

学 位 論 文 題 名

Modeling of Ecosystem and Biogeochemical Cycles in the Western North Pacific

（西部北太平洋の生態系と物質循環に関するモデリング）

学位論文内容の要旨

これまでに、海洋生態系や物質循環の理解を目的に、三次元の海洋生態系モデルを用いた研究が行われている。しかし、組み込まれていた生態系モデルは、計算資源の問題や生態系の複雑さから、生物のグループ構成を表現できないモデルが主であった。本研究では、PICES (North Pacific Marine Science Organization)で開発された生態系モデル NEMURO (North Pacific Ecosystem Model Used for Regional Oceanography)を基に、プランクトンの機能グループとそれに伴う窒素やケイ素、炭素の循環の違いを明示的に表現した三次元海洋生態系モデルを開発し北太平洋西部亜寒帯域に適用した。このモデルを用いて以下の3つの事柄について考察を行った。

(1) 物理環境と生態系の関係に注目し、植物プランクトンの優占グループが季節的・海域的に変化する要因を考察した。特に、優占グループ決定における、ボトムアップコントロール（栄養塩、光、温度など環境要因が生態系をコントロールするという概念）とトップダウンコントロール（動物プランクトンの捕食など高次生物が生態系をコントロールするという概念）の両者の果たす役割を考察した。(2) 生態系と物質循環の関係に注目し、海洋の二酸化炭素の取り込みを考える上で重要な量である Rain 比(100m 深での CaCO_3 の輸出生産に対する POC の輸出生産の比で定義)の海域的な違いが生じるメカニズムを考察した。特に、Rain 比の決定に対して、沈降粒子の生成過程と輸出過程が果たす役割を明示的に分解し考察した。(3) モデルで地球温暖化実験を行い、温暖化に対する海洋生態系および物質循環の応答を予測した。モデルは現在の西部北太平洋における生態系の季節変化や水平的な分布を良く再現し、解析によりそれぞれ以下の3つの基礎的知見を得ることができた。

(1) 植物プランクトンの優占グループの季節的・海域的变化について

モデルで、年平均のケイ藻類の優占率（植物プランクトン全体に占めるケイ藻類の割合で定義）は、亜寒帯域で 50~60%、亜熱帯で 30%以下であり、これらは本海域で知られている優占グループの特徴を再現していた。

ボトムアップコントロールの視点から、光合成のどの制限要因（栄養塩濃度、温度、光）が年平均の P/B 比（比光合成速度）および優占グループを決定しているのか解析を行った。亜熱帯のような貧栄養海域では、栄養塩濃度がグループ間の P/B 比の違いを通して優占グループを決定していた。一方、栄養塩濃度の高い亜寒帯域ではグループ間の P/B 比に大きな違いはなく、優占グループの決定に栄養塩濃度だけでなくトップダウンコントロールの役割が重要であることを示唆していた。

優占グループ決定におけるトップダウンとボトムアップコントロールの両者の役割を理解するため、代表的な3点（黒潮続流域、亜寒帯域、亜熱帯域）を取りだし、優占率および比光合成速度・比捕食速度の季節変動を調べた。黒潮続流域と亜寒帯域では冬季から春季ブルームの始まりにかけて、ケイ藻類の優占率は70%以上に急激に増加した。これは、ケイ藻類が冬季、動物プランクトンによる捕食圧が低い状態で、高い成長速度を持つことが要因であった。春季ブルームの終わってから夏季にかけて、ケイ藻類の優占率は30%まで減少していたが、これはケイ藻類を好んで捕食するカイアシ類が深層から表層へ鉛直的に移動してきたこと及び、同時期に珪酸塩濃度の減少がケイ藻類の光合成を制限したためであった。以上より、黒潮続流域と亜寒帯域では、優占率の季節変動に、栄養塩濃度だけでなく動物プランクトンの捕食嗜好性が重要な役割を果たしていた。一方、亜熱帯域のような貧栄養海域では優占率は年間を通じて主に栄養塩濃度により決定されていた。

(2) Rain 比の決定要因について

Rain 比の決定において、表層での CaCO_3 と POC の生産過程と生成から輸出の過程（分解過程）の、それぞれが果たす役割を調べた。年平均の Rain 比は亜寒帯域の 0.05 から亜熱帯域の 0.15 まで増加し、この増加は以下の2つの要因が同程度寄与して引き起こされていた。1つは、亜寒帯域から亜熱帯への優占グループの遷移（ケイ藻類から円石藻を含む小型の植物プランクトングループへ）に伴い、海域により CaCO_3 と POC の生産の割合が異なる効果であった。これは(1)で述べられたように、主に栄養塩環境の変化により引き起こされていた。2番目の要因は、海域により CaCO_3 と POC の輸出の割合が異なる効果であった。これは、分解過程が強い温度依存性を持つこと及び、輸出の過程で CaCO_3 よりも POC の方が遙かに多く分解されるため、 CaCO_3 と POC の分解の温度依存性に違いが無くとも、温暖な海域ほど CaCO_3 よりも POC の輸出生産が減少するためであった。このことは、生産の割合が変化しなくとも温度の変化により Rain 比が変わりうることを示している。つまり、地球温暖化などのより温暖な気候条件下では、有機物の分解が促進され Rain 比は上がり温暖化に対して正のフィードバックとして働くことを意味している。一方で、氷期のような寒冷な気候下では負のフィードバックとして働くと考えられる。

(3) 地球温暖化に対する生態系と物質循環の応答

観測された気候値と IPCC の IS92a シナリオ（中程度の温暖化シナリオ）に従った地球温暖化実験の結果（CCSR/NIES の大気海洋結合モデルにより行われた実験結果）を生態系モデルの境界条件として用い、気候値実験と地球温暖化実験を行い両者の結果を比較した。

地球温暖化実験の結果、温暖化に伴う海水温の上昇により、鉛直的な成層は強化され、海洋表層への栄養塩の供給は減少した。その結果、21世紀末に植物プランクトンの生物量が減少し、ケイ藻類から小型の植物プランクトンへグループが遷移することが予測された。これらの結果は地球温暖化の一般的仮説を支持するものであったが、興味深い点としては、栄養塩環境が悪くなるにもかかわらず、P/B 比が温暖化により増加したことである。これは、成層の強化により新生産と輸出生産は減少する一方、温度上昇により光合成にとってより好適な温度環境となるためである。また、表層での再循環の増加も、表層での栄養塩の供給を通して生産の増加に寄与していた。

温暖化に伴う生物量や優占グループの季節変化は亜熱帯-亜寒帯の移行域で最も大きかった。特徴としては、ケイ藻類の春季ブルームが、成層の強化により現在よりも半月ほど早く起こると予測された。また、

ブルーム時の生物量の最大値も栄養塩濃度の減少に伴い最大で 30%程度減少することが予測された。対照的に、ケイ藻ブルームの後の小型の植物プランクトングループの最大生物量は現在とほぼ同じであった。その結果、温暖化に伴う優占グループの遷移は、ブルーム後期に最も顕著に現れた。夏季から冬季は、現在も栄養塩濃度・プランクトンの生物量とも春季に比べ低いため、この時期の変化は小さかった。

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 岸 道 郎

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

Modeling of Ecosystem and Biogeochemical Cycles in the Western North Pacific

(西部北太平洋の生態系と物質循環に関するモデリング)

本研究の成果は、海洋生態系の季節変動や海域による違い、そして生態系と物質循環のつながりについて、数値モデルにより物理的側面と生物地球化学的側面の両面から統合的に理解したことである。これまでに、海洋生態系や物質循環の理解を目的に、三次元の海洋生態系モデルを用いた研究が行われている。しかし、組み込まれていた生態系モデルは、計算資源の問題や生態系の複雑さから、プランクトンのグループ構成を表現できないモデルが主であった。本研究では、プランクトンの機能グループとそれに伴う物質循環の違いを明示的に表現した三次元海洋生態系モデルを開発し、西部北太平洋に適用した。そして、このモデルを用いた気候値実験および地球温暖化実験を通して、以下の3つの問題に取り組んだ。

(1) 物理環境と生態系の関係に注目し、植物プランクトンの優占グループが季節的・海域的に変化する要因を考察した。特に、優占グループ決定における、ボトムアップコントロール（栄養塩、光、温度など環境要因が生態系をコントロールするという概念）とトップダウンコントロール（動物プランクトンの捕食など高次生物が生態系をコントロールするという概念）の両者の果たす役割を考察した。(2) 生態系と物質循環の関係に注目し、海洋の二酸化炭素の取り込みを考える上で重要な量である Rain 比（100m 深での CaCO_3 の輸出生産に対する POC の輸出生産の比で定義）の海域的な違いが生じるメカニズムを考察した。(3) モデルで地球温暖化実験を行い、温暖化に対する海洋生態系および物質循環の応答を予測した。

モデルは現在の西部北太平洋における生態系の季節変動や水平的分布を良く再現し、解析により以下のことが明らかになった。(1) 両コントロールの役割を明らかにするため、比光合成速度および比捕食速度の季節変動を調べた。その結果、亜熱帯域のような貧栄養海域では、優占率は年間を通じて栄養塩濃度により決定されボトムアップ的な関係にあった。一方、亜寒帯域では、優占率の季節変動に栄養塩濃度だけでなく、動物プランクトンの捕食嗜好性によるトップダウンコントロールも重要な役割を果たしていた。(2) 年平均の Rain 比は亜寒帯域の 0.05 から亜熱帯域の 0.15 まで増加し、この増加は以下の 2 つの要因が同程度寄与して引き起こされていた。1 つは、亜寒帯域から亜熱帯への優占グループの遷移に伴い、海域により CaCO_3 と POC の生産の割合が異なる効果、もう 1 つの要因は、海域により CaCO_3 と POC の輸出の割合が異なる効果であった。このことは、生産の割合が変化しなくとも温度の変化により Rain 比が変わりうることを示しており、氷期のような寒冷な気候条件下では、有機物の分解が抑えられ Rain 比は下がり、寒冷化を促進する正のフィードバックとして働くことを示唆していた。

(3) 以上の気候値実験で得た知見を基に、IPCC の IS92a 温暖化シナリオに従った実験を行い、海洋生態系の温暖化に対する応答を予測した。温暖化実験の結果、温暖化に伴う海水温の上昇により、鉛直的な成層は強化され、海洋表層への栄養塩の供給は減少した。その結果、21 世紀末に植物プランクトンの生物量が減少し、ケイ藻類から小型の植物プランクトンへグループが遷移することが予測された。これらの結果は地球温暖化の一般的仮説を支持するものであったが、本研究で得られた興味深い知見の一つは、温暖化による影響が季節的・海域的に一様に起こるわけではなく、季節的には春季、植物プランクトンが大増殖するブルームの時期に、海域的には亜寒帯域-亜熱帯域の移行域で特に大きいことであった。

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。