

浮遊物質濃度の画像計測における四流束モデルの適用

神戸大学大学院 学生員 ○山下 健作 神戸大学工学部 フェロー 神田 徹
神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志 大阪府庁 正会員 岩井 康隆

1. はじめに

筆者らは、画像輝度をもとに水中の浮遊物質濃度を計測する手法について検討を行っている。前報¹⁾では、放射伝達方程式を用いて懸濁水中での光の伝播を表現し輝度 - 濃度関係を定式化していたため、多重散乱の項を実験的に同定する必要があった。そこで本報では、多重散乱の影響を明確にするために、光の伝播を直達光と拡散光(多重散乱光)とに分けて表す四流束モデル²⁾を用いることにより、輝度 - 濃度関係を定式化した。また、得られた関係式中に含まれるモデルパラメータを同定し、ほぼ一様な濃度場の推定を行った。

2. レーザースキャニングを用いた可視化実験システムの概要

図1に可視化実験システムの概要を示す。アルゴンイオンレーザー光を光学フィルター(波長 488nm のみ透過)を通したのち、スキャナーによって奥行き(z 方向)に走査する。そのレーザー光をコリメータレンズとシリンドリカルレンズを用いてシート状にし、水槽内に可視化断面を作成する。可視化断面を CCD カメラで撮影し、画像処理ボードを搭載したパソコンに 256 階調の輝度データとして保存する。

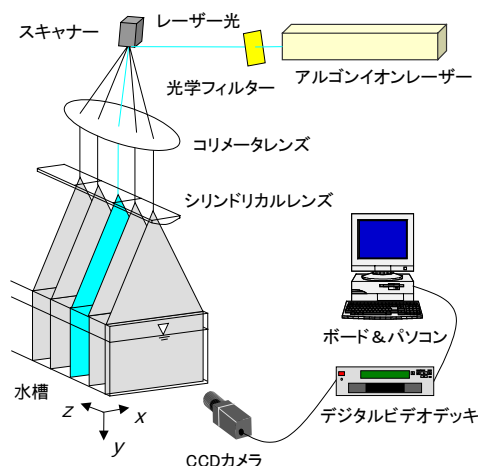


図1 可視化実験システムの概要

3. 四流束モデルによる輝度 - 濃度関係式

(1)対象とする光路 図2に示す光路において、点Pでの画像輝度を考える。レーザーシート光はQP間(y 方向)で浮遊物質による散乱や水分子による吸収によって減衰し、点Pでの浮遊物質(濃度 c)によって散乱する。点Pでカメラ方向に散乱された光はPR間(z 方向)を減衰しながら伝播しカメラに撮影される。この光の伝播過程を以下の四流束モデルによって表現し、輝度 - 濃度関係を定式化する。

(2)四流束モデルの概要 四流束モデルにおける光の伝播過程を図3に示す。四流束モデルでは直達光 I_d 、直達光の底面からの反射光 I_u 、散乱による上向きの拡散光 E_d 、下向きの拡散光 E_u の四つの放射照度によって表している。四流束モデルの基礎方程式は、以下の式(1)～(4)で表される。

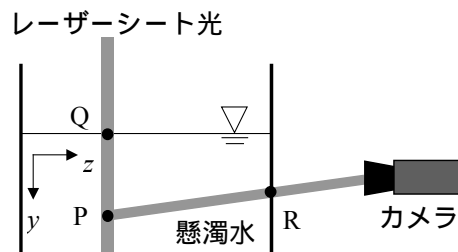


図2 光路図

ここに、 A : 吸収係数、 S : 散乱係数、 p_f : 前方散乱確率、

$$\begin{aligned} \frac{dI_d}{dy} &= -(A + Sc)I_d & (1) & \quad \frac{dI_u}{dy} = (A + Sc)I_u & (2) \\ \frac{dE_d}{dy} &= p_f Sc I_d - \eta(A + p_b Sc)E_d + \eta p_b Sc E_u & (3) \\ \frac{dE_u}{dy} &= -p_b Sc I_d + \eta(A + p_b Sc)E_u - \eta p_b Sc E_d & (4) \end{aligned}$$

ここに、 A : 吸収係数、 S : 散乱係数、 p_f : 前方散乱確率、 p_b : 後方散乱確率、 η : 直達光と拡散光の透過長比、 c : 濃度である。

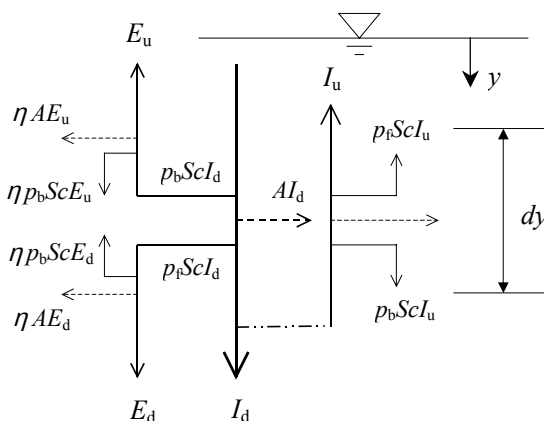


図3 四流束モデルにおける光の伝播過程

キーワード：計測法，画像処理，浮遊物質濃度，画像輝度，光伝播，四流束モデル

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL 078-881-1212 FAX 078-803-6069

(3)輝度 - 濃度関係式 四流束モデルを y 方向と z 方向の光の伝播過程に用いることにより, 輝度と濃度の関係を定式化する. 境界条件は y 方向, z 方向についてそれぞれ以下のである.

$$y \text{ 方向 } E_{yd}(\infty) = E_{yu}(\infty) = 0 \quad (5) \quad z \text{ 方向 } E_{zd}(0) = E_{zu}(0) = \frac{1}{2} \beta (E_{yd} + E_{yu}) \quad (6)$$

ここに, β : z 方向に散乱する割合を表す係数である. また, 本研究では水槽底面を黒く塗装しているため, レーザー反射光はないと仮定した. 得られた輝度 - 濃度関係式を次に示す.

$$L = \alpha (I_y + E_{yd} + E_{yu}) (E_{zd} + E_{zu}) c \quad (7)$$

ここに,

$$I_y = e^{-Jy} \quad (8)$$

$$E_{yd} = \gamma \frac{p_f A S c (\eta - 1) + (\eta p_b + p_f) S^2 c^2}{J^2 - (\eta K)^2} (e^{-\eta K y} - e^{-Jy}) \quad (9)$$

$$E_{yu} = \frac{A + p_b S c - K}{p_b S c} e^{-\eta K y} - \frac{(\eta - 1) J p_b S c}{J^2 - (\eta K)^2} e^{-Jy} \quad (10)$$

$$E_{zd} = \frac{1}{2K} e^{-\eta K z} \left[\left\{ (A + p_b S c + K) - (A + p_b S c - K) e^{2\eta K z} \right\} \left\{ \frac{1}{2\eta K} S c M e^{(J+\eta K)z} + C_1 \right\} + p_b S c (1 - e^{2\eta K z}) (N - C_2) \right] \quad (11)$$

$$E_{zu} = \frac{1}{2K} e^{-\eta K z} \left[\frac{1}{2\eta K} p_b S c (1 - e^{2\eta K z}) e^{-(J+\eta K)z} (M + C_1) - \left\{ (A + p_b S c + K) - (A + p_b S c - K) e^{2\eta K z} \right\} (N - C_2) \right] \quad (12)$$

また, L : 輝度, α , γ : 比例定数, C_1 , C_2 : 積分定数であり, 他の項は表 1 に示す. 関係式中には 8 つのモデルパラメータ (A , S , η , p_f , p_b , α , β , γ) が含まれている.

4. ほぼ一様な濃度場の推定

(1)モデルパラメータの同定 輝度 - 濃度関係式中に含まれる 8 つのモデルパラメータを同定するために, 多重散乱の影響が大きい高濃度のカオリナイト懸濁水を用いて実験を行った.

表 2 に実験条件を示す. 同定は調整濃度 $c_0 = 0.1 \text{ g/l}$ の各断面の中央鉛直輝度分布 (1000 枚平均) を用いて行い, 実験値と輝度 - 濃度関係式による計算値の輝度の誤差が最小となるようにモデルパラメータを決定した. 表 3 にモデルパラメータの同定結果を, 図 4 に実験で得られた輝度と同定したモデルパラメータの値を用いて計算した輝度の鉛直分布を示す. これより, 水面付近を除き, 計算値は良好に実験値を再現していることがわかる.

(2)濃度場の推定 得られたモデルパラメータの同定値を用いて, 濃度によって変化すると考えられる T , η を変化させることにより, $c_0 = 0.01$,

0.05, 0.1 g/l での濃度場の推定を行った. 図 5 に, 推定した鉛直濃度分布 ($z = 2.3 \text{ cm}$) を示す. 推定された濃度は, 水面付近で誤差があるが, ほぼ調整濃度 c_0 に近い値である.

<参考文献> 1) 神田 徹, 宮本仁志, 岩見収二: 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, 1999. 2) 杉森康宏, 坂本 亘: 海洋環境光学, 東海大学出版会, pp. 107-128, 1985.

表 1 関係式中の各項

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

表 2 実験条件

調整濃度 c_0 (g/l)	0.01	0.05	0.1
計測断面 z (cm)	1.3, 2.3, 3.3, 4.3, 5.3		
1画素の実長 (cm)	0.05		
シャッタースピード (sec)	1/60		
フレーム間隔 (PPS)	30		
絞り	4	8	16
レーザー出力 (W)	0.4		
レーザー波長 (nm)	488		

表 3 各モデルパラメータの同定値

A	S	η	p_f	p_b	α	β	γ
0.14	1.4	10.5	0.6	0.4	47900	0.8	5.5

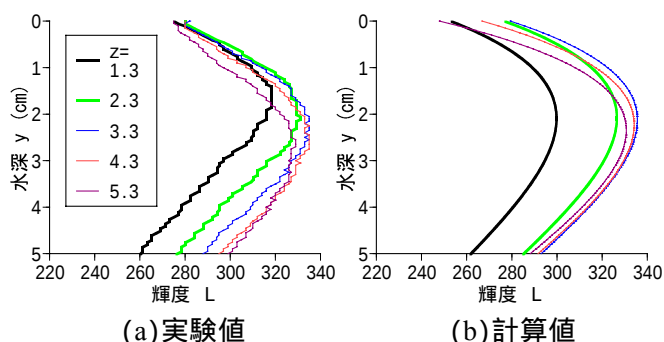


図 4 断面中央の鉛直輝度分布 ($c_0 = 0.1 \text{ g/l}$)

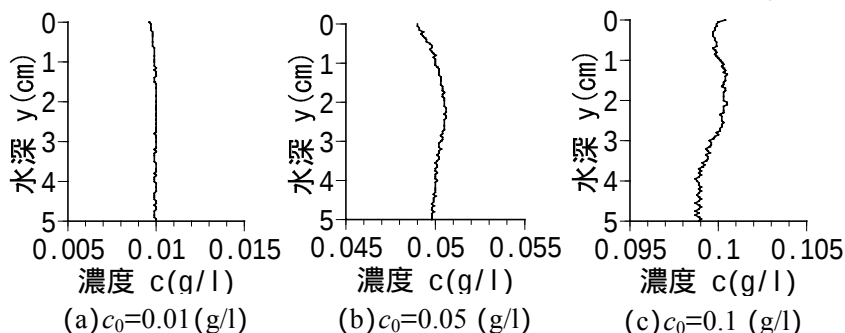


図 5 鉛直濃度分布の推定結果