

修了年月：2016年3月

専攻名：複雑理工学専攻

氏名：中川 裕介

学生証番号：47-146095

論文題目：太古代における地球表層環境と海洋生物基礎生産の理論的制約

キーワード：太古代, 暗い太陽のパラドックス, 大気化学, 嫌気性生物

指導教員氏名：田近 英一

指導教員役職：教授

## 要旨

太陽進化の標準モデルによれば、地球史初期の太陽光度は現在の70%程度だったと推定されている。このため、もし大気組成が現在と同じだったと仮定すると、約20億年前以前の地球は氷点下だったことになる。しかし、地質記録によれば、約25億年前以前の地球は現在よりむしろ温暖だったことが示唆されている。この矛盾を「暗い太陽のパラドックス」と呼ぶ。このため、当時の大気中には温室効果ガスが現在よりも豊富に存在していたものと考えられている。

温室効果ガスとしてCO<sub>2</sub>が有力視されているが、古土壌を用いた推定から、理論的に必要なCO<sub>2</sub>分圧を説明できないことが示唆され、それを補う温室効果ガスとしてCH<sub>4</sub>が注目されている。CH<sub>4</sub>は主にメタン菌の活動によってもたらされる。約20億年前以前の地球表層は無酸素環境であったため、生物はエネルギー獲得に酸素を用いない嫌氣的代謝を行っていた。真核生物はまだ出現しておらず、酸素を発生しない光合成によって生成した有機物がメタン菌の関与で嫌氣的に分解されてCH<sub>4</sub>が発生する。その発生量がある値(2.5×10<sup>11</sup> molecules cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)を上回れば、温暖環境に必要なCH<sub>4</sub>濃度(>3000 ppm)を実現可能であることが分かっている。そのようなCH<sub>4</sub>供給率は、先行研究(e.g., Kharecha et al., 2005)では火山性H<sub>2</sub>脱ガス率として、10<sup>11</sup> molecules cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以上を与えた場合に限り実現することが示されている。しかしながら、この値は現在の10~100倍程度であり、このような火山性H<sub>2</sub>脱ガス率が当時実現していたかどうかは定かではない。一方で、先行研究のモデルで考慮されている酸素非発生型光合成生物は「水素資化光合成細菌」のみであり、水素資化光合成細菌と共に主要な基礎生産をなしていたと考えられる「鉄酸化光合成細菌」との共存を考慮することで、火山性H<sub>2</sub>脱ガス率をもっと小さい場合においても温暖気候が実現する可能性がある。

そこで本研究では、複数種の基礎生産者の共存系を扱うことができる、鉛直1次元大気光化学-海洋生態系-生物化学循環結合モデルの開発を行った。そして、とくに太古代(40~25億年前)において海洋の基礎生産の大部分を担っていたと考えられる、嫌気性の酸素非発生型光合成生物である「水素資化光合成細菌」と「鉄酸化光合成細菌」などが共存

するシステムのモデル化を行い、生物起源 CH<sub>4</sub> 供給率の推定を行った。

その結果、地球内部からの現実的な H<sub>2</sub> 供給率と Fe<sup>2+</sup>供給率の境界条件に対して、水素資化光合成細菌のみの場合には不十分な生物起源 CH<sub>4</sub> 供給率しか得られないものの、水素資化光合成細菌と鉄酸化光合成細菌が共存する場合には、太古代の低い太陽光度と古土壌から示唆される低い大気 CO<sub>2</sub> 分圧の下でも、温暖気候を十分実現しうる高い生物起源 CH<sub>4</sub> 供給率が得られることが分かった。

大変興味深いことに、水素資化光合成細菌のみによる CH<sub>4</sub> 供給率に鉄酸化細菌のみによる CH<sub>4</sub> 供給率を加えても、十分な CH<sub>4</sub> 供給率にはならず、両者が共存することで初めて、十分な CH<sub>4</sub> 供給率が実現される。

この理由は大きく2つある。一つ目は、有機炭素のリサイクル効果による CH<sub>4</sub> 生成の増幅効果である。海洋において生産された有機炭素のうち、海底堆積物に埋没する割合はごくわずか ( $x \sim 0.02$ ) で、大部分は分解されてリサイクルする。分解された有機炭素は CH<sub>4</sub> となるが、CH<sub>4</sub> は大気光化学反応によって H<sub>2</sub> となり、再び水素資化菌の基礎生産に利用される。鉄酸化細菌によって生産された有機炭素も同様にリサイクルされる。この有機炭素のリサイクルによって、CH<sub>4</sub> 供給率は増幅されることになる。この増幅効果は、有機炭素埋没効率  $x$  を用いて、 $(1-x)/x$  と表すことができる。この値に化学量論的な因子と有機物埋没率をかけたものが、実現される CH<sub>4</sub> 供給率を規定する。鉄酸化細菌の共存によって増加した有機炭素生産にこの効果ははたらくことで、CH<sub>4</sub> 供給率は大きく増加する。

二つ目の理由は、H<sub>2</sub> や Fe<sup>2+</sup> など還元力の供給率の増加により、一酸化炭素資化酢酸生成菌の活動による、CH<sub>3</sub>COOH を介した CO 由来の CH<sub>4</sub> 生成経路や、炭化水素エアロゾルの rainout 由来の CH<sub>4</sub> 生成の寄与が大きく増加する、という効果である。これは、それぞれ、H<sub>2</sub>O の光解離の阻害による OH ラジカル供給率の欠乏、および大気 CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 比の上昇によるものである。

この二つのメカニズムにより、CH<sub>4</sub> 供給率が大幅に増幅され、温暖気候が実現していた可能性が示唆される。

一方、炭素全体の固定量に対する有機炭素として固定される割合 ( $f$  値) は大気 CO<sub>2</sub> 分圧と有機炭素埋没効率、相対的風化効率に強い依存性があることが分かった。そこで、古土壌の記録が示唆する低い大気 CO<sub>2</sub> 分圧の下で、炭素同位体比記録から示唆される太古代の  $f$  値を満たすような有機炭素埋没効率と相対的風化効率の組み合わせを調べたところ、太古代の有機炭素埋没効率は現在とそれほど大きく違わなかったはずであることが分かった。

本研究によって、現在の好氣的環境とは全く異なる、太古代の嫌氣的環境下における海洋生態系構造と大気化学、海洋化学、気候、炭素循環の結合モデリングを行うことによって、太古代の温暖気候を実現するために必要な CH<sub>4</sub> 供給率が実現可能であることが、初めて示された。