

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

AN IMAGE PROCESSING METHOD FOR MEASURING SUSPENDED SOLID
CONCENTRATION CONSIDERING EFFECT OF MULTIPLE SCATTERING

神田 徹¹・宮本仁志²・岩見収二³

Tohru KANDA, Hitoshi MIYAMOTO and Shuji IWAMI

¹正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 修士(工学) 神戸大学助手 工学部建設学科 (同上)

³正会員 修士(工学) (株)建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋本町4-9-11)

In this study, we propose an image processing technique for measuring the temporal and spatial distribution of the suspended solid concentration in water. An equation, which relates luminance in the image to the concentration of the suspended solid in water, is derived by applying the radiative transfer equation that represents the effect of the multiple scattering of light as well as that of the light attenuation. The optimized values of the coefficients in its equation are experimentally determined from luminance of image on the uniform concentration condition. In order to examine the accuracy of the present method, the concentration distributions are measured with the quasi-uniform concentration in water. The result of measurement shows that this method is useful for estimating the rather high concentration of suspended solid.

Key Words : *measurement, image processing, suspended solid concentration, multiple scattering, luminance*

1 はじめに

貯水池における濁水の長期化現象や水底堆積物(底泥)の巻き上げによる水域の貧酸素化・富栄養化などに見られるように, 水中での微細粒子の浮遊・滞留は水域の水質・生態系に少なからず悪影響を及ぼす. これらの問題の解決にあたっては, 水域における浮遊物質の物性把握とともに, 移流・乱れ・波動など流れの動力学的な特性が微細浮遊粒子の発生, 滞留, 輸送, 消散などどのように関係するかを明らかにすることが重要である. そのためには, 浮遊物質濃度の時空間分布を把握せねばならないが, その濃度分布の測定手法は, 実水域はもとより室内水理実験においても未だ十分なレベルに達しておらず, 新たな計測法の開発が待たれている.

本研究では, 実験室水槽での浮遊物質濃度を対象とし, 画像処理技術を適用して, 画像の輝度情報から浮遊物質濃度の瞬時的・空間的な濃度分布を推定する手法の開発

を目標にしている. 前報¹⁾では, 光の伝播を表す基礎方程式としてLambert-Beerの法則を適用したため, 光の多重散乱の影響を実験定数項として導入せざるを得なかった. そこで本研究では, まず, 画像輝度が濃度場における光の減衰のみならず光の多重散乱の影響を受けるような比較的高濃度場において, それらの光の伝播特性を表す基礎方程式(放射伝達方程式)を適用することにより画像輝度-浮遊物質濃度関係式の定式化を行う. 次に, その関係式中に含まれる未知係数を実験的に同定し, それらの同定値を用いてほぼ一様な濃度場での可視化画像から濃度の推定を行い, 本計測手法の精度について検討を行った.

なお, 水中の物質濃度の面的計測法としては, 医療技術から発展したCTの原理を適用した日野と佐藤²⁾の手法, 海洋光学の分野において希薄な植物プランクトン濃度を対象にしたPalowitch と Jaffe³⁾の画像計測手法などの研究が報告されているが, 比較的高濃度場における浮遊物質に対して画像情報を用いる計測法は少ない.

2 輝度－濃度関係式の定式化

(1) 基礎方程式(放射伝達方程式)

ある光路上を伝播する光強度の変化を考えた場合、波長 λ の入射光強度を I_λ 、距離 ds だけ隔たった点への入射光強度を $I_\lambda + dI_\lambda$ とすると、入射光強度の変化量 dI_λ は、媒質中で消散される減衰量 $(-\kappa_\lambda \rho I_\lambda ds)$ と、その体積内で生じる放射の射出(真の射出)と他の方向から考えている入射方向への散乱(見かけの射出)による増加量 $(j_\lambda \rho ds)$ の和になる。したがって、濃度場における光の減衰・多重散乱などの光の伝播過程を表現する放射伝達方程式は以下のようになる⁴⁾。

$$\begin{aligned} dI_\lambda &= -\kappa_\lambda \rho I_\lambda ds + j_\lambda \rho ds \\ &= -\kappa_\lambda \rho I_\lambda ds + \kappa_\lambda S_\lambda \rho ds \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、

$$S_\lambda \equiv j_\lambda / \kappa_\lambda \quad (2)$$

$$\kappa_\lambda = \chi_\lambda + \alpha_\lambda = \chi_\lambda^w + \chi_\lambda^s + \alpha_\lambda^w + \alpha_\lambda^s \quad (3)$$

ここに、 κ_λ : 質量消散係数、 j_λ : 質量射出係数、 ρ : 媒質の密度、 S_λ : 放射の源泉関数、 χ_λ : 質量吸収係数、 α_λ : 質量散乱係数、 χ_λ^w : 水分子による吸収係数、 χ_λ^s : 懸濁粒子による吸収係数、 α_λ^w : 水分子による散乱係数、 α_λ^s : 懸濁粒子による散乱係数である。

(2) 画像輝度－浮遊物質濃度関係式

放射伝達方程式(式(1))を対象とする浮遊物質濃度場に適用することで、画像輝度と浮遊物質濃度の関係を定式化する。

まず、図-1のような光路上における式(1)の解を考える。ここで、源泉関数 S_λ は本来、求めるべき放射強度 I_λ の関数となるが、その値が既知であると仮定することで式(1)は簡単な1階常微分方程式となる。したがって、その解は次のように容易に求まる。

$$\begin{aligned} I_\lambda(r) &= I_\lambda(0) e^{-\tau(r,0)} \\ &\quad + \int_0^r S_\lambda(s) e^{-\tau(r,s)} \kappa_\lambda \rho ds \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $I_\lambda(r)$ 、 $I_\lambda(0)$: それぞれ $s=r$ 、 0 への入射光強度、 $S_\lambda(s)$: $s=0 \sim r$ 間の任意の点での放射の源泉関数である。また、 τ は光学的厚さであり次式で表される。

$$\tau(r, r') = \int_{r'}^r \kappa_\lambda \rho ds \quad (5)$$

ここで、式(4)の物理的意味を考えると、右辺第1項は入射光 $I_\lambda(0)$ が $s=0 \sim r$ の間で消散して r に入射する強度、すなわち光の減衰項であり、一方、第2項は区間 $[0, r]$ 上の任意点 s からの射出が r から r の間で消散した強

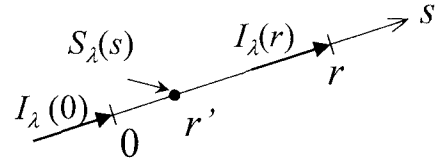


図-1 光伝播の光路図

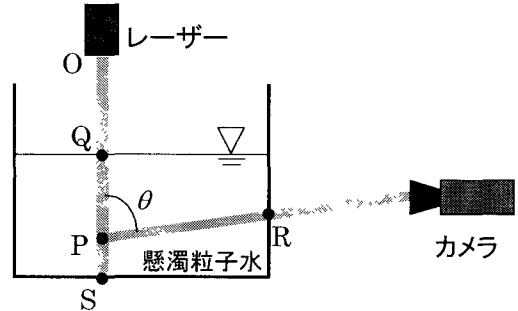


図-2 懸濁粒子水中における光路図

度を区間に関して積分したもの、すなわち光の多重散乱項と解釈できる。

次に、図-2のように、懸濁粒子水(カイリナイト水溶液)が入った水槽の上方からレーザー光を入射させて断面 QS を可視化し、水槽の側方からビデオカメラで可視化断面を撮影する場合を考え、得られた画像の点 P における輝度と濃度の間の関係式を導く。ここで、本研究では比較的高濃度場を取り扱うため、懸濁粒子による散乱が光の減衰に対して支配的であると仮定する($\kappa_\lambda = \alpha_\lambda^s = \alpha$)。また、密度 ρ の代わりに懸濁粒子の濃度 c を考えると、式(5)の光学的厚さ τ は次のようになる。

$$\tau(r, r') = \int_{r'}^r \alpha c ds \quad (6)$$

ここで、レーザー光源を用いているため、水面への入射光および懸濁粒子水中における散乱光の波長は一定であり、以後、波長を表す添字 λ は省略する。

点 Q への入射光強度を I_Q としたとき、点 P の入射光強度 I_P は、式(4)より次のようになる。

$$I_P = I_Q e^{-\tau(p,q)} + \int_q^p S(s) e^{-\tau(p,s)} \alpha c(s) ds \quad (7)$$

ここに、 $S(s)$ 、 $c(s)$: それぞれ光路上の任意の点における源泉関数、濃度、 p 、 q : それぞれ光路 QP 上の点 P、Q の位置座標である。

次に、点 P 周辺の微小体積要素 dV から R 方向 ($\angle QPR = \theta$) への散乱光強度 $I_P(\theta)$ は次式で示される。

$$\begin{aligned} I_P(\theta) &= I_P c_P dV i_\theta \\ &= \left\{ I_Q e^{-\tau(p,q)} + \int_q^p S(s) e^{-\tau(p,s)} \alpha c(s) ds \right\} \\ &\quad \cdot c_P dV i_\theta \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 c_P : 点 P の濃度、 i_θ : 位相関数である。

式(8)で表される散乱光強度 $I_p(\theta)$ が光路PRで減衰と多重散乱の影響を受けてカメラに入射する。輝度と光の強度が線形関係にあると仮定することにより、計測される点Pの輝度 L_p は次式のように表すことができる。

$$L_p = k \{ I_Q e^{-\tau(p,q)} e^{-\tau(r,p)} c_p dV i_\theta + \int_q^p S(s) e^{-\tau(p,s)} \alpha c(s) ds \cdot e^{-\tau(r,p)} \cdot c_p dV i_\theta + \int_p^r S(s) e^{-\tau(r,s)} \alpha c(s) ds \} = K G c_p + \beta \quad (9)$$

ここに、 k ：比例係数、 r ：光路上の点Rの位置座標である。また、 K ：散乱角 θ と入射光強度によって決まる係数、 G ：光の減衰項、 β ：多重散乱項であり、それぞれ以下の式で表される。

$$K = k I_Q dV i_\theta \quad (10)$$

$$G = e^{-\tau(p,q)} e^{-\tau(r,p)} \quad (11)$$

$$\beta = k \{ \int_q^p S(s) e^{-\tau(p,s)} \alpha c(s) ds \cdot e^{-\tau(r,p)} \cdot c_p dV i_\theta + \int_p^r S(s) e^{-\tau(r,s)} \alpha c(s) ds \} \quad (12)$$

式(9)が点Pにおける輝度 L_p と濃度 c_p の関係を与える式であり、散乱係数 α 、係数 K 、および多重散乱項 β が与えられれば、輝度 L_p から濃度 c_p を求めることができる。

(3) 輝度－濃度関係式の離散化および未知係数について
可視化画像の輝度値は各画素、各断面ごとに離散的に得られるため、式(9)を以下のように表現し直す。

$$L(x, y, z) = K \left\{ \exp \sum_{i=1}^{y-1} (-\alpha c(x, i, z) \Delta y) \right\} \left\{ \exp \sum_{j=1}^{z-1} (-\alpha c(x, y, j) \Delta z) \right\} \cdot c(x, y, z) + \beta(x, y, z) = K \cdot G(x, y, z) \cdot c(x, y, z) + \beta(x, y, z) \quad (13)$$

ここに、 Δy ：1画素の実長、 Δz ：計測断面間隔、 $G(x, y, z)$ ：光の減衰項である。

ミーの散乱理論によると、散乱係数 α は、実験で用いた懸濁粒子の径（中央粒径 $3.5\mu\text{m}$ ）とレーザー波長（ 488nm ）の比および粒子の屈折率によって決定される。本研究では、レーザーの波長が一定であること、また、懸濁粒子（カオリナイト粒子）の粒度分布は空間的に均質であると仮定することから、散乱係数 α の値は一定値をとるものとした。また係数 K については、その値は散乱角 θ の関数となっている。ここでは、カメラへの入射光

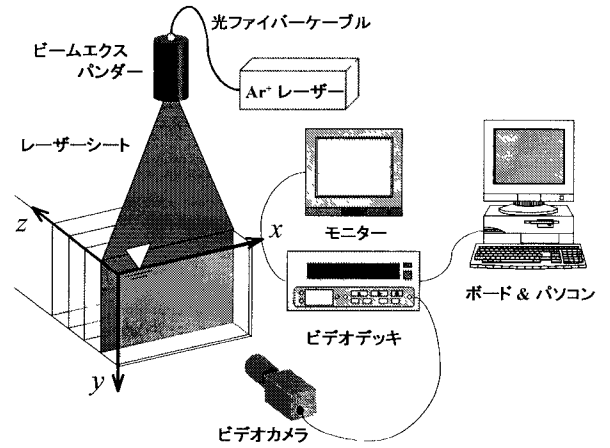


図-3 可視化実験システムの概要

表-1 実験条件

調整濃度 c_0 (g/ℓ)	0.3, 0.2, 0.1
計測断面 z (cm)	0, 1, 2, 3, 4, 5
シャッタースピード (sec)	1/500
フレーム間隔 (PPF)	240
レーザーの出力 (W)	0.8
レーザーの波長 (nm)	488
光源-水面間の距離 (cm)	162
1画素の実長 (cm)	0.05

は可視化断面に垂直方向の散乱光であると仮定することにより、係数 K の値も一定値をとるものとする。多重散乱項 β は、式(12)より、懸濁粒子水中における光の伝達経路上の濃度と位相関数によって決まる複雑な関数であるため、一般には空間位置によって違った値をとる。ただし、ここでは、一様濃度場において平行均質な光が水面に入射する場合を考えるため、多重散乱項 β は位置座標 (y, z) の関数として取り扱うことができるものとした。また、光が水面に到達するまでの間と水槽前面からカメラの間の空気による光の減衰は無視できるものとする。

3. 未知係数の同定

(1) 可視化実験の概要

輝度－濃度関係式(式(9))中の未知係数 α 、 K 、 β を実験的に同定するために、水槽内で濃度が均一になるよう十分に攪拌したカオリナイト水を用いて可視化実験を行った(以下、このときのカオリナイトと水の配合割合から算出される水槽内の平均的な重量濃度を調整濃度と呼ぶことにする)。画像計測システムの概要を図-3に、実験条件を表-1にそれぞれ示す。得られる可視化画像は、 512×512 画素、256階調の輝度データとしてパソコンに保存し、水槽側壁の影響のない断面中央の幅10cmを解析対象とした。

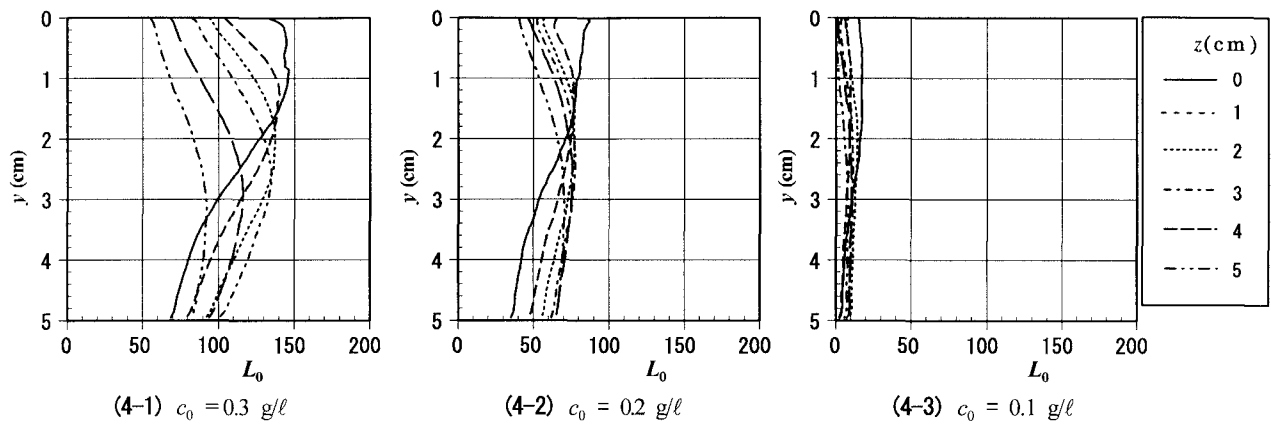


図-4 断面中央における輝度の鉛直分布 ($x = 5$ cm)

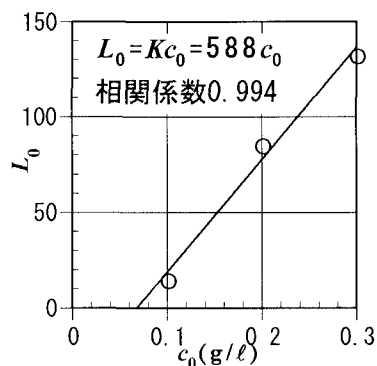


図-5 水槽最前面の水面における画像輝度と調整濃度の関係 ($y = z = 0$ cm)

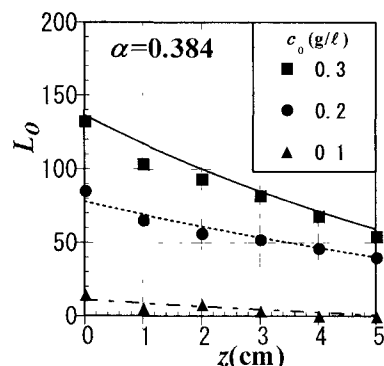


図-6 水面における輝度分布 ($y = 0$ cm)

(2) 係数同定のための画像輝度について

水槽内の浮遊物質濃度を一様にするためにカオリナイト水溶液を十分に攪拌しているが、攪拌による水溶液の流動に伴い水槽内の空間的な濃度分布は時々刻々変化する。したがって、得られる可視化断面の輝度分布は瞬時の空間的な濃度分布を反映したものとなるため、ここでは前報¹⁾と同じく、約4.5秒間の画像(1089枚)を平均することにより、一様濃度分布に対応する輝度分布が得られているものとした。

断面中央($x = 5$ cm)における輝度 L_0 の鉛直分布を図-4に示す。調整濃度 c_0 が高くなるにしたがって浮遊物質の粒子数が多くなるため、同一断面位置(z)における輝度値は高くなる。また、調整濃度 c_0 が高い場合、断面(z 軸方向)による輝度値の差は大きく、濃度が低くなるにしたがって輝度値の差は小さくなる。これは、濃度が低いほど奥行き方向(z 軸方向)の光の減衰が小さくなるためである。水深方向(y 軸方向)については、多重散乱の影響により、輝度分布は単調減少ではなく、ある水深で極大値をとることが確認できる。

(3) 係数 K

得られた輝度値を用いて未知係数を同定する。

水槽最前面の水面($y = z = 0$ cm)において、光の減衰・多重散乱の影響が無視できるとすれば、式(13)は次のようになる。

$$L(x) = K c(x) \quad (14)$$

図-5に、水槽最前面の水面($y = z = 0$ cm)における輝度 L_0 と調整濃度 c_0 の関係を示す。図-5の輝度値から上式(14)を用いて最小二乗法によって係数 K を同定した。図-5には回帰直線を併示してある。ここで、回帰直線の切片が負の値をとることになるが、これは画像処理ボードのA/D変換特性に起因すると考えられるため、切片の値が0となるように輝度値を調整した。なお、以下の係数同定においては、調整後の輝度値を使用する。

(4) 散乱係数 α

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、一様濃度場に対しては、式(13)は光の減衰のみを考慮して、次式のように表すことができる。

$$L_0(z) = K G(z) c_0 \quad (15)$$

ただし、

$$G(z) = \exp(-\alpha c_0 z \cdot \Delta z) \quad (16)$$

水面($y = 0$ cm)における輝度分布から、式(15)、(16)を用いて最小二乗法により散乱係数 α を同定した。

図-6に、水面における輝度分布とその回帰曲線を調整濃度 c_0 ごとに示す。この図より、全ての調整濃度 c_0 において、同定した散乱係数 α は光の減衰を良好に表現し得ることが確かめられる。

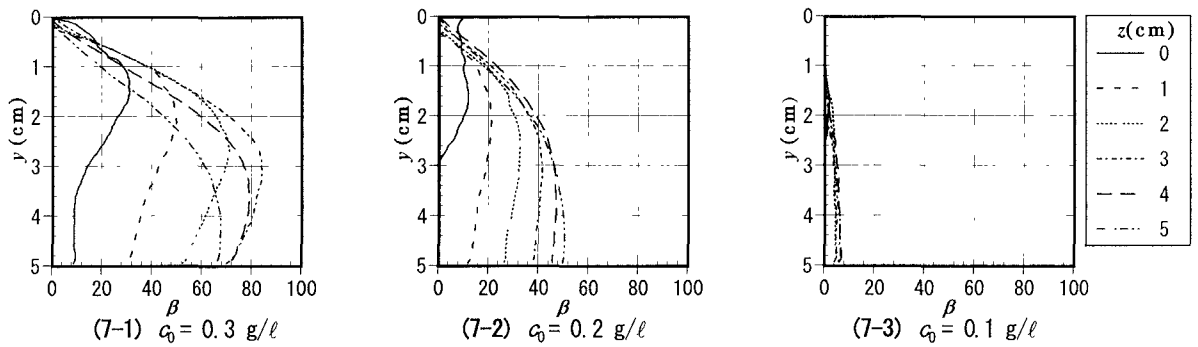


図-7 多重散乱項の鉛直分布

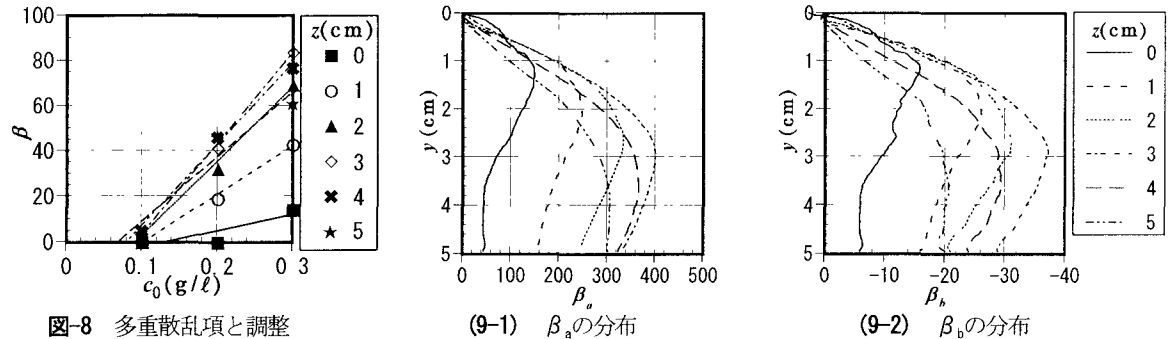


図-8 多重散乱項と調整濃度の関係 ($y=3\text{cm}$)

図-9 多重散乱項の線形回帰式における係数の鉛直分布

(5) 多重散乱項 β

一様濃度場においては、輝度－濃度関係式は次式のように表すことができる。

$$L(y, z) = K \exp\{-\alpha c_0 (y \Delta y + z \Delta z)\} c_0 + \beta(y, z) \quad (17)$$

同定した散乱係数 α と係数 K を用いることで、式(17)より、多重散乱項 β は次のように調整濃度ごとに評価できる。

$$\beta(y, z) = L(y, z) - K \exp\{-\alpha c_0 (y \Delta y + z \Delta z)\} c_0 \quad (18)$$

図-7に、多重散乱項 β の分布を調整濃度 c_0 ごとに示す。水面の極く近傍においては、多重散乱項 β は調整濃度 c_0 によらずほぼ0に近い値をとり、多重散乱の影響が極めて小さいことが確認できる。また、調整濃度 c_0 が高くなるにしたがい、多重散乱項 β の値は大きくなる。奥行き方向(z 軸方向)においては、調整濃度 $c_0=0.3\text{g/l}$ (図-(7-1))の場合、 $z=3\text{cm}$ の断面で多重散乱項 β は最大となるが、調整濃度 $c_0=0.2\text{g/l}$ (図-(7-2))の場合では、多重散乱項 β は奥行き方向に単調増加する傾向を示す。また、水深方向 (y 軸方向) については、多重散乱項 β はある深さで極大値をとり、奥行き方向に向かって極大値の現れる水深は深くなる傾向を示す。

上述のように多重散乱項 β は浮遊物質濃度によって変化するため、次に、濃度と多重散乱項の関係を規定できるかどうかを調べた。図-8に各断面における多重散乱項 β と調整濃度 c_0 の関係 ($y=3\text{cm}$) を示す。同図には、 c_0 と β の回帰直線を併示している。これより、 c_0 と β の間には強い正の相関があることが確認できる。

そこで、最小二乗法により多重散乱項 β を次式のように単純な線形式で近似した。

$$\beta(y, z) = \beta_a(y, z) c_0 + \beta_b(y, z) \quad (19)$$

図-9に得られた β_a と β_b の鉛直分布を示す。

4. ほぼ一様な濃度場への本計測手法の適用

濃度が水槽内ではほぼ一様になるように攪拌している濃度場を対象として、同定した各係数を用いて、時間平均を施した画像輝度分布から浮遊物質濃度分布を求める。

(1) 濃度の計算方法

輝度－濃度関係式(式(13))と同定した各係数 α , K , β を用いると、浮遊物質濃度は次式により算出できる。

$$c(x, y, z) = \frac{L(x, y, z) - \beta_b(y, z)}{K G(x, y, z) + \beta_a(y, z)} \quad (20)$$

計算は、光の減衰および多重散乱の影響がない水槽前面の水面 ($y = z = 0\text{cm}$) から始めて、順次水深方向 (y 軸方向) および奥行き方向 (z 軸方向) に向かって行う。

(2) 画像輝度の空間分布特性

得られた鉛直断面内の輝度分布の例を図-10に示す。輝度値は、水槽前面から奥の断面にいくほど全体的に低い値となる。また、水槽前面 ($z=0\text{cm}$) の輝度値は水面 ($y=0\text{cm}$) で最も高く、水深方向に減少している。これらの輝度値の減少は光の減衰の影響によるものと考えられる。一方、 $z=2, 5\text{cm}$ の断面においては、多重散乱の影響

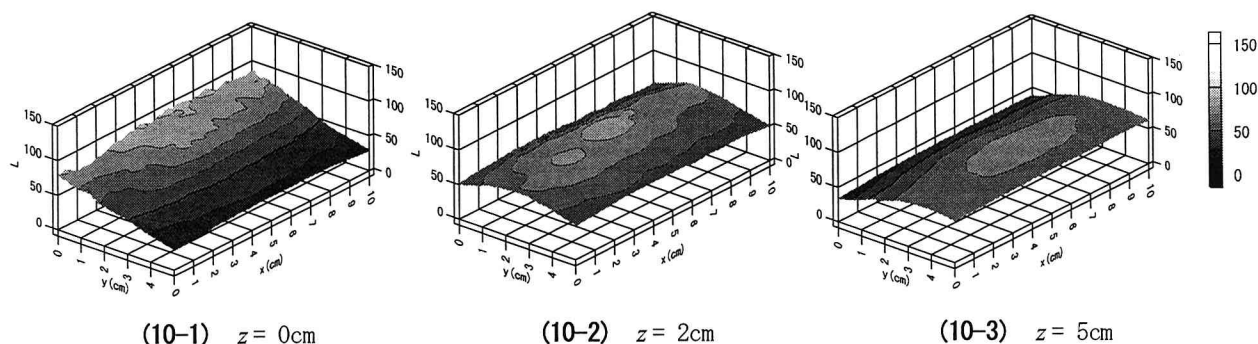


図-10 画像輝度の空間分布特性 (調整濃度 $c_0=0.2\text{g}/\ell$)

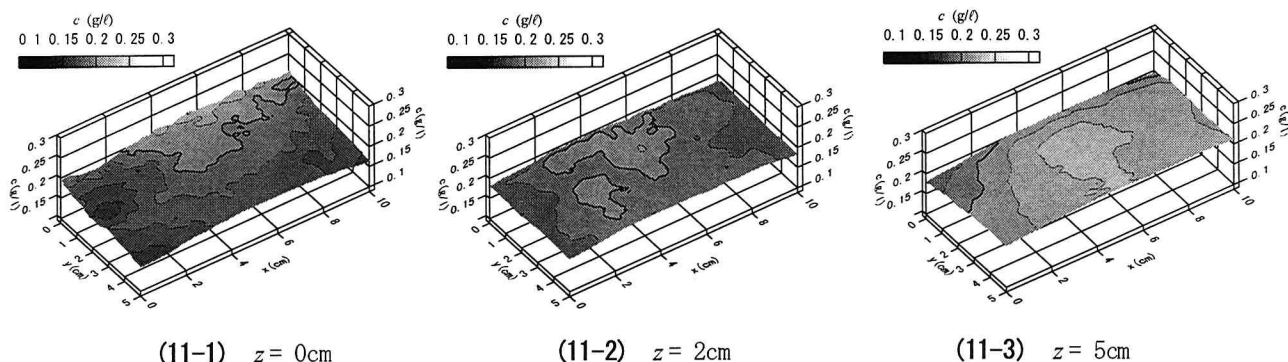


図-11 濃度分布の推定結果 (調整濃度 $c_0=0.2\text{g}/\ell$)

響により、輝度分布はある水深で極大値をとる。極大値の現れる水深は、断面が奥行き方向にいくほど深い位置となる。なお、すべての輝度分布において、水槽中央部に比べて両端付近の輝度値がやや低く計測されているが、これは両端付近の入射光がやや弱いためと考えられる。

(3) 濃度分布の推定結果

図-11に、濃度分布の推定結果の例を示す(図-10の輝度分布に対応)。上述の輝度分布は光の減衰・多重散乱の影響によって空間的に大きく変動するが、対応する各断面の濃度分布は調整濃度値 c_0 に近いほぼ様な分布が得られている。推定濃度分布の標準偏差は約 $0.01\text{g}/\ell$ であった。なお、x軸方向の両端部において濃度がやや低く推定されているが、これは上述の入射光の非均質性が影響していると考えられる。

5. 結 論

画像輝度から浮遊物質濃度を推定する計測手法に関して検討を行った。得られた成果を以下に列挙する。

- ①光の減衰のみならず多重散乱の影響を表現する放射伝達方程式を適用することで、比較的高濃度場における輝度-濃度関係式を誘導した。関係式は、光の伝播経路上での光の減衰の項と多重散乱の項から構成される。
- ②一様濃度場での画像輝度を用いて、関係式中の未知係数を同定した。散乱係数 α は多重散乱の影響のない水

面の輝度を用いて同定した。多重散乱項 β は濃度が高いほど大きい値を取り、ある水深で極大値が現れる。

- ③本手法をほぼ一様な濃度場に適用した結果、比較的良好に空間的な濃度場を推定できることが確認できた。

今後は、非一様濃度場における浮遊物質濃度の推定手法について検討を行う予定である。

謝辞：可視化実験において神戸大学大学院生 森信広一君の御協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 神田 徹, 宮本仁志, 東野 誠, 岩見収二: 画像の輝度情報を用いた浮遊泥濃度の計測, 水工学論文集, 第42巻, pp. 553-558, 1998.
- 2) 日野幹雄, 佐藤行成: C T型レーザー濃度計 - 仮想荷重法の応用による逆問題の解 -, 水工学論文集, 第42巻, pp. 565-570, 1998.
- 3) Palowitch A. W. and Jaffe J. S.: Three-dimensional reconstruction of ocean chlorophyll distributions from underwater serial fluorescence images, *Ocean Optics XII*, Proc. SPIE, Vol.2258, pp.56-66, 1994.
- 4) 杉森康宏, 坂本 亘: 海洋環境光学, pp. 41-50, 東海大学出版会, 1985.

(1998. 9. 30受付)