光遮断方式による高濃度浮遊砂の画像計測

Laboratory Measurement of High Sediment Concentration with Light Extinction Method

下園武範¹·佐々木淳之²·岡安章夫³·松林由里子⁴

Takenori SHIMOZONO, Atsushi SASAKI, Akio OKAYASU and Yuriko MATSUBAYASHI

A new system of sediment concentration measurement was developed with the light-extinction method for wide range of concentration. A thin electroluminescence sheet which caused minimal disturbance to the flow was used as a light source, and the transmission was detected by a digital video camera which had a 2-dimensional capability. The relationship between the light attenuation and sediment concentration was formulated with preliminary test results on the basis of the modified Lambert-Beer law with scattering corrections. It was confirmed that the present system was capable of measuring spatial-temporal distributions of sediment concentration up to 300g/l with high resolution through the application to an actual sediment transport problem in a wave flume.

1. 序論

実験水路における砂濃度の計測法には、古くは採水方 式が用いられ(たとえば Bosmanら, 1987),現在では 光学式後方散乱濃度計や超音波式濃度計が広く用いられ ている.しかしながら,これらの手法は接触・点計測で あるため、二次元的な濃度分布を計測することが難しく, 空間解像度も低い.また、計測濃度レンジが比較的小さ いため、底面近傍などの高濃度域では使用できないといっ た短所がある.一方,Okayasuら(2004)は、複数のレー ザーダイオードと逆解析を用いたCT型濁度計により, 水平面内での砂濃度の時空間分布を計測しているが、解 像度や計測幾何配置の制約が大きく,最大濃度も小さい.

そこで本研究では画像情報を利用し、高濃度となる底 面近傍を含めた砂濃度時空間変動の計測法を開発する. 画像情報を利用して砂濃度分布を計測する試みはこれま でにも行われており、砂濃度と砂粒子群による散乱光の 比例関係を利用する方法(佐藤・久保田,1991; Sleath・ Wallbridge, 2002; Liu・Sato, 2005)と画像上で個々の砂 粒子を抽出しその個数を算定することにより砂濃度を算 定する方法(柿木・辻本,2004; Radiceら,2006)に大 別される.高濃度の状況を想定した場合には,個々の粒 子識別が困難になるため後者は不向きであり,輝度の変 化を利用する前者の方法が適している.しかし,既往の 計測では水路外部から点光源で光を照射し,水路内の砂 粒子による散乱光をカメラ等で計測する方式をとってお り、この光散乱方式では強い光を対象範囲に均一になる よう照射せねばならない.また,通常の実験環境では少

 1 正 会 員
 修(工)東京海洋大学助手海洋科学部

 2 非 会 員
 (株)月星海運

 3 正 会 員
 工博
 東京海洋大学教授海洋科学部

 4 非 会 員
 修(工)東京海洋大学大学院

なからず迷光が散乱光に加わるため,高濃度側への適用 域が狭い.さらに,実験時の光環境の変化によって輝度 と濃度の関係が変化することから,実際の計測環境下に おいて,両者の関係を求めるための正確なキャリブレー ションが必要になる.

これに対して本研究で開発する手法は、図-1に示すよ うに水路内に均一な面光源を設置し、砂を含んだ流体を 透過した光を計測し、その減光量から砂濃度を算定する 光遮断方式に基づくものである.この計測原理は流体の 濃度計測に古くから用いられており、減光度と粒子濃度 の関係は、Lambert-Beerの式によく適合することが知ら れている.同じ光源を用いる場合には、事前のキャリブ レーションにより減光係数を決定しておけば、実験水路 で得られた減光度から砂濃度を求めることができる.計 測は暗室状態で面光源のみを用いて行うことにより、キャ リブレーション時と実験時の環境を等しくできるため、 高い信頼性を確保することができる.





2. 計測系の構成

図-2に示すように、計測系は面光源と受光(撮像)装置からなる。面光源から発せられた光は、砂粒子を含ん だ検査体積を通過する際に粒子により吸光または散乱す るため、受光装置で計測される光の輝度は、入射光輝度 よりも小さくなる.一般に,物質による光の減衰は,吸 光と散乱の効果によるものであるが,通常の砂粒子はそ の大部分が非吸光物質であるSiO₂(複素屈折率:1.55+i0) によって構成されるため,減光のほとんどは散乱による ものと考えられる.本手法は(1)式で定義される減光度 が粒子濃度に比例することを利用するものである.

$$A = -\log(\frac{I}{I_0}) \tag{1}$$

ここに, A:減光度, I:透過光輝度, I₀:入射光輝度である. 減光度は粒子濃度以外に検査体積の奥行き幅(光路長) Iの関数であるため,光源の位置(奥行き幅)を適宜設 定することにより幅広い範囲の濃度計測が可能となる. 一方で,適切な光路長を設定するにあたり光源を水路内 に設置する必要が生じるため,面光源は流体場を乱さな いように非常に薄いものが要求される.これを満たすも のとして, ELシート(Electroluminescence Sheet)を用い た. EL シートは蛍光体に交流電圧を印加することで発光 する厚さ0.5mm程度のシートであり,約300cd/m²の輝度を 有する均一な面光源(中心波長:510-525nm)である.そ の発光原理上,任意の形状に裁断して用いることができ るため,さまざまな実験状況に対応することが可能である.

受光装置には市販の3CCDデジタルビデオカメラを用いた. したがって, *R*(580-720nm), *G*(500-570nm), *B*(400-470nm)の3つの異なる波長帯ごとの減光度を求めることができる.



3. 減光度と砂濃度の関係

(1) キャリブレーション

減光度と砂濃度の関係を求めるためにキャリブレーショ ンを行った.これは既知の濃度で砂を含んだ供試体に光 を透過させ、その減光度を計測するものである.ここで はアクリル製透明容器に濃度ごとに所要量の水と砂を投 入して密閉し、手動で攪拌し均一濃度としたものを供試 体として、図-3に示すように透過光を計測した. 攪拌し た容器を光源前への設置した後、砂は直ちに沈降を開始 するが、中間層においてはある程度の時間ほぼ均一な濃 度の状態を保つため、この範囲で取得された画像から3 波長帯ごとの輝度を求めた.また、気泡の影響を避ける ために、静置直後の画像は除外した.

この手順を複数回行い,得られた各画像輝度の平均値 を所与の濃度に対する透過光の輝度とした.上述の奥行 き幅と減光度の関係を求めるため,計測には3通りの幅 *l*=1.0,2.5,4.5cmの容器を用いた.砂濃度Cについて は,表-1に示すようにC=0.0~347.2g/lまでの13条件に対 して計測を行った.用いた砂は中央粒径0.15mmの相馬 硅砂6号であり,成分の93%を非吸光物質であるSiO₂が 占める.図-4には*l*=2.5cmの条件で得られた6ケースの 計測画像を例として示す.計測画像の1pixelは約0.2mm 四方に相当する.





表-1 砂濃度の条件(g/l)

Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9	Case10	Case11	Case12	Case13
0.0	2.5	5.0	10.0	14.9	24.8	49.1	72.9	96.3	141.9	185.9	269.3	347.2

(2) 計測結果

図-5に1=2.5cmの場合に得られた砂濃度とR,G,B3つ の波長帯での減光度の関係を示す.グラフの縦軸は減光 度A, 横軸は砂の質量濃度Cである.いずれの波長帯で も,濃度が100g/1程度に達するまでは両者に線形関係が 成り立ち,それを超えると減光度が飽和する.一般に短 波長波の方が吸光・散乱し易いため,グラフの傾きに若 干の違いが見られるものの,可視光の範囲ではその差は 顕著でない.したがって,以下の議論では外的なノイズ の影響を小さくするため光源の中心波長を含んだ輝度の 高いGの波長帯のデータを用いる.

図-6には3通りの奥行き 1 に対する砂濃度と減光度の 関係を示している. 1 が小さいほど,高濃度まで両者の 関係に線形性が保たれ,1=1.0cmの場合には200g/程度 の濃度まで概ね直線関係が成り立つことがわかる.しか しながら,その傾きは濃度が高くなるにしたがって緩や かになり,Lambert-Beer理論が示す比例関係が成立しな くなる.一般に,濃度が高くなると多重散乱が優勢にな り,粒子径が光の波長に対して大きい場合には,前方散 乱光が卓越する.上記の問題は,高濃度域ではこの前方 散乱光が受光装置へと達するため,濃度の上昇に対する 減光量の変化が小さくなることによると考えられる.し たがって,両者の関係を定式化するにあたって,吸光の 理論であるLambert-Beer理論をそのまま用いた場合には, 高濃度域において大きな誤差を生じることになる.

(3) 減光度と砂濃度の関係式

そこで、高濃度域にも対応可能な修正Lambert-Beer式 に基づいて減光度と砂濃度の定式化を行う.透過光にお けるLambert-Beer式は以下のように表すことができる.

$$A = \sigma_{ext} l \tag{2}$$

ここに σ_{ext} は減光係数であり、媒体中に径 d_{o} の粒子 が単位体積あたりN個存在する場合には、

$$\sigma_{ext} = \frac{\pi d_s^2}{4} N Q_{ext} \tag{3}$$

のように表すことができる.ここに、Q_{eet}は減光効率で ある.散乱を考慮しない場合は**図-6**の結果に基づいてこ の減光効率を決定すればよいが、散乱を含む問題では減 光度が1に対して線形とならず、(2)式をそのまま適用す ることはできない.そこで、本研究ではWind・Szymanski (2002)による散乱補正を加えた修正Lambert-Beer式を用 いる.Windらは前方散乱光のうち受光装置に達する分の 寄与を考慮して(2)式を以下のように書き改めた.

$$A = -\log\{\frac{I_{sca}}{I_0} + \exp(-\sigma_{ext}l)\}$$
(4)



(4)式の log 内第1項が散乱光の寄与を表す項であり、これを無視すれば(4)式は(2)式に一致する.ここに、*Isee*は 受光装置に達する散乱光強度であり、

$$I_{sca} = \sigma_{sca} I_0 l_{sca} \tag{5}$$

のように表すことができる. *a*scot 散乱係数であり(3)式 と同様に散乱効率 *Q*scoを用いて表すことができる. *I*scot 受光装置に至る散乱光の平均光路長を表し,計測系の幾 何学的条件によって決まるものである. Windらは *I*scoを 散乱理論に基づいて定式化しているが,ここでは単純に 計測体積の奥行き幅 *l* と前方散乱光の平均光路長 *I*sco 関係が一定であると仮定し,以下のようなパラメータを 導入する.

$$Q'_{sca} = Q_{sca} \frac{l_{sca}}{l} \tag{6}$$

(3),(4),(5),(6)式をまとめ,さらに砂粒子が球体で ある仮定して粒子数濃度を質量濃度に変換すれば,減光 度と質量濃度の間に以下の関係が成り立つ.

$$A = -\log\{KQ'_{sca} + \exp(-KQ_{ext})\}, \ K = \frac{3Cl}{2\rho_s d_s}$$
(7)

ここに,ρ.は砂粒子の密度である.この修正により, 濃度が高くなるに従って(7)式の右辺第1項の寄与が大き くなることで,濃度の上昇に対する減光量の変化を小さ くする散乱の効果が考慮される.

図-6に示したデータを用いて,最小二乗法により二つ のパラメータを決定すると,Q_{er}=0.38,Q_{se}=0.0025となっ た.図-7には得られた理論曲線を計測データと合わせて 表示している.理論曲線は飽和域も含めグラフの勾配の 変化を良好に表していることが分かる.K=12を超えると 計測データの勾配はゼロに近づき,理論値は減少をはじ めることから,K<12が本計測系の計測可能条件となる.

図-8は, K<12 の範囲で(7)式により実験の減光度か ら求まる濃度の逆算値を実測値に対してプロットしたも のである. 図中の破線は相対誤差10%の範囲を示してい る. 高濃度では *l* が小さい場合に, 逆に低濃度では *l* が 大きい場合の方が理論値と実測値はよく一致する. *l* = 1.0cmの条件では, 300g/1程度の極めて高濃度の範囲ま で計測可能となり, 散乱光を考慮したことにより計測限 界濃度が概ね1.5倍程度に拡大していることがわかる.



4. 計測手法の適用例

これまでに開発した計測法を,実際の土砂輸送問題に 適用した例を示す。ここで対象としたのは、非定常かつ 高濃度な浮遊砂を生じる,実験室内での孤立波の斜面遡 上に伴う土砂輸送である.実験は図-9に示すような長さ 20.0m,幅1.0mの造波水路に勾配1/20の一様勾配斜面を 設置し、斜面上にキャリブレーション時に用いたものと 同じ砂を4.0cmの厚さで敷き詰めて行った.入射波は波 高12.0cmの孤立波であり、斜面を伝播したのちに静水汀 線付近で砕け、ボア状となって底質を巻上げながら斜面 を遡上する、この遡上に伴う浮遊砂濃度を計測するため に静水汀線から陸側へ1.0mの位置に計測点を設定した. 高濃度の浮遊砂を対象とするため、面光源であるELシー ト (縦20.0cm×横15.0cm)をガラス側壁から1.0cm位置 に砂に埋める形で設置し、キャリブレーション時と同じ 相対的位置関係になるようカメラを配置した、この状態 で入射波を作用させ、暗環境のもと、遡上した波が流れ を転じて流下するまでの連続画像を30Hzで取得した.

画像を解析するにあたり,計測点での浮遊砂濃度鉛直 分布の時間変化を求めるため,連続画像上で1cm幅 (50pixel)の短冊状の領域を切り出し、前節と同様にG の波長帯の輝度を算出した、得られた輝度を幅方向に平 均し、砂の存在しない状態での基準輝度をもとに減光度 を求め、さらに(7)式により砂濃度を推定した. 図-10に は上からそれぞれ、減光度鉛直分布の時間変化、底面上 4点での浮遊砂濃度時間変化、同条件の粗面固定床実験 でLDVにより計測された底面近傍3点の水平流速を示し ている。各グラフの時間軸の原点は遡上波の先端が計測 点に達した時点である. ボア状に発達した遡上波の先端 部では、強い乱れ成分を含んだ大きな流速によって、高 濃度の浮遊砂が間欠的に生じている様子が読みとれる. 底面近傍のz=0.25cmでの濃度は最大で300g/l近くに達し ており、この瞬間には上層まで高い濃度で砂が巻上げら れていることが分かる.その後,t=2.7s前後で流れは方 向を転じ、沖向き流れの発達に伴ってt=5-9sの間で再び 浮遊砂が生じている状況が示されている.







5. 結論

本研究では、高濃度浮遊砂現象の定量化を目的として 光遮断方式に基づく砂濃度の計測法を開発した. 散乱に よる非線形性を考慮した修正Lambert-Beer式に基づいて 両者の関係を定式化することで,比例関係の成立しない 範囲を含めた広い範囲で減光度から精度良く濃度を評価 できる理論曲線を求めた.特に光路長を小さくとった場 合には非常に高濃度な領域まで計測可能となった. 開発 した手法を造波水路における土砂輸送問題に適用した結 果,従来の手法では計測が困難であった,底面近傍を含 めた300g/に達するような高濃度浮遊砂の時空間変動を, 高い解像度で捉えることができた.

本計測手法はその計測原理上,適当な光路長を設定す ることで,実験水路における低濃度から高濃度まで幅広 い範囲の土砂輸送問題への適用が可能である。キャリブ レーション時と実際の計測時の光環境に相違をもたらす 要因が少ないため,計測精度はそのままキャリブレーショ ン精度に依存することになる。ここでは,簡便な方法で キャリブレーションを行ったが,さらなる高精度化のた めにはより信頼性の高いキャリブレーション手法を確立 することが課題となる。また,光路長を小さくとり,高 濃度域の計測を行う場合には低濃度域での感度が下がる。 これら二つの領域での精度を両立するためには,同時に 複数の光源を異なる奥行きに設置して計測を行う等の方 策が考えられる.また,面的情報が必要でない場合には, 光源を線状にすることで,3次元性の高い流体場にも応 用可能となることが期待できる.

参考文献

- 柿木哲哉・辻本剛三(2004):浮遊粒子の粒度及び濃度分布の 同時計測に関する基礎的研究,第52回海講論文集,pp.456-460.
- 佐藤愼司・久保田洋次(1991): ビデオ画像を用いた砕波点付 近の浮遊漂砂現象の解析,第38回海講論文集, pp.251-255.
- Bosman, J.J., E.T.J.M. van der Velden and C.H. Hulsbergen (1987): Sediment Concentration Measurements by Transverse Suction, Coastal Eng., Vol. 11, pp.353-370.
- Liu, H. and S. Sato (2005): Laboratory study on sheetflow sediment movement in the oscillatory turbulent boundary layer based on image analysis, Coastal Eng. Journal, Vol. 47(1), pp. 21-40.
- Okayasu, A., Y. Uno, T. Kobayashi and M. Shimaya (2004): Laboratory Measurement of Suspended Sediment Concentration in Surf Zone with CT Concentration Meter, Coastal Eng. Journal, Vol. 46(2), pp. 203-218.
- Radice, A., S. Malavasi and F.Ballio (2006): Solid transport measurements through image processing, *Exp. Fluids*, 41, pp. 721-734.
- Sleath, J.F.A. and S. Wallbridge (2002): Pickup from rippled beds in oscillatory flow, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. 128 (6), pp. 228-237
- Wind L. and W.W. Szymanski (2002): Quantification of scattering corrections to the Beer-Lambert law for transmittance measurements in turbid media, Meas. Sci. Technol. 13, pp. 270-275.