

汚濁物質の拡散抑制技術に関する平面2次元解析

Horizontally two-dimensional analysis for a technology of controlling pollutant's dispersion

森田修二* 中村圭吾** 村橋和夫*** 嘉森裕史**** 新居 理*****

Syuji Morita, Keigo Nakamura, Kazuo Murahasi, Hiroshi Kamori, Osamu Arai

In this paper the authors investigated a technology controlling pollutant's dispersion by applying an artificial floating island consisted of the catalytic filter media, and proposed an numerical method for planning this island. Basic characteristics of the catalytic filter media and informations for designing the media are investigated through experiment. It is found that Darcy law is applicable to the flow between these media because velocity varies in proportion to water level's gradient. We have to take into account of the distribution of grain size of pollutant to exactly predict the dispersion and settling of pollutant.

Keyword : catalytic filter media artificial floating island pollutant's dispersion

1. まえがき

海洋や湖沼には常に河川の水が流入しているが、雨天時には河川が増水し、河川中に堆積した土砂や有機物、リンが多く流出する。流出した土砂は海岸や湖沼の水深を減少させ、有機物やリンは海水や湖水の富栄養化を引き起こす。このような問題の対策の1つには、海洋や湖沼への汚濁物質の拡散を河口付近で抑制する方法¹⁾が考えられる。河口付近で抑制する方策としては、流出水の流速を低下させて汚濁物質の沈降を促進させる方法や汚濁物質を吸着除去させる方法が考えられる。これらの対策を計画する場合には、流速を低下させたり、吸着させる構造体を適切に配置するための解析手法が必要となる。本研究の目的は、このような実用的な解析を行うために、透過性の構造体を含めた流体中の汚濁物質の移流拡散に関する平面2次元解析手法を提案することである。

2. 基礎方程式

2.1 流れ場の解析

沿岸域の流れの解析に対しては、底面の条件を考慮し深さ方向に平均的な流れを仮定した平面2次元の海浜流の方程式が一般によく適用される。海浜流の方程式は波浪に伴う沿岸流や離岸流を対象としたものであるが、本方程式を数値的に解く場合には、潮汐に伴う流れや潮流、河川水の流入などについても境界条件として圧力や流速の条件を仮定することで解析領域内の流況をシミュレーションすることができる。したがって、海浜流の方程式を本報が目的としている河川を含めた流況の解析にも適用できる。海浜流の方程式は、流速が比較的小さく流体の粘性応力は小さいとして、完全流体を仮定したもので、連続の式と完全流体を仮定したオイラーの運動方程式を水面と底面の境界条件を用いて鉛直方向に積分し、波の周期で時間平均することで次式によって表される。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial u h}{\partial x} + \frac{\partial v h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \tau_x \right) + g \frac{\partial \xi}{\partial x} - L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \tau_y \right) + g \frac{\partial \xi}{\partial y} - L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

ここで、 ξ は平均水位変動、 u 、 v は x 、 y 方向の流速、 h は水深であり、 S_{xx} 、 S_{yy} 、 S_{xy} はラディエーション応力と呼ばれる波の過剰運動量流束、 τ_x 、 τ_y は x 、 y 方向の底部せん断力、 L は渦動粘性係数である。

* 正会員 (株)奥村組・電算センター (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2丁目2番2号)

** 正会員 建設省土木研究所・河川環境研究室

*** (株)大阪防水建設社・市場開発チーム

**** 新日本製鐵(株)・エンジニアリング事業本部

***** (株)協和エクシオ・環境システム部

底部せん断力や渦動粘性係数については種々の式が提案されているが、本報では渦動粘性係数に James²⁾ の式を用い、底部せん断力は樁木ら³⁾ の式および Chezy の公式を用いる。一方、河川から流入する汚濁水を抑制するために、図-1 に示すような構造体を河口付近の比較的水深の浅い領域に配置することを考えている。本構造体は微生物の付着生成や産卵に用いられる糸状生物担体で構成されるものであるが、塩ビの心材にポリ塩化ビニルの繊維を融着させた糸状生物担体の一種を用いたものである。現地では、このような構造体を多数連結した人工浮島を配置することになるが、構造体内部の流れは他の領域とは異なり、完全流体を仮定して流れ場を求めることはできない。一方、本報の解析の目的は、構造体内部の流れ場を厳密に再現することではなく、人工浮島によって周辺の流れ場や拡散物質の移行がどのように影響を受けるかを予測することである。また、解析領域の中で人工浮島は一部の領域に限られることを考慮すれば、人工浮島を簡易的にモデル化することができる。ここでは、人工浮島中の流れ場を、糸状担体間を流れる間隙流と仮定して評価する。間隙流に関する運動方程式は、ダルシー則に基づき次式で表される。

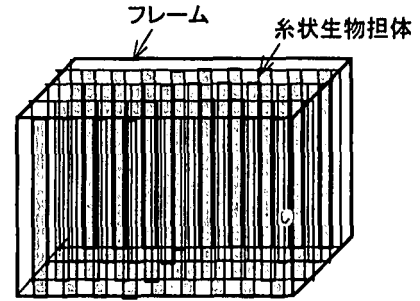


図-1 糸状生物担体からなる透過性の構造体

$$u + k \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$v + k \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

ここで、 k は実験定数である。ただし、構造体中のラディエーション応力は無視し、底部せん断力等は全て実験定数 k に含め評価する。河川からの流入や人工浮島を含めた領域全体の流れ場を求めるために、一般の領域には式(1)～式(3)を適用し、間隙流の領域には式(1)と式(4)、式(5)を適用するハイブリッド型の数値解析手法を用いる。数値解析手法には、差分法の中でも漸化式を利用して陰的に解く ADI 法を適用する。本手法は差分法であるため、基礎方程式の異なる領域を比較的に容易に接続することができる。式(1)と式(4)、式(5)の定式化は次式で表される。なお、一般領域の定式化は多くの文献⁴⁾ に示されているので省略する。

$$\zeta_{ij}^{n+1/2} = -A_{ij} u_{ij}^{n+1/2} + D_{ij} \quad (6)$$

$$u_{i,j}^{n+1/2} = -E_{ij} \zeta_{ij}^{n+1/2} + F_{ij} \quad (7)$$

$$v_{ij}^{n+1/2} = -k(\zeta_{ij+1}^{n+1/2} - \zeta_{ij}^{n+1/2}) \quad (8)$$

ここで、係数 A_{ij} 、 B_{ij} 、 D_{ij} 、 E_{ij} 、 F_{ij} は次式で表される。添え字の i 、 j は x 、 y 方向の差分点を表す。通常の ADI 法の通り、式(6)、式(7)を用いてステップ n の ζ_{ij} 、 v_{ij} から解析領域のステップ $n+1/2$ の ζ_{ij} 、 u_{ij} を求め、次に式(8)を用いてステップ $n+1/2$ の v_{ij} を求める。次に式(6)～式(8)の u と v を入れ替え、差分方向も i と j を入れ替えた式を用いて、ステップ $n+1/2$ からステップ n の ζ_{ij} 、 u_{ij} 、 v_{ij} を求める。

$$A_{ij} = \Delta t \cdot h_{ij} / 2 \Delta s \quad (9)$$

$$B_{ij} = \zeta_{ij}^n - A_{ij} v_{ij}^n + A_{ij-1} v_{ij-1}^n \quad (10)$$

$$D_{ij} = A_{i,j} u_{i,j}^{n+1/2} + B_{ij}^n \quad (11)$$

$$E_{ij} = k / (1 + k A_{ij}) \quad (12)$$

$$F_{ij} = k D_{ij} / (1 + k A_{ij}) \quad (13)$$

以上の操作を繰り返し行うことで流れ場の非定常解析が行える。また、一般領域と間隙流の領域との接続点では ζ_{ij} と u_{ij} あるいは ζ_{ij} と v_{ij} を連続させればよいので容易に処理できる。

2.2 移流拡散解析

流体中の物質移行の解析方法には、物質の移行を逐次追跡していくラグランジュ的な方法と質量保存則に基づいて解くオイラー的な方法が考えられる。オイラー的解法は対象とする解析領域の全域について計算を実行する必要があるため計算量は多くなるが、海浜流のように比較的流速の小さい場合には、ラグランジュ的解法に比べて安定で精度の良い解が得られる。したがって、本報においてはオイラー的解法を適用する。物質移行に関する基礎方程式は、連続の方程式とフィックの法則から導かれる移流拡散方程式で表され、鉛直方向に積分した平面2次元の基礎方程式は次式で表される。

$$h(1+R) \frac{\partial C}{\partial t} + u h \frac{\partial C}{\partial x} + v h \frac{\partial C}{\partial y} - \epsilon_x h \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \epsilon_y h \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \Delta q = 0 \quad (14)$$

$$\Delta q = C_0(w_f - u^*) + C w_f \quad (15)$$

ここで、 C は拡散物質の断面平均濃度、 ϵ_x 、 ϵ_y は分散係数、 R は遅延係数、 Δq は鉛直方向フラックス、 C_0

は底面の境界条件としての基準点濃度、 w_f は物質の沈降速度、 u^* は底部摩擦速度の振幅、なお、式(15)の第1項は巻き上げフラックスを表すもので、 $u^* \leq w_f$ のときは0である。なお、本報では、数値解析手法に有限要素法を適用した。有限要素法は完全に陰的に解を求めるため、定常解も容易に求められる利点がある。

一方、拡散物質の粒度分布を考慮する場合は、粒径に依存する沈降速度の差を評価する必要がある。断面平均濃度 C を粒径ごとに次式のベクトルで表し、沈降速度 w_f についても各粒径ごとに次式のベクトルを適用する。

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_m\} \tag{16}$$

$$w_f = \{w_{f1}, w_{f2}, w_{f3}, \dots, w_{fm}\} \tag{17}$$

上式の $C_1, \dots, w_{f1}, \dots$ は粒径ごとの濃度と沈降速度を表している。 m は粒度分布を表す代表粒径の総数である。最終的には、各粒径ごとの濃度の和として次式で断面平均濃度を求める。 b_i は各粒径の分配率である。

$$C = \sum C_i \times b_i \quad (i=1 \sim m) \tag{18}$$

通常の解法では、粒径ごとに連立方程式を陰的に解く必要があるため、粒径の数だけ計算量が倍増することになる。なめらかな粒度分布を評価して非定常の計算を行う場合には計算量が膨大になることが予想される。本報では、この煩雑さを回避するために沈降フラックスを連立方程式の係数とせずベクトル項として扱い、収束計算を行う手法を適用した。遅延係数や分散係数に濃度依存性がなければ、沈降フラックスをベクトル項とすることで、連立方程式の係数は粒径の数に関わらず一定となるので、連立方程式は1回だけ解けばよいことになる。

3.実験による検証

図-2には水理模型実験の概要を示したが、まず、解析に必要となる物性値の評価を行い、次に流れと汚濁物質の移流拡散現象に対する解析手法の妥当性を検証するために、模型実験のシミュレーションを行った。

3.1 物性値の評価

糸状担体のモジュール（糸状担体とフレームによって構成される1ユニット）が流れに対してどの程度の抵抗体となるか、また、流速と圧力の関係が先のモデル化のようにダルシー則に適合するか確認の実験を行った。図-3には、2次元水槽を用いて一定流速の条件下で得られた流速と糸状担体のモジュールによって生じる水位差の関係を示したものである。図の横軸は流速であり、縦軸はモジュールの前と後との水位差を表している。モジュールの長さは1m、幅は水路幅と同じ0.5mで一定であるが、モジュール内の糸状担体の配置間隔（流れと直交方向）を5cm、10cm、20cmの3種類について実験を行っている。流れ方向の配置間隔は10cmで一定である。配置間隔が10cmの場合について流速を変えて水位差の変化を調べた。流速と水位差はほぼ比例関係にあり、ダルシー則の適用が可能であることが分かる。したがって、糸状担体の配置間隔が10cmの場合は、実験定数は $k=10\text{m/sec}$ となる。流速が10cm/secの場合で、糸状担体の配置間隔によるモジュール前後

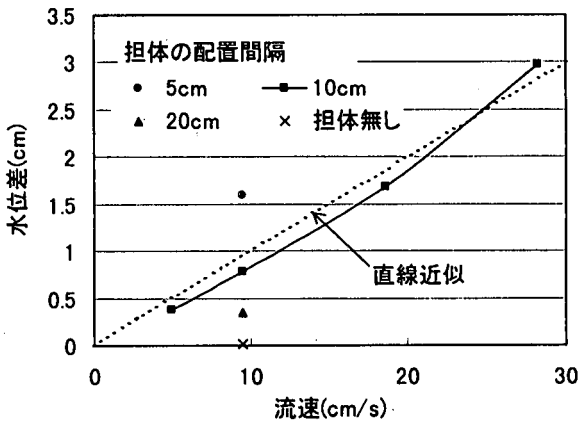


図-3 流速と水位差の関係

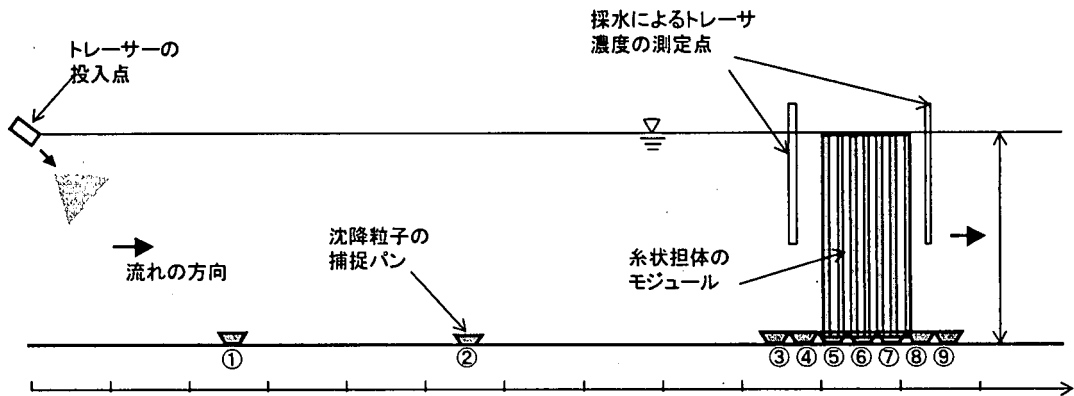


図-2 水理模型実験の概要

の水位差の変化を見ると、配置間隔が 5cm では特に水位差が大きくなる傾向が見られる。この結果から、配置間隔を 5cm 以下にすると水位差がさらに急激に大きくなることが予想される。

次に、糸状担体の吸着や沈降といった物質の移行に及ぼす特性について確認した。実験方法は、流速抵抗と同じ 2 次元水槽で、上流からトレーサー（関東ロームと粒度分布が同等なマイクロサンド）を混入させた溶液を一定時間通水しモジュールの前後と直下の水路底にパンを設置して沈降粒子を捕捉するというものである。また、通水終了後には担体に付着した粒子の重量を測定し、沈降粒子と吸着粒子の粒度分析も行った。表－1 に実験の条件を示した。実験条件では、CASE4 はモジュールを無しとしてモジュールの有無による比較を行った。流速は一定としたが、投入するトレーサの濃度を変化させて沈降量やモジュールへの吸着量の濃度に対する依存性を確認した。表中の投入流量は原液の投入量であり、換算濃度は通水量によって希釈された投入点における平均濃度を表している。

図－4 には水路底のパンに捕捉されたトレーサの沈降量をパンの中心座標で示したものである。図の縦軸の沈降量は単位面積あたりの沈降重量 W を表－1 の換算濃度と水深で無次元化したもので、図の横軸は図－2 の座標であり、トレーサの投入点を原点としている。図中で黒塗りはモジュールがある場合、白ヌキがモジュールのない場合を示している。モジュールの位置を図中に示したが、CASE1～CASE3 のモジュールを設置した場合でも、その範囲において沈降量に特に大きな変化は見られず、モジュールの前後とほぼ同じような傾きで変化している。また、モジュールがない場合と比較しても特に差は見られない。これらの結果から、モジュールによる沈降現象そのものには影響が特に認められなかった。

糸状担体への吸着特性を把握するために、通水実験の終了後にモジュール内の第 1 列、4 列、7 列、10 列（全体で 11 列）の糸状担体を 2 本ずつ採って、吸着したトレーサの重量を測定した。図－5 には、トレーサ濃度と吸着量の関係を示した。縦軸の吸着量は糸状担体 1 本あたりの吸着量を占有体積で除した値である。占有体積とはモジュールの体積（ $1\text{m} \times 0.4\text{m} \times 0.5\text{m}$ ）を糸状担体の本数で除して 1 本当たりの占有体積を表したものである。また、横軸は流水中のトレーサ濃度で、図－2 の採水によって測定したモジュール前後のトレーサ濃度から糸状担体の位置における濃度を内挿補間した値である。実験終了時には流水中の濃度は十分に定常状態に達しており、モジュール前後の濃度の差は小さく、内挿補間した値を用いても問題はない。この結果から、トレーサ濃度と吸着量には概ね比例関係が成り立つと考えられる。したがって、式（14）中の遅延係数を用いることが可能であり、遅延係数は $R=3.0$ となる。

3.2 解析手法の検証

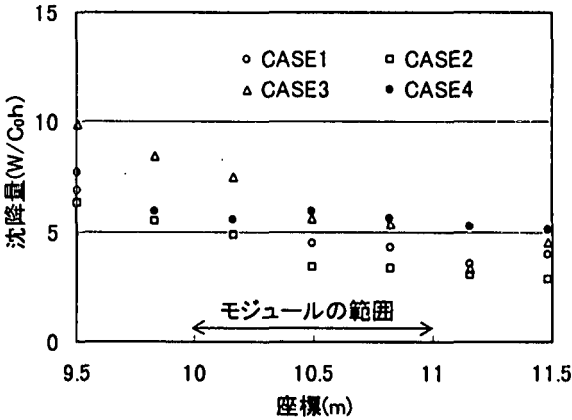
実験結果の分析から得られた物性値を用いて水理模型実験のシミュレーションを行い、モジュールによって生じる水位差やトレーサの沈降量、etc から本解析手法の検証を行う。

（1）流れ場の解析

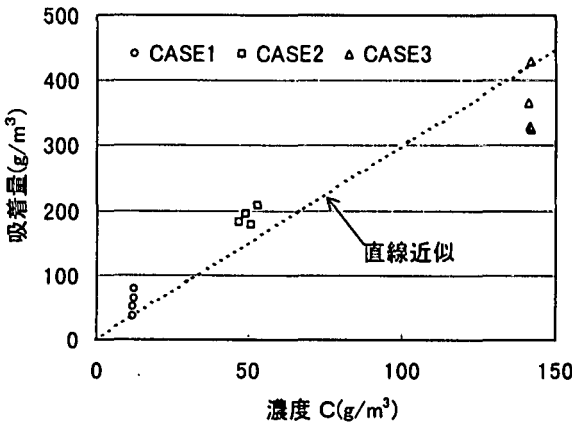
まず、実験条件の中で、糸状担体間隔が 10cm の場合の実験定数 $k=10\text{m/s}$ を用いて流れ場のシミュレーショ

表－1 トレーサ通水実験の条件

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
流速(m/s)	0.059			
原液濃度(g/m ³)	3770	16700	30800	14700
原液流量(m ³ /s)	8.33×10^{-5}			
換算濃度(g/m ³)	26.6	117.9	217.5	103.8
モジュールの有無	有り			無し
水槽断面寸法	0.4m(水深) × 0.5m(幅)			



図－4 沈降量の分布



図－5 濃度による吸着量の変化

ンを行う。なお、解析手法は2次元平面解析であるが、1次元問題として扱い、解析領域はモジュールを中心に10mとした。図-6に解析結果を示したが、縦軸はモジュールの上流と下流での水位の変化を示したものである。図の横軸は、図-2に示した座標に合わせて示した。適用した実験定数からは、流速が0.05~0.3m/sに対し、水位の変化は理論的には0.005m, 0.01m, 0.02m, 0.03mとなる。解析結果は、流速が0.3m/sの場合にモジュールの前面にやや乱れが見られるが、ほぼ理論上の水位変化に一致している。

図-7には、モジュールの上・下流の流速の変化を示した。流速が0.05m/sや0.1m/sの場合では、流速の変化が非常に小さいが、0.2m/s, 0.3m/sでは明らかにモジュールの下流側で流速が大きくなっていることが確認できる。理論的には水位差に応じて流速が変化するため、次式で変化量が求められる。ここで u_0 は初期流速、 h 初期水位、 Δu 、 Δh は流速と水位の変化である。図との比較から理論値とよく一致している。

$$\Delta u = u_0 \times (\Delta h / h)$$

$$u_0 = 0.2 \text{ m/s} \rightarrow \Delta u = 0.2 \times (0.02 / 0.4) = 0.01 \text{ m/s}$$

$$u_0 = 0.3 \text{ m/s} \rightarrow \Delta u = 0.3 \times (0.03 / 0.4) = 0.0225 \text{ m/s}$$

以上の結果から、流れ場の解析については実験結果を非常によく再現できることが分かり、モジュールのモデル化も含め本解析手法の妥当性が確認できた。

(2) 拡散解析

拡散解析では、表-1の実験条件を対象としたシミュレーションを行う。実験の条件は流速一定で、トレーサの濃度とモジュールの有無が異なっている。実験結果の分析から、物性値がトレーサ濃度に依存しないことから、解析ではモジュールの有無による2ケースとした。解析領域はモジュールを中心に20mとし、上流の境界をトレーサの流入境界とし、下流の境界を自然流出境界とした。流速と水位は解析領域全域で一定とした。厳密にはモジュールの上流と下流で流速と水位が変化するが、図-6、図-7から分かるように、流速が0.059m/s程度ではその変化は1%程度で無視できる範囲と考えられる。また、トレーサの沈降速度に関して粒度分布を考慮した解析を行う。解析では、粒度分布を10段階の粒径に分割して、各粒径の沈降速度をRubeyの式によって推定した。粒子の沈降速度に関しては数種の推定式があるが、今回の実験で用いたトレーサの粒径の範囲では、いずれの式を用いても沈降速度はほぼ同様の値となる。図-8には、60分間通水後の沈降量の分布について解析値と実験値の比較を示した。

実線が解析値、白ヌキが実験値を表している。また、粒度分布を考慮した効果を確認するために、中央粒径のみで解析した場合の結果を点線で示した。図の横軸はトレーサの投入点から下流方向の座標であり、縦軸は単位面積当たりの沈降量を投入点のトレーサ濃度と水深で無次元化したものである。先の実験結果の分析からモジュールによる沈降量の変化はほとんどないこと。また、通水時間が60分間と長く、トレーサ濃度が定常状態に達してから十分に時間が経過しているため、吸着係数の影響も小さくなっている。これらのことから、解析値と実験値ともに沈降量の分布にはモジュールの有無による差が見られない。解析値と実験値の比較では、CASE3にややずれがあるが、その他は解析によってよくシミュレートできていることがわかる。2.4m、5.4mの地点にお

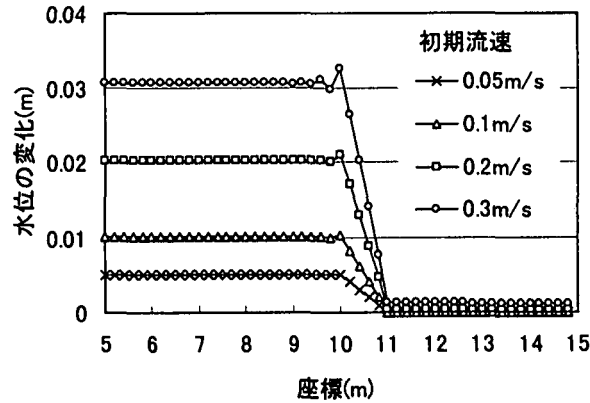


図-6 水位の分布

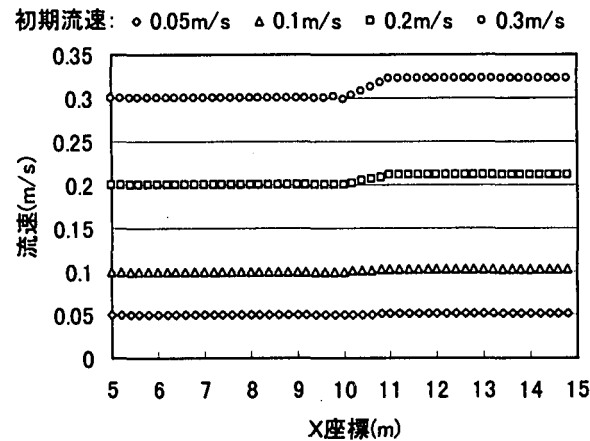


図-7 流速の変化

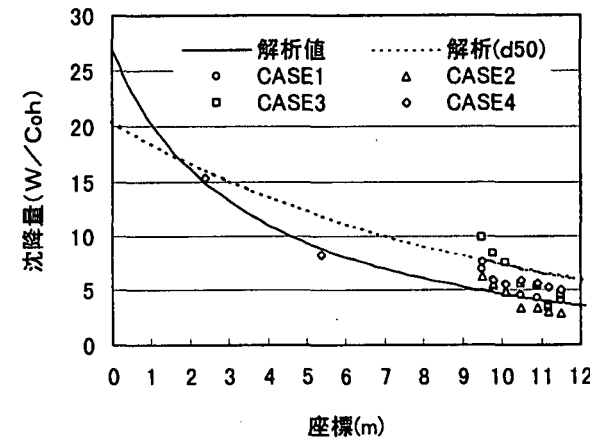


図-8 沈降量の分布

る沈降量を測定しているのは CASE4 だけではあるが、この地点においても解析値とよく一致している。一方、中央粒径による解析結果では、沈降量は平滑化された分布状況となっており、投入点付近では沈降量が過小評価になり、投入点から離れると過大評価になる。

つぎに、沈降あるいは吸着したトレーサの粒度分布について検討する。図-9 には、沈降粒子の粒度分布を示した。粒度分析を実施したのは、図-2 における④、⑥、⑨のバットに捕捉したトレーサである。図には解析値と実験値に加えて、投入値としてトレーサの原材料の粒度分布も合わせて表した。解析値ではバットの位置による差が極めて小さいために、⑥に相当する結果のみを示した。

図-9 の投入値と解析値を比較すると、解析値では粒径が小さい部分と大きい部分の分布率が減少している。この原因は、粒径が小さい部分は、沈降速度が小さいために沈降量が少なくなり、粒径が大きい部分は比較的早めに沈降が進むために捕捉バットの位置では沈降量が少なくなることである。一方、実験値を見ると、粒度分布そのものには解析値とややずれがあるが、投入値との比較では、解析値と同じ傾向が現れている。

図-10 には、モジュールに吸着したトレーサの粒度分布を示した。粒度分析を行ったのは吸着量を測定した吸着粒子（図-2 の第1、第4、第7、第10 列の糸状担体、全体では 11 列）である。沈降粒子と同じく投入値の粒度分布も合わせて示した。解析値は、糸状担体の各列に該当する地点の粒径ごとの濃度分布が吸着粒子の粒度分布に相当するものとしたが、列の位置による差がほとんどないので、第4 列の粒度分布を示している。解析値と投入値を比較すると、解析値では粒径の大きいものが比較的早めに沈降して、粒径の小さい部分の分布率が大きくなっていることを表している。一方、実験値では $10\mu\text{m}$ 以下の粒子の分布率は小さいが、 $10\mu\text{m}$ 以上の粒子の分布率は、投入値よりも解析値に近い値を示している。この結果は、粒径の小さいものが糸状担体に吸着しにくい傾向を示唆しており、今後の解析手法の課題と考えられる。

4. あとがき

糸状担体で構成されるモジュールの機能を確認するために実施した水理模型実験の結果から、解析に必要な物性値の評価を行った。ここで得られた物性値を基にした水理実験の数値シミュレーションの結果では、モジュールの流速抵抗や汚濁物質の沈降量、沈降粒子や吸着粒子の粒度分布の比較から、本報で適用した解析手法やモジュールのモデル化が実用的であることが確認できた。今回用いた糸状担体には汚濁物質の吸着性は小さく、沈降に与える影響も認められなかった。一方、流速抵抗に関する特性は確認できており、糸状担体で構成される人口浮島によって流れの方向を制御することは可能である。したがって、汚濁物質の拡散を抑制するためには人工浮島の配置方法が重要と考えられ、本報で提案した解析手法を用いて、現地に促した検討が必要であろう。

4. あとがき

糸状担体で構成されるモジュールの機能を確認するために実施した水理模型実験の結果から、解析に必要な物性値の評価を行った。ここで得られた物性値を基にした水理実験の数値シミュレーションの結果では、モジュールの流速抵抗や汚濁物質の沈降量、沈降粒子や吸着粒子の粒度分布の比較から、本報で適用した解析手法やモジュールのモデル化が実用的であることが確認できた。今回用いた糸状担体には汚濁物質の吸着性は小さく、沈降に与える影響も認められなかった。一方、流速抵抗に関する特性は確認できており、糸状担体で構成される人口浮島によって流れの方向を制御することは可能である。したがって、汚濁物質の拡散を抑制するためには人工浮島の配置方法が重要と考えられ、本報で提案した解析手法を用いて、現地に促した検討が必要であろう。

なお、本報で示した水理模型実験は、建設省土木研究所、(財)土木研究センターと民間 11 社（大阪防水、奥村組、鹿島建設、加藤建設、カナツ技建、協和エクシオ、熊谷組、三信建設、新日本製鐵、日特建設、日本建鐵）による共同研究「糸状生物担体による河川・湖沼浄化技術の開発に関する研究」で実施したものである。

【参考文献】

- 1)建設省土木研究所他：糸状生物担体による河川・湖沼浄化技術の開発に関する共同研究 平成8 年度報告書
- 2)James,I.D.: A nonlinear theory of longshore currents, Estuarine and Coastal Marine Science, Vol.2,pp.235~249
- 3)樫木亨、他：河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研究,第 31 回海岸工学講演会論文集,pp.411~415,1984
- 4)例えば、金子安雄、他：ADI 法による潮流汚染拡散の数値計算、港湾技術研究所報告,Vol.14,No.1,pp.3~61,1975

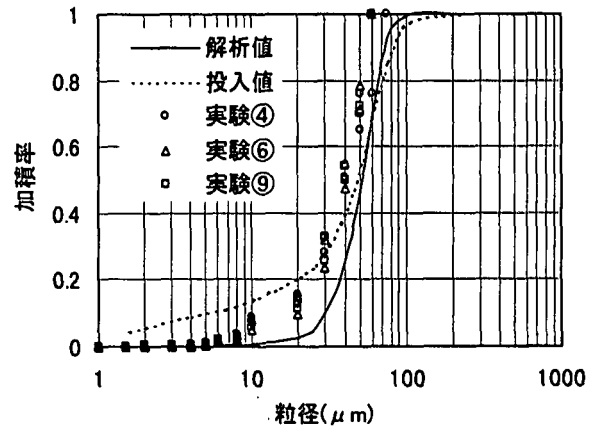


図-9 沈降粒子の粒度分布

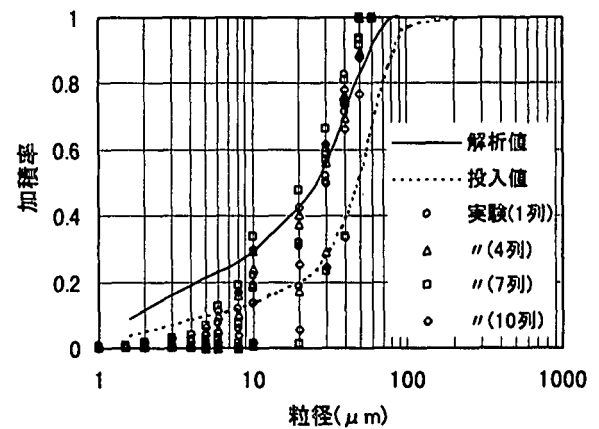


図-10 吸着粒子の粒度分布