

日本海表層における植物色素濃度の季節変化に関する研究

学位論文内容の要旨

[緒 言]

日本海における過去の植物色素濃度の研究のほとんどは対馬暖流域内に限られ、極前線を含む日本海北部海域の植物プランクトンブルームの特徴についてはまだ十分に明らかにされていない。そこで、本研究では時空間変動を広範囲で同時に観測ができる海色測定用のセンサーから測定した CZCS (Coastal Zone Color Scanner, 沿岸域海色走査計) データを用いて表層植物色素濃度の季節変化を記述し、さらにその物理—生物学的要因を調べることにした。表層植物色素濃度の季節変化要因を明らかにすることは、低次生物生産過程を理解するために重要であるとともに、餌料環境を通して関連のある水産資源生物の再生産、回遊、成長の予測にも必要な情報であると考えられる。

本研究では、まず最初に植物色素濃度・日射量・表層混合層の年平均及び季節変化について記述し、合成(Combined) 経験的直交関数 (Empirical Orthogonal Function: 以下 EOF と略す) 解析結果から日本海の植物色素濃度と日射量、混合層との時空間変動を調べる。次に、合成 EOF 解析結果を基に区分した 4 つの海域毎における植物色素濃度の季節変化を簡単な表層混合層モデルを用いて再現を試み、極前線以北海域と対馬暖流域における植物プランクトンブルームの発生と修了の要因を明らかにする。さらに、表層混合層が最も発達する冬季 2 月において日本海の中央をほぼ南北に横切る PM 線上で得られた水温資料解析から、対馬暖流域における局所的な植物色素濃度分布に影響すると考えられる冬季表層混合層の経年変化を調べた。以下に本研究の成果についてその概要を記す。

【植物色素濃度・日射量・表層混合層の年平均及び季節変化】

植物色素濃度の年平均場は、日本海東西 2 ヶ所に $0.7\mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 以上の高い濃度領域が存在し、北緯 38~40 度付近の東韓暖流域 (日本海西部) において $0.9\mu\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 以上の極大域となり、これらの極大域は主として春季ブ

ブルーム時に形成されている。日射量の年平均値は対馬/大韓海峡から北海道沖に向かって次第に小さくなる傾向がみられるが、季節変化の振幅は全海域ほぼ一様である。表層混合層が最も発達する冬季において極前線付近は水深 80m 以下と浅く、その北側で極端に深くなり (200m 以深)、南側はわずかに深くなる (100m 程度)。次に、植物色素濃度の季節変化が各海域で独立した現象によるものか、それとも日本海全域の組織的な現象によるものか、さらに日射量・表層混合層の変動とどの様な関係にあるのかを調べるために、客観解析法の 1 つである合成 EOF 解析を行った。

合成 EOF 解析による第 1 モードは日射量に対応したモードであり、日射量の少ない冬季に極前線東部で極大値を示すブルームを抽出している。また、このモードは極前線以南海域の対馬流域においても冬季に比較的高い植物色素濃度を持っていることを示している。第 2 モードは日本海全域において海面加熱と冷却の遷移期である春季と秋季に発生する顕著なブルームを抽出し、植物色素濃度としては春季の方が高い。第 3 モードは日本海北部域と対馬暖流沿岸域における冬季の海面冷却による深い混合層が形成されるモードである。このモードに対応した植物色素濃度は極前線上の西部海域、すなわち韓半島沖で春季ブルームが特に大きい傾向を示している。加えて、月別の表層植物色素濃度分布を詳しくみると、北部海域の春季ブルーム時期は対馬暖流域と比べて 1~2 ヶ月遅れる傾向がみられる。

上記に示した各モードの植物色素濃度の変動特性の違いから、日本海は北部海域、極前線西部海域、極前線東部海域、そして対馬暖流域の 4 海域に分けることができる。

【表層混合層モデルを用いた植物色素濃度の季節変化の再現】

合成 EOF 解析から区分した 4 海域別の植物プランクトン色素濃度の季節変化が簡単な表層混合層モデルを用いてどこまで再現することができるのかを調べた。結果として、極前線を境界とした南北海域における春季ブルーム特性の違いはある程度再現することができたものの、韓半島沖における特に大きな春季ブルームについては再現することはできなかった。

まず、表層混合層下部におけるエントレイメント率に対するモデルの応答特性を調べた。その結果、日本海における年 2 回のブルームを再現できるエントレイメント率 m は $2.5 < m < 4$ m/day 範囲にあることが推測された。そこで次に、 $m = 3$ m/day の値を用いて日本海の南北海域に対応

した冬季表層混合層の違いによる春季と秋季のブルームの再現を行なった。冬季の表層混合層が深い北部海域は冬季に混合層内に取り込まれる栄養塩濃度は高いものの、光環境が悪く、春季においても植物プランクトン量はかなり少なくなる。そのため、春季に光環境が良くなっても、植物プランクトンの増加率は高いものの増加量は小さく押さえられ、冬季表層混合層が浅い南部海域に比べて春季ブルーム時期が遅れる。しかし、北部海域は南部海域に比べて高い栄養塩が混合層内に供給されるいるためにブルーム時の植物プランクトン濃度は相対的に高くなる。一方、南部海域は冬季の混合層が比較的浅いために成長に必要な光量があり、加えて混合層下部からのエントレイメントによる栄養塩の供給がある。そのため、南部海域は冬季においても植物プランクトン濃度が比較的高い傾向があり、春季に混合層が浅くなり光環境が良くなれば、すぐにブルームが発生する。秋季ブルームは南北海域同様な発生、終了を示す。すなわち、混合層発達による栄養塩の取り込みで発生し、同時にエントレイメントによる混合層下部への排除の影響も受けている。南部海域の秋季ブルーム終了は冬季の比較的高い植物プランクトン濃度につながるため明瞭ではないものの、エントレイメントによる排除に加え、栄養塩の取り込みの減少と植物プランクトンの死亡にも依存している。

【対馬暖流域における冬季表層混合層の経年変化】

日本海の対馬暖流域には暖水渦、冷水渦が存在し、長期平均の水温場では再現できない冬季表層混合層の空間分布の違いがある。私は韓半島沖の特に大きな春季ブルームが上記のモデル計算で表現できなかった理由として、Ulleung warm eddy の存在による冬季混合層の局所的な空間分布が表現できなかったためと考える。

韓半島沖には十分な海洋観測資料がないため、同じ対馬暖流域内にある PM 線上の水温資料を用いて冬季の表層混合層が年によってどのように変化しているのかを調べた。その結果、冬季海面冷却量の指標となるモンスーン指数と表層混合層厚との比較から、混合層厚の経年変化は海面冷却量の年による違いだけでは説明できず、むしろ対馬暖流域に存在している暖水渦の配置や対馬暖流の張り出しに大きく影響を受けていることがわかった。おそらく、韓半島沖に存在している Ulleung warm eddy の挙動にも大きな経年変化のあることが推測される。

【今後の課題】

本研究により、日本海における極前線をはさんだ南北海域における植

物プランクトンの春季ブルームの違いは、冬季表層混合層厚の違いに影響を受けていることが示唆された。しかしながら、対馬暖流域の春季ブルームは暖水渦の配置や対馬暖流の張り出しに大きく影響を受けている可能性があり、本研究で用いた長期平均場の表層混合層モデルでは対馬暖流域の植物色素濃度の季節変化を十分説明することができなかった。

それ故、対馬暖流域における植物色素濃度の季節変化をより正しく再現するためには、スナップショット的な海洋観測（水温・塩分資料）を用いて、データ同化の手法を用いて水平及び鉛直流を見積もり、移流・拡散場における物理モデルを作成する必要があると考える。また、生物モデルはマルチレベルとし、おそらく秋季ブルームに影響すると考えられる夏季の植物プランクトン中層極大値を表現する必要がある。近い将来、物理—生物過程をカップリングさせたマルチモデルを完成させ、日本海における一次生産量を定量的に見積り、他の海域の生産量と比較したいと考えている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	大谷	清隆
副査	教授	池田	勉
副査	教授	岸	道郎
副査	助教授	磯田	豊
副査	助教授	斉藤	誠一

学位論文題名

日本海表層における植物色素濃度の季節変化に関する研究

日本海は日本近海で漁獲される浮き魚類の産卵場あるいは東シナ海の産卵場と成熟に達する亜寒帯水域を結ぶ索餌回遊経路として重要な海域である。日本海南部は東シナ海を経て対馬暖流として流入する亜熱帯起源の水塊が寒冷な日本海固有水の上を覆い、北部の寒冷水との間に日本海中央を東西に伸びるフロントが形成されている。本研究は海洋生物群に対する日本海の環境収容力の基礎となる植物プランクトンの発生に関して、衛星による植物色素情報(CZCS)と海洋気候値等の物理的条件を対比させ、その時空間分布と変動要素について解析したものである。

本研究では先ず衛星の海色測定センサーで得られた8年間にわたる植物色素濃度の月別分布を日本海全域についてまとめ、表層植物色素濃度の季節変化の特徴を示した。つぎに植物プランクトンの生産に関係する表層混合層の深さと日射量の月別統計値を日本海全域についてまとめ、これらの関係から日本海を日本海南部、極前線西部、極前線東部および日本海北部の4海域に分けた。

海域ごとに集計した月別植物色素濃度には春と秋にピーク(blooming)となる変化が4海域に共通して認められるが、極前線西部と日本海南部では春季ブルームの方が秋季ブルームより大きいのに対して日本海北部と極前線東部では秋季ブルームの方が大きく、日本海北部の春季ブルームは他の3海域より1月遅い5月に生ずるなど海域別植物色素濃度の周年変化の特徴をしめした。

これに対比される日射量の空間変化は小さく、4海域とも周年変化が卓越しているがブルームに対応する関係は見出されなかった。一方表層混合層深度は夏に浅く冬に深くなる共通した季節変化があるが、日本海北部では冬季に有光層深度をはるかに越える深さまで混合層が深まることや、極前線海域では日本海南部海域より冬季の混合層が浅いことなどの海域ごとの違いを示し、混合層の季節変化が表層の植物色素濃度の時空間変化に関係していることを推定した。

これらの結果に基づいて、動物プランクトンの摂食、有機懸濁物の分解、栄養塩の補給等の要素を取り入れた表層混合層モデルを用いて表層植物濃度の時空

間変化の再現を試みた。モデル計算の結果は日本海北部の春季ブルーミングが遅く生じる事や、極前線海域では秋のブルーミングに続いて冬季も比較的高い植物色素濃度が持続するなどおおむね統計値が示す変動パターンを再現し、冬季の混合層深度が植物色素濃度の時空間分布の変化を生じる重要な要素である事を示した。さらに、植物プランクトンの生産に続く動物プランクトンの生産の変化もこれまで得られている測定結果を再現しており、有意なモデル計算であることを示した。しかし対馬暖流が流れる日本海南部海域では冬季の経年変化が大きく、その原因を対馬暖流にしばしば存在する暖水渦の有無によって混合層深度が変化する事に有ることを示し、基礎生産に与える暖水塊の存在効果を示唆した。

これらの結果は日本海の生物生産過程を解明する為の有意義な知見を提出したものであり、審査員一同は、本研究の申請者が博士（水産学）の学位を授与される十分な資格を有すると判定した。