

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2007～2011
 課題番号：19204051
 研究課題名（和文） バイオマーカー水素同位体比を用いた過去15万年間の熱帯太平洋大気対流活動の復元
 研究課題名（英文） Reconstruction of changes in the atmospheric convection activity in the tropical Pacific Ocean during the last 150,000 years using hydrogen isotopes of biomarkers
 研究代表者
 山本 正伸（YAMAMOTO MASANOBU）
 北海道大学大学院地球環境科学研究院・准教授
 研究者番号：60332475

研究成果の概要（和文）：

本研究では、熱帯太平洋域5地点から採取された海底コアに含まれる生物起源有機分子を分析し、過去15万年間の熱帯太平洋大気対流活動を復元した。古水温の解析から、融氷期には、太平洋東縁では冷水舌が縮小、東西水温勾配が小さいエルニーニョに似た平均状態を保ちながら、全体として温暖化し、西縁では暖水塊が拡大したことが示された。脂肪酸の水素同位体組成から降水量復元を試みたが、石筍酸素同位体記録と矛盾した。石筍記録は古水温記録と調和的であり、歳差運動（2.3万年周期）に応答してエルニーニョ南方振動が長期的に変動し、熱帯太平洋の東西水温勾配と対流中心の位置が変化することが示唆された。

研究成果の概要（英文）：

We reconstructed the atmospheric convection activity in the tropical Pacific by analyzing biomarkers in marine cores retrieved from five locations in the tropical Pacific. Paleotemperature records demonstrated that the cold tongue shrank, the western Pacific warm pool expanded, and zonal temperature gradient was relaxed during the last deglaciation. A deuterium record of fatty acids from the southern South China Sea disagrees with a published stalagmite record from northern Borneo. The latter is consistent with paleotemperature records, suggesting that zonal temperature gradient and the position of convection center has varied in response to precession.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	28,300,000	8,490,000	36,790,000
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
総計	36,800,000	11,040,000	47,840,000

研究代表者の専門分野：古海洋学，古気候学，有機地球科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・層位・古生物学

キーワード：環境変動，気候変動，地質学，地球化学

1. 研究開始当初の背景

熱帯太平洋は地球表層最大の気候海洋相互作用の場であり、太陽放射を吸収・蓄熱し、活発な気候海洋相互作用にとも

ないエネルギーを中高緯度へと伝搬する役割を果たしている。このような役割から、熱帯太平洋は地球のヒートエンジンと称せられる。しかしながら、過去の気候変動におい

て、この熱帯太平洋が果たした役割は明らかではない。

1970年代に最終氷期最盛期(LGM)の熱帯域水温が現在と比較して0~2℃しか低くないと報告されて以来(CLIMAP Project Members, 1976; Science, 191, 1131), 熱帯域は気候変動に対して鈍感であり、重要な役割を果たしていないと考えられてきた。しかし、2000年以降、有孔虫Mg/Ca比分析の結果、LGMの熱帯域水温が3℃以上現在よりも低かったことが明らかになった(Lea et al., 2001; Science, 289, 1719)。また、最終氷期から完新世への移行(最終融氷期)に際して、エルニーニョ的な緩やかな東西水温勾配を維持しながら、熱帯太平洋水温が上昇したことが示された(Koutavas et al., 2002, Science, 297, 226)。さらに、熱帯太平洋西縁の水温上昇は南極気温と大気二酸化炭素濃度の変化に同調し、グリーンランド気温上昇や熱塩循環の変化に数千年先行していたことが明らかになった(Visser et al., 2003, Nature, 421, 152)。これは緩やかな東西水温勾配を保ちつつ、熱帯太平洋全体が早期に温暖化したことを意味する。これらの新知見にもとづき、熱帯太平洋の大気海洋状態の変化(エルニーニョ南方振動の長期的変動など)が氷期間氷期変動に深く関与していたとする考えが浮上してきた。

この熱帯太平洋の果たした役割を明らかにするためには、熱帯太平洋の大気と海洋の平均状態の変化と氷期間氷期変動との関係を理解することが重要である。熱帯太平洋から他地域への気候シグナルの伝搬を理解するには、とくに大気状態の復元が不可欠である。しかし、海洋環境については古水温分布からある程度理解が進んだが、大気の状態についてはほとんど情報が得られていない。

2. 研究の目的

本研究では、熱帯太平洋域の西縁の3地点、東縁の2地点から採取された海底コアに含まれる陸上高等植物起源バイオマーカー(生物起源有機分子)の水素同位体比分析を行い、熱帯太平洋東西両縁の過去15万年間の降水量変動を明らかにし、軌道強制力および全球的気候変動との周期と位相の関係を検討することにより、熱帯太平洋対流活動が気候変動の駆動過程であるのか受動的応答

過程であるのか判断する。あわせてアーキア起源脂質を利用したTEX86古水温推定法を用いて海面温度の復元を行い、大気対流活動と海面温度との対応関係を確認する。特に過去2回の融氷期については時間分解能を高めて分析を行い、大気二酸化炭素濃度、南極気温、グリーンランド気温等の変動との位相関係(先行・遅延の関係)を検討し、気候変動を駆動する諸過程のなかで、熱帯対流活動がどのような役割を果たしたのか手がかりをつかむ。

3. 研究の方法

熱帯太平洋西縁の3地点の海底コアMD05-2928(パプアニューギニア南方)、MD97-2151(南部南シナ海)、MD97-2146(北部南シナ海)、東縁の2地点の海底コアODP Site 1239(エクアドル沖)、ODP Site 1237(ペルー沖)の合計5地点から採取した海底コアを研究に用いた(下図)。



分取された試料について、有機溶媒を用いて生物起源分子(バイオマーカー)を抽出、2段階のカラムクロマトグラフィー、トランスエステル化、尿素アダクト法により長鎖n-アルカン、長鎖n-脂肪酸、長鎖n-アルコールを分離し、ガスクロマトグラフ熱分解同位体比質量分析計(GC/TC/IRMS)を用いて、水素同位体比を測定した。その水素同位体比から降水量を推定することを試みた。

また、堆積物から抽出・分離したテトラエーテル脂質について液体クロマトグラフ質量分析計を用いて分析し、TEX86水温指標を求め、古水温を復元した。

4. 研究成果

熱帯太平洋域の西縁の3地点、東縁の2地点から採取された海底コアに含まれる生物起源有機分子とその水素同位体比の分析を行った。東縁2地点については、有孔虫酸素同位体比を分析し、年代モデルを確立した。

TEX₈₆により求められた古水温は熱帯太平洋では有孔虫のMg/Caから求められた古水温と良く一致した。水温変動は熱帯太平洋東縁が先行し、西太平洋暖水塊南縁(サンゴ海)、西太平洋暖水塊北西縁(東シナ海)の順で遅れて変動することが示された。Mg/Ca比の既報データもあわせて考察すると、融氷期には、

太平洋東縁では冷水舌が縮小，東西水温勾配が小さいエルニーニョに似た平均状態を保ちながら，全体として温暖化し，西縁では暖水塊が拡大したと考えられる．西太平洋暖水塊水温は南シナ海を除くと，南極アイスコア大気二酸化炭素濃度変動と良く一致しており，西太平洋暖水塊が温室効果ガス強制にตอบสนองしていることが示唆された．南シナ海水温は西太平洋暖水塊水温に対して約2千年遅れた変動を示し，冬季モンスーン変動の影響を受けていると解釈した．

南部南シナ海の脂肪酸の水素同位体組成 (δD 値) は，融氷期で顕著に低かった．研究開始時点では，低い δD 値は，大気対流活動が活発で，降水量が多いと解釈するつもりであった．しかし，研究期間中に，ボルネオ島の石筍酸素同位体組成 ($\delta^{18}O$) が報告されたが (Partin et al., 2009, *Nature*, 449, 452), $\delta^{18}O$ は融氷期で高く，対流活動は不活発であったことが示唆された．この石筍記録は，我々の脂肪酸水素同位体記録と矛盾する．もし，水生の高等植物に由来する脂肪酸が融氷期により多く寄与したとすると，水素同位体組成が淡水の組成を反映し，低くなったことがありうる．脂肪酸の水素同位体組成が降水の水素同位体組成を反映しているのかどうか引き続き検討が必要である．

他の地点の脂肪酸の水素同位体組成は，試料中の脂肪酸濃度が低く，分析できなかった．分析を可能にするには，ガスクロマトグラフ熱分解質量分析計において，発生した水素ガスを質量分析計により多く導くよう機器を改良する必要がある．しかし，まだ十分に改良できていない．

脂肪酸水素同位体分析とその結果の解釈については，上記のような困難があり，有効にデータを活用することができなかった．他方，石筍の酸素同位体記録が，他グループにより報告されたことにより，その記録を用いて熱帯太平洋の大気対流活動の変動を理解することが可能になった．

我々の水温記録と，文献の石筍記録データを総合すると，熱帯大気対流活動変動に関して以下のような展望が得られた．

軌道強制力との関係については，Clement et al. (1999; *Paleoceanography*, 14, 441) や

Yamamoto et al. (2004; *Geophysical Research Letters*, 31, L16311) が予測したように歳差運動 (2.3 万年周期) にตอบสนองしてエルニーニョ南方振動が長期的に変動し，熱帯太平洋の東西水温勾配と対流中心の位置が変化した．この変動は水温の東西シーソー的な変動とボルネオ酸素同位体組成の変動として検出された．他方，熱帯太平洋全域同時の変動は大気二酸化炭素濃度変動に平行に離心率変動 (10 万年周期) にตอบสนองしている．離心率変動にตอบสนองした熱帯太平洋全域の温暖化と歳差運動にตอบสนองしたエルニーニョの状態の両者の条件が整ったとき融氷期全球温暖化が起きると理解される．熱帯太平洋のウォーカー循環の変化が融氷期温暖化を引き起こすひとつの要素であることが示唆された．

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16件)

1. Shintani, T., Yamamoto, M., Chen, M.-T., (2011) Paleoenvironmental changes in the northern South China Sea over the past 28,000 years: a study of TEX86-derived sea surface temperatures and terrestrial biomarkers. *Journal of the Asian Earth Science*, 40, 1221-1229. 査読有り.
2. Igarashi, Y., Yamamoto, M., Ikehara, K. (2011) Climate and vegetation in Hokkaido, northern Japan, since the LGM: pollen records from core GH02-1030 off Tokachi in the northwestern Pacific. *Journal of the Asian Earth Science*, 40, 1102-1110. 査読有り.
3. Shiau, L.-J., Chen, M.-T., Clemens, S. C., Huh, C.-A., Yamamoto, M., Yokoyama, Y. (2011) Warm Pool hydrological and terrestrial variability near southern Papua New Guinea Over the past 50k. *Geophysical Research Letters*, 38, L00F01. 査読有り.
4. Ho, S. L., Yamamoto, M., Mollenhauer, G., Minagawa, M. (2011) Core top TEX86 values in the south and equatorial Pacific. *Organic Geochemistry*, 42, 94-99. 査読有り.

5. Isono, D., Yamamoto, M., Irino, T., Oba, T., Murayama, M., Nakamura, T. and Kawahata, K. (2009) The 1,500-year climate oscillation in the mid-latitude North Pacific during the Holocene. *Geology*, 37, 591-594. doi:10.1130/G25667A. 査読有り.
6. Yamamoto, M., Polyak, L. (2009) Changes in terrestrial organic matter input to the Mendeleev Ridge, western Arctic Ocean, during the Late Quaternary. *Global and Planetary Change*, 68, 30-37. doi:10.1016/j.gloplacha.2009.03.012. 査読有り.
7. Inagaki, M., Yamamoto, M., Igarashi, Y., Ikehara, K. (2009) Biomarker records from Core GH02-1030 off Tokachi in the northwestern Pacific over the last 23,000 years; Environmental changes during the last deglaciation. *Journal of Oceanography*, 65, 847-858. 査読有り.
8. Yamamoto, M. (2009) Response of mid-latitude North Pacific surface temperatures to orbital forcing and linkage to the East Asian summer monsoon and tropical ocean-atmosphere interactions. *Journal of Quaternary Science*, 24, 836-847. 査読有り.
9. 山本正伸 (2009) 北太平洋中緯度域の氷期・間氷期気候変動. *地質学雑誌*, 115, 325-332. 査読有り.
10. 山本正伸・五十嵐八枝子・大場忠道 (2009) 北太平洋亜熱帯循環の氷期・間氷期変動—熱帯大気海洋相互作用および東アジア夏季モンスーンとの関連. *第四紀研究*, 48, 195-206. 査読有り.
11. 山本正伸 (2009) 古水温変動からみた北太平洋の軌道強制力に対する応答. *化石*, 86, 44-57. 査読有り.
12. Yamamoto, M., Okino, T., Sugisaki, S., Sakamoto, T. (2008) Late Pleistocene changes in terrestrial biomarkers in sediments from the central Arctic Ocean. *Organic Geochemistry*, 39, 754-763. 査読有り.
13. Shiau, L.-J., Yu, P.-S., Wei, K.-Y., Yamamoto, M., Lee, T.-Q., Yu, E.-F., Fang, T.-H. and Chen, M.-T. (2008) Sea surface temperature, productivity, and terrestrial flux variations of the southeastern South China Sea over the past 800,000 years (IMAGES MD972142). *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Science*, 19, 363-376. doi:10.3319/TAO.2008.19.4.363. 査読有り.
14. Shintani, T., Yamamoto, M., Chen, M.-T. (2008) Slow warming of the northern South China Sea during the last deglaciation. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Science*, 19, 341-346. doi:10.3319/TAO.2008.19.4.341. 査読有り.
15. Yamamoto, M., Yamamuro, M. and Tanaka, Y. (2007) The California current system during the last 136,000 years: response of the North Pacific High to precessional forcing. *Quaternary Science Reviews*, 26, 405-414. 査読有り.
16. Yamamoto, M., Shimamoto, A., Fukuhara, T., Naraoka, H., Tanaka, Y., Nishimura, A. (2007) Seasonal and depth variations in molecular and isotopic alkenone composition of sinking particles from the western North Pacific. *Deep-Sea Research Part I*, 54, 1571-1592. 査読有り.
- [学会発表] (計28件)
1. Masanobu Yamamoto, Hirota Kai Sai, and Liang-Jiang Shiau, Min-Te Chen (2011) Response of the Asian winter monsoon to precessional forcing: Evidence from SST variation in the South China Sea. 2011 Kochi International Symposium on Paleoclimatology and Paleoenvironment in East Asia (Kochi, 2 March 2011).
2. 山本正伸・齊博貴・籙良堅・陳明德 (2011) 過去15万年間の西太平洋暖水塊の水温変動. 2010年度古海洋シンポジウム (2011年1月7日, 柏)
3. 山本正伸 (2010) 北西太平洋沈降粒子中のテトラエーテル脂質とTEX86指標値. 第

- 28 回有機地球化学シンポジウム
(2010 年8月6日, 長岡) .
4. Hasrizal bin Shaari, Masanobu Yamamoto, Tomohisa Irino, Tatsufumi Okino (2010) Sea surface temperature variability and GDGT distributions during the Last Glacial cycles in the Eastern Equatorial Pacific. 第28 回有機地球化学シンポジウム(2010 年8月6日, 長岡) .
 5. Yamamoto, M., Sai, H., Shiau, L., Chen, M. (2010) Asynchronous variations of the northern and southern margins of the Western Pacific Warm Pool during the last 150,000 years. American Geophysical Union 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 23 June 2010, Taipei.
 6. Ajioka, T., Yamamoto, M., Okino, T., Takemura, K., Hayashida, A. (2010) Paleotemperature reconstruction based on MBT/CBT-index from Lake Biwa sediment, central Japan, during the last 56,000 years. American Geophysical Union 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 23 June 2010, Taipei.
 7. Yamamoto, M. (2010) Paleoclimate changes in historical times. ESF-JSPS Frontier Science Conference Series for Young Researchers. Contact Zones of Empires in Asia and Europe: Complexity, Contingency, Causality. 27 February- 4 March 2010, Fukuoka.
 8. Yamamoto, M. (2010) Paleotemperature variation in the South China Sea and the displacement of the Intertropical Convergence Zone during the last 30 kyrs. Western Pacific Paleocyanography Workshop I: Future Challenge, January 11-12, 2010, Keelung.
 9. Nakanishi, T., Yamamoto, M., Okino, T., Irino, T., Oda, H., Yokoyama, Y., Matsuzaki, H., Tada, R. (2010) Holocene temperature change in the northern East China Sea; Application of TEX86 paleothermometry. Western Pacific Paleocyanography Workshop I: Future Challenge, January 11-12, 2010, Keelung.
 10. Sai, H., Yamamoto, M., Chen, M.T. (2009) TEX86 and UK37' paleotemperature records from the southern South China Sea during the last two glacial cycles. American Geophysical Union, fall meeting 2009, San Francisco, December 15, 2009.
 11. Nakanishi, T., Yamamoto, M., Okino, T., Irino, T., Oda, H., Yokoyama, Y., Matsuzaki, H., Tada, R. (2009) Holocene temperature change in the northern East China Sea; Application of TEX86 paleothermometry. American Geophysical Union, fall meeting 2009, San Francisco, December 15, 2009.
 12. Yamamoto, M., Shintani, T., Sai, H., Chen, M.-T. (2009) Paleotemperature variation in the South China Sea and the displacement of the intertropical convergence zone during the last 30 kyrs. American Geophysical Union, fall meeting 2009, San Francisco, December 15, 2009.
 13. Shiau, L., Huh, C., Clemens, S C., Yamamoto, M., Liao, Y., Yokoyama, Y., Chen, M.T. (2009) Biogenic and terrestrial sediment records of the last two glacial cycles from offshore southeastern Papua New Guinea. American Geophysical Union, fall meeting 2009, San Francisco, December 15, 2009.
 14. Ajioka, T., Yamamoto, M., Okino, T., Takemura, K., Hayashida, A. (2009) Paleotemperature reconstruction in Lake Biwa, central Japan, during the last 50,000 years. American Geophysical Union, fall meeting 2009, San Francisco, December 14, 2009.
 15. 山本正伸・新谷知也・齋博貴・陳明徳 (2009) 南シナ海コア古水温変動からみた過去3万年間の熱帯収束帯の変動. 日本第四紀学会2009年大会. 滋賀県立琵琶

- 湖博物館（滋賀県草津市），2009年8月29日。
16. 山本正伸・沖野龍文・嶋本晶文 (2009) 北西太平洋沈降粒子中TEX86の季節変動. 2008年度古海洋学シンポジウム. 東京大学海洋研究所(東京), 2009年1月9日.
 17. 中西貴大・山本正伸・入野智久・沖野龍文・多田隆治 (2009) 東シナ海懸濁粒子中のTEX86とUK37'. 2008年度古海洋学シンポジウム. 東京大学海洋研究所(東京), 2009年1月9日.
 18. 齋博貴・山本正伸・沖野龍文・陳明德 (2009) 過去15 万年間の南部南シナ海の古水温変動. 2008年度古海洋学シンポジウム. 東京大学海洋研究所(東京), 2009年1月9日.
 19. 中西貴大・山本正伸・沖野龍文・入野智久・小田啓邦・横山祐典・松崎浩之・多田隆治 (2008) 東シナ海北部の完新世水温変動. 日本地球化学会 2008年度年会(東大)2008年9月19日.
 20. 齋博貴・山本正伸・陳明德 (2008) TEX86 による過去15 万年間の南部南シナ海の古水温復元. 日本地球化学会 2008年度年会(東大)2008年9月19日.
 21. 山本正伸・五十嵐八枝子・大場忠道 (2008) 北西太平洋とその縁辺域の氷期間氷期変動. 日本第四紀学会2008年大会(東京大学)シンポジウム「第四紀後期の気候変動と地球システムの挙動—その原因とメカニズムの解明に向けて—」2008年8月24日
 22. 山本正伸 (2008) 北太平洋・熱帯太平洋の古海洋学. 国立極地研究所研究集会 南極氷床の物理・化学・生物のフロンティア. 国立極地研究所(東京), 2008年3月13日
 23. 山本正伸・沖野龍文 (2008) TEX86 古水温指標の第四紀古海洋学研究への適用. 2007年度古海洋学シンポジウム. 東京大学海洋研究所(東京), 2008年1月8日.
 24. Shiau, L.-J., Huh, C.-A., Yamamoto, M. and Chen, M.-T. (2007) 50,000-year Late Quaternary Biogenic Sedimentation, Sea Surface Temperature, and Land Erosion Records From the Southern Papua New Guinea (IMAGES MD052928). American Geophysical Union 2007 Fall Meeting, San Francisco, 10 December 2007.
 25. Yamamoto, M. (2007) East-west seesaw of sea surface temperature variation in the mid-latitude North Pacific on orbital and millennial time scales. International Symposium on Quaternary Environmental Changes and Humans in Asia and the Western Pacific, Tsukuba, 10 November 2007.
 26. 山本正伸 (2007) 海洋堆積物のバイオマーカーからみた北太平洋中緯度域の気候変動. 日本地質学会第114回学術大会シンポジウム, 札幌, 2007年9月9日.
 27. 山本正伸・沖野龍文 (2007) TEX86とBIT指標の検討. 2007年有機地球化学シンポジウム. 金沢, 2007年7月28日.
 28. 山本正伸 (2007) 北西太平洋・東アジア地域の最終融氷期寒冷化. 日本地球惑星科学連合2007年大会. 千葉, 2007年5月24日.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
山本 正伸 (YAMAMOTO MASANOBU)
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・准教授
研究者番号：60332475
 - (2) 研究分担者
入野 智久 (IRINO TOMOHISA)
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・助教
研究者番号：70332476
杉本 敦子 (SUGIMOTO ATSUKO)
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・教授
研究者番号：50235892
沖野 龍文 (OKINO TATSUFUMI)
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・准教授
研究者番号：30280910
 - (3) 連携研究者
なし