

神戸大学工学部 学生員 ○橋本佳世子
 神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志

1. はじめに

筆者らは画像輝度から浮遊物質の濃度分布を計測する手法を検討している。懸濁水中の光の伝播過程に対してはランバート・ビア則、放射伝達方程式、直達光と拡散光で表現する四流束モデルなどを用いて輝度－濃度関係の定式化を試みているが、前報¹⁾の四流束モデル型の関係式ではモデルパラメータに不確定な部分があった。そこで本研究では、光路上の光伝播過程を多流束モデル²⁾に拡張することによって輝度－濃度関係を定式化し、得られた輝度－濃度関係式中のモデルパラメータについて検討を行った。

2. 多流束モデルの概要

2-1 基礎式の導出

多流束モデルでは拡散光の伝播方向分割を任意におこなうことが可能であるが、六流束以上の分割を行うと煩雑な数値解析が必要となる。また、六流束モデルでは解析解は求められるが、特殊関数を用いた展開が必要となるため工学上の応用を考える場合、より簡便なモデルが優位になる。そこで本研究では、従来の六流束モデルの概念を参考にしながら、四流束モデルで用いたモデルパラメータを出来るだけ活用する形で基礎式を導出した。得られた多流束モデルの基礎方程式を以下に示す。

$$\begin{pmatrix} dF_1/dx \\ dF_2/dx \\ dF_3/dx \\ dF_4/dx \\ dF_5/dx \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -s-k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_2 & \eta(-s-K_1+P_2) & \eta(P_3+P_4)/2 & \eta(P_4+P_5)/2 & \eta(P_3+P_5)/2 \\ P_3 & \eta(P_3+P_4)/2 & \eta(-s-K_2+P_2) & \eta(P_3+P_4)/2 & \eta(P_4+P_5)/2 \\ P_4 & \eta(P_4+P_5)/2 & \eta(P_3+P_5)/2 & \eta(-s-K_2+P_2) & \eta(P_3+P_4)/2 \\ P_5 & \eta(P_5+P_3) & \eta(P_4+P_5)/2 & \eta(P_3+P_4)/2 & \eta(-s-K_1+P_2) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $F_1(x)$ ：光路 x 上の前方への直達光放射照度、 $F_2(x), F_3(x), F_4(x), F_5(x)$ ：次節に示す各経路における拡散光放射照度、 k ：直達光の吸収係数、 $K_i := k/|\cos\theta|$ 、 η ：直達光透過長と拡散光平均透過長の比、 P_i ：直達光の経路 i への入射確率、 s ：散乱係数、 θ ：鉛直方向と経路境界間の角度、 η ：直達光透過長と拡散光平均透過長の比、である。このモデルでは光の多重散乱の影響は $F_2(x), F_3(x), F_4(x), F_5(x)$ で考慮される。なお、通常 $F_6(x)$ で表される後方直達光放射照度は本研究では存在しないと仮定し省略している。

2-2 拡散光伝播の考え方

基礎式を簡便なものとするため、本研究では次のように拡散光伝播の分割モデルを新たに考えた。図-1に光束の経路区分を示す。矢印で示す経路2-①の部分へ入射する拡散光が、経路3-②と3-⑦に拡散される場合を考える。これら2方向への散乱確率は入射方向と散乱方向の相対的な角度関係で決まると考え、経路2-①から3-②へは 180° 方向から入射する直達光が経路3に拡散される確率 P_3 と等しく、一方、経路2-①から3-⑦へは同様に考えて確率 P_4 とする。さらに、経路2から3への拡散光の確率は、両者の算術平均をとり $(P_3+P_4)/2$

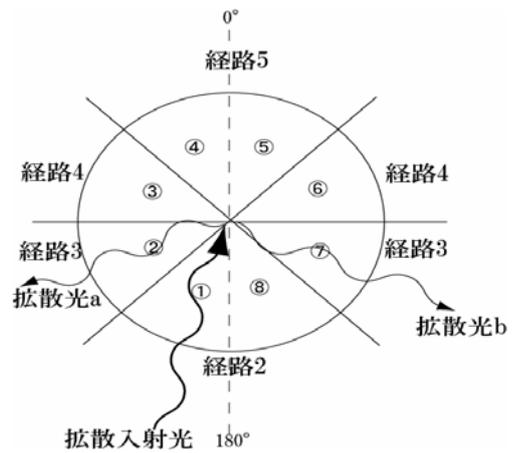


図-1 拡散光の伝播モデリング

とする。式(1)では、すべての拡散光伝播で同様に考え散乱確率をだして基礎式を導出している。

3. 輝度－濃度関係の定式化

図-2に懸濁水中を伝播する画像輝度の光路を示す。本研究では、可視化断面QS上の点Pにおける散乱光が光路PR上を伝播してカメラに撮影されると考え、光路QP、PRでの光伝播を上述の多流束モデルを用いて表現することによって輝度－濃度関係を定式化する。その際、散乱係数 s は濃度 c_p に比例すると仮定する。基礎式(1)を解く際の光路QPおよびPRでの境界条件は以下のものである。

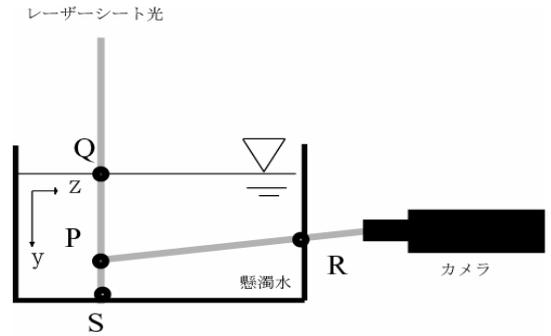


図-2 光路図

$$F_1(0) = F_0, \quad F_i(0) = 0 \quad i = 2,3,4,5 \quad (\text{鉛直方向 } y=0) \quad (2, 3)$$

$$G_2(0) + G_5(0) = \beta(F_3(y) + F_4(y)), \quad G_3(0) + G_4(0) = \chi(F_2(y) + F_5(y)) \quad (\text{水平方向 } z=0) \quad (4, 5)$$

ここに、 F_i, G_i : それぞれ光路QPおよびPRにおける直達光と拡散光の各光束、 F_0 : レーザー光による入射直達光放射照度、 β, χ : 比例係数、である。光路QPおよびPRの原点はそれぞれ水表面と可視化断面における任意の深さ y となる。

式(1)～(5)を用いて得られた輝度－濃度関係式を以下に示す。

$$L(y, z) = \alpha \left(\sum_{j=1}^5 C_j A_{3j} e^{\lambda_j y} + \sum_{j=1}^5 C_j A_{4j} e^{\lambda_j y} \right) * \left(\sum_{j=2}^5 C_j B_{2j} e^{\lambda_j z} + \sum_{j=2}^5 C_j B_{5j} e^{\lambda_j z} \right) \quad (6)$$

ここに、 L : 画像輝度、 α : 輝度と濃度の変換係数、 A_3, A_4, B_2, B_5 : 散乱係数 s などモデルパラメータを含む関数である。この輝度－濃度関係式中には次の5つのモデルパラメータ (s, k, P_i, η, α) が含まれる。

4. モデルパラメータの感度分析

得られたモデルパラメータの変化が輝度分布に与える影響を次に調べる。図-3は感度分析の結果である。図-3(a)は基準 (濃度 $c_0 = 0.1\text{g/l}$, $k = 0.0174$, $s = 1.0$, $\eta = 10.0$, 臨界角 45° , $\alpha = 1000$) であり、図-3(b), (c)に吸収係数 ($k = 0.00174$ に変更)・透過長比 ($\eta = 5.0$ に変更)の各変化を示す。図-3(a)より、各鉛直断面において算出された輝度はある水深で極大値をとり、多重散乱の影響がモデル化されていることがわかる。また、断面が奥行方向にいくに従い、全体的に輝度値が小さくなる。モデルパラメータに対する輝度分布の変化に関しては、主に吸収係数・散乱係数が奥行・水深両方向の輝度分布を、透過長比が奥行方向の輝度分布を、そして、臨界角・変換係数が全体的な輝度の大きさを変化させていることがわかった。

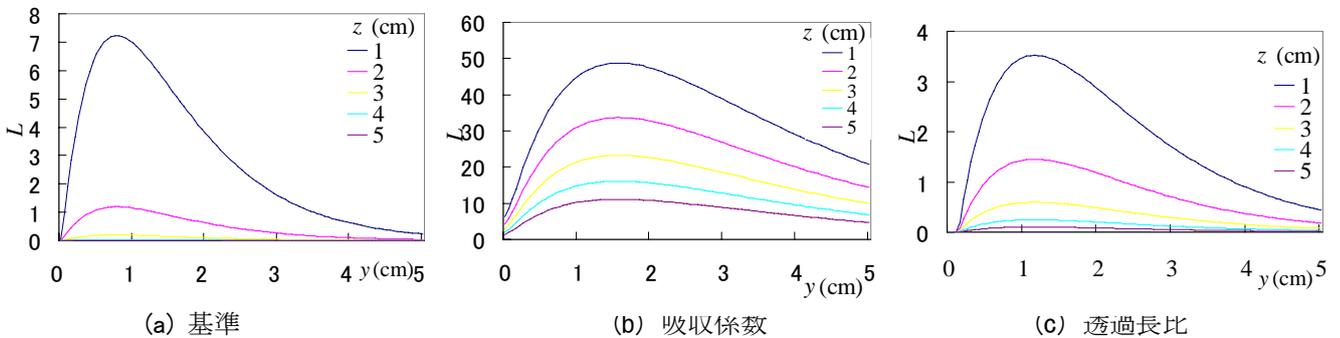


図-3 モデルパラメータの感度分析

<参考文献>1)北村, 宮本, 神田, 山下: 画像解析による浮遊物質濃度における四流束モデルの有効性について, 土木学会第 57 回年次学術講演会, II-154, pp.307-308,2002. 2)Mudgett P.S. and Richards L.W.: Multiple Scattering Calculations for Technology II, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.39, No.3, pp.551-567, 1972.