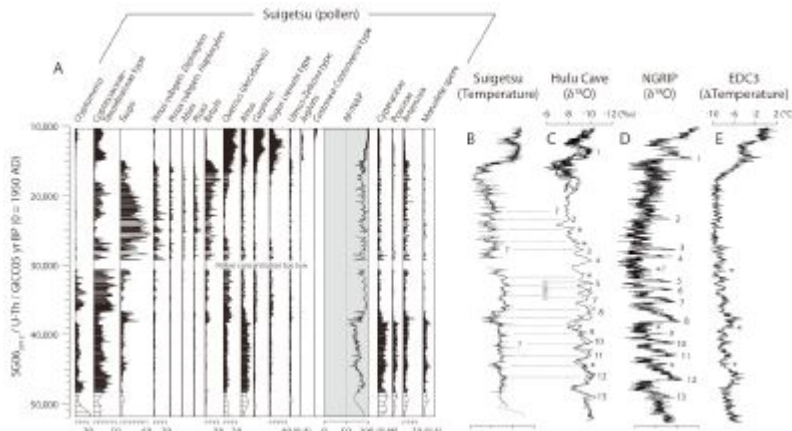


図2:水月湖 SG06 コアの花粉分析の結果。グリーンランドや葫芦洞と一定の類似を示した(高解像度の図は論文で発表する)。

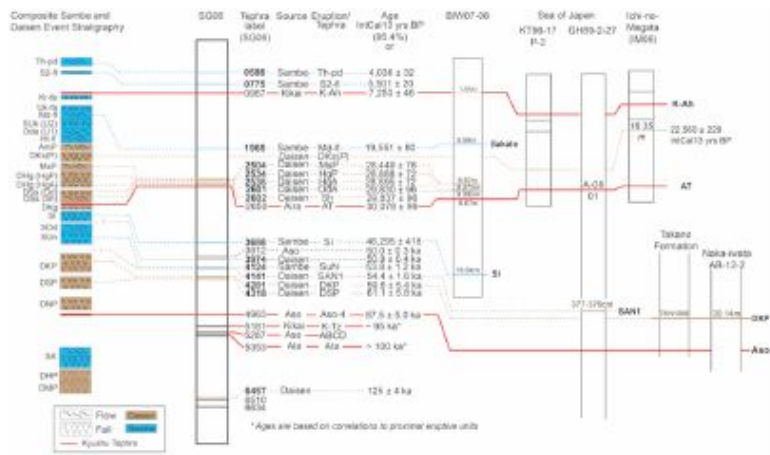


図3:火山灰分析の結果。水月湖と若狭湾を中心に、日本および周辺各地の代表的な堆積物層序を対比することに成功した(高解像度の図は Albert et al. Earth Science Reviews で投稿中)。

副産物として、10世紀の白頭山の火山灰がごく微量ながら検出された。同火山灰はグリーンランドの氷床コアからも報告されており、水月湖とグリーンランドを直接対比する可能性が、この発見によってはじめて実証的に示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計15件)(すべて査読あり)

D McLean, PG Albert, T Nakagawa, T Suzuki, RA Staff, K Yamada, et al. (2018) Integrating the Holocene teprostratigraphy for East Asia using a high-resolution cryptotephra study from Lake Suigetsu (SG14 core), central Japan. Quaternary Science Reviews 183, 36-58.

T Irino, R Tada, K Ikehara, T Sagawa, A Karasuda, S Kurokawa, A Seki, et al. (2018) Construction of perfectly continuous records of physical properties for dark-light sediment sequences collected from the Japan Sea during Integrated Ocean Drilling Program Expedition 346 and their potential utilities as paleoceanographic studies.

Progress in Earth and Planetary Science 5 (1), 23.

R Tada, T Irino, K Ikehara, A Karasuda, S Sugisaki, C Xuan, T Sagawa, et al. (2018) High-resolution and high-precision correlation of dark and light layers in the Quaternary hemipelagic sediments of the Japan Sea recovered during IODP Expedition 346. Progress in Earth and Planetary Science 5 (1), 19.

T Sagawa, Y Nagahashi, Y Satoguchi, A Holbourn, T Itaki, SJ Gallagher, M Saavedra-Pellitero, K Ikehara, R Tada (2018) Integrated teprostratigraphy and stable isotope stratigraphy in the Japan Sea and East China Sea using IODP Sites U1426, U1427, and U1429, Expedition 346 Asian Monsoon. Progress in Earth and Planetary Science 5 (1), 18.

I Kitaba, T Nakagawa (2017) Black ceramic spheres as marker grains for microfossil analyses, with improved chemical, physical, and optical properties. Quaternary International 455, 166-169

G Schlotlout, A Brauer, T Nakagawa, HF Lamb, JJ Tyler, RA Staff, et al. (2017)

Evidence for a bi-partition of the Younger Dryas Stadial in East Asia associated with inversed climate characteristics compared to Europe. *Scientific Reports* 7, 44983.

I Kitaba, M Hyodo, T Nakagawa, S Katoh, DL Dettman, H Sato (2017) Geological support for the Umbrella Effect as a link between geomagnetic field and climate. *Scientific reports* 7, 40682.

M Kuwae, M Yamamoto, T Sagawa, K Ikehara, T Irino, K Takemura, et al. (2017) Multidecadal, centennial, and millennial variability in sardine and anchovy abundances in the western North Pacific and climate-fish linkages during the late Holocene. *Progress in Oceanography* 159, 86-98.

Y Suzuki, R Tada, K Yamada, T Irino, K Nagashima, T Nakagawa, et al. (2016) Mass accumulation rate of detrital materials in Lake Suigetsu as a potential proxy for heavy precipitation: a comparison of the observational precipitation and sedimentary record. *Progress in Earth and Planetary Science* 3 (1), 5.

Y Ujiié, H Asahi, T Sagawa, F Bassinot (2016) Evolution of the North Pacific Subtropical Gyre during the past 190 kyr through the interaction of the Kuroshio Current with the surface and intermediate waters. *Paleoceanography* 31 (11), 1498-1513.

D McLean, PG Albert, T Nakagawa, RA Staff, T Suzuki, VC Smith (2016) Identification of the Changbaishan 'Millennium' (B-Tm) eruption deposit in the Lake Suigetsu (SG06) sedimentary archive, Japan: Synchronisation of hemispheric-wide palaeoclimate archives. *Quaternary Science Reviews* 150, 301-307.

K Nagashima, Y Suzuki, T Irino, T Nakagawa, R Tada, Y Hara, K Yamada, et al. (2016) Asian dust transport during the last century recorded in Lake Suigetsu sediments. *Geophysical Research Letters* 43 (6), 2835-2842.

BAA Hoogakker, 29 other authors, T Nakagawa, et al. (2016) Terrestrial biosphere changes over the last 120 kyr. *Climate of the Past* 12 (1), 51-73

S Tei, H Yonenobu, S Suzuki, M Ohyama, K Gotanda, T Nakagawa, et al. (2015) Reconstructed July temperatures since AD 1800, based on a tree-ring chronology network in the Northwest Pacific region, and implied large-scale atmospheric-oceanic interaction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 435,

203-209.

C Leipe, T Nakagawa, K Gotanda, S Müller, PE Tarasov (2015) Late Quaternary vegetation and climate dynamics at the northern limit of the East Asian summer monsoon and its regional and global-scale controls. *Quaternary Science Reviews* 116, 57-71.

[学会発表](計13件)

I Kitaba, M Hyodo, T Nakagawa, S Katoh, DL Dettman, H Sato: Selective cooling on land supports cloud formation by cosmic ray during geomagnetic reversals. AGU Fall Meeting (2017)

G Schlolaut, A Brauer, HF Lamb, MH Marshall, RA Staff, C Bronk Ramsey, T Nakagawa: A new high resolution glacial flood history from Japan based on the Lake Suigetsu sediment record. EGU General Assembly (2017)

K Kubota, Y Yokoyama, T Ishikawa, T Sagawa, M Ikehara, T Yamazaki: Deglacial Western Equatorial Pacific pCO₂ Reconstruction Using Boron Isotopes of Planktonic Foraminiferas. AGU Fall Meeting (2017)

R Tada, A Seki, M Ikeda, T Irino, K Ikehara, A Karasuda, S Sugisaki, T Sagawa, et al.: Intermittent Occurrence of Millennial-scale Variability of East Asian Summer Monsoon before 1.45 Ma based on the High-resolution Br Record of the Japan Sea Sediments. AGU Fall Meeting (2017)

T Sagawa, T Saito, T Irino: Mg/Ca of planktonic foraminifer *Pulleniatina obliquiloculata* as a thermocline temperature proxy: results from sediment trap experiments in the equatorial Pacific. AGU Fall Meeting (2017)

G Schlolaut, A Brauer, T Nakagawa, H Lamb, M Marshall, M Kato-Saito, et al.: Indications of a pan-hemispheric bi-partition of the Younger Dryas Stadial from Lake Suigetsu, Japan. EGU General Assembly (2016)

K Tsumura, (7 other authors), T Nakagawa: High-resolution paleomagnetic secular variation for the last 20 kyr from varved sediments of Fukui-SG14 core from Lake Suigetsu, central Japan. AGU Fall Meeting (2016)

G Schlolaut, A Brauer, T Nakagawa, et al.: Pan-Hemispheric bi-partition of the Younger Dryas Stadial inferred from a multi-proxy study of the Lake Suigetsu sediments, Japan. AGU Fall Meeting (2016)

R Tada, T Irino, M Ikeda, K Ikehara,

A Karasuda, S Lu, A Seki, S Sugisaki, T Itaki, T Sagawa et al.: Emergence and evolution of millennial-scale variability in the East Asian summer monsoon over the last 3 Ma recorded in hemipelagic sediments of the Japan Sea recovered by IODP Expedition 346. AGU Fall Meeting (2016)

HH Huang, M Yasuhara, H Iwatani, CA Alvarez Zarikian, MA Bassetti, T Sagawa: Benthic Biotic Response to Climate Changes over the Last 700,000 Years, the Sea of Japan: Ostracode Assemblages from Site U1427, IODP Expedition 346. AGU Fall Meeting Abstracts (2016)

HH Huang, H Iwatani, M Yasuhara, CA Alvarez Zarikian, MA Bassetti, T Yamaguchi, K Yamada, T Sagawa, S Toucanne: Glacial/Interglacial variability of deep-sea benthic fauna in the Japan/East Sea over the last 1 million years: ostracode fossil assemblages from the Site U1427, IODP-Expedition 346. 12th International Conference on Paleoceanography (2016)

T Sagawa, A Timmermann, M Tigchelaar, M Murayama, K Okamura: Western Pacific thermocline variability in orbital-and millennial-timescale. AGU Fall Meeting (2015)

CA Alvarez Zarikian, MA Bassetti, S Toucanne, T Sagawa, A Holbourn, et al.: Variability of the intensity of the Tsushima Warm Current and bottom water ventilation in western North Pacific marginal seas during the Pleistocene: Preliminary results from IODP Expedition 346 (Sites U1427 and U1428/29) based on benthic ostracod assemblages. EGU General Assembly (2015)

〔図書〕(計1件)

中川 毅「時を刻む湖：7万枚の地層に挑んだ研究者たち」岩波化学ライブラリー、ISBN 978-4-00-029642-7, 2015, 122頁

中川 毅「人類と気候の10万年史：過去に何が起きたのか、これから何が起こるのか」講談社ブルーバックス、ISBN 978-4-06-502004-3, 2017, 218頁

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 毅 (NAKAGAWA Takeshi)
立命館大学・総合科学技術研究機構・教授
研究者番号：20332190

(2) 研究分担者

池原 研 (IKEHARA Ken)
国立研究開発法人 産業技術総合研究所・地質情報研究部門・首席研究員

研究者番号：40356423

佐川 拓也 (SAGAWA Takuya)
金沢大学・自然システム学系・助教
研究者番号：40448395

(4) 研究協力者

Victoria Smith
オックスフォード大学・考古学教室・准教授

Paul Albert
オックスフォード大学・考古学教室・研究員

長橋 良隆 (NAGAHASHI Yoshitaka)
福島大学・強制システム理工学類・教授

木村 純一 (KIMURA Jun-ichi)
海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・上席技術研究員