

建設技術研究所 正 員 岩見収二
 神戸大学工学部 正 員 宮本仁志
 神戸大学工学部 正 員 神田 徹

1. はじめに

水域における浮遊物質の瞬時的・空間的な濃度分布特性の把握を目的に、筆者らは画像の輝度情報を用いた浮遊泥濃度の計測法の検討を行っている。比較的高濃度場を光が伝播するとき、画像輝度は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反映したものとなる¹⁾。本稿では、それらの光の伝播特性を表す放射伝達方程式を用いて輝度と濃度の関係を定式化し、式中に含まれる未知係数を実験的に同定した。さらに、それらの同定値を用いて一様に調整した濃度場を計測し、本計測法の精度について検討を行った。

2. 光の減衰・多重散乱の影響を考慮した輝度-濃度関係式

懸濁水中の微小距離を光が伝播するとき、光の強度変化は次の放射伝達方程式で表される。

$$dI = -\alpha c I ds + j c ds \quad (1)$$

ここで、 dI ：光強度変化、 c ：懸濁水濃度、 α ：散乱係数、 I ：入射光強度、 j ：射出係数、 ds ：懸濁水中の微小距離である。右辺第二項を無視すると、上式は光の減衰のみを考慮した Lambert-Beer の法則に帰着する。図1の点Pにおける輝度 L_P と濃度 c_P の関係は、光路 QPR に式(1)を適用することにより、次式で表される。

$$L_P = K \exp\left(-\int_Q^P \alpha c(s) ds\right) \exp\left(-\int_P^R \alpha c(s) ds\right) c_P + \beta \quad (2)$$

式(2)の右辺第一項は光路上での光の散乱による減衰の影響を、第二項の β は多重散乱の影響をそれぞれ表す。

式中の係数 K 、散乱係数 α 、多重散乱項 β を実験的に同定することにより、輝度 L_P から濃度 c_P が推定できる。

3. 実験方法および画像輝度分布

式(2)の各係数を同定するために、一様に調整した濃度場（調整濃度 c_0 ）の画像輝度分布を計測する。画像計測システムおよび画像の取得方法は、筆者らの既往の研究¹⁾と同様である。懸濁水の調整濃度 c_0 は 0.3, 0.2, 0.1 g/l の3ケースとし、計測断面は水槽前面から奥行方向 (z 軸方向) へ 1cm ごとに 0~5cm の6断面とした。得られた輝度の鉛直分布の例を図2に示す。輝度は水深方向 (y 軸方向) に単調減少ではなく、多重散乱の影響によりある深さで極大値をとる分布となる。

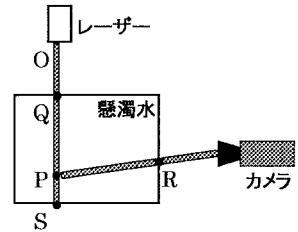


図1 光路図

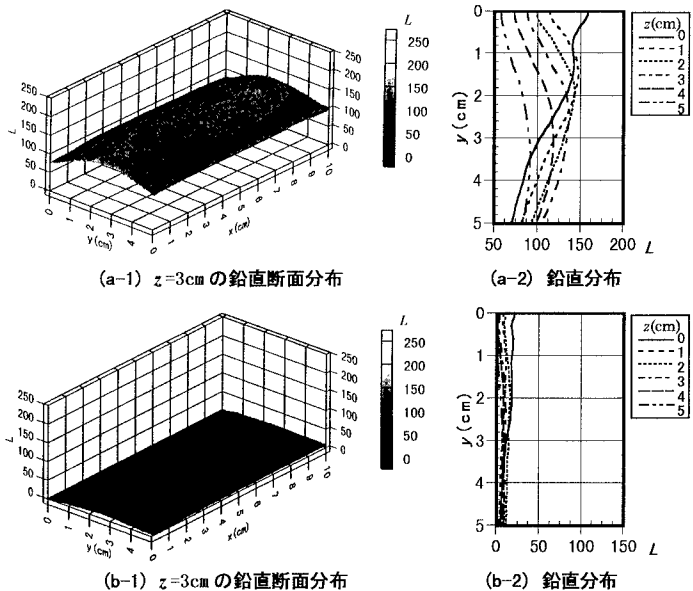


図2 輝度分布の例：(a) $c_0=0.3$ g/l, (b) $c_0=0.1$ g/l；(x: 横断方向, y: 水深方向)

キーワード：浮遊泥、計測法、画像、輝度、濃度、多重散乱

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL 078-881-1212 FAX 078-803-1050

4. 係数の同定

実験により得られた画像輝度を用いて式(2)の未知係数を同定する。

4.1 係数 K 水槽最前面の水面 ($y=z=0\text{cm}$) において、光の減衰、多重散乱の影響が無視できると仮定すると、式(2)は次のようになる。

$$L = Kc \quad (3)$$

ここでの輝度と濃度の関係より、係数 K が同定できた(同定値: $K=588$)。

4.2 散乱係数 α 水面において多重散乱の影響が無視できると仮定すると、式(2)は光の減衰の影響のみを考慮して、式(4)のように表すことができる。

$$L = K \exp(-\alpha c z \cdot \Delta z) c \quad (4)$$

水面の輝度分布から、式(4)を用いて最小二乗法により α を同定した (同定値: $\alpha=0.384$)。

4.3 多重散乱項 β K , α の同定値を用いて、式(2)より多重散乱項 β を算出した。調整濃度 $c_0=0.3, 0.1\text{g/l}$ における多重散乱項 β の鉛直分布を図3に、輝度 L に対する多重散乱項 β の割合を図4に示す。多重散乱項 β は調整濃度が高いほど大きな値を示している。また、調整濃度 $c_0=0.3\text{g/l}$ の場合、水深方向に極大値が存在する分布となっている。調整濃度 $c_0=0.1\text{g/l}$ の場合は、多重散乱の影響はほとんど現れていない。このように多重散乱項 β は濃度 c によって変化するため、両者の関係を規定する必要がある。図5に β と c の関係の一例を示す。水面近傍を除く点で、 β と c の間には図5に示すような非常に強い正の相関が確認できたため、最小二乗法を用いて各点 (y, z) ごとに β と c の関係を線形近似した。

5. 一様濃度場における計測結果

同定した各係数を用いて、一様濃度場 ($c_0=0.3, 0.1\text{g/l}$) を対象に輝度分布から濃度分布を求めた。濃度計測結果の例を図6に示す。画像輝度は図2に示すように、空間的に大きく変動する分布を呈するが、対応する濃度は調整濃度値に近いほぼ一様な分布が得られている。濃度計測値の標準偏差は、 $c_0=0.3, 0.1\text{g/l}$ に対してそれぞれ $0.012, 0.008\text{g/l}$ であり、かなり良好な結果が得られている。

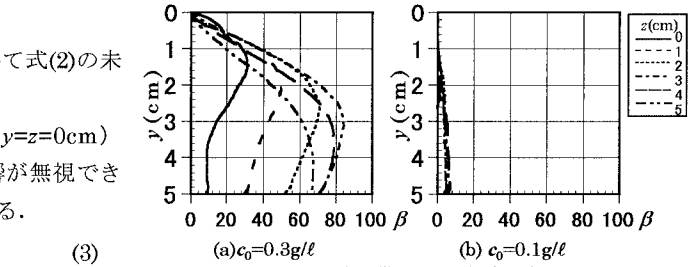


図3 多重散乱項 β の鉛直分布

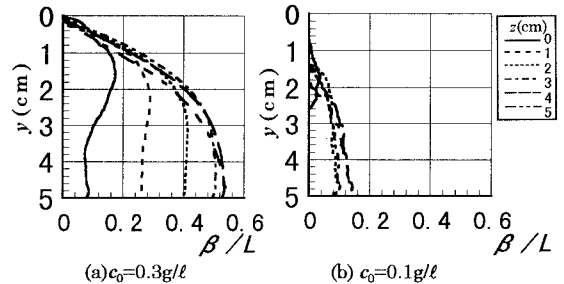


図4 輝度に対する多重散乱項の割合 β/L の鉛直分布

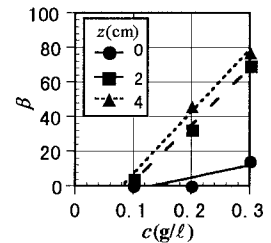
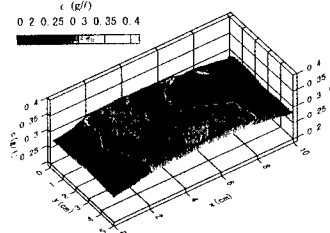
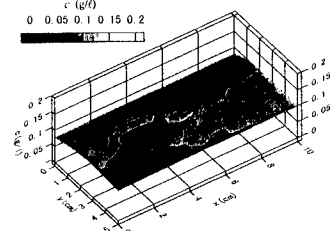


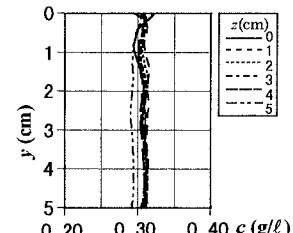
図5 β と c の関係 ($y=3\text{cm}$)



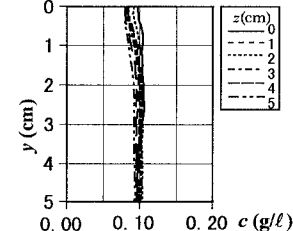
(a-1) $z=3\text{cm}$ の鉛直断面分布



(b-1) $z=3\text{cm}$ の鉛直断面分布



(a-2) 鉛直分布



(b-2) 鉛直分布

図6 濃度分布の例: (a) $c_0=0.3\text{g/l}$, (b) $c_0=0.1\text{g/l}$; (x: 横断方向, y: 水深方向)

<参考文献> 1) 神田, 宮本, 東野, 岩見: 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.