

沿岸汚濁海域における海色リモート センシングに関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

日本の沿岸の海洋環境は、昭和30~40年代に比べると改善され清浄さを取り戻しつつあるが、未だに全国各地で赤潮や青潮、赤土問題などが発生しており、例えば赤潮の発生件数は、瀬戸内海で年間100件前後、東京湾でも数十件発生し、漁業への被害も生じている。このような沿岸海域の汚濁対策を行うためには、まず汚濁状況を定量的に把握することが必要である。ただし、この汚濁状況の把握は、船舶では広範囲にわたる観測に限界があり、人工衛星によるリモートセンシングが期待されている。海中に入射した太陽放射は、海中で海水分子によるRayleigh散乱、及び汚濁物質によるMie散乱や吸収を受け、再び海表面から上空へ放射され、衛星のセンサに検出される。この上向き放射は、汚濁物質の濃度変化により、例えば清浄海域は濃青色、沿岸海域は緑色、赤潮は赤褐色ないし黄褐色と変化するため、この海色の変化(上向き放射輝度スペクトルの変化)を測定することにより、海域の汚濁状況を把握することが出来る。そこで本研究では、海水中の溶存物質や懸濁物質、海水分子の吸収係数や散乱係数などの光学的特性を与えて大気-海洋結合系の太陽放射の伝播に関する放射伝達方程式を解き、上向き放射輝度スペクトルと汚濁物質濃度との関係を求めた。その上で沿岸海域汚濁の例として赤潮や赤土流出問題を取り上げ、リモートセンシングにより汚濁物質濃度を推定する手法についての基礎的検討を行った。以下に本研究の概要を述べる。

第一章では、本研究の背景として、最近の日本沿岸海域における海洋汚濁状況について概説した。また、人工衛星によるリモートセンシングについて概説し、上向き放射輝度スペクトルと汚濁物質濃度との関係を求める方法について述べた。そして沿岸域のような非常に懸濁物質の多い海域では、本研究のように大気-海洋結合系の太陽放射の伝達方程式を解く必要があることを説明した。

第二章では、上向き放射輝度スペクトルと汚濁物質濃度との関係を求めるための、大気-海洋結合系における太陽放射の伝達方程式の解法について述べた。本研究では、放射伝達方程式の解法として不変埋蔵法を用い、大気-海洋結合系における放射伝達計算モデルを開発した。このモデルでは大気ならびに海洋をいくつかの層に分け、その各層ごとに放射特性を表す散乱関数と透過関数を与える。この散乱関数と透過関数の算出には、discrete ordinate methodと呼ばれる解法を用いた。この際、各層に存在している粒子の散乱光の角度分布関数が必要となるが、プランクトンなど海洋中の粒子は非常に強い前方散乱特性を持つため、 δ 関数近似を適用した。また、海面においては海水の屈折の効果のため放射が大気から海中に入射すると立体角は減少し、単位立体角で表されている放射輝度は増加する。逆に海中から大気中に射出するときは、立体角は増加し放射輝度は減少する。この屈折の効果も放射伝達モデルに組み込んだ。

第三章では、放射伝達計算で必要となる海洋の光学モデルについて述べた。海洋中の懸濁物質として、植物プランクトンやその遺骸であるデトリタス、サブミクロン粒子（粒径 $1\ \mu\text{m}$ 以下の粒子群）および無機粒子を考慮した。植物プランクトンとして、沿岸域の汎布種である *Skeletonema costatum* と赤潮の原因種である *Heterosigma akashiwo* を対象とし、光学的特性を測定するために国立環境研究所からそれらの菌株を入手し培養した。また過去の研究でプランクトンの死骸であるデトリタスも海洋中での放射伝達過程に重要な役割を果たしていることがわかっていることから、プランクトンとデトリタスの双方について以下の測定を行った。放射計算で必要となる散乱光の角度分布関数や、粒子の散乱性を示す単一散乱アルベドを算出するためには、粒子の複素屈折率が与えられなければならない。この複素屈折率のうち、吸収の強さに関係する虚数部についてはヘッドオンフォトマルチプライアーを装着した分光光度計を用いて測定した。一方、散乱の強さに関係する実数部については、鉱物学における浸液法を応用し測定した。以上の測定値を基に、Mie散乱理論を用いて放射計算に必要な光学的特性（散乱光の角度分布関数及び単一散乱アルベド）を算出した。なお、サブミクロン粒子についてはバクテリアや様々な生物の分解産物であるとし、また無機粒子は土壌粒子であるとして、文献を基にそれらの粒子の光学的特性を与えた。

第四章では、第三章で得られた光学モデルをもとに、清浄な外洋域や赤潮発生海域、赤土流出海域などさまざまな海域を対象として、太陽放射の伝達計算を行った。その結果、プランクトン自身は散乱過程にほとんど寄与せず、海洋中の散乱過程、特に後方散乱過程に対して、プランクトンの低濃度時にはサブミクロン粒子や鉱物粒子が、プランクトンの高濃度時にはデトリタスやサブミクロン粒子が、大きく寄与していることがわかった。一方、吸収過程に関しては、プランクトンの低濃度時は、波長 $0.4\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 付近の可視光短波長領域で鉱物粒子と黄色物質による寄与が大きく、また波長 $0.6\ \mu\text{m}$ 以上の波長領域では水分子による吸収の寄与が大きいことがわかった。次に実際の海色が再現されているかどうかを検証するために、計算された放射輝度スペクトルから CIE1931rgb 表色系を参考にして海色の色彩を合成した。まず、プランクトン濃度の非常に低い外洋域での計算結果から、黒潮のような暗く青い色が再現された。次にプランクトン濃度を増加させ各パラメータを変化させたところ、徐々に海色に変化し、赤潮発生域では茶褐色の赤潮の色が、赤土流出海域では赤黒い海色が再現された。赤潮発生海域では、赤潮プランクトンの対数増殖期、定常期、死滅期によってデトリタスのプランクトンに対する存在量が変わると考え、存在割合を変化させた。その結果、プランクトン濃度の変化だけでなく、デトリタスやサブミクロン粒子、そして鉱物粒子などの他の物質の存在量が海色に大きく寄与しており、海色からプランクトン濃度を推定するためには、海洋中の上記の物質の光学的特性や平均的な存在量をより高精度で決定する必要があることが示唆された。

第五章では、人工衛星を用いたリモートセンシングによる赤潮プランクトン濃度の推定の可能性を検討した。衛星及びセンサとしては、地表での解像度やセンサのスペクトル特性、入手や検索の容易さ等から、Landsat衛星のTMを選択した。また赤潮が記録されている画像について、1つは、水産庁が発行している赤潮による漁業被害状況を基に、赤潮発生日時に発生海域を記録した画像を検索し、もう一つは、リモートセンシング技術センターに保管されている全てのサンプルデータから目視により検索した。その結果、植物性赤潮プランクトンである *Gymnodinium mikimotoi* による赤潮画像を入手することができ、解析を行った。ただし本研究では、*Gymnodinium mikimotoi* の光学的特性を測定していない。そこで比較的似た光学的特性を持つ *Heterosigma akashiwo* の測定結果を適用し、その結果、赤潮プランクトンの濃度分布を推定することができた。

なお今後打ち上げられる予定のADEOS-IIのGLIセンサは、バンド幅が狭く、またバンド数が多いため、沿岸海域汚濁のより高精度な海色探査が可能になることも示した。

以上、本研究により、海洋中の様々な物質の濃度および光学特性値を基に、大気-海洋結合系の太陽放射の伝達方程式を解くことにより、海色（海面からの放射輝度スペクトル）を算出することができ、その結果、海色のリモートセンシングから汚濁物質濃度を推定できる可能性が示された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 太 田 幸 雄
副 査 教 授 清 水 達 雄
副 査 教 授 田 中 信 寿
副 査 助 教 授 村 尾 直 人

学 位 論 文 題 名

沿岸汚濁海域における海色リモート センシングに関する基礎的研究

近年、人間活動の活発化に伴い、世界各地で赤潮や青潮、土砂流出など沿岸海域の汚濁が進行している。この沿岸海域の汚濁対策を行なうためにはまず汚濁状況の定量的な把握が必要であるが、船舶等では広範囲にわたる観測に限界があり、人工衛星によるリモートセンシングが期待されている。海中に入射した太陽放射は海水分子と汚濁物質による散乱や吸収を受け、再び海表面から上空へ放射され衛星のセンサーで受光される。それ故、この上向き放射輝度スペクトル（海色）と海中の汚濁物質の種類および濃度との関係を明らかにできれば、海色の測定から海域の汚濁状況の定量的な把握が可能となる。

本論文は、この人工衛星による沿岸海域の海色のリモートセンシングから汚濁物質濃度を算出する手法を開発するための基礎的な検討を行なったものである。本研究では、まず大気-海洋結合系における太陽放射の伝達計算モデルを開発している。このモデルでは大気ならびに海洋をいくつかの層に分け、各層毎に散乱関数と透過関数を与えて放射伝達計算を行っており、この散乱関数と透過関数の計算において、プランクトンなど前方散乱の非常に強い粒子については散乱光の角度分布関数についてデルタ関数近似を行ない、また、海面における放射の屈折の効果も厳密に考慮している。

海洋中の懸濁物質として、植物プランクトン、植物プランクトンの遺骸から形成されるデトリタス、サブミクロン粒子および無機粒子の4種類を考慮し、これらの粒子の光学的特性（粒径分布および複素屈折率）を詳細に検討している。本研究では特に植物プランクトンとして沿岸域の汎布種である *Skeletonema costatum* と赤潮の原因種である *Heterosigma akashiwo* を対象として、それらの菌株を培養し、さらにそれらの死骸をデトリタスと考へて、2種の植物プランクトンとデトリタスの光学的特性を実測している。複素屈折率の虚数部についてはヘッドオンフォトマルチプライヤ法により測定し、一方実数部については鉱物学における浸液法を改良した新たな手法により測定を行なっている。本研究によりデトリタスはその基となるプランクトンの種類によらずほぼ同じ粒径分布および複

素屈折率をもち、海水に対する相対複素屈折率の実数部が1.046であることが初めて明らかとなり、プランクトンと同様にデトリタスは非常に前方散乱性が強いことがわかった。

本論文では、上記の各光学特性値を考慮した実際的な海洋モデルを用いて、大気-海洋結合系における太陽放射の伝達方程式を厳密に解き、実測値と一致する上向き放射輝度スペクトルを得ている。本計算により、海洋中の放射伝達過程において、プランクトンは吸収体として寄与し、一方デトリタスやサブミクロン粒子および無機粒子は散乱過程に大きく寄与していることが明らかとなった。

さらに本論文では、計算された放射輝度スペクトルから、CIE1931RGB表色系色彩理論を用いて海色（海の色）を合成している。その結果、清浄海域では、海水分子の散乱が非常に小さく、かつ波長500nm以上では吸収が強くなるために、暗い青色が再現された。植物プランクトンのみが多い海域では、プランクトン濃度が少ない時には暗い緑色、プランクトン濃度の高い時には赤みがかかった海色が再現された。黄色物質やサブミクロン粒子および無機粒子の多い沿岸海域では、波長440nm付近において黄色物質とプランクトンによる吸収により上向き散乱光が減少し、一方550nm付近の波長域ではサブミクロン粒子と無機粒子による散乱により上向き散乱光が増加するため、緑色の海色となった。赤潮発生海域では、海色はデトリタスの存在割合が50%の場合には暗い赤みの強い赤褐色、100%の時は暗い赤褐色、200%の時は明るい黄土色に変化した。赤土流出海域では、赤褐色の海色が再現された。このように、大気-海洋結合系の放射伝達計算に基づき、現実の海色を初めて再現している。

本論文では、最後に、衛星リモートセンシングによる沿岸海域の汚濁物質濃度の推定の可能性について検討している。まず、ランドサット衛星のTMセンサーの画像データから、赤土流出海域における赤土粒子の濃度推定の可能性を示した。一方赤潮プランクトンの濃度推定に関しては、ランドサットTM画像ではセンサーの感度が低くかつバンド数が不足していることから、デトリタスの濃度を仮定しなければ赤潮プランクトン濃度を推定できないこと、しかし2000年に打ち上げ予定のADEOS-IIのGLIセンサーのように、感度が高くかつ可視・近赤外領域に数多くのバンドを持つセンサーを用いれば、デトリタス濃度に依らず赤潮プランクトン濃度を推定できる可能性があることを示している。

これを要するに、著者は、植物プランクトンおよびこれまで不明であったデトリタスの光学的特性を実測により明らかにし、大気-海洋系の放射伝達過程を厳密に考慮して放射輝度スペクトルを算出し、さらに色彩理論を適用することにより、様々な海域における海色の再現に初めて成功した。それらの結果を基に、人工衛星の海色リモートセンシングによる沿岸海域の汚濁物質の濃度推定の可能性を示しており、海洋環境工学および大気環境工学の発展に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。