

学位論文題名

生態系モデルによるオホーツク海における
植物プランクトン分布の時空間変動に関する研究

学位論文内容の要旨

【緒言および目的】

植物プランクトン現存量の時空間変動のメカニズムを理解することは、炭素の生物地球化学的なサイクルにおける海洋の役割を明らかにするために重要である。オホーツク海は世界でも最も高生産海域の1つであり、この海域での植物プランクトンの主な構成種は珪藻類であり、その細胞数は春季に最大となり秋季に最小となることが報告されている (Hanzawa *et al.*, 1981)。そして、秋季は小型植物プランクトンが優占し、珪藻類のブルームは起きないことが報告されている (Shiomoto, 1997)。また、衛星海色データを用いて植物プランクトン現存量を示すクロロフィル分布の季節変動が解析されている (Saitoh *et al.* 1996)。これまでの研究ではオホーツク海における植物プランクトンの時間的な変動、または空間的な分布傾向についての論議はあるものの、ブルーム期における植物プランクトン現存量の空間的な分布を決定する要因についての議論は少ない。海水の鉛直混合、水温、光環境、栄養塩の濃度とその構成、そして生物の種間関係など多くの重要な因子が植物プランクトン現存量の時間的または空間的な分布に影響を与え、解析を困難にしている。これら複合要因を解析するきわめて有効な手段に数値モデルがある。物理過程と生物過程を考慮した生態系モデルの利用は、上述したような様々な要因について同時に考慮して解析できる方法の1つである。本論文では、生態系モデルを利用して、秋季および春季のオホーツク海における植物プランクトンの空間分布を決定する要因を明確にすることを試みた。

【モデル】

北太平洋の生態系を解析するために開発された NEMURO (North Pacific Ecosystem Model Understanding Regional Oceanography, Eslinger *et al.*, 2000) と呼ばれる生態系モデルを 3 次元物理モデルと結合させ、オホーツク海に適用した。物理モデルはハーバード大学によって開発された HOPS (Harvard Ocean Prediction System, Lozano *et al.*, 1994; Robinson, 1996) を用いた。NEMURO は 11 個のコンパートメントから構成され、植物プランクトン 2 区分 (珪藻類とその他の小型植物プランクトン) と動物プランクトンの 3 区分 (小型、大型および捕食性の動物プランクトン) を含んでいる。

(秋季ブルーム期の解析)： 1996 年 10 月 6 日～11 月 10 日の現場データと気候値 (World

Ocean Atlas 94) を客観解析して水温および塩分の初期値を求めた。また、この水温・塩分場を用い、水深 1000m を無流面とした地衡流を計算して得られた流速を、初期の流速場とした。海表面境界で daSilva *et al.*(1994)の気候値を用いて風応力、熱フラックス、日射量を与え、30 日間のモデル計算を行い、秋季ブルーム期における植物プランクトンの空間分布の再現を試みた。(春季ブルーム期の解析)：衛星の海水厚データをモデルに組み込み海水の効果(表面水温のパラメタリゼーション、海水下の光環境、海水と海水間での運動フラックスと塩分フラックス)を考慮した。初期の水温・塩分場は気候値を用いた。海表面境界で daSilva *et al.*(1994)の気候値を与え、海水が形成される前の 10 月中旬から翌年 6 月までの 260 日間のモデル計算を行い 1997 年と 2001 年の春季ブルームの再現を試みた。なお、2001 年の海水積算体積は 1997 年より約 2 倍多い。

【結果および考察】

(秋季ブルーム期の解析)：モデルの計算結果の解析から小型植物プランクトンが Chl-a の 90%以上を占め、その空間分布は観測値の Chl-a 分布とよく一致している。サハリン東岸では表層の低塩分水の影響で混合層深度は約 20m と浅い状況が保たれる。一方、オホーツク海南部では塩分躍層がないため、混合層深度は計算開始時の約 30m から 30 日後には 40m に発達する。計算開始 10 日後から 30 日後まで光合成速度は、モデル第 1 層において、サハリン東岸は 0.40~0.50/day、オホーツク海南部では 0.49~0.50/day と大きな違いは認められないが、第 1 層における Chl-a 濃度はサハリン東岸で 1.30~2.66mg/m³、オホーツク海南部では 0.98~1.51mg/m³ となり、オホーツク海南部よりサハリン東岸で濃度が高く維持されている。混合層の発達の強いオホーツク海南部では、表層部で生産された植物プランクトンは鉛直的に大きく混合されるために、生物量の増加にとって不利な環境である。一方、サハリン東岸では混合層が浅いことが、表層の高 Chl-a を維持する要因となっている。秋季のオホーツク海において、混合層の発達の空間的変化が、植物プランクトンの空間分布を決定する要因の 1 つとなっている。

(春季ブルーム期の解析)：2001 年の SiO₂-Si のストック量は 1997 年の約 1.1 倍と海水積算体積の差(約 2 倍)と比較して小さく、海水成長にともなう鉛直混合によってもたらされる海水面への栄養塩供給は必ずしも大きいわけではない。1997 年および 2001 年における春季ブルームの再現実験の結果、オホーツク海のブルームの始まりは、光合成速度の増加によって説明でき、その光合成速度は、光環境に依存していることが明らかになった。1997 年の春季ブルームのピークは 5 月下旬であったが、海水の影響が強かった 2001 年の春季ブルームは 5 月下旬から 6 月中旬であった。その理由は、海水存在下では光制限を受けるため、光合成速度が低くなり、植物プランクトンは海水融解まで現存量を増加できないことにある。海水融解の時間的なタイミングが、ブルームの時間的なズレを生じさせ、植物プランクトンの時空間分布に影響を与えられられる。

(感度解析)：過去に NEMURO に使用されているパラメータと本論文で使用したパラメータを用いて、1997 年の春季ブルームの再現を試みるモデル計算を行った。異なった海域で適用されたパラメータを用いた場合、モデルはオホーツク海の春季ブルームを再現できないことが分かった。北海道沖で NEMURO を適用している Kuroda & Kishi (2002)および 西部北太平

洋(44°N, 155°E)での Fujii *et al.*(2002) のパラメータとオホーツク海の春季ブルームに用いたパラメータとの違いの1つは最大光合成速度の大きさである。最大光合成速度の大きさはブルームの大きさとタイミングを支配しており、オホーツク海における春季ブルーム時期を再現するには、大型植物プランクトンの最大光合成速度のパラメータを過去に用いられているより小さく設定しなければならない。これは、光合成活性が低い状態においても植物プランクトンが大増殖できるオホーツク海の特徴を示す結果と考えられる。

以上のように物理生態系結合モデルをオホーツク海に適用してブルームに関する多くの知見が得られた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 岸 道 郎
副 査 教 授 三 宅 秀 男
副 査 教 授 齊 藤 誠 一
副 査 助 教 授 磯 田 豊

学 位 論 文 題 名

生態系モデルによるオホーツク海における 植物プランクトン分布の時空間変動に関する研究

これまでのオホーツク海における研究では、植物プランクトンの時間的な変動、または空間的な分布傾向についての論議はあるものの、ブルーム期における植物プランクトン現存量の空間的な分布を決定する要因についての議論は少ない。その理由として、海水の鉛直混合、水温、光環境、栄養塩の濃度とその構成など複雑にからみあった物理的要因があり、それらに加えて生物の種間関係など多くの生物学的な因子が植物プランクトン現存量の時間的または空間的な分布に影響を与えているため、解析を困難にしてきたことが挙げられる。

これら物理的、生物学的複合要因を解析するきわめて有効な手段に数値モデルがある。本研究では、PICES(北太平洋海洋科学機構)の MODEL Task Team で開発された北太平洋向けの低次生態系モデル NEMURO(North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography)を利用している。NEMUROは低次生態系の種間関係を考慮した近年開発されたモデルであり、これを実際の海域で応用した研究はまだ非常に少ない。この NEMURO を3次元物理モデルと結合することによって、秋季および春季のオホーツク海における植物プランクトンの空間分布を決定する要因を明確にした重要な研究である。

その結果、秋季は海洋の成層構造の違いによって植物プランクトンのブルームの海域による差が生じることを数値的に証明した。オホーツク海西部ではアムール川の影響で密度躍層が薄く、一方中央部では躍層比較的厚いことが秋季ブルームの有無に密接に関わっていることを解明した。また南部千島列島周辺では北西季節風の影響によって湧昇がおりこれが列島周辺の一次生産の増大に寄与していることを数値的に示した。このことは従来から「想像」として言われてきたことであるが、モデルを用いて証明したことに大きな価値が在る。

一方、春季ブルームの解析では、海水による光制限を導入することで春季ブ

ブルームの海域的な推移を説明できることを示した。海氷は人工衛星の解析から得られた分布を与え、物理モデルとの結合を行った。そして特に海氷の多かった年と少なかった年の違いをモデルで再現することによって、実際の人工衛星からの海色データと比較した。モデルは人工衛星での海色データをよく再現した。これらの結果に基づいて、海氷の有無が春期ブルームに与える影響を解析した結果、海氷によって光が海面に達することが制限される効果を導入するだけで、従来言われてきた ice algae のブルームを考慮しなくても十分にオホーツク海南部のブルームの季節的推移、ならびに年々変動を説明できることを示した。またパラメータの感度実験を行って、数値モデルで解析しうる新しい知見を多く提供したことも画期的である。また、PICES によるモデル「NEMURO」が実際の海域の生態系の解析にきわめて有効であることを示した研究としても国際的に価値があるものである。

以上の結果は、オホーツク海における植物プランクトンのブルームに対して多くの有益な知見を与えたものであり、高く評価できる。よって審査員一同は本論文が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。