

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：16401
 研究種目：基盤研究(B) (一般)
 研究期間：2019～2021
 課題番号：19H04256
 研究課題名(和文) 年縞から探る温室期の急激な気候変化：温暖化による気候モードジャンプの可能性

研究課題名(英文) Verification of abrupt climate change in hothouse climate state from lacustrine varve record

研究代表者
 長谷川 精 (Hasegawa, Hitoshi)
 高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・講師

研究者番号：80551605
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：モンゴルの白亜系年縞湖成層を対象に超高時間分解能な解析(季節レベル～数十年解像度)を行い、約1億年前の気候変動を詳細に解読した。年縞ラミナを対象に蛍光顕微鏡解析と微小領域同位体比分析を行った結果、太陽活動(11年周期や125年周期)を反映した夏季藻類生産量と降水量の変動が明らかになった。またXRFコアスキャナーを用いて約35万年区間を解析した結果、蒸発/降水量変動の指標であるCa/Tiが、千年スケールおよび地球軌道要素変動で大きく振幅変調したことが明らかになった。この千年スケール変動は高緯度深層水の沈み込み強弱を伴っていた可能性が示唆され、「温室期」の気候安定性を理解する上でも重要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の人為起源CO₂の排出により、200年後には大気CO₂濃度が1000 ppmに達する可能性があり、地球の気候は人類が未体験のモード「温室期(Hothouse)」に入りつつあることが危惧されている。大気CO₂濃度が1000ppmを超えていたのは約1億年前の白亜紀のレベルに相当する。本研究では、白亜紀「温室期」の気候変動を、数年～数十年解像度の人間生活に関わる時間スケールで詳細に復元し、極端な温暖化が進行した後の気候安定性の解明を試みた。その結果、当時のアジア内陸域は約千年毎に干ばつイベントが発生するような、千年スケールで急激な気候変化が発生する「不安定」な気候モードだった可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：Understanding climate variability and stability under extremely warm ‘greenhouse’ conditions in the past is essential for future climate predictions. This study examined ultra-high-resolution (seasonal- to decadal-scale) climate variability from annually laminated lacustrine deposits formed during the mid-Cretaceous in southeastern Mongolia. Inter-annual changes in lake algal productivity and micro-scale stable isotope analysis reveal a pronounced solar influence on decadal- to centennial-scale climatic variations. Ca/Ti ratios (proxy for evaporation/precipitation changes) for a ~350-kyrs interval by using XRF core scanner further indicate millennial-scale extreme drought events in inner-continental areas of mid-latitude paleo-Asia. These findings point to a previously unidentified mode of millennial-scale abrupt climate oscillations occurring under warmer ‘greenhouse’ conditions, which were possibly linked to oscillations in the strength of deep-water formation.

研究分野：気候システム変動学

キーワード：白亜紀 温室期 年縞 アジア内陸 蒸発/降水量変動 太陽活動 千年スケール 気候安定性

1. 研究開始当初の背景

近年の人為起源 CO₂ の排出により、2200 年には大気 CO₂ 濃度が 1000 ppm に達する可能性があり、地球の気候は人類が未体験のモード「温室期 (Hothouse)」に入りつつあることが危惧されている。本研究では、現在よりも大気 CO₂ 濃度が 1000ppm に達し、極域氷床も存在しない白亜紀中期「温室期」の気候変動を、数年～数十年の時間スケールで詳細に復元し、極端な温暖化が進行した後の気候安定性の解明を試みた。いわゆる「氷期」には、ダンスガード・オシュガー・イベントと呼ばれる、気温が数年で 7~10℃も上昇するような激しい変動が約千年周期でくり返し起こっていたことが知られている (e.g., Dansgaard *et al.*, 1993, *Science*)。それに対し、現在も含まれる温暖な「間氷期」の気候は、比較的安定だと考えられてきた (Bond *et al.*, 2001, *Science*; Barker *et al.*, 2011, *Science*)。一方で、現在よりも温暖化が進んだ「温室期」モードでの千年スケールの気候安定性については、実測データに基づく議論がなされていなかった。

代表者らは、モンゴル南東部シネフダグ地域で、年縞 (ねんこう) と呼ばれる 1 年毎の縞模様を保存する湖成層を発見した (Hasegawa *et al.*, 2018, *Island Arc*; 日本地質学会 2019 年 *Island Arc* 賞)。この湖成層 (シネフダグ層) を対象に解析を進めたところ、千年スケールで湖水位が大きく変動したことを示す岩相変化 (頁岩とドロマイトの互層) が見られ、白亜紀「温室期」にも約千年スケールで急激な気候変化が起こっていた可能性が示唆された。この事は、現在よりも温暖な「温室期」の気候モードでも急激な気候変化 (気候ジャンプ) が起こり得る可能性を示しており、本課題でその実態解明を試みた。

2. 研究の目的

モンゴルの白亜系年縞湖成層 (シネフダグ層) を対象に超高時間分解能 (季節変動スケール～数十年スケール) な解析を行い、約 1 億年前の気候変動を人間生活に関わる時間スケールで詳細に復元することを目的とする。そして、白亜紀「温室期」にアジア中緯度域の気温・降水量がどのような移行期間・周期性・振幅で変動したのかを調べ、氷床の存在しない「温室期」モードにおける急激な気候変化の実態や、発生メカニズムの解明を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、以下の手順で白亜紀中期「温室期」の急激な気候変化の実態解明を試みた。①XRF コアスキャナー (ITRAX) を用いた超高解像度元素組成変動の解析、②炭酸塩の炭素・酸素同位体比分析による頁岩-ドロマイト互層の成因究明、③蛍光顕微鏡を用いた夏季藻類生産量変動の復元、④年縞ラミナレベルの微小領域炭素・酸素同位体比分析、⑤古細菌バイオマーカー TEX86 を用いた古水温の解析。ただし⑤に関しては、分担者の山本がシネフダグ層の掘削コア試料 CSH01 から分取した 60 試料に対して古細菌バイオマーカー (GDGTs) の測定を行ったものの、GDGTs が検出されず、古水温指標 (TEX86) の解析は困難であることが明らかになった。したがって本研究では①～④の研究に注力した。そして、これらの結果から示唆される白亜紀「温室期」の急激な気候変化の要因について考察した。

4. 研究成果

(1) XRF コアスキャナー (ITRAX) を用いた超高解像度元素組成変動の解析

シネフダグ層から採取した 2 本のコア試料 (CSH01 の約 30m 区間と CSH02 の約 60m) を対象とし、0.5mm の間隔 (約 6 年の時間分解能) で主要・微量元素組成分析を行った。その結果、湖水位変動の指標である頁岩-ドロマイト互層と Ca/Ti が良い対応を示し、さらに Ca/Ti が千年スケールで大きく変動することが示された。そこで Ca/Ti 変動の周期解析を行うために、年縞層厚と Ca/Ti の関係性と、その誤差範囲を加味したモンテカルロ計算を行い、年縞層厚から堆積速度を換算して時系列データに変換した。その結果、千年スケール成分は準周期的ではあるものの、約 1000 年、1500

年、2000年、3400年、4900年、7500年の周期成分が卓越することが明らかになった。さらに千年スケール変動は、2万年周期の歳差運動や10万年周期の離心率変動で振幅変調が見られることが明らかになった（図1）。

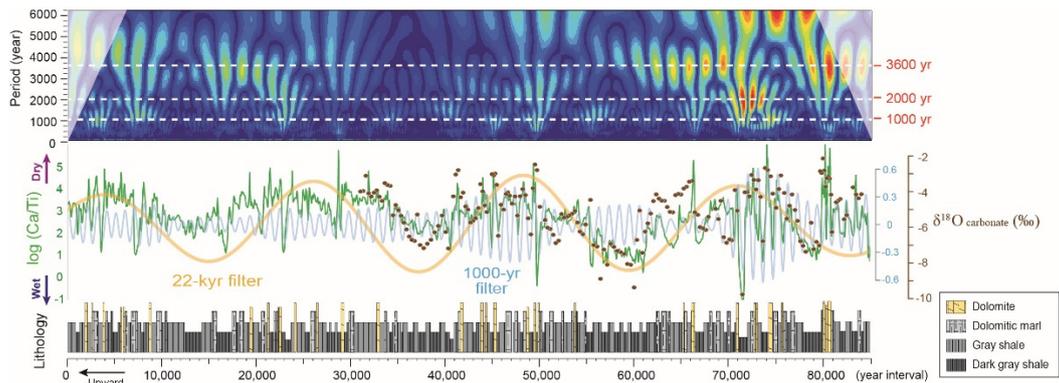


図1 CSH01コアの85,000年区間の岩相変化とCa/Ti, 千年周期filterおよび2万年周期filterの変動とWavelet解析結果. 茶色●は炭酸塩の酸素同位体比変動を示す. 岩相とCa/Ti, 酸素同位体比が良く相関することがわかる。

(2) 炭酸塩の炭素・酸素同位体比分析

CSH01コアから2.5cm毎に分取したバルク試料183試料に対して、炭酸塩の安定炭素・酸素同位体比分析を行った（図1,2）。炭素同位体比と酸素同位体比は強い正相関を示し（図2右），ドロマイト試料で重く（ $\delta^{18}\text{O}_{\text{carbonate}}$: -4 ‰ ~ -2 ‰），頁岩試料で軽い（ $\delta^{18}\text{O}_{\text{carbonate}}$: -9 ‰ ~ -6 ‰）という顕著な傾向があった。この炭素・酸素同位体比の正相関は現生の中緯度閉鎖湖における同位体比組成と整合的であり，ドロマイト-頁岩の互層はこれまでの解釈と同様に，蒸発量/降水量変動の指標となることが示された。さらに千年スケールのCa/Ti変動とも良い相関を示した（図1）。

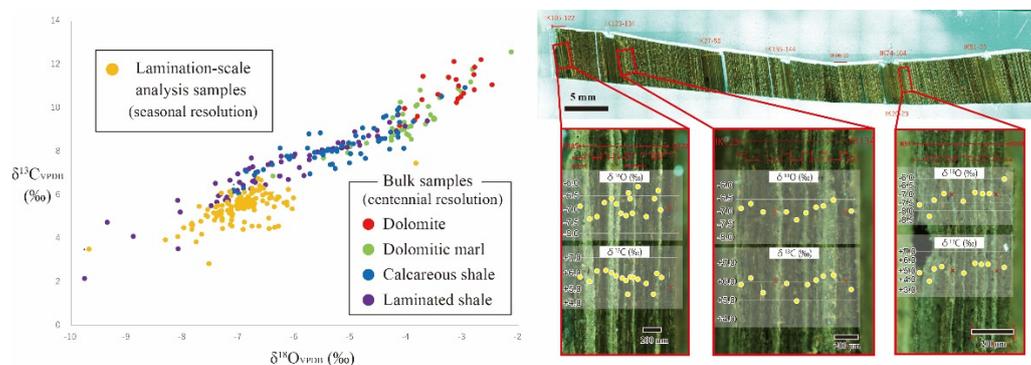


図2 (左) バルク分析(研究2)と微小領域分析(研究4)の炭素・酸素同位体比分析結果の比較. (右)年縞ラミナに対して行ったGeomilを用いた微小領域切削(季節レベル)と微量炭素・酸素同位体比分析の結果(研究4)。

(3) 蛍光顕微鏡を用いた夏季藻類生産量変動の復元

頁岩層準に保存される年縞を対象に，蛍光顕微鏡を用いて夏季の藻類起原有機物ラミナのみを蛍光させ，その蛍光強度変化から藻類生産量変動の解析を行った。5.5cm区間（年縞計測により1091年間に対応）に対して解析を行い，復元された藻類生産量変動に対してフーリエ解析およびWavelet解析を行った結果，顕著な11年周期の変動に加え，125年，212年，284年の卓越周期が検出された。これらの卓越周期は太陽黒点変動に見られる周期性と良く一致しており，十年～百年スケールの藻類生産量変動は太陽活動の気候影響を反映していることが明らかになった。

(4) 年縞ラミナレベルの微小領域炭素・酸素同位体比分析

白亜紀湖成年縞の層厚は約60 μm と極微小なため、分担者の石村が開発した微量炭酸塩安定同位体比測定システム (MICAL3c; Ishimura *et al.*, 2004, 2008; 石村, 2021) と、高精度マイクロミル (Geomill326) を用いたマイクロサンプリングを組み合わせることで、1億年前の年縞ラミナ中の微小カルサイトを対象とした季節レベルの炭素・酸素同位体比分析を行った (切削幅30 μm , サンプル量は数 μg という従来法の数十倍の解像度; 図2)。その結果、酸素同位体比は-9‰~-6‰となり、バルク分析の頁岩試料の値と整合的だった (図2左)。また夏季ラミナの同位体比は冬季ラミナに比べて顕著に重い値を示し、夏季藻類生産量の増大は乾燥環境下で起こり、雲量が少なく日照量が多かった時期を反映していると解釈した。即ち、研究3の太陽活動周期を反映した藻類生産量変動も、乾湿変動に伴う日照量変化を反映していると解釈される。

(5) 白亜紀「温室期」の急激な気候変化の発生要因についての考察

以上の通り、モンゴル年縞湖成層に記録されるCa/Ti比変動は、白亜紀当時のアジア内陸域の蒸発/降水量変動を反映しており、十年~百年スケールでは太陽活動周期を反映した振幅の小さな変動であるのに対し、千年スケールでは酸素同位体比が-5‰程度の変動を伴う振幅の大きな変動であることが明らかになった。さらに千年スケール変動は約2万年の歳差運動周期 (図1) や約10万年の離心率変動周期 (図3左) で大きく振幅変調していることも明らかになった。

この千年スケール変動が地球軌道要素で振幅変調していることは、氷期極相期から間氷期への移行期である

「Intermediate glacial state」においてダンスガード・オシュガー・イベントのような急激な気候変化が見られる事と類似する (図3右)。ダンスガード・オシュガー・イベントは北大西洋の深層水循環の変動と同調して起こっており、「Intermediate glacial state」において深層水循環の変動と気候の不安定化が起こるのは、氷床サイズが規定していると示唆されている (Barker *et al.*, 2011, *Science*)。一方で、本研究の結果は白亜紀においても千年スケールの急激な気候変化が起こっていたことを示唆し、「温室期」(およびその移行期)における気候安定性を理解する上で重要である。

極域氷床が縮小した「温室期」にも千年スケールの急激な気候変化が起こることは、幾つかの気候モデルの結果とも整合的である。例えば始新世「温室期」には大気CO₂濃度の増加に伴って、熱塩循環の高緯度沈み込み場が北半球から南半球にシフトすることが再現されている (Winguth *et al.*, 2012, *Geology*)。また現在の海洋でも、CO₂増加に伴って北半球高緯度域の沈み込みが弱まる一方で、約千年後から南半球の沈み込みが強化されることが再現されている (Yamamoto *et al.*, 2015, *Glob. Biog. Cycl.*)。以上のように、本研究の知見から、現在よりも温暖化が進んだ「温室期」には、高緯度深層水の沈み込み強弱が千年スケールで変動する可能性が示唆された。同様の現象は温暖化進行後の近未来の地球環境にも起こる可能性があり、「温室期」における気候安定性を理解する上で非常に重要である。今後は他の「温室期」を対象とした同様な高解像度解析や、気候モデルを用いた検証が求められる。

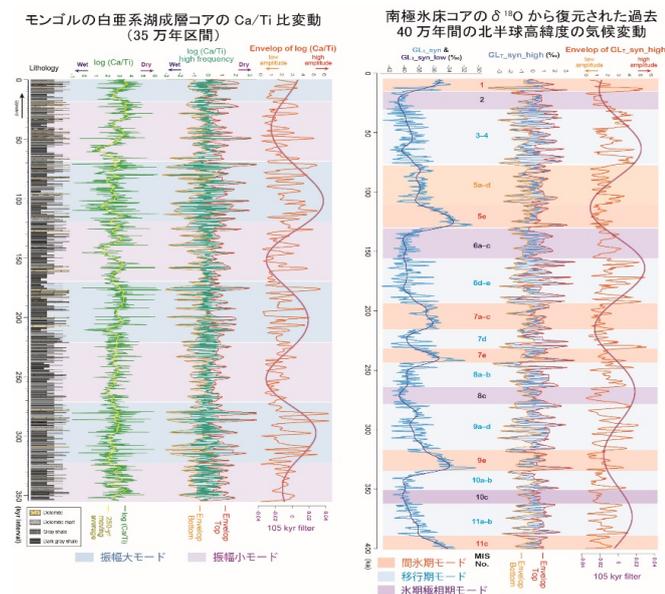


図3 白亜紀湖成層の35万年区間の蒸発/降水量変動(左)と過去40万年間の北半球高緯度の気温変動(右)の比較。両者共に、千年スケール変動が10万年周期で振幅変調している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kuma Ryusei, Hasegawa Hitoshi, Yamamoto Koshi, Yoshida Hidekazu, Whiteside Jessica H., Katsuta Nagayoshi, Ikeda Masayuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Biogenically induced bedded chert formation in the alkaline palaeo-lake of the Green River Formation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 p.1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-52862-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Katsuta Nagayoshi, Matsumoto Genki I., Hase Yoshitaka, Tayasu Ichiro, Haraguchi Takashi F., Tani Eriko, Shichi Koji, Murakami Takuma, Naito Sayuri, Nakagawa Mayuko, Hasegawa Hitoshi, Kawakami Shin ichi	4. 巻 46
2. 論文標題 Siberian Permafrost Thawing Accelerated at the Bolling/Allerd and Preboreal Warm Periods During the Last Deglaciation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 13961 ~ 13971
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019GL084726	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Cho Tenichi, Mantani Hideaki, Ohta Tohru, Li Gang	4. 巻 9
2. 論文標題 Evaluation of Cretaceous Hinterland Weathering and Climate in the Sichuan Basin, SW China	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Open Journal of Geology	6. 最初と最後の頁 696 ~ 699
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4236/ojg.2019.910078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Katsuta Nagayoshi, Naito Sayuri, Ikeda Hisashi, Tanaka Kuniaki, Murakami Takuma, Ochiai Shinya, Miyata Yoshiki, Shimizu Mayuko, Hayano Asuka, Fukui Konami, Hasegawa Hitoshi, Nagao Seiya, Nakagawa Mayuko, Nagashima Kana, Niwa Masakazu, Murayama Masafumi, Kagawa Masako, Kawakami Shin-ichi	4. 巻 248
2. 論文標題 Sedimentary rhythm of Mn-carbonate laminae induced by East Asian summer monsoon variability and human activity in Lake Ohnuma, southwest Hokkaido, northern Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quaternary Science Reviews	6. 最初と最後の頁 106576 ~ 106576
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.quascirev.2020.106576	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 石村 豊穂	4. 巻 55
2. 論文標題 極微量炭酸塩の高精度安定同位体比分析の実現：ナノグラム領域の新たな環境解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地球化学	6. 最初と最後の頁 63～86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14934/chikyukagaku.55.63	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamada Keitaro, Omori Takayuki, Kitaba Ikuko, Hori Tatsuo, Nakagawa Takeshi	4. 巻 272
2. 論文標題 Extraction method for fossil pollen grains using a cell sorter suitable for routine 14C dating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Quaternary Science Reviews	6. 最初と最後の頁 107236～107236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.quascirev.2021.107236	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shozaki Hiroki, Hasegawa Hitoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of longitudinal dunes under Pangaeen atmospheric circulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Climate of the Past Discussions	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/cp-2021-181	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 隈隆成, 長谷川精, 山本鋼志, 吉田英一, 池田昌之, 勝田長貴, Whiteside J.
2. 発表標題 アメリカ湖水環境における生物起源チャート層の成因と堆積リズム
3. 学会等名 日本地球化学学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川精, 勝田長貴, 村木綏, 安藤寿男, Ichinnorov N., Heimhofer U., 山本鋼志, 村山雅史, 太田亨, 山本正伸, 池田昌之, 多田隆治
2. 発表標題 モンゴルの年縞湖成層から読み解く白亜紀中期“超温室期”の十年~千年スケール気候変動と太陽活動の気候影響
3. 学会等名 日本地質学会山口大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 隈隆成, 長谷川精, 山本鋼志, 吉田英一, 池田昌之, 勝田長貴, Whiteside J.
2. 発表標題 米国グリーンリバー層に見られる湖成チャートの堆積リズムと湖生物生産との関係性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kuma, R., Hasegawa, H., Yamamoto, K., Ikeda, M., Yoshida, H., Katsuta, N., Whiteside, J. H.
2. 発表標題 Non-marine paleoclimatic response of Early-Middle Eocene “hothouse” interval evidence from a lacustrine record of the Green River Formation in Utah, USA
3. 学会等名 American Geophysical Union (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川航輝, 長谷川精, Ichinnorov N.
2. 発表標題 モンゴルの年縞湖成層から復元する白亜紀中期におけるアジア内陸のオービタル~千年スケールの気候変動
3. 学会等名 日本地質学会四国支部香川大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hasegawa H.
2. 発表標題 Millennial-scale climate instability in “hothouse” state: implication from mid-Cretaceous and Quaternary lacustrine records in Mongolia
3. 学会等名 JpGU-AGU2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hasegawa H., Nagaya F., Nagashima K., Katsuta N., Murayama M., Harada N.
2. 発表標題 Reconstruction of variations in South Pacific westerly jet path during the last glacial
3. 学会等名 JpGU-AGU2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 隈隆成, 長谷川精, 山本鋼志, Whiteside J., Elson A., 吉田英一, 三村耕一
2. 発表標題 米国グリーンリバー湖成層に記録される始新世前期～中期 (52.7-43.8 Ma) の全球気候変動を反映した陸域環境変動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hasegawa H., Nagaya F., Nagashima K., Katsuta N., Murayama M., Harada N.
2. 発表標題 Reconstruction of variations in South Pacific westerly jet path during the last glacial and calibration for the water content influence of ITRAX intensity
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川精, 朝日博史
2. 発表標題 白亜紀湖成層コアに記録される千年周期成分の抽出：モンテカルロ法による年代不確定性の検討
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川精
2. 発表標題 地層から読み解く地球と火星の表層環境の歴史
3. 学会等名 日本地質学会2021年名古屋大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石村 豊穂 (Ishimura Toyoho) (80422012)	京都大学・人間・環境学研究所・准教授 (14301)	
研究分担者	山本 正伸 (Yamamoto Masanobu) (60332475)	北海道大学・地球環境科学研究所・教授 (10101)	
研究分担者	太田 亨 (Ohta Tohru) (40409610)	早稲田大学・教育・総合科学学術院・教授 (32689)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	勝田 長貴 (Katsuta Nagayoshi) (70377985)	岐阜大学・教育学部・准教授 (13701)	
研究分担者	村山 雅史 (Murayama Masafumi) (50261350)	高知大学・教育研究部総合科学系複合領域科学部門・教授 (16401)	
研究分担者	山田 圭太郎 (Yamada Keitaro) (30815494)	立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構 (BKC)・助教 (34315)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関