# 波浪の侵入が卓越する河口エスチャリーにおける 波・流れ場と土砂移動

Waves, Currents and Sediment Movement in River Estuary with Dominant Wave Incidence

上山 聡<sup>1</sup>·牛 小静<sup>2</sup>·和田麻美<sup>1</sup>·劉 海江<sup>3</sup>·高川智博<sup>4</sup>·田島芳満<sup>5</sup>·佐藤愼司<sup>6</sup>

Satoshi UEYAMA, Xiaojing NIU, Asami WADA, Haijiang LIU, Tomohiro TAKAGAWA Yoshimitsu TAJIMA and Shinji SATO

Mechanisms of complex sediment movement in a river mouth were described by a field measurement and numerical modeling for the Magome River. Shizuoka Prefecture. The movement of color sands in the estuary was monitored for three months. The interaction of short waves, long waves, tidal currents and river flow was described by the field data and successfully modeled on the basis of wave energy balance equation and shallow water equations. The simulated movement of color sand particles qualitatively reproduced the measurements.

## 1. はじめに

自流の少ない中小河川では河口閉塞が問題となっていることが多い。閉塞対策として導流堤が建設されている場合も多いが、導流堤の建設は沿岸漂砂の遮断など副作用もあるうえ、河口内部へ波浪の侵入が卓越することにもなり、土砂移動機構はさらに複雑となる。本研究では古くから河口閉塞に悩まされ、土砂掃流用水の導入や導流堤の建設などの歴史を有する静岡県馬込川河口部を対象として流体運動と土砂移動に関する現地観測を実施し、観測された現象をできるだけ忠実に組み込んだ数値モデルを構築する。これにより、河口部の複雑な水理・土砂移動現象を記述するとともに河口閉塞対策に活用できる基本モデルを構築することを目的とした。

# 2. 現地観測

2008年9月13日~14日の大潮期に、遠州灘に流入する 馬込川の河口部において、波浪と流れを多点で計測する とともに着色砂の追跡を実施した.馬込川河口部では、 河川流、潮汐流、下水処理水放流そして海浜流により、 時空間的に異なる複雑な流れ場が存在している(富田ら、 2008).

### (1) 波と流れ

フェロー

工博

今回の観測ではそれぞれ3つの波高計,流速計を使用した.図-1に示したように,導流堤の入口から上流に向

1 学生会員 修(工) 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 2 非会員 Ph.D. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University 3 正会員 博(工) 東京大学特任助教 同上 4 正会員 博(理) 東京大学助教 同上 東京大学准教授 同上 5 正会員 Ph.D.

東京大学教授 同上

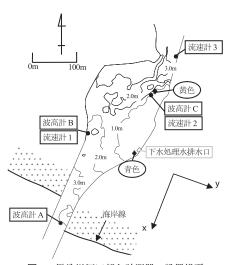


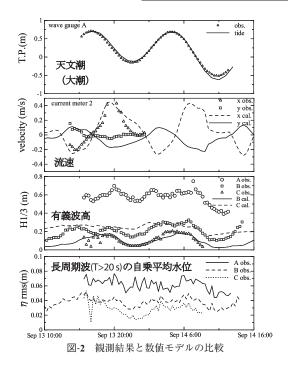
図-1 馬込川河口部と計測器の設置場所 (数値は潮位 T.P. 0mのときの水深)

かって順番にそれぞれ波高計A, B, C, 流速計1, 2, 3 とする. また導流堤に沿った下流方向にx軸をとり, それに直角に $\mathbb{Z}$ -1のように $\mathbb{Z}$ -1 をとった.

波高計Aは導流堤水路部,波高計Bは導流堤水路部から川幅が急激に広がる右岸部分に設置した.波高計Cは河口域左岸側の砂州上に、やぐらを組んで固定するという形で設置した.この場所は現地観測の際、干潮時の水位はほとんど0mに近くなるが、満潮時には完全に水没する.また流速計1は波高計Bと、流速計2は波高計Cと同じ場所に設置した.そして流速計3は河口域の上流部に設置した.

# a) 観測結果

波高計,流速計から得られた計測結果と,後述する数値モデルによる計算結果を比較したものが図-2である。潮汐に応じて,河口域内の水深,流速が大きく変化して



いる様子がわかる.

#### b) 短周期波·長周期波

3つの波高計の観測結果をスペクトル解析したものが図-3である。データは13日の20時、下げ潮時の40分間の観測結果を用いた。まず高周波数帯の短周期波に注目すると、波高計Aのスペクトル密度は周波数が0.07Hzから0.1Hz、周期にすると10秒から14.5秒のところでピークを持つ。A地点が導流堤水路部の水路中央付近であることより、A地点では河口部に侵入してきた波の短周期成分が卓越すると考えられる。つまり10秒程度の周期を持つ成分が河口部に侵入する短周期波といえる。また波高計Bのスペクトル密度が、Aと比較すると全体的に値が小さくなっているのは、A地点に比べると砕波して減衰している波が多いためと考えられる。一方、波高計Cから得られたスペクトル密度の高周波数帯にはピークが見られない。この時間帯は水位が低く、波がほとんど伝播してこないためである。

また、波高計Aに顕著なように、短周期成分の倍周波

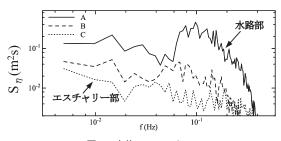


図-3 水位のスペクトル

数成分が含まれていることがわかり、波の非線形性により倍周波数成分が発達しているといえる。次に、同様に非線形性により発達すると考えられる長周期成分について着目する。波高計A、Bの2つに顕著であるが、0.01Hzから0.02Hzの低周波数帯、周期に換算すると50秒から100秒の長周期波成分にピークがあるのが読み取れる。さらに、場所ごとに短周期成分と長周期成分のスペクトル密度を比較すると、上流側にいくにつれて長周期成分の影響が相対的に大きくなっている。つまり、馬込川の河口部では10秒程度の周期をもつ短周期波の影響が卓越するが、上流に波が伝播していく過程においてそれらは急激に減衰するため、上流部では50秒から100秒程度の周期をもつ長周期波が卓越するといえる。

さらに図-2の有義波高,長周期波の自乗平均水位の変動に注目すると,図-3で見た下げ潮の時間帯だけではなく,全時間帯において波の短周期成分と長周期成分の挙動の違いが当てはまることがわかる。すなわち,波浪の短周期成分の減衰と長周期成分の伝播が潮位に関わらず河口内部の流体運動を支配していることが確認できる。

#### c) 長周期波の性質

図-4は、波高計Cと流速計2で計測した水位と流速のクロススペクトルを示している。伝達関数は長波理論で無次元化したものを用い、解析には9月13日の21時からの80分間の観測結果を使った。低周波数帯の長周期成分に注目すると、周波数が0.01[Hz]から0.03[Hz]の間で位相差が $\pi/2$ と $-\pi/2$ の間で振動しており、上段に示した伝達関数とはピークがずれているのがわかる。これは長周期成分が重複波として存在していることを示しており、馬込川河口部では、周期30秒程度を境として短周期成分が進行性の波であり、長周期波が重複性の波であることがわかった。

#### (2) 着色砂追跡

#### a)追跡方法

着色砂は青色,黄色の2色を使用し,9月13日の午前10時に図-1に示すように異なる2点に投入した。青色の着色砂は馬込川河口域の左岸側の,下水処理排水口よりも河口側の場所に投入した。黄色の着色砂は青色よりも上流側,馬込川左岸側の砂州が最も露出したときの砂州

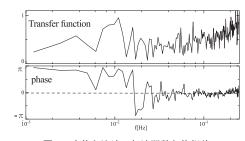


図-4 水位と流速の伝達関数と位相差

上に投入した. どちらも投入量は500kgで, 粒径は現地の砂と同じ粒径の0.2mmから0.4mmのものを使用した.

馬込川河口全域にわたるサンプリングを、着色砂投入の当日、1週間後、2週間後、1ヵ月後、2ヵ月後、3ヵ月後に、サンプリングがしやすいように、各日の干潮時にあわせて採取を行った。水路内や澪筋部は水深が深く流れが急なため、サンプル採取が困難であった。そのためボートを用いての採取を行った。ボートによる土砂のサンプリングでは、ボートの上からサンプラーを用いて海底表層の砂を採取した。サンプラーには片方の端に軍足をはめた短い単管パイプを用いた。サンプラーを数回投げ入れて、靴下に収まった土砂を回収しているので、各採取地点での土砂採取量にはばらつきがある。底面が礫で覆われている地点では、採取土砂がごく微量もしくはゼロのところもった。ことができない場所では手づかみによる採取を行った。礫が多い場所では手づかみによる採取が最も効率的に砂を回収することができた。

#### b)分析方法

着色砂の計数は浜松ホトニクス (株) で開発された, ターンテーブル式砂粒子分析システムを用いた.このシステムは,遠州灘プロジェクトで東大と浜松ホトニクス (株) が共同で開発しているものであり,量の少ないサンプル (90g程度) でも計測できるという利点がある.

回転する円型テーブル上においたサンプル砂が仕切り 板によって砂の厚さが一定になるように自動でならされたのち(今回は厚さ2mmに設定),カメラによってその 表層画像を撮影する。またカメラの視野画面を過ぎた砂は,固定されたブラシによって攪拌され、そのとき表層 に現れる砂が変化する。つまり円型テーブルが回転している間は,サンプル砂の表層が変化し続ける仕組みになっている。またこのカメラは撮った画像から光の三原色の割合によって色を判別する。そして多数回計測し視野画面内に表れるサンプル砂の着色砂平均検出個数を計測する。それを検出密度(count per frame)と呼ぶ。今回は1秒間で4回撮影し,1つの試料に対して100回の画像を撮影した。図-5に示すように,肉眼で数えた計測と分析システムの計測値の線形性が十分にとれている。



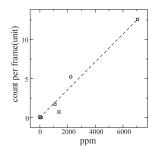


図-5 砂粒子分析装置と線形性の確認

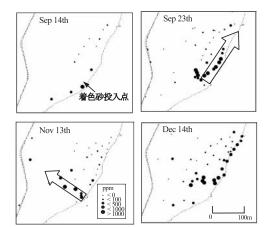


図-6 青色着色砂の移動(右上の矢印は河口域左岸上を上流側へ移動する動き,左下の矢印は下水処理水放流軸に沿う動きを示す)

#### c) 砂の移動機構

この分析システムを用いてサンプル砂に含まれる青色着色砂の個数を計測した結果が図-6である。青色着色砂を投入した翌日には、上流側に少しずつ移動しているのがわかる。そして2週間後には上流側への移動と、下水処理水放流軸に沿った方向と、2方向へ移動した様子がわかる。1ヶ月後も同様の結果を示しており、さらに3ヵ月後にはこの2つの方向への移動が顕著に現れている。

現地観測より、干潮時をはじめ潮位が-30cm以下の低水位時には青色着色砂の投入地点付近は水深が数cmまたは0になる。このように水位が低いとき、砂は下水処理水排水口からの流れの影響を強く受け、着色砂はその流れに沿って移動する。逆に高潮位時のように処理水排水口付近も十分水位が高いときは、河口から侵入してくる波に比べ相対的に下水処理水放流の影響は小さくなり、多くの砂が波によって上流側へ押し出される。このように、青色の着色砂は「低水位時」と「高水位時」で異なる動きをした結果、2方向へ移動したものと考えら

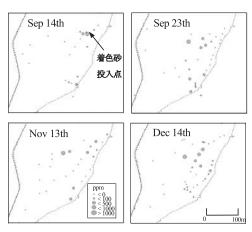


図-7 黄色着色砂の移動

れる.

図-7に黄色着色砂の追跡結果を示す。黄色着色砂の分布は青色着色砂ほど明確ではないが、排水口上流部で川の流れに沿って振動している様子がわかる。まず投入地点が川の澪筋のすぐ近くで流れが強いため、一旦ほとんどの着色砂が河口側へと流されている。しかし上げ潮時には多くの波が河口域内に伝播してくるために、一度川の流れによって河口方向へ移動した砂が、再び海浜流によって上流側に押し戻されたと考えられる。とくに2ヵ月後の移動結果より、黄色の着色砂が左岸側の砂州上にまで押し戻されているのがわかる。

また下水処理水排水口付近で黄色の着色砂がたくさん 計測されているが、これは同じサンプルに青色の着色砂 が大量に含まれていたためシステムが誤感知をしたから である。今後システムの更なる改良が必要である。この ポイントの値以外は特異な点は見受けられなかった。

#### (3) 木片トレーサー追跡調査

馬込川河口内における流れ場を捉える目的で,20cm四方の木片をトレーサーとして河口内に投入し,河口域を囲む位置に配置したビデオカメラでこれらを追跡した.その結果,下水処理水排水口付近においては,上げ潮時は遡上する波が排水口の下流側で砕波して減衰し,波とともに運ばれたトレーサーは処理水の流れにより右岸側に運ばれていた.その他の時間帯においても,上げ潮時ほど顕著ではないものの処理水によって弱い循環流ができていて,排水口前面に運ばれたトレーサーがゆっくりと右岸側に運ばれる様子が捉えられた.トレーサー追跡の結果は以下の3.で示す.

# 3. 数値モデル

## (1) 流体モデル

現地観測で得られた実測値を検証データとして用い、対象時間スケールに応じて2つのモデルを構築し、馬込川河口域内に存在する複雑な流体・底質運動の再現を試みた。まず回折を考慮したエネルギー平衡方程式モデル(間瀬ら,2004)による非定常計算を行い、侵入波浪の砕波変形を計算した。また、これから得られるラディエーション応力を非線形長波方程式に代入して流れの計算を行った。さらにその結果を前者の波浪変形予測モデルに代入して、時空間的に変化する流況場と波の干渉を再現した。また、流れの計算では侵入波浪の波群性に伴う拘束波相当の長周期成分を自由波として沖側境界で与えることにより、長周期波成分の計算も重合させた。

河川流速は流速計3の計測結果,下水処理水放流量は 昨年,富田ら(2008)によって計測された1.75[m³/s]を用 い,時間に関わらず一定とした。潮汐は御前崎観測所で 計測された実測値を用いた。波浪の条件として天竜川河 口部での実測データを用いたところ、水路内の流れによって波高が増減する様子を表現できたが、波向などの影響で計算結果が観測結果と完全には一致しなかった。そこでA地点の波高計から得られた波の情報を境界条件として用いることにした。図-2に現地観測の結果とともに数値モデルの計算結果を示している。波高、流速ともによく現地観測から得られた実測値を再現できているといえる

また、振幅5cm、周期100秒の長周期波を河口部から 馬込川河口エスチャリーに伝播させたときの波高分布を 見ると、モデルではきちんと浅水変形を考慮できており、 さらに上流部では回折して波高が大きい領域があったこ とから、長周期波が上流部まで伝播することがよく再現 できているといえる。満潮時(流れが最も小さいとき) の短周期波の波高分布と比較しても、長周期成分が上流 側で卓越しているのがわかる。現地観測で計測器から得 た結果を十分再現できたといえる。

図-8は、色の変化が9月13日20時の波高分布を、矢印が1潮汐周期における流速を平均した残差流を示している。上流側にいくにつれて波が減衰しており、現地観測

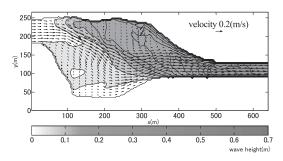


図-8 波高分布と残差流

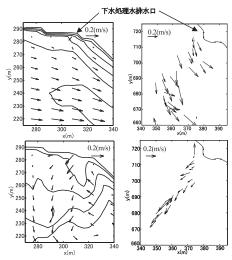


図-9 モデル (左:残差流) とトレーサー追跡 (右) の流速 比較 (上が高水位時,下が低水位の下水処理水排水口 付近の流れを表す)

から得られた結果と一致する. また図-9を見ると下水処理水排水口付近で弱い循環流が認められる. 低水位時ではこの循環流により,沖向きに流れた青色と黄色の着色砂が再び上流側へ戻ってくるような挙動を示したものと考えられる. さらにトレーサー追跡調査では,低水位時と高水位時では流れの向きが異なる様子がはっきりとわかる. なおトレーサー追跡では連続画像からトレーサーの位置を抽出し,トレーサーの動く速さからその位置の水表面流速を求め,1m格子ごとに平均した流速を図-9に示している.

#### (2) 着色砂の移動シミュレーション

構築した流体モデルを用いて、着色砂の移動シミュレーションを行った。底質の移動を判断する指標としてシールズ数甲を用い、移動限界値を $\Psi$ =0.06とした。さらにシールズ数が限界値を越えても底質が移動する確率を50%とすることで、着色砂が他の砂の下に埋没することの再現を試みた。またTajima et al. (2007) のランダムウォークモデルを用い、波の進行方向に卓越的な、着色砂の拡散特性を考慮している。今回は底質の着色砂をそれぞれ10 $^5$ 個用い、実際の投入点に瞬間的に投入するものとして計算した。投入後、1日経過したときのシミュレーション結果を図-10に示す。

まず青色の着色砂の分布は河口域左岸側に集中し、下流方向だけでなく上流方向と下水処理水放流方向の2方向へも移動していることがわかる.これは現地観測の結果と一致する.そして現地観測の結果から得られた考察通り、低水位時に下水処理水放流の影響が大きくなる結果がこのシミュレーションからも得られた.しかし実測に比べて上流方向への砂の移動量が少ないことは、波による漂砂量を考慮していないことが考えられる.また波浪が侵入しない条件での仮想シミュレーションでは青色着色砂がほとんど動かなかったことから、潮汐と波浪の混合場では波浪が底質移動の大きな役割を果たしているといえる.

一方黄色の着色砂は大部分が河口側へ移動しているが、上げ潮時に河口域左岸側に押し戻され、下げ潮時に 再び河口側へ移動する様子も確認できた.これも現地観

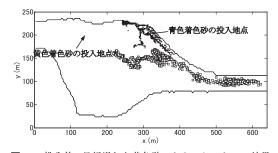


図-10 投入後1日経過した着色砂のシミュレーション結果 (黒の丸は青色着色砂,白抜きの四角は黄色の着色砂を表す)

測の結果と一致する.

黄色着色砂のこのような挙動は、河口域において河川流と図-8に見られる河口側への残差流の影響を強く受けるものの、河口部では上流側へ伝播する波浪の影響が無視できないために起こると考えられる.

なお、シミュレーションでは黄色着色砂のほうが青色 着色砂よりも短時間で大きく移動している様子や、時間 に伴い着色砂が広範囲に分布する様子も再現できた.

#### 4. おわりに

馬込川河口エスチャリーでは、さまざまな要因で発達する広い時間スケールの流れが重合し、空間的にも複雑な流れ場が観察された。また侵入する波浪の波群性に起因する倍周波数成分、長周期波成分の非線形な発達もとらえることができ、それらの波は周期によって異なる挙動を示すことを確認した。着色砂の追跡からは、潮汐によって変動する水位によって移動方向が異なることを明らかにできた。また、着色砂の検出・計数には、自動計数分析システムが有効であることが確認できた。本システムの導入により、1地点あたりの計数に必要な時間と労力が大幅に減少することが可能である。

以上の観測により明らかとなったマルチスケールの諸 現象のすべてを表現する数値モデルを構築した。そして 構築したマルチスケール流体モデルを用いて,着色砂の 移動を模擬したシミュレーションを実施した結果,河口 エスチャリーの堆砂特性を論じる上では,波による漂砂 移動を考慮したモデリングが必要であることがわかっ た。本研究で得られた知見は,潮位差が大きく波浪の侵 入が顕著な中小河川の河口の漂砂問題を検討するうえ で,有用であると考えられる。

謝辞:本研究は科学技術振興調整費(遠州灘プロジェクト)による研究の一部である.集中観測の実施には、豊 橋技術科学大学、本多電子、浜松ホトニクス、浜松市、 静岡県をはじめとする関係各機関の協力を得た.記して 深甚なる謝意を表する.

#### 参考文献

富田沙希・田島芳満・平松遥奈・佐藤慎司 (2008):砂丘を貫 入する馬込川河口域における堆砂と土砂掃流用水の役割, 海岸工学論文集,第55巻,pp.701-705.

間瀬 肇・由比政年・雨森洋司・高山知司 (2004):波・流れ 共存場における砕波および回折効果を考慮した位相平均 波浪変形予測モデルの構築,海岸工学論文集,第51巻, pp.6-10

Tajima, Y., Kozuka, M., Tsuru, M., Ishii, T., Sakagami, T., Momose, K., Mimura, N. and Madsen, O.S., (2007): Tracking sediment particles under wave-current coexisting field. Coastal Sediment 07, 96-109