

静岡県馬込川河口域における 非対称な流況場と堆砂特性

ASYMMETRIC CURRENT FIELD AND SEDIMENTATION CHARACTERISTICS OBSERVED AROUND THE MAGOME RIVER MOUTH

田島芳満¹・富田沙希²・佐藤慎司³
Yoshimitsu TAJIMA, Saki TOMITA and Shinji SATO

¹正会員 Ph. D. 東京大学准教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²学生会員 東京大学大学院修士課程 工学系研究科社会基盤学専攻 (同上)

³フェロー 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (同上)

This paper investigates asymmetric current fields and resulting sedimentation characteristics observed around the Magome River mouth. Field survey was first conducted to obtain detailed bathymetry of the river mouth and to capture spatial current patterns by tracing wooden chips floated on the water surface. Image rectification technique was utilized to track the actual coordinates of wooden tracers. Time-varying water level and flow velocity near the bottom were also measured and, not only yielded time-varying tidal characteristics, did these data support the validity of estimated current patterns using wooden tracers. Circulation current patterns induced by broken waves were clearly observed in the area where the distance between two jetties was widened and local sedimentation was observed in the landward edge of this circulation current. This circulation current also caused asymmetric distributions of tidal current velocity across the narrow river mouth. Numerical analysis was finally conducted to investigate the influence of observed asymmetric current on the sand discharge rate at the river mouth.

Key Words : *Asymmetric current fields, river mouth, broken waves, sedimentation, tidal current*

1. はじめに

河口域周辺における漂砂制御を考える際には、河口閉塞の抑止と沿岸漂砂の連続性維持の両立が重要となる。天竜川河口の西約4km地点に位置する馬込川では、過去頻発していた河口閉塞対策として導流堤の建設と掃流用水の導水が実施された。これにより河口先端部では流路幅が40mに固定され、比較的大きな流出流速が維持されたことにより、開口部周辺での堆砂・閉塞問題が解消した。その一方で、天竜川からの土砂供給量の減少に伴い馬込川河口周辺の水深が増加し、馬込川による沿岸漂砂の遮断が一因と考えられる中田島砂丘の侵食問題が懸念されている(たとえば宇多ら, 2007, 佐藤, 2008)。

馬込川河口上流側で導流堤の設置間隔が広がった流域では、現在でも高波浪来襲後に局所的な土砂堆積が見られるが、これらの堆積土砂はその後の平常時の河川流により消失している。すなわち、馬込川は、高波浪時には河道内への堆砂を許容しながら、平常時にはそれを海域へ自然還元する機能を有しているようである。もし、河口内への堆積土砂量に応じて掃流用水を含む河川流量を制御し、必要最小限

の土砂を海域へ徐々に還元するシステムが構築できれば、過剰な掃流用水を用いることなく効率的に河口閉塞を抑止し、かつ、沿岸漂砂の遮断を緩和する漂砂制御技術として、特に小規模河川などでの一般的な適用が期待される。

そこで本研究では、馬込川における土砂堆積・還元機構を現地観測に基づき明らかにし、上述したような河口域漂砂制御技術を構築するための知見とすることを目的とする。

2. 河口周辺地形と堆砂特性

まず、馬込川河口域における現在の地形および土砂堆積状況を整理する。図-1に、曳航式超音波流速計とGPSを用いて2007年6月に計測した馬込川河口域周辺の水深分布を示す。図中の太線は河口周辺流域の導流堤形状を現し、白黒の濃淡は流域内の水深分布を表す。図より、上流からの南東方向への流れが大きく湾曲して流線を南西方向へと流路を変える遠州灘大橋周辺では、流れがぶつかる左岸(東)側に護



図-1 馬込川河口周辺概要および水深図

岸が設置され、その前面で水深が深くなっている。

一方、右岸側前面の水深は小さく、流域が急に拡幅する地点まで自然護岸となっている。さらに遠州灘大橋南側の下流域では左岸に沿った領域の水深が急に浅くなり、周囲よりも水深の大きい流路は南西方向へ蛇行して右岸側導流堤へと漸進している。佐藤(2008)は、馬込川周辺の過去の地形図や、地形変動の外力となる風や波のデータを分析し、馬込川の蛇行した流路は飛砂による東向きの砂移動と沿岸漂砂による西向きの砂移動によって形成されたものであることを示している。

さらに河口に近づくと、両岸の導流堤の間隔が40mに狭まり、流路内の水深は全域的に大きくなるが、特に右岸側の水深の方が大きいことが分かる。河口から上流に向かって流路幅が広がる地点Cから北側の領域では、左岸に沿って水深50cm以下の浅瀬が広がっている。遠州灘大橋上の地点A(図-1)から河口方向を望んだ写真-1では、河口部から入射した来襲波が導流堤左岸側で集中的に砕波している様子が分かる。

砕波が顕著な地点C周辺では、地形計測を実施した2007年6月には河床表層が礫や小石で覆われていたが、同年9月に台風9号が来襲した後は、これらの礫層の上に海浜砂が堆積していた。写真-2には、台

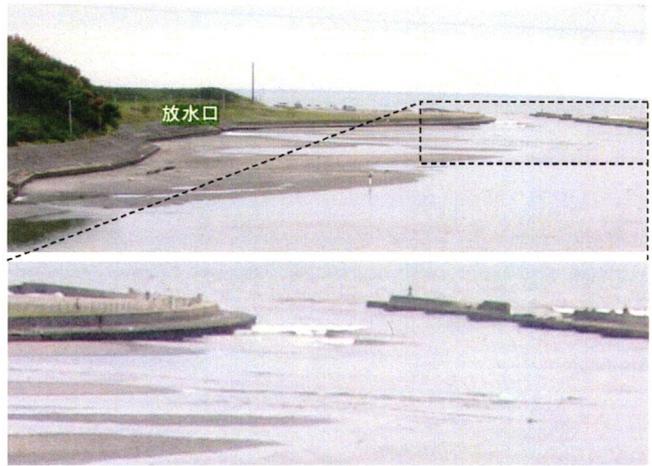


写真-1 遠州灘大橋から見た河口域周辺の堆砂状況と砕波



写真-2 台風9号来襲直後(9月13日)および4ヵ月後(1月8日)における放水口前面の堆砂状況。

風9号来襲直後の9月13日と、その4ヵ月後の2008年1月8日において、地点Cから放水口方面を望んで撮影した写真を比較しており、台風9号により放水口周辺に堆積した土砂が消失している様子が見取れる。また下水処理水の放水口前面から北側の浅瀬においても、台風9号来襲後に土砂の堆積量が増加し、その後徐々に土砂量が減少する傾向が見られた。富田ら(2008)は、過去数年間における馬込川河口域周辺の写真、波浪および流量データを整理し、高波浪時にはこの浅瀬領域に土砂が堆積し、平常波浪時には河川流量の大きさに呼応する形で堆積土砂が消失していくことを確認している。

また平松ら(2008)は着色砂による馬込川周辺における土砂移動形態追跡調査を行い、放水口前面における土砂の堆積は、主に高波浪時に左岸側導流堤を越波して河口内に流れ込んだ波によって、海岸から直接運ばれた土砂であることを示している。

3. 馬込川河口域における流況調査

以上に整理したように、馬込川河口域では局所的な土砂堆積傾向が顕著であることが分かった。ここでは、このような偏在的な土砂輸送特性を規定していると考えられる河口域周辺の波・流れ場の観測を試みる。まず、2007年8月30日から9月1日までの3日

間を対象に、着色砂を用いた河口周辺の土砂動態調査と流況調査を実施した。流況調査では超音波流速計や電磁流速計、水圧式波高計による観測に加え、木片をトレーサーとして用いた画像解析による表層流れ場の観測を実施した。さらに、この観測により導流堤狭窄部(幅40m部分)では横断方向に非一様な流れ場が形成されていることが明らかとなったため、河口内における平面的な流れ場を捉える目的で2007年9月13日および14日に、木片トレーサーを用いた表層流れ場の補足観測を実施した。

これらの対象期間を含む前後約1ヶ月間を対象に、御前崎観潮所で記録した潮位の時間変化を図-2に示す。後で示すように馬込川河口部における潮位変動は御前崎観潮所におけるそれとよく一致することが分かっている。図に見られるように、網がけで示した調査対象期間は比較的潮位変動が大きい期間であることが分かる。以下に観測機器による流況調査および木片トレーサーによる表層流れ場調査のそれぞれについて、調査方法とその結果を整理する。

(1) 観測機器による流況調査

右岸側導流堤の先端位置(図-1, 地点1)に、導流堤と平行に沖に向けて水平発射式超音波ドップラー流速計(SL-ADP)を設置し、2007年8月30日から約3日間の水平流速を計測した。SL-ADPの設置水深は平均水位下1.2mとし、流速は図-1に示したSL-ADPの設置位置を原点として導流堤と平行に上流方向を正としたy軸に対して、 $-2\text{m} < y < -6\text{m}$ の区間を6mおきに10区間に区分し、それぞれの領域において計測した水平流速の2分平均値を記録した。

次に地点1の東側の河口開口部と地点2に水圧式波高計を、地点2のみに電磁流速計をそれぞれ設置し、同じ時期の水位および流速の経時変化を0.5秒間隔で記録した。電磁流速計の設置深さは水底から56cm上部とした。

図-3にこれらの観測機器により記録した水位データや流速データに基づく波高、潮位、および水平流速の時間変化を比較する。これらの図には、天童川河口沖水深40m地点に位置する竜洋波浪観測点における波高、波向および潮位の観測結果を一緒に図示した。図中(d)および(e)における水平流速分布のうち、太い実線はx軸方向(沿岸方向)の、破線はy軸方向(冲向きを負)の水平流速成分を表し、細い実線は地点2に設置した電磁流速計による計測結果を示す。また(d)および(e)では、SL-ADPに最も近い2つのセル、すなわち、 $-2\text{m} < y < -8\text{m}$ 、 $-8\text{m} < y < -16\text{m}$ の区間における平均流速の計測結果を示した。SL-ADPは水平方向に斜めに2本の超音波を発射するため、流速計から離れた地点では流速の計測領域が広がる。これに対し、本研究では導流堤の先端から沖に向かって計測を行っており、特に潮汐に伴う河口からの流入出が顕著な時間では、流れ場が沿岸方向に有

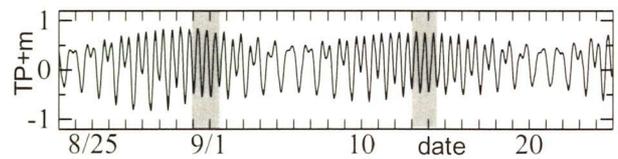


図-2 流況調査対象期間の潮汐

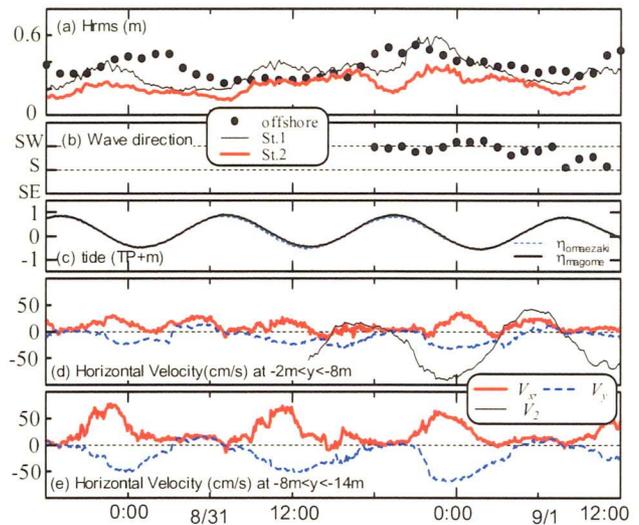


図-3 馬込川河口周辺域における (a) 自乗平均波高, (b) 波向(竜洋観測点), (c) 潮位, および水平流速成分(突堤先端から (d) $-2\text{m} < y < -8\text{m}$, (e) $-8\text{m} < y < -14\text{m}$).

意な分布を持ち、計測器から遠い地点での計測精度が問題となる。本観測では遠方での流れ場が近傍でのそれとは異なる特性をもつ計測結果が得られたが、その考察についてはデータの信頼性の検証も含めて今後の課題とし、本論文では結果を示していない。

まず(c)の潮位変動に着目すると、SL-ADPにより計測した馬込川導流堤先端での計測値と御前崎におけるそれとはよく一致していることが分かる。次に竜洋波浪観測点(offshore)および馬込川河口部(St. 1)における波高と潮汐との関係に着目すると、データ数が少なく普遍的な特性を論じるのは難しいものの、下げ潮時に河口周辺の波高が沖からの来襲波高条件に対して相対的に大きくなる傾向が見られる。SL-ADPによるy軸方向(上流向きを正)の流速変動から下げ潮時には冲向きの流れが卓越しており、波・流れ干渉に伴う波の屈折・集中による影響が理由のひとつとして考えられる。また観測期間中は静穏な波浪条件であったにも関わらず、地点2では自乗平均波高で30cm程度の波が常時観測され、写真-1に見られるような左岸側浅瀬上への波の屈折・集中・砕波現象が見られた。以上より、馬込川河口域における土砂輸送特性には、平常時においても侵入波による影響が重要であることが推定される。

最後にSL-ADPによる水平流速成分に着目する。y軸方向の流れについては、下げ潮時に冲向きの流れが大きくなる傾向が(d)および(e)に共通して見られた。また沿岸方向の流れについても潮汐との強い相

関が見られ、特に下げ潮時に西向きの流れが卓越していったことが分かった。以上より、河口左岸側では西向きの流れが下げ潮に伴う沖向き流れとともに卓越しており、河口から流出する土砂は河口西側に輸送されることが推定される。

(2) トレーサーによる表層流速分布の推定

超音波流速計や電磁流速計を用いた流況場の観測を実施した2007年8月31日～9月1日では、図-1に示した測線3-3'上で、木片トレーサーを用いた表層流速場の観測を行った。観測ではまず、互いを結ぶ線分が導流堤延長方向と垂直に交わるような基準点を導流堤両岸でひとつずつ選定し、さらに、この線分から5.5m離れた地点に同様の基準点を2つ選定して、合計4つの基準点にマークをつけた。次にこの2本の線分を横切るように木片トレーサーを投入し、兩岸の基準点4つとトレーサーの挙動を固定したビデオカメラで撮影した。記録したデジタル画像に、基準点を結ぶ2本の平行線をアフィン変換に基づく座標変換を用いて画像上に描き込み、投入したトレーサーがこの区間を流れるのに要した時間を記録して流速を算定した。またそれぞれのトレーサーが2本の線分を横切った時の実座標位置を推定し、それぞれの位置を平均して、対象とするトレーサーの右岸からの距離を求めた。また観測期間中における風速は2.0m/s程度であり、現地では風による小波も観測しなかったことから、トレーサーの追跡調査に及ぼす風の影響は無視できると判断した。

このようにして追跡したトレーサーを、計測時間別および右岸・左岸側別に分類し、それぞれの区分における平均移動速度を算出して、前述した電磁流速計による流速の時間変化と比較した(図-4)。図に見られるように、推定した表層流速は電磁流速計による計測結果と整合した結果を与えていることが分かった。また、右岸と左岸における流速の違いに着目すると、潮汐によらず右岸側では左岸側よりも沖向きの移動速度が大きい傾向が見られた。図-5には、測線3-3'上における表層流速の横断方向分布を示す。図より、特に沖向き流速がピークとなる下げ潮時(9/1, 10:30)において、右岸側と左岸側での流速の差が顕著に表れていることが分かる。

次に、河口内における循環流パターンを捉えることを主な目的とし、木片トレーサーを用いた追加観測を2007年9月13日および14日に実施した。この観測では、図-1のA, B, C, D地点に固定した定点カメラを用いて流域を10秒間隔で連続撮影し、投入したトレーサーの軌跡を追跡した。流域には導流堤に沿って基準点を設け、各点における位置情報をGPSで記録した。カメラ画像にはこれらの基準点が4点以上写る様にアングルを調整した。これらの基準点に基づき、Hollandら(1997)と同様の手法で画像データを実座標へ変換する際の最適パラメータを非線

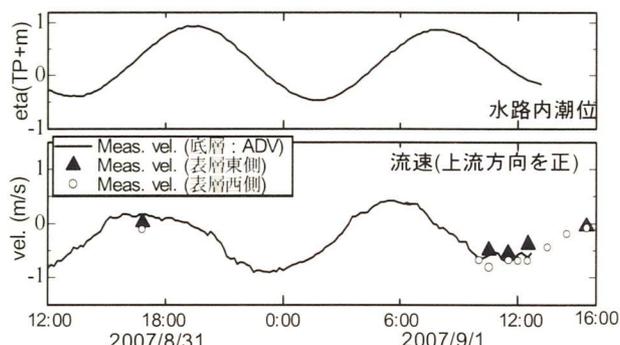


図-4 地点2における潮位と流速、および測線3-3'上における表層流速の時間変化

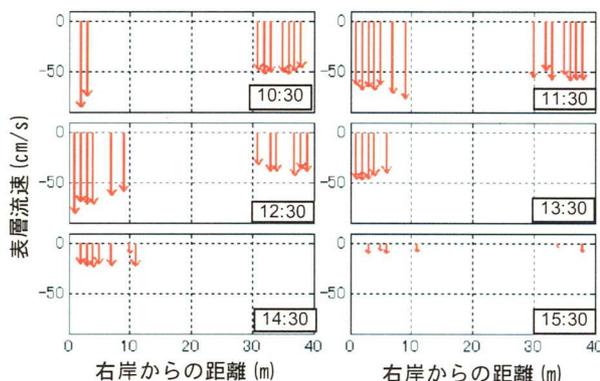


図-5 測線3-3'上における表層流速の横断方向分布

形最小自乗法に基づき算定した。ただし、カメラアングルが比較的小さい条件下において、比較的遠方における座標位置の推定精度を向上させる目的で、非線形最小自乗法による最適パラメータの抽出には田島ら(2008)と同様の重み関数を導入した。トレーサーの軌跡は、10秒間隔の撮影各時刻における各トレーサーの画像座標を抽出し、予め推定しておいた座標変換パラメータを用いて、トレーサーの10秒毎の実座標の変遷を推定した。

観測期間における沖合波浪条件(竜洋波浪観測所)、および御前崎潮位観測所における潮位の時間変化と、木片トレーサーによる追跡調査を実施した時刻との関係を図-6に示す。図に示したように、木片トレーサーの追跡時刻は、干潮、上げ潮、満潮、下げ潮の時刻を選んだ。図-7には、干潮時および上げ潮時における河口上流域におけるトレーサーの軌跡を示す。図に示した各点は10秒毎のトレーサー位置を表しており、隣り合った点の間隔が長いほどトレーサーの移動速度が大きいことを表している。また、図中の矢印はトレーサーの移動方向を表す。図に見られるように、干潮時、上げ潮時ともに、その流下方向は異なるものの、トレーサーの軌跡は図に重ねた航空写真の水深が大きい(濃淡の濃い)流路に沿って流れている様子が分かる。水位が上がる満潮時における広領域でのトレーサー調査は行えなかったものの、浅瀬全域が浸水してその上部を沖向きに流れる流況

が確認できた。

最後に図-8には、干潮、上げ潮、満潮、下げ潮時のそれぞれにおける、導流堤漸拡部周辺でのトレーサー軌跡を示す。漸拡部における平面的な流れ場は、潮位により大きく異なり、特に上げ潮時には表層全域で上流向きの遡上流が卓越していることが分かった。一方、その他の潮位条件では冲向きの流れが卓越的であったが、左岸側前面では常に上流方向の表層流が確認された。これは主に左岸側に屈折・集中した砕波を伴う波による質量輸送によるものであると考えられる。左岸側を遡上する波は砕波して放水口前面で消失し、波とともに上流向きに運ばれたトレーサーは放水口前面周辺から右岸側へ輸送されるものが多く見られた。

右岸側における流況に着目すると、上げ潮時以外では冲向きの流れが観測されたが、トレーサーは全て流域の中央付近から右岸側の導流堤にぶつかるようにして流れ、右岸に近づいてからは導流堤と平行に移動して河口部へと流出する傾向がみられた。対象領域では水深が最大2.5m程度と浅く、波動運動や砕波が卓越する左岸側を除けば底層の流れも表層付近とほぼ同様であると考えられる。以上より、左岸側に集中的に堆積した土砂はこのような循環流によって徐々に海域へと運ばれていることが推定され、

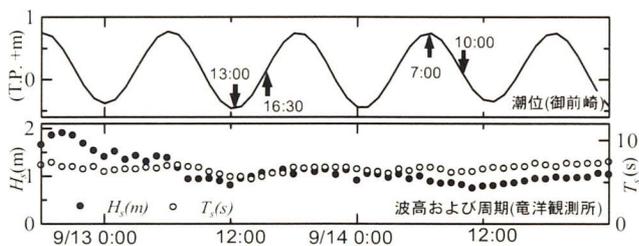


図-6 2007年9月13～14日における潮汐および沖合波浪条件と表層流速分布の観測時間。

右岸側に集中した冲向きの早い流れは、土砂の掃流に効果的に寄与していると考えられる。

4. 数値モデルによる土砂収支の検証

以上に整理した地形および流況調査結果より、馬込川河口域では反時計回りの循環流が形成され、上流向きの流れが卓越する導流堤漸拡部左岸側では、土砂が集中的に堆砂する傾向があることが分かった。さらに、冲向き循環流は右岸側に集中し、これによって河口付近の流路狭窄部での横断方向の流速分布が非対称になり、右岸側での冲向き流速が左岸側

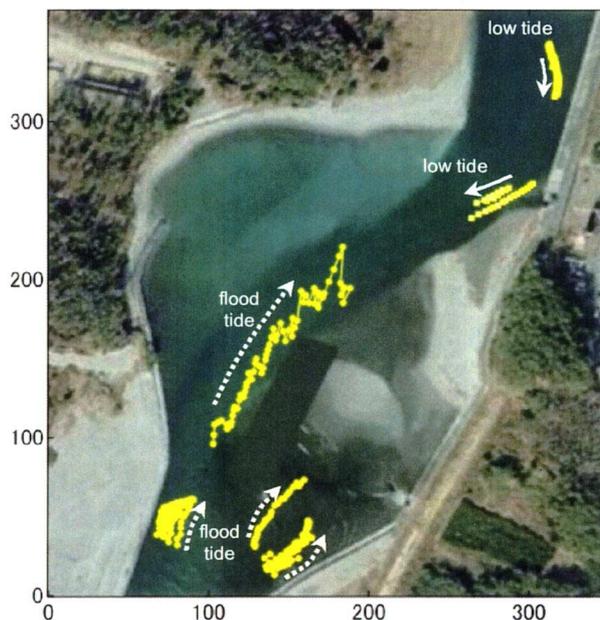


図-7 木片トレーサーの追跡による流れ場の平面分布 (□：干潮時，●：上げ潮時，単位：m)

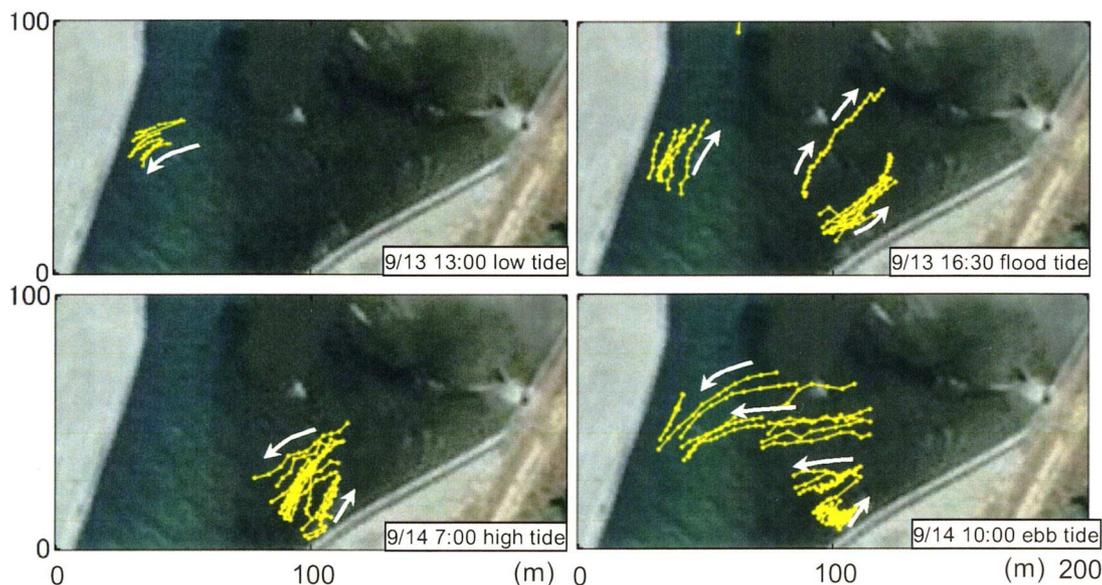


図-8 木片トレーサーの追跡による流れ場の平面分布 (単位：m)

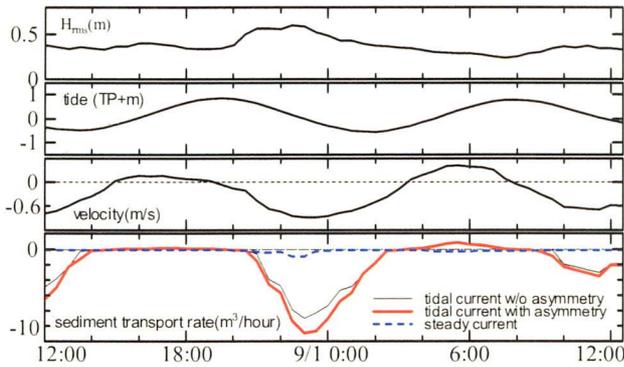


図-9 2007年8月31日～9月1日における外力場とモデルによる漂砂量(上流方向を正)の時間変化

におけるそれよりも20～30cm/s程度大きくなる傾向が見られた。馬込川河口域に見られた土砂の貯蓄・還元機能をうまく利用し、掃流用水量を制御しながら河口からの出流速を必要最小限に維持できれば、沿岸漂砂の遮断抑止に貢献できると考えられる。

ここで重要となるのは、必要最小限の河川流量の推定である。馬込川河口では波と流れが重合し、かつ潮汐流による時間変動や、循環流に起因する左右非対称流れが卓越するため、単純な一様流による必要河川流量の推定が困難である。そこで本研究では、波による非対称波形と平均流速成分の両者による土砂の掃流・浮遊移動を考慮した高地ら(2002)の漂砂モデルを用い、観測した潮流や横断方向に非対称な流れ場が、土砂流送特性に及ぼす影響について簡単な考察を行う。

平松ら(2008)による着色砂調査では、河口付近に投入した着色砂は観測期間中に沖方向へ移動する傾向があることを示している。ここでは、同じ2007年8月31日～9月1日に実際に河口部で計測した潮位、流速、波高データをそのまま高地らのモデルに適用した。ここで、波の非対称波形の算定には田島・Madsen(2004)のモデルを用い、平均流速成分については、底面付近の流速としてMadsen(1994)のモデルに基づき、波・流れ共存場における底面境界層外縁での流速を用いた。土砂の粒径は0.35mmとした。

図-9は高地ら(2002)のモデルに基づき算定した、水路中央部での漂砂量フラックス($m^3/hour$)の時間変化を示す。図の漂砂量の比較における破線は潮汐による変動流速を無視した場合の漂砂量、細実線は潮汐に伴う変動流速を考慮するものの、流路横断方向の流れが一様であると仮定した場合の漂砂量、さらに太線は右岸側/左岸側の流速を平均流速よりも30%大きく/小さくした場合の漂砂量を表す。図に見られるように、潮汐に伴う変動流速は、正味の漂砂量に非常に大きな影響を及ぼしていることが分かる。また、右岸側と左岸側で非対称な流れ場が生じることにより、河川からの流出流量は同じであっても、正味の沖向き漂砂量を有意に増加させる効果があることも定量的に明らかとなった。

5. おわりに

馬込川河口域における流況調査を実施し、河口内に侵入した波の屈折・集中・砕波により、循環流が形成されていること、また、この循環流により、河口内における土砂の堆積域が限定されていることが分かった。さらに、馬込川の地形と砕波に伴う循環流により蛇行した流れは、局所的に堆積した土砂を効率的に流送する効果を有していることが分かった。また、既往の漂砂量モデルによる検証計算を実施し、循環流に伴う非対称な流れ場や、潮汐に伴う変動流速が、河口から流出する正味の土砂移動量に大きな影響を及ぼすことを定量的に示した。今後は、本研究で明らかとなった潮汐や波浪、横断方向に非対称な流れ場を勘案した土砂輸送予測モデルを構築し、より詳細なデータに基づきモデルを精緻化することにより、河口部における必要掃流量を定量的に推定する技術が必要になると考えられる。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号15360261、研究代表者：佐藤慎司)の補助を受けました。また現地観測では豊橋技術科学大学の青木先生、岡辺氏にご協力いただきました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- Holland, K.T., Holman, R.A., Lippmann, T.C., and Stanley, J.: Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies, *IEEE J. of Ocean. Eng.*, 22(1), pp.81-92, 1997.
- Madsen, O.S.: Spectral wave-current bottom boundary layer flows, *Proc. 24th, ICCE*, pp.384-394, 1994.
- 宇多高明, 青木伸一, 三波俊郎, 芹沢真澄, 古池綱, 石川仁憲: 遠州灘海岸の馬込川河口部の地形変化と中田島砂丘の保全, *海洋開発論文集*, 第23巻, pp.1021-1026, 2007.
- 高地潤, 佐藤慎司, 渡辺晃: 前傾化した波と流れによるシートフロー漂砂量, *海工論文集*, 第49巻, pp.426-430, 2002.
- 佐藤慎司: 遠州灘浜松海岸の土砂移動実態, *土木学会論文集*, (印刷中), 2008.
- 田島芳満, O. S. Madsen: 砕波帯内外における底面流速波形の非対称性とそのモデリングについて, *海工論文集*, 第51巻, pp.21-25, 2004.
- 田島芳満, 高川智博, 浅野泰志, 佐藤慎司: 特性の異なる二つの台風による天竜川河口砂州の大規模変形, *海工論文集*, 第55巻, 2008(投稿中).
- 富田沙希, 田島芳満, 平松遥奈, 佐藤慎司: 砂丘を貫流する馬込川河口域における堆砂と土砂掃流用水の役割, *海工論文集*, 第55巻, 2008(投稿中).
- 平松遥奈, 富田沙希, 佐藤慎司, 田島芳満, 青木伸一, 岡辺拓巳: 着色砂調査に基づく遠州灘馬込川河口周辺の砂移動機構の解明, *海工論文集*, 第55巻, 2008(投稿中).