

白川河口干潟における凝集性土砂の土砂収支に関する数値計算

Numerical Simulations to Calculate Sediment Budgets of Cohesive Sediments on an Intertidal Flat at the Mouth of the Shirakawa River.

鶴崎賢一¹・栗山善昭²

Ken-ichi UZAKI and Yoshiaki KURIYAMA

A quasi-3D sediment transport model named "WD-POM", which can describe tidal and wind-driven currents and the movement of cohesive sediments, was developed in order to investigate the flow and sediment transport on intertidal flats. In this study, the spacial distribution of mud content was considered in the calculation of vertical sediment flux on the bottom surface, and "WD-POM" was applied to an intertidal flat at the mouth of the Shirakawa River in the Ariake Sea. Numerical results gave good agreements with observation results with regard to the tidal elevation, tidal currents and the sediment concentration near the bottom. Finally, sediment budgets at the mouth of the Shirakawa River were calculated by using numerical results and comparisons with observation results were made.

1. 緒 論

干潟は内湾の水質や生態系の維持において非常に重要な役割を担っているという指摘がなされている。そうした指摘のもとづいて全国各地で人工干潟の造成が相次いでいるが、干潟における地形変化のメカニズムについては未解明な部分が多い。人工干潟の動的な安定性を維持するためにも、干潟上の底質輸送の詳細を明らかにし、その地形変化を予測できるようにすることは重要である。古川ら (2000) は、東京湾の盤洲干潟において現地観測を行い、波によって巻き上げられた底質が潮流と吹送流によって移流されると指摘し、深浅測量データなどから底質の移動量を算定した。また、栗山・橋本 (2004) は、有明海の白川河口干潟において、深浅測量データなどから干潟上の土砂収支を計算している。しかしながら、現地観測データだけでは広範囲かつ任意の時間の底質移動量の把握や、それにもとづいた地形変化の予測は不可能である。このような問題にアプローチするためのツールとして、数値流体モデルにもとづいた干潟の地形変化予測モデルがいくつか提案されている。しかしながら、それらは残差流の問題などいずれも流動場の再現の段階でいくつかの問題を抱えており、十分に実用に供するモデルは現在まで開発されてはいない。内山 (2004, 2005) は、3 次元 σ 座標系海洋流動モデル (POM; Blumberg and Mellor, 1983) をベースとして、干出・冠水を考慮した潮汐による凝集性土砂の挙動が計算可能な準 3 次元底質輸送モデル「WD-POM」を構築した。

WD-POM は、POM をベースにしていることから潮流場の再現性に信頼性が高く、また σ 座標であることから干潟上のような極浅海域においても計算が可能であるという利点がある。

本研究では、現行の WD-POM を、含泥率を考慮した巻き上げモデルに改良した上で有明海の白川河口干潟周辺に適用し、潮流速ならびに SS 濃度の観測結果と計算結果の比較検討を行うとともに、潮汐による凝集性土砂の土砂収支を調べた。

2. モデルの概要

WD-POM は、3 次元 σ 座標系海洋流動モデル (POM) に干出・冠水スキーム (WDS; Wetting and Drying Scheme) を加え、底面の抵抗係数の算定において拡張対数則を導入し、移流拡散方程式とシルトに代表される凝集性土砂 (Cohesive Sediment) の巻き上げ・沈降モデルに基づいた底質輸送モデルを組み合わせたモデルである。

POM は、静水圧近似、Boussinesq 近似された 3 次元 Reynolds 方程式を基礎式とし、水平および鉛直 Reynolds 応力の評価にそれぞれ Smagorinsky 型モデルと Mellor-Yamada レベル 2.5 モデルを用いている。詳細は Blumberg and Mellor (1983) を参照されたい。干出・冠水スキーム (WDS) は、もととなった POM にも用いられている、対象メッシュが陸か海かを 0 (陸) か 1 (海) で表現する Land Mask Function (LMF) を、水平 2 次元計算モード (External Mode) の各時間ステップで評価するようにしたものである。本計算では、干出・冠水の最小水深 d_{min} は 0.30 m とした。拡張対数則は、極浅海域において最下層厚が底面粗度より小さくなった場合、通常対数則を用いると底面抵抗係数の計算が破綻することを防ぐために、新たな長さスケール δ

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋水工部漂砂研究室 研究官

2 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋水工部漂砂研究室 室長

を用いて変形した対数則を導入したものである。干出・冠水スキーム、拡張対数則ならびに底質輸送モデルの詳細は Uchiyama (2004, 2005) を参照されたい。

本論文ではさらに、底質分布による巻き上げフラックスの空間変化を精確に表現するために、中川 (2002, 2003) を参考にして、巻き上げモデルにおいて底質の含泥率の空間分布を考慮した。式 (1) に巻き上げモデルを示す。

$$E_r = \gamma P_e \left(\frac{\tau_b - \tau_{be}}{\tau_{be}} \right) \quad \text{when } \tau_b \geq \tau_{be} \dots\dots\dots (1)$$

$$E_r = 0 \quad \text{when } \tau_b < \tau_{be}$$

E_r は、巻き上げフラックス、 τ_b は底面せん断応力を示す。上式に示すように、含泥率 γ を Constant Erosion Probability (P_e) に乗じた形でモデル化した。有明海の含泥率の値は中川 (2002, 2003) による。また、侵食限界せん断応力 τ_{be} についても、含泥率に依存する形にモデル化した。詳細は中川 (2002, 2003) を参照されたい。

3. 計算領域ならびに条件

計算は、栗山・橋本 (2004) による測量結果とそれに基

づいた土砂収支の評価との比較検討を行うために、熊本県の白川河口干潟を対象に行った。まず大領域として、橘湾の沖を開境界に設定して有明海全体の計算を行い、得られた潮位データを境界条件として、小領域の計算を行うというように、ネスティングして計算を行った。図-1 に計算領域を示す。図中に灰色の実線で示された四角は、栗山・橋本 (2004) による深淺測量の領域である。小領域の計算では、白川河口の汀線位置において河川からの流入水量と凝集性土砂量を、流速と SS 濃度に換算して与えた。前者については 1997 年から 2002 年までの年平均流量を、後者については流量と流出シルト量の関係式から流入シルト量を求めて与えた。流量ならびに関係式の詳細については栗山・橋本 (2004) を参照されたい。また中川 (2002, 2003) は、白川河口沖の St. A において、潮位、流速の鉛直分布ならびに底面上 20 cm, 50 cm, および水面下 100 cm の鉛直 3 点における濁度の計測を行っている。濁度については、1 Hz で 10 秒間計測された濁度値の平均をとり、さらに現地底泥を用いたキャリブレーションにより SS 濃度に換算した結果を解析に用いている。このデータを計算結果との比較

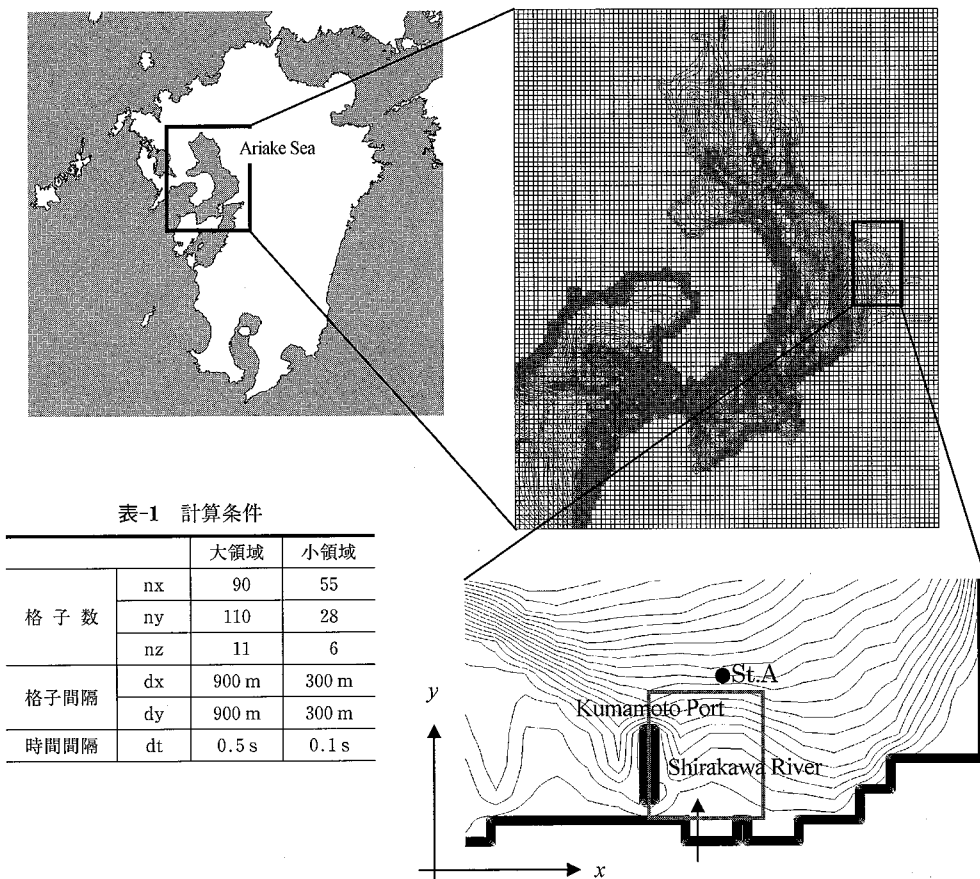


図-1 計算領域ならびに観測地点

に用いた。計算条件を表-1に示す。大領域の計算において、開境界における潮位は、予め有明海内の4つの観測点で計算潮位が実測潮位に適合するように中川(2003)によって調節された調和定数を用いて計算を行った。計算期間は、大領域の計算が2001年10月25日から11月9日までの15日間、小領域の計算が、観測結果との比較についてはそのうちの7日間、土砂収支については15日間とした。また、計算開始から12時間までの間は、境界潮位の振幅を徐々に大きくして与えた。

4. 計算結果ならびに考察

図-2(a)~(d)に、各潮時における表層流速ベクトルのスナップ・ショットを示す。順に、干潮、上げ潮最強時、満潮、下げ潮最強時である。観測結果との詳細な比較は行っていないが、図から、本計算において干出冠水スキームが機能しており、潮位変化に伴う汀線の移動が計算できていることがわかる。図-3, 4(a), (b)に、潮位、底層流速ならびにSS濃度についての計算結果と観測結果の比較を示す。なお、 u_b は x 方向(北向き)の流速成分、 v_b は y 方向(西向き)成分を示す。図において、灰色の実線が観測結果、黒の実線が計算結果を示す。計算開始直後においては両者は一致しないが、一日程度経過するとよく一致することがわかる。潮位については非常に高い精度で、また底層流速については u_b 、 v_b とも下げ潮最大時の流速値が若干過小評価になるものの、それ以外は非常に高い精度で一致することがわかる。図-5に底面近傍のSS濃度についての計算結果と観測結果の比較を示す。SS濃度は2日程度経過してから両者が一致するようになる。観測結果にノイズが多く、精度よく一致するにはいたっていないが、最高・最低濃度やピークのタイミングなどは良好に一致する傾向にある。これらの結果から、本モデルは観測結果を比較的良好に再現することができると言え、本モデルの計算結果はある程度の信頼性があるものと判断できる。

図-6に、SSフラックスの収支計算を行った断面を示す。測量範囲の西側端の x 軸に平行な断面をline1、北側端の y 軸に平行な断面をline2とした。ここで、熊本港側、つまり領域南端からの流出入は、熊本港があるために非常に小さいものと考え、フラックスの算出を行わなかった。図-7に、各断面におけるSSフラックスの時間変化を示す。それぞれ流出方向のフラックスを正と定義した。フラックスは各計算点の u と C の積をとり、水深方向と水平方向に積分した量を示している。図において、黒の実線がline1、破線がline2のSSフラックス、灰色が潮位を示している。図から、line1のSSフラックスがline2のフラックスよりも振幅が大きいことがわかる。また、上げ潮最強時にline1が負の最大、line2が正

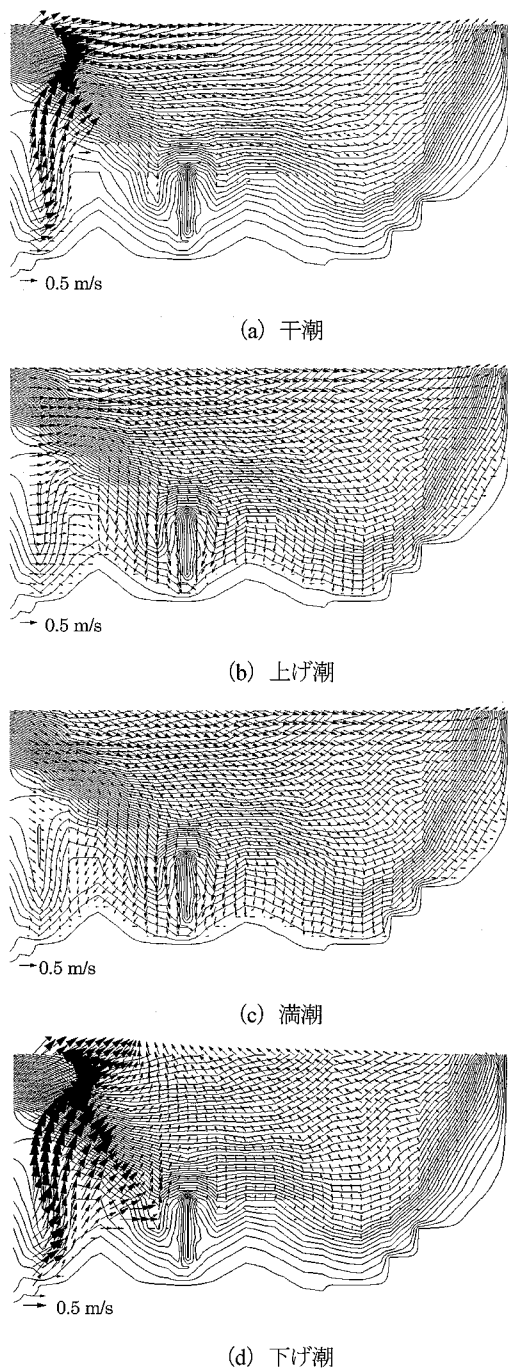


図-2 表層流速ベクトルのスナップ・ショット

の最大、下げ潮最大時にline1が正の最大、line2が負の最大を示すことがわかる。このことから、潮流の主軸方向が岸沖方向から若干傾いた方向にあるものの、フラックスの大部分が岸沖方向成分であることがわかる。また、大潮時に最大値をとり、小潮時にはほとんど0に近い値となることもわかる。SSフラックスの時系列データか

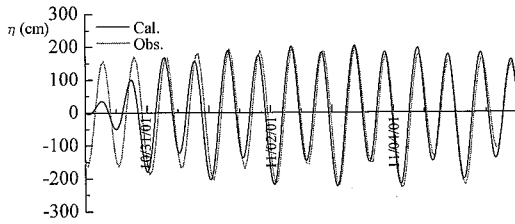


図-3 水面変動についての計算結果と観測結果の比較

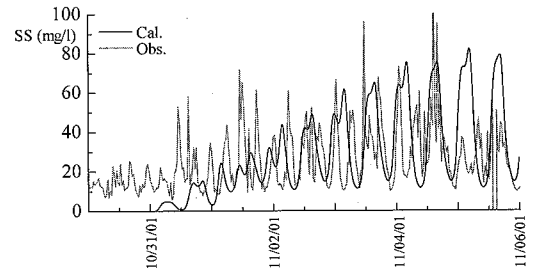
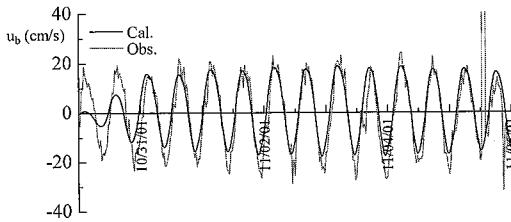
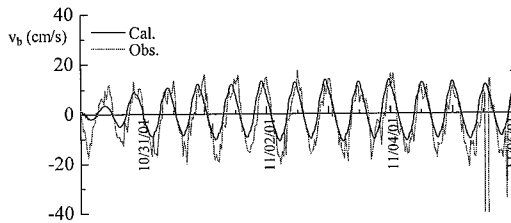


図-5 底層のSS濃度についての計算結果と観測結果の比較



(a) u_b



(b) v_b

図-4 底層流速についての計算結果と観測結果の比較

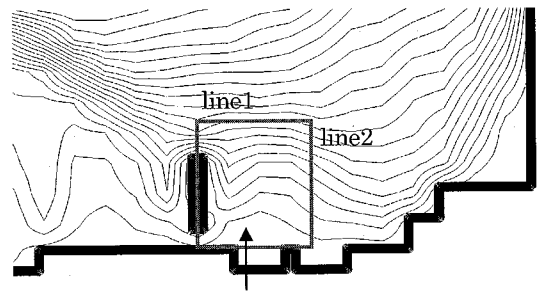


図-6 SSフラックスの計画断面

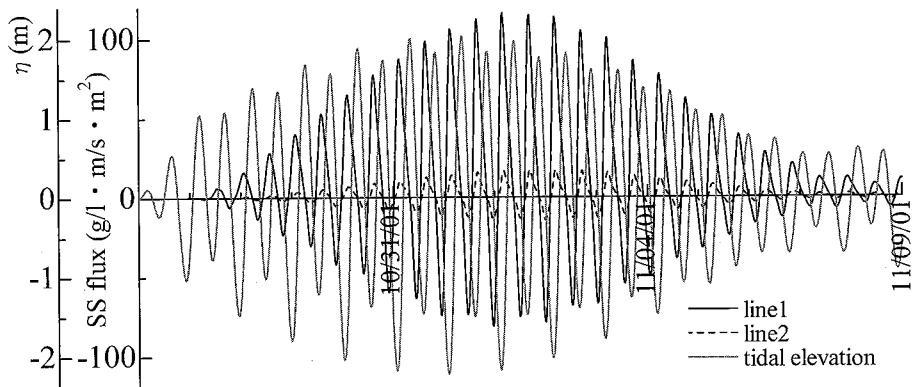


図-7 SSフラックスの時間変化と潮位変化

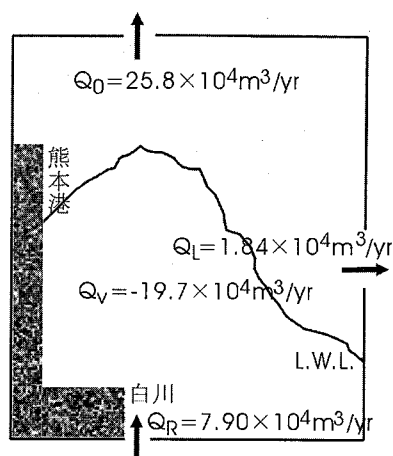


図-8 SSフラックスの収支計算結果

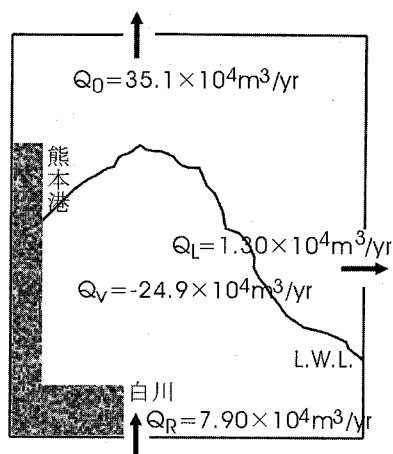


図-9 栗山・橋本 (2004) による土砂収支計算の結果

ら、大潮時および小潮時について一潮汐周期のデータを抽出し、それぞれについて平均をとり、さらに両者の平均をとって1年間の値に換算し、測量範囲で土砂収支をとったものを図-8に示す。図から、河川から7.9万 m^3/yr の流入に対して、沖向きに25.8万 m^3/yr 、北向き(x方向)に1.84万 m^3/yr の流出となることがわかる。その結果、測量範囲全体では19.7万 m^3/yr の侵食となった。栗山・橋本(2004)も同様に土砂収支の算定を行っているが、彼らは凝集性土砂ではなく土砂(砂とシルト)の量で収支計算を行っており、フラックスの値を直接比較することはできないが、参考までに彼らの算定結果を図-9に示す。図は、1997年～2002年の期間における年平均の収支である。彼らは、波浪データをもとにした沿岸漂砂量と河川流入量ならびに深浅測量データからこれらの計算を行った。その結果、白川からの流入土砂は7.9万 m^3/yr 、北向きに1.3万 m^3/yr の沿岸漂砂、

領域全体では24.9万 m^3/yr の侵食となり、それ以外の漂砂フラックスは35.1万 m^3/yr となった。このそれ以外のフラックスは、潮汐による沿岸方向の砂のフラックスを含み、一概に岸沖方向フラックスとは言えないが、図-9では、土砂収支の関係と潮汐と波の主方向から考えて、その大部分が沖向きであろうと推測して沖向きの矢印で示されている。従って、本計算結果と比較して、測量範囲全体としての侵食傾向は一致する。また、計算結果による侵食量の値も、土砂とシルトの関係を考慮すれば比較的良好な結果であるといえる。

5. 結 論

潮汐による凝集性土砂の挙動を計算する準3次元の底質輸送モデル「WD-POM」を、底質の巻き上げモデルに含泥率を考慮するよう改良した上で有明海の白川河口干潟に適用し、潮位、底層流速、底層のSS濃度について観測結果と計算結果の比較検討を行った。その結果、本モデルは観測結果を精度よく再現することがわかった。また、栗山・橋本(2004)による深浅測量の範囲において土砂収支を計算した。その結果、沖向きに25.4万 m^3/yr 、北向きに1.5万 m^3/yr の流出となり、領域全体では19.0万 m^3/yr の侵食となった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、(独法)港湾空港技術研究所海洋水工部沿岸環境領域の中川康之主任研究官には、データの提供ならびに貴重なご意見を頂き、ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 栗山善昭・橋本孝治(2004)：熊本県白川河口干潟における土砂収支，港空研資料，No. 1074。
- 中川康之・今林章二・末次広児(2002)：有明海の底泥輸送現象に関する現地データの解析，海岸工学論文集，第49巻，pp. 566-570。
- 中川康之(2003)：有明海における底泥輸送現象のモデル化，港空研報告，第42巻 第4号。
- 古川恵太・藤野智亮・三好英一・桑江朝比呂・野村宗弘・萩本幸将・細川恭史(2000)：干潟の地形変化に関する現地観測—盤洲干潟と西浦造成干潟—，港湾技研資料，No. 965。
- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor(1983)：Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight, J. Geophys. Res., 88, pp. 4579-4593。
- Uchiyama, Y. (2004)：Modeling wetting and drying scheme based on an extended logarithmic law for a three-dimensional sigma-coordinate, Rep. Port and Airport Res. Inst., Vol. 43 No. 4。
- Uchiyama, Y. (2005)：Modeling three-dimensional cohesive sediment transport and associated morphological variation in estuarine intertidal mudflats, Rep. Port and Airport Res. Inst., Vol. 44 No. 1。