

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02012

研究課題名(和文)地質時代境界事変のペースメーカーとしての天文周期

研究課題名(英文)Astronomical cycles as pacemakers of geological age boundary events

研究代表者

池田 昌之 (IKEDA, MASAYUKI)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：10635882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,910,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、地質時代境界として定義された示準化石の出現や絶滅のいくつか、天文学的周期の環境変動によってペースメーカーされたという可能性を検証するため、主に新生代と中生代の地質時代境界を跨いで地球化学的・古生物学的な検討を行った。その結果、従来のミランコビッチ仮説で注目された2万年から10万年の地球軌道要素変化の振幅変調周期である、100万年から1000万年の地球軌道要素変化がモンスーンや炭素循環を介して、地質時代境界の気候変動のいくつかに影響したことを明らかにした。さらに、1000万年周期の気候変動が恐竜などの初期放散や大型化など生物進化にも影響した可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は生物の絶滅や進化がどのように起きてきたかという謎への答えの一助として、巨大天体衝突や大規模火成活動だけでなく、地球軌道要素の極端な変化が重要であった可能性を指摘した。特に、日射量変動が植生や風化のフィードバックを介して、大気中二酸化炭素濃度を大きく変化させ、これが植物や恐竜などの脊椎動物、海洋無脊椎動物の群集変化やサイズ変化にも影響を与えていた点で、学術的および社会的な意義が高い

研究成果の概要(英文)：We examined mainly geochemical and palaeontological investigations across the Cenozoic and Mesozoic geological age boundaries in order to test the possibility that some of the indicative fossil occurrences and extinctions defined as geological age boundaries were pace-marked by astronomical cycles of environmental change. The results show that the 1-10 million year scale amplitude modulation cycle of the 20,000-100,000 year Earth orbital element change, which was the focus of the previous Milankovitch hypothesis, affected some of the climate changes at the geological age boundary via the monsoon and carbon cycle. The study also showed that the 10-million-year climate change may have affected biological evolution, including the early dispersal and enlargement of dinosaurs and other animals.

研究分野：古気候学

キーワード：地質時代境界事変 天文周期 絶滅 海洋無酸素事変 ミランコビッチサイクル

### 1. 研究開始当初の背景

19世紀初頭の化石による地層の同定 (Smith, 1816) により、系統的な地球生命史研究が可能になった。しかし、境界として認定された群集シフトが起きた要因については、現在も重要な課題である (Alroy, 2010 *Science*)。古生物学や古環境学の発展により高精度に時代境界が認定され、大規模な環境変化や火山活動や海水準変動、隕石衝突など諸説が要因として提唱されてきた。しかし、多くの知見は数回程度の大量絶滅に限られ、国際的な基準である階の境界事変の殆どは未解明であった。

一方、氷期サイクルに代表される数万年~10万年スケールでの環境変化は、地球軌道の準周期変化 (ミランコビッチサイクル) がペースメーカーであり (Hays et al., 1976 *Science*) 日射が域値を越えると環境が非線形応答し、群集シフトの要因となることも明らかになった。しかし、さらに長周期の100万年から1000万年周期での地球軌道要素の変化とその表層環境や生態系への影響は議論が続いていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、100万年から1000万年周期の表層環境や生態系の変動が、どの程度、地軸傾動や離心率変動の影響を受けたか？さらに、その増幅メカニズムは何か？について検討する。そして、これらの地球環境変動が生態系に与えた影響、特に絶滅や進化のメカニズムの解明を試みる

### 3. 研究の方法

本申請では、地質時代境界のモンスーンに伴う植生変化や大陸風化、海洋環境変化を万年スケールの高解像度で浅海層と深海層から池田・後藤・堀が復元すると共に、大気-海洋結合大循環モデル MIROC を用い、過去の大陸配置における地球軌道要素 (離心率と地軸傾動) に対する大陸風化の感度実験を行い、地質記録と比較して1000万年スケールの環境動態とその地球軌道要素変化の影響、増幅過程等を解明し、各階境界で表層環境や生態系に与えた影響を検討する。

地質記録として美濃帯-神居古潭帯ジュラ系深海層と白亜紀における1000万年周期の13C極小期 (離心率極大期) と13C極大期 (離心率極小期) における時代境界の軌道変化を検討した。従来は13CやCa濃度など古気候学的解釈が複雑な指標が用いられていたが、本研究では古気候学的解釈がより明確な生物源Si堆積速度や風化度、植生記録、砂漠堆積物分布を用いた。

### 4. 研究成果

中生代から新生代の地質時代境界における、モンスーンに伴う大気-海洋系の変動を(半)定量的に復元するため、地球化学的・堆積学的検討を本邦及び欧米の深海層や浅海層について行なった。新型コロナウイルスの影響で地質調査が思うように進まなかったが、白亜系深海チャートからは想定していたモンスーンに加え、様々な陸上植物化石が発見され、アプチアの海洋無酸素事変 OAE 1a に伴う水循環強化が Barremian/Aptian 境界付近から発生したことが明らかになった (Nakagawa, Ikeda, Hori et al., 2022 *Global and Planetary changes*)。さらに、熱帯降水帯の数1000年スケール変動も確認され、同時期の高緯度に位置したモンゴル湖成層の湿潤度変動にも数10年から数1000年スケール変動も記録されていることから (Hasegawa, Ikeda et al., 2022 *Scientific Reports*) より短周期の環境変動に振幅もかなり大きいことがわかり、さらなる高解像度な研究が必要であることが判明したことは重要である。数100年から数1000年の変動はペルム紀末絶滅時期の山火事記録 (Saito, Ikeda et al., 2023 *Nature communications*) や三疊紀末絶滅時期の遠洋生物生産量 (Bole, Ikeda et al., 2022 *Global and Planetary Changes*) においても明らかにした。

一方、数万年から1000万年スケールの地球軌道要素変化がモンスーン強度変動や全球風化速度変動を介して、大気CO<sub>2</sub>濃度変動や表層水温変動に影響し、陸上植物や恐竜などの脊椎動物、放散虫などの海洋無脊椎動物の生物地理や体サイズにも影響したことが示唆された (Ikeda et al., 2020 *Scientific Reports*)。そのため、数10年スケールから1000万年スケールまでの環境変動をシームレスに検討することが必要と考えられる。

ただし、天文学的要因のみならず大陸配置や地形といったテクトニックな要因も重要であるため、これらの変化についても検討している (池田ほか JpGU2023; Ikeda et al., in prep)。その結果、想定していた白亜紀の砂漠帯の移動の多くは大陸移動の影響が無視できないことがわかり、古地磁気学的にも顕著であったゴビ砂漠の北上は天文学的影響ではなく、アジア東岸山脈の隆起の影響で説明しうることを示した (Higuchi, Ikeda et al., in prep)

さらに、最も最近の1000万年の極大期である中新世後期の地球寒冷化と北太平洋のメガロドンやデスモスチルスといった大型脊椎動物の最終産出と放散虫群集転換のメカニズムも検討した。各水塊の強度指標となる放散虫の群集変化を数千年スケールの時間分解能で検討すること

により、水塊毎に地軸傾動の4万年周期が卓越し、太平洋子午面循環や冬モンスーン強度の変動が南と北の氷床量変動によって、それぞれ引き起こされた可能性を見出した (Matsuzaki, Ikeda et al., 2022 Scientific Reports)。一方、同時期に絶滅した日本海固有種の放散虫は離心率変動の10万年周期が卓越し、夏モンスーン弱화에伴う栄養塩供給量の弱化が要因であった可能性を指摘し、これが絶滅要因であると示唆した。ただし、日本海の古地形、特に古津軽海峡の開閉が影響した可能性も否定できず、日本海においても天文学的周期のみならず、テクトニクスの高精度な復元が必要であることが判明した。

これらの結果は、想定していた天文学的周期の影響のみならず、大陸配置や古地形といったテクトニクスの影響の重要性を指摘したという意味で非常に示唆に富んだ成果であり、今後は古気候学で境界条件と考えることの多いテクトニクスの制約と天文学的な古気候学的研究の両輪が必要であることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kemp David B., Chen Wenhan, Cho Tenichi, Algeo Thomas J., Shen Jun, Ikeda Masayuki	4. 巻 212
2. 論文標題 Deep-ocean anoxia across the Pliensbachian-Toarcian boundary and the Toarcian Oceanic Anoxic Event in the Panthalassic Ocean	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Global and Planetary Change	6. 最初と最後の頁 103782 ~ 103782
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gloplacha.2022.103782	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 Kaiho Kunio, Tanaka Daisuke, Richoz Sylvain, Jones David S., Saito Ryosuke, Kameyama Daichi, Ikeda Masayuki, Takahashi Satoshi, Aftabuzzaman Md., Fujibayashi Megumu	4. 巻 579
2. 論文標題 Volcanic temperature changes modulated volatile release and climate fluctuations at the end-Triassic mass extinction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 117364 ~ 117364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2021.117364	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 北村晃寿・池田昌之	4. 巻 48
2. 論文標題 2021年7月3日に静岡県熱海市伊豆山地区で発生した土石流の速報	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 静岡大学地球科学研究報告	6. 最初と最後の頁 63-71
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 McGairy Anna, Komatsu Toshifumi, Williams Mark, Harvey Thomas H. P., Miller C. Giles, Nguyen Phong Duc, Legrand Julien, Yamada Toshihiro, Siveter David J., Bush Harrison, Stocker Christopher P.	4. 巻 17
2. 論文標題 Ostracods had colonized estuaries by the late Silurian	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biology Letters	6. 最初と最後の頁 20210403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsbl.2021.0403	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 Legrand Julien, Yamada Toshihiro, Komatsu Toshifumi, Williams Mark, Harvey Tom, De Backer Tim, Vandenbroucke Thijs R.A., Nguyen Phong Duc, Doan Hung Dinh, Nguyen Hung Ba	4. 巻 107
2. 論文標題 Implications of an early land plant spore assemblage for the late Silurian age of the Si Ka Formation, northern Vietnam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annales de Paléontologie	6. 最初と最後の頁 102486 ~ 102486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.annpal.2021.102486	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 Legrand Julien, Takimoto Hideo, Pons Denise, Nishida Harufumi	4. 巻 65
2. 論文標題 Paleofloristic and paleoenvironmental implications of a Late Jurassic palynoflora from the Tochikubo Formation, North-East Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geobios	6. 最初と最後の頁 29 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geobios.2021.03.001	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 Legrand Julien, Yamada Toshihiro, Nishida Harufumi	4. 巻 136
2. 論文標題 Yezopollis mikasaensis gen. et sp. nov., a new Normapolles-type angiosperm pollen from the Upper Cretaceous of Hokkaido, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cretaceous Research	6. 最初と最後の頁 105216 ~ 105216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cretres.2022.105216	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 Legrand Julien, Yamada Toshihiro, Terada Kazuo, Nishida Harufumi	4. 巻 25
2. 論文標題 Palynofloras from the Itsuki and Kuwajima Formations of the Tetori Group and their Correlation with Paleofloristic Provinces of Eastern Asia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Paleontological Research	6. 最初と最後の頁 177-190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2517/2020PR017	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 Ikeda Masayuki, Tada Ryuji	4. 巻 537
2. 論文標題 Reconstruction of the chaotic behavior of the Solar System from geologic records	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116168 ~ 116168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2020.116168	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 Ikeda Masayuki, Ozaki Kazumi, Legrand Julien	4. 巻 10
2. 論文標題 Impact of 10-Myr scale monsoon dynamics on Mesozoic climate and ecosystems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 11984
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-68542-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 -

1. 著者名 Maximilien BoLE, IKEDA Masayuki, Peter O. BAUMGARTNER, HORI S. Rie, Anne-Sophie BOUVIER and Duje KUKO	4. 巻 71
2. 論文標題 Oxygen isotope analysis of Mesozoic radiolarites using SIMS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of the Geological Survey of Japan	6. 最初と最後の頁 355-393
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 無
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 Maximilien BoLE, IKEDA Masayuki, Peter O. BAUMGARTNER, HORI S. Rie, Anne-Sophie BOUVIER and Duje KUKO	4. 巻 71
2. 論文標題 SIMS analysis of Si isotope for radiolarian test in Mesozoic bedded chert, Inuyama, central Japan.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of the Geological Survey of Japan	6. 最初と最後の頁 331-353
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 無
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 Ikeda Masayuki, Tada Ryuji	4. 巻 537
2. 論文標題 Reconstruction of the chaotic behavior of the Solar System from geologic records	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 116168 ~ 116168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2020.116168	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 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 16448
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

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Masayuki Ikeda, Kazumi Ozaki, LeGrand Julien
2. 発表標題 Impact of long-term monsoon dynamics on Cenozoic-Mesozoic climate and ecosystems.
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2021. (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川友紀、LeGrand Julien、堀利栄、黒田純一郎、長谷川精、池田昌之
2. 発表標題 白亜紀アプチアン海洋無酸素事 変OAE 1a時期の遠洋深海層状チャートでみられた遠洋域での陸上植物の堆積
3. 学会等名 JpGU2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Maher A., Yamada T., Legrand J.
2. 発表標題 Palynostratigraphy of the Permo-Carboniferous succession in two wells from the Gulf of Suez, Egypt.
3. 学会等名 日本古生物学会2021年年会.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 馬場美邑・ルグラン ジュリアン・西村智弘・池田昌之.
2. 発表標題 上部白亜系蝦夷層群函淵層ハドロサウルス産出層の古花粉学的研究.
3. 学会等名 日本古生物学会2021年年会.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Julien Legrand・山田敏弘・小松俊文・Mark Williams・Tom Harvey・Tim De Backer・Thijs R.A. Vandenbroucke・Phong Duc Nguyen・Hung Dinh Doan・Hung Ba Nguyen
2. 発表標題 初期陸上植物の微化石群集から解明する北部ベトナムSi Ka層の地質年代と古環境.
3. 学会等名 日本古生物学会2021年年会.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M Boile, M Ikeda, RS Hori, PO Baumgartner
2. 発表標題 Silicon Isotopes Of The Mesozoic Radiolaria: Implications For Carbon-Silicon Cycle Coupling.
3. 学会等名 Goldschmidt 2020
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 池田昌之、ルグラン ジュリアン、古賀多聞
2. 発表標題 陸域脊椎動物の群集変化要因としてのモンスーン:三畳紀の例
3. 学会等名 日本古生物学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M Bole, M Ikeda, RS Hori, PO Baumgartner
2. 発表標題 Silicon Isotopes Of The Mesozoic Radiolaria: Implications For Carbon-Silicon Cycle Coupling.
3. 学会等名 American Geophysical Union 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryusei Kuma, Hitoshi Hasegawa, Koshi Yamamoto, Masayuki Ikeda, Hidekazu Yoshida, Nagayoshi Katsuta, Jessica Hope Whiteside
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 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田昌之
2. 発表標題 中生代の地球環境と生態系の変遷
3. 学会等名 日本古生物学会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田昌之、ルグラン ジュリアン、古賀多聞
2. 発表標題 陸域脊椎動物の群集変化要因としてのモンスーン：三畳紀の例
3. 学会等名 日本古生物学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田昌之
2. 発表標題 氷室地球と温室地球の遷移期における地球軌道要素が表層環境に与えた影響
3. 学会等名 日本地球惑星連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

池田昌之のホームページ <a href="https://sites.google.com/site/masayukiikedaswebsite/">https://sites.google.com/site/masayukiikedaswebsite/</a> Masayuki Ikeda's website <a href="https://sites.google.com/site/masayukiikedaswebsite/ikeda-s-website">https://sites.google.com/site/masayukiikedaswebsite/ikeda-s-website</a> masayukiikedaswebsite <a href="https://sites.google.com/site/masayukiikedaswebsite/">https://sites.google.com/site/masayukiikedaswebsite/</a>
---

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	堀 利栄 (Hori Rie)  (30263924)	愛媛大学・理工学研究科(理学系)・教授  (16301)	

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	後藤 孝介  (Goto Kosuke)  (30612171)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員    (82626)	
研究分担者	LEGRAND Julien  (Legrand Julien)  (60737534)	静岡大学・理学部・助教    (13801)	

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		
中国	南京大学	中国地質大学武漢	
米国	シンシナティ大学		
英国	レイセスター大学	The Natural History Museum	
ベトナム	ベトナム地球科学鉱物資源研究所		
中国	南京大学	中国地質大学(武漢)	
米国	コロンビア大学	マサチューセッツ工科大学	
スイス	ローザンヌ大学		