

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05595

研究課題名（和文）過去600万年間にわたる大気中二酸化炭素濃度と気候の相互作用の解明

研究課題名（英文）Reconstruction of atmospheric carbon dioxide concentration during the last 6 million years and the study of the interaction between atmospheric carbon dioxide and climate

研究代表者

山本 正伸 (Yamamoto, Masanobu)

北海道大学・地球環境科学研究所・教授

研究者番号：60332475

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 155,500,000円

研究成果の概要（和文）：長鎖脂肪酸炭素同位体比を用いた独自の手法により、大気中CO₂濃度が過去600万年間の最高値が300 ppm前後にすぎないこと、350万年前から250万年前にわたり長期的に低下したこと、CO₂濃度が190 ppm前後に低下したタイミングで4万年から4万年に変動周期が変調したことが明らかになった。CO₂濃度の長期的低下は太平洋深層水の酸化の進行と同調しており大気海洋系の炭素総量が減少したことによる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた過去600万年間の大気中CO₂濃度記録は、従来の過去80万年間のアイスコア気泡のCO₂濃度記録をはるかに超えており、過去の環境変動・気候変動の原因を考察するうえで不可欠なデータである。IPCCでの地球環境予測評価等、地球環境研究において広範囲に活用されることが予想される。

研究成果の概要（英文）：Using an original method based on carbon isotope ratios of long-chain fatty acids, we found that the highest atmospheric CO₂ concentration over the past 6 million years was only around 300 ppm. The results also revealed that the CO₂ concentration decreased from 3.5 million to 2.5 million years ago, and that the period of change modulated from 400,000 to 40,000 years at the time when the CO₂ concentration dropped first to around 190 ppm. The long-term decrease in CO₂ concentration was synchronized with the oxidation in the deep Pacific Ocean, presumably resulting from a decrease in the total amount of carbon in the atmosphere-ocean system.

研究分野：古気候学

キーワード：二酸化炭素 温室効果 C4植物 氷期間氷期変動 気候変動 海底コア 長鎖脂肪酸 同位体

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

温室効果は地球表層の温度を決める重要な要素である。大気中 CO₂ 濃度の連続的な測定は 1957 年以降であり、それ以前の CO₂ 濃度はアイスコア気泡中のガス測定により復元されている (Luthi et al., 2008 など)。過去の CO₂ 濃度を復元することは、地球の気候の歴史を考えるうえで極めて重要である。

アイスコアの CO₂ 濃度記録は、過去の気候変動の原因の解明や気候感度の推定に活用されており、数多くの古気候記録の中でも最重要の強制力 (気候変動の原因) に関わるものとして重視されている。しかし、アイスコアの最古の氷は 80 万年前のものであり、それ以前の CO₂ 濃度の精密復元は行われていない。アルケノン安定炭素同位体比や有孔虫ハウ素同位体比を用いる CO₂ 濃度推定は分析誤差が大きく、気候との関係を検討するには不十分である。

代表者らは、インド洋ベンガル湾 U1446 地点の過去 80 万年間の海底堆積物コア中の長鎖脂肪酸の安定炭素同位体比 ($^{13}\text{C}_{\text{FA}}$) の変動がアイスコア CO₂ 濃度変動と高い負の相関を示すことを見いだした (相関係数 = -0.88)。陸上植物の葉ワックスに由来する長鎖脂肪酸はインド東部から河川を通じてベンガル湾に流入しており、海底堆積物中の $^{13}\text{C}_{\text{FA}}$ はインド東部の C₃ 植物と C₄ 植物の植生比を反映している。CO₂ 濃度が低い条件では C₄ 植物が生育に有利であるため、C₄ 植物の割合が高くなり、 $^{13}\text{C}_{\text{FA}}$ が高くなる。この関係を利用して $^{13}\text{C}_{\text{FA}}$ から 80 万年前以前の CO₂ 濃度を復元することができる。

代表者は、この方法により過去 150 万年間の CO₂ 濃度を復元した。U1446 地点では 150 万年前より前の堆積物が得られていないので、同地点においてそれ以上時代を遡ることはできない。しかし近隣の U1445 地点では過去 600 万年間をカバーする堆積物コアが得られているので、それを用いて 150 万年前よりも前の時代の高精度な CO₂ 濃度記録を作成することが可能である。

2. 研究の目的

本研究では、ベンガル湾の国際深海掘削科学計画 (IODP) U1445 地点の堆積物コアに含まれる長鎖脂肪酸の安定炭素同位体比 ($^{13}\text{C}_{\text{FA}}$) を測定し、600 万年前から 150 万年前の CO₂ 濃度を約 1700 年解像度で復元した。得られたデータにもとづき、CO₂ 濃度変動の原因を考察し、CO₂ と気候の相互作用を検討した。

氷期-間氷期変動の始まりの解明: 270 万年前以降に氷床の拡大と縮小が繰り返し起こるようになり (氷期-間氷期変動)、更新世を通じて、氷期の氷床量が徐々に増加してきた。この変化の原因として、CO₂ 濃度の減少が有力視されているが (Lunt et al., 2008 など)、その根拠となる CO₂ 濃度変動記録はまだ得られていない。この時期の CO₂ 濃度を精密に復元し、CO₂ 濃度の変動の原因と氷期-間氷期変動が卓越する状況の成立に炭素循環がどのように関与したかを検討した。

560 万年前の温暖化の原因の解明: 570 万年前から 550 万年前の 20 万年間に全海洋の水温が上昇し、氷床も縮小した。この時期の CO₂ 濃度を復元することで、さらにこの温暖化に CO₂ 濃度がどのように関与していたのかを検討した。

温暖地球の気候感度の推定: 現在進行している温暖化により地表温度が何度上昇するのか推定するためには、気候感度 (CO₂ 濃度の変化に対する地表気温の増加率) を求めることが必要である。気温が高かった鮮新世 (約 300 万年前) の CO₂ 濃度を正確に復元し、気候感度の確度を上げることを試みた。

3. 研究の方法

試料分取: ベンガル湾インド沖の国際深海掘削科学計画 (IODP) U1445 地点で掘削された過去

600 万年間の堆積物コア試料を 20 cm 間隔 (1500-2000 年間隔) で分取した。

CO₂ 濃度復元: 過去 600 万年間の 3762 試料について ¹³C_{FA} を測定し, CO₂ 濃度を復元した。U1445 地点は U1446 地点よりも 190 km 南西に位置しているため, ¹³C_{FA} がマハナディ川流域の南方に位置する小河川流域の ¹³C_{FA} の影響を受けている可能性がある。これを検討するために過去 80 万年間の ¹³C_{FA} とアイスコア CO₂ 濃度を比較し, U1445 地点で有効な関係式を求めた。ついで 80 万年前以前の試料の ¹³C_{FA} を分析し, その値から上記関係式を用いて CO₂ 濃度を復元した。

年代モデルの確立: 過去 600 万年間の 3762 試料について底生有孔虫の酸素同位体比を分析し, 既知の酸素同位体比変動曲線と比較し, 当てはめることにより, 堆積物試料の年代を決定した (酸素同位体層序)。

氷期-間氷期変動の始まりの解明: 氷期-間氷期変動が開始し, 次第に振幅が拡大した時代 (300 万年前から 150 万年前) の CO₂ 濃度の時代的な変化と, 太平洋深層水の温度変動, 全球平均気温変動, 氷床体積変動を比較することにより, CO₂ 濃度変動の原因と全球気候変動における役割を考察した。

560 万年前の温暖化の原因の解明: 570 万年前から 550 万年前の 20 万年間の CO₂ 濃度変動と同時期の全球海面温度の変化を比較することにより CO₂ 濃度が全球気温に及ぼした影響を評価した。

鮮新世の気候感度の推定: 後期鮮新世の 350 万年前から 300 万年前の CO₂ 濃度と同時期の全球平均気温を比較することにより, 温暖期における CO₂ 濃度の全球気温に及ぼす影響を評価した。

4. 研究成果

CO₂ 濃度変化: 長鎖脂肪酸炭素同位体比を用いた独自の手法により過去 600 万年間の大気中 CO₂ 濃度を従来にない高精度・高時間解像度で復元した結果, 従来の復元方法では捉えられていなかった CO₂ 濃度変化を捉えることができた。600 万年前の後期中新世寒冷期の CO₂ 濃度は 230 ppm まで低下した。その後 CO₂ 濃度は上昇し, 400 万年前に極大を示したが, 300 ppm 前後にすぎない。その高 CO₂ 期は 330 万年前の M2 氷床拡大イベント時に更新世氷期レベルの 190 ppm まで低下することにより終了し, 270 万年前以降は氷期の CO₂ 濃度は 190 ppm 前後で推移してきた。さらに周期性についてみると, 330 万年前よりも以前の期間では, 地球の公転軌道の離心率と同調しており, 40 万年の周期的変動を示した。一方, 270 万年前以降は CO₂ 濃度変動は底生有孔虫 ¹⁸O から推定される氷床体積変動と同調しており, 90 万年前までは 4 万年周期を, 90 万年前以降は 10 万年周期を示した。

本研究では過去 600 万年間の CO₂ 濃度変動を始めて明らかにした。とくに CO₂ 変動の形態 (周期, 振幅, 位相) が時代により異なることが分かったことは地球の炭素循環に関わる重大な発見である。地表の境界条件の変化が地球システム内の CO₂ の挙動を変化させた可能性が想像できる。

CO₂ 以外の因子が C₃/C₄ 植生に与える影響

本研究で用いた CO₂ 復元手法は独自開発の新規の手法であるため, 手法の有効性を徹底的に検討する必要があった。

CO₂ 以外の因子が C₃/C₄ 植生に与える影響について U1446 地点で得られた CO₂ 濃度変動記録 (本研究の採択以前に取得したデータであるが, 採択後に解析を行った) を用いて検討した。U1446 地点では, 堆積物中の GDGT, 浮遊性有孔虫の酸素同位体比, 脂肪酸の水素同位体比から, 過去 150 万年間の降水量を復元した。その降水量の変動と比較から, ¹³C_{FA} 変動の 2-10% は降水量変動により説明可能であることが明らかになった。これは CO₂ 変動が ¹³C_{FA} 変動の

78%を説明するのに比べると重要ではなく、 $^{13}\text{C}_{\text{FA}}$ 変動は基本的に CO_2 変動を反映していることが明らかになった。この検討に用いた降水量復元結果は McGrath et al. (2021) と Clemens et al. (2021) として公表した。

また CO_2 濃度と降水量の変動がインド東部の C_3/C_4 植生に与える影響を植生モデルを用いて検討した。まず国際比較プロジェクト PMIP/CMIP に参加するマルチモデル 9 つの氷期 LGM 実験の結果を解析し、Mahanadi 河流域での LGM での 9 モデル平均した気温変化(約-3)と降水量変化(約-10%)を不確実性の幅とともに求めた。その上で、 CO_2 を 10ppm 刻みで行う感度実験のほかにリファレンス気候から気温を一律で-1 から-4 まで段階的に低下させた感度実験と、降水を-10%から段階的に-30%まで減少させた感度実験を行った。その結果、プロキシが示す氷期の Mahanadi 河流域の C_4 植物の増加に対しては CO_2 低下が支配的で、降水減少の寄与は小さく、気温の低下は逆符号に働くことが示された。このモデルの結果からも、 $^{13}\text{C}_{\text{FA}}$ 変動は基本的に CO_2 変動を反映していることが明らかになった。また C_3/C_4 植生が CO_2 濃度に敏感に反応する地域を動的植生モデルにより特定したところ、年平均気温 18 以上、年降水量 1000~1500 mm の範囲の高温で季節的に乾燥したサバンナ気候に対応することがわかった。このような地域はインド東部以外にもあり、将来的に大気中 CO_2 濃度復元を再現するための研究候補地点になりうる。この検討結果は Oishi et al. (2021) および Yamamoto et al. (2022) として公表した。さらに本研究の長鎖脂肪酸水素同位体比($\delta\text{D}_{\text{FA}}$)の分析から、東インドの降水量変動が過去 600 万年間を通じて、過去 80 万年間の変動を超えるものではなかったことが示された。このことは $^{13}\text{C}_{\text{FA}}$ による過去 600 万年間の CO_2 濃度復元が有効であることを保証する。

更新世の CO_2 変動メカニズム

U1446 地点で得られた CO_2 濃度変動記録について統計的解析を行い、過去 150 万年間の CO_2 変動メカニズムを考察した。氷床体積変動が 4 万年周期から 10 万年周期へ移行するおよそ 90 万年前の中期更新世遷移期では、 CO_2 と氷の体積サイクルの相対的な位相が変化していたことが示された。一方、 CO_2 濃度は深海の炭素同位体比と一致した変化トレンドを示した。これらの結果から、深層水循環が CO_2 変動の長期的なトレンドを制御しており、中期更新世遷移期では CO_2 と大陸氷、深層水循環の相互作用が再編成されたことが示唆された。本成果は Yamamoto et al. (2022) として公表した。

さらに CO_2 濃度と日射変動を変数として、過去 150 万年間の大陸氷床量変動を大型計算機によりシミュレーションした。日射量変動のみを変化させた場合でも大陸氷床体積は、現実のような周期の変動(氷期間氷期変動)を示すが、酸素同位体比変動と調和的な CO_2 濃度変動を加えると、振幅についても現実合致した変動を示すことが明らかになった。このことは CO_2 が氷期間氷期変動の振幅を制御するフィードバックの一要素であることを示唆する。本成果は Watanabe et al. (2023) として公表した。

氷期-間氷期変動の始まり

過去 80 万年間の CO_2 濃度変動記録にもとづき、氷期では海洋の成層が強くなり、海洋深層に炭素がより多く貯留し、大気中 CO_2 濃度が低下したとする「成層化仮説」が有力である(Skinner et al., 2010 *Science* など)。 CO_2 濃度と大陸氷床の大きさの間には良い相関が認められることから、氷床体積が何かしらの形で海洋成層状態に影響し、大気中 CO_2 濃度を制御していると想像されている。本研究により CO_2 の氷床への応答は過去 270 万年間継続していたことが初めて示された。応答が始まったのは CO_2 濃度が更新世氷期レベルまで継続的に低下し、北半球氷床が形成されはじめた時期に一致する。このことは氷床の大きさがある閾値を超えたことにより、 CO_2 の制御メカニズムが大転換があったことを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件／うち国際共著 13件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 山本正伸	4. 巻 39
2. 論文標題 山本正伸過去の大気中二酸化炭素濃度を復元する試み（2016年度有機地球化学賞受賞記念総説）	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Researches in Organic Geochemistry	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -
1. 著者名 Iizuka, M., *Seki, O., Wilson, D. J., Suganuma, Y., Horikawa, K., van de Flierdt, T., Ikehara, M., Itaki, T., Irino, T., Yamamoto, M., Hirabayashi, M., Matsuzaki, H., Sugisaki, S.	4. 巻 14
2. 論文標題 Multiple episodes of ice loss from the Wilkes Subglacial Basin during the Last Interglacial.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-37325-y	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 -
1. 著者名 Grant, G. R., Williams, J. H. T., Naeher, S., Seki, O., McClymont, E. L., Patterson, M. O., Haywood, A. M., Behrens, E., Yamamoto, M., and Katelyn Johnson, K.	4. 巻 19
2. 論文標題 Amplified surface warming in the south-west Pacific during the mid-Pliocene (3.3-3.0 Ma) and future implications.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Climate of the Past	6. 最初と最後の頁 1359-1381
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/cp-19-1359-2023	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 -
1. 著者名 Cenozoic CO2 Proxy Integration Project (CenCO2PIP, 関心がプロジェクトメンバー) Consortium	4. 巻 382
2. 論文標題 Towards a Cenozoic history of atmospheric CO2.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/science.adi517	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 -

1. 著者名 Watanabe Yasuto, Abe-Ouchi Ayako, Saito Fuyuki, Kino Kanon, O'ishi Ryouta, Ito Takashi, Kawamura Kenji, Chan Wing-Le	4. 巻 4
2. 論文標題 Astronomical forcing shaped the timing of early Pleistocene glacial cycles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications Earth and Environment	6. 最初と最後の頁 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43247-023-00765-x	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 -

1. 著者名 Yamamoto Masanobu, Clemens Steven C., Seki Osamu, Tsuchiya Yuko, Huang Yongsong, O'ishi Ryouta, Abe-Ouchi Ayako	4. 巻 15
2. 論文標題 Increased interglacial atmospheric CO2 levels followed the mid-Pleistocene Transition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 307 ~ 313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41561-022-00918-1	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 Yamamoto Masanobu, Wang Fangxian, Irino Tomohisa, Yamada Kazuyoshi, Haraguchi Tsuyoshi, Nakamura Hideto, Gotanda Katsuya, Yonenobu Hitoshi, Leipe Christian, Chen Xuan-Yu, Tarasov Pavel E.	4. 巻 623
2. 論文標題 Environmental evolution and fire history of Rebun Island (Northern Japan) during the past 17,000 years based on biomarkers and pyrogenic compound records from Lake Kushu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Quaternary International	6. 最初と最後の頁 8 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.quaint.2021.09.015	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 Segawa Yudai, Yamamoto Masanobu, Kuwae Michinobu, Moriya Kazuyoshi, Suzuki Hitoshi, Suzuki Koji	4. 巻 127
2. 論文標題 Reconstruction of the Eukaryotic Communities in Beppu Bay Over the Past 50 Years Based on Sedimentary DNA Barcoding	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 e2022JG006825
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022jg006825	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 Hasegawa Hitoshi, Katsuta Nagayoshi, Muraki Yasushi, Heimhofer Ulrich, Ichinnorov Niiden, Asahi Hirofumi, Ando Hisao, Yamamoto Koshi, Murayama Masafumi, Ohta Tohru, Yamamoto Masanobu, et al.	4. 巻 12
2. 論文標題 Decadal centennial-scale solar-linked climate variations and millennial-scale internal oscillations during the Early Cretaceous	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 21894
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-25815-w	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 Michinobu Kuwae, Bruce P Finney, Zhiyuan Shi, Aya Sakaguchi, Narumi Tsugeki, Takayuki Omori, Tetsuro Agusa, Yoshiaki Suzuki, Yusuke Yokoyama, Hirofumi Hinata, Yoshio Hatada, Jun Inoue, Kazumi Matsuoka, Misaki Shimada, Hikaru Takahara, Shin Takahashi, Daisuke Ueno, Atsuko Amano, Jun Tsutsumi, Masanobu Yamamoto, et al.	4. 巻 10
2. 論文標題 Beppu Bay, Japan, as a candidate Global Boundaries Stratotype Section and Point for an Anthropocene series	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Anthropocene Review	6. 最初と最後の頁 2.05302E+14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/20530196221135077	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 嶋田美咲・高原光・加三千宣・池原研・入野智久・山本正伸・山田圭太郎・竹村恵二	4. 巻 32
2. 論文標題 別府湾堆積物の花粉および微粒炭分析に基づく後期完新世における照葉樹林の衰退過程	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 植生史研究	6. 最初と最後の頁 15-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 McGrath, S. M., Clemens, S. C., Huang, Y., Yamamoto, M.	4. 巻 48
2. 論文標題 Greenhouse gas and ice volume drive Pleistocene Indian Summer Monsoon precipitation isotope variability.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL092249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL092249	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 Clemens, S. C., Yamamoto, M., Thirumalai, K., Giosan, L., Richey, J. N., Nilsson-Kerr, K., Rosenthal, Y., Anand, P., McGrath, S.	4. 巻 7
2. 論文標題 Remote and local drivers of Pleistocene South Asian Summer Monsoon precipitation: A test for future predictions.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabg3848
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abg3848	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 Yamamoto, M., Wang, F., Irino, T., Suzuki, K., Yamada, K., Haraguchi, T., Gotanda, K., Yonenobu, H., Chen, X.-Y., Tarasov, P.	4. 巻 9
2. 論文標題 A lacustrine biomarker record from Rebus Island reveals a warm summer climate in Northern Japan during the early Middle Holocene due to a stronger North Pacific High.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Front. Earth Sci.	6. 最初と最後の頁 704332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2021.704332	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 Suzuki, K., Yamamoto, M., Rosenheim, B. E., Omori, T., Polyak, L.	4. 巻 66
2. 論文標題 New radiocarbon estimation method for carbonate-poor sediments: A case study of ramped pyrolysis 14C dating of postglacial deposits from the Alaskan margin, Arctic Ocean.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Quaternary Geochronology	6. 最初と最後の頁 101215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.quageo.2021.101215	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 Sakurai, H., Yamamoto, M., Seki, O., Omori, T., Sato, T.	4. 巻 22
2. 論文標題 Cellulose oxygen isotopes of Sphagnum and vascular plants in a peat core reveal climate change in northern Japan over the past 2,000 years.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 e2020GC009597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GC009597	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 Yamamoto, M., Kikuchi, T., Sakurai, H., Hayashi, R., Seki, O., Omori, T., Sulaiman, A., Shaari, H., Abdullah, M. Z., Melling, L.	4. 巻 48
2. 論文標題 Tropical Western Pacific hydrology during the last 6,000 years based on wildfire charcoal records from Borneo.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2021GL093832
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL093832	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 Kong, S. R., Yamamoto, M., Shaari, H., Hayashi, R., Seki, O., Tahir, N. M., Fadzil, M. F., Sulaiman, A.	4. 巻 16
2. 論文標題 The significance of pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in Borneo peat core for the reconstruction of fire history.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLoS ONE	6. 最初と最後の頁 e0256853
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0256853	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 Yuan, H., Meng, F., Yamamoto, M., Liu, X., Dong, H., Shen, J., Yin, H., Wang, J., Wang, J.	4. 巻 126
2. 論文標題 Linking historical vegetation to bacterial succession under the contrasting climates of the Tibetan Plateau.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ecological Indicators	6. 最初と最後の頁 107625
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecolind.2021.107625	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 McGrath Sarah M., Clemens Steven C., Huang Yongsong, Yamamoto Masanobu	4. 巻 48
2. 論文標題 Greenhouse Gas and Ice Volume Drive Pleistocene Indian Summer Monsoon Precipitation Isotope Variability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL092249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL092249	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 Harigai Wakana, Saito Aya, Suzuki Hitoshi, Yamamoto Masanobu	4. 巻 37
2. 論文標題 Genetic Diversity of Ligidium Isopods in Hokkaido and Niigata, Northern Japan, Based on Mitochondrial DNA Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Zoological Science	6. 最初と最後の頁 417 ~ 428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2108/zs200017	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 Suzuki Kenta, Yamamoto Masanobu, Seki Osamu	4. 巻 157
2. 論文標題 Late Miocene changes in C3, C4 and aquatic plant vegetation in the Indus River basin: evidence from leaf wax $\delta^{13}C$ from Indus Fan sediments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geological Magazine	6. 最初と最後の頁 979 ~ 988
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S0016756819001109	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31件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Yamamoto, M., Clemens, S., Irino, T., Seki, O., Tsuchiya, Y., Huang, Y., O'ishi, R., Abe-Ouchi, A.
2. 発表標題 Reconstruction of atmospheric CO ₂ concentration over the past 1.5 million years based on leaf wax (long-chain n-fatty acid) carbon isotope record from the Bay of Bengal.
3. 学会等名 XXI INQUA Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamamoto, M., Clemens, S., Irino, T., Seki, O., Tsuchiya, Y., Huang, Y., O'ishi, R., Abe-Ouchi, A.
2. 発表標題 CO ₂ reconstruction based on Indian C3/C4 vegetation changes over the past 1.46 million years. PMIP
3. 学会等名 Beyond EPICA seminar series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉森正和
2. 発表標題 古気候モデリングを通して考える．北極域温暖化増幅のメカニズム．
3. 学会等名 東京大学大気海洋研究所研究集会「古気候研究におけるプロキシとモデルの融合：温暖期の気候変動について」．
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉森正和
2. 発表標題 古気候モデリングを通して考える．気候感度と北極域温暖化増幅．
3. 学会等名 CPS-ABCワークショップ「地球型惑星の気候を地球古気候研究から考える」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamamoto, M., Clemens, S.C., Seki, O., Tsuchiya, Y., Huang, Y., O'ishi, R., Abe-Ouchi, A.
2. 発表標題 A 1.46-million-year record of atmospheric CO ₂ from sedimentary leaf wax in the Bay of Bengal.
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yamamoto, M., Kikuchi, S., Bova, S., Rosenthal, Y
2. 発表標題 Drier climates in Papua New Guinea during interglacials over the past 1.68 million years.
3. 学会等名 2022 Goldschmidt Conference, Honolulu (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本正伸, スティーブ・クレメンズ, 関宰, 土屋優子, ヨンソン・ファン, 大石龍太, 阿部彩子
2. 発表標題 過去150万年間の大気中二酸化炭素濃度を解明
3. 学会等名 地球環境史学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yamamoto, M., Clemens, S.C., Seki, O., Tsuchiya, Y., Huang, Y., O'ishi, R., Abe-Uchi, A.
2. 発表標題 Reconstruction of atmospheric CO2 concentration over the past 1.5 million years based on leaf wax (long-chain n-fatty acid) carbon isotope record from the Bay of Bengal.
3. 学会等名 COLDEX seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yamamoto, M., Kikuchi, T., Sakurai, H., Hayashi, R., Seki, O., Omori, T., Sulaiman, A., Shaari, H., Abdullah, M. Z., Melling, L.
2. 発表標題 Tropical Western Pacific hydrology during the last 6,000 years based on wildfire charcoal records from Borneo.
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 山本正伸・関宰
2. 発表標題 泥炭コアに含まれるミズゴケとイネ科植物のセルロース酸素同位体比からみた過去4400年間の利尻島の気候変化, 北海道の歴史との関連
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 Sudo, G., Yamamoto, M., Bova, S., Rosenthal, Y.
2. 発表標題 Millennial variability in precipitation in Papua New Guinea during the last deglaciation.
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 山本正伸, スティーブ・クレメンス, 関宰, 土屋優子, ヨンソン・ファン, 大石龍太, 阿部彩子
2. 発表標題 リーフワックス炭素同位体比を用いた古CO2復元; 146万年にわたる大気中CO2の連続プロキシ記録
3. 学会等名 第7回地球環境史学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本正伸・櫻井弘道・関宰
2. 発表標題 縄文時代以降の気候変化が北海道の狩猟漁撈最終文化に与えた影響
3. 学会等名 令和3年度日本地質学会北海道支部例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 HAPPIチーム・山本正伸
2. 発表標題 北極海の完新世変動の解明をめざして
3. 学会等名 第7回地球環境史学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井花菜, 関宰, 山本正伸, マイケル・E・ウィーバー, マウリーン・E・レイモ, ピクトリア・L・ペック, ウィリアムズ・トレバー, IODP Expedition 382 研究者
2. 発表標題 鮮新世中期の温暖期におけるスコシア海の海面温度の復元
3. 学会等名 第7回地球環境史学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須藤樂, 山本 正伸, 後藤大貴, ポバ, サマンサ, ローゼンタール・ヤイール
2. 発表標題 最終氷期末におけるパプアニューギニアの千年規模気候変動
3. 学会等名 第7回地球環境史学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yamamoto, M., Clemens, S., Seki, O., Tsuchiya, Y., Huang, Y., O'ishi, R., Abe-Ouchi, A.
2. 発表標題 Use of leaf wax carbon isotopes in Bay of Bengal sediments for paleo-CO2 reconstruction; A new continuous 1.46-million-year proxy record of atmospheric CO2.
3. 学会等名 American Geophysical Union, Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入野 智久・山本 正伸・Giosan L.・Clemens S.
2. 発表標題 堆積相・酸素同位体層序に基づく北東インド洋 IODP U1445 地点の堆積環境
3. 学会等名 第六回地球環境史学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Irino, T., Yamamoto, M., Giosan, L., and Clemens, S.
2. 発表標題 Depositional environment at IODP Site U1445 in the northeastern Indian Ocean based on the litho- and isotope-stratigraphy,
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Clemens, S., Yamamoto, M., McGrath, S., Thirumalai, K., Huang, Y., Kerr, K., Richey, J., Rosenthal, Y.
2. 発表標題 Pleistocene Water Isotope Reconstructions from the Indian Monsoon Region
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yamamoto, M., Kikuchi, S., Yamamoto, Y., Bova, S., Rosenthal, Y.
2. 発表標題 The Western Pacific Warm Pool hydrology during the last 1.68 million years
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 稲垣 征哉、中村 英人、山本 正伸、中川 毅
2. 発表標題 水月湖堆積物コアの多環芳香族炭化水素及び五環性トリテルペノイドメチルエーテル類に残された過去700年間人間活動の記録
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yamamoto, M., Kikuchi, T., Sakurai, H., Hayashi, R., Seki, O., Omori, T., Sulaiman, A., Shaari, H., Melling, L.
2. 発表標題 Tropical western Pacific hydrology during the last 6000 years based on charcoal records from Borneo
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2020年大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本正伸
2. 発表標題 微粒炭および燃焼起源化合物を用いた過去の火災イベントの復元
3. 学会等名 第35回考古学研究会東海例会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本正伸・瀬川雄大・鈴木仁・鈴木光次・加三千宣
2. 発表標題 堆積物に残留する真核生物 DNAからみた1970年以降の 別府湾環境の変化
3. 学会等名 シンポジウム「人新世国際標準模式地認定に向けた別府湾での取り組み」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yamamoto, M. & Clemens, S.
2. 発表標題 Sedimentary soil organic matter records of the Indian Summer Monsoon variability during the last 1,460, 000 years.
3. 学会等名 American Geophysical Union, Chapman Conference on the Evolution of the Monsoon, Biosphere and Mountain Building in Cenozoic Asia, Washington, D.C. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Seki, O., Irino, T., Horikawa, K., Okazaki, Y., & Abe-Ouchi, A, Jonaotaro Onodera,
2. 発表標題 Reconstruction of atmospheric pCO2 during the Plio-Pleistocene
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019, San Francisco USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本正伸・クレメンス, スティーブ・関宰・土屋優子・フアン, ヨンソン・大石龍太・阿部彩子
2. 発表標題 過去146万年間の大気中二酸化炭素濃度の復元
3. 学会等名 地球環境史学会年会(つくば市)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yamamoto, M., Clemens, S.
2. 発表標題 GDGT proxies approach to the reconstruction of Indian summer monsoon variability during the last 1,460,000 years.
3. 学会等名 The International Meeting on Organic Geochemistry, Gotenberg, Sweden, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seki, O., Irino, T., Horikawa, K., Okazaki, Y., Abe-Ouchi, A., & Onodera, J.,
2. 発表標題 Reconstruction of atmospheric CO2 concentration during the Plio-Pleistocene.
3. 学会等名 13th International Conference on Paleoceanography, Sydney Australia (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本正伸・クレメンス, スティーブ・関宰・土屋優子・ファン, ヨンソン・大石龍太・阿部彩子
2. 発表標題 長鎖脂肪酸炭素同位体比を用いた大気中二酸化炭素濃度復元
3. 学会等名 第37回日本有機地球化学シンポジウム(金沢市)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>メインプロジェクト(過去600万年間のCO2濃度復元) 過去600万年間にわたる大気中二酸化炭素濃度と気候の相互作用の解明 https://pablos.ees.hokudai.ac.jp/yamamoto/project/KakenSC02.html</p>
--

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	入野 智久 (Irino Tomohisa) (70332476)	北海道大学・地球環境科学研究所・准教授 (10101)	
研究分担者	関 宰 (Osamu Seki) (30374648)	北海道大学・低温科学研究所・准教授 (10101)	
研究分担者	阿部 彩子 (Abe Ayako) (30272537)	東京大学・大気海洋研究所・教授 (12601)	

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	吉森 正和 (Yoshimori Masakazu) (20466874)	東京大学・大気海洋研究所・准教授 (12601)	

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