

沈降中の泥塊からの汚濁発生量について

金山 進*・田口 智*・清水 琢三*
山田 富朗**・石井 貴之***・京谷 修***

1. まえがき

海上工事等による汚濁拡散の予測は濁りの影響範囲を平面的に把握する目的で平面2次元のモデルを用いるのが一般的であり、SSの発生量は既往の工事例に基づく汚濁発生原単位表によって定められることが多い。対象海域が大水深の場合には3次元あるいは鉛直2次元のモデルが用いられるが、この場合、SS発生についても、汚濁源の沈降過程においてどの段階でどれだけの量が浮遊粒子となるかを詳細に表現する、いわゆる移動点源としての取扱いが望ましい。そこで本研究では、静水中での泥塊の沈降実験により、ビンガム降伏値 τ_y で5~1000 (Pa)の強度を対象に沈降中の泥塊からの汚濁発生状況を作用抗力と対応させて把握し、SSの移動点源としてのモデル化を試みた。

2. 泥塊沈降実験

実験は、図-1に示すように所定の強度および大きさに調整した泥塊を水深1.5m×幅3.2m×奥行2.0mの水槽内で沈降させて観測窓を通してVTR撮影を行い、画像解析によって泥塊の沈降過程における汚濁発生状況を測定するものである。

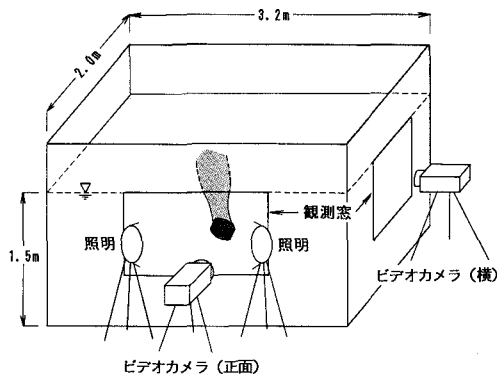


図-1 実験概要図

2.1 実験条件

試料泥は、粒径、含水比と降伏値 τ_y の関係が把握されている福島第二原子力発電所専用港湾内の底泥を用いた。表中の τ_y の値は推定値である(清水ら, 1991)。中央粒径が15 μ m, 25 μ mと異なる2種類の試料について、含水比によって泥塊強度を、泥塊の大きさ・形状によって沈降中の作用外力を変化させた。泥塊形状はいずれも円柱型であるが、断面積43cm²(直径7.4cm)×高さ3.5cmのタイプA, 断面積43cm²×高さ7.0cmのタイプB, 断面積86cm²(直径10.4cm)×高さ3.5cmのタイプCの3種類を設定した。沈降泥塊の諸元を実験結果の一部とともに表-1に示す。

2.2 VTR画像による汚濁発生量の測定

佐藤・久保田(1991)はビデオ画像を用いて浮遊砂濃度と浮遊砂の移動速度を推定する方法を開発しているが、本研究においてもこれと同様に、代表的な画面のビデオ信号をパソコンに取り込み、横140×縦256画素の64階調RGB輝度としてデータ化した。観測窓上に設定された撮影面は1画素が5mm×5mmのスケールとし、深度方向1m×横方向0.7mで水槽底面上0.5mが画面から外れる。

佐藤・久保田(1991)の場合、水を黒に着色した上で浮遊砂に反射される照明光の輝度と浮遊砂濃度との相関を検定して計測を行っているのに対して、本研究の場合、観測窓側からの照明光が浮遊粒子中を透過して水槽奥壁で反射し、ビデオカメラに到達するまでの過程で生じる輝度の低下量から浮遊粒子量を求める方法を採用した。

沈降実験に先立ち、SS濃度の水槽奥行き方向積分値とVTR画像の輝度低下量の関係を検定するため、3種類の直径(6cm, 10cm, 18cm)のアクリルパイプ内に所定濃度の泥水を入れ、水中でパイプを引き抜く瞬間をVTR撮影した。図-2は、横軸に泥水濃度にパイプ径を乗じた値、すなわち撮影面単位面積当たりの浮遊粒子重量、縦軸にパイプ中心線上の画素での輝度低下量(泥水の存在しない状態で撮影した画像からの輝度低下量)をとったものであり、Greenの輝度を対象としている。Redの輝度は相関が良好であるがSSに対する輝度低下量の比率すなわち計測上の分解能が小さく、Blueの輝度は分

* 正会員 工修 五洋建設(株)土木設計部
** 正会員 東電設計(株)原子力土木部
*** 正会員 東京電力(株)

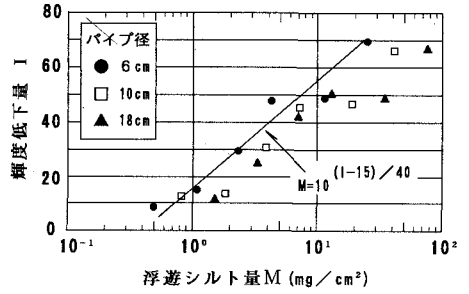
表-1 実験条件

ケース	中央粒径 $d_{50}(\mu\text{m})$	含水比 $w(\%)$	降伏値 $\tau_0(\text{Pa})$	形状タイプ	形状抵抗係数 C_d	沈降形態
CASE 1	15	200.0	6.1	A	2.01	多塊流動型
CASE 2				A	3.01	多塊型
CASE 3				B	3.64	流動多塊型
CASE 4				C	1.61	流動多塊型
CASE 5		165.8	19.1	A	1.59	単塊型
CASE 6		159.8	24.8	A	2.41	単塊型
CASE 7				B	3.27	多塊型
CASE 8				C	1.50	単塊型
CASE 9		147.0	47.0	A	1.60	単塊型
CASE10		139.9	73.4	A	1.46	単塊型
CASE11		134.8	108.8	A	1.36	単塊型
CASE12				B	2.20	単塊型
CASE13				C	1.87	単塊型
CASE14		121.8	769.9	A	2.04	単塊型
CASE15	25	146.0	5.2	A	1.74	流動型
CASE16				A	1.87	流動型
CASE17				B	3.07	流動型
CASE18		C	1.21	流動型		
CASE19		126.0	13.2	A	1.96	流動多塊型
CASE20				B	2.41	流動型
CASE21				C	1.74	流動型
CASE22		113.0	28.9	A	1.50	単塊型
CASE23		103.0	64.3	A	1.74	単塊型
CASE24				B	1.65	単塊型
CASE25				C	1.56	単塊型
CASE26	A			1.81	単塊型	
CASE26	93.8	198.4	A	1.81	単塊型	

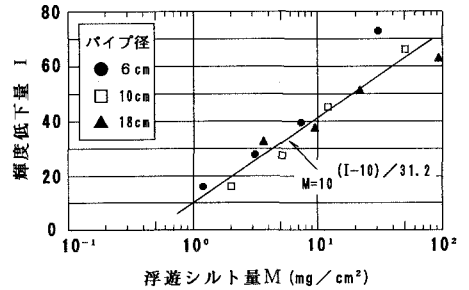
解能が高いが相関が悪くなるといった傾向を示したので Green の輝度を採用した。比較的相関の良くない中央粒径 $15\mu\text{m}$ の試料でもパイプ径によるバラツキは 1 オーダー以内であることから、今回の実験条件の下では、輝度低下量は対象画素上の SS 総量に対応し、その関係は水槽奥行き方向の濃度分布によらないと仮定した。なお、輝度低下量には限界があり、Green の輝度の場合、約 70 以上で沈降実験における泥塊本体との識別が不能となる。

図-3 は上記の検定結果を用いて沈降泥塊周辺の汚濁発生状況を定量化した例である。数値は画素単位面積当たりの SS 濃度の水槽奥行き方向積分値であり、この値を平面的に積分すればその瞬間における SS 総量を算定することができる。なお、図には縦 3 × 横 3 の 9 画素の平均値を示している。

ここに示された 3 例は、それぞれ後述する 3 種類の沈降形態の代表例である。図-3(a) の CASE 6 ($\tau_0: 24.8\text{ Pa}$) と (b) の CASE 7 ($\tau_0: 24.8\text{ Pa}$) は、泥塊本体を目視で判別することが可能であり斜線部でこれを表しているが、(c) の CASE 17 ($\tau_0: 9.6\text{ Pa}$) の場合、斜線部は泥塊との識別が不能であった高濃度領域を表している。図-3 の例では、投入の瞬間から 1 秒後と 3 秒後の状態を示しているが、実際の解析においては各ケース毎に投入の瞬間から 1 秒間隔と着底寸前の画像を対象にこのような処理を行い、泥塊の沈降過程の汚濁発生量を算定した。



(a) 中央粒径 $15\mu\text{m}$



(b) 中央粒径 $25\mu\text{m}$

図-2 浮遊土粒子量と輝度低下量の関係 (Green)

3. 泥塊の沈降状況

今回の実験範囲内で観察された沈降形態は、図-3 に示された 3 例を代表として以下の 3 種類に分類することができる。

- ①単塊型：初期の泥塊形状をほぼ維持したまま、汚濁を発生しつつ沈降する (図-3(a))。
- ②多塊型：沈降途中で泥塊が割裂する (図-3(b))
- ③流動型：沈降途中で初期の泥塊形状が識別できないほどの高濃度雲が発生する (図-3(c))。

単塊型と多塊型は、泥塊本体と懸濁部との境界を終始明瞭に識別することができ、浮遊粒子の殆どが発生地点付近に漂うか、拡散しつつ泥塊本体の後に追従する。これに対して、流動型の場合、高濃度雲発生以前に泥塊本体から離脱した浮遊粒子は単塊型、多塊型の場合と同様の挙動を示すが、高濃度雲本体は流動的に形状を変化させつつも直ちに拡散することなく、概ね一体として挙動する。実験においては、この高濃度雲は水槽底面に至ると同時に著しい拡散を呈するが、仮に底面が存在しなければ、かなりの深度まで一塊の流動体として沈降するものと推測される。

図-4 は、上記 3 形態の発生状況を泥塊強度 (降伏値 τ_0) と作用剪断応力 τ の関係から整理したものであり、 τ

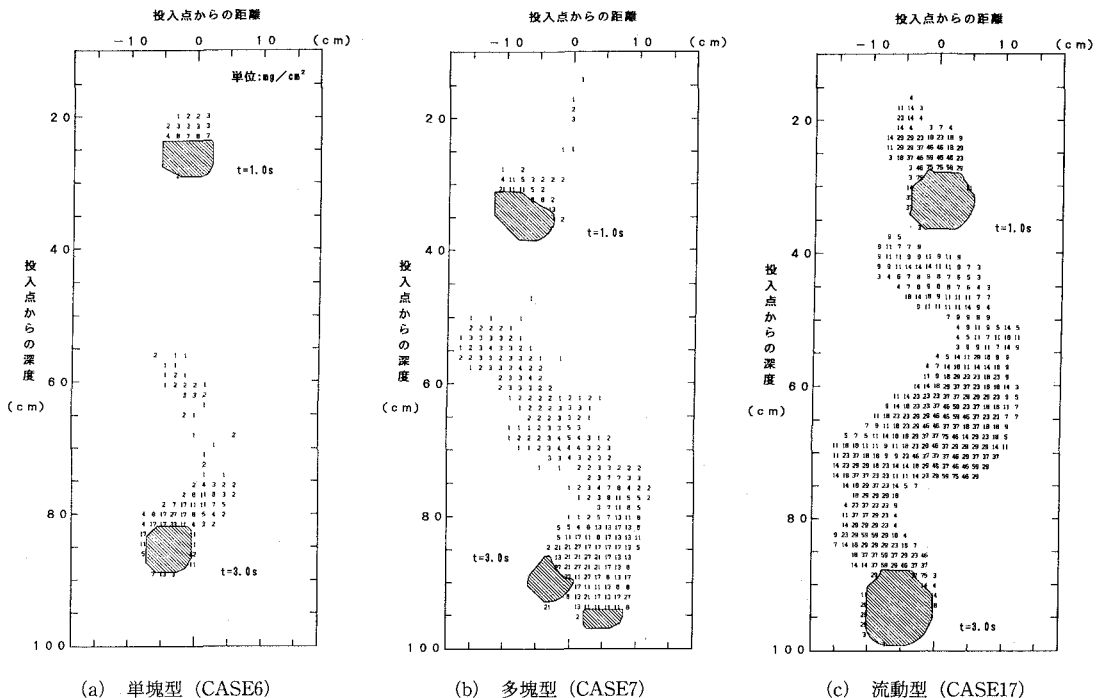


図-3 沈降形態別の汚濁発生状況の画像処理結果例

は後述する沈降塊の運動方程式によって算定した実験中の最大の剪断応力である。上記3形態の複合形態もいくつか観測されており、図中の▲で示された流動多塊型は、発生した高濃度雲が複数に分裂したケースであり、●の多塊流動型は泥塊状態で割裂した後に高濃度雲となったケースである。

多塊型および多塊分散型は、いずれも

$$\tau = 1.13\tau_y + 15 \dots\dots\dots (1)$$

という条件の下で生じていることから、概ね、これを泥塊破壊の判定基準とみなすことができる。

流動型の沈降形態は図中の破線よりも上の領域でのみ観察されたが、この関係よりも大きな τ を作用させることができたのは今回の実験条件では τ_y が20 (Pa)以下の泥塊に限られる。

4. 汚濁移動点源としてのモデル化

4.1 沈降泥塊の運動方程式による汚濁の移動点源モデル

水槽内での泥土沈降実験結果を汚濁発生量の評価に反映させるには、矢内・加藤 (1990) のように汚濁負荷率という一つの指標で表現する方法もあるが、ここでは、泥塊の沈降過程に対応した汚濁の発生状況を表現することを考え以下のようなモデル化を行う。

流水剪断応力によって減耗しつつ沈降する泥塊の挙動

を沈降塊の運動方程式(2)と浮遊粒子の発生すなわち泥塊の質量減少を表す式(3)によって表示する。

$$M \frac{dw}{dt} = (M - m)g - \frac{1}{2} m \frac{dw}{dt} - \frac{1}{2} A \rho C_D w^2 \dots (2)$$

$$\frac{dM}{dt} = -E(\tau) \cdot S \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 w ：泥塊の沈降速度、 t ：時間、 M ：泥塊の質量、 m ：泥塊の排水質量、 g ：重力加速度、 A ：泥塊の投影面積、 ρ ：水の密度、 C_D ：泥塊の形状抵抗係数、 $E(\tau)$ ：泥塊の侵食率、 τ ：泥塊表面に働く剪断応力、 S ：泥塊の表面積である。

剪断応力 τ は便宜的に式(2)の右辺第3項の抗力項

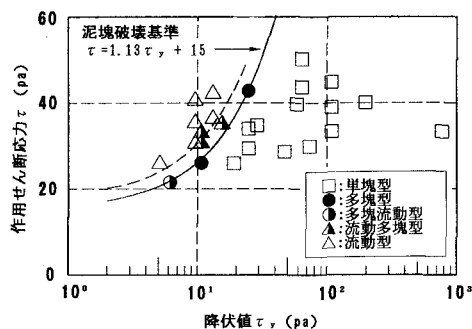


図-4 沈降形態の分類

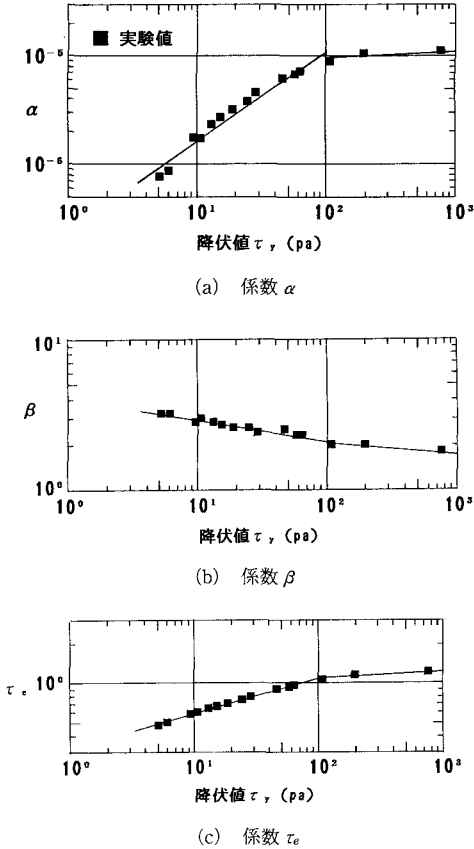


図-5 汚濁発生量評価式のパラメータと降伏値 τ_y の関係

を泥塊表面積 S で除して評価する。

泥塊の侵食率 $E(\tau)$ は、シルテーション解析で広く用いられている巻き上げフラックス算定式と同型の式(4)を仮定した。

$$E(\tau) = \alpha(\tau/\tau_e - 1)^\beta \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 α ：侵食率の次元を有するパラメータ、 β ：無次元パラメータ、 τ_e ：剪断応力の次元を有するパラメータであり、物理的にはこれ以下では侵食が生じない限界の剪断応力という意味を持つ。

4.2 泥塊沈降実験結果によるモデルの同定

泥塊沈降実験の結果に基づいて、式(4)の3つのパラメータを泥塊強度 τ_y のみの関数として定式化する。

上記の移動汚濁点源モデルは、本来の意味では今回の実験ケースのうち単塊型の沈降形態についてのみ適用できるものであるが、多塊型は沈降過程の大部分を単塊で沈降しており、流動型の場合、少なくとも実験水槽内では高濃度の流動体が形を変えつつも一つの塊となって挙動することから、全ケースを対象とし、流動型のケースについては高濃度雲に含まれない浮遊粒子のみを汚濁発生量として扱う。

まず、各ケース毎に沈降距離の経時変化をVTR画像から読み取り、実験中の平均泥塊重量を用いて、式(2)でパラメタスタディを行い、沈降距離の経時変化を最も良好に再現する形状抵抗係数 C_D の値を求める。円柱型の泥塊は、蛇行した沈降経路を呈しつつ様々な方向に向きを変えるが、ここでは、底面積を投影面積 A と仮定して C_D を求めた。各ケースの C_D 値は表-1に示されているが、円柱の水平方向の形状抵抗係数1.2と比べてやや大きめの値となっている。円柱の形状抵抗は鉛直方向のものが水平方向のものに比べて大きいことが知られており、蛇行しながら沈降したことが原因と考えられる。別途実施した球形泥塊に対するケースでは C_D は0.6程度となり、一般に言われている値とほぼ一致した(今回の実験範囲ではレイノルズ数が 10^4 のオーダーとなり、球の C_D は0.5となる)。

次に、図-3のような画像処理を各ケースに対して1秒間隔で行って浮遊粒子量の経時変化を求め、式(3)、(4)によって α, β, τ_e に関するパラメタスタディを行った。同一の泥塊降伏値 τ_y に対するケースは各パラメタの値が共通となるようにした。

α, β, τ_e を降伏値 τ_y に対して整理したものが図-5である。100 Pa を境界に傾向が変わるが、いずれのパラメタも τ_y との間に良好な相関を示しており、以下のように表示することができる。

$5(\text{Pa}) < \tau_y < 100(\text{Pa})$

$$\alpha = 2.49 \times 10^{-7} \times \tau_y^{0.817} \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta = 4.03 \times \tau_y^{-0.141} \dots\dots\dots (6)$$

$$\tau_e = 0.32 \times \tau_y^{0.263} \dots\dots\dots (7)$$

$100(\text{Pa}) < \tau_y < 1,000(\text{Pa})$

$$\alpha = 6.83 \times 10^{-6} \times \tau_y^{0.0683} \dots\dots\dots (8)$$

$$\beta = 2.98 \times \tau_y^{-0.0788} \dots\dots\dots (9)$$

$$\tau_e = 0.84 \times \tau_y^{0.0531} \dots\dots\dots (10)$$

これによって、 $t=0$ における泥塊の質量 M 、体積 m 、形状抵抗係数 C_D および降伏値 τ_y を与えれば式(2)~(10)

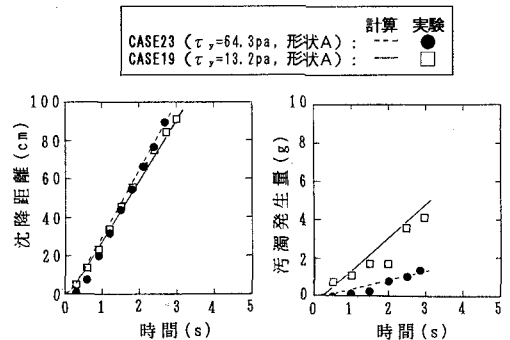


図-6 沈降泥塊モデルによる実験再現

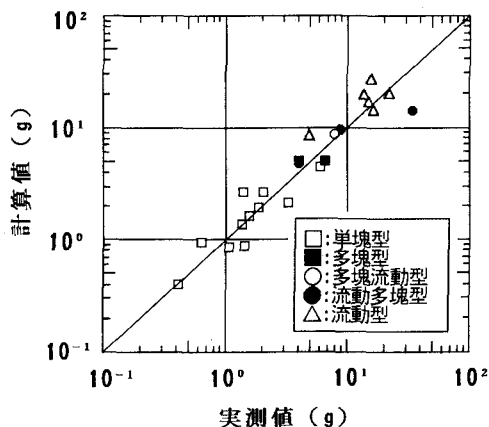


図-7 最終汚濁発生量

によって泥塊の沈降過程での汚濁発生量の時間変化を逐次算定できることになる。

図-6は、上記のモデルによって、改めて実験中の汚濁発生状況を再現した例であり、泥塊の沈降とともに浮遊粒子量が増加していく様子が表現されている。

図-7は全ケースについて最終汚濁発生量(泥塊あるいは濁りの一部が撮影画面から消失する寸前の汚濁発生量)の実測値をモデルによる計算値と比較したものであるが、沈降形態によらず計算値は実測値のほぼ0.6倍～2倍の範囲に収まっており、良好な相関を示している。

4.3 現地への適用について

ここで提案されたモデルを現地に適用する場合、現時点ではいくつかの課題が残されている。

まず、実際の泥塊の大きさを適切に評価する必要があるが、対象泥が当初より泥塊の集合体となっている場合は、何種類かの大きさの泥塊に対して本モデルを適用し、それぞれの存在率に応じて重ね合わせを行うという方法が可能である。しかしながら、対象泥を泥塊の集合体とみなせない場合には取り扱いが難しくなる。対処法として、式(1)の泥塊破壊条件により単塊型となる最大の大きさを対象泥の強度から求め、投入と同時にこの大きさの泥塊群に分割されると仮定することも考えられるが、

この場合、分割時に発生する濁りを如何にして評価するかという問題が残る。これはスケール効果を伴う現象であるので模型実験等で対処することは難しく、試験工事等が必要となる。

いま一つの課題は、本研究で流動型と称した沈降形態が発生した場合の取り扱いである。実験範囲の沈降距離では、高濃度塊は著しい拡散を示さずにほぼ一体となって沈降したが、いずれ自らの周囲に形成された励起流が慣性を失った時点で激しく拡散するものと考えられる。こういった問題に対処するためには、堀江(1983)や小田ら(1990)のように励起流を考慮した取り扱いが必要となる。

5. あとがき

画像解析の導入により、濁度計や採水器では困難な汚濁濃度の時空間的な測定を行うことができた。これに基づいて構築した汚濁移動点源モデルは、現地への適用に際して今後検討すべき課題が残されているものの、汚濁の発生に時間と空間の概念を導入するとともに、泥の強度、作用外力による汎用的な評価法が得られた点で意義は大きいと考えられる。

最後に、佐藤慎司横浜国立大学助教授(現建設省土木研究所)には、本研究で用いた画像処理ソフトについて懇切なる御教示を頂いた。ここに記して、深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 小田一紀・重松孝昌・氏本浩介(1990): DEM法とMAC法の併用による粒子群の沈降分散挙動のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 759-763.
- 佐藤慎司・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, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 251-255.
- 清水琢三・金山進・井上茂・山田富朗・植木一浩・榊山勉(1992): 取水港湾におけるシルテーションの数値モデル, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 421-425.
- 堀江毅(1983): MAC法による直投土砂の初期拡散に関する数値解析, 港研資料, No. 471, 34 p.
- 矢内栄二・加藤謙(1990): 外洋投棄した底泥の拡散過程, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 774-778.