

神戸大学工学部 フェロー 神田 徹
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 学生員○岩井 康隆

1. はじめに

筆者らは画像の輝度情報を用いた浮遊物質濃度の計測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水中を伝播する光の減衰，多重散乱の影響を輝度－濃度関係式に導入しており，その関係式での多重散乱項を実験により決定する必要があった．本研究では，光の伝播における多重散乱の役割を明確にするために，散乱(多重散乱)の影響を拡散光として取り扱う四流束モデル²⁾を用いて輝度－濃度の関係を定式化する．また，得られた関係式中の各モデル係数をほぼ一様な調整濃度場において同定し，それらの係数を用いて濃度場の推定を行った．

2. 計測システムの概要

図1に画像計測システムの概要を示す．光学フィルターを通ったアルゴンイオンレーザー光をスキャナーにより奥行き方向(z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瞬時の可視化断面を作成する．この可視化断面をCCDカメラにより撮影し，画像処理ボード搭載のパソコンに256階調の輝度データとして保存する．表1に実験条件を示す．

3. 四流束モデルを用いた輝度－濃度関係の定式化

3-1 モデルの概要

四流束モデルにおける基礎方程式は，以下のように表される．

$$\frac{dI_d}{dy} = -(Q + Sc)I_d \quad (1) \quad \frac{dI_u}{dy} = (Q + Sc)I_u \quad (2)$$

$$\frac{dE_u}{dy} = -bScI_d + \eta(Q + bSc)E_u - \eta bScE_d \quad (3)$$

$$\frac{dE_d}{dy} = aScI_d - \eta(Q + bSc)E_d + \eta bScE_u \quad (4)$$

ここに， I_d ：直達光放射照度， I_u ：反射光放射照度， E_d ：下向き拡散光(多重散乱)の放射照度， E_u ：上向き拡散光の放射照度， Q ：吸収係数， S ：散乱係数， a ：前方散乱確率， b ：後方散乱確率， η ：直達光と拡散光の平均透過長比， c ：濃度である．図2に示すように，四流束モデルは直達光 I_d ， I_u および散乱光 E_d ， E_u の四つの放射照度の伝播特性を考えるものであり，多重散乱の影響は E_d ， E_u により考慮されている．なお，本研究では，実験水槽の底面を黒く塗装してあるため，反射光の影響(式(2))は無視できるものと仮定する．

式(1)，(3)，(4)を解くために， y 方向， z 方向の境界条件を以下のように設定する．

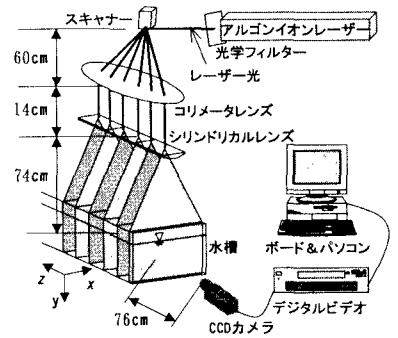


図1 画像計測システムの概要

表1 実験条件

調整濃度 c (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		

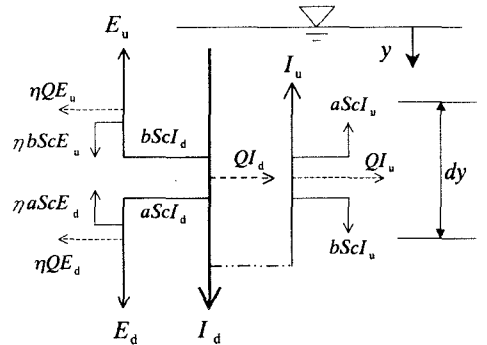


図2 四流束モデルの概要

$$\textcircled{1} \ y \text{ 方向 } E_{yd}(\infty) = E_{yu}(\infty) = 0 \quad (5)$$

$$\textcircled{2} \ z \text{ 方向 } E_{zd} = E_{zu} = \frac{1}{2} w (E_{yd} + E_{yu}) \quad (6)$$

ここに、 w : z 方向に散乱する割合を表す係数である。

3-2 輝度-濃度関係式

以上の四流束モデルを、 y , z 方向の光の伝播過程に取り入れるることにより、輝度と濃度の関係を次式のように定式化した。

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

ここに、

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

$$E_{yu} = \frac{Q + bSc - K}{bSc} e^{-\eta Ky} - \frac{(\eta - 1)JbSc}{J^2 - (\eta K)^2} e^{-Jy} \quad (9)$$

$$E_{yd} = v \frac{aQSc(\eta - 1) + (\eta b + a)S^2c^2}{J^2 - (\eta K)^2} (e^{-\eta Ky} - e^{-Jy}) \quad (10)$$

$$E_{zu} = \frac{1}{2K} e^{-\eta Kz} \left[\frac{1}{2\eta K} bSc(1 - e^{2\eta Kz}) e^{-(J+\eta K)} (M + C_1) - \left\{ (Q + bSc + K) - (Q + bSc - K)e^{2\eta Kz} \right\} (N - C_2) \right] \quad (11)$$

$$E_{zd} = \frac{1}{2K} e^{-\eta Kz} \left[\left\{ (Q + bSc + K) - (Q + bSc - K)e^{2\eta Kz} \right\} \frac{1}{2\eta K} ScMe^{(J+\eta K)} + C_1 + bSc(1 - e^{2\eta Kz})(N - C_2) \right] \quad (12)$$

また、 L : 輝度、 T , v : 比例定数、 C_1 , C_2 : 積分定数であり、その他の項は表 2 に示す。以上より式中には T , Q , S , η , w , a , b , v の 8 つのモデルパラメータが含まれる。

4. モデル係数の同定および濃度推定

多重散乱の影響が大きい調整濃度 $c_0 = 0.1 \text{ g/l}$ の輝度分布を用いて、輝度-濃度関係式中に含まれる 8 つのパラメータを求めた。図 3 に、用いた輝度分布の一例を示す。ここでは、実験値と計算値との輝度の差が全断面で最小となるように係数を同定した。

図 4 に断面中央での鉛直輝度分布(実験値と計算値)を、表 3 に同定した係数の値を示す。図 4 より、得られた関係式は、 $z = 1.3 \text{ cm}$ の断面を除き、実験値をよく再現している。

次に同定した係数の値を用いて、 T , η を濃度により調整することで、濃度場の推定を行った。図 5 に $z = 2.3 \text{ cm}$ における $c_0 = 0.01 \text{ g/l}$, $c_0 = 0.05 \text{ g/l}$, 0.1 g/l の濃度推定結果を示す。水面付近で調整濃度 c_0 からの差が大きい、ほぼ調整濃度 c_0 が推定できているのがわかる。各調整濃度における最大偏差は 3.8~5.6%であった。

<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 2 関係式中の各項

$J = (Q + Sc)$	
$K = \sqrt{Q(Q + 2bSc)}$	
$M = \frac{1}{2\eta K} Sc e^{-(J+\eta K)z} \left\{ \frac{a(Q-K) + bSc}{J + \eta K} - \frac{a(Q+K) + bSc}{J - \eta K} e^{2\eta Kz} \right\}$	
$N = \frac{1}{2K} bSc e^{-(J+\eta K)z} \left\{ \frac{J-K}{J - \eta K} e^{2\eta Kz} - \frac{J+K}{J + \eta K} \right\}$	

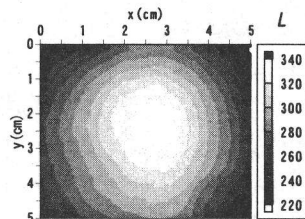
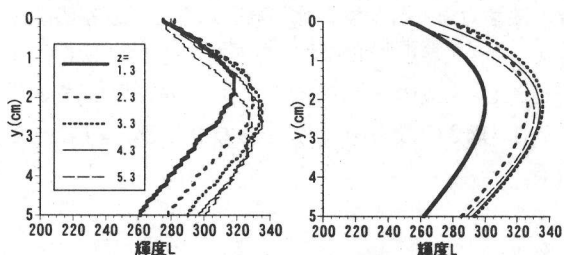


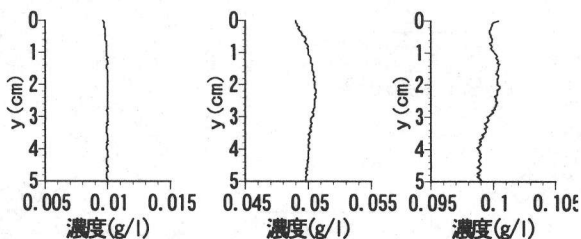
図 3 平均輝度分布 ($c_0 = 0.1 \text{ g/l}$, $z = 3.3 \text{ cm}$)

表 3 係数の最適値

T	Q	S	η	w	a	b	v
47900	0.14	1.4	10.5	0.8	0.6	0.4	5.5



(a) 実験値 (b) 計算値
図 4 鉛直輝度分布



(a) $c_0 = 0.01 \text{ g/l}$ (b) $c_0 = 0.05 \text{ g/l}$ (c) $c_0 = 0.1 \text{ g/l}$
図 5 鉛直濃度分布の推定結果