

底泥の輸送・凝集・圧密モデルのマハカムエスチャリーへの適用

Fitri Riandini¹・山下隆男²・高山知司³

底泥の凝集, 沈降阻害, 圧密の挙動を, 流れの静圧近似 3 次元モデルに導入した底泥輸送の数値モデルを構築した。このモデルでは, 浮遊底質と乱流との相互作用, フロックの成長に及ぼす乱流せん断応力と濃度の関係式, 圧密による堆積層の強度増加機構, 沈降抑制効果による高密度界面の形成を考慮している。流泥層の流動モデルには Bingham 塑性体のせん断応力関係が適用され, 圧密モデルでは底泥の骨格構造や応力関係をフラクタル理論により表示した Gibson 方程式が用いられている。このモデルをインドネシア, 東カリマンタン州のマハカム川の淡水・海水交換過程, 底泥輸送のシミュレーションに適用し Utrecht University の観測結果との比較からモデルの再現性を検討した。

1. 緒 言

底泥の凝集, 沈降阻害, 圧密の挙動を, 流れの静圧近似 3 次元モデルに導入した底泥輸送の数値モデルを構築した。このモデルでは, 浮遊底質と乱流との相互作用, フロックの成長に及ぼす乱流せん断応力と濃度の関係式, 圧密による堆積層の強度増加機構, 沈降抑制効果による高密度界面の形成を考慮している。モデルでは, 高濃度浮泥層 (CBS 層) と流泥層 (fluid mud) からなる流動層と, 圧密層とを分離している。CBS 層・流泥層の流動モデルには Bingham 塑性体のせん断応力関係が適用され, 圧密モデルでは底泥の骨格構造や応力関係をフラクタル理論により表示した Gibson 方程式が用いられている。本研究では, このモデルをインドネシア, 東カリマンタン州のマハカム川の河口デルタでの淡水・海水交換過程, 底泥輸送のシミュレーションに適用した。マハカムエスチャリーでは, 2003 年に Utrecht University の IMAU (Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht) により, 水温, 塩分, 浮遊底泥濃度等の現地観測と衛星画像による解析が行われている。本研究では, この観測結果を底泥の輸送・凝集・圧密数値モデルで再現することを試みた。

2. 底泥の輸送・凝集・圧密数値モデルの概要

粘着性底泥モデルの構造を図-1 に示す。乱流, フロック形成, 沈降阻害を考慮した water column 内の流動モデルと, mobile mud 内の高濃度浮泥層 (CBS), 流泥層 (fluid mud), および圧密層 (consolidation mud) からなる圧密モデルで構成される。流体力学モデルは ECOMSED (HydroQual, 2002) をそのまま用いているので, 準 3 次元 σ 座標系の POM (プリンストン海洋

モデル) である。ただし, ECOMSED の粘着性底質の輸送モデルの部分を, 図-1 の輸送・凝集・圧密数値モデルに書き換えた (Fitri・山下; 2005)。

流動モデルでは, POM の 2.5 次モーメントの乱流モデルで計算される乱流場と底泥の凝集・崩壊の相互作用, 沈降阻害を考慮した沈降速度を導入している (Winterwerp, 1999)。流動層の下には Mobile mud 層 (CBS 層と fluid mud 層) を考慮し, ここでの底泥は Bingham 塑性体を仮定している。

圧密モデルはフラクタル次元で表示した組成構造, 応力から誘導した鉛直 1 次元の Gibson 方程式でシルト・クレイと砂の 2 成分を考慮している。流動と圧密の時間特性の相違を考慮し, 流動モデルの数ステップに 1 回, 圧密モデルを計算する。モデルの詳細は Fitri・山下 (2005) に示してある。

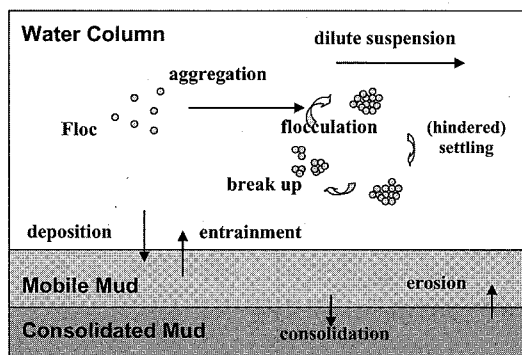


図-1 モデル構造

3. マハカムエスチャリーでの数値解析

(1) マハカムエスチャリー

マハカム川は, 図-2 に示すように, カリマンタン島の東部位置し, マッカサル海峡に流入する大河で, そこには面積 5,200 km² の熱帯生態系が形成されている。その内訳は, デルタの陸上植生部分は 1,500 km², テラス

1 学 生 員 工 修 京都大学 大学院工学研究科
2 正 会 員 工 博 広島大学教授 大学院国際協力研究科
3 フェロー 工 博 京都大学教授 防災研究所

部は $1,000 \text{ km}^2$ 、プロデルタ部は $2,700 \text{ km}^2$ である。マハカム川の流量は $1,000 \sim 3,000 \text{ m}^3/\text{s}$ で流送土砂量は約 $8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ であると推定されている (Davis, 1985)。来襲波浪は高々 60 cm で、波浪による底質の分散効果は小さい。潮汐は平均潮位差で 1.2 m 、大潮時潮位差 3 m の半日周潮で、デルタ地形の形成には大きな影響を及ぼすが、必ずしも潮汐卓越型のデルタではない。潮汐の流速は河口部で約 1 m/s のオーダーである。マハカムエスチャリーの水産資源や水運はインドネシアに貴重な資源であるが、陸起源の海洋汚染、沿岸環境の管理の遅れ、水産資源の乱獲の他に、流域開発に伴う河川からの流送浮遊砂量の変化に関する理解不足が加わって、主要水産業施設の廃止や航路埋没等の漂砂災害も発生している状況である。

このような状況に鑑み、2003年にオランダの Utrecht University の IMAU (Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht) により、水温、塩分、浮遊底泥濃度等の現地観測と衛星画像による解析が行われ、マハカムエスチャリーの水域環境に関する情報が整備されてきている。

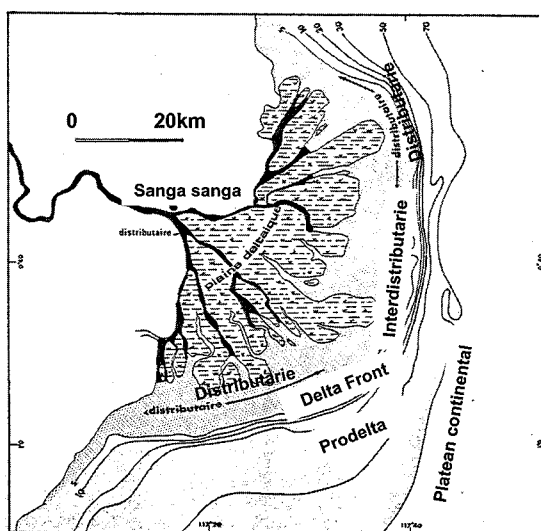


図-2 マハカムエスチャリーの地形

(2) 計算条件

本研究では、マハカムエスチャリーにおける IMAU の観測結果を底泥の輸送・凝集・圧密数値モデルで再現することを試みる。計算領域は図-3に示すマハカムデルタ、マハカム川およびマッカサル海峡を包括する、南緯 $0^{\circ}10'00''$ から $1^{\circ}03'00''$ 、東経 $116^{\circ}59'00''$ から $118^{\circ}00'00''$ である。平面メッシュ数は 468×490 (200 m) で、鉛直 σ 座標は計算機のメモリー制約も考慮して 5 メッシュとした。

表面における全浮遊物質の空間分布は IMAU の衛星画像解析観測 (Landsat TM, SPOT の HRV と ASTER) により求められているので、これを鉛直一様分布として浮遊底質の初期・境界条件とした。海域での浮遊砂濃度観測は図-6に示す 15 点で実施されており、ここの観測結果は計算結果の検証に用いる。

潮汐は主要 6 分潮を、河川流量は一定値 $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$ を与えた。初期境界条件としての塩分濃度は海域で 33 psu、河川は 0 psu、水温は河川で 29°C 、海域で 26°C とした。また、鉱物粒子の基本粒径は $4 \mu\text{m}$ で、これがフロックを形成する過程を質量保存則とフロック数の変化式を解いてフロックの粒径をシミュレーションしている。そのため、河川最上流端での境界条件は、粒径 $4 \mu\text{m}$ の鉱物粒子の浮遊砂濃度 170 mg/l の一定値が供給されるものとした。

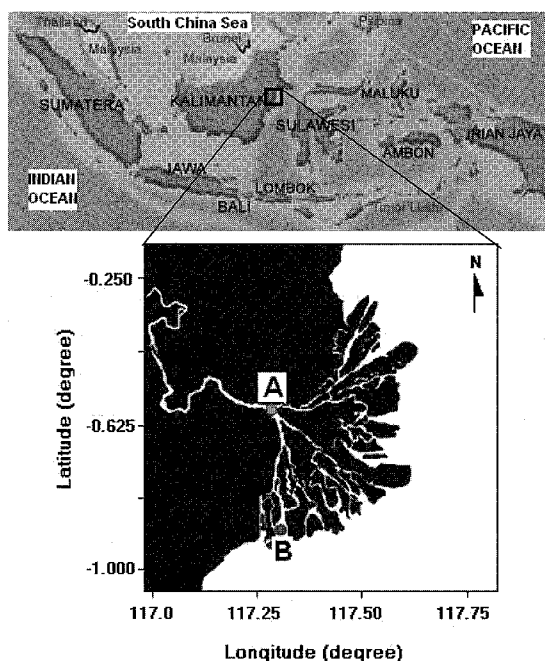


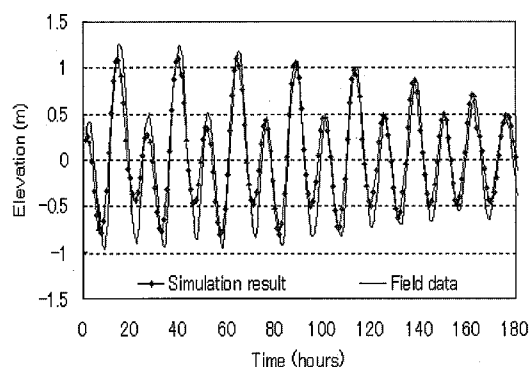
図-3 マハカムエスチャリーの位置と計算領域

(3) 解析結果

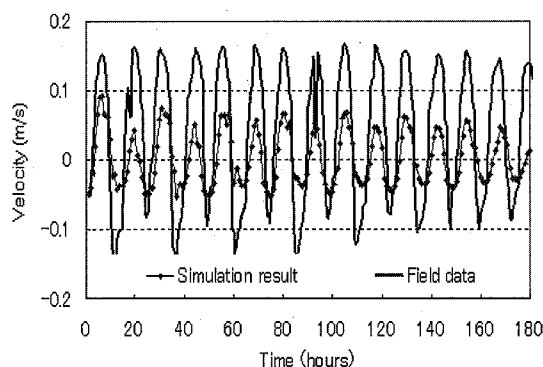
流体力学モデルは POM を用いている。図-3の下図に示した点 A (Muara Jawa) での 2003 年の 6 月 30 日から 7 月 8 日の間の水面変動および流速記録により、潮汐計算の検証を行った結果を図-4に示す。この図の (a) より、支流の上流部にもかかわらず潮位変動計算の結果は極めて再現性が良いことがわかる。しかしながら、(b)に示す流速値の比較では、計算結果が半分以下になっている。これは、流路幅の再現性に水平メッシュ 200 m の解像度の限界があるためで、この点での河道幅が

大きめに再現されているためであると思われる。河道内での流速の再現性は水平解像度に大きく左右されるため、浮遊砂の移動特性にはこれによる誤差が介入することを考慮する必要がある。

観測点 A における表層の浮遊砂濃度時系列の計算結果 (ECOMSED の浮遊砂輸送モデルと本研究で用いたモデル) と IMAU の観測結果の比較を図-5 に示す。この図



(a) 点 A における潮位変化



(b) 点 A における流速変化

図-4 潮汐の検証計算

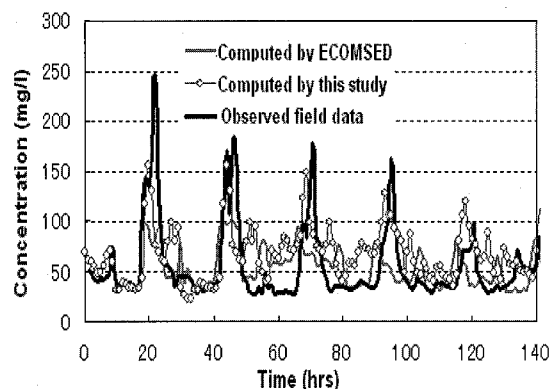
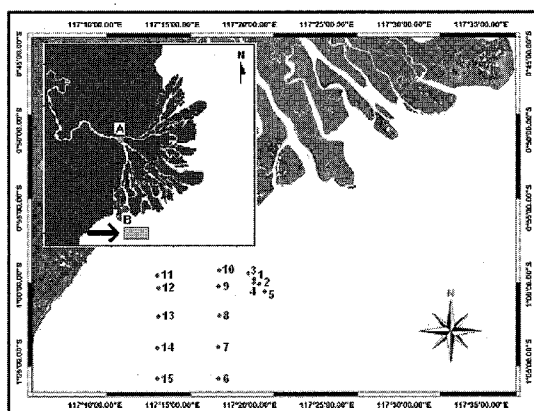


図-5 浮遊砂濃度の変化のモデルと観測結果の比較

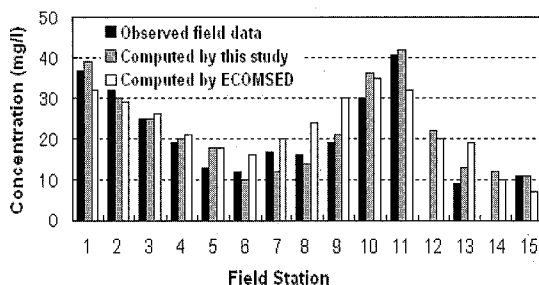
からわかるように、計算結果が観測値より小さめに出ていのは、河道幅の解像度による流速値の過小評価に起因しているものと考えられる。ECOMSED の浮遊砂輸送モデルと本研究で用いたモデルとの比較では、本研究モデルはピーク時の高濃度を再現しており、観測値に近いことがわかるが、この結果からだけではモデルの適用性の優劣の判断としては十分ではない。

一方、流速の再現計算において河川幅の影響を受けない海域での浮遊砂濃度の観測結果によるモデルの検証を行った結果を図-6 に示す。これは 2003 年 7 月 3 日から 5 日の平均濃度を、図に示す 15 地点での観測結果と本モデルによる計算結果とを比較したものであるが、海域の空間分布の傾向が良く再現されていることがわかる。

表層の塩分濃度の 1 潮汐内での空間分布の変動特性を図-7 に示した。また、浮遊砂濃度および平均流速ベクトルの空間分布の同様の変動特性を図-8 に、計算と日時は異なるが、Budhiman (2004) がランドサット ETM から推定した 2002 年 9 月 10 日の全浮遊物質濃度 (TSM) 分布を図-9 に示した。図-7 からは、表層の塩水・淡水境界面は一定の形状を保ちながら変動しているが、下げ潮時には河川水が塩水・淡水境界面を海側へ押



(a) 浮遊砂濃度の観測位置 (Field Station No. 1~15)



(b) 観測値とモデルによる推算値との比較

図-6 海域における浮遊砂濃度の観測-モデルの比較

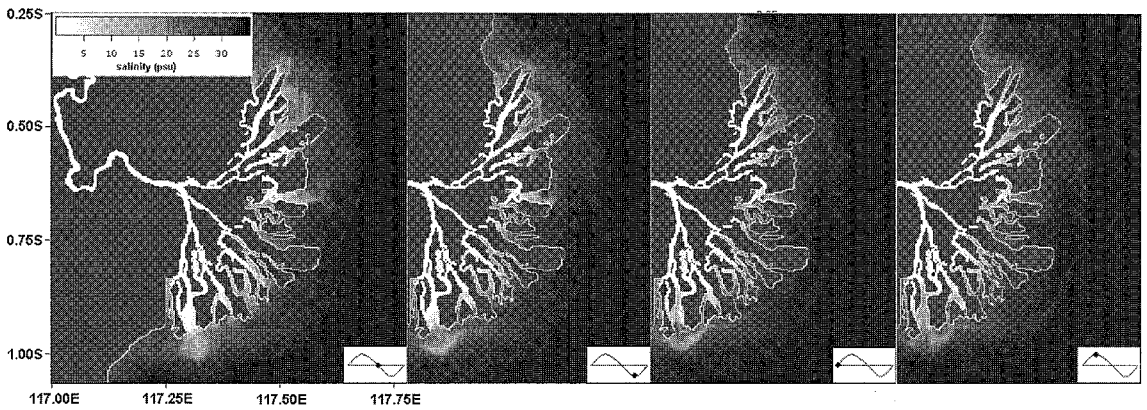


図-7 表層塩分濃度の1潮汐内での空間分布の変化

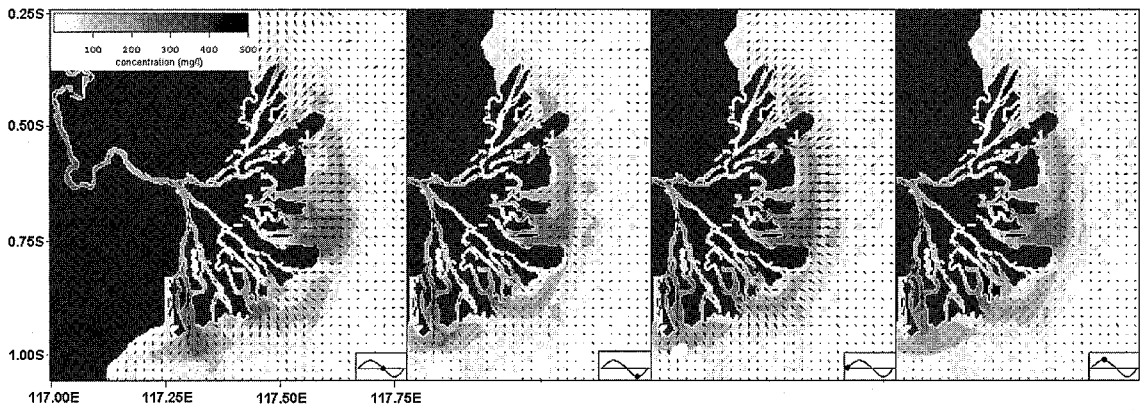


図-8 表層浮遊砂濃度および平均流速ベクトルの1潮汐内での変化

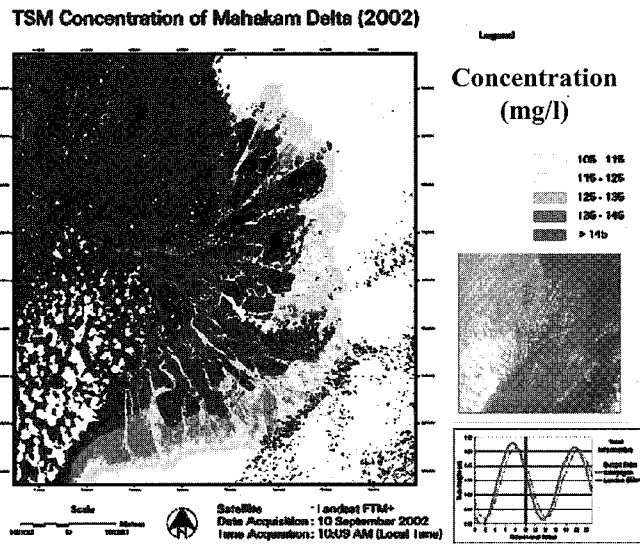


図-9 ランドサット ETM から推定された全浮遊物質濃度の平面分布 (Budhiman (2004) による).

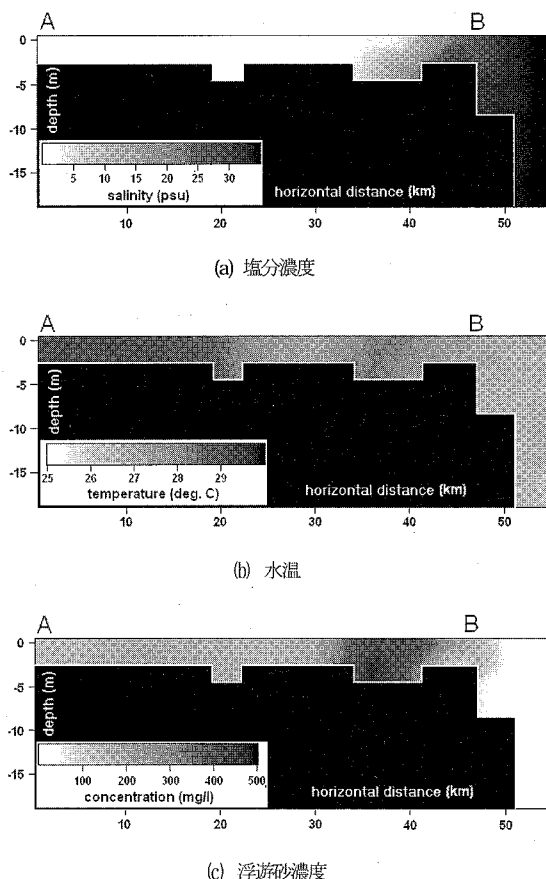


図-10 下げ潮時の A-B 断面内 (図-3) での塩分濃度と浮遊砂濃度の鉛直分布

し出し、上げ潮時には海水が河川に侵入する様子が再現されていることがわかる。

図-8 からは、浮遊砂の濃度分布も一定の形状を保ちながら変動しており、デルタを取り囲むように帯状の高濃度帯が形成される特性が再現されている。さらに、河川水はデルタの両側で多く排水されているが、高濃度帯は淡水域の少ないデルタ中央部に形成されていることが再現されている。図-9 に示す Budhiman のランドサット ETM からの全浮遊物質濃度の推定値は、図-8 に示した河口周辺部での浮遊砂濃度の計算値の平面分布と、沖合いへの拡散範囲はオーダー的に同一である。ただし、計測と計算では日時や河川からの流出濃度が異なるので濃度の直接的な比較はできないが、計算では 300 mg/l

程度であるがランドサットからの推定値はその半分程度で、南部に高濃度帯が集中している。

さらに、図-3 の A-B 断面内での下げ潮時の塩分、水温と浮遊砂濃度の鉛直分布を図-10 に示す。図から、塩水淡水境界面が上流の点 A 地点から 35~45 km の付近にでき、ここに浮遊砂の高濃度帯が形成されている。この高濃度帯は、河口部での混濁淡水の浮上ブルームで形成されたものと考えられ、また、水温は河川部で高く、海洋部で低いが、河道内にも、潮汐の関係で高温部、低温部が周期的に変化しており、流下距離 20 km までは海洋の影響が到達していることが推定される。以上のように、河口部での浮遊砂高濃度帯の形成過程、海水の河道内浸入の様子が再現されているようですが、検証データが限られているので、今後、観測結果との詳細な検討が必要である。

4. 結 語

底泥の輸送・凝集・圧密数値モデルを東カリマンタン州マハカム川のエスチャリーに適用し、2003 年に実施された Utrecht University, IMAU のマハカムエスチャリーでの観測データと比較した。精度は不明であるが、モデルは観測結果を定性的には再現していた。

なお、本研究は、科学研究費 (基盤研究 (B) (2) 海外調査, 研究代表者 山下隆男) の研究の一部として実施された。最後に、観測データを提供するとともに、シミュレーション条件について助言を下さったバンドン工科大学の Nining Sari Ningsih 博士に謝意を表します。

参 考 文 献

- Fitri Riandini・山下隆男 (2005) : 高濃度底泥の沈降・輸送モデルと移流・拡散型圧密方程式の ECOMSED への導入, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 991-995.
- Budhiman, S. (2004) : Mapping TSM Concentrations from Multisensor Satellite Images in Turbid Tropical Coastal Waters of Mahakam Delta, Indonesia, Master Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands.
- Davis, R.A. (eds) (1985) : Coastal Sedimentary Environments, Springer-Verlag New York Inc.
- HydroQual (2002) : A Primer for ECOMSED Version 1.3 ; User Manual, HydroQual Inc., New Jersey.
- Winterwerp, H. (1999) : On the dynamics of high-concentrated mud suspension, Report99-3 Communication on Hydraulic Engineering, Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 172p.