

北太平洋亜寒帯域における植物プランクトン分布および 基礎生産の変動機構の解明

—マルチセンサーリモートセンシングによるアプローチ—

学位論文内容の要旨

北太平洋亜寒帯域は世界でも生物生産が非常に高い海域で、植物プランクトンダイナミクスでは、東部と西部で異なった特色を持つことから、東部と西部の比較研究が最近良く行われている。本研究海域における、植物プランクトン、基礎生産に関する研究は、1960年代から、非常に多くの研究者によってなされてきた。特に東部のアラスカ循環域（AG）には Stn.Papa(145° W, 50° N)と呼ばれる国際的な大測点があり、多数の研究者による大量のデータ蓄積がある。AG域は、春に明瞭なブルームが見られず、表層のクロロフィル a 濃度が通年で約 0.4 mgm⁻³ 以下の、高栄養塩低クロロフィル海域（HNLC: High Nutrient Low Chlorophyll）と言われている。低いクロロフィル濃度になる理由として、鉄制限によって植物プランクトンの成長が抑制されるという知見や、動物プランクトンによる補食圧が高い等の知見があるがまだ不明な点が多い。特に、西部亜寒帯循環域（WSG）での知見は AG 域に比較してさらに少ない。

近年、人工衛星搭載の海色センサーによるリモートセンシング技術を用いて、全球規模かつ連続的に、海洋植物プランクトン現存量が観測されている。1978年から1986年まで稼働した米国 NASA の実験気象衛星、Nimbus-7 搭載の CZCS (Coastal Zone Color Scanner) データは、初めて海洋観測による植物プランクトン現存量の観測を実現し、我々に多くの海洋学的知見を与えた。その後 10 年間は利用できる海色センサーはなかったが、OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner) を搭載した宇宙開発事業団のみどり (ADEOS) 衛星が 1996 年 8 月に打ち上げられ、1997 年 6 月まで稼働した。現在は 1997 年 8 月に NASA が打ち上げた海洋観測衛星 Orbview-2 衛星搭載の SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of view Sensor)、1999 年 12 月に打ち上げられた Terra 衛星搭載の MODIS (Moderate Resolution

Imaging Spectroradiometer)が、全球規模の植物プランクトン観測を継続している。

地球規模の気候・環境変化に対して、地域的、時間的な植物プランクトン・基礎生産の分布特性と変動メカニズム現象を解明していくために、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だと考えている。本研究では、複雑な植物プランクトン・基礎生産分布メカニズムの解明のために、植物プランクトンをはじめ、水温・風・日射等の複数の環境要素を同時に、連続に、かつ広域に観測することができるマルチリモートセンシングを適用した。長期のマルチセンサーリモートセンシングデータを用いれば、季節変動、年々変動も含んだ長期的な海洋の生物生産の変動と地球環境との関係を同時に理解することが可能となる。

本研究では前述した問題点をふまえ、El Niño, La Niña 年も含んだ 1997 年から 2000 年までの、クロロフィル、基礎生産、水温、海上風、日射量など衛星マルチセンサーデータを用いて、北太平洋亜寒帯域で衛星広域観測を行い、以下の 2 点を明らかにすることを目的とした。

- ① 北太平洋亜寒帯域における植物プランクトン濃度および基礎生産の時空間分布変動特性を記述する。
- ② 北太平洋亜寒帯域における植物プランクトン濃度および基礎生産の時空間分布変動特性と物理環境との関係を考察する。

解析した結果、以下のことが明らかになった。

- ① 1998 年から 2000 年まで 3 年間における、植物プランクトン分布の季節変動、年々変動の空間的特徴を把握するため、各年で作成した Chl-*a* 濃度最大・最小出現月画像を用いて、定常的な分布パターンと年々変動がある分布パターンがある海域を区別できた。
- ② Chl-*a* 濃度最大・最小出現月画像を用いて海域区分を行うことによって次の 3 つの総観的分布特性が明らかになった。1 つは、高緯度域 40N 以北では、5 月に最大になる海域は 2 月に最小となるパターンが多い。2 つ目は、中緯度に分布する 4 月に最大となる海域は夏 8 月に最小となる海域が多い。3 つ目は低緯度に分布する 12 月に最大値となる海域は 8 月に最小値が出現する傾向がある。
- ③ Area2 として区分された 5 月に Chl-*a* 濃度のピークが出現するクリル諸島・アリューシャン列島周辺海域は、本研究海域で最も Chl-*a* 濃度、基礎生産が大きかった。高い Chl-*a* 濃度が維持される原因

として、両海域は水平、鉛直的にも栄養塩の供給が常に大きい海域であると考えられる。5月のChl-*a*濃度のピークは、日射量のピークと一致することから、本海域は安定した豊富な栄養塩と日射条件の整った5月にブルームが起き、そして栄養塩供給が絶えず起こっていることから、ブルームも比較的長く維持されると考えられる。ブルームの終焉は夏季昇温期に表層の成層化によって下層からの栄養塩供給が弱められるとき表層の栄養塩の枯渇と同時に起こるものと推測される。

- ④ Area3として区分されたアラスカ循環北縁の9月に必ずChl-*a*濃度ピークが出現する海域は、その空間分布と亜寒帯太平洋における夏季のMacro-zooplanktonの分布(Mackas and Tsuda, 1999)とを比較すると、その海域とMacro-zooplanktonバイオマスの高い海域が非常に良く一致していた。このことから9月にChl-*a*濃度ピークが見られたこの海域は、春季から夏季にかけてMacro-zooplanktonバイオマスが多く、補食圧も高いと考えられ、同時期の現場観測データがないことから定量的には議論できないが、Area3における9月のピークは、春以降夏まで高かった動物プランクトンの補食圧が、秋以降が弱まることが起因となる見かけのピークであることが示唆された。
- ⑤ 165E付近Area6を含む46-53NのWSG周辺海域では、1998年の秋9月が他年の同時期より高いchl-*a*濃度になり、約1.0 mgm⁻³の高濃度パターンが広く分布した。1998年44N以北では、春4月から夏季9月までは、正の風アノマリが持続された。特に5月、6月は最も風が強く、この春の強い風は鉛直混合を高め、水塊安定度を弱め、春季のブルームを抑制したと考えられる。WSG付近の1998年秋9月のブルームを強めた原因は、例年より多い冬季の栄養塩の供給と春から夏の強い風が鉛直混合を高め、秋のブルームが起こったと考えられる。
- ⑥ 1999年のみ6月にArea6を含む50-52N付近に1.0 mg m⁻³の高濃度域が見られるのは、冬から春3月にかけて風が強まったことにより、鉛直混合が促進され、栄養塩の下層からの供給が高められ、さらに春以降風が弱まったことによって成層化が促進され例年よりも高いブルームが起こったと考えられる。1999年はLa Niña年であり、アリューシャン低気圧が西方シフトしたことによってWSG付近の冬季の風が強まった。このことは、地球規模の環境変化が高緯度域にテレコネクションし、大気の風速場を変化させ、海洋の植物プランクトン分布にまで影響を与えていることを示唆

している。

- ⑦ WSG 海域と AG 海域の東西循環系海域を比較した結果、WSG の方が AG に比べて Chl-a 濃度が比較的高く、変動は大きい。1999 年のみであるが WSG では 6 月にピークが見られた。衛星観測による Chl-a 濃度の西高東低パターンは、Shiomoto et al. (1998) の船舶観測による東西比較結果と良く一致した。AG では春季に明確なクロロフィルの増加が見られない知見があるが (Parsons and Lalli, 1988)、今回の衛星観測結果でも同様のパターンが見られた。AG のクロロフィル a 濃度観測結果では、Wong et al. (1995) によると、通年で約 $0.4\text{mg}/\text{m}^3$ 以下の低濃度で推移すると言われているが、今回の衛星観測では秋のピークを除けば良く一致していた。

本研究では、マルチセンサーリモートセンシングを用いることによって、植物プランクトン分布、基礎生産分布とその物理環境との関係を同時に捉えることができた。また、衛星データであるので空間的に広い範囲を同時に観測でき、空間解像度もこれまでの船舶観測や数値モデルにはない 9km であり、よりきめ細かな時空間分布パターンが解析できることを示した。今後、さらに本研究を発展させ、北太平洋亜寒帯域における海洋生態系の植物プランクトンと基礎生産量の時空間分布変動を定量的に明らかにできれば、地球環境変化に対する海洋植物プランクトンの応答の解明、さらには太平洋における水産資源における餌環境を通じた生存・成長に与える影響や資源管理予測など水産海洋学的応用にも役立つものと考えている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 齊 藤 誠 一
副 査 教 授 岸 道 郎
副 査 教 授 三 浦 汀 介
副 査 教 授 飯 田 浩 二
副 査 教 授 才 野 敏 郎 (名古屋大学)

学位論文題名

北太平洋亜寒帯域における植物プランクトン分布および 基礎生産の変動機構の解明

—マルチセンサーリモートセンシングによるアプローチ—

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海色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。現在まで北太平洋亜寒帯域における広域にわたる春季ブルームなどの生物生産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が非常に有力な手段となりつつある。

本研究で対象とした北太平洋亜寒帯域は、世界でも生物生産が非常に高い海域で、植物プランクトンの変動特性は、東部と西部で異なった特色を持つことから、東部と西部の比較研究が最近良く行われている。本研究海域における、植物プランクトン、基礎生産に関する研究は、1960年代から、非常に多くの研究者によってなされてきた。特に東部のアラスカ循環域 (AG) にはSt.Papa(145° W, 50° N)と呼ばれる国際的な大測点があり、多数の研究者による大量のデータ蓄積がある。AG域は、春に明瞭なブルームが見られず、表層のクロロフィルa(Chl-a)濃度が通年で約0.4 mgm⁻³以下の、高栄養塩低クロロフィル海域 (HNLC: High Nutrient Low Chlorophyll) と言われている。低いChl-a濃度になる理由として、鉄制限によって植物プランクトンの成長が抑制されるという知見や、動物プランクトンによる捕食圧が高い等の知見があるがまだ不明な点が多い。特に、西部亜寒帯循環域 (WSG) での知見はAG域に比較してさらに少ない。

地球規模の気候・環境変化に対して、地域的、時間的にどのように植物プランクトン・基礎生産が変動しているのか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。

申請者は、複雑な植物プランクトン・基礎生産分布の変動機構解明のために、連続に、かつ広域に観測することができるマルチセンサーリモートセンシングデータを利用して、単に植物プランクトン分布の時空間変動を記述しただけでなく、海上風、海面温度などの物理環境を同時に解析しその影響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. 1998年から2000年まで3年間における、植物プランクトン分布の季節変動、年々変動の空間的特徴を把握するため、各年で作成したChl-a濃度最大・最小出現月画像を用いて、定常的な分布パターンと年々変動がある分布パターンがある海域を区別して総観的な分布特性を明らかにした。
2. Chl-a濃度最大・最小出現月画像を用いて海域区分を行うことによって次の3つの総観的な分布特性が明らかになった。1) 高緯度域40N以北では、5月に最大となる海域は2月に最小となるパターンが多く、2) 中緯度に分布する4月に最大となる海域は夏8月に最小となる海域が多く、3) 低緯度に分布する12月に最大値となる海域は8月に最小値が出現する傾向があることを明らかにした。
3. WSG周辺海域では、1998年の秋9月が他年の同時期より高Chl-a濃度になり、約 1.0 mgm^{-3} の高濃度パターンが広く分布し、WSG付近のブルームを強めた原因は、例年より多い冬季の栄養塩の供給と春から夏の強い風が鉛直混合を高め、秋のブルームが起こったことを考察した。これは、マルチセンサーリモートセンシングを用いることによって、植物プランクトン分布、基礎生産分布とその物理環境との関係を同時に捉えることができることを示したものである。
4. WSG海域とAG海域の東西循環系海域を比較した結果、WSGの方がAGに比べてChl-a濃度が比較的高く、変動は大きいことを示した。衛星観測によるChl-a濃度の西高東低パターンは、過去の船舶観測による東西比較結果と良く一致した。AGでは春季に明確なクロロフィルの増加が見られない知見があるが、今回の衛星観測結果でも同様のパターンがあることを示した。
5. 1999年はLa Niña年であり、アリューシャン低気圧が西方シフトしたことによってWSG付近の冬季の風が強まった。このことは、地球規模の環境変化が高緯度域にテレコネクションし、大気の流れ場を変化させ、海洋の植物プランクトン分布にまで影響を与えていることを示唆した。
6. 本研究は、地球環境変化に対する海洋植物プランクトンの応答の解明、さらには太平洋における水産資源における餌環境を通じた生存・成長に与える影響や資源管理予測など水産海洋学への衛星海色リモートセンシングの応用可能性を示した。

今後、このような方法で、長期のマルチセンサーリモートセンシングデータを用いれば、4-5年スケールのENSOイベント周期からさらに10年スケール以上の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可能となる。

審査員一同は、本研究が、北太平洋亜寒帯域における植物プランクトン分布に関する重要な知見を得たものと高く評価し、本論文が博士（水産科学）の学位論文として価値あるものと認定した。