画像解析による浮遊物質濃度計測における四流束モデルの有効性について

神戸大学大学院 学生員 北村 暢慶 神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志 神戸大学工学部 フェロー 神田 徹 八千代エンジニヤリング 正会員 山下 健作

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分布の計測法について検討している^{1),2)}.前報²⁾では四流 束モデルを用いて懸濁水中の光の伝播過程をモデル化することにより輝度と濃度の関係を定式化したが,関 係式中のモデルパラメータについて不確定な部分があった.そこで本報では,レーザー光を連続的に走査す ることによって輝度の空間分解能を高めるとともに,光路上の散乱過程に修正を加えることにより輝度-濃 度関係式の再構築を行い,浮遊物質濃度の画像計測における四流束モデルの有効性を検討した.

2.スキャニングによる可視化実験の概要

図-1 に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て作られたレーザーシート光 によって水槽内に可視化断面を作成する.その可視化断面を CCD カメラで撮影し,PC に 256 階調の輝度データとして保存する.な お,前報²⁾では1cm 毎に可視化断面を微小時間静止させていたが, ここでは,画像輝度の空間分解能を高めるためにレーザーシート 光を連続的にスキャンさせ,(6cm/s)可視化断面を撮影した.

3. 画像輝度の空間分布

可視化断面を連続的に移動させた場合と静止させた場合では 得られる輝度情報が異なる可能性があるため,両者の画像輝度を 比較検討した.図-2 に輝度の断面平均値の z 方向分布を示す.両 者の分布はよく一致している.図-3 に x – y 平面での時間平均輝 度分布を示す.平均輝度は,光の減衰や多重散乱,レーザーシー ト光強度の非均一性などの影響により,ある水深 y で極大値をも つ楕円状の分布形を示す.図-3(a),(b)に示す両者の平均輝度はほ ぼ同じ分布となる.以上より,可視化断面を連続的に移動させる ことによる輝度値への影響はほとんどないといえる.

4.四流束モデルを用いた輝度 - 濃度関係式 4-1 輝度 - 濃度関係式

四流束モデルの基礎方程式を以下に示す.

$$\frac{dI_{f\xi}}{d\xi} = -(A+S)I_{f\xi} \quad (1) \qquad \frac{dI_{b\xi}}{d\xi} = (A+S)I_{b\xi} \quad (2)$$

$$\frac{dE_{f\xi}}{d\xi} = p_f SI_{f\xi} - \eta (A+p_b S)E_{f\xi} + \eta p_b SE_{b\xi} + p_b SI_{b\xi} \quad (3)$$

$$\frac{dE_{b\xi}}{d\xi} = -p_b SI_{f\xi} + \eta (A+p_b S)E_{b\xi} - \eta p_b SE_{f\xi} - p_f SI_{b\xi} \quad (4)$$
ここに, :光の伝播方向, I_f , I_b :前方,後

方への直達光放射照度, E_f , E_b :前方,後方への



図 1 実験システムの概要





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

表 1 関係式中の各項

J = (A + Sc)

拡散光放射照度, A:吸収係数, S:散乱係数, p_f, p_b:前方,後方への散乱確率, :直達光の透過長と拡散光の平均透過長との比である.四流束モデルでは,光の多重散乱の影響は E_f と E_b によって考慮される.

y, z方向への光の伝播過程を式(1)~(4)を用いて表すことによ り輝度と濃度の関係を定式化する.その際,前報²⁾では可視化 断面内の点 p における z 方向への散乱光強度がその点の濃度 c_p に比例すると仮定したが, I_{fy} , E_{fy} , E_{by} の一部が z 方向に伝播す ると考える方が四流束モデル³⁾の概念と合致するため,点 p に おける z 方向への散乱過程(境界条件)に修正を施した.得られ た輝度 - 濃度関係式を次式に示す.

$$L = \alpha \left\{ e^{-Jy} + M \left(e^{-Ky} - e^{-Jy} \right) \right\} \left\{ e^{-Jz} + M \left(e^{-Kz} - e^{-Jz} \right) \right\}$$
(5)

ここに,*L*:画像輝度, :画像輝度と放射照度の変換係数 である.その他の項は表-1に示す.式(5)にはモデルパラメータ (*A*, *S*, *p*_{*f*}, *p*_{*b*}, ,)が含まれる.このうち,水の吸収係数は *A*=0.0174m⁻¹,前方(後方)散乱確率はミー散乱の理論より *p*_{*f*} =0.996 (*p*_{*b*}=0.004)とした.

4-2 モデルパラメータの同定

次に,可視化実験により得られた輝度値を用いてモデルパラ メータを同定した.図-4~6 に調整濃度 c₀と散乱係数 S,変換 係数 ,透過長比 との関係をそれぞれ示す.ここで,各モデ ルパラメータの値は輝度の計算値(式(5))と実験値の誤差が最 小となるように求めた.図-4,5に示す S と は c₀にかかわら ずほぼ一定値をとっており,それぞれ値を平均することにより

同定値とした.一方, について は,物理的な考察からは濃度 cの みの関数と考えられるが,図-6に 示すように,得られた の値は可 視化断面の位置 z に対しても系統 的に変化している.したがって, ここでは最小自乗法により c と z の一次関数として を与えること にした.

5.一様調整濃度場への適用

ー様に調整した濃度場での輝度



<参考文献>1) 神田, 宮本, 岩見: 水工学論文集, 第43巻, pp.767-772, 1999.2) 山下, 神田, 宮本, 岩井: 土木学会第56年次学術講 演会講演概要, 158, pp.316-317, 2001. 3) Kuberuka P.: J. of the Optical Society of the America, Vol. 38, No. 5, pp.448-457, 1948

Κ $= \eta \sqrt{(2 p_b Sc + A)}A$ $(\eta + 1) + (\eta p_b + p_f)S^2c^2$ $p_f ASc$ $J^2 - K^2$ $A + p_b Sc - K$ N = $p_{b}Sc$ 11 ♦ z=1 10 S = 8.2□ z=2 9 ▲ z=3 s γ × z=4 7 • z=5 6 平均 5 0 0.02 0.04 0.06 0.08 0.1 $c_0(g/\ell)$ 义 4 散乱係数 Sと調整濃度 C₀の関係 160 ♦ z=1 150 =131.6 □ z=2 140 ▲ z=3 <u></u> ¢130 × z=4 120 ∘ z=5 110 平均 100 0 0.02 0.04 0.06 0.08 0.1 $c_0 (g/\ell)$ 変換係数 と調整濃度 🗛の関係 义 5 60 50 ◆ z=1 40 □ z=2 ≈ 30 ▲ z=3 20 × z=4 10 Ă ○ z=5 0.06 0.08 0.1 0.02 0.04 $c_0(g/\ell)$ 6 透過長比 と調整濃度 *c*₀の関係 义



図-7 濃度推定結果($c_0=0.03g/\ell$)