有色溶存有機物の光学特性を利用した 静止海色衛星による東京湾の塩分分布推定 に関する検討

比嘉 紘士¹・福田 智弘²・宮下 寿哉³・中村 由行⁴・鈴木 崇之⁵

¹正会員 横浜国立大学助教 大学院都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5) E-mail:higa-h@ynu.ac.jp

²非会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府

³学生会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府

²正会員 横浜国立大学教授 大学院都市イノベーション研究院

³正会員 横浜国立大学准教授 大学院都市イノベーション研究院

東京湾において静止海色衛星を用いた有色溶存有機物の光学特性 (a_{CDOM}) に基づく塩分分布推定を行うため、現地観測による光学観測の結果から a_{CDOM} 推定モデルを作成し、Bio-opticalモデルによる a_{CDOM} 推定適用範囲の検討を行った。その結果、 a_{CDOM} 推定は粒子態の吸収係数の変化によって誤差が生じるものの、衛星画像へ推定モデル適用後において相対的に塩分を推定可能であることが分かった。さらに、衛星画像から推定された塩分分布の結果から、江戸川河口付近の低塩分水塊が船橋から浦安沖付近にかけて広がる様子や、河川流量の増加時に荒川・隅田川・多摩川河口域から川崎沖にかけて低塩分水塊が広がり、徐々に湾内の海水と混合していく過程が確認できた。

Key Words : CDOM, Remote sensing, Bio-optical model, GOCI, Salinity, Tokyo Bay

1. はじめに

塩分は、海洋の流動や生態系を決定する主要な環境指標の一つである。特に沿岸域においては、海洋へ流れ込む河川水が、密度流等の流れ場の形成や生物生産が高い汽水域の形成に寄与するなど、沿岸域の環境形成に大きな役割を果たす。一方で、都市部に近い閉鎖的な内湾では、河川を経由した栄養塩の流入が、湾内の物質循環のバランスの変化に影響し、貧栄養化による漁獲量の低下や富栄養化による赤潮の発生の一要因となっている。また、淡水流入による密度成層の強化は、春季から夏季における湾内の鉛直混合を抑制し、底層での貧酸素・無酸素状態の継続時間を助長させるなど、内湾へ流入する河川水は、主要な環境問題とも密接に関連する。

そのため、行政や研究機関は、沿岸域における適切な物質循環のバランスや水環境の維持と管理を目的として、船舶調査や係留系の設置により継続的に環境モニタリングを実施しており、特に塩分は主要な環境指標として常時モニタリングされている。

しかしながら内湾の塩分は、短期スケールで著しく変動するため、その挙動を船舶調査や係留系のポイント的な観測のみで捉えるには限界があり、また、現地観測を

伴う環境モニタリングは、労力とコストが大きくなってしまうため、将来的にも高頻度且つ継続的なモニタリングの機会を増やしていくことは難しいと考えられる。

そこで、低労力且つ低コストで環境モニタリングを実現する人工衛星リモートセンシングが有効と考えられる。近年の人工衛星の発展は著しく、衛星データの空間分解能と観測頻度は飛躍的に向上し続けているだけでなく、沿岸域における水質推定法の検討も進んでおり、今後の現地での環境調査と組み合わせた利用が期待される。

衛星データを利用した塩分モニタリングについては、有色溶存有機物 (Color Dissolved Organic Matter : CDOM) の光学特性を利用した塩分推定法が提案されている。CDOMはフミン酸やフルボ酸などの腐食性物質であり、沿岸域では主に陸域起源や有機物の分解過程で生成されるものが存在するが、難分解性で保存的に挙動するため、水域によっては塩分と高い負の相関関係があることが報告されている^{1,2)}。またCDOMは、短波長の光を吸収する光学特性があり、人工衛星の海色センサーによりCDOMの光吸収係数 (a_{CDOM}) を適切に捉えることが可能となれば、 a_{CDOM} 推定値から塩分に換算することができる³⁾。

しかしながら、沿岸の水中には様々な物質が混在しており、光環境が複雑に変動するため、水域ごとの光学特

そこで本研究では、我が国を代表する富栄養化水域の1つである東京湾を対象として、**acorn**推定モデルを作成し、その適用範囲について明らかにする。また、静止海色衛星を利用し、**acorn**推定に基づいた塩分の空間分布推定を実施し、湾内へ流入する河川水の空間的な挙動について明らかにすることを目的とした。

図-2 塩分と $a_{CDOM}(440)$ との関係

図-3 $a_{CDOM}(440)$ と $R_{rs}(660)/R_{rs}(490)$ との関係

表しており、 $a^*_{ph}(\lambda)$ 、 $a^*_d(\lambda)$ 、 $a^*_{CDOM}(\lambda)$ は各々植物プランクトン、デトリタス、CDOMの単位濃度当たりの吸収係数（比光吸収係数）である。Bio-opticalモデルでは、各比光吸収係数は水域の特性を表すパラメータとなり、東京湾では $a^*_{CDOM}(440)$ は1.0 (1/m)、また、 $a^*_d(440)$ は0.0348 (1/m)、 S_d 、 S_{CDOM} は0.0090と0.0155といった41サンプルの平均値を与えた。さらに、後方散乱係数 $b_b(\lambda)$ は、純水 (b_{bw})、植物プランクトン (b_{ph})、デトリタス (b_{td}) の後方散乱に分離され、以下のように表される。

$$b_b(\lambda) = b_{b,w}(\lambda) + b_{b,ph}(\lambda) + b_{b,d}(\lambda) \quad (8)$$

b_{ph} と b_{td} を足し合わせた粒子の後方散乱係数 b_{bp} のスペクトルは、550nmの波長を基準として以下の式で計算される⁹⁾。

$$b_{b,p}(\lambda) = b_{b,p}(550) \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-n} \quad (9)$$

本研究では、後方散乱計Hydroscat-6pによって測定された6チャンネル (420 nm, 442 nm, 488 nm, 510 nm, 550 nm, 676 nm) の b_{bp} の実測値を用いて、回帰分析により $b_{bp}(550)$ (0.0214 (1/m))、スペクトル勾配 n (1.258) を導出した。 $b_{ph}(\lambda)$ と $b_{td}(\lambda)$ の分離方法として、 $b_{bp}(\lambda)$ に対する寄与がそれらの濃度に比例する関係を利用し、浮遊懸濁物質中の植物プランクトン (PSS) を算出し、デトリタス濃度は、TSSからPSSを差し引くことにより算出した⁷⁾。さらに、 R_{rs} の再現においてクロロフィル蛍光の影響を考慮するため、Gilerson et al.⁸⁾によって提案されたクロロフィル蛍光モデルを組み合わせ、 R_{rs} の計算を実施した。

(4) 静止海上衛星COMS/GOCIの衛星画像の解析

COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite) /GOCI (Geostationary Ocean Color imager) は、2010年6月に韓国により打ち上げられた世界発の海上色センサーを搭載し

た静止衛星である。このセンサーは日本列島を網羅した2500 km四方を、約500 mの解像度で1時間間隔で観測しており、海洋観測衛星としては高い時空間分解能が特徴である。搭載バンドは、412 nm, 443 nm, 490 nm, 555 nm, 660 nm, 680 nm, 745 nm, 865 nmであり、植物プランクトン、CDOM、濁度、クロロフィル蛍光強度、エアロゾル量の計算に適したバンドを有している⁹⁾。GOCI画像の大気補正はLinux 64bitのSeaDAS Version7.3.2を使用し、MUMM大気補正を実施した。

3. 結果と考察

(1) 人工衛星の海上色センサーによる塩分の推定

既往の研究における塩分と $a_{CDOM}(440)$ との関係では、塩分の実測値を海面直下から採水深度より下方向からの深度までの塩分を鉛直的に平均することで取り扱われており、文献によって平均化する深度は異なる²⁾。本研究では、0.1m間隔で鉛直的に塩分を測定しており、1mおきに平均化した塩分と $a_{CDOM}(440)$ との関係を調べた結果、0.1mから1mの平均値のときに最も高い相関関係を示したため、1m平均の塩分値を使用した。その結果を図-2に示す。両者の間には、決定係数 $R^2=0.788$ と高い相関関係が認められ、このことから東京湾におけるCDOMは河川起源のものが支配的であることが分かる。そのため、人工衛星の海上色センサーを用いて $a_{CDOM}(440)$ を推定することが可能となれば、図-2の関係によって塩分を推定可能である。そこで東京湾における $a_{CDOM}(440)$ 推定モデルを検討するため、Keith et al.²⁾に従い660 nmと490 nmにおける R_{rs} の実測値の比と $a_{CDOM}(440)$ の実測値との関係を図-3に示す。両者には概ね正の相関関係が認められるものの、ばらつきが大きいことが分かる。カラーバーは各プロットの490nmにおける a_p の実測値を表しており、 $a_p(490)$ が高いときに $R_{rs}(660)/R_{rs}(490)$ による $a_{CDOM}(440)$ の推定結果は過小評価となり、ばらつきが大きくなっていた。 $a_p(490)$ とChl-aとの関係によると、 $a_p(490)$ が1の場合においてChl-aはおおよそ50~60 $\mu g/l$ の赤潮状態となる。そこで、図-3から $a_p(490)$ が1以上のプロットを除去した場合、決定係数 R^2 は、0.349から0.746と上昇するため、 $a_p(490)$ の増加が推定精度に大きく影響することが分かった。これは、水中の植物プランクトン、デトリタスの粒子が増加することにより、式(2)の導出時に仮定する $a_{w1} + a_{p1} \approx a_{w1}$ 及び $a^*_{CDOM2} \gg a_{p2}$ の仮定が成り立たなくなることが原因と考えられる。つまり、 $R_{rs}(660)/R_{rs}(490)$ に基づく a_{CDOM} 推定モデルには、水質の状態によって適用可能な範囲が存在し、水中にある一定以上の粒子量が存在したとき推定誤差が生じると示唆される。次節では、構築したBio-opticalモデルを用いて a_{CDOM} 推定の適用範囲について検討する。

図-4 Bio-opticalモデルによる R_{rs} の再現結果

表-1 既往の研究による a_{CDOM} 推定モデル

Model	Equation form	Coefficients
This study	$a_{CDOM}(440) = a1(R_{rs}(660)/R_{rs}(490)) + a2$	1.055, -0.363
D'Sa et al., (2003)	$\log(a_{CDOM}(412)) = a1 \log(R_{rs}(443)/R_{rs}(510)) + a2$	-0.874, -2.025
Kutser et al., (2005)	$a_{CDOM}(420) = a1(R_{rs}(555)/R_{rs}(660))^{a2}$	5.13, -2.67
Brezonik et al., (2005)	$\ln(a_{CDOM}(440)) = a1(TM1/TM4) + a2(TM1) + a3$	-0.657, -0.3528, 23.65
Meken et al., (2006)	$a_{CDOM}(440) = a1(R_{rs}(670)/R_{rs}(571))^{a2}$	174.9, 3.372
Mannino et al., (2008)	$a_{CDOM}(443) = \ln((R_{rs}(490)/R_{rs}(551) - a1)/a2)/(-a3)$	0.4247, 2.453, 13.586
Ficek et al., (2011)	$a_{CDOM}(440) = a1(R_{rs}(570)/R_{rs}(655))^{a2}$	3.65, -1.93
Brezonik et al., (2015)	$\ln(a_{CDOM}(440)) = a1 \ln(OLI3/OLI4) + a2 \text{ Landsat 8}$	-1.507, 1.582

図-5 Bio-opticalモデルによる a_{CDOM} 推定範囲

(2) $a_{CDOM}(440)$ 推定の適用範囲の検討

式(3)～(9)により構築したBio-opticalモデルを使用し、東京湾の R_{rs} を計算した。Chl-aとTSSの異なる4ケースにおける R_{rs} の計算値と実測値との比較を図-4に示す。その結果、全てのケースにおいて R_{rs} がよく再現されていることが分かる。そこで構築したBio-opticalモデルを用いて表-1に示す本研究及び既往研究の a_{CDOM} 推定モデルに対し、Chl-aを0から100 $\mu\text{g/l}$ まで変化させたときの、 $a_{CDOM}(440)$ の0から1.2/mまでのinput値と推定値とのRMSEの変化を計算する¹⁰⁾。本研究における現地観測結果から、Chl-aと $a_{CDOM}(440)$ は、それぞれ0.76から97.3 $\mu\text{g/l}$ 、0.08から1.08 (/m)の範囲で変化していたことを考慮しinputの計算範囲を決定した。

図-5にデトリタスが5.0mg/l、10.0mg/lの2ケースにおける結果を示す。Detritus=5.0 mg/lのケースでは、Chl-aが0から8 $\mu\text{g/l}$ まではKutserの a_{CDOM} 推定モデルが有効であるものの、さらにChl-aが高くなった状態では、東京湾の a_{CDOM} 推定モデルが

Chl-aの濃度変化に対して幅広く有効であった。Detritus=10.0mg/lのケースでは、Chl-aが低濃度の場合においてもKutserのモデルより、東京湾のモデルの方が有効であるが、Chl-aが15 $\mu\text{g/l}$ 以上になった場合には、DSaのモデルが安定的に a_{CDOM} を推定可能であった。また、Detritusの濃度をさらに上昇させた場合においても、 a_{CDOM} 推定誤差への影響は小さかったことが分かった。

このことから、東京湾の a_{CDOM} 推定にはChl-a増加に伴う a_p の上昇が主要な誤差の要因になり、Chl-aが10 $\mu\text{g/l}$ 以下においては $R_{rs}(660)/R_{rs}(490)$ のモデルが有効であるが、よりChl-aの濃度が上昇した場合には、 a_p 変動の影響を受けにくい適切な a_{CDOM} 推定モデルの選択が必要であることが分かった。

(3) 塩分推定モデルの静止海色衛星画像への適用

東京湾水質連続観測が行われている4つのモニタリングポスト（浦安沖、千葉波浪観測塔、千葉港口第一号灯標、川崎人工島）においてChl-aが10 $\mu\text{g/l}$ 以下であったときの2012年10月19日から2012年10月24日に取得されたGOCI画像に対し大気補正を施し、東京湾の a_{CDOM} 推定モデル及び塩分換算のための回帰式を適用した（図-6）。結果に示す通り、荒川・隅田川河口及域び、江戸川河口域において相対的に低塩分化していたことが分かる。モニタリングポストの塩分の実測値とGOCI画像の塩分の推定値との関係を図-7に示す。塩分の推定値は、実測値と比較して過大評価しており、これは、 $a_p(490)$ の変動により推定式の切片が一定値を保てていなかったことが原因と考えられる。現状としては、相対的には塩分の空間分布を表すことが可能となっており、今後は $a_p(490)$ の変動を補正するモデルの提案が課題となる。本研究では、塩分分布を相対的に推定できていることを利用し、次節にて低塩分水塊の空間的な拡がり方に着目する。

(4) 河川流量増加時における塩分分布の変動

図-6のGOCI画像が取得されたときの気象と水質状況を把握するため、図-8に2012年10月18日から2012年10月24日における東京管区気象台の降雨、東京都中央区晴海の潮位、鈴木ら¹¹⁾に従い算出した江戸川、荒川、多摩川の河川流量、浦安沖、千葉波浪観測塔、千葉港口第一号灯標、川崎人工島における表層塩分、表層Chl-aの時系列結果を示す。18日19:00から19日6:00にかけて平均2.15 mm/h、最大7.0 mm/hの降雨があり、この影響によって18日12:00から江戸川の河川流量が増加し始め、少し遅れて19日10:00から荒川・多摩川の河川流量が19日19:00をピークとして増加していた。このとき表層塩分は、千葉波浪観測塔、千葉港口第一号灯標においては塩分の変動が小さく、低塩分水塊がこの2地点までは及んでいなかったことが分かる。浦安沖の表層塩分は、およそ29から31の間で変動を繰り返す。流入した河川水の影響を受けており、一方、川崎

図-6 2012年10月19日、21日、24日のGOCI画像による塩分の空間分布推定結果

図-7 塩分の推定値と実測値との関係

人工島では、図-8中青枠内において表層塩分が21日21:00から徐々に低下し始め、20日から21日の間で平均29.4で推移し、20日4:00、21日5:00にそれぞれ25.9、24.7と低下のピークが見られた。期間中の表層Chl-aは4つのモニタリングポストで殆ど同様な傾向で変化しており、常に10 $\mu\text{g/l}$ 以下の濃度を維持していた。

図-6の10月19日10:30の塩分分布に着目すると、主に江戸川の河口付近から浦安沖まで低塩分水塊が広がっており、また河川流量の増加直後であったため、荒川・墨田川・多摩川河口域においては低塩分水塊の拡がりは小さかった。図-8中期間Aでは、浦安沖と川崎人工島のGOCI画像からの塩分推定値は、相対的には実測値と同様な傾向になっており、浦安沖での塩分低下を捉えていた。

図-8中青枠内の川崎人工島での塩分の低下中、10月21日の図中矢印においては、塩分が上昇していたことが確認できる。このとき図-6の10月21日9:30~13:30(期間B)までの塩分分布は、荒川・隅田川河口から川崎沖におか

図-8 2012年10月18~24日の降雨、流量、潮位、4地点モニタリングポストの表層塩分、Chl-aの時系列結果

図-9 図-6中測線における塩分分布

て低塩分の水塊が広がっており、時間の経過とともに徐々に低塩分水塊が湾内海水と混合する過程が確認できる。また、図-8中青枠内の著しい塩分低下が潮位と対応していたことを考慮すると、河川流量増加時の低塩分水塊分布の挙動は、潮位の変動と対応し、拡大・縮小を繰り返しながら海水と混合していたと示唆される。

さらに、図-8の10月24日14:30(期間C)では、10月24日2:00に江戸川の流量が増加していたものの、その増加期間と最大値(24.1 m^3/s)は小さかった。そのため、図-6中の10月24日14:30の低塩分水塊の分布は、江戸川、荒川河口で局所的に拡がり、多摩川河口付近までは及んおらず、期間Cの江戸川流量の増加が低塩分水塊の分布拡大に及ぼした影響は小さかったと考えられる。

図-9に湾奥部の測線(図-6中点線)における塩分分布を示す。湾奥部中央付近である緯度139.9~139.95(図中青枠)の塩分に着目すると、低塩分水塊が湾奥部へ拡がる前の10月19日を基準として、10月21日にかけて塩分が大きく低下していたことが確認できる。また、青枠内において10月21日9:30以降からは塩分が増加しており、低塩分水塊が湾内の海水と徐々に混合していたことが分かる。9月24日には緯度139.97を境として塩分が大きく変化しており、低塩分水塊は湾内海水との混合が進んでおらず、湾内へ流入した直後だったと示唆される。

以上のように、 α_{DOM} 推定に基づく塩分推定手法を適用したGOCI画像から、短期スケールにおける湾内塩分の空

間的挙動を把握することが可能となった。

4. まとめ

本研究では、静止衛星の海色センサーを利用した東京湾における塩分分布推定モデルを提案し、衛星画像から低塩分水塊の挙動について考察を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 東京湾では湾内のCDOMが塩分と高い相関関係があり、人工衛星の海色センサーにより a_{CDOM} を推定することで塩分分布を推定可能であることが分かった。
- (2) 固有光学特性の実測値に基づいたBio-opticalモデルを構築し、東京湾における R_s を高精度に再現可能となった。
- (3) 構築したBio-opticalモデルにより a_{CDOM} 推定モデルの適用範囲を検討した結果、Chl-aが0から10 $\mu\text{g/l}$ 以下において a_{CDOM} が0から1.2 (1/m)に対し、RMSEは平均0.21 (1/m)の精度で a_{CDOM} を推定可能であることが分かった。
- (4) GOCI画像に a_{CDOM} 推定モデル及び塩分の換算式を適用した結果、 a_p の変動により絶対値としての塩分推定は困難であるものの、相対的には塩分分布を推定可能であることが分かった。
- (5) GOCI 画像から推定された塩分分布の挙動を考察した結果、江戸川河口付近の低塩分水塊が船橋から浦安沖にかけて広がる様子や、河川流量の増加時に荒川・隅田川・多摩川河口域から川崎沖にかけて低塩分水塊が広がり、徐々に湾内の海水と混合していく過程が確認できた。

謝辞：本研究は宇宙航空研究開発機構（JAXA）による地球環境変動観測ミッション（GCOM）の第6回研究公募の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Bowers, D. G., & Brett, H. L.: The relationship between

CDOM and salinity in estuaries: an analytical and graphical solution. *Journal of Marine systems*, 73(1), 1-7, 2008.

- 2) Keith, D. J., Lunetta, R. S., & Schaeffer, B. A.: Optical Models for Remote Sensing of Colored Dissolved Organic Matter Absorption and Salinity in New England, Middle Atlantic and Gulf Coast Estuaries USA. *Remote Sensing*, 8(4), 283, 2016.
- 3) 岸野元彰, 古谷研, 田口哲, 平澤享, 鈴木光次, 田中昭彦: 海水の光吸収係数の測定. *海の研究*, 10(6), 537-559, 2001.
- 4) Bowers, D. G., Harker, G. E. L., Smith, P. S. D., & Tett, P.: Optical properties of a region of freshwater influence (the Clyde Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50(5), 717-726, 2002.
- 5) Gordon, H.R. and A. Morel: Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery. *Springer-Verlag*, New York, 114 pp, 1983.
- 6) Lee, Z., Carder, K.L., Arnone, R.A.: Deriving Inherent Optical Properties from Water Color: a Multiband Quasi-Analytical Algorithm for Optically Deep Waters. *Applied Optics*. 41, 5755 pp, 2002.
- 7) Oyama, Y., Matsushita, B., Fukushima, T., Matsushige, K., Imai, A.: Application of spectral decomposition algorithm for mapping water quality in a turbid lake (Lake Kasumigaura, Japan) from Landsat TM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 73-85 pp, 2009.
- 8) Gilerson, A., Zhou, J., Hlaing, S., Ioannou, I., Schalles, J., Gross, B., Moshary, F., Ahmed, S.: Fluorescence component in the reflectance spectra from coastal waters. Dependence on water composition. *Optics Express*, 15, 15702-15721 pp, 2007.
- 9) Faure, F., Coste, P., & Kang, G. The GOCI instrument on COMS mission-The first geostationary ocean color imager. *In Proceedings of the International Conference on Space Optics (ICSO)*, Vol. 6, 1-6 pp, 2008.
- 10) Brezonik, P. L., Olmanson, L. G., Finlay, J. C., & Bauer, M. E. (2015). Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 157, 199-215.
- 11) 鈴木高二朗: 東京湾の海水交換と貧酸素化に及ぼす淡水流入と風の影響について, 博士論文, 2013.

(2017.3.15 受付)

ESTIMATION OF SALINITY DISTRIBUTIONS BASED ON THE OPTICAL PROPERTY OF COLOR DISSOLVED ORGANIC MATTER BY THE GEOSTATIONARY OCEAN COLOR SATELLITE IN TOKYO BAY

Hiroto HIGA, Tomohiro FUKUDA, Kazuya MIYASHITA, Yoshiyuki NAKAMURA and Takayuki SUZUKI

In order to estimate salinity distributions based on the optical properties of color dissolved organic matter using the geostationary ocean color satellite in Tokyo Bay, $a_{CDOM}(440)$ estimation model was developed using optical observation data in the field and the estimation application range of the estimated $a_{CDOM}(440)$ was evaluated using the developed bio-optical model for Tokyo Bay. As a result, the $a_{CDOM}(440)$ estimation error increased with increase of light absorption coefficient for particles but it was applicable to estimate salinity relatively after applying the model to GOCI image. Furthermore, the estimated salinity maps showed a situation that low salinity water mass near Edogawa estuarine area spreaded out to Funabashi and Urayasu offshore sides. In addition, when river discharges increased, it was confirmed that low salinity water mass spreaded from the estuarine areas of Arakawa, Sumida and Tama rivers to Kawasaki offshore and it was gradually mixed with high salinity water mass.