

画像の輝度情報を用いた浮遊泥濃度の計測

A MEASUREMENT OF SUSPENDED MUD CONCENTRATION BY USING LUMINANCE DATA OF IMAGE

神田 徹¹・宮本仁志²・東野 誠³・岩見収二⁴

Tohru KANDA, Hitoshi MIYAMOTO, Makoto HIGASHINO and Shuji IWAMI

¹正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657 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学生会員 修士(工学) 神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程 (同上)

⁴学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程 (同上)

As a method of measuring the temporal and spatial distribution of suspended mud concentration in water, an image processing technique is proposed in the present paper. An equation that represents the relationship between luminance in the image and the concentration of the suspended mud in water is derived by taking the effect of light attenuation into consideration. Based on the luminance data of images that are visualized under uniform concentration conditions, both the modified equation, in which the effect of scatter of the light is introduced, and the optimized values of coefficients in its equation are obtained. The accuracy of the present method is verified by comparing the estimated concentrations with the experimental ones.

Key Words : *suspended mud, measurement, image processing, luminance, concentration*

1. はじめに

河川、貯水池・湖沼、内湾などの水域では、有機物や栄養塩などを多く含んだ微細粒子からなる底泥が堆積している。このような底泥は、流水や波動の作用によって巻き上がり水域内で浮遊、滞留することにより、水域の水質汚濁や富栄養化などの問題を引き起こしている。これらの問題を解決するためには、底泥の物性を把握することはもとより、流水の作用により巻き上げられ浮遊した底泥材料の濃度（浮遊泥濃度）を定量的に把握する必要がある。従来のサイフォンによる採水や濁度計を用いた計測手法では、① 水中にプローブを挿入し流れを乱すため、巻き上げられた浮遊泥の正確な濃度分布を測定することが困難である、② 点計測手法であるため、空間的な濃度分布の把握が難しい、などの問題があり、現象解明のためには浮遊泥濃度分布の新たな計測手法の確立が望まれる。

本研究は、近年技術発展が著しい画像処理技術を適用し、画像の輝度情報をもとに浮遊泥濃度の空間

的分布を推定する手法の開発を目標にしたものであり、本稿においては、輝度－浮遊泥濃度関係式を基礎理論から誘導し、一様濃度場での可視化画像から濃度を求める手法を提示する。また、本計測法の適用結果をもとに、今後の課題について考察を加える。

なお、流体中の物質濃度の面的計測については、土砂濃度を対象としてCT型レーザーを利用した日野¹⁾、佐藤ら²⁾の手法や、気体中の物質濃度計測法³⁾が報告されているが、浮遊泥に対して輝度情報を用いる計測法は少ない⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

2. 光の減衰を考慮した輝度－濃度関係式

水中に微細底泥粒子が浮遊する水槽において、ある断面を可視化し、可視化画像の輝度分布から濃度分布を求めようとする場合、濃度場での光の減衰が輝度に及ぼす影響を考慮しなければならない。本研究ではLambert-Beerの法則を導入し、光の減衰効果を輝度－濃度関係式に反映させた。

(1) 光の減衰

濃度 c の媒質中を光が微小距離 dx 進む間に光の強度 I が $I+dl$ に変化するとき、強度変化 dl に関するLambert-Beerの法則は次のように表される。ただし、多重散乱の影響は無視している。

$$dl = -\alpha c l dx \quad (1)$$

ここに、 α ：散乱係数、 c ：濃度、である。

距離 r だけ離れた2点O ($x = 0$)、P ($x = r$) への入射光強度をそれぞれ I_0 、 I_p とし、濃度を $c(x)$ とする。式(1)を $x = 0$ から $x = r$ まで積分すると、次式のようになる。

$$I_p = I_0 \exp \left\{ \int_0^r -\alpha c(x) dx \right\} \quad (2)$$

ここで、光の減衰 $E(OP)$ を2点への入射光強度の比として次のように定義する。

$$E(OP) \equiv \frac{I_p}{I_0} = \exp \left\{ \int_0^r -\alpha c(x) dx \right\} \quad (3)$$

(2) 輝度－濃度関係式

図-1に示す可視化断面QSを考え、断面上の点Pにおける輝度－濃度関係式を導く。

点Qへの入射光を I_q で、点Oから点Q、P間の距離をそれぞれ r_q 、 r_p で表し、レーザーが扇形に広がる効果を r_q / r_p で評価すると、点Pに入射する光の強度 I_p は次のようになる。

$$I_p' = \frac{r_q}{r_p} I_q E(QP) \quad (4)$$

ここで、点Pの周辺の微小体積要素 dV を考えると、点PのR方向 ($\angle QPR = \theta$) への散乱光強度 $I_p'(\theta)$ は次式のようになる。

$$I_p'(\theta) = I_p' c_p dV i_\theta \quad (5)$$

ここに、 c_p は点Pの濃度であり、 i_θ は位相関数と呼ばれ散乱光の θ 方向への方向依存性を表す。

カメラに入射する光の強度は、式(5)で表される散乱光 $I_p'(\theta)$ が光路PRで減衰したものである。輝度と光の強度が線形関係にあると仮定すると、計測される点Pの輝度 L_p は濃度 c_p と次の関係がある。

$$\begin{aligned} L_p &\propto I_p'(\theta) E(PR) \\ &= \frac{r_q}{r_p} I_q E(QP) E(PR) c_p dV i_\theta \end{aligned} \quad (6)$$

したがって、点Pにおける輝度－濃度関係式は次式のように表される。

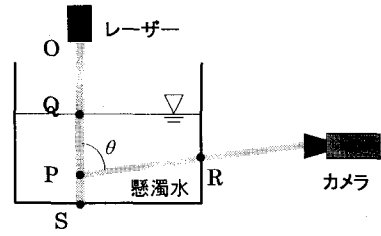


図-1 懸濁水中を通過する光路の模式図

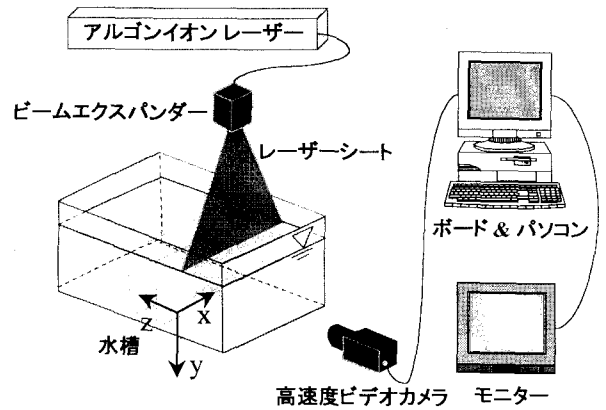


図-2 可視化実験概要図

$$\begin{aligned} L_p &= k \frac{r_q}{r_p} I_q E(QP) E(PR) c_p dV i_\theta \\ &= K \frac{r_q}{r_p} E(QP) E(PR) c_p \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、

$$K = k I_q dV i_\theta \quad (8)$$

ここに、 K ：散乱角 θ によって決まる係数、 k ：定数である。

したがって、式(3)、式(7)中の係数 α 、 K 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. 係数 α 、 K の同定と補正係数 β の導入

(1) 実験の方法および条件

上述の未知係数 α 、 K を実験的に決定するために、水槽内で濃度が一樣になるように調整したカオリナイト懸濁水を用いて実験を行った。このときの濃度を調整濃度 c_0 とする。図-2に実験の概要図を示す。アルゴンイオンレーザーをビームエクspanderによってシート状にして水槽上方から照射することにより可視化断面を作成する。レーザー出力は0.8W、波長は488nm、またビームエクspanderから水面までの距離は1.62mである。可視化断面は高

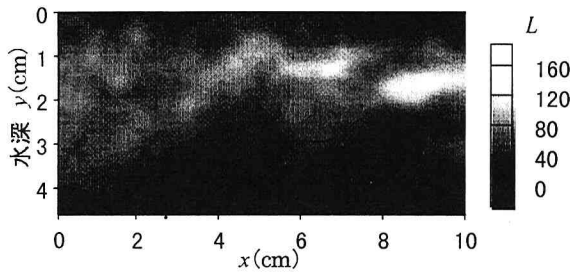


図-3 可視化断面の輝度分布（瞬間画像）
($c_0=0.3\text{g}/\ell$, $z=1\text{cm}$)

速度ビデオカメラを用いて撮影し、画像メモリーボード(DITECT)搭載のパソコンに 512×512 画素、256階調の輝度データとして保存する。なお、可視化断面の輝度データを実験値として使用するため、一連の実験装置を暗幕で覆い、外部からの光の進入を完全に遮断した状態で実験を行った。

カオリナイト懸濁水の調整濃度 c_0 は $0.3, 0.4, 0.5\text{g}/\ell$ の3ケースとし、可視化断面は、水槽側壁の影響のない断面中央部の幅 10cm を対象とし、水槽前面から奥行き方向(z 軸方向)に 1cm ごとに $z=1$ から 5cm までの5断面を計測した。可視化断面の輝度分布の一例（瞬間画像）を図-3に示す。

濃度を一樣に調整するためにカオリナイト懸濁水を十分に攪拌しているが、攪拌による懸濁水の流動に伴い空間的な濃度分布は時々刻々変化している。したがって、得られる可視化断面の輝度分布は、完全に一樣な濃度分布に対応した輝度分布ではない。そこで今回は、攪拌終了直後の約 4.5 秒間の画像を平均化することにより、一樣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。

また、得られた各画像は、 3×3 画素のメディアンフィルターを用いてノイズ除去操作を施している。

(2) 基礎関係式の離散化

得られた可視化画像の輝度データは各画素（1画素の実長： 0.05cm ）ごとの離散データとして得られるため、式(7)を以下のように表現し直す。

$$L(x, y, z) = K(x, y) \frac{r_Q}{r_P} \left\{ \exp \sum_{i=1}^{y-1} (-\alpha c(x, i, z) \Delta y) \right\} \times \left\{ \exp \sum_{j=1}^{z-1} (-\alpha c(x, y, j) \Delta z) \right\} c(x, y, z) \quad (9)$$

ここに、 Δy ：1画素の実長、 Δz ：計測断面間隔である。散乱係数 α は、カオリナイトの形状に関係した値をとると考えられるので、ここでは一定値とする。また、係数 K は本来散乱角 θ によって定まる係数であるが、ここでは断面奥行き方向(z 軸方向)に散乱角 θ は変化しないと仮定し、断面内の位置座

標 (x, y) のみの関数として取り扱う。光が水面に到達するまでの間と水槽前面からカメラまでの間は、空気による光の減衰はないものとする。

(3) 散乱係数 α の同定

散乱係数 α の同定にあたって、まず式(9)を次式のように書き直す。

$$L(x, y, z) = K(x, y) G(x, y, z) c(x, y, z) \quad (10)$$

ここに、

$$G(x, y, z) = \frac{r_Q}{r_P} \left\{ \exp \sum_{i=0}^{y-1} (-\alpha c(x, i, z) \Delta y) \right\} \times \left\{ \exp \sum_{j=0}^{z-1} (-\alpha c(x, y, j) \Delta z) \right\} \quad (11)$$

ここで、 $G(x, y, z)$ は光の減衰を表現する係数である。したがって、光の減衰を補正した輝度 L' は次式で表される。

$$L'(x, y, z) = L(x, y, z) / G(x, y, z) \quad (12)$$

水槽内の濃度を一樣（ $c(x, y, z) = c_0 = \text{const.}$ ）とした場合を考えると、次式で示すように $L'(x, y, z)$ は z によらず位置座標 (x, y) ごとに等しい値をとると考えられる。

$$L'(x, y, z) = K(x, y) c_0 \quad (13)$$

そこで、 $z=1\text{cm}$ の計測面における補正輝度 $L'(x, y, 1)$ を基準として、 $L'(x, y, z)$ との誤差 $\varepsilon(x, y, z)$ の総和が最小になるように、次式を用いて α を決定した。

$$\sum_{x, y, z} \varepsilon(x, y, z) = \sum_{x, y, z} |L'(x, y, 1) - L'(x, y, z)| \quad (14)$$

(4) 係数 K の同定と補正係数 β の輝度－濃度関係式への導入

係数 K は、本来は、決定した散乱係数 α を用いて、調整濃度 c_0 の懸濁水における輝度－濃度関係式、

$$L(x, y, z) = K(x, y) \frac{r_Q}{r_P} \exp \{ -\alpha c_0 \Delta y (y-1) \} \times \exp \{ -\alpha c_0 \Delta z (z-1) \} c_0 \quad (15)$$

を満たすように、最小二乗法により各点 (x, y) ごとに決定するのであるが、以下に述べる問題点が生じたため補正係数 β を導入する（後述）。

図-4に、得られた α を用いて計算した補正輝度 L' と調整濃度 c_0 の関係を示す。式(15)の近似解として係数決定をすることを考えると、式(13)から明らかのように、 $L' - c_0$ 関係は原点を通る線形関係になる必要がある。しかしながら、図-4に示す実験値によ

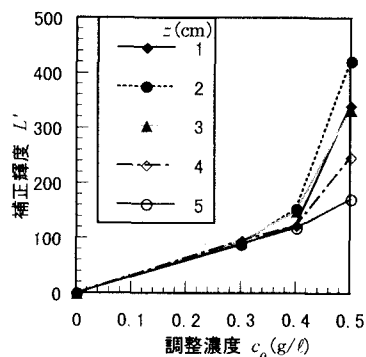


図-4 補正輝度 L' と調整濃度 c_0 の関係
(断面中央: $(x, y) = (5, 2)$ cm)

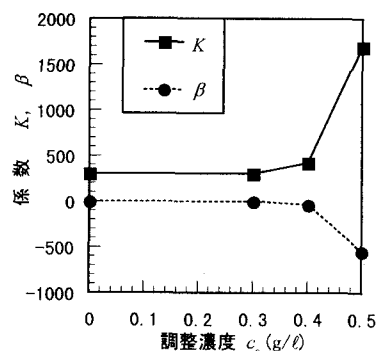


図-5 調整濃度 c_0 と係数 K, β の関係
(断面中央: $(x, y) = (5, 2)$ cm)

る $L'-c_0$ 曲線は線形関係になく、適切な係数 K の値が同定できない可能性がある。実際、本研究の遂行中、上述の方法で同定した係数 K を用いて一様濃度の値を輝度データより算出すると、濃度値として存在し得ない値が一部算出された。

この原因の一つには、光の多重散乱の影響を全く考慮せず輝度-濃度関係式を誘導したことが挙げられる。そこで、主に多重散乱の影響を表す項 β を実験係数として付加し、次式を輝度-濃度関係式の補正式とする。

$$L'_p = K c_p + \beta \quad (16)$$

式(16)を用いる場合、係数 K と β は濃度に依存する係数と考えられる。したがって、係数 K と β の同定方法は、式(16)について、一様濃度場 ($c_p = c_0 = \text{const.}$) を考えた場合の離散データに関する式(17)を用いて、各点 (x, y) ごとの輝度データを使用し、調整濃度ごとに最小二乗法で算出することになる。

$$L'(x, y, z) = K(x, y) c_0 + \beta(x, y) \quad (17)$$

今回は、調整濃度を $0 \sim 0.3, 0.3 \sim 0.4, 0.4 \sim 0.5 \text{ g/l}$ の3区間に分割し、それぞれの濃度域に対する係数 K, β を同定している。図-5に調整濃度 c_0 と係数 K, β の関係を示す。これより、高濃度において係数 K は増加、係数 β は減少する傾向を示しており、両係数はそれぞれ濃度とある一定の関係を持つことが推測される。

4. 画像計測結果および今後の課題

(1) 計算結果

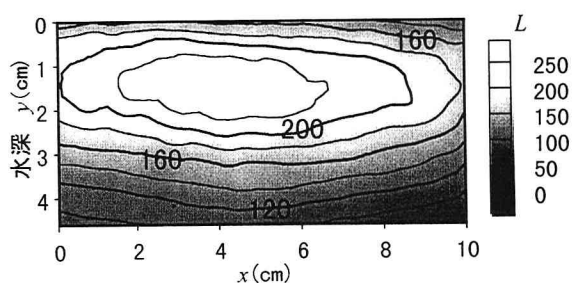
同定された各係数 α, K, β を用いて、次の輝度-濃度関係式により、一様濃度場における画像の輝度分布からカオリナイト懸濁水の濃度分布を算出する。

$$L(x, y, z) = \{K(x, y) c(x, y, z) + \beta(x, y)\} G(x, y, z) \quad (18)$$

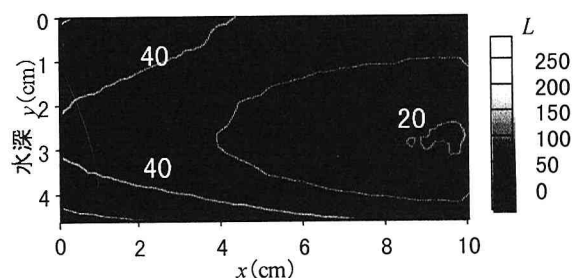
計算は、光の減衰の影響のない水槽前面の水面直下から始めて、順次鉛直下向き方向 (y 軸方向) および奥行き方向 (z 軸方向) に向かって行う。

可視化断面 $z = 1, 5 \text{ cm}$ における調整濃度 $c_0 = 0.5, 0.3 \text{ g/l}$ の場合の輝度分布を図-6に、対応する濃度分布の計算結果を図-7に示す。画像データは係数を決定するときと同様に約4.5秒間の平均画像を使用した。可視化断面の輝度分布の値 (図-6) は、光の減衰および多重散乱などの影響で、調整濃度 c_0 、断面の位置 z 、および計測断面内の位置 (x, y) により、大きく異なる値を示している。それに対して、本手法により計算された濃度分布 (図-7) は、断面により多少の相違はあるものの、どの点でもほぼ調整濃度 c_0 付近の値を示している。これらの濃度計算値の標準偏差は、 $c_0 = 0.5, 0.3 \text{ g/l}$ の場合に対して、それぞれ $0.030, 0.055 \text{ g/l}$ である。

次に、図-8に調整濃度 $c_0 = 0.5, 0.3 \text{ g/l}$ の場合の断面中央 $x = 5 \text{ cm}$ における輝度の鉛直分布を、図-9にそれに対応する濃度の鉛直分布の計算結果をそれぞれ示す。調整濃度 $c_0 = 0.5 \text{ g/l}$ の場合、得られた輝度分布 (図-8(a)) は、光の減衰効果により、計測断面が奥に移行するに伴って全体的に小さい値を示すことになる。調整濃度 $c_0 = 0.3 \text{ g/l}$ の場合 (図-8(b)) については、上述の $c_0 = 0.5 \text{ g/l}$ の場合と同様の減衰傾向を示すが、相対的に濃度が低いため、水槽前面から後面への減衰率は小さくなっている。一方、本手法により計算された濃度分布は、相対的に濃度が高い $c_0 = 0.5 \text{ g/l}$ の場合 (図-9(a)) において $\pm 0.1 \text{ g/l}$ 程度の幅はあるものの、計測断面によらずほぼ調整濃度 c_0 付近の値を示しており、本手法の有効性が確認できる。

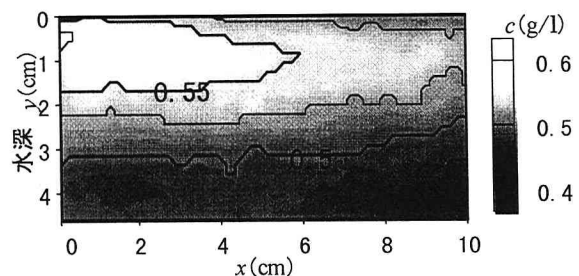


(a) $z=1\text{cm}$

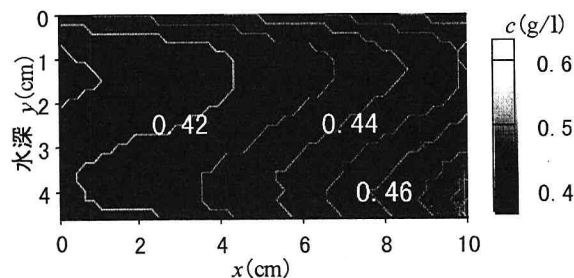


(b) $z=5\text{cm}$

(6-1) 調整濃度 $c_0=0.5\text{g/l}$ の場合

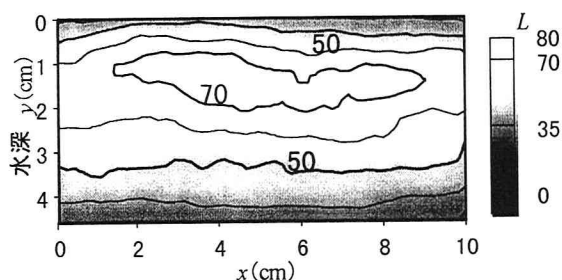


(a) $z=1\text{cm}$

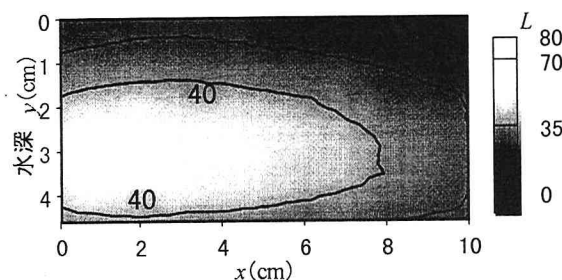


(b) $z=5\text{cm}$

(7-1) 調整濃度 $c_0=0.5\text{g/l}$ の場合

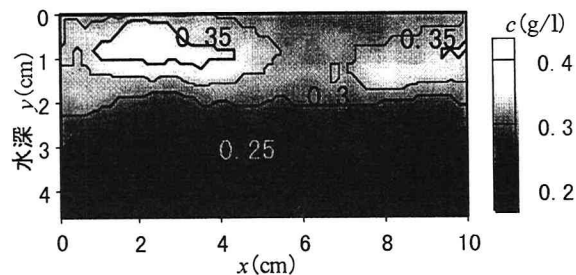


(a) $z=1\text{cm}$

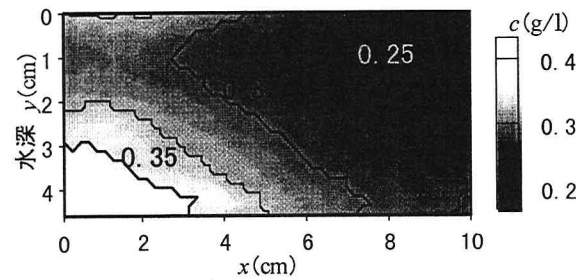


(b) $z=5\text{cm}$

(6-2) 調整濃度 $c_0=0.3\text{g/l}$ の場合



(a) $z=1\text{cm}$



(b) $z=5\text{cm}$

(7-2) 調整濃度 $c_0=0.3\text{g/l}$ の場合

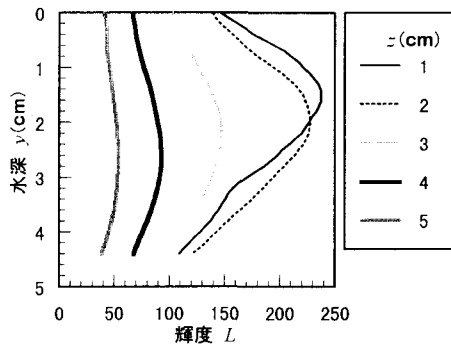
図-6 可視化断面の輝度分布 (平均画像)

図-7 濃度分布の計算結果

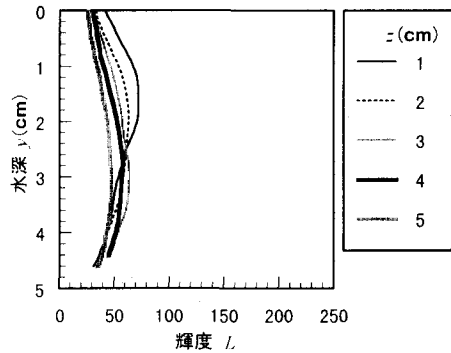
(2) 今後の課題

輝度-濃度関係式に主に多重散乱の影響を表現する実験定数項 β を導入した結果、本計測法は一様調整濃度場に対しては、上述のとおり比較的良好な結果を示している。しかしながら、現行では、関係式中に現れる係数 K 、 β が濃度に依存して変化するため、非一様な濃度場の計測は困難であり、多重散乱についてさらに検討を加える必要がある。

また、本計測手法は画像の輝度データをもとに濃度を算定するため、現行では輝度が256階調を超える範囲の計測は困難である。これはカメラのしぼり、シャッタースピードなどカメラの入射光量に関するパラメーターを一定にして画像を取得しているためであり、今後、それらのパラメーターの関係についても検討する必要がある。

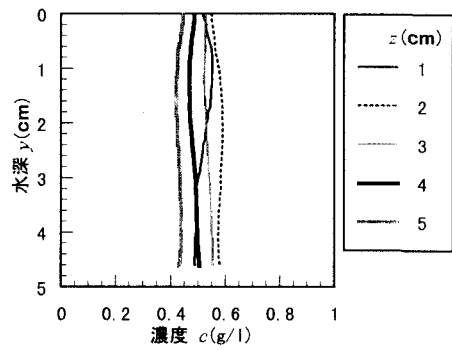


(a) 調整濃度 $c_0=0.5\text{g/l}$ の場合

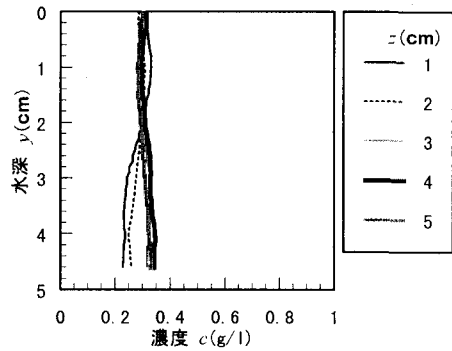


(b) 調整濃度 $c_0=0.3\text{g/l}$ の場合

図-8 輝度の鉛直分布
(断面中央 $x=5\text{cm}$)



(a) 調整濃度 $c_0=0.5\text{g/l}$ の場合



(b) 調整濃度 $c_0=0.3\text{g/l}$ の場合

図-9 濃度の鉛直分布の計算結果
(断面中央 $x=5\text{cm}$)

5. 結 論

画像の輝度情報を用いて浮遊泥濃度を算出する計測手法について、輝度－濃度関係式を誘導し、一様調整濃度場における手法の有効性について検討した。得られた結果を以下に列挙する。

- ①可視化画像の輝度と浮遊泥濃度の関係を定式化した。式中には、浮遊泥濃度中を進む光の減衰の影響、および主に多重散乱の影響を表現する係数 α 、 K 、 β が含まれている。
- ②各係数の同定手法を検討し、一様調整濃度場の輝度と濃度のデータより各係数を決定した。
- ③決定した係数 α 、 K 、 β を用いて、一様調整濃度場に対して本計測法を適用した結果、概ね良好な結果が得られた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、データ整理において神戸大学工学部学生 森信広一君の御協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日野幹雄：CT型レーザー土砂濃度計の開発，水工学論文集，第41巻，pp.1085-1090，1997.
- 2) 佐藤行成，常見 亮，日野幹雄：CT型レーザー土砂濃度二次元分布計の試作，水工学論文集，第41巻，pp.1091-1096，1997.
- 3) 加賀昭和：換気室内濃度分布計測，画像処理産業総覧 下巻（応用技術編），（株）フジ・テクノシステム，pp.508-513，1994.
- 4) 岩見収二，神田 徹，東野 誠：底泥の巻き上げの面的計測に関する基礎的検討，土木学会第51回年次学術講演会，1996.
- 5) 神田 徹，宮本仁志，東野 誠，岩見収二：浮遊泥濃度の画像計測法，土木学会関西支部年次学術講演会，1997.
- 6) 岩見収二，神田 徹，宮本仁志，東野 誠：浮遊泥濃度の3次元計測法，土木学会第52回年次学術講演会，1997.

(1997. 9. 30受付)