

可視化画像情報を用いた浮遊泥濃度の時空間分布計測手法 に関する基礎的研究

山田 文彦* 小林 信久**・滝川 清***
白木原圭太****・谷口 正 浩*****

1. はじめに

有明海には有機物などを多く含んだ底泥が堆積している。潮汐や波浪の作用によって巻上がった浮遊泥は、富栄養化や海浜変形といった問題を引き起こしている。このような問題を解決するためには、底泥の物性はもとより、浮遊泥濃度の時空間分布を定量的に把握することが重要である。通常、浮遊物質濃度の計測には採水や光学的あるいは音響的手法が用いられるが、いずれも空間内の 1 点での計測となるため、浮遊物質濃度の時空間分布を定量的に把握することは非常に困難である。

本研究は、可視化（ビデオ）画像の輝度分布から浮遊泥濃度の時空間分布を逆解析により推定する新たな計測手法の開発を目指すものである。今回はその基礎的研究として次のことを行った。1）光の伝搬特性を記述する放射伝達方程式より導いた輝度分布と浮遊物質濃度との関係式中の未定係数を同定するために可視化実験を行った。2）相対的な量である輝度を同時に計測した照度を用いて絶対量に変換する方法について検討した。3）変換した輝度分布を用いて関係式中の未定係数を同定し、一様濃度場の逆解析を試みた。

2. 可視化実験

ビデオ画像の輝度は、照明やカメラの絞り、また浮遊物質の濃度・粒径・色などの相違による光の減衰や放出・散乱などの影響を受けやすい。そこで今回は、基礎的研究としてこれらの影響を取り除くため、照明の照度を一定とし、さらに懸濁粒子として粒径が均一で白色のカオリナイトを用いて実験を行った。実験方法は、図-1 に示すような水槽を用い、水深 19.5 cm として行った。以下では、カオリナイトと水の配合割合から算出される平均的な重量濃度を調整濃度と呼ぶ。可視化手法は、レーザー光をシート状にして水槽上方から照射し、可視化断面を作成する。各ケースの撮影条件を合わせるために、撮影

前に攪拌器を用いて 1 分間攪拌し、攪拌終了 30 秒後に高速カメラを用いて側方より撮影を行った。得られたビデオ画像は、パソコン上で 512×480 画素、256 階調の輝度に変換される。このビデオ撮影と平行して水槽前面の 12 点において照度を計測した。照度計は Minolta, T-10 M を使用し、その受光面は $\phi=14\text{ mm}$ である。また、これらの可視化実験は、外部からの光の進入を極力避けるため、日没後、光を遮断した状態で実施した。なお、実験条件は表-1 に示す通りである。

2.1 輝度の分布特性

図-2 は調整濃度 0.3 g/l 、レーザーシートが水槽前面 ($z=0.0\text{ cm}$) にある場合の輝度分布を表したもので、白いほど明るいことを示す。この分布は $1/3$ 秒間隔で 10 枚の画像を取り込み、メディアン・フィルタを用いて算出した。また、同図中の 3 つの断面 (A~C) での輝度の鉛直分布を表したものが図-3 である。両図より、空間的には B・C 断面より中央断面 A の輝度が全体的に高く、左右対称でほぼ楕円状に分布していることがわかる。つま

表-1 実験条件

調整濃度 $c(\text{g/l})$ 計 6 ケース	0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0
可視化断面 $z(\text{cm})$ (計 5 断面)	0, 1, 2, 3, 4
シャッタースピード (s)	1/125
レーザーの出力 (W)	4.0

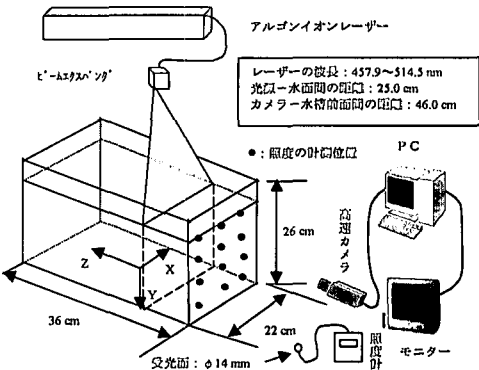


図-1 可視化実験概要図

* 正会員 博(工) 熊本大学助手 工学部環境システム工学科
** 正会員 Ph.D. デラウェア大学教授 応用海岸研究センター
*** 正会員 工 博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科
**** 正会員 修(工) 東京建設コンサルタント
***** 学生員 熊本大学大学院自然科学研究科

り、輝度は水深方向に対して一様に分布するのではなく、水面下2~4.0 cmの所で最大値をとり、その後単調に減少する。このように輝度の空間変化が大きい要因としては、使用したレーザー光の波長(約0.5 μ m)がカオリナイト粒子の径(中央粒径3.5 μ m)に比べて小さすぎるためと考えらる。そこで次に、光の伝搬特性について述べ、輝度の分布特性を光伝搬の物理過程に基づき検討する。

微細粒子が浮遊する水中に入射した光は、微細粒子や水分子などにより吸収・散乱される。つまり、入射した光(放射)エネルギーは、吸収と散乱過程により入射方向の放射エネルギーを減衰させながら伝播していく。そのため、吸収と散乱との効果を合わせて消散と呼ばれる。

上述の消散過程に対して、光の伝播において放射エネルギーが増加する過程が射出である。この過程は媒質が熱源となる熱放射の射出(真の射出)と光路上で散乱された光の一部が再び光路上に戻ってくる見かけの射出(多重散乱)との和として表現される。一般には、真の射出は赤外域を扱う時以外では無視される場合が多いが、本研究では照明としてレーザー光を使用するため、真の射出を考慮する必要があるか否かを調べた。ここではサーモグラフィー(チノー, CPA-570)を用いて水槽の温度分布を側方と上方の2方向から測定したが、レーザー光を2分間照射させても温度分布には変化がみられなかった。よって本研究では射出過程においては、多重散乱のみを取り扱うこととした。

以上、光の伝搬特性を考慮すると図-2, 3で得られた輝度分布は次のように解釈できる。すなわち、水面近傍では散乱の影響が大きく、入射光が減衰するため輝度分布は小さいが、水深とともに多重散乱が大きくなり、それに伴い輝度分布も大きくなる。そして水面下2~4.0 cm付近では多重散乱が卓越し、輝度分布もピーク値を示す。しかし、それ以深の水深では吸収の影響が強くなり多重散乱が小さくなるとともに輝度分布も減少する。

今回は吸収係数の実測は行っていないが、Sasakiら(1968)の実測によると水深とともに指数的に増加することが示されており、定性的には上記の解釈と一致する。

2.2 照度の分布特性

図-4は図-2, 3と同条件での照度の分布を示す。図より、中央断面Aから同距離で測定したB・C断面ではほぼ同じ分布を示しており、照度についても輝度と同様に左右の対称性が確認できる。また同図において3つの断面を比較した場合、断面Aが最も高い値をとり、照度がピークとなる水深の位置は、輝度分布とほぼ同様に水面下3~4.0 cmの所となった。さらに図は示していないが、奥行き方向や各濃度においても同様の傾向であるため、照度は輝度との相関が高いことがわかった。

2.3 照度を用いた輝度補正方法の提案

図-5は中央断面(水槽前面)での輝度分布と濃度との関係を示す。調整濃度0.0 g/l以外では特に、水面から4.0 cm程度までは輝度分布やピーク値などに明確な差は見られず、輝度と濃度との関係は不明確である。これは輝度自体が相対的な量であることやカメラの絞りが一定でなかったことに起因し、そのため、この分布のみで濃度場の逆推定を行なうことは非常に困難である。そこで、前述の輝度と照度との相関性に着目し、照度分布を調整濃度別に比較した。

図-6は同条件での照度の鉛直分布であり、高濃度ほど水表面付近の照度は大きく、水深とともに各濃度の照度差はなくなることを示している。つまり、照度分布は輝度分布よりも濃度との関係が明確であり、この照度を用いて輝度を絶対量に変換する方法について検討した。具体的には、調整濃度1.0 g/lでの照度の最大値815 lxを輝度の最大値255とし、各濃度の照度ピーク値に応じて線形的に補正係数を算出し、輝度分布の再計算を行った。

図-7は補正後の輝度の鉛直分布を示したもので、補

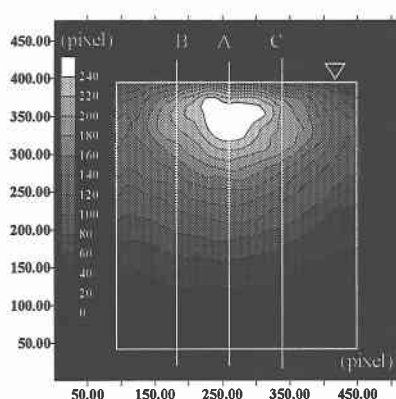


図-2 輝度の空間分布 (0.3 g/l)

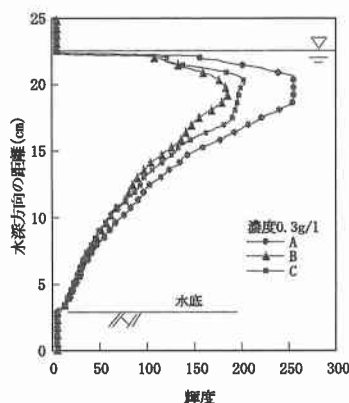


図-3 輝度の鉛直分布 (0.3 g/l)

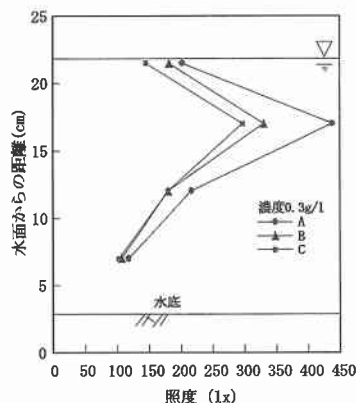


図-4 照度の鉛直分布 (0.3 g/l)

正前にはほぼ一致していた輝度分布が、この補正により濃度に応じた分布傾向を示していることがわかる。よって本研究では、以降の解析にはこの補正後の輝度分布を用いる。

3. 画像輝度—浮遊物質濃度の関係式

本実験では、図-1のように水槽上方からレーザー光を入射させ可視化断面を作成する。そこで、可視化断面内における画像輝度と浮遊物質濃度との関係式について説明する。光の放射伝達過程は、一般に次式で表される。

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho dr} = -I_\lambda + S_\lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 λ : 光の波長、 I_λ : 放射強度、 $S_\lambda \equiv j_\lambda/k_\lambda$: 放射の源泉関数、 k_λ : 質量消散係数、 j_λ : 質量射出係数、 ρ : 媒質の密度、 r : 媒質中の伝達距離である。

(1)式は放射伝達方程式と呼ばれ、右辺第1項は消散過程を、第2項が射出過程を表す。消散係数 k_λ は、2.1で述べたように、放射エネルギーの吸収・散乱過程に関係するため、次式で表現される(杉森・坂本, 1985)。

$$K_\lambda = x_\lambda + a_\lambda = x_\lambda^w + x_\lambda^s + a_\lambda^w + a_\lambda^s \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x_λ : 質量吸収係数、 a_λ : 質量散乱係数、 $x_\lambda^w \cdot a_\lambda^w$: 水分子による吸収・散乱係数、 $x_\lambda^s \cdot a_\lambda^s$: 懸濁粒子による吸収・散乱係数である。

なお、図-5, 6より調整濃度 0.0 g/l では輝度・照度分布ともほぼ0を示しているため、今回は水分子による吸収・散乱係数 (x_λ^w , a_λ^w) は無視することとした。

次に、直線光路上における式(1)の解を考えるが、源泉関数 S_λ は積分の中に求めるべき放射強度 I_λ を含んでいるため、その一般解を求めることは非常に困難である。リモートセンシングの分野では、式(1)の数値解法がいくつか提案されているが(例えば、Mobley, 1994; 宮崎・灘岡, 1999)、ここでは、神田ら(1998, 1999)の

手法を参考にした。

源泉関数が既知であると仮定すると、式(1)は1階常微分方程式となり、その形式解は次のように求まる。

$$I_\lambda(r) = I_\lambda(0)e^{-\tau(r,0)} + \int_0^r S_\lambda(s)e^{-\tau(r,s)}k_\lambda \rho ds \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 $I_\lambda(r)$, $I_\lambda(0)$ はそれぞれ直線光路上 $s=r, 0$ への放射強度、 $S_\lambda(s)$ は $s=0 \sim r$ 間の任意点の源泉関数、 τ は光学的厚さであり、消散係数を対象区間で積分したものである。ここで、密度 ρ の代わりにカオリナイトの濃度 c を考え、水表面(点 Q)へ入射する放射強度を I_0 とする。また、可視化断面内の任意点 P 周辺の微小体積要素 dV からの散乱光強度 $I_P(\theta)$ を考慮し、輝度と放射強度が線形関係にあると仮定すると、高速カメラで計測される点 P の輝度 L_P は最終的に次式で表される(神田ら, 1998, 1999)。

$$\begin{aligned} L_P &= k \{ I_0 e^{-\tau(p,q)} e^{-\tau(r,q)} c dV i_0 + \int_p^r S_\lambda(s) e^{-\tau(r,s)} k_\lambda c ds \\ &\quad + \int_p^q S_\lambda(s) e^{-\tau(p,s)} k_\lambda c ds e^{-\tau(r,p)} c dV i_0 \} \\ &= K \cdot G \cdot c + \beta \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 k : 比例定数、 p, q, r : 光路上の点 Q, P, R の位置座標、 K : 散乱角 θ と入射光強度によって決まる係数、 G : 消散係数、 c : 一様濃度、 β : 多重散乱項を表す。

次章において、未知係数を可視化実験の結果を用いて同定するが、本実験では吸収係数の実測ができなかったため、ここでは消散係数を懸濁粒子による散乱係数 a_λ (以降は a) のみで評価する。また、係数 K, a の空間分布に関しては水平方向の分布は考慮するが、水深・奥行き方向には一定と仮定する。さらに、ビデオ画像の輝度は、各画素(512×480画素)・可視化断面ごとに得られるため、式(4)を以下のように表現し直す。

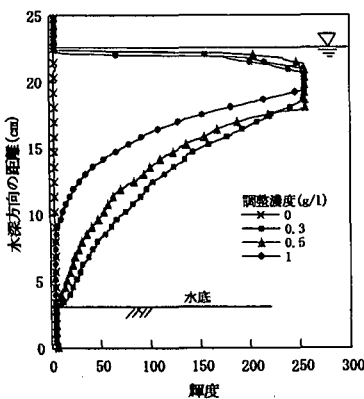


図-5 濃度別の輝度の鉛直分布

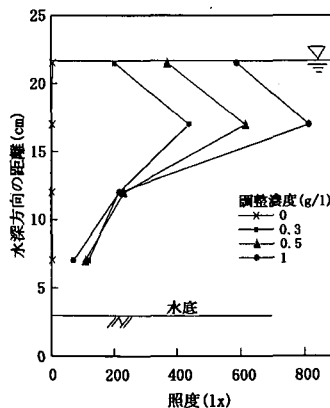


図-6 濃度別の照度の鉛直分布

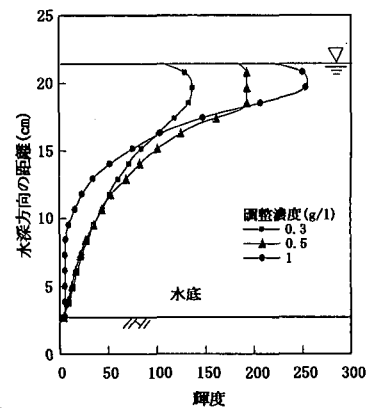


図-7 補正後の輝度の鉛直分布

$$L'(c, x, y, z) = K(x) \left\{ \exp \sum_{i=1}^{y-1} (-\alpha(x)c\Delta y) \right\} \left\{ \exp \sum_{j=1}^{z-1} (-\alpha(x)c\Delta z) \right\} \cdot c + \beta(c, x, y, z) \\ = K(x) \cdot G(x, y, z) \cdot c + \beta(c, x, y, z) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 Δy ：1画素の実長、 Δz ：計測断面間隔、 $L'(c, x, y, z)$ ：照度を用いた補正後の輝度である。

4. 未知係数の同定と濃度場の逆推定結果

水槽最前面の水面($y=z=0$ cm)において、光の消散・多重散乱の影響が無視できるとすれば、式(5)は

$$L'(c, x, 0, 0) = K(x) \cdot c \quad \dots\dots\dots (6)$$

図-8(a)に、最小自乗法により決定した水槽前面の水面における係数 K の空間分布を示す。係数 K は水面中央付近で最大となり、水槽壁に向かって減少する左右対称な分布を示す。これは水槽壁に近づくにしたがって、レーザーシート幅が広がり放射強度が減衰するためである。図-8(b)は、係数 K の決定係数の分布を示す。決定係数は、通常0.8以上であれば線形性の仮定が妥当であることを示す指標である。同図より、全体的に濃度 c と補正輝度 L' との相関性は高く、線形性を仮定しても十分説明できることを示している。なお、4~8.0 cmにかけて決定係数が低くなっている部分があるが、これは、レーザーシートの軸が少し右側にずれていたためである。

次に、散乱係数の同定方法であるが、水面($y=0$ cm)において多重散乱の影響が無視できるとすると、式(5)は光の消散のみを考慮して次のように表すことができる。

$$L'(c, x, 0, z) = KG(x, 0, z)c \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $G(x, 0, z) = \exp(-\alpha(x)c(y\Delta y + z\Delta z)) \dots\dots\dots (8)$
式(8)を考慮して式(7)を変形すると、次式となる。

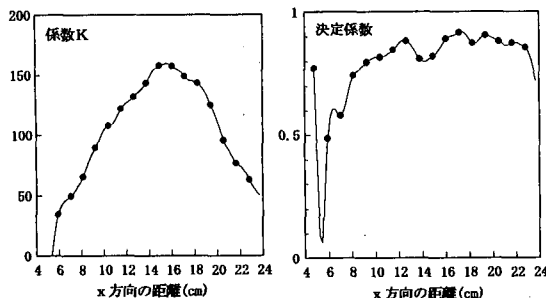
$$\frac{1}{c \cdot z} \log \left(\frac{L'(c, x, 0, z)}{K(x) \cdot c} \right) = -\alpha(x) \cdot z \quad \dots\dots\dots (9)$$

水面($y=0$ cm)における補正後の輝度分布から式(9)を用いて最小二乗法より散乱係数 α を同定した。図-9は散乱係数 α の調整濃度別の空間分布を示す。一様濃度0.5、1.0 g/lではx方向に対してほぼ一定な分布であるが、0.3 g/lでは右上がりの傾向を示している。これも、前述のレーザーシートのずれが一因と考えられる。なお、散乱係数 α についても決定係数の分布を調べたが、その値はほぼ1に近い値を示し、 α を同定する際の線形性の仮定も妥当であることを確認した。

図-10に水槽前面での消散項 L_a (式(5)の右辺第一項)の鉛直分布を濃度毎に示す。図より、消散項は濃度に関係なく水表面下5~7.0 cm以内に分布し、水深方向に急激に減衰する。つまり、入射した光の放射強度は、カオリン粒子による散乱の影響でその強度を水深方向に徐々に減少させ、水深10.0 cm以下では消散項はほぼ0になることが示されている。このように消散項が水深方向に単調に減少するのは、今回の解析では消散過程におけるカオリン粒子による吸収過程を考慮していないためである。

次に、多重散乱項 β を補正輝度 L' より散乱項 L_a を差し引くことで求めた。図-11に中央断面における多重散乱項の鉛直分布を示す。図より、各調整濃度とも水面下3.0 cm程度の深さで最大値をとることや、高濃度ほど多重散乱のピーク値は大きくなるのがわかる。また、水面下5~7.0 cm付近で各濃度の多重散乱項が交差しているが、これも吸収過程を考慮していないことが一因と考えられる。

このように多重散乱項は調整濃度によって変化することから、濃度と多重散乱項の関係についても調べた。水槽前面(水面中央)の多重散乱項と各調整濃度との関係より、濃度と多重散乱項の間にも線形関係を確認したので、最小二乗法により多重散乱項の空間分布を各ピクセル単位で次式のように線形的に近似した。



(a) 係数 K の空間分布 (b) 決定係数の空間分布

図-8 係数 K

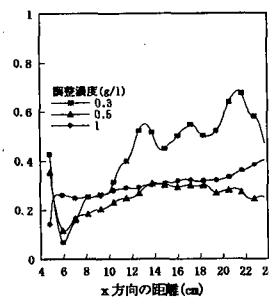


図-9 係数 α

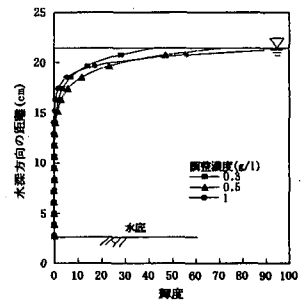


図-10 消散項の鉛直分布

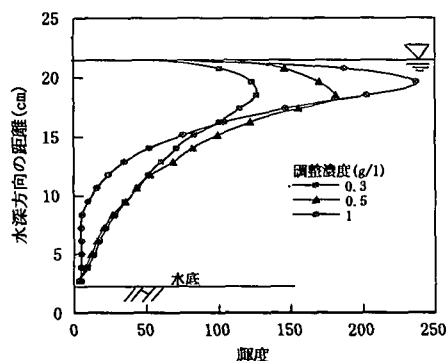


図-11 多重散乱項の鉛直分布

$$\beta(c, x, y, z) = \beta_a(x, y, z) \cdot c + \beta_b(x, y, z) \cdots (10)$$

以上、同定した係数 K , α と多重散乱項 β を用いて、補正後の輝度分布から一様濃度場を逆解析 (推定) する。式 (5) を式 (10) を用いて書き直し、

$$\begin{aligned} L'(c, x, y, z) &= K(x) \cdot G(x, y, z) \cdot c + \beta(c, x, y, z) \\ &= K(x) \cdot G(x, y, z) \cdot c + \beta_a(x, y, z) \\ &\quad \cdot c + \beta_b(x, y, z) \cdots \cdots \cdots (11) \end{aligned}$$

さらに、式 (11) を変形すると、次式を得る。

$$c(x, y, z) = \frac{L'(c, x, y, z) - \beta_b(x, y, z)}{K(x)G(x, y, z) + \beta_a(x, y, z)} \quad (12)$$

図-12 は一様濃度場: 0.3 g/l の逆推定結果を鳥瞰図で表したものである。同図よりほぼ一様濃度場が再現されていることがわかる。しかし、水面下 6~8.0 cm 付近で非常に高い値が出力されている。この位置は、図-11 において各濃度の多重散乱項が交差する場所とほぼ一致し、係数 β_a の過小評価が一因である。今後吸収過程を考慮することで、濃度場の逆推定精度は向上すると考えられるが、一様濃度場であっても輝度分布から濃度場を逆推定することは非常に複雑であり、非一様濃度場への本手法の適用は困難であることがわかった。

5. 結 論

本研究では、ビデオ画像の輝度情報から浮遊物質濃度の時空間分布を逆推定する新しい計測手法に関して検討を行った。得られた結論を要約すると以下の通りである。

- (1) 輝度と照度の計測結果を比較すると、両者には高い相関性が見られること、また、照度のピーク値は輝度と異なり、物質濃度に比例して大きくなることがわかった。

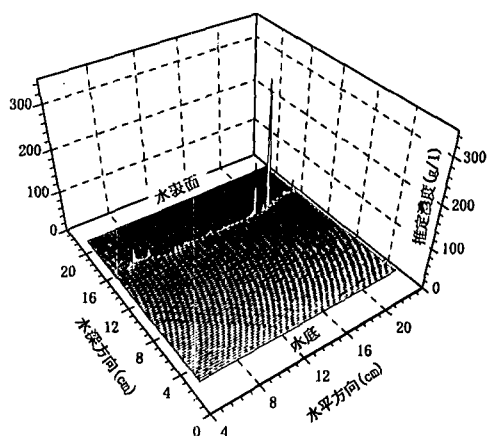


図-12 一様濃度場の逆推定結果 (0.3 g/l)

- (2) 相対量である輝度を照度の値を用いて変換することで、絶対量として評価する方法を提案し、それを用いて輝度分布と浮遊物質濃度との関係式中の未定係数を同定した。
- (3) 同定した係数と変換した輝度を用いて一様濃度場の逆解析を行い、本手法の妥当性を示したが、非一様濃度場への本手法の適用は困難であることもわかった。

謝辞: 神戸大学工学部宮本仁志先生には本研究を遂行するに当たり、資料提供を含め貴重なご助言をいただきました。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 神田 徹, 宮本仁志, 岩見収二 (1998): 画像の輝度情報を用いた浮遊泥濃度計測手法の開発, 建設工学研究論文報告集, 第40巻, pp. 67-80.
- 神田 徹, 宮本仁志, 岩見収二 (1999): 光の多重散乱の影響を考慮した浮遊物質濃度の画像計測法, 水工学論文集, 第43巻, pp. 767-772.
- 杉森康宏, 坂本 亘 (1985): 海洋環境光学, 東海大学出版会, pp. 41-50.
- 宮崎早苗, 澁岡和夫 (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, C. D. (1994): Light and Water, Academic Press, INC., pp. 321-340.
- Sasaki, T., S. Watanabe, M. Kishino, and G. Oshiba (1968): Optical properties of the water I adjacent regions of the Kuroshio, J. Oceanogr. Soc. Jap., Vol. 24, pp. 45-50.