

## 学 位 論 文 題 名

西部北極圏海域における海洋環境変動に対する  
植物プランクトン群集の応答

## 学位論文内容の要旨

近年、北極海における海水減少の加速に伴い、物理および化学環境の変化を介して海洋生物分布に影響が現れている。海洋の基礎生産者である植物プランクトン群集への影響についてはいち早く報告されている。しかしながら、海水減少に伴う海洋の光環境の変化と植物プランクトンの成長期間および生息域の増加による基礎生産量増加が報告される一方で、海水融解や陸域からの淡水流入量の増加に伴う表層の低密度水の蓄積によって、下層から有光層への栄養塩供給が遮断され、基礎生産量が低下しているとの報告もある。

このように北極海における海水分布の変動が植物プランクトン群集へ与える影響は、物理環境の時空間変動や地形差が大きいため、一貫した知見は得にくいとされており、海域に特化した時系列観測が重要であると考えられている。特に、食物網を介したエネルギー転送過程が短い極域生態系において、基礎生産者の時空間分布の変動は高次生物へ大きな影響を与える。多くの予測モデルが更なる海水減少の継続を示唆しており、生態系や生物地球化学的物質循環の変動を評価する上で、海水分布の変動に伴う植物プランクトン群集の時空間分布の変化を明らかにすることは重要である。

そこで本研究では、北部チャクチ海からベーリング海陸棚域にかけての西部北極圏海域において、海水分布変動に対する植物プランクトン群集の応答を明らかにすることを目的とした。

植物プランクトン群集の分布に影響を与える重要な過程として、特に (1) 海水の融解時期の変化、および (2) 新規開放水面域の拡大、の 2 つの現象に着目した。

(1) については、陸棚域における春季から夏季にかけての海水融解時期と植物プランクトン群集の時空間分布特性について、主に衛星リモートセンシングを用いて調査した。現場データは、ベーリング海およびチャクチ海陸棚域において 2007 年の夏季に取得した。取得データは、植物プランクトンサイズ分画色素濃度、および生物光学観測データである。これらのデータより、衛星リモートセンシングより植物プランクトンサイズ組成を推定するアルゴリズムの構築を行った。衛星データは、1998–2010 年の海色データ (反射率)、海表面水温 (SST) および海水密接度を取得した。海色データより植物プランクトンサイズ組成、クロロフィル *a* 濃度 (chl<sub>a</sub>)、および年間基礎生産量を算出した。また、物理モデルによる混合層深度データを使用した。海水密接度データより各年の海水融解期を求め、海水融解時期の変化に伴う植物プランクトンサイズ組成、chl<sub>a</sub>、SST および混合層深度の変動特性とその相互関係を調べた。さらに、年間基礎生産量に対する植物プランクトンサイズの変動の寄与を評価した。

(2) については、開放水面域が最も拡大する 9 月の北部チャクチ海における植物プランクトン群集の分布の経年変動を、現場観測データを基に調査した。観測は 2008–2010 年の、開放水面域が最大となる 9 月に実施した。表層採水の分析および CTD により、植物プランクトン色素濃度、海面水温、塩分、および栄養塩濃度を測定した。植物プランクトン色

素濃度は高速液体クロマトグラフィー(HPLC)にて定量し、色素組成に基づくクラスター解析により植物プランクトンのグループ分けを行った。さらに、分類した各グループの生息環境因子(水温、塩分、栄養塩濃度)およびchl aの平均値について多重比較検定を行い、各グループがどのような環境条件に適応して分布しているのか調べた。また、衛星リモートセンシングにて取得した海水分布および海表面水温を使用し、植物プランクトングループ分布との対応を調べた。

海水の融解時期の変化に対する植物プランクトン群集の応答を調べるため、始めに、粒径5  $\mu\text{m}$ 以上の植物プランクトンのchl a バイオマスの割合( $F_L$ )を光学的に定量化し、衛星海色リモートセンシングによる植物プランクトンサイズ組成推定モデルを確立した。これにより、当海域における $F_L$ を、衛星より $\pm 20\%$ の誤差内で69%の精度で推定可能とした。

チャクチ海陸棚域では海水の融解時期が早期化しており、ベーリング海陸棚域では晩期化する傾向にあった。しかしながら、海水融解時期の変化に対する植物プランクトン群集は類似した分布傾向を示した。1.0  $\text{mg m}^{-3}$ 以上の高いchl aは海水の融解直後に認められ、植物プランクトンのブルーム時期は海水の融解時期の影響を大きく受けていた。海水融解時期とSSTの変動にも高い相関があり、海水融解が早くなると融解時期の水温は低く、また成層化が遅れる傾向にあった。これに伴い、海水融解時期における平均的な植物プランクトンサイズは大型化する傾向にあった。したがって、海水融解時期の変動は水柱の安定時期と栄養塩状態を左右し、植物プランクトンサイズの組成に影響を及ぼすものと推測される。さらに、当海域における植物プランクトンサイズ組成は、年間基礎生産量の変動要因として成長期間の長さよりも重要であった。つまり、当海域では海水の融解時期の変化によって変動する海洋環境が、植物プランクトンのサイズ組成と基礎生産量に影響を与えることが示唆された。

開放水面域が最大となる9月の北部チャクチ海において、植物プランクトングループは4つのグループに分類された。各グループはその色素組成から、ブラシノ藻類、ケイ藻類、ハプト藻類+ケイ藻類、および渦鞭毛藻類の優占率がそれぞれ高いと考えられた。ブラシノ藻類およびハプト藻類+ケイ藻類は海盆地、ケイ藻類および渦鞭毛藻類は陸棚域で見られたが、その分布には年による違いがみられ、特にハプト藻類+ケイ藻類のほとんどは2008年の東部チャクチ海に分布していた。環境因子に対する多重比較検定の結果、ケイ藻類および渦鞭毛藻類が優占したグループは、海水融解水の影響が小さい( $>29 \text{ psu}$ )陸棚域に分布し、ブラシノ藻類およびケイ藻類+ハプト藻類が優占したグループは、海水融解水の影響が大きく( $<29 \text{ psu}$ )、また栄養塩が枯渇した海域に分布していた。その一方でハプト藻類+ケイ藻類は、ブラシノ藻類に比べ有意に高い水温帯( $>3^\circ\text{C}$ )に分布していた。2008年は東部チャクチ海において、他の年よりも2–3 $^\circ\text{C}$ 高いSSTが分布しており、このSSTに対応してハプト藻類+ケイ藻類が分布していた。また、2008年における東部チャクチ海は他の年よりも、およそ1–2ヶ月早く開放水面域が広がっていた。したがって、早い開放水面域の拡大によって海面が太陽放射を長く受けたため、水温の上昇をもたらし、東部チャクチ海における植物プランクトングループ組成が遷移したと推測される。

本研究結果により、陸棚域における海水融解時期の変動、および北部チャクチ海新規開放水面域における海水の時空間分布変動は、いずれも植物プランクトン群集のサイズ組成や優占グループを変動させることが明らかとなった。将来的に北極圏海域における海水減少がさらに進行すると、開放水面面積の拡大および海水融解期間の早期化に比例して、生態系や生物地球化学的物質循環に対するボトムアップ的側面からの影響は、時空間的に増大していくと予測される。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	今井一郎
副査	教授	齊藤誠一
副査	准教授	平譯享
副査	准教授	鈴木光次 (地球環境科学研究院)

## 学位論文題名

### 西部北極圏海域における海洋環境変動に対する 植物プランクトン群集の応答

近年、北極海における海氷減少の加速に伴い、物理および化学環境の変化を介して海洋生物分布に影響が現れている。海洋の基礎生産者である植物プランクトン群集への影響についてはいち早く報告されている。しかしながら、海氷減少に伴う海洋の光環境の変化と植物プランクトンの成長期間および生息域の増加による基礎生産量増加が報告される一方で、海氷融解や陸域からの淡水流入量の増加に伴う表層の低密度水の蓄積によって、下層から有光層への栄養塩供給が遮断され、基礎生産量が低下しているとの報告もある。

このように北極海における海氷分布の変動が植物プランクトン群集へ与える影響は、物理環境の時空間変動や地形差が大きいと、一貫した知見は得にくいとされており、海域に特化した時系列観測が重要であると考えられている。特に、食物網を介したエネルギー転送過程が短い極域生態系において、基礎生産者の時空間分布の変動は高次生物へ大きな影響を与える。多くの予測モデルが更なる海氷減少の継続を示唆しており、生態系や生物地球化学的物質循環の変動を評価する上で、海氷分布の変動に伴う植物プランクトン群集の時空間分布の変化を明らかにすることは重要である。

そこで申請者は、北部チャクチ海からベーリング海陸棚域にかけての西部北極圏海域において、海氷分布変動に対する植物プランクトン群集の応答を明らかにすることを目的とし、現場データおよび衛星リモートセンシングデータを用いて研究を行った。

審査員一同が評価した点は以下の通りである。

1. 植物プランクトンおよび光学に関する様々な現場観測を実施し、光吸収および光散乱から粒径  $5\ \mu\text{m}$  以上の植物プランクトンのクロロフィル *a* バイオマスの割合を求めるモデルを構築した。さらに、衛星によりサイズ組成を $\pm 20\%$ の誤差内で  $69\%$ の精度をもって推定可能にした。光吸収と光散乱の両方を利用したサイズ推定モデルは過去には少なく、特に北極海用のこのようなモデルは初めての例である。
2. 植物プランクトンのブルーム時期は海氷の融解時期の影響を大きく受け、海氷融解時期と SST の変動にも高い相関があり、海氷融解が早くなると融解時期の水温は低く、また成層化が遅れる傾向にあることを示した。また、上記のモデルを利用することにより、海氷融解時期の早

期化は、春季陸棚域の植物プランクトンサイズを大型化させ、夏季には逆に小型化させることを明らかにした。さらに、年間基礎生産量は開放水面となる面積・日数の影響を受けるという過去の知見に対し、陸棚域では年間基礎生産量に植物プランクトンサイズが大きく影響していることを示した。

3. 新規開放水面域となる北部チャクチ海においても、海氷後退の早期化が水温上昇と光環境の改善をもたらし、優占する植物プランクトン群集を変化させることを、現場観測データに基づき明らかにした。

以上の研究結果は、北極海における更なる海氷減少に対する植物プランクトン群集の変化と海洋生態系への影響を評価する上で重要な知見であり、北極海洋研究・生態系研究に寄与すると、高く評価した。また、申請者は衛星による推定だけではなく、自ら現場観測・サンプル分析とそれらを利用したモデル化や検証も実施し、研究に十分活用できる能力があると認められる。さらに、結果の一部は、査読付き英文雑誌に掲載され、審査中の査読者に対する回答も的確であった。公開発表の質疑に対する応答も妥当であり、投票判定では審査委員および関連教員全員(16名)が可と判定とした。

よって、審査員一同は申請者が博士(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。