

現地連続計測型多成分濃度計開発のための基礎的研究

灘岡 和夫*・二瓶 泰雄**・宮崎 早苗***・森井 順之****

1. はじめに

最近の青潮問題に見られるような沿岸環境問題の多様化の傾向や, 沿岸開発に関するミチゲーション等の議論に見られるような適切な事前・事後評価のための環境モニタリングの必要性, さらには沿岸環境学の進展, などを背景として, 沿岸環境の実態および発生機構を的確に精度良く把握するための合理的な環境モニタリング技術を開発していくことが, 従来に増して強く求められている。特に, 濁質やプランクトンなど多種多様な物質が混在している沿岸域では, そのモニタリングに際して各物質の濃度を分離した形で定量的に測定する技術が必要となる。

既存の現地連続計測用のクロロフィル a 濃度計や濁度計としては, 主として光学センサーが用いられており, これらの光学センサーは, 単一バンドにおける光の強さと対象物質濃度との回帰的な関係より実際の海域の濃度を算定している。しかし, 実際の沿岸域の測定では, 測定対象外物質の光学的な影響を受けるため, センサーで測定された濃度と実際の濃度に大きな誤差が生じることが考えられる。

そこで著者らは, 上記の測定原理上の問題を解決するため, 衛星リモートセンシング画像解析の分野における宮崎・灘岡 (1999) の考え方を現地連続計測用光学センサーに応用し, 複数物質濃度の分離推定を可能にする「現地連続計測型多成分濃度計」を開発することを目指している。この新型濃度計は, 図-1 のイメージに示すような, 回転板により一定時間毎に入れ替わる分光フィルターを通した光を入射させ, 対象物質からの散乱光を前方及び後方の受光部にて分光情報として取得する一種のマルチバンド型光学センサーであり, 光学理論に基づくソフトウェアによって, この分光受光データから各濃度値を分離した形で逆推定しようというものである。なお

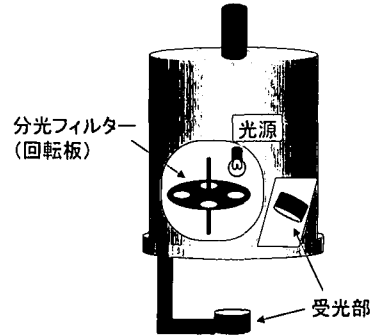


図-1 新型濃度センサーの概要

最近では, 海水の吸収係数の分光計測手法が海洋学の分野で発展しつつあるが(例えば, 岸野ら, 1997), ここでは主として吸収係数の計測自体に主眼が置かれており, ここで目的としている光学理論に基づく多種多様な物質濃度の同時分離計測とは異なる。

本研究では, 新型センサー開発のための基礎的検討として, まず, センサー諸元に対応した光の放射伝達過程をモデル化し, それをコンピューター上で再現するとともに, その基本性能を調べるために室内実験を行った。さらに, 新型濃度計による濃度の推定精度を検証するため, 上記の光学シミュレータを用いて複数物質濃度の同時分離推定を試みた。

2. 光学シミュレータの作成

現地センサーの製作において最も基礎となる光学系の設計を行うため, まず, 光学理論に基づいた光学シミュレータを作成した。これは, センサー諸元に基づき光の放射伝達過程をモデル化し, それをコンピューター上で再現するものである。以下に, このモデル化について説明する。

光の放射伝達現象は, 一般的に次式で表される。

$$\frac{dI(\lambda)}{K(\lambda)\rho ds} = -I(\lambda) + S(\lambda) \dots \dots \dots (1)$$

ここで, 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 : 媒質密度, s : 媒質中の

* フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究所 情報環境学専攻
** 正 会 員 博(工) 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究所 情報環境学専攻
*** 正 会 員 (株)NTT データ 情報科学研究所
**** 学生会員 東京工業大学大学院情報理工学研究所情報環境学専攻

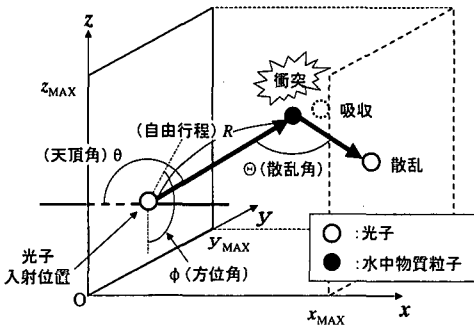


図-2 シミュレーションモデル

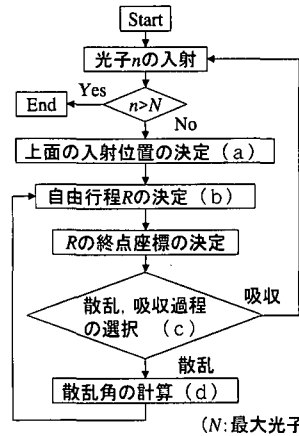


図-3 モンテカルロ法のフローチャート

伝達距離である。しかし、式(1)の一般解を求めることは非常に困難だといわれている。そこで本研究では、高木ら(1991), Mobley(1994), Bukata et al.(1995)に基づいて、光の放射伝達過程をモンテカルロ法によりモデル化した。

モンテカルロ法による解法では、図-2に表されるように、粒子(水分子もしくは対象物質粒子)との衝突、吸収・散乱などの過程を確率過程でモデル化し、個々の光子の伝達を再現する。そのため、他のどの解法よりも現象に忠実でなおかつシンプルであり、3次元場での光の放射伝達過程のモデル化が最も容易であるという特長を持っている。以下、図-3のフローチャートに従って説明を行う。

a) 初期入射方向、光子入射位置の決定

初期値として光子の入射する位置・方向を与える。ここで3次元的な方向は、図-2に示すように(天頂角)、(方位角)の2つの角度を用いて表現する。入射位置は平面 $x=0$ 上とし、その y, z 座標は、決められた範囲 $(0 \leq y \leq y_{MAX}, 0 \leq z \leq z_{MAX})$ 内で一様分布となるよう、 y, z それぞれについて一様乱数 Rnd を発生させて決定する。

b) 自由行程 R の決定

光束が散乱粒子の混合している媒体中を突き進むとき、光束中の一部の光子は粒子との接触により散乱・吸収するため、光束の一部が消された状態で透過側の面まで達する。この衝突するまでに光子が移動する幾何学的距離、すなわち自由行程 R に対する定式化は、ここでは、光学的距離 l と、光子が l 移動したときに消散する確率 $P_l(l)$ (以下、「消散確率」と呼ぶ)を用いて導出することとする。具体的には以下に示す通りである。まず、注目している座標 \vec{x} で進行方向 $\vec{\xi}$ に光束が入射した時、微小距離 dr だけ進んだ点での輝度値 $L(x; \vec{\xi})$ の消散の度合は、

$$\frac{dL(\vec{x}; \vec{\xi})}{dr} = -cL(\vec{x}; \vec{\xi}) \dots\dots\dots (2)$$

距離 r について積分された形では、

$$L(r; \vec{\xi}) = L(0; \vec{\xi}) \exp(-cr) \dots\dots\dots (3)$$

で表される。ここで、 c は消散係数($a+b$ 、 a : 吸収係数、 b : 散乱係数)である。衝突時における光子の吸収・散乱現象に伴う放射輝度の減衰過程を表す式(3)を用いると、光子が光学的距離 $l (=cr)$ 進んだ時の消散確率 $P_l(l)$ は、次式のように与えられる。

$$P_l(l) = 1 - \exp(-l) \dots\dots\dots (4)$$

上式を変形すると、光学的距離 l に関する式が得られる。

$$l = -\ln(1 - P_l(l)) \dots\dots\dots (5)$$

上式における l は、光子が衝突するまでに移動する光学的な距離に相当していることから、上式の両辺を消散係数 c で除すれば、自由行程 R に関する以下の式が導出される。

$$R = -\frac{1}{c} \ln(Rnd) \dots\dots\dots (6)$$

なお、ここでは、式(5)右辺中の自然対数の括弧内における $1 - P_l(l)$ を、一様乱数 Rnd を用いてモデル化している。

c) 光子散乱確率の計算

b)において光子が対象粒子に接触した場合、光子は吸収、散乱いずれかの過程を伴う。ここではひとつの粒子がもつ散乱吸収特性に注目し、散乱確率を計算する。対象粒子の散乱アルベドを ω_0 ($\omega_0 \equiv b/c$) とすると、 $\omega_0, 1 - \omega_0 (=a/c)$ の確率によりそれぞれ吸収、散乱の過程が生じる。そこで、一様乱数 Rnd を $[0, 1]$ 区間で発生させ、吸収過程の場合には $Rnd > \omega_0$ 、散乱過程の場合には $Rnd \leq \omega_0$ とする。

d) 光子散乱方向の決定

散乱過程を選択した場合、対象粒子に衝突した光子はある散乱角 θ (図-2参照)により3次元的に任意の方向に向きを変え進む。ここでは、a)と同様に、光子の進行方向の方位角を ϕ 、天頂角を ψ とする。しかし、散乱角 θ

の分布 (位相関数 $P(\theta)$) は物質の種類により異なり, また角度に対する分布は複雑な形状をしているため, 一般的にその分布を決定するためには数学的な解決法が必要である. そこで本研究では, 土屋 (1993)などを参考にし, 以下に示すような方法で分布を決定する.

水分子など, 光の波長に比べ小さいスケールの粒子が光に当たった場合については, レイリー散乱が適用でき, そのときの位相関数 $P_m(\theta)$ は,

$$P_m(\theta) = \frac{3}{4} \frac{2}{(2+\delta)} ((1+\delta) + (1-\delta) \cos^2 \theta) \dots (7)$$

と表される (ここで, δ : 偏光解消度). 一方, 土砂成分など光の波長に比べスケールの大きい粒子については, ミー散乱が適用でき, 位相関数 $P_p(\theta)$ は,

$$P_p(\theta) = \frac{1-g^2}{\sqrt{(1-2g \cos \theta + g^2)^3}} \dots (8)$$

と表される. ここで, g は $[-1, 1]$ の範囲で散乱角度の非対称性を表すパラメータであり, 等方散乱だと $g=0$, 完全前方散乱だと $g=1$, 完全後方散乱だと $g=-1$ である. 光の放射伝達過程では, レイリー散乱粒子, ミー散乱粒子との衝突が任意に起こると考え, レイリー散乱粒子, ミー散乱粒子の散乱による光学的厚さをそれぞれ τ_{sw} , τ_{sp} とおき, 散乱過程のうちレイリー散乱が起こる確率 f_m を,

$$f_m = \frac{\tau_{sw}}{\tau_{sw} + \tau_{sp}} \dots (9)$$

と表すことにより, 位相関数 $P(\theta)$ は,

$$P(\theta) = f_m P_m(\theta) + (1-f_m) P_p(\theta) \dots (10)$$

と定義される. この位相関数 $P(\theta)$ と一様乱数 Rnd を用いることにより, 散乱角 θ は, 次式を数値的に解くことで求められる.

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^\theta P(\theta') d\theta' = Rnd \dots (11)$$

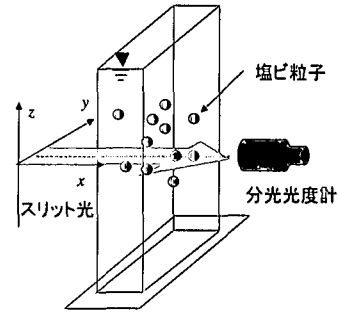


図-4 室内実験装置の概要

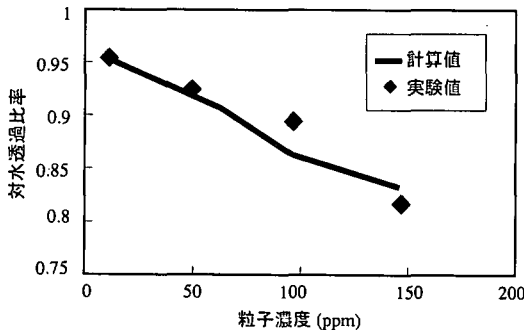
ここで, 左辺の係数は, 位相関数を正規化するための定数である.

3. 室内実験による光学シミュレータの基本性能の確認

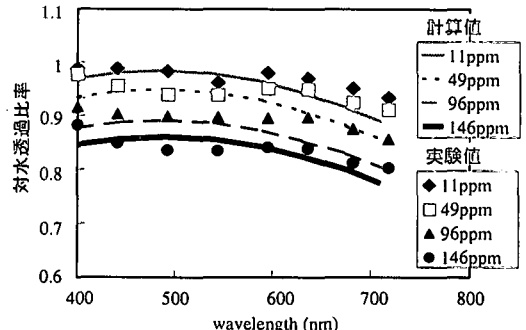
3.1 室内実験および光学シミュレーションの概要

前章で述べた光学シミュレータが幅広い条件下において有効であることを検証するため, 簡単な室内実験を行い, 同条件下での光学シミュレーション結果との比較を行った. 室内実験装置の概要を図-4に示す. 透過光を計測するために, 透明なアクリル板を用いた水槽を作成し, 混合させた測定対象粒子の濃度分布が一様となるようにした. 測定対象粒子には, 白色粒子として塩化ビニル樹脂 (球形粒子, 粒子径: 約 $100 \mu\text{m}$, 水中密度: 約 0.96 g/cm^3) を使用し, 光源には, 点光源の場合光量が少なく測定精度に問題が生じやすいため, ハロゲンランプ光に約 1 cm 幅のスリットを通したのを用い, 水槽側面を透過した光について分光光度計 (Ocean Optics 社製) を使用して分光測定を行った.

一方, 光学シミュレーションでは, 対象となるミー散乱粒子には全散乱粒子である白色粒子を用い, 散乱の方向性に関して等方散乱と仮定した. また, 実験装置と同



(a) 可視域平均された透過比率による比較



(b) 分光透過比率での比較

図-5 濃度変化に関する実験と計算の比較

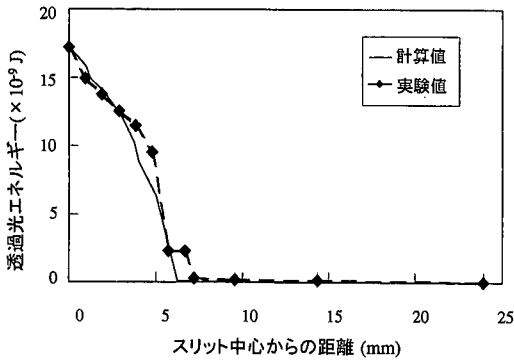


図-6 空間分布に関する検討結果

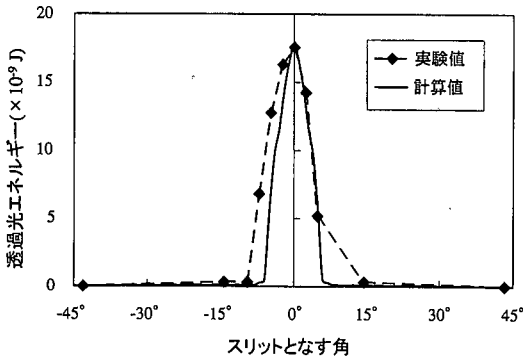


図-7 センサー角度変化に関する検討結果

じサイズの境界を設定し、光子が境界を出て行く場合には、その光子における追跡計算を終了させることとした。そして、濃度変化による光学量の変化、透過光束の空間的な分布、センサー受光角度の変化について、室内実験と同じく透過光での受光光量の計算を行った。

3.2 濃度変化に関する検討

まず、濃度変化に対する透過光量の変化が、実験とシミュレーションで一致するかを確認した。対象物質濃度は、10~150 ppm に設定し、それぞれの濃度で得られた実験値と計算値について、水の場合の値との比(以下、対水透過比率とよぶ)について比較した。粒子濃度を幅広く変化させたところ、可視域平均された対水透過比率の濃度依存性は図-5(a) のように示された。実験では、測定された濃度域における透過率について、概ね線形的な減少が確認され、シミュレーションについても同様の結果が得られた。また、さらに詳細に解析するため分光データについて比較した結果、図-5(b) に示すように、計算値と実験値との間の良好な一致が確認できた。

3.3 空間分布に関する検討

次に、スリット近傍での透過光の空間的な分布に関する検討を行った。ここでは、スリット中心部を基準位置

とし、その位置から上(図-4におけるz軸の正の方向)に25 mmの地点まで受光位置を移動させ測定を行った。図-6では、粒子濃度60 ppmの場合の透過光エネルギーについて実験結果と計算結果を示す。実験値と計算値との間の一致が確認できた。しかし、入射光の直達成分の到達範囲外に相当している5~10 mmの地点においては、実験で検知されたわずかな透過光量が、シミュレーションではほとんど見られなかった。その主な原因としては、室内実験の光源や受光部などの精度の問題、シミュレーションにおける測定対象物質の散乱特性の仮定法の問題、などが考えられる。このことについては、使用した粒子の散乱特性も含め、今後さらに検討していきたい。

3.4 角度分布に関する検討

最後に、検出センサーの向きを変化させることによる透過光量の変化について検討を行った。ここでは、スリット光の進行軸方向を0°と設定し、受光部の向きとなす角を1°ごとに変化させて測定を行った。実験の結果、図-7に示すような分布が得られ、これから、計算結果と実験結果が良好に一致することがわかる。

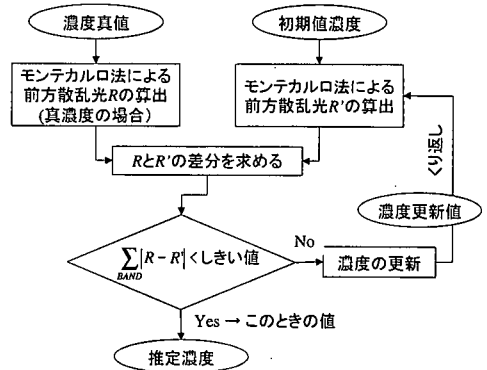


図-8 逆推定法の処理フローチャート

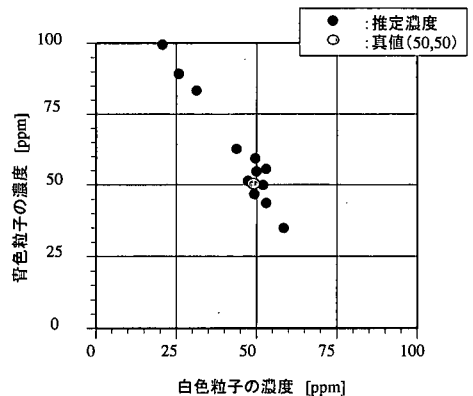


図-9 逆推定法による濃度推定結果

以上の検討により、本シミュレーションモデルの基本的な妥当性が立証できた。

4. 模擬データを用いた複数物質濃度の逆推定

4.1 逆推定実験の概要

次に、ここで開発する「現地連続計測型多成分濃度計」による複数物質濃度の同時分離推定の可能性を検討するために、前述の光学シミュレータによる水中物質濃度の逆推定実験を行った。

ここでは逆推定の手法として、非線形最適化手法を用いた。その概要を、図-8に示した逆推定法の処理フローを用いて説明する。ここではまず、濃度真値を与え、モンテカルロ法を用いて前方散乱光データを計算する。これを、実際にセンサーでの計測で得られる前方散乱光量 R とする。一方、初期値濃度を与え、モンテカルロ法を用いて計算した前方散乱光量を R' とする。次に、非線形最適化手法によるくり返し計算を行い、そして、両者の差分 $|R - R'|$ が最小値となる場合の濃度更新値を推定濃度として算出する。なお、非線形最適化手法の最適化アルゴリズムには Levenberg-Marquardt 法を用いた。

実験では、本新型濃度計の基本的性能を検討するために、以下に述べるような非常に簡略化した状態を仮定した。水中物質としては、直径 0.120 mm の白色粒子及び青色粒子がそれぞれ 50 ppm で混在した場合について、粒子濃度の初期値をそれぞれ 0 ppm~100 ppm と変化させ推定精度を求めた。入射光は可視光 4 バンド (400 nm, 440 nm, 490 nm, 540 nm) とし、逆推定にはそれぞれの波長の光の前方散乱光を用いた。

4.2 逆推定実験結果

図-9に推定結果を示す。いくつかの初期値のケースを除き、おおむね精度良く推定できることがわかる。この場合の全ケースにおける平均推定誤差は、白色粒子が 2.4%、青色粒子が 12.1% であった。なお、推定精度に誤差が多く含まれるのは、青色粒子の濃度の初期値が 80~100 ppm の場合であり、この濃度域で local mini-

mum が存在する可能性があるが、詳しくは今後検討する予定である。以上より、適当な初期値を与えることで、本濃度計シミュレータにより、高精度に複数の物質濃度が同時に推定できる可能性が示された。

5. おわりに

本論文では、新しく開発する「現地連続計測型多成分濃度計」にて複数物質濃度を精度よく同時分離推定することを目的とし、その基礎となる光学シミュレータをモンテカルロ法に基づいて構築した。検証実験結果との比較から、本シミュレータが実現象をきわめて良好に再現し得ることが確認できた。

さらに、模擬粒子を用い本手法に基づく複数物質濃度の逆推定を行った結果、真値とほぼ一致する推定結果が得られ、新型濃度計の複数物質濃度分離推定の基本的な可能性が確認された。

謝辞：本研究は、平成 10~11 年度文部省科学研究費補助金（基盤研究 (B) (2)）（研究代表者：灘岡和夫、課題番号 10555170）の補助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 岸野元彰・才野敏郎・古谷 研 (1997): 海水の光吸収スペクトル測定法の検討 1. 検討ワークショップ, 1997 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, p. 157.
- 高木幹雄・下田陽久 (1991): 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会.
- 土屋 淳 (1993): リモートセンシング概論, 朝倉書店.
- 宮崎早苗・灘岡和夫 (1999): 光学理論に基づく海域内複数物質濃度の逆推定法, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 19, No. 2 pp. 50-63.
- Mobley, Curtis D. (1994): Light and Water-Radiative Transfer in Natural Waters, Academic Press, Inc., pp. 321-329.
- Bukata, R. P., J. H. Jerome, K. Ya. Kondratyey and D. V. Pordnyakoy (1995): Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters, CRC Press.