

学位論文題名

Roles of Sedimentation Processes in the Oceanic Carbon Cycle on the Glacial-Interglacial Timescales

(氷期-間氷期の時間スケールにおける
海洋炭素循環変動に対する堆積過程の役割)

学位論文内容の要旨

海底堆積層内でおこる堆積過程は、海洋炭素循環の変動と関係しており、氷期-間氷期サイクルにおける大気中の二酸化炭素分圧の変動に対して重要な役割を果たしている。堆積層では、炭酸カルシウムの再溶解を通して、海水中のアルカリ度と全炭酸のバランスを数万年スケールで調整し、それに伴う大気中の二酸化炭素分圧の長期的な変動に寄与する。また、堆積層では、海洋表層で生物生産された有機炭素、炭酸カルシウム、および生物起源シリカが埋没することで過去の気候変動を記録している。大気中の二酸化炭素分圧の変動に対する堆積過程の寄与を評価するには、地質学的記録との比較ができる点からも、堆積モデルを用いた数値実験が有効である。しかしながら、これまで用いられてきた堆積モデルは、移流スキームの再現性が悪いため、10cm程度の深度に制限された準定常的な堆積過程しか扱えなかった。そこで、本研究では高精度の移流スキームである CIP-CSL2 スキームを用いて10cm以上の堆積過程を表現できる堆積モデルを開発し、堆積モデルの再現性、堆積過程の応答を介した大気中の二酸化炭素分圧と堆積分布の応答、および大気中の二酸化炭素分圧の変動に対する堆積過程の寄与を調べた。

堆積層の深度を従来の10cmと新たに100cmに拡張した鉛直一次元堆積モデルを用い、生物起源シリカの海底に到達するフラックスが急激に変動する実験を行った。海底に到達する生物起源シリカが減少すると、10cm深度の堆積モデルは100cm深度のモデルよりも生物起源シリカの溶解フラックスを過小評価する。これは、10cm深度のモデルでは、10cm以深で起こる生物起源シリカの溶解と、10cm以深から堆積層表層へ鉛直上向きに輸送される生物起源シリカの溶解とを考慮していないことに起因した。このことは、堆積モデルの深度を従来の10cmよりも深く設定する必要性を示唆している。

海洋を4ボックスで表現した海洋物質循環モデル(HILDA モデル)に堆積層を50cmにした堆積モデルを結合させ、Rain 比(海洋表層で生物生産される有機炭素に対する炭酸カルシウムの比)の変化に伴った堆積過程の変動が大気中の二酸化炭素分圧および堆積分布に与える影響を調べた。このモデルでは Rain 比を25%低下させると、堆積層内の炭酸カルシウムの再溶解が変動し、大気中の二酸化炭素分圧が2~3万年程度かけて約60ppm 低下した。この結果は、氷期極大期における大気中の二酸化炭素分圧の80~100ppm の低下を Rain 比の変化によって説明す

る Rain 比仮説を裏づけている。この応答において、炭酸イオンの飽和深度は約2km下降したのに対し、炭酸カルシウムの含有率の鉛直分布を示す指標(ライソクライン)は300m程度しか変動しなかった。これは、海水中の炭酸イオンの飽和深度が下降して溶けにくくなったために逆に炭酸カルシウムの埋没が増加した効果と、Rain 比が減少して海底に達するフラックスが減少したために炭酸カルシウムの埋没も減少した効果とが相殺されたことに起因する。このことは、氷期極大期において、炭酸イオンの飽和深度が現在よりも数km深かった観測事実と、ライソクラインが全球平均で1km以内の変動であった観測事実と整合する。

堆積過程が大気中の二酸化炭素分圧の変動にどのような影響を与えるかに関し、堆積過程を無視した closed system(HILDA モデルのみ)と、堆積過程を考慮した open system(堆積モデルと HILDA モデルを結合)の実験を行った。低緯度表層における生物ポンプ(有機炭素および炭酸カルシウムの鉛直輸送)を最大に強めると、closed system では大気中の二酸化炭素分圧が約4000年で18ppm 低下した。一方、open system では、大気中の二酸化炭素分圧が最初の4000年で closed system と同様に低下したものの、その後約10万年かけて初期値よりも33ppm 増加した。両システムにみられる大気中の二酸化炭素分圧の低下は、海洋表層のアルカリ度と全炭酸が深層へ積極的に輸送されたことに起因し、これは一般的な解釈と一致する。一方、open system にみられる大気中の二酸化炭素分圧の増加は、有機炭素や炭酸カルシウムの埋没量の増加によって、海洋における河川による流入と埋没による流出との非平衡状態が生じ、海水中の栄養塩や、アルカリ度、全炭酸の総量が減少したことに起因する。これらの総量の減少は、海水中の二酸化炭素濃度の増加と、栄養塩濃度に比例した生物ポンプの衰退をもたらすため、大気中の二酸化炭素分圧は結果的に増加に転じた。これらの応答は、堆積過程の変動が、氷期-間氷期の時間スケールをかけて海洋物質循環および大気中の二酸化炭素分圧の変動まで大きな影響を与えることを示唆する。

これまでの堆積モデルは、堆積過程を生物攪拌が起こる10cmで活発化すると仮定され、モデル深度を10cmに制限されていた。しかしながら、本研究では10cmより深いところで起こる堆積過程を考慮することで、準定常的ではなく長時間変動を含めた堆積過程の応答にも着目した。本研究結果は、堆積過程が海洋炭素循環および大気中の二酸化炭素分圧の変動に氷期-間氷期の時間スケールで大きく寄与することを示しており、これは氷期-間氷期サイクルの気候変動に対しても関連性を示唆している。

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 教 授 吉 川 久 幸
副 査 Assistant Professor

松 本 克 美 (ミネソタ大学地質学・
地球物理学部)

学位論文題名

Roles of Sedimentation Processes in the Oceanic Carbon Cycle on the Glacial-Interglacial Timescales

(氷期 - 間氷期の時間スケールにおける
海洋炭素循環変動に対する堆積過程の役割)

本研究では、堆積過程を取り扱うモデルを開発し、簡単な海洋物質循環モデルと組み合わせることにより、氷期 - 間氷期の時間スケールにおける海洋炭素循環変動に対する堆積過程の役割を明らかにした。

堆積過程を考慮した海洋炭素循環の変動は、氷期 - 間氷期の時間スケールにおいて大気中二酸化炭素分圧の変動に大きく寄与する。本研究は堆積モデルに CIP 移流スキームを適用し、モデルの再現性、大気中二酸化炭素分圧と堆積分布の応答、および大気中の二酸化炭素分圧の変動に対する堆積過程の寄与を調べた。

堆積層を従来の 10 cm と新たな 100 cm とした堆積モデルを用い、海底に達する生物起源シリカのフラックスが変動する実験を行った。10 cm のモデルでは、10 cm 以深での生物起源シリカの溶解と、10 cm 以深から表層へ輸送される生物起源シリカの溶解を考慮しないため、100 cm のモデルより生物起源シリカの溶解フラックスを過小評価した。

海洋物質循環モデル (HILDA モデル) に堆積層を 50 cm とした堆積モデルを結合し、Rain 比 (海洋表層で生物生産される有機炭素に対する炭酸カルシウムの比) を 25% 減少させた実験では、大気中二酸化炭素分圧が約 60 ppm 低下した。このとき、炭酸イオンの飽和深度は 2 km 下降し、炭酸カルシウムの堆積深度の指標 (ライソクライン) は約 300 m 変動した。これは、氷期に炭酸イオンの飽和深度が数 km 深くライソクラインは全球平均で 1 km 以内の変動であった観測事実と整合する。

堆積過程を考慮した系 (堆積モデルと HILDA モデルを結合) および堆積過程を考慮しない系

(HILDA モデルのみ) において海洋の生物ポンプを強化すると、大気中二酸化炭素分圧は堆積過程を考慮しない系で18 ppm 低下し、堆積過程を考慮した系で33 ppm 増加した。両者の違いは、堆積過程を考慮した系で堆積過程の変動に伴い海水中の炭酸系物質と栄養塩の総量が増加したことに起因した。

これまでの堆積モデルは、堆積過程を生物攪拌が起こる10cmで活発化すると仮定され、モデル深度を10cmに制限されていた。しかしながら、本研究では10cmより深いところで起こる堆積過程を考慮することで、準定常的ではなく長時間変動を含めた堆積過程の応答にも着目した。本研究結果は堆積過程が海洋炭素循環および大気中二酸化炭素分圧の変動へ大きく寄与することを示しており、これは氷期 - 間氷期サイクルの気候変動にも関連している。

審査員一同は以上の研究成果を高く評価し、また研究者として研鑽を重ねており、その研究に対する態度も誠実かつ熱心であること、取得単位を満たしたことをあわせ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。