

大河津分水路河口における密度差の影響を受ける土砂移動機構の把握

水工学研究室 大竹 剛史
指導教員 細山田得三

1. はじめに

河口では、河川の上流から淡水の流入によって土砂・シルトが流入する一方、海岸からは潮汐や波浪によって塩水や漂砂が河口に輸送され、浮遊土砂が複雑に混合される場所となっている。特に河川水と海水の密度差は、海水が河川水の下に潜り込もうとし、河川水が上層を流れて海面上に広がろうとする河口密度流や、河川から輸送されてきた土砂が、塩水と接触することによってフロックを形成して沈降速度が速まる現象など、土砂輸送に大きな影響を与えると考えられる。

浮遊砂の運動は一般的に移流拡散現象として取り扱われているが、これは土粒子個別の現象を表しておらず、フロック形成といった土粒子個別に起こる現象に適用するには疑問が残る。そこで本研究では、河口密度流や凝集沈殿といった河口での密度差の影響を受ける土砂輸送のモデルを開発した。特に移流拡散方程式と並行して粒子追跡計算を実施し、フロック化と沈降促進に関する数値モデルを導入し海底への沈降過程について考察を行った。

2. 粒子追跡による土砂の計算

河川から流出する土砂の実際の物理的な現象は個別な粒子である。そこで連続量としてではなく個別な粒子として捉え、粒子位置の時間発展を追跡していく計算法を行う。この方法の利点は、粒子の状況を個別的に処理することができるため、例えば1つ1つの粒子が接触した塩分の量、それに伴う粒径の変化、さらに粒子ごとの沈降速度の変化をモデル化して時々刻々追うことが容易である。

粒子の移動速度は、粒子を球体と考え式(1)のような運動方程式を解く。

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{sed} \frac{d\mathbf{V}_b}{dt} = \mathbf{F}_r \quad (1)$$

ここに \mathbf{V}_b , r , ρ_{sed} , \mathbf{F}_r , g はそれぞれ土粒子の移動速度、土粒子の半径、土粒子の密度、土粒子が流体から受ける抵抗力および重力加速度である。土粒子の粒径および初期配置は正規分布および一様分布に従う乱数を発生させることで求めた。抵抗力 \mathbf{F}_r は以下のように表される。

$$\mathbf{F}_r = \frac{1}{2} \rho_w C_D \mathbf{u}_r |\mathbf{u}_r| A \quad (2)$$

ここに、 ρ_w は流体の密度、 C_D は抗力係数、 \mathbf{u}_r は粒子の相対移動速度、 A は投影面積である。

3. 室内実験スケールの数値実験

まず室内実験スケールを対象としてロックイクスチェンジの計算を行い粒子追跡の方法の妥当性を検証し

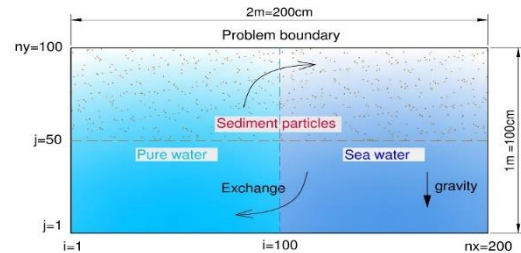


図-1 室内実験スケール(ロックイクスチェンジ)の計算領域

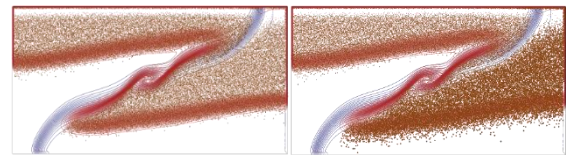


図-2 ロックイクスチェンジでの土砂濃度、密度、土砂粒子の計算結果 (計算開始8秒後)

左段：フロック化なし、右段：フロック化あり

た。ロックイクスチェンジとは、矩形容器の左右で密度の異なる流体を入れ、中央のしきりを瞬間的に外すと密度の低い流体が上層へ、密度の高い流体が下層へと進行する現象である。初期状態は容器の上層に土粒子を配置した(図-1)。

図-2 に図-1 を初期条件としたロックイクスチェンジによる土砂濃度 (等高線赤)、密度 (等高線青)、と土砂粒子 (茶色点) の8秒後の様子を示す。右図はフロック化による粒径の増大が考慮されており、左図はフロック化が考慮されていない。フロック化のモデルは仮想的に2%の密度に10秒触れると2倍に粒径が増大すると設定した。右図・左図とも土粒子は渦により巻き上げられていることを確認できる。左図は概ね土砂濃度の高い部分に土粒子が配置されている。右図では土粒子は塩水に触れている部分 (初期に右側で上側に配置された粒子) の粒子サイズが増大し、沈降速度が上昇しており、フロック化なしの場合に比べて鉛直方向に土粒子が広がりを持って分布している。

4. 鉛直2次元計算

次いで実現場スケールでの数値実験として、人工河川で河川由来の土砂堆積が新しく、日本海側では珍しい汀線が前進している海岸線である大河津分水路河口付近における堆積土砂の生成過程に対して土砂輸送の数値計算を行った。土砂が海水と接触して沈降する過程と河川の冲向きの流れによって輸送される土砂の比率および密度流の形態によって海底に沈降する土砂の岸沖方向の配分を把握するために、大河津分水路河口の標高データを、河川の横断方向に平均を取り断面2次元の地形データを作製し計算を行った。水平方向の

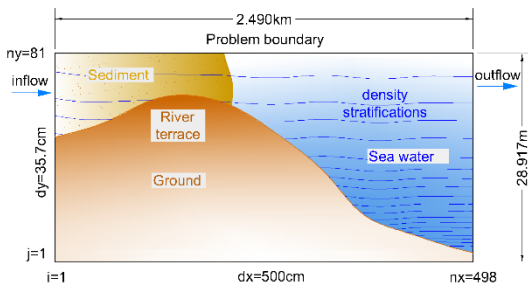


図-3 大河津分水路河口を対象とした2次元計算領域

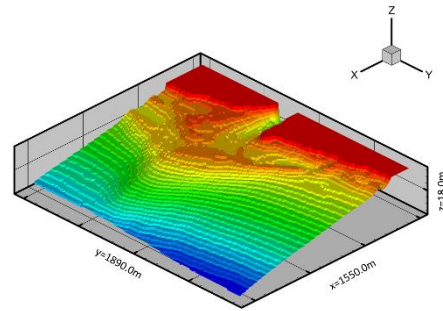


図-6 大河津分水路河口を対象とした3次元計算領域

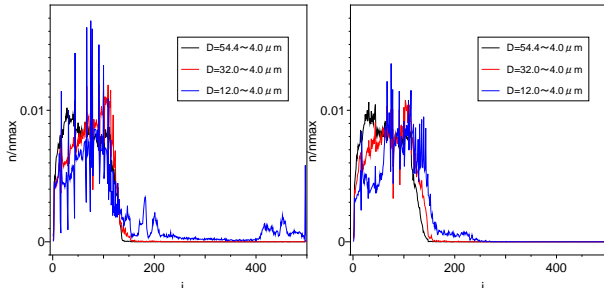


図-4 流入流速 19.1m/s の最終土粒子着底位置
(左: フロック形成モデルなし 右: フロック形成モデルあり)

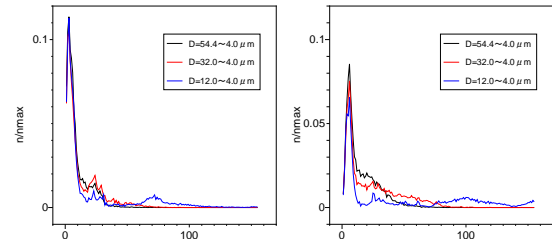


図-7 x方向の最終土粒子着底位置
(左: 流入流速 15.0m/s 右: 流入流速 50.0m/s)

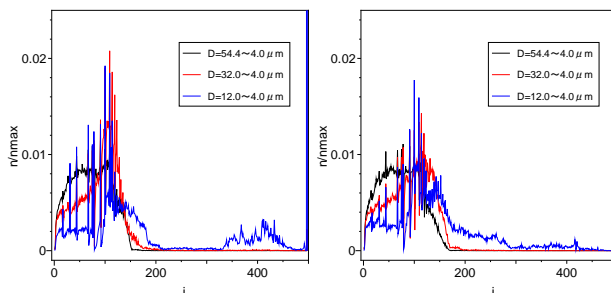


図-5 流入流速 38.2m/s の最終土粒子着底位置
(左: フロック形成モデルなし 右: フロック形成モデルあり)

長さ 2.490km、鉛直方向の長さ 28.917m の領域で 10 時間分の計算を行った(図-3)。フロックの形成モデルは、2%の塩水に土粒子が 300 秒間触れていると、シグモイド関数に従い最終的には2倍の大きさにまで増大するモデルを導入した。

図-4 に、図-3 および流入流速 19.1cm/s を初期条件としたときの最終土粒子着底位置を示す。図-5 に、図-3 および流入流速 38.2cm/s を初期条件としたときの最終土粒子着底位置を示す。図-4、図-5 とも左図はフロック形成モデルを導入していない場合、右図はフロック形成モデルを導入している場合である。流入流速 19.1cm/s の場合は河口密度流が河口テラスを越えて河川上流側に遡上するため図-4 は上流側に沈降する土砂が多い。流入流速 38.2cm/s の場合は河口密度流が河口テラスを越えることができないため図-5 は河口密度流によって河口密度流のヘッド部に沈降する土砂が多い。フロック形成の有無を比較すると、図-4、図-5 ともフロック形成モデルを導入している着底位置は、河口テラスより少し沖側まででほぼ着底している。

5. 3次元計算

土砂が河川から放出され、密度流やフロック形成の影響を受けながらどのように底面に配分されるかを把握するために大河津分水路河口の地形に適用した3次元計算を行い、輸送土砂の平面的な分布を調べた。

x方向の長さ 1.550km、y方向の長さ 1.890km、z方向の長さ 18.0m の領域で 10 時間分の計算を行った(図-6)。フロックの形成モデルは、2.5%の塩水に土粒子が 300 秒間触れていると、シグモイド関数に従い最終的には2倍の大きさにまで増大するモデルを導入した。

図-7 に図-6 を初期条件としたときの x 方向の最終土粒子着底位置を示す。左図は流入流速 15.0cm/s、右図は流入流速 50.0cm/s の場合である。流入流速 15.0cm/s の場合は河口密度流によって河口テラスより上流に流される土砂と、沖に流されたあと河口密度流によって流し戻される土砂の 2 つのピークが見られる。流入流速が 50.0m/s の場合は強い掃流力によって河口テラスより沖側に流される土粒子が多い。

6. まとめ

粒子追跡法では個別にレイノルズ数や抗力係数を設定でき、フロックの形成過程を表現することが容易であるという利点を有することがわかった。また巻き上がりや流し戻しといった、土砂の動きの履歴が残り視覚的にも明瞭になった。実現場での計算では、密度流の形態がフロックの形成に作用し、土砂の堆積過程に影響を与えることがわかった。海側外力の評価や、粒子追跡での乱流拡散の複雑な振る舞いなど課題は残されている。