

神戸大学大学院 学生員 ○山下 健作 神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志
神戸大学工学部 フェロー 神田 徹 神戸大学工学部 学生員 北村 暢慶

1. はじめに

筆者らは画像の輝度情報より浮遊物質濃度分布を計測する手法について検討している^{1), 2)}。前報²⁾では、懸濁水中の光の伝播過程を直達光と拡散光で表現する四流束モデル³⁾を用いて輝度と濃度の関係を定式化した。関係式中のモデルパラメータについて不確定な部分があった。そこで本報では、光路上の散乱過程に修正を加えることにより輝度-濃度関係式を再構築し、浮遊物質濃度の画像計測における四流束モデルの有効性について検討を行った。

2. 可視化実験システムの概要

図1に実験システムの概要を示す。アルゴンイオンレーザーのビーム光をスキャナーを用いてz方向(奥行き方向)に走査させ、コリメータレンズとシリンドリカルレンズを用いることにより水槽内に可視化断面を作成する。その可視化断面を側方から CCD カメラで撮影し、画像処理ボード搭載の PC に 512×512 画素、256 階調の輝度データとして保存する。

3. 画像輝度と浮遊物質濃度の関係式

3-1 四流束モデルの概要

四流束モデルの基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{dI_{f\xi}}{d\xi} = -(A + S)I_{f\xi} \quad (1), \quad \frac{dI_{b\xi}}{d\xi} = (A + S)I_{b\xi} \quad (2)$$

$$\frac{dE_{f\xi}}{d\xi} = p_f SI_{f\xi} - \eta(A + p_b S)E_{f\xi} + \eta p_b SE_{b\xi} + p_b SI_{b\xi} \quad (3)$$

$$\frac{dE_{b\xi}}{d\xi} = -p_b SI_{f\xi} + \eta(A + p_b S)E_{b\xi} - \eta p_b SE_{f\xi} - p_f SI_{b\xi} \quad (4)$$

ここに、 ξ : 光の伝播方向、 $I_{f\xi}$ 、 $I_{b\xi}$: 前方、後方への直達光放射照度、 $E_{f\xi}$ 、 $E_{b\xi}$: 前方、後方への拡散光放射照度、 A : 吸収係数、 S : 散乱係数、 p_f 、 p_b : 前方、後方への散乱確率、 η : 直達光の透過長と拡散光の平均透過長との比である。四流束モデルでは、光の多重散乱の影響は $E_{f\xi}$ と $E_{b\xi}$ によって考慮される。

3-2 輝度-濃度関係の定式化

図2に光路図を示す。本研究では、可視化断面 QS 上の点 P における散乱光が光路 PR 上を伝播してカメラに撮影されると考え、光路 QP、PR での光の伝播を四流束モデルを用いて表現することにより、輝度-濃度関係を定式化する。その際、前報²⁾では点 P での PR 方向への散乱光の強さはその点の濃度 c_p に比例すると仮定していた。しかしながら、四流束モデルでは点 P の放射照度 $I_{f\xi}$ 、 $E_{f\xi}$ 、 $E_{b\xi}$ の一部が R 方向に伝播すると仮定した方がモデルの考え方に一致するため、ここでは、光路 PR での境界条件を以下のようにした。

$$I_{f\xi}(0) = w\{I_{f\xi}(y_p) + E_{f\xi}(y_p) + E_{b\xi}(y_p)\} \quad (5), \quad E_{f\xi}(\infty) = E_{b\xi}(\infty) = 0 \quad (6)$$

以上より、得られた輝度-濃度関係式を次に示す。

$$L = \alpha \left\{ e^{-Jy} + M(e^{-Ky} - e^{-Jy}) \right\} \left\{ e^{-Jz} + M(e^{-Kz} - e^{-Jz}) \right\} \quad (7)$$

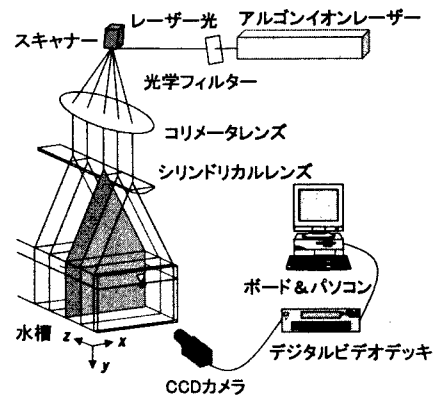


図1 実験システムの概要

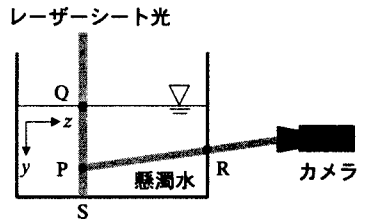


図2 光路図

表1 関係式中の各項

$J = (A + Sc)$
$K = \eta\sqrt{(2p_b Sc + A)A}$
$M = \frac{p_f A Sc (\eta + 1) + (\eta p_b + p_f) S^2 c^2}{J^2 - K^2}$
$N = \frac{A + p_b Sc - K}{p_b Sc}$

ここに、 L : 画像輝度、 α : 画像輝度と放射照度の変換係数である。その他の項は表1に示す。この輝度-濃度関係式中には6つのモデルパラメータ($A, S, \eta, p_f, p_b, \alpha$)が含まれる。このうち、水の吸収係数は $A=0.0174\text{m}^{-1}$ 、前方(後方)散乱確率はミー散乱の理論より $p_f=0.996$ ($p_b=0.004$)とした。

3-3 モデルパラメータの同定

表2に、モデルパラメータ同定のための実験条件を示す。可視化実験は多重散乱の影響が小さい調整濃度 $c_0=0.01$ (g/l) からその影響が大きくなる $c_0=0.1$ (g/l) までの10ケースとし、同定には約10分間の平均輝度値を用いた。図3~5に c_0 と散乱係数 S 、変換係数 α 、透過長比 η との関係を示す。ここで、各モデルパラメータの値は輝度の計算値(式(7))と実験値の誤差が最小となるように求めた。図3、4に示す S と α は c_0 にかかわらずほぼ一定値をとっており、それぞれ値を平均することにより同定値とした。一方、 η については、物理的な考察からは濃度 c のみの関数と考えられるが、図5に示すように、得られた η の値は可視化断面の位置 z に対しても系統的に変化している。したがって、ここでは最小自乗法により c と z の一次関数として η を与えることにした。以上により同定したモデルパラメータの値を用いて、式(7)より求めた輝度の計算値と、再度実験を行って得た輝度の実験値を比較する。図6に輝度の実験値と計算値の鉛直分布を示す。実験輝度は、多重散乱の影響により、水深 y 、断面 z が大きくなるにしたがって高くなる。計算値はこの分布の変化をよく再現していることがわかる。ただし、水面付近では両者に誤差があり、濃度推定に影響する可能性がある。

4. 一様濃度場の推定

一様に調整した濃度場での輝度値を用いて式(7)により濃度推定を行った。図7に調整濃度 $c_0=0.04$ (g/l) の濃度推定結果を示す。濃度推定値は、全体的には c_0 に近い値(平均誤差約6%)を示しており、四流束モデルを用いた輝度-濃度関係式は多重散乱の影響する濃度場を良好に再現しているといえる。ただし、水面付近において誤差は若干大きくなっており、上述の輝度分布における誤差が影響していると考えられる。

<参考文献>1) 神田, 宮本, 岩見: 水工学論文集, 第43巻, pp. 767-772, 1999. 2) 神田, 宮本, 山下, 岩井: 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, II-64, 2001. 3) Paul Kubelka: New Contributions to the Optics of Intensely Light-Scattering Materials. Part I, Journal of the Optical Society of America, Volume 38, Number 5, pp. 448-457, 1948.

表2 実験条件

調整濃度 c_0 (g/l)		0.01~0.1
計測断面 z (cm)		1.0~5.0
レーザー	出力 (W)	0.4
	波長 (nm)	488
カメラ	シャッタースピード (sec)	1/60
	フレーム間隔 (fps)	30
1画素の実長 (cm)		0.05

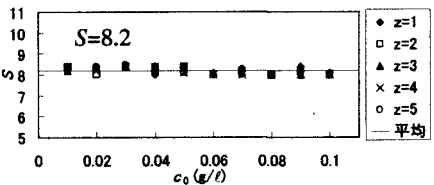


図3 散乱係数 S と調整濃度 c_0 の関係

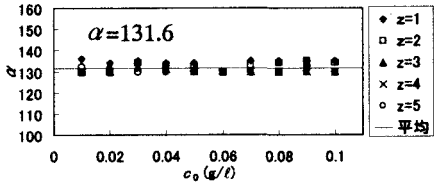


図4 変換係数 α と調整濃度 c_0 の関係

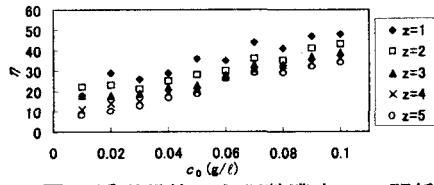


図5 透過長比 η と調整濃度 c_0 の関係

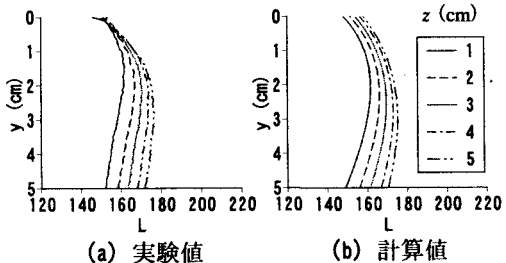


図6 断面中央における輝度の鉛直分布

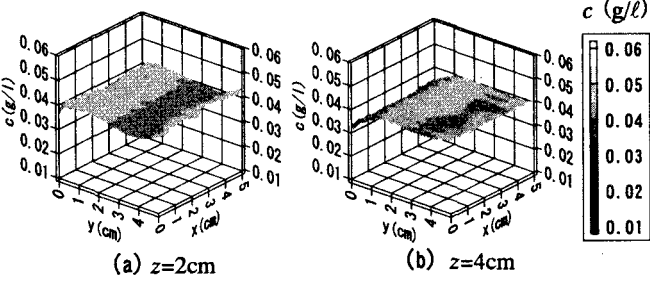


図7 濃度推定結果 ($c_0=0.04$ g/l)