

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～千年周期気候変動と太陽活動の気候影響

Solar influence of decadal- to millennial-scale climate variability in the mid-Cretaceous Supergreenhouse: Insights from a Mongolian lacustrine record

*長谷川 精¹、安藤 寿男²、勝田 長貴³、村木 綏⁴、Ichinnorov Niiden⁵、村山 雅史⁶、山本 鋼志⁷、太田 亨⁸、長谷川 卓⁹、山本 正伸¹⁰、長谷部 徳子¹¹、Heimhofer Ulrich¹²、池田 昌之¹³、西本 昌司¹⁴、山口 浩一¹⁵、阿部 文雄⁴、多田 隆治¹⁶

*Hitoshi Hasegawa¹, Hisao Ando², Nagayoshi Katsuta³, Yasushi Muraki⁴, Niiden Ichinnorov⁵, Masafumi Murayama⁶, Koshi Yamamoto⁷, Tohru Ohta⁸, Takashi Hasegawa⁹, Masanobu Yamamoto¹⁰, Noriko Hasebe¹¹, Ulrich Heimhofer¹², Masayuki Ikeda¹³, Shoji Nishimoto¹⁴, Koichi Yamaguchi¹⁵, Fumio Abe⁴, Ryuji Tada¹⁶

1. 高知大学理工学部、2. 茨城大学理学部、3. 岐阜大学教育学部、4. 名古屋大学宇宙地球環境研究所、5. モンゴル古生物地質研究所、6. 高知大学農林海洋学部、7. 名古屋大学環境学研究科、8. 早稲田大学教育学部、9. 金沢大学理学部、10. 北海道大学地球環境科学研究所、11. 金沢大学環日本海研究センター、12. ハノーバー大学地質学科、13. 静岡大学理学部、14. 名古屋市科学館、15. 名古屋市工業研究所、16. 東京大学地球惑星科学専攻

1. Faculty of Science and Technology, Kochi University, 2. Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Ibaraki University, 3. Faculty of Education, Gifu University, 4. Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, 5. Institute of Paleontology and Geology, Mongolian Academy of Sciences, 6. Faculty of Agriculture and Marine Sciences, Kochi University, 7. Department of Earth and Environmental Studies, Nagoya University, 8. Faculty of Education and Integrated Arts and Sciences, Waseda University, 9. Faculty of Science, Kanazawa University, 10. Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, 11. Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, 12. Institut für Geologie, Leibniz Universität Hannover, 13. Institute of Geoscience, Shizuoka University, 14. Nagoya City Science Museum, 15. Nagoya Municipal Industrial Research Institute, 16. Department of Earth and Planetary Science, the University of Tokyo

完新世および最終氷期における気候変動には数十年～千年スケールの周期性が見られ、宇宙線生成核種 (¹⁴Cや¹⁰Be) の生成量変動との相関が見られることから、太陽活動の周期変動が地球の気候変動に影響を及ぼしている可能性が指摘されている(約210年周期のde Vries cycleや約1000年のEddy cycle, 約2300年周期のHallstatt cycleなど; e.g., Steinhilber *et al.*, 2012; Adolphi *et al.*, 2014; Moffa-Sanchez *et al.*, 2014; Soon *et al.*, 2014)。また完新世のBond eventや最終氷期のダンスガード・オシュガー・サイクル(DOC)のように、約1500年周期の気候変動も北大西洋や北極域などの古気候記録から報告されており、その変動要因は気候システムが持つ内部振動なのか、太陽活動変動などの外的フォーシングの影響があるのかどうか議論が続いている(e.g., Bond *et al.*, 2001; Braun *et al.*, 2005; Debret *et al.*, 2009; Muscheler, 2012; Barker *et al.*, 2015; Buizert & Schmittner, 2015)。しかし、第四紀以前においても太陽活動周期に対応した数十年～千年スケールの気候変動が一貫して見られるかどうかは、解析が可能なアーカイブに限られるため、中新世の一例(Kern *et al.*, 2012)を除いて示されていない。本研究では、年縞を保存するモンゴルの湖成層を解析することで、完新世や最終氷期に見られる太陽活動周期と極めて類似する、十年～千年スケールの気候変動が白亜紀中期にも見られることを報告する。

白亜紀中期“超温室期”における陸域気候システムの変動を解明するため、我々はモンゴル南東部に露出するアプチアン期前期(123.8～118.5Ma)の湖成層(シネフダグ層)を対象に研究を進めてきた。シネフダグ層は数mから数十m毎にリズミカルに互層する頁岩とドロマイトからなり、地球軌道要素変動に伴う湖水位(降水量)変動を反映している(Hasegawa *et al.*, 2018)。また高湖水位期に対応する頁岩層準では、春～夏

の生物生産増大と秋~冬の碎屑物流入の季節変動を反映した年縞（ねんこう）を保存する。そこで蛍光顕微鏡画像の画像解析により、連続した約1090年区間の夏季強度の変動を解析した結果、約3-5年、11年、35-40年、90-120年、220年、360-400年の周期性が検出された。これらは報告されている太陽活動周期（11年のSchwabe cycle, 88-105年のGleissberg cycle, 約210年のde Vries cycle）と一致しており、太陽活動が影響したと考えられる十年~百年周期の気候変動が白亜紀中期の記録にも見られることが明らかになった。特に太陽黒点変動に卓越する11年周期の変動は、古気候記録からは報告が限られるが（e.g., Czymik *et al.*, 2016; Novello *et al.*, 2016）、白亜紀中期のアジア中緯度域には11年周期の気候変動も卓越していたことが示唆された。

本研究では更に、 μ XRFコアスキャナー（ITRAX）を用いて20m長のコア試料（約20万年区間に相当）に対して500 μ m毎（約10年の解像度）で主要・微量元素組成を測定し、百年~千年スケールの気候変動がどのように記録されているかを検討した。その結果、降水量因子（Ca/Ti）の変動から約400-500年、1000年、1400-1450年、2000-2300年、3500-4000年の周期性が検出された。この約400-500年、1000年および2000-2300年の周期性は、報告されている太陽活動周期（約1000年のEddy cycleや約2300年のHallstatt cycle）と一致する。また約1400-1450年周期の変動は、最終氷期のDOCと周期性や変動パターンが非常に類似していた。これらの結果は、上述の年縞解析の結果と併せて考えると、白亜紀と氷期・間氷期という全く異なる気候モードにおいても共通の外力（フォーシング）によって気候が変動していたことを示唆し、太陽活動が影響して数十年~千年周期で地球気候が変動するという考えを支持する。またDOCは氷床融解や海洋循環などの内部変動に起因するという考えが支配的だったが（e.g., Barker *et al.*, 2015; Buizert & Schmittner, 2015）、氷床サイズや海-陸分布が全く異なる中新世（Kern *et al.*, 2012）や白亜紀（本研究）にも類似した周期変動が見られることから、約1400-1500年の周期性についても外的フォーシングが影響した気候振動の可能性を示唆した先行研究の考え（Bond *et al.*, 2001; Braun *et al.*, 2005）を支持する。約1500年の周期性は完新世の宇宙線核種生成量などの太陽活動変動には見られないという問題があるが、Muscheler (2012)も指摘するように古気候記録に一貫して見られる約1500年の周期性の要因として、太陽活動の気候影響の可能性を完全には排除できないと考えられる。さらに、氷期の気候モードでのみ見られた千年周期の急激な気候変動（Barker *et al.*, 2011）が白亜紀中期“超温室期”にも見られることから、現在よりも温暖な気候モードにおいても千年周期の急激な気候変動を引き起こす安定解が存在する可能性が示唆された。

キーワード：十年周期、千年周期、気候変動、湖成年縞、白亜紀、太陽活動

Keywords: decadal-scale, millennial-scale, Climate variability, Lacustrine varve, Cretaceous, Solar activity