

学 位 論 文 題 名

Modeling of marine biogeochemical cycles in
the mid-Cretaceous focusing on causes of
Ocean Anoxic Events

(海洋無酸素事変に注目した白亜紀中期の海洋物質循環のモデリング)

学位論文内容の要旨

白亜紀中期(約1億年前)には海洋無酸素事変(OAEs)と呼ばれる地質学的イベントが全球規模で2回発生した(OAE-1a, -2)。このイベント時の地層では有機物含有率の高い黒色頁岩の埋没と炭素同位体比の大きな変動が見られ、これらは海洋深層無酸素化と炭素循環の大きな変動を意味する。このイベントの引き金一つとして大規模な火山活動による温暖化が考えられている。本研究の目的はこのイベントと当時の物質循環を数値シミュレーションにより理解することである。OAEsの時間スケールは100万年程度と大気海洋変動の時間スケールと比べ長く、イベント時に大気海洋系は岩石圏からの強制に準定常応答しながら変動したはずである。本研究では、大循環モデルを用いてその準定常状態の一つを調べ、簡略モデルを用いて100万年スケールの変動を議論した。

まず白亜紀の地形と高い二酸化炭素濃度を与えた大循環モデルで実験を行った。その結果、深層循環は不活発になり、深層の溶存酸素濃度は低下した。深層の溶存酸素濃度の低下は空間的に一様でなく、テチス海で高濃度、パンサラッサ海で低濃度という勾配が形成された。この濃度勾配は深層水の年齢の違いによるものではなく、表層の生物生産の空間分布により作られていた。このことは不活発な深層循環の下では深層循環と物質循環の関係がブロッカーのコンペアーベルトの関係と異なることを意味する。上述の実験では海洋中の栄養塩量を現在と同程度と仮定し、海洋深層の29%の海域が無酸素状態になった。温暖化時には風化が活発になり河川からの栄養塩供給の増大が予想される。そこで栄養塩量増加に対する無酸素領域拡大への影響を調べたところ栄養塩量が現在の倍程度になると海洋全域で無酸素状態になった。深層循環が活発な状態で同様の実験を行ったところ、現在の4倍程度の栄養塩量で海洋深層の70%以上が無酸素状態になり、活発な深層循環においても全球規模で無酸素状態になることがわかった。

次に簡略モデルに火山ガスを想定した外力を与え、OAE発生時の物質循環変動を考察した。炭素同位体比の応答は火山ガス入力開始時に負異常、終了時に正異常が見られ、負異常は正異常より時間スケールが短かった。また火山ガスを長期間与えたケースでは負・正異常の間に安定化する期間があった。まず安定化時の同位体比の値について調べた。その結果、安定化時の同位体比は火山ガス入力に対する炭酸塩風化と

埋没フラックスの感度とその同位体比から決まり、一般に考えられる範囲では火山ガス入力以前のものより高い値をとることがわかった。次に負異常の時間スケールが正異常のものと比べ短いことについて調べた。その結果、火山ガスの入力開始時は終了時より炭素の入力フラックスが強く、大気海洋系内の炭素量が少ないことから炭素同位体比の応答時間が短くなり、負異常の方が正異常よりも短いという非対称な応答をすることがわかった。また、このモデルの結果と地質学的証拠からしられる OAE-1a の環境変動や同位体比変動を比較したところ、数 10Tmol で百万年程度の間、CO₂ の供給が必要であることがわかった。この量は当時の火山活動による CO₂ 供給量の推定値とくらべ数十倍程度大きかった。このことは OAE-1a にメタンハイドレード崩壊など別の要因も複合的に寄与していたことを示唆している。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 山 中 康 裕

副 査 教 授 池 田 元 美

副 査 教 授 久 保 川 厚

副 査 助 教 授 阿 部 彩 子 (東京大学気候システム
研究センター)

副 査 助 教 授 田 近 英 一 (東京大学大学院理学
研究科地球惑星科学専攻)

学 位 論 文 題 名

Modeling of marine biogeochemical cycles in the mid-Cretaceous focusing on causes of Ocean Anoxic Events

(海洋無酸素事変に注目した白亜紀中期の海洋物質循環のモデリング)

今から約 1 億年前の白亜紀中期は、全球規模で 100 万年程度の期間、有機物含有率の高い黒色頁岩の埋没が見られ、同時に $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ に負・正異常が見られる。これらの地質学的事実から、この時期はイベント的火山活動による脱ガス（イベント脱ガス）が引き金となって温暖化が起こり、海洋が富栄養化したことや海洋深層循環が不活発になったことにより海洋深層が全球規模で無酸素状態になった（海洋無酸素事変）と解釈されてきた。しかし、海洋無酸素事変に伴う物質循環変動や、海洋の富栄養化と深層循環不活発化のどちらが無酸素状態を作るのに重要かという定量的議論は不十分であった。申請者は 2 つの数値モデルを用いてこれらのことを調べた。

第 1 に、海洋物質循環を含む大循環モデルを用いて数値実験を行った。このモデルは溶存酸素などの空間分布が得られる。それを利用し、深層循環不活発時の海洋物質循環と海洋の富栄養化と深層循環の不活発化による海洋深層の無酸素領域拡大への影響を調べた。実験の結果、深層循環は非定常な不活発な状態になった。深層循環不活発時には海洋深層に流れがない状態で、テーチス海深層の溶存酸素濃度が高く、パンサラッサ海では低いという濃度勾配が形成された。現在のような深層循環活発時には、深層水は溶存酸素濃度の高い方から低い方へ流れるという関係がある。深層に流れがない時に深層の溶存酸素に濃度勾配が形成されるというモデルの結果は、深層循環と物質循環の関係が現在のものと異なることを示唆している。深層循環不活発時に濃度勾配が形成される原因を深層の溶存酸

素の収支解析によって調べた。その結果、深層の溶存酸素濃度は表層の生物生産の強い（弱い）ところで低く（高く）なるという関係になっていた。深層水は溶存酸素濃度の高い方から低い方へ流れるという関係は過去の深層循環を復元する際に用いられるが（実際には同様の関係にある $\delta^{13}\text{C}$ が用いられる）、深層循環不活発時には適用できないことが示唆された。次に深層循環が活発・不活発の場合それぞれについて、 PO_4 の量を増加させて実験を行った。その結果、 PO_4 量が現在の量程度では全球規模の海洋深層無酸素状態を作れないことがわかった。全球規模で海洋深層無酸素状態になるには、深層循環が不活発な場合で現在の2倍以上、活発な場合で現在の4倍以上の PO_4 量が必要であることがわかった。

第2に、100万年以上計算することができる、簡略化した大気海洋・岩石圏の物質循環モデルを用いて数値実験を行った。このモデルに様々なイベント脱ガスを与え、海洋無酸素事変発生から終了までの物質循環変動を考察した。

イベント脱ガスに対して $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ は、負・正異常を示し、負異常は正異常と比べ時間スケールが短かった。また、脱ガス期間が50万年より長い場合、負・正異常の間に一定値をとる期間があった。この結果は地質学的事実と類似している。負・正異常が現れる原因は定性的議論から明らかである。ここでは特に、負・正異常の間に一定値をとること、負・正異常の時間スケールの違いについて考察した。イベント脱ガスがある定常状態での $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ の値を、大気海洋の炭素同位体のバランスから求めた。その結果、負・正異常の間に見られる一定値と一致した。このことは、大気海洋系の炭素循環がイベント脱ガスのある状態で準定常状態に達し、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ が一定の値をとったことを意味する。次に大気海洋系の炭素同位体比の特性時間を求めた。その結果、イベント脱ガス開始時（終了時）は、大気海洋系への炭素の入力の増加（減少）に対して大気海洋の炭素量の増加（減少）が遅れるため特性時間が短く（長く）なるため、負異常の時間スケールは正異常のそれと比べ短くなることがわかった。次に、どの程度のイベント脱ガスを加えたとき地質学的証拠と類似するか調べた。その結果、当時のイベント脱ガス量の推定値より1オーダー大きいケースが該当した。このことはイベント脱ガス以外の要因も海洋無酸素事変発生に寄与していたことを示唆している。このケースでは、海洋中の PO_4 量は現在の約8倍程度まで増加し、深層循環は活発な状態で海洋深層が無酸素状態になっていた。大循環モデルの結果もこれと整合的であることから、海洋の富栄養化が海洋深層無酸素状態にした主因と考えられる。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。