

学 位 論 文 題 名

オホーツク海とベーリング海における
クロロフィル *a* 濃度時空間変動の比較海洋学的研究

学位論文内容の要旨

[結言]

オホーツク海とベーリング海は北半球で隣接する半閉鎖的な亜寒帯縁辺海である。地理学的にほぼ同じ緯度に属し、水深 200 m 以浅の広大な大陸棚域と 2000 m 以深の海盆地に分けられる。どちらの海洋も季節海氷が発達（オホーツク海は全面結氷に対して、ベーリング海は北部のみ）し、反時計回りの循環流が存在する。また、大陸棚域では潮汐混合が他の海域に比べて卓越している。生物面では非常に豊富なプランクトンバイオマスに支えられた豊富な漁業資源が存在する反面、生物多様性は低く環境変化を受けやすいという特徴を持つ。

両海洋の特徴である高いプランクトンバイオマスは近年の研究により大きく変動することが示されている。特にベーリング海のバイオマスは過去 30 年間に 1976/77 年や 1998/99 年の 2 度のレジームシフトを経て、大きく変動していることが多くの物理・生物学的研究から指摘されている。このレジームシフトに伴って、基礎生産プロセスが変動し、さらに動物プランクトンの摂餌に影響し、最終的には大型魚の新規加入にも影響することが示唆されている。したがって、一次生産者である植物プランクトンのバイオマス変動メカニズムを明らかにすることは、これらの海における生物資源変動を考える上で不可欠である。

これまで、オホーツク海・ベーリング海における植物プランクトンバイオマスの時空間変動に関する研究がなされており、海氷変動や海上風変動が植物プランクトンの春季ブルームに影響することが示唆されている。しかしながら、両海洋を総観的に捉えて比較をした研究は今までにない。また両海洋の海氷変動がアリューシャン低気圧とシベリア高気圧の変動によってシーソー型に変動することが明らかになっているが、その生物生産過程に対する影響は明らかになっていない。以上を踏まえて、本論文では、両縁辺海における気候変動と関連した植物プランクトンバイオマス、基礎生産量の変動メカニズムを明らかにすることを目的とする。

[資料と方法]

オホーツク海とベーリング海におけるクロロフィル *a* (Chl-*a*) 濃度の時空間変動とその要因を明らかにするために、本研究では 1998 年 1 月から 2004 年 12 月における Orbview2/SeaWiFS による月平均及び 8 日間平均の Chl-*a* 濃度データを用いた。また、衛星による Chl-*a* 濃度と表面水温データからモデルにより基礎生産量を推定した。Chl-*a* 濃度変動は季節、経年変動成分に分けて解析を行った。特に Chl-*a* 濃度の経年変動については Empirical Orthogonal Function (EOF) 解析を用いて変動の定量化を行った。EOF 解析を行う前処理として、雲によるランダムな欠損値の影響を取り除くために空間統計的手法を用いてデータ補間を行った。補間は地球統計学的手法であるセミバリオグラムを用いて Chl-*a* 濃度の空間的な相関関係を求め、空間相関係数で重み付けしたクリギング法により補間した。

さらに Chl-*a* 濃度の経年変動要因を解析するために、DMSP/SSMI による海氷密接度、NCEP/NCAR 再解析データによる海上風・太陽放射照度の各データを用いて解析を行った。海上風、太陽放射照度は SeaWiFS の Chl-*a* データ同様に EOF 解析を行い、それぞれの各モードと Chl-*a* 濃度の EOF 解析結果と比較した。また、海上風や太陽放射照度の変動要因となるアリューシャン低気圧の挙動を解析するために海面気圧と Chl-*a* 濃度の経年変動との関係を調べた。

最後に、プランクトンの増殖と減少の過程およびそのメカニズムを明らかにするために、鉛直一次元海洋物理—生態系モデルを用いた再現実験を行った。モデルは 9 つのコンパートメントを持つ生態系モデルで、境界条件として海氷による光制限項及び海上風向風速・表面水温から計算される混合層深度の変動と Chl-*a* 濃度や動物プランクトンバイオマス変動を再現することで、それら物理パラメータの変動とプランクトン増殖との関係とメカニズムを調べた。

[結果と考察]

1. Chl-*a* 濃度の経年変動の総観的特徴

両海洋の Chl-*a* 濃度の経年変動を年間平均 Chl-*a* 濃度の解析により調べた結果、オホーツク海における年平均 Chl-*a* 濃度の経年変動の幅は、最大で 2001 年の 3.4 mg m^{-3} 、最小は 1999 年の 3.1 mg m^{-3} であり、その差は 0.3 mg m^{-3} であった。一方、ベーリング海では最大が 1999 年の 3.1 mg m^{-3} で最低が 2003 年の 2.65 mg m^{-3} で、その差は 0.55 mg m^{-3} であった。推定基礎生産量で比較した結果、オホーツク海における基礎生産量の経年変動幅は最も基礎生産力の高くなる春季において $0.12 \text{ gCm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であったのに対し、ベーリング海では $0.18 \text{ gCm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と高かった。

2. Chl-*a*濃度の季節変動

Chl-*a*濃度の季節変動パターンは両海洋とも、大陸棚及び大陸棚斜面域において5月から6月にかけて 5 mg m^{-3} を越える高いChl-*a*濃度であった。また、海盆域では最大でも 1.0 mg m^{-3} 程度と年間を通じて低Chl-*a*濃度であった。他の季節と比較すると、相対的に春季におけるChl-*a*濃度の変動が年間の基礎生産量の経年変動へ大きく寄与していることから、両海洋における基礎生産変動に対する春季ブルームの経年変動の重要性が示された。

3. Chl-*a*濃度の経年変動

両縁辺海におけるChl-*a*濃度の経年変動についてEOF解析を行なった結果、両海洋におけるChl-*a*濃度のEOF第一モードから第三モードまですべて、春季における時空間変動を示し、全変動の約40%を占めた。空間的には、オホーツク海では北部陸棚域やシェリコフ湾、サハリン東部沿岸における変動が最も大きかった。ベーリング海では東部陸棚域、中央部のナバリン溪谷付近、西部ベーリング海陸棚斜面域付近での変動が大きく、特に東部陸棚域と西部ベーリング海陸棚斜面付近では、一方が高いと一方が低いというシーソーの関係にあった。時間的にはオホーツク海では5月から6月にかけて春季ブルームのタイミングが経年変動し、ベーリング海は4月から6月の期間で経年変動が大きかった。

4. Chl-*a*濃度の経年変動要因

春季ブルームの経年変動要因の解析を行った結果、最もChl-*a*濃度の経年変動が大きかったオホーツク海北部陸棚域では、海氷融解から2週間以内に春季ブルームが発生していることが衛星観測から示された。また、生態系モデルによる再現実験から、光制限により増殖を制限されていた植物プランクトンが海氷融解により、光合成を開始することで春季ブルームが発生することが明らかになった。ベーリング海の東部陸棚域や陸棚斜面域では、海上風と、太陽放射照度変動が春季ブルームのタイミングに大きく影響していた。特に春季におけるアリューシャン低気圧の位置が東西に変動することにより風と太陽放射照度が変動することが最も大きな要因であった。生態系モデルによる再現実験によって、風応力による混合層深度が20mよりも浅くなるタイミングが2週間から1ヶ月程度ずれることで、春季ブルームの時期が変動することが示された。

両海洋における春季ブルーム変動に大きな影響を与えているアリューシャン低気圧の変動は、1998年や2001年の場合、アリューシャン低気圧は通常よりも東側のアラスカ付近に位置し、ベーリング海の東部において南風が5月頃まで卓越することから、春季ブルームのタイミングが遅れた。相対的にベーリング海の西部やオホーツク海付近では高気圧帯となり、春季ブルームのタイミングは早くなった。オホーツク海北部陸棚域では高気圧から吹き出す北風が卓越

し、海氷融解が遅れ、春季ブルームの時期は例年よりも遅くなった。したがって、両海洋における春季ブルームのタイミングには北太平洋における大規模な気候システムの変動が影響していることが示唆された。

[結論]

本研究では、衛星リモートセンシングと生態系モデルを組み合わせ解析することにより、春季におけるオホーツク海、ベーリング海の広範囲かつ大規模な Chl-*a* 濃度の時空間変動とそのメカニズム、さらに地球規模の気候変動との関係を明らかにすることができた。また、Chl-*a* 濃度変動に関して両海洋を比較的に考察することにより、変動メカニズムの同一性や相違性を明らかにすることができた。本研究の手法を北極海やバレンツ海といった他の縁辺海にも応用することにより、縁辺海における基礎生産変動と、北極を中心にした気候変動との関係を明らかにできると考える。さらには、水産資源における餌環境を通した生存・成長に与える影響や生態系をベースとした資源管理など、水産海洋学的応用にも役立つことが期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 齊 藤 誠 一

副 査 教 授 志 賀 直 信

副 査 助 教 授 平 譚 享

副 査 教 授 石 坂 丞 二 (長崎大学水産学部)

学 位 論 文 題 名

オホーツク海とベーリング海における

クロロフィル *a* 濃度時空間変動の比較海洋学的研究

近年、衛星を用いた地球環境観測技術が進歩し、海洋の物質循環や汚染のモニタリングに応用可能な衛星リモートセンシングに関心が高まってきた。特に船舶で常時観測するのが困難な遠隔の外洋域で、このような観測技術を用いてその生産性やその健康度をモニターしていくことは極めて重要な課題である。現在までオホーツク海やベーリング海における春季ブルームなどの生物生産過程および物理過程の時空間変動に関する研究は極めて少なく、従来の船舶観測に加え、広域を、瞬時に、繰り返し観測できる衛星による海色観測や海面高度観測が非常に有力な手段となっている。さらに、数値モデリング手法を加えることでその変動機構の理解が可能になる。

オホーツク海とベーリング海は北半球で隣接する半閉鎖的な亜寒帯縁辺海で、季節海氷が発達することが特徴であり、非常に豊富なプランクトンバイオマスに支えられた豊富な漁業資源が存在する。そして、生物多様性は低く環境変化を受けやすいという特徴を持つ。しかしながら、高緯度に存在する両縁辺海における高基礎生産量維持メカニズムに関する研究は極めて少ない。

地球規模の気候・環境変化に対する植物プランクトン・基礎生産の地域的、時間的変動を明らかにしていくために、従来の船舶観測や、定点観測に加えて、衛星観測による長期的な時系列解析を行うことが重要である。さらに、その変動機構を理解し、将来的に予測するためには、数値モデルによる素過程の理解と要因の究明が不可欠である。

本研究は衛星リモートセンシングと生態系モデルを組み合わせることで解析することにより、春季におけるオホーツク海、ベーリング海の広範囲かつ大規模な Chl-*a* 濃度の時空間変動とそのメカニズム、さらに地球規模の気候変動との関係を解明した。

特に審査員一同が評価した点は以下の通りである。

1. 年平均クロロフィル *a* (Chl-*a*) 濃度の経年変動の幅は、ベーリング海がオホーツク海に比べて大きいことを明らかにした。
2. 他の季節と比較すると、相対的に春季における Chl-*a* 濃度の変動が年間の基礎生産量

の経年変動へ大きく寄与していることから、両海洋における基礎生産変動に対する春季ブルームの経年変動の重要性を明らかにした。

3. 両海洋における Chl-*a* 濃度の EOF 第1モードから第3モードまですべて、春季における時空間変動を示し、全変動の約40%を占めることを明らかにした。
4. 生態系モデルによる再現実験によって、風応力による混合層深度が20mよりも浅くなるタイミングが2週間から1ヶ月程度ずれることで、春季ブルームの時期が変動することを明らかにした。
5. 両海洋における春季ブルームのタイミングにはアリューシャン低気圧の位置や強度など北太平洋における大規模な気候システムの変動が影響していることを示唆した。

現在、IGBPプログラムの一環として、日本、アメリカ、ノルウェーなど8カ国加盟してリージョナルGLOBEC/ESSAS（亜寒帯海洋生態系研究）を推進している。今後、このプログラムが進展することにより、北半球の高緯度縁辺海生態系の理解が一段と進むこと期待されている。本研究はその先駆け的な研究としても大きく評価できる。

審査員一同は、本研究がオホーツク海、ベーリング海の広範囲かつ大規模な Chl-*a* 濃度の時空間変動とそのメカニズム、さらに地球規模の気候変動との関係に関する統合的な知見を得たものと認め、申請者が博士（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。