

新たな衛星画像解析法に基づく沿岸環境モニタリング技法の 実用化に向けての検討

宮崎 早苗* ・ 灘岡 和夫** ・ 熊野 良子***
二瓶 泰雄****・ 孟 伟*****・ 劉 寧*****

1. はじめに

近年、沿岸環境問題はますます多様化・複雑化しているが、東京湾などの沿岸海域でしばしば観測される赤潮・青潮などの実態や発生・発達過程の詳細は未だ明らかになっていないのが現状である。これらの現象をより詳細に把握するためには、海中に混在する複数物質濃度の時空間分布を把握することが不可欠となる。

このような沿岸環境解析には、広域性・周期性を有する衛星リモートセンシングが有用であり、これまでもリモートセンシングデータを用いて海域を解析する試みが行われてきている。従来の解析法は主として回帰式等に基づく経験依存型であるため、海域や画像によって推定精度がばらつく等の精度のトレーニングデータ依存性が無視できなかった。それに対して近年、光の放射伝達過程を物理的に解析し、海中の物質濃度を合理的に推定する手法に関する研究が進んできている。この中で、Doerffer and Fischer (1994) は、two-flow model および matrix-operator model に基づいた解法により、北海を対象に CZCS データを用いて複数物質濃度の推定を試みている。しかしながら、この解法では、解析対象海域の海中物質濃度の標準状態、および解析対象海域における解析対象画像センサと太陽の位置の平均値を入力データとして、予め様々な環境状況下での衛星到達光を算出する必要があるため、解析対象や使用するセンサが変わるごとに、衛星到達光を算出するための膨大な処理時間が必要となる。

著者ら（宮崎ら, 1996；宮崎・灘岡, 1997）は海域依存性やセンサ依存性のない汎用的かつ合理的な衛星リモートセンシング画像解析手法の確立を目指して four-flux model を用いた光学理論に基づく複数物質混在水域の海中物質濃度推定法を提案しており、いくつかの模擬

画像データを用いてその妥当性の検証をしてきた。しかし、これまでのところ実海域画像データに対しては東京湾の青潮海域における濃度推定のみで一般的な海域への適用例はなく、その意味では実用化レベルには至っていないのが現状である。

本研究ではまず、宮崎・灘岡の新解析法（以下「新解析法」と）と従来の統計的解析手法（以下「従来手法」とよぶ）との差違を明らかにするために、光学理論に基づいて生成した模擬画像データに対して従来手法と新解析法を用いて濃度推定を行い、各々の妥当性を検討した。ここでは、より一般的な海域に新解析法を適用させるために物質の混在ケースを複数設定して比較を行った。さらに、Landsat TM 画像で得られた実海域データに対し新解析法を適用して濃度逆推定を行い、現地観測結果との比較・検討を試みた。また、新解析法の実用化の上で重要となる、非線形最適化手法における推定精度の初期値依存性についても検討を行った。

2. 光学理論に基づく新解析法

新解析法は、海中に存在する物質の光学的特性、およびその濃度の違いに起因する衛星データの輝度値の違いから物質の濃度の推定を行うものであり、海中の放射伝達理論に基づいて定式化されている。以下、この推定法の概要について簡単に説明する。

光の放射伝達現象は一般的に次式で表される（高木・下田, 1991）。

$$dI(\lambda)K(\lambda)\rho dl = -I(\lambda) + S(\lambda) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 λ : 光の波長、 $I(\lambda)$: 分光放射輝度、 $S(\lambda)$: 源泉関数、 $K(\lambda)$: 質量減衰係数、 ρ : 媒質の密度、 l : 媒質中の伝達距離である。一般に式（1）の一般解を求めることは難しいため、ここでは拡散放射理論に基づく four-flux model を用いて定式化する。このモデルで表される放射伝達過程の連立微分方程式を、上向き放射照度 E_u について解き、海面からの放射照度を求める。ここでは、鉛直の濃度分布を一定とする。また水深に比べ光の透過距離が十分短いとし、海底からの反射は考慮しないこととする。これより海面直下の上向き放射照度 E_{u0} は、

* 正会員 NTT データ通信(株) 情報科学研究所
** 正会員 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
*** 学 士 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻
**** 正会員 修(工) 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
***** 中国環境科学研究院

$$E_{y0-} = \frac{(\mu + B_b - K)(E_0 + I_0(P - r_i Q))}{B_b - (\mu + B_b - K)r_i} - QI_0 \cdots (2)$$

$$q = a + s$$

$$K = \sqrt{\mu(\mu + 2B_b)}$$

$$P = \frac{(\mu + a)b_f + (B_b + b_f)s}{q^2 - K^2}$$

$$Q = \frac{(\mu - a)b_b + (B_b - b_b)s}{q^2 - K^2}$$

ただし,

I_0 : 海面直下での太陽直達光の強さ

E_0 : 海面直下での太陽拡散光の強さ

r_i : 海面での海中拡散光の反射率

a : 平行光の吸収係数

s : 平行光の拡散係数

β : 前方散乱確率

η : 平行光束と拡散光束の透過長比

μ : 拡散の吸収係数 ($=\eta a$)

b_f : 平行光の前方散乱係数 ($=\beta s$)

b_b : 平行光の後方散乱係数 ($=(1-\beta)s$)

B_f : 拡散光の前方散乱係数 ($=\eta\beta s$)

B_b : 拡散光の後方散乱係数 ($=\eta(1-\beta)s$)

で表され, 海面での透過率および海面の屈折率などを考慮し, 海面直上の上向き放射輝度 L_{y0+} を求めると,

$$L_{y0+} \doteq 0.15 E_{y0-} \cdots \cdots \cdots (3)$$

となる (Bukata et al., 1995).

次に衛星データから大気や海面での吸収・散乱の影響を取り除き, 海面での上向き放射輝度 $L_{\text{image}+}$ を求める. 新解析法を実海域に適用するにあたっては, 模擬画像データでは問題とならなかった大気補正が必要となってくる. ここでは, 大気シュミレータ MODTRAN 3.5 (米国 Hanscom AFB の Phillips Lab が開発, 配布している大気透過モデル (放射伝達コード)) を用いて大気補正を行っている. そうして, 得られた $L_{\text{image}+}$ と L_{y0+} の波長帯積分値が等しいとして非線形最適化手法により吸収係数および散乱係数に含まれる各物質の濃度パラメータを推定する. なお, あらかじめ海中に存在する各物質の光学的特性を把握することが必要であり, 本研究では既存の研究 (杉森・坂本, 1985; Bukata et al. 1995 など) に基づきそれらを簡単な関数でモデル化した.

3. 模擬画像データに基づく統計的手法と新解析法との基本性能比較

3.1 模擬画像データによる濃度の推定精度比較

比較実験に用いる模擬画像データは, 後述する実画像データの解析に用いる Landsat TM データの可視〜近赤外波長域の 4 バンド (Band 1〜Band 4) を想定して 2. で述べた手法で生成した. まず, 植物プランクトンのみ

表-1 設定する物質および濃度

Case	混在する物質および濃度
1	植物プランクトンのみ (クロロフィル a 濃度 20~100 mg/m ³)
2	植物プランクトン, 土砂 (5 g/m ³)
3	植物プランクトン, 土砂 (5 g/m ³), DOC (5 g/m ³)
4	植物プランクトン, 土砂 (20 g/m ³)
5	植物プランクトン, 土砂 (20 g/m ³), DOC (20 g/m ³)

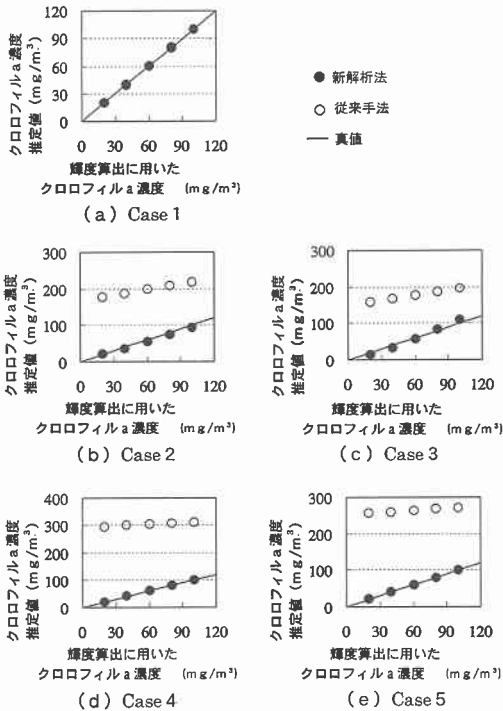
が存在し, そのクロロフィル a の濃度が 20~100 mg/m³ の場合の模擬画像データを生成し, 従来の代表的な解法である重回帰分析により輝度値とクロロフィル a 濃度との関係を表す回帰式を求めた. さらに, この回帰式を用いてクロロフィル a 濃度が 20~100 mg/m³ で, さらにその他の物質がある濃度で混在するケースを想定し (表-1), 模擬画像データを作成し, この画像からクロロフィル a 濃度の推定を試みた. ここで, Case 2, Case 3 において混在している土砂および溶存有機炭素 (DOC) は東京湾内で見られるそれらの濃度とほぼ同じオーダーに設定した. これと同時に新解析法による濃度推定を行い, この結果と従来の統計的手法による解析結果の差について検討した.

3.2 新解析法と従来手法の比較実験結果

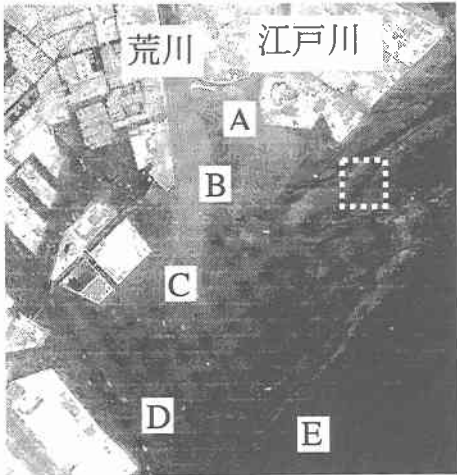
模擬画像データに対する新解析法と従来手法のシミュレーション実験結果を図-1 に示して比較する. 図-1 (a) は植物プランクトンが単一で存在した場合 (Case 1) の模擬画像データから濃度推定を行った結果を示したものである. これを見ると, 新解析法では真値からのずれは全くなく, 従来手法を用いても当然ながらほぼ真値を再現していることが分かる. 図-1 (b) は Case 2 の植物プランクトンと土砂が混在した場合の濃度推定結果を示したものである. 新解析法によれば真値との誤差は小さく, かつ混在する土砂の濃度推定も同時に行うことが可能であるが, 従来手法では推定値は真値から大きくずれており, 複数の物質が混在する場合には正しく濃度を推定できないことが分かる. 混在する物質数を増加させた Case 3 でも同様に, 図-1 (c) に示すように大きな誤差が出ていることが分かる.

また, 混在する物質濃度を増加させた Case 4 および Case 5 に関するシミュレーション結果を図-1 (d), (e) に示す. 従来手法では Case 2, Case 3 に比べ真値からのずれが大きくなっているが, 新解析法を用いると混在物質濃度が増加した場合でも精度良く真値を推定している.

以上に述べたように, 従来手法では複数の物質が混在している状況下では, 濃度を正確に推定することは困難であることが分かった. これは, 衛星データの輝度値が海中に混在する複数物質の濃度に非線形に依存している



図一 模擬画像データによる新解析法と従来手法による推定結果



図二 東京湾湾奥部の衛星画像 (1993. 5. 21, Landsat TM (Band 2))

表二 逆推定法における各物質濃度の初期値

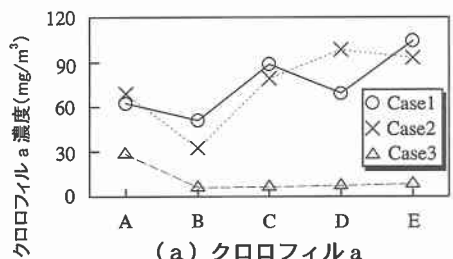
Case	クロロフィル a (mg/m^3)	土砂 (g/m^3)	DOC (g/m^3)
1	150	10	15
2	200	10	5
3	100	20	10

は、海中に最も存在しやすく計算的にも安定していることが示されているクロロフィル a, 土砂, DOC を設定し、表一に示すように、クロロフィル a の初期値を $100 \sim 200 \text{ mg/m}^3$ 、土砂の初期値を $10 \sim 20 \text{ g/m}^3$ 、DOC の初期値を $5 \sim 15 \text{ g/m}^3$ の範囲で変化させて濃度推定を行った結果を図一に示す。これは図二中に示す A～E の 5 点について、それぞれのケースでの推定値を表したものである。なお、ここでは、各点を中心にした 20 画素 $\times$ 20 画素の領域の推定値を平均して比較している。これを見ると、DOC の推定濃度には初期値によってばらつきがあるがこの理由としては、DOC の絶対値が他の物質に比べて小さく全体的なシグナルレベルが低いために、S/N 比が小さくノイズに埋もれやすいということが考えられる。土砂の推定濃度は初期値によらず、またクロロフィル a の推定濃度は Case 1 と Case 2 でほぼ一定の値を示していることが分かる。しかし、クロロフィル a および DOC 濃度推定値は Case 3 で他のケースに比べ、非常に小さい値となっている。ここで、Case 3 では土砂の初期値は他のケースの 2 倍の 20 g/m^3 と後述する実際の値よりも高い値に設定していることから、これが他の物質の推定値に影響しているものと思われる。このことから、より精度良く濃度を推定するためには、現地観測で得られたシートゥールズデータなどを基にしてある程度妥当な範囲の初期値を設定することが必要であることが分

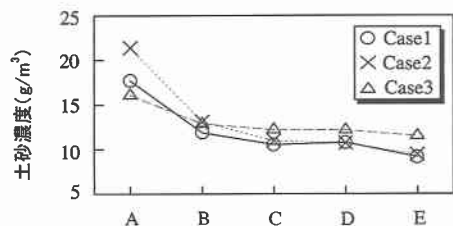
4. 初期値依存性の検討

新解析法では、非線形最適化手法により各物質の濃度推定を行う。ここでは $L_{\text{image}+}$ と L_{y0+} の差を評価関数として定義し、これを繰り返し計算により最小化していき最適解を求めている。しかし、この方法では初期値によっては local minimum に収束してしまい、最適解が得られない可能性がある。そこで、初期値を変化させていくつかのケースについて解析を行い、物質濃度の初期値依存性について検討した。

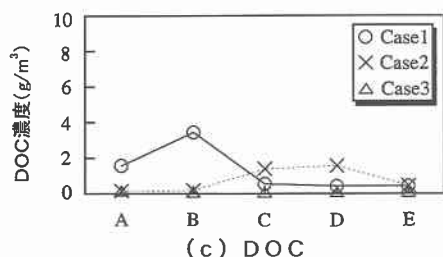
解析領域は河川からの流出によって複数の物質が混在する東京湾湾奥部海域、また解析には Landsat TM データ (図二, 1993. 5. 21 撮影) の可視～近赤外バンド (Band 1～Band 4) を用いた。濃度推定を行う物質として



(a) クロロフィル a

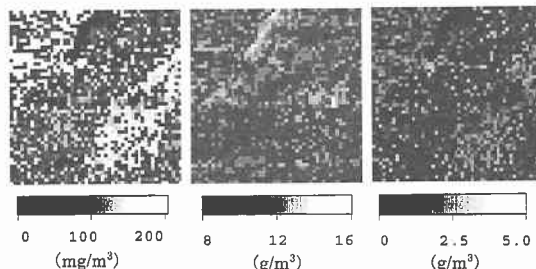


(b) 土砂



(c) DOC

図-3 初期値による推定値の変化



(a) クロロフィル a (b) 土砂 (c) DOC

図-4 赤潮海域の濃度推定結果

かった。

5. 新解析法の実海域データへの適用

以上をふまえて、本研究では現地観測などにより複数物質が高濃度で混在することが明らかとなっている2つの代表的な沿岸海域に対して、新解析法を適用した。なお、本研究では Landsat TM データ Band 1~4 の4バンドを用いて解析を行っている。

5.1 東京湾の衛星画像への適用

a) 解析概要

解析対象海域は図-2の点線で囲まれた海域で、千葉県調査(小川, 1993)によると、撮影当日この海域には赤潮が発生していたことが確認されている。なお濃度推定物質は、クロロフィル a, 土砂, DOCとした。

b) 解析結果

解析領域内ではあや状に赤潮が発生しているのが衛星画像からも確認できる。この領域における各物質の推定濃度分布を図-4に示す。クロロフィル a の濃度分布を見ると、赤潮の分布と同様のあやを示している。また、領域全体のクロロフィル a 濃度推定値の平均値は 87.1 mg/m^3 で、実画像から赤潮濃度が非常に高いと思われる領域では、推定値 $110 \sim 200 \text{ mg/m}^3$ 程度、その他の領域では $25 \sim 85 \text{ mg/m}^3$ 程度に分布している。同日、この解析領域内の1つの観測ポイントで測定されたクロロフィル a の濃度は 70 mg/m^3 であったことから(小川, 1993)、本手法を用いれば、高い精度でクロロフィル a の濃度が推定できることが確認できた。また、土砂および DOC の濃度分布については、領域内での推定値のばらつきが小さく、推定濃度の平均値は土砂が 10.6 g/m^3 、DOC が 0.60 g/m^3 であった。残念ながら、土砂および DOC の濃度については実測値が入手出来なかったため、厳密な推定精度については言及できないが、通常、東京湾での土砂濃度は $3 \sim 4 \text{ g/m}^3$ 程度、DOC 濃度は 1 g/m^3 程度といわれており、土砂濃度の推定値が若干高いものの、実際的な推定値となっている。

5.2 中国膠州湾の衛星画像への適用

次に中国の沿岸域に適用した例について述べる。

a) 解析概要

解析対象海域は中国の山東省山東半島の南岸に位置する膠州湾である。膠州湾は総面積 432 km^2 で、そのうち湾岸部の 125 km^2 を干潟が占めている。

濃度推定物質としてクロロフィル a, 土砂, DOCを設定した。植物プランクトンの卓越種であるけい藻の *Chaetoceros* の光学特性を用い粒径は $5.0 \mu\text{m}$ で代表させ、土砂の粒径は $5.0 \mu\text{m}$ とした。

b) 現地観測結果と衛星画像解析結果との比較

上記に述べた衛星データから新解析法による濃度推定を行った。図-6(a)~(c)は各観測ポイントにおける現地観測結果と濃度推定結果を比較したものである。現地観測は、中国環境科学研究院との共同研究によるものであり、観測実施日は1997年8月14~15日で観測点を図-5に示す。これらの観測点において多項目水質計による水温、塩分、水深、クロロフィル a 量、COD や BOD などの水質、流速等の調査を行った。ただし、クロロフィル a, 土砂の観測結果は水面から 5 m までの平均値をとっており図-6中のマーカーは平均値、その上下の点線は観測値の分散を表している。推定結果についても、

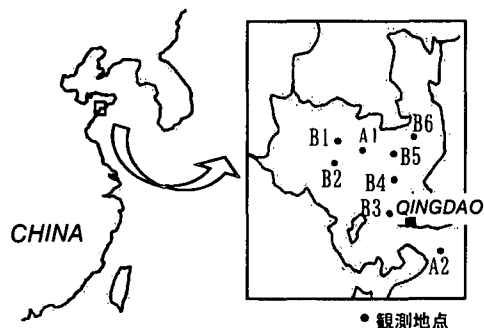
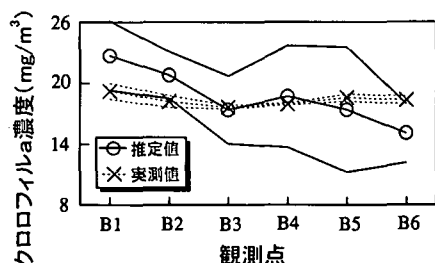
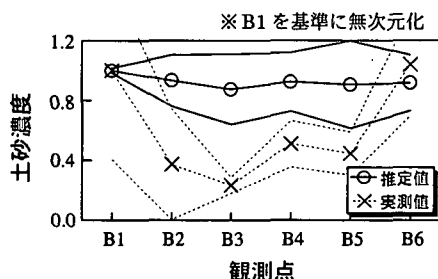


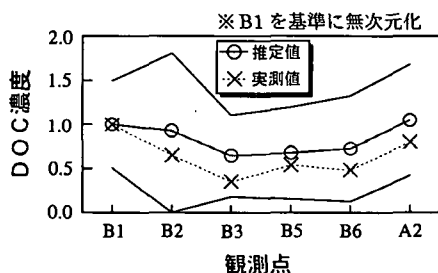
図-5 現地観測地点



(a) クロロフィル a



(b) 土砂



(c) DOC

図-6 推定値と実測値の比較

マーカーは観測点付近の推定値の平均値、上下の実線はその分散を示している。土砂とDOCについては現地では濁度、CODとして測定しており定量的な比較ができないため、観測点B1を基準に無次元化し分布傾向のみの比較を行った。まず図-6(a)から現地で観測したクロロフィルa量と推定結果を比較すると、その絶対値が良好

に一致していることが分かる。図-6(b)は現地での濁度の測定結果と土砂濃度の推定結果の分布傾向を示している。現地観測結果によれば観測点B1およびB6において高濃度となっているのに対し、濃度推定結果では各観測点においてあまり大きな差が現れておらず、分布傾向の一致は示されなかった。図-6(c)はCODの現地観測結果およびDOCの推定結果を定性的に比較したものである。これを見ると、実測値、濃度推定値ともに観測点B1、A2で高く、B3では最も低くなっており、濃度分布傾向が一致していることが示された。なお、衛星撮影日は曇っており大気状態が悪かったため、推定結果に大気ノイズの影響がある程度含まれていることも考える。

しかし、どの物質についても湾岸部における推定値が不自然に高濃度となったり、いくつかの点においては解の発散がみられた。この原因としては、新解析法では海底面からの反射の影響がないものと仮定しているのに対し、湾岸部は干潟になっており水深が非常に浅いため、衛星データに海底面の影響が含まれているものと考えられる。この点については今後改良する予定である。

6. おわりに

本研究では、まず、模擬画像データを用いたシミュレーション実験を通じて、複数物質混在海域に対する従来の統計的枠組みによる解析法の基本的な問題点を明確にすると同時に新解析法の妥当性を明らかにした。また、新解析法を実海域データに適用して、推定値と実測値およびその分布傾向がほぼ一致することが分かった。また新解析法の初期値依存性についても概ねクリアできることが示されたことから、実用化に向けての基本的な妥当性が確認できた。

謝辞：本研究を行うにあたって、千葉県水質保全研究所の小倉久子氏には有益なデータの提供及び多くのアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 小川カホル (1993): 赤潮等プランクトン調査, 平成5年度千葉県水質保全研究所年報, pp. 91-100.
- 杉森康宏・坂本 亘 (1985): 海洋環境光学, 東海大学出版会.
- 高木幹雄・下田洋久 (1991): 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会.
- 宮崎早苗・灘岡和夫・八木 宏 (1996): 光学理論に基づく海域内物質濃度の逆推定法, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1261-1265.
- 宮崎早苗・灘岡和夫 (1997): 光学理論に基づく海域内物質濃度の鉛直構造推定, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1271-1275.
- Bukata, R. P., Jerome, J. H., Kondratyev, K. Ya, and Pozdonyakov, D. V (1995): Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters, CRC Press, INC.
- Doerffer, R. and Fischer, J. (1994): Concentration of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff incase II waters derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods, J. Geophys. Res., Vol. 99, No. C4, pp. 7457-7466.