

学 位 論 文 題 名

大気変動に対する黒潮続流域における
春季ブルームの応答

学位論文内容の要旨

[緒言]

黒潮続流域は、高次回遊魚のカツオ、マグロや多獲性浮魚類のサンマ、イワシなどがフロントや蛇行に伴う暖水舌を越えて索餌回遊する海域であり、当海域における植物プランクトンによる一次生産は、食物連鎖を介して、動物プランクトンや水産資源のための餌環境を根底で支えている。植物プランクトン生物量は毎年春季ブルーム時に最も高くなるが、近年、地球温暖化によって春季ブルームが早まることでその生物量が小さくなることが示唆されてきた。現在よりも海面水温が2から3℃上昇した場合、下層から表層への栄養塩供給量が減少するため、ブルーム後半時には植物プランクトン生物量が30%も減少することが生態系モデリングによって示されている。春季ブルーム時の植物プランクトン量が減少すると、それを大量に摂餌しようとする小型魚に影響があると考えられ、結果的に水産資源量が激減する可能性が挙げられている。よって、黒潮続流域において春季の植物プランクトン生物量の変動を明らかにすることは、水産資源の変動を理解する上で重要である。しかしながら、特に春季ブルームのタイミングや規模、持続期間やその経年変動に関しては、その重要性に反して未解明な部分が多い。

春季の植物プランクトン分布には冬季鉛直混合による表層への栄養塩供給が大きく影響し、冬季鉛直混合は主に海洋から大気へ熱が放出されることで引き起こされる。その後、春季になり、海洋への熱フラックスの増加によって成層化が促進されて臨界深度理論の条件が満たされると、春季ブルームが発生する。したがって、春季の植物プランクトン分布の変動を理解するためには、冬季だけではなく、春季の大気場も考慮することが重要であると考えられる。しかしながら、大気・海洋環境変動の植物プランクトン分布への影響に関しての知見は十分ではない。特に、春季の大気場の重要性を論じた研究は少なく、春季の大気変動の植物プランクトン分布への影響に関しては明らかになっていない。そこで本研究では、大気変動に対する黒潮続流域における春季ブルームの応答を明らかにすることを目的とする。

[資料と方法]

海洋表層だけではなく水柱内の植物プランクトン生物量の議論を行うため、過去に提唱

された有光層内積算クロロフィル a 量の推定式を基に、Orbview-2/SeaWiFS によるクロロフィル a 濃度データ（1998 年から 2007 年）を用いて水柱積算のクロロフィル a 量を推定した。この際、船舶観測による全 142 点での各層のクロロフィル a 濃度データを用いて推定値の精度検証と系統誤差の改善を行った。その後、黒潮続流域（30 °-40 °N, 140 °E-180 °）における水柱積算のクロロフィル a 量の時空間変動特性を調査した。次に、JAMSTEC DIAS によって作成された 1998 年から 2006 年までの 4D-VAR 海洋再解析プロダクト（空間解像度: 1°, 鉛直 27 層）の月平均水温、塩分値を用いて、成層強度の指標として各深度における浮力振動数を算出し、クロロフィル a 量との関係を調べた。また、NCEP/NCAR の大気圧データを用いて北太平洋（20 °-70 °N, 130 °E-120 °W）において主成分分析を行い、その経年変動特性を抽出した。その結果を基に、気圧配置と海面熱フラックス（NCEP Global Ocean Data Assimilation System より入手）との関係を調べた。そして、大気変動の冬季混合層深度への影響、植物プランクトン分布への影響を調べた。

[結果と考察]

1. 水柱積算クロロフィル a 量の時空間変動

水柱積算クロロフィル a 量は 3 月～6 月に高く、経年変動も大きかった。その春季平均値は 2005 年に最も高く（24.4 mg m⁻²）、1998 年に最も低かった（21.9 mg m⁻²）。2005 年には 4 月から 5 月にかけて値が高く維持されていたのに対し（春季ブルームの長期持続）、1998 年には急激に減少していた（春季ブルームの早期終焉）。クロロフィル a 量は毎年 4 月に最大値を記録したがその経年変動は小さく、そのおよそ 2 倍（分散値）の経年変動が 5 月に観測された。また、4 月よりも 5 月のクロロフィル a 量の方が春季平均値との間には明瞭な関係性があり、相関係数はそれぞれ 0.43（ $p < 0.22$ ）、0.94（ $p < 0.0001$ ）であった。以上のことから、春季のクロロフィル a 量の経年変動には、春季ブルームの規模（最大値）ではなくその持続期間が大きく関係しており、特に 5 月の植物プランクトン量をモニタリングすることが、春季の植物プランクトン生物量を議論する上で重要である。

2. 成層強度と水柱積算クロロフィル a 量との関係

春季クロロフィル a 量の大きかった 1998 年と小さかった 2005 年に着目し、両年 5 月における水柱の成層強度を比較すると、2005 年の方が全体的に表層（105 m まで）の成層強度が弱かった。そのため、2005 年には植物プランクトンがより下層の栄養塩も利用することができ、高いクロロフィル a 量が維持されたと考えられる。黒潮続流域での空間平均の成層強度とクロロフィル a 量との関係を、1998 年から 2006 年の 9 年間の各月について調べたところ、両者の間で相関関係が最も強かった月は 5 月であり、相関係数は -0.81（ $p < 0.008$ ）であった。次いで 4 月、6 月の順に相関係数が高く、それぞれ -0.75（ $p < 0.03$ ）、-0.61（ $p < 0.08$ ）であった。逆に 3 月には表層の成層強度が強いとクロロフィル a 量が高くなる傾向があり、相関係数は 0.52（ $p < 0.16$ ）であった。よって、4 月から 6 月には、十分な光環境下で（臨界深度理論を満たした上で）成層化の発達が遅れると春季ブルームの持続に

寄与し、結果として春季クロロフィル a 量の経年変動に大きく関係すると考えられる。

続いて、これまでの研究で考えられてきた冬季鉛直混合と春季クロロフィル a 量との経年変動の関係性を調べたが、両者の間には有意な相関は見られなかった ($r = -0.01$, $p < 0.98$)。このことから、1998 年から 2006 年には、冬季鉛直混合の経年変動は春季植物プランクトン分布の経年変動には影響しておらず、従来の研究には反する結果が示された。

3. 大気変動の水柱積算クロロフィル a 量への影響

北太平洋での 4, 5 月平均の海面気圧の主成分分析を行った結果、第一主成分は 41.0% の寄与率を示し、ベーリング海北部でのアリューシャン低気圧の強度、および太平洋高気圧の張り出しに関する空間パターンを示した。この空間構造が卓越した春季には、太平洋高気圧由来の暖気が例年よりも黒潮続流域上空に張り出していた。時間関数が最も大きかった 1998 年には、黒潮続流域における海洋への熱フラックスが例年より大きく ($+39.5 \text{ W m}^{-2}$)、時間関数が三番目に小さかった 2005 年には熱フラックスは小さかった (-16.0 W m^{-2})。海洋への熱フラックスが大きかった年には成層が発達していたと考えられる。海面気圧の第一主成分の時間関数、黒潮続流域におけるクロロフィル a 量、熱フラックス、成層強度のそれぞれのパラメータ間で相関係数 $+0.5$ 以上、もしくは -0.5 以下の有意な関係性が得られた。以上のことから、4, 5 月にベーリング海北部に低気圧が位置し、北太平洋では南方から高気圧が張り出す年に、黒潮続流域では海洋への熱フラックスが大きくなり、成層化が促進され、表層への栄養塩供給が遮断されるため、植物プランクトン生物量は小さくなる傾向にあった。逆に、太平洋高気圧の張り出しが弱い年には、成層化が遅れ、より深い層までの栄養塩を多く利用できるため、クロロフィル a 量は高くなる傾向にあった。本研究では、春季の大気場の植物プランクトン分布への影響を定量的に示すことができ、その重要性を明らかにすることができた。

独立行政法人水産総合研究センターの資源評価報告書によると、1998 年にはサンマやスルメイカの資源量が激減した。同年の春季クロロフィル a 量は最小であったことから、餌環境悪化がその資源激減の一因であると考えられる。本研究結果から、気候変動に伴う低次生産からのボトムアップ効果の変化を把握することが可能になると考えられ、将来的に、気候変動を考慮した生態系ベースの水産資源管理に役立つことが期待される。さらに、海洋再解析プロダクトに代表されるデータ同化モデルに生態系モデルをカップリングすることで、大気・海洋環境変動に伴う水産資源の年々変動および長期変動の理解が進み予測精度が向上すれば、最終的には、持続可能な水産資源管理を遂行することが可能となる。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	齊 藤 誠 一
副 査	教 授	桜 井 泰 憲
副 査	教 授	淡 路 敏 之 (京都大学大学院)
副 査	准教授	平 譚 享
副 査	准教授	山 口 篤

学 位 論 文 題 名

大気変動に対する黒潮続流域における 春季ブルームの応答

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、黒潮続流域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、海表面水温観測、海面高度観測などが非常に有力な手段となっている。

本研究で対象とした黒潮続流域は、高次回遊魚のカツオ、マグロや多獲性浮魚類のサンマ、イワシなどが索餌回遊する海域であり、当海域における植物プランクトンによる一次生産は、食物連鎖を介して、動物プランクトンや水産資源のための餌環境を根底で支えている。植物プランクトン生物量は毎年春季ブルーム時に最も高くなるが、近年、地球温暖化によって春季ブルームが早まることで一次生産性が低くなることが示唆されてきた。その結果として、水産資源量が激減する可能性が挙げられている。以上のことから、黒潮続流域において春季の植物プランクトン生物量と春季ブルーム発生のタイミングおよびその持続性を明らかにすることにより、海洋生態系の応答が理解でき、さらに水産資源の変動を予測できる。しかしながら、春季ブルームのタイミングや規模、持続期間やその経年変動などの点においては、その重要性に反して未解明な部分が多い。

春季の植物プランクトン分布の変動や規模には冬季鉛直混合による表層への栄養塩供給の違いが大きく影響すると考えられてきたが、春季の大気場がどのように植物プランクトン生産に影響を与えているかを論じた研究は少なく、春季の大気変動の植物プランクトン分布への影響に関しては明らかになっていない。

申請者は、船舶観測、衛星観測データを用いて、春季の植物プランクトン分布の時空間変動を解明し、さらに、数値モデルによるプロダクトや気候データを用いて、海洋環

境と植物プランクトン分布との関係、大気変動に伴う春季ブルームの応答を考察したものである。

特に審査員一同が評価した点は以下の通りである。

1. 海洋表層だけではなく水柱内の植物プランクトン生物量の議論を行うため、過去に提唱された有光層内積算クロロフィル a 量の推定式を基に、衛星海色データを用いて水柱内のクロロフィル a 量を推定した。この際、船舶観測データを用いて推定値の精度検証と系統誤差の改善を行い、その有用性を示した。
2. 1998 年から 2007 年までの 10 年間の黒潮続流域における春季植物プランクトン分布の時空間変動を明らかにし、春季植物プランクトン生物量の経年変動を考える上では、春季ブルームの持続をモニタリングすることが重要であることを明らかにした。
3. 4 月から 6 月にかけて、成層強度と水柱内クロロフィル a 量との間には有意な負の相関関係があることを明らかにした。
4. 冬季鉛直混合と春季クロロフィル a 量との間に有意な相関関係がなかったことを示し、冬季鉛直混合の経年変動は春季植物プランクトン分布の経年変動には影響していなかったことを明らかにした。
5. 4 月から 5 月に、ベーリング海北部にアリューシャン低気圧が位置し、北太平洋では南方から太平洋高気圧が押し寄せる年に、黒潮続流域では海洋への熱フラックスが大きくなり、成層化が促進され、植物プランクトン生物量は小さくなることを、統計的に有意な関係性を示して示唆した。

地球規模の気候・環境変化に対する植物プランクトンの地域的、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、素過程の理解が不可欠である。本研究はその素過程の理解と要因の解明を目指したものであり、本研究の成果を基礎に、データ同化モデルへ生態系モデルをカップリングした研究を推進すれば、年々変動も含んだ長期的な海洋の生物生産変動と地球環境変動との関係を同時に理解することができ、将来的に、生態系をベースとした水産資源管理や水産資源変動の把握が可能となる。

審査員一同は、本研究が気候変動・海洋環境変動に伴う黒潮続流域における春季植物プランクトン分布の変動に関する新たな知見を得たものと高く評価し、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。