

学 位 論 文 題 名

Bio-optical Characteristics of the Arctic Ocean: Application to an Arctic Ocean Color Algorithm

(北極海における海洋光学的特性：

北極海に適応可能な海色アルゴリズム開発への応用)

学位論文内容の要旨

[緒言]

近年、急速な地球温暖化が懸念されている。北極海における海氷分布域は年々減少を続け、昨年 2007 年の夏期に過去最小値 (420 万 km²) を記録した。海水温の上昇に加え、この海氷の減退は海洋生態系の根底を支える植物プランクトンの分布に顕著な影響を及ぼすことが示唆されている。そのため、船舶を用いた現場観測により植物プランクトンバイオマス、さらには基礎生産量を把握する調査が行われてきたが、この観測方法は海氷分布により時期的・海域的な制約を受ける。広域を継続的かつ効率的に観測可能な海色センサを用いたリモートセンシング技術の応用は、この物理的制限を解消する唯一の方法であり、その有益性が強く認識されてきた。しかしながら、北極域に適用される海色アルゴリズムによる植物プランクトンバイオマスの推定精度には問題があることが数多く指摘されており、その原因である北極海の海洋光学的特性はいまだ明らかにされていない。

そこで本研究では、現場観測により海洋光学的特性を統計的に明らかにすることを研究目的とする。そこで得られた知見を基に、北極海に適用可能な海色アルゴリズムの開発を行う。

[使用データ]

本研究で用いた現場データは、65-76° N、120-180° W の海域において国際的な北極プロジェクト(SBI: 2002 年 5 月 8 日から 2002 年 8 月 21 日、CASES2003: 2003 年 9 月 13 日から 2003 年 11 月 25 日、および MR04-05: 2004 年 9 月 1 日から 2004 年 10 月 15 日)で取得したクロロフィル *a* (chl*a*)濃度、光吸収・後方散乱係数、輝度および照度である。chl*a* 濃度は蛍光法により測定した。植物プランクトンおよび植物プランクトン以外の懸濁物質(NAP)による光吸収係数は quantitative filter technique により測定した。有色溶存有機物質(CDOM)の光吸収係数の算出方法は海洋光学観測の SeaWiFS 標準プロトコル

に従った。後方散乱係数は、後方散乱計 Hydroscat-6 を用いて測定した。輝度・照度の測定は水中分光放射計 PRR-600/610 および SPMR/SMSR により取得した。搭載したバンドはそれぞれ 6 バンド(443、490、510、555、565、670 nm) と 13 バンド (405、412、443、490、510、520、532、555、565、620、665、683、700 nm) である。なお、船影の影響を最小にするため、分光放射観測は船尾において船体から十分に離れた後に実施した。輝度・照度より、海面直上における光の反射率および海色センサで検出可能な光学深度を算出した。

【解析方法】

本研究で取得した植物プランクトンの光吸収係数に対し、chl a との回帰分析を実行した。また、植物プランクトン、CDOM、および NAP の吸収係数に対し、その合計に対するそれぞれによる光吸収の割合を算出した。

本研究では、物質による光の吸収・散乱の結果を半解析的に反映した quasi-analytical algorithm (QAA) による光吸収・後方散乱係数の推定精度について検証した後、このアルゴリズムを採用した。また、北極域に対して適用されている Arctic OC4L、OC4V4、および OC3M の 3 つの経験的海色アルゴリズムの推定精度を検証した。評価指数として、root mean square error (RMSE) を採用した。

【結果および考察】

1. 北極海における海洋光学的特性

北極海では、chl a と有意に高い相関(可視域 400 から 700 nm において $r^2 > 0.70$) を示した植物プランクトンによる光吸収が、低・中緯度と比較して顕著に低かった。これは、北極域に分布する植物プランクトンによるパッケージ効果が原因であることが示唆される。また、CDOM による光吸収が他の海域と比較して有意に高く、植物プランクトンによる光吸収が最大となる 443 nm において、CDOM による光吸収は水以外の全吸収の 64 % を占め、植物プランクトン (24 %) や NAP (12 %) と比較して顕著に高かった。この高い CDOM による光吸収は、中緯度沿岸域 (46 %) と比較しても極めて高く、北極海における海洋光学的な特徴の 1 つであることが初めて明らかになった。この結果は、北極海全体の体積が全球の 1 % であるにもかかわらず、陸からの淡水流入のうちの 13 % が北極海に流入するという過去の知見と一致する。

2. 既存の海色アルゴリズムの精度検証

1. 北極海における海洋光学的特性で明らかになった海洋光学的特性を基に、Arctic OC4L、OC4V4、および OC3M アルゴリズムの推定精度を検証した。その結果、沿岸域特有の水である Case 2 water を除くと、Arctic OC4L は他の 2 つ (OC4V4 および OC3M) と比較して高精度で chl a を推定することが可能であることがわかった(それぞれ、RMSE=0.13、0.23、0.24)。この結果は、Arctic

OC4L アルゴリズムには北極域に分布する植物プランクトンによるパッケージ効果と CDOM による高い光吸収の両者がともに加味されていることを示唆している。一方、Case 2 water を含めると、いずれのアルゴリズム (Arctic OC4L、OC4V4、および OC3M) も 25 % 以上の顕著な誤差を生じる事実が明らかになった。

3. 北極海で適応可能な海色アルゴリズムの開発

2. 既存の海色アルゴリズムの精度検証の結果から、Arctic OC4L アルゴリズムを北極海沿岸域に適用することは困難であることが明らかとなった。この結果は、Case 2 waters の懸濁・溶存物質による多様かつ複雑な光学場に対し、平均的な光学場を反映した経験的アルゴリズムを適用することには物理的制限があることを示唆している。そこで本研究では、物質による光の吸収・散乱の結果を半解析的に反映した QAA に **1. 北極海における海洋光学的特性**で得られた統計的関係を組み合わせることで、従来のアルゴリズムと比較して高精度かつ汎用性に優れたアルゴリズムの開発に成功した。この手法は、純粋な理論に基づいた放射伝達モデルを直接適用する方法と比較し、大容量の衛星画像に対して迅速にかつ高精度で適用可能であることから、実用性が高い。本研究で提案したアルゴリズムは経験的および半解析的な結果を併用していることから、季節的・あるいは経年的に変化し得る植物プランクトンの光学的特性を統計的に反映することができる。本研究結果は、北極海における植物プランクトンバイオマスを高精度で推定することが可能となることを示唆しており、今後、温暖化に対する植物プランクトンバイオマスの応答を定量的に把握できることが期待される。本研究成果は、海氷の減退や海水温の上昇といった物理的な研究に加え、現在進行中である地球温暖化に対する植物プランクトンの応答から気候変化への理解を向上する重要な成果である。

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 教 授 石 坂 丞 二 (長崎大学)

副 査 准教授 平 譯 享

学 位 論 文 題 名

Bio-optical Characteristics of the Arctic Ocean: Application to an Arctic Ocean Color Algorithm

(北極海における海洋光学的特性：

北極海に適応可能な海色アルゴリズム開発への応用)

近年、急速な地球温暖化が懸念されている。北極海における海氷分布域は年々減少を続け、昨年 2007 年の夏期に過去最小値 (420 万 km²) を記録した。海水温の上昇に加え、この海氷の減退は海洋生態系の根底を支える植物プランクトンの分布に顕著な影響を及ぼすことが示唆されている。そのため、船舶を用いた現場観測により植物プランクトンバイオマス、さらには基礎生産量を把握する調査が行われてきたが、この観測方法は海氷分布により時期的・海域的な制約を受ける。広域を継続的かつ効率的に観測可能な海色センサを用いたリモートセンシング技術の応用は、この物理的制限を解消する唯一の方法であり、その有益性が強く認識されてきた。しかしながら、北極域に適用される海色アルゴリズムによる植物プランクトンバイオマスの推定精度には問題があることが数多く指摘されており、その原因である北極海の海洋光学的特性はいまだ明らかにされていない。

そこで本研究では、北極海で適用可能な海色アルゴリズムの開発を目指し、海洋光学的特性を明らかにすることを研究目的とした。本研究では、海洋生物光学研究に関する知見が少ない北極海において、クロロフィル *a* (chl_a) 濃度、光吸収・後方散乱係数、輝度および照度を測定した結果を用いて、以下の 3 つの点に着目し、解析を遂行したものである。

- ① 北極海における海洋光学的特性を統計的に明らかにすること。
- ② 既存の海色アルゴリズムによる chl_a 推定精度を検証すること。
- ③ ①、②を踏まえ、北極海で適用可能な海色アルゴリズムの開発を行うこと。

特に審査員一同が評価した点は以下の通りである。

1. 北極海では植物プランクトンによるパッケージ効果が顕著であることを定量的に明らかにした。

2. 北極海では有色溶存有機物質(CDOM)による光吸収が中緯度沿岸域と比較しても極めて高く、北極海における海洋光学的な特徴の1つであることを統計的に明らかにした。
3. 北極海に対して適用される3つの海色アルゴリズム、Arctic OC4L、OC4V4、およびOC3Mの推定精度を検証した結果、沿岸域特有の水であるCase 2 waterを除くと、Arctic OC4Lは他の2つ(OC4V4およびOC3M)と比較して高精度でchl_aを推定することが可能であることがわかった。この結果は、Arctic OC4Lアルゴリズムには北極域に分布する植物プランクトンによるパッケージ効果とCDOMによる高い光吸収の両者がともに加味されていることを示唆している。一方、Case 2 waterを含めると、いずれのアルゴリズム (Arctic OC4L、OC4V4、およびOC3M)も25%以上の顕著な誤差を生じる事実もともに明らかになった。
4. 3.の結果から、Arctic OC4Lアルゴリズムを北極海沿岸域に適用することは困難であることを明らかにした。この結果は、Case 2 watersの懸濁・溶存物質による多様かつ複雑な光学場に対し、平均的な光学場を反映した経験的アルゴリズムを適用することには物理的制限があることを示唆している。
5. 北極海では、Quasi-analytical algorithm (QAA)の推定精度が高い事実を明らかにした。このQAAは物質による光の吸収・散乱の結果を半解析的に反映することから、季節的・あるいは経年的に変化し得る植物プランクトンの光学的特性を統計的に反映することができる可能性を示唆した。
6. 3から5で明らかにした結果を踏まえ、QAAにArctic OC4Lアルゴリズムを組み合わせることで、従来のアルゴリズムと比較して高精度かつ汎用性に優れたアルゴリズムの開発に成功した。

以上の諸点は北極海における光環境と生物光学・衛星海洋学に関する重要な知見を得たものとして高く評価できる。開発された高精度アルゴリズムを応用することより、近年深刻化している地球温暖化に対する植物プランクトンバイオマスの応答を定量的に把握できることが期待される。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。