

論文の内容の要旨

論文題目 海色リモートセンシングによる
沿岸環境モニタリング手法の開発
(Development of Ocean Color Remote Sensing Methods
for Coastal Environment Monitoring)

氏 名 比嘉 紘士

1 序論

閉鎖性水域である東京湾では、富栄養化が進んでおり未だ改善の兆しが見られない。これまでに水質総量規制や干潟再生等、水質改善に向けた様々な取り組みが行われており、25年前と現在を比較すると約半分近くのCODが削減されているものの、現在でも赤潮、青潮は多発しているのが現状である。赤潮が発生すると、大量の有機物が海底に沈降・分解され、無生物化を引き起こす貧酸素水塊の形成要因となる。さらに酸素消費が進行した場合には、無酸素水状態となり、北風の連吹などの外力により底層から無酸素水塊が湧昇することで青潮の発生に繋がる。青潮はアサリや稚魚の斃死を引き起こし、大規模な場合には漁業被害に繋がるため重大な環境問題の1つとして認識されている。そのため、赤潮や青潮といった環境問題に対して、環境影響への評価、改善策を検討するため、植物プランクトンの増加や貧酸素水塊の状態について限られた地点においては十分にモニタリングされ、その変動メカニズムや消長要因に関する考察が進んでいる。しかしながら、赤潮や青潮の空間的な広がりに関する知見は乏しく、それにともない空間的な変動要因や変動パターンに関して未解明な部分が多い。

このことから、水環境の状態を水平スケールとして定量的に評価することや赤潮や青潮の空間的挙動を明らかにするためには、時空間的観測に優れた人工衛星によるリモートセンシングの技術が有効であると考えられる。しかしながら沿岸域におけるリモートセンシングは、海中に混在する様々な物質によって海色が著しく変化することから、その光環境の特性は非常に複雑であり未知の部分が多く、物理量推定技術の開発が難航しているのが現状である。加えて、様々な沿岸域において人工衛星リモートセンシングの技術を一般化し適用することは非常に困難である。一方、東京湾は著しい富栄養化のため水質の変動幅が大きいといった特徴がある。そのため、東京湾に適したリモートセンシングのための物理量推定モデルが開発されると、他の富栄養化水域にも適用できる可能性が高いと考えられる。

そこで本研究では、東京湾における複雑な光環境特性を詳細に解明した上で、海色リモートセンシングのためのChlorophyll-a (Chl-a)、有色溶存有機態 (Color dissolved organic matter: CDOM)、デトリタスの光吸収係数の物理量推定モデル及び青潮分布推定モデルを開発する。また開発した手法を応用することで、湾内の赤潮、青潮の空間的挙動や分布の形成パターンについて明らかにすることを目的とした。

2 現地観測に基づく富栄養化水域の光環境特性の解明

本研究では、東京湾における光環境を解明するため2010年6月～2013年の9月の間、約月に1度の頻度で現地観測を実施した。観測地点では、分光放射計 (TriOS Optical Sensors : RAMSES ACC/ARC) を使用して見かけの光学特性 (Apparent Optical Properties : AOP) である海面射出輝度、海面直上の下向き分光放射照度を測定し、その比であるリモートセンシング反射率 (R_{rs}) を導出した。また、Hydroscat-6P を使用して固有光学特性 (Inherent Optical Properties : IOP) である後方散乱係数を測定し、さらに表層の海水を採水して持ち帰り、分光光度計 (日本分光 : V-550) を用いて植物プランクトン (a_{ph})、CDOM (a_{CDOM})、デトリタス (a_d) の光吸収係数を測定した。さらに、蛍光光度計 (Turner Design, 10-AU) にてChl-aを測定し、電子天秤による重量測定によって全浮遊懸濁物質 (Total suspended solids : TSS)、有機態浮遊懸濁物質 (Organic suspended solids : OSS)、無機態浮遊懸濁物質 (Inorganic suspended solids : ISS) を測定した。

はじめに水環境の特性を知るために、実測のChl-aとTSS、OSS、ISSとの関係を調べた。その結果、降雨時には河口域でISSが上昇していたものの、主にはTSSとChl-aとの間に良好な関係が認められ、基本的に東京湾は有機物が卓越している海域であることを示した。通常、有機物は光を多く吸収する特性があることから、全光吸収係数の逆数を取った場合におけるスペクトルと R_{rs} のスペクトルの形状について両者で比較したところ類似していたことが分かった。これは東京湾の光環境は概ね光吸収で説明可能であることを示している。さらに、青潮や出水等のイベントが発生していない場合、 a_{ph} と a_d はChl-aと良好な関係があり、また a_{CDOM} は塩分と良好な関係が認められた。このような水域の特性を利用して、線形の関係によってBio-optical modelを構築し赤潮の光学特性の解明を行った。その結果、Chl-aが増加するにつれて全光吸収係数の逆数のスペクトルは565nmから589nmへピークシフトが起こることが分かり、これは諫早湾の赤潮と同様な光学特性であったことが確認された。このピークシフトの原因について実測の光吸収係数を用いて考察した結果、 a_{ph} と a_d の上昇が大きく寄与していたことが明らかになった。加えて、特殊な海色変動を示す青潮の光学特性についても検討を行った結果、青潮は表層において後方散乱が著しく上昇し、その影響によって570nm付近を極大値として R_{rs} が大きく上昇していたことが明らかになった。

3 現地観測結果に基づく海色リモートセンシングのための物理量推定手法の提案

(1) Chl-a 推定手法の開発

現地観測結果から導出した R_{rs} を使用して従来のChl-a推定モデルの検証及びChl-a推定のための最適波長の探索を行った。その結果、700～730nm付近の波長帯及び670nm付近の波長の R_{rs} を組み合わせたモデルがChl-aを最も精度良く推定できることが分かった。これは a_{CDOM} 、 a_d の影響が大きい可視域の波長帯を使用せず、近赤外域の波長帯を用いて赤色域側の散乱をキャンセルし a_{ph} の特性を強調することが可能なためと考えられる。また、既往の研究における霞ヶ浦、チェサピーク湾のChl-a推定結果、光学特性の結果と照らし合わせることで、近赤外、赤色域の波長帯を用いたChl-a推定が沿岸、湖沼等の富栄養化水域において有効である可能性を示した。しかし、700nm付近のバンドを搭載したセンサーを持つ現状使用可能な人工衛星は存在しない。そこで、現行の人工衛星を使用したChl-a推定を行うため、クロロ

フィル蛍光の増減を利用した FLH (Fluorescence Line Height) を適用し検討した結果、東京湾の Chl-a 推定に有効である可能性があることが分かった。

(2) CDOM 推定手法の開発

Kutser らの CDOM 推定モデルを参考に青域と近赤外域のバンドに基づいた東京湾に適した CDOM 推定モデルを提案した。

(3) a_{ph} , a_d の推定手法の開発

QAA (quasi-analytical algorithm) を用いて IOP 推定の検証を行った。その結果、東京湾では主に年間を通して珪藻類が優占しているが、種の変遷があったときに植物プランクトンの光吸収効率が変化し推定誤差が生じていた。また、Chl-a が高濃度の場合に植物プランクトンの光吸収効率が低下したときにおいても、推定誤差が生じることが分かった。加えて、QAA の IOP 推定プロセスで使用される全光吸収係数 ζ , ξ 推定の経験式を改良することによって a_{ph} , CDOM+デトリタスの光吸収係数 (a_d) の推定精度を向上させることができた。さらに、 a_g の推定値と a_{CDOM} の推定値を使用して a_d の推定手法を提案した。

(4) 青潮分布推定手法の開発

2章で明らかにした青潮の光学特性に基づいて、最も反射率が高くなる 550nm 付近のバンドをベースとした青潮分布推定モデルを開発した。

4 物理量推定モデルの人工衛星画像への適用

第3章において現地観測結果に基づいて開発した物理量推定モデルを実際に衛星画像に適用し、精度の検証を行った。はじめに、Chl-a を推定するために FLH 手法を衛星画像に適用した結果、植物プランクトンの活性度の変化や大気の影響により、衛星画像取得日ごとに相対的には Chl-a と FLH は指数関数的な関係を持つが、濃度を絶対値として推定することは困難であった。それを解決するため、ポイント的な連続モニタリングにより得られた実測の Chl-a を逐次同期することで絶対値としても概ね良好に Chl-a を推定することが可能になった。

また CDOM 推定モデルを衛星画像に適用した場合、443nm より短波長のバンドでは大気の影響が正常に補正されず CDOM 推定に誤差が生じていた。そこで 488nm のバンドを代用することで大気補正による誤差の影響を避けることが可能となり、CDOM を推定できることが分かった。さらに DO と a_d の実測値を使用して、CDOM による湧昇域推定と改良した QAA による a_d 推定の可能性について示した。加えて、静止海色衛星 COMS/GOCI の衛星画像に青潮分布推定モデルを適用することで、青潮の空間分布を推定することが可能となった。

この章において沿岸環境モニタリングを行うために開発した物理量推定モデルの実用性について検証し、Chl-a, CDOM, デトリタス、水温の空間分布を明らかにすることが可能となった (図-1: 例として 2010 年 7 月 28 日の結果)。また、青潮発生時には CDOM, 青潮分布推定モデルを使用することで、湧昇域及び青潮分布を推定することが可能となった (図-2: 例として 2012 年 9 月 24 日の結果)。

5 海色リモートセンシングによる赤潮・青潮の空間的変動特性の把握

(1) 青潮分布と湧昇域の検証及び空間的変動に関する考察

2012年9月に発生した大規模な青潮を対象に風況、DO、流況の観測結果及び3次元流動・生態系モデルにより計算したDOの結果から推定した湧昇域の整合性について検証した。その結果、湧昇が起きた期間は現地観測結果と一致し、数値モデルによる貧酸素水塊の分布と推定された湧昇域の分布は概ね一致していたことが示された。さらに、推定した青潮分布の拡がりや数値シミュレーションの情報を相互的に補完することで浦安沖浚渫地内の硫化物を含む水塊の湧昇が青潮の分布形成に寄与していた可能性があることが明らかになった。

(2) 夏季及び冬季における赤潮分布の空間的変動に関する考察

Chl-a, CDOM, デトリタス、水温の空間分布の変動とChl-a、水温、塩分等の連続モニタリングの結果及び風況、日射、降雨等の気象の結果を用いて、2010年、2011年の夏季と冬季を対象に赤潮分布の形成過程、赤潮の発生要因について検討した。その結果、夏季のChl-a分布は出水 + 南南東の連吹パターン、出水パターン、南風系の連吹パターンに分類され、冬季は日射の継続 + 北風系の連吹パターン、長期間の日射の継続 + 北風系の連吹パターン、出水 + 北風系の連吹パターンに分類することができた。また夏季と冬季の共通のパターンとして外洋水流入時におけるChl-a分布の形成パターンが見られた。夏季では、Chl-a分布パターンの形成要因として出水、南風の連吹時間の変化が重要な役割を果たし、主に風の連吹によって荒川、隅田川河口付近から北岸、東岸に沿って拡大し、湾内全体を覆うように分布が拡大していたことが分かった。またChl-aの濃度は主に日射と北風によって増減していた。

冬季においては北よりの風が支配的となっており、北岸と東岸沿いにおいて頻りに湧昇域が確認された。このとき湾内の沿岸水は西方向へ輸送され、沿岸水が滞留する西岸の河口域付近からChl-aが増加していたことが分かった。またChl-aは陸域付近の水深の浅い箇所から徐々に増加しており、これは混合層と有光層の大きさの兼ね合いが重要であったことが示唆された。さらに、出水パターンとして、冬季において湾内の高濃度のChl-aが河川からの出水直後に希釈されることによって低濃度になっていたことが確認された。これは冬季ブルームの発生は長期間の安定的な日射が重要であるが、その間に外洋水の流入や出水などのイベントが起こったことにより赤潮が緩和されていたと考えられる。

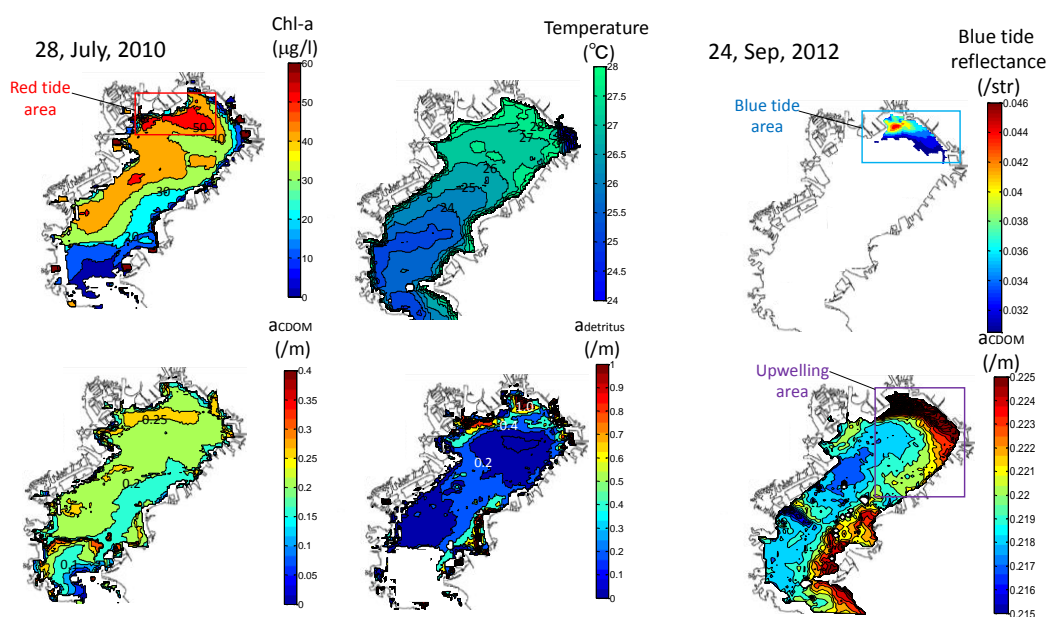


図-1 2010年7月28日のChl-a、aCDOM、水温、 a_d の空間分布

図-2 2012年9月24日の青潮分布及び湧昇域