

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800266

研究課題名(和文)長周期ミランコビッチサイクルに伴う炭素循環動態の解読

研究課題名(英文)Carbon cycle dynamics paced by the long-period Milankovitch cycle

研究代表者

池田 昌之(Masayuki, Ikeda)

静岡大学・理学部・助教

研究者番号：10635882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：国内外の深海層や陸成層の地質調査と化学分析、および数値計算を基に、中生代の天文学的周期が気候変化を介して全球の大陸風化や炭素循環に影響していたことを明らかにしました。天文学的周期の影響が増幅した原因として、当時存在した超大陸パンゲアで発生した大規模な大気循環「メガ・モンスーン」が寄与した可能性を指摘しました。この結果は、温暖な中生代における地球システムの応答を解明する上で重要な成果であると言えます。

研究成果の概要(英文)：This research show that the long-period Milankovitch cycle paced global chemical weathering and carbon cycle through climate change during the Mesozoic on the basis of the geologic survey and chemical analysis of deep-sea and continental sequences with numerical modelling. We propose that Mega-monsoon over Supercontinent Pangea could have amplified the astronomical forcing. Our research provide new insights into the Earth system response to astronomical forcing during the Mesozoic greenhouse world.

研究分野：地質学、地球環境史学、堆積学

キーワード：天文学的周期 炭素循環 シリカ循環 深海 堆積リズム 環境変動

### 1. 研究開始当初の背景

大気中の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) は、その温室効果により、気候変化を左右する重要な要素です。大気 CO<sub>2</sub> 濃度は、地質学的時間スケール (数十万年程度) においては、大陸風化により大気から除去される速度に強く影響されます。大陸風化による CO<sub>2</sub> の除去速度は、環境条件 (気温や降水量等) に影響されますが、それらは大気 CO<sub>2</sub> 濃度と関連しているため、大陸風化は気候の安定化に重要な役割を担っています。たとえば、何らかの要因で気候が温暖化した場合、大陸風化が促進されることで大気 CO<sub>2</sub> 濃度が低下し地球温暖化を抑制する、という安定化機構が働くと考えられます。そのため、大陸風化が地質時代を通じて、どのような要因によって、どの程度変化したのかを明らかにすることは、過去の炭素循環を介した気候状態や生態系、物質循環、及びそれらの変化要因を理解する上で非常に重要です。

地質学的時間スケールで全球的な気候状態を左右する要因の中で、とりわけ重要なものの一つとして、天文学的周期「ミランコビッチ・サイクル」が挙げられます。地球の軌道は、太陽と木星や火星などの惑星の重力相互作用により、約 2 万年、4 万年、10 万年、40.5 万年、数 100 万年～数 1000 万年スケールにまで及ぶ階層的な周期に伴って変化します。その結果、地球が受ける日射量やその分布が変わることで、例えば氷期-間氷期サイクル等の、全球的で大規模な気候変動が引き起こされてきたと考えられています。しかし、全球の大陸風化速度を、地質記録から直接見積もることは一般に困難であり、過去の大陸風化速度やその変化要因については、よく分かっていませんでした。

私たちは、日本をはじめ、アジアやアメリカ、ニュージーランドなど環太平洋地域に広く分布する、中生代の深海チャートが、当時の全球の大陸風化速度の指標となりうるの

ではないか、と考えました。なぜなら、深海チャートは主に放散虫起源のシリカで構成されており、大陸風化によって海洋へと供給されるシリカの主要な除去プロセスだった可能性があるからです。

しかしながら、深海チャートについて、どれほどのシリカが、どの程度変動しながら堆積したのかは、不明でした。その理由の一つは、堆積速度を計算する上での時間分解能が、従来の化石に基づく時代区分では数 100 万年オーダーと粗かったためです。

そこで私たちは、深海チャートの層状構造にみられる堆積のリズムが、ミランコビッチ・サイクルに伴ってリズムカルに変動した可能性に着目しました。この堆積リズムの周期を新たな時間目盛とすることで、約 2 億年前の地層でも、約 2 万年の高時間分解能で、かつ長周期 (数千万年スケール) で、どの程度、堆積速度が変動したのか復元出来ると考えました。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ミランコビッチ・サイクルが炭素循環に与えた影響を地質学的、地球化学的データと物質循環モデルから定量的に評価することです。

### 3. 研究の方法

そこで、本研究では、岐阜県・愛知県に分布する三畳紀-ジュラ紀 (2 億 5 千万年前～1 億 8 千万年前) の深海チャート 1 枚 1 枚の地質調査と蛍光 X 線分析を行い、生物源シリカの堆積速度を推定しました。得られた結果と物質循環モデルから推定される大陸風化速度を比較することで、深海チャートの生物源シリカ堆積速度が大陸風化速度を反映した可能性を検証します。

さらに、生物源シリカの堆積速度の周期解析を行い、ミランコビッチ・サイクルの各卓越周期成分において、どの程度変動したかを復元し、その要因を検討します。

#### 4. 研究成果

その結果、生物源シリカの堆積速度が、ミランコビッチ・サイクルの 10 万年から 3000 万年の周期で大きく変化したことを明らかにしました。さらに、推定された堆積速度は、大分県や北海道、北米サンフランシスコや、ニュージーランドにある同時代の深海チャートの結果とも調和的で、当時の低緯度海洋に堆積した放散虫の  $\text{SiO}_2$  は、現在の全海洋の合計堆積速度の約 9 割にも相当する莫大な量に相当した、と見積もられました。

これらの結果は、数万年スケールでは、海洋から放散虫として除去されたシリカが、大陸風化によって海洋へ供給された量と釣り合っていた、という仮説と調和的です。さらに、物質循環モデル(改良版 GEOCARBSULFvolc モデル)を用いて計算した大陸風化速度変動が、本研究の推定と大局的に一致していたことから、この仮説は支持されました。

本研究で推定された生物源シリカ堆積速度は、ミランコビッチ・サイクルに伴う夏の日射量変化よりも大きな振幅で変化しており、このことは、何らかのメカニズムによって日射量変化の影響が増幅されていたことを意味します。私たちはこの原因として、当時存在した超大陸パンゲアで形成された大規模な大気循環「メガ・モンスーン」が寄与したのではないかと指摘しました。モンスーンとは、陸と海の比熱の差に起因する季節風で、日射が強い夏のモンスーンは陸域に雨をもたらします。そのため、ミランコビッチ・サイクルに伴う夏の日射量変動は、降水量を変化させます。深海チャートにみられた約 10 万年～3000 万年の周期では、地球公転軌道の離心率変動に伴って太陽との距離が大きく変わるため、約 2 万年周期の歳差運動(ごますり運動)に伴う夏の日射量が数%～10 数%程度変わります。

大規模な大気循環「メガ・モンスーン」に

よって季節変化が大きくなり、降水量が多い熱帯収束帯や夏モンスーンによる雨期の地域の分布が、1 年の間に大きく移動します。この移動幅が、ミランコビッチ・サイクルに伴ってさらに大きく変動し、超大陸パンゲア内陸に広がった乾燥地域が急激に湿潤化することで、大陸風化速度が非線形的に大きく変動した可能性があります。

メガ・モンスーンに伴う降水量や大陸風化の変化は、大気  $\text{CO}_2$  濃度や、栄養塩の供給量、海洋溶存酸素濃度に作用するため、生態系にも影響を与えたと考えられます。中生代は、大気  $\text{CO}_2$  濃度が現在の数倍もあり、陸域には恐竜や翼竜、海洋にはアンモナイトや魚竜、首長竜が進化、繁栄した時代です。

このメガ・モンスーン仮説を検証するため、今回の深海チャートの結果を他地域の結果、特に同時代の陸域の降水量や化学風化強度、大気  $\text{CO}_2$  濃度や浅海域の栄養塩量を反映する堆積学、地球化学的、古生物学的なデータ等と総合的に比較検討することで、天文学的周期が地球環境や生態系に影響について、研究を進めております。また、深海チャート自体から陸域の環境情報を抽出する試みも進めて行きます。深海チャートには陸から風で飛ばされてきた風成塵が含まれています。この風成塵の堆積速度や地球化学的性質(元素濃度比、同位体比など)から陸域環境変動や大気循環に関する情報が残されている可能性に着目しております。

さらに同時代に限らず、地球史を通してミランコビッチ・サイクルが炭素循環を介して、地球環境や生態系に与えた影響を解明する研究をすすめております。地球システム自体も進化しており、時代毎に異なる応答をしてきたことが予察的に確認されております。また、ミランコビッチ・サイクルは太陽系惑星のカオス的挙動に伴い、その影響力も変化した可能性があります。さらに、ミランコビッチ・サイクルに伴う日射量変動は、地球以外

の惑星の環境にも、影響を与えた可能性があります。このように、本研究の地質学的研究内容を天文学、惑星科学的手法に展開していく所存です。

#### 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 9 件)

Ikeda M., Tada, R., Ozaki, K., 2017. Astronomical pacing of the global silica cycle recorded in Mesozoic bedded cherts. Nature Communications. 8, 15532. 査読有.

Ikeda M., Baumgartner P, Bole M., 2016. Orbital-scale changes in redox condition and biogenic silica/detrital fluxes of the middle Jurassic radiolarite in Tethys (Sogno, Lombardy, N-Italy): Possible link with glaciation? Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 440, 725-733. 査読有.

Kitamura A., Ohashi Y., Ishibashi H., Miyairi Y., Yokoyama Y., Ikuta R., Ito Y., Ikeda M., Shimano T., 2016. Holocene geohazard events on the southern Izu Peninsula, central Japan. Quaternary International. 397, 541-554. 査読有.

Ikeda M., Hori S. R., Okada Y., Nakada R., 2015. Volcanism and deep-sea acidification across the end-Triassic extinction event. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 440, 725-733. 査読有.

曾田勝仁, 尾上哲治, 池田昌之, 2015. 九州東部津久見地域に分布する秩父帯中部三畳系層状チャートのサイクル層序学的検討. 地質学雑誌. 121, 147-152. 査読有.

岡田有希, 堀利栄, 池田昌之, 池原実, 2015. パンサラッサ海深海堆積物における三畳系-ジュラ系境界層の地球化学的検討. 大阪微化石研究会誌特別号, 第15号, p.219-232. 査読有.

Kameda, J., Kouketsu, Y., Shimizu, M., Yamaguchi, A., Hamada, Y., Hamahashi, M., Koge, H., Fukuchi, R., Ikeda, M., Kogure, T., Kimura, G., 2014. The influence of organic-rich shear zones on pelagic sediment deformation and seismogenesis in a subduction zone. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. 109, 228-238. DOI: 10.2465/jmps.140403. 査読有.

Ikeda M., and Hori S. R., 2014. Effects of Karoo-Ferrar Volcanism and Astronomical Cycles on the Toarcian Oceanic Anoxic Events (Early Jurassic).

Paleo-3, 410, 134-142. doi:10.1016/j.palaeo.2014.05.026 査読有. Ikeda M., and Tada R., 2014. A 70 million year astronomical time scale of the deep-sea sequence (Inuyama, Japan): Implication for Triassic-Jurassic geochronology. Earth and Planetary Science Letters, 399, 30-43. doi:10.1016/j.epsl.2014.04.031 査読有.

〔学会発表〕(計 2 件)

Ikeda M., Orbital-scale Changes in Silica Cycle Dynamics of Panthalassa Superocean. Asia Oceania Geoscience Society, 2014 年 8 月 1 日, ロイトン札幌ホテル、北海道札幌市、招待講演.

Ikeda M., Tada R., Ozaki K., Global silica cycle paced by astronomical cycles recorded in the Mesozoic bedded chert: Implications for early Mesozoic extinctions. American Geophysical Union Fall Meeting, 2016 年 12 月 11 日, San Francisco, USA

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等  
<https://sites.google.com/site/masayukiikedaswebsite/>  
静岡大学教員データベース  
<https://tdb.shizuoka.ac.jp/RDB/public/default2.aspx?id=11134&l=0>

#### 氏名及び所属研究機関名・部局・職名

6. 研究組織  
(1) 研究代表者

池田 昌之 (Masayuki, Ikeda)  
静岡大学・理学部・助教  
研究者番号：10635882