

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

Sedimentation and the Role of Sediment Flush Discharge in the River Mouth of the Magome River Flowing through Coastal Sand Dune

富田沙希¹・田島芳満²・平松遥奈¹・佐藤慎司³

Saki TOMITA, Yoshimitsu TAJIMA, Haruna HIRAMATSU and Shinji SATO

This paper investigates the mechanisms of sediment movements under waves and currents in the river mouth of the Magome River. Special focus is paid on a function of “sediment-flush discharge” which was uniquely introduced to the Magome River to increase the river discharge and mitigate sedimentation problems around the river mouth. Analysis of various data showed that sudden and severe sedimentation is caused by overtopping of stormy waves while daily river discharge including sediment flush discharge flushes sediment in a more gradual manner. Numerical analysis was conducted to investigate quantitative effects of sediment flush discharge and showed that flexible control of sediment flush discharge adjusting to the sedimentation conditions should reduce the risk of inundation.

1. はじめに

馬込川は天竜川河口の西約4kmに位置し、中田島砂丘を貫流する二級河川であり、天竜川から輸送されてきた沿岸漂砂や中田島砂丘からの飛砂によって河口閉塞が生じ、氾濫被害に長年苦しめられてきた。これに対し、河口部では導流堤の建設や掃流用水の導入などの緩和策を講じてきた。最近ではこれらの緩和策の効果と天竜川からの土砂供給量の減少によって河口閉塞問題は解消しつつあるが、現在でも高波浪来襲後には導流堤上流域での堆砂が観測され、2004年には馬込川下流域での湛水被害が生じている。また導流堤による沿岸漂砂の連続性の遮断という弊害も顕在化してきており、将来的には天竜川水系のダム再編事業によって再び沿岸漂砂量が増大することを勘案すると、効果的な河口閉塞抑止対策の継続と沿岸漂砂の連続性維持の両立が求められる。

本研究では、馬込川における掃流用水を有効利用した漂砂制御対策と河口部堆砂環境の変遷との関係を整理し、さらに数値モデルによる土砂収支の分析を加えることにより、主に中小規模河川を対象とした河口周辺域の漂砂制御技術に資する知見を得ることを目的とする。

2. 馬込川河口域の変遷

馬込川河口域の航空写真、周辺地区の土地改良区の記録や導流堤建設時の調査資料などを収集し、馬込川河口域の変遷を分析した。図-1は1946年から1990年の期間における馬込川河口部周辺域の航空写真である。1946年の図-1(a)は導流堤建設以前のものである。この頃は、天

竜川から輸送される豊富な土砂により河口部に土砂が堆積し、左岸に西方に伸びた砂嘴が形成され、河口部は大きく彎曲していた。馬込川は自流量が少なく、水面勾配が緩やかで通水能力が低く、平常時でも沿岸部の排水不良がしばしば起きていた。また、佐藤(2008)によると浜松海岸では秋冬季の西北西からの強風によって年間6,000m³の飛砂が発生し、馬込川にその多くが流入することが示されている。天竜川からの西向きの沿岸漂砂に加え、風による東向きの飛砂流入も馬込川の閉塞原因であった。

浜松市立白脇村公民館編(1996)によると、河口閉塞時には中田島や江ノ島地区の住民が声を掛け合ってスコップで水路を開く「みなと掘り」の習慣が昭和初期まで続いていた。沿岸漂砂と飛砂による平常時の土砂流入に加え、台風などの高波浪時には砂礫で河口が全面閉塞し、馬込川の通水能力はなくなり、水位が上昇して馬込川下流域の440haの沿岸耕地、1570戸の家屋が湛水・浸水被害に見舞われてきた。

そこで閉塞抑止対策として、河口に堆積する土砂を掃流するために1942年に浜名用水の水利権(10.85m³/s)が認可され、1947年より天竜川の西鹿島取水口から馬込川に注水が開始された。また、同じく水害を防ぐために1958年から約6年の歳月をかけて導流堤の建設が行われ、馬込川の河口部は幅40mに固定された。図-1(b)は1962年のものである。前年には工事の90%が終了していたが、62年9月15日の第二室戸台風では河口が全面閉塞し、導流堤内堆砂標高は2m以上となり、ブルドーザーによる開削が行われた。10月12日の台風24号及び10月24日の台風26号でも1.5m以上堆砂し、人力開削(図-1(g): 1962年4月22日)が行われている。これらにより導流堤長は当初計画より約60m延長され、1966年に完成した(図-1(c))。左岸側の汀線が導流堤先端から少し後退しており、掃流

1 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
2 正 会 員 Ph.D 東京大学准教授 同上
3 フェロー 工博 東京大学教授 同上

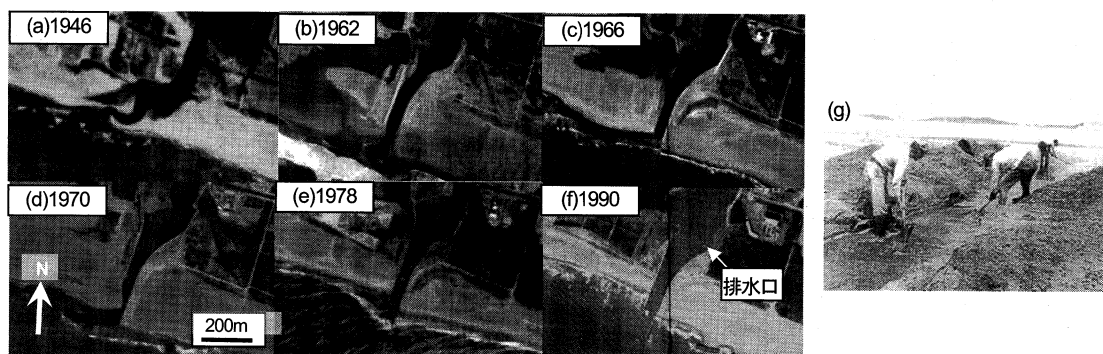


図-1 1946年～1990年における馬込川河口域の航空写真(a～f)および河口閉塞時における人力開削の様子(g:1962年)

用水の導入、導流堤の建設も終えたこの時期も依然として高波浪時の河口全面閉塞が生じていたことが土地改良区の開削工事記録によってわかった。掃流用水に関しては1954年頃から天竜川の河床低下に伴い、取水が困難となり、十分な量が取水できなかった。これに対し西鹿島から船明ダムへと取水口を移動させ、1979年以降に、最大 $10.85\text{m}^3/\text{秒}$ の取水を安定して行える環境が整った。

閉塞問題が生じなくなったのは1971年以降である。その要因には、導流堤の効果、掃流用水の実質的運用に加え、天竜川からの土砂供給量の減少によって浜松五島海岸の海岸土砂が減少し、この期間に馬込川河口部の先端水深が増大し、導流堤水路内に流入する土砂量が減少したことが挙げられる(平松ら, 2008)。1978年の図-1(e)では、1970年の図-1(d)に比べ、左岸側の汀線が大きく後退している。近年(図-1(f))さらに汀線が後退し、右岸側の中田島砂丘においても侵食が進んでいる。1970年までは河口閉塞による氾濫被害に悩まされてきた馬込川河口域だが、現在は侵食問題に直面しており、馬込川河口域の土砂環境は大きく変遷を遂げてきたことがわかった。

3. 馬込川河口域における近年の堆砂特性

河口全面閉塞による氾濫問題は解消したが、一方で、現在でも導流堤水路内に局所的に土砂が堆積し、湛水被害が発生している。堆砂が特に顕著だった2004年と2005年に注目して、河口部の堆砂状況と馬込川沖合での有義波高と、河口流量との対応関係について分析した(図-2)。図中一番下のグラフは後述する土砂収支モデルによって求めた、水路内における日単位の上流向き漂砂量を示している。ここで河口流量は馬込川注水量と河口自流量の合計値を利用している。注水量は掃流用水量と農業用水の余水吐流量、下水排水流量を合計したものであり、河口流量は河口から5.4km上流に位置する松江水位観測地点の自流量から流域面積比によって算定されたものである。河口流量には西遠浄化センターからの排水流量(約 $2\text{m}^3/\text{s}$)は含まれていない。図からわかるように、掃流用水量は年間を通して水利権最大流量を注水している

わけではなく、主に6月から9月にかけて運用している。冬期は河川工事を行うために掃流用水はほとんど注入していない。

図-2の写真1～8はいずれも馬込川水路内の左岸導流堤側から、遠州灘大橋方向に向かって撮影されたものである。写真2～4と波高分布の図から、高波浪が来襲するたびに流路の広がる排水口付近の左岸導流堤沿いの堆砂量が增大していることがわかる。堆積は左岸側のみ見られ、右岸側や導流堤先端付近には堆積せず、河口閉塞は生じていない。平松ら(2008)による着色砂追跡調査により、高波浪時に排水口の南側に堆積する土砂は、導流堤の入り口から入ってきたものではなく、越波によって左岸導流堤を越えて流入してきたものだと考えられる。

これらの写真より、顕著な堆砂が見られた直前には、必ず高波浪が来襲していることが分かった。2004年と2005年のデータにおいて、このような顕著な堆砂を引き起こした高波浪の最小値を記録したのは2005年6月10日20時で、竜洋波浪観測点での有義波高が 3.75m であった。これは沖波有義波高で 4.1m に相当し、小川・首藤(1983)の打ち上げ高の算定式によれば、このときの打ち上げ高さは約 1.4m となる。同時刻における潮位(御前崎観測点でT.P.+56cm)を勘案するとTP基準の打ち上げ高さは約T.P.+2mとなり、馬込川左岸側導流堤の天端高さ(T.P.+2.1m)とほぼ一致することが分かった。

一方、河口流量が特に大きいときには土砂が数百 $\text{m}^3/\text{日}$ のオーダーで海へ流出することが後述する土砂収支モデルからもわかるが、写真2～4から、台風時には河口流量の増大による土砂掃流量の増加分を上回る越波による流入があることがわかる。また、堆砂量が多いとその後の平常時の流量では土砂は容易に掃流されず、次の高波浪来襲時に堆砂標高がさらに上昇していくことがわかる。

波高が特に大きかった台風23号(10月20日)によって土砂は導流堤エプロン上部にまで堆積している(写真4)。その後11月11、12日の大雨(2日間で200mm以上)によって五島地区で28haに及ぶ湛水被害が発生し、周辺農産物(蔬菜・ブロッコリー)が被害を受けた。11月11日の河口

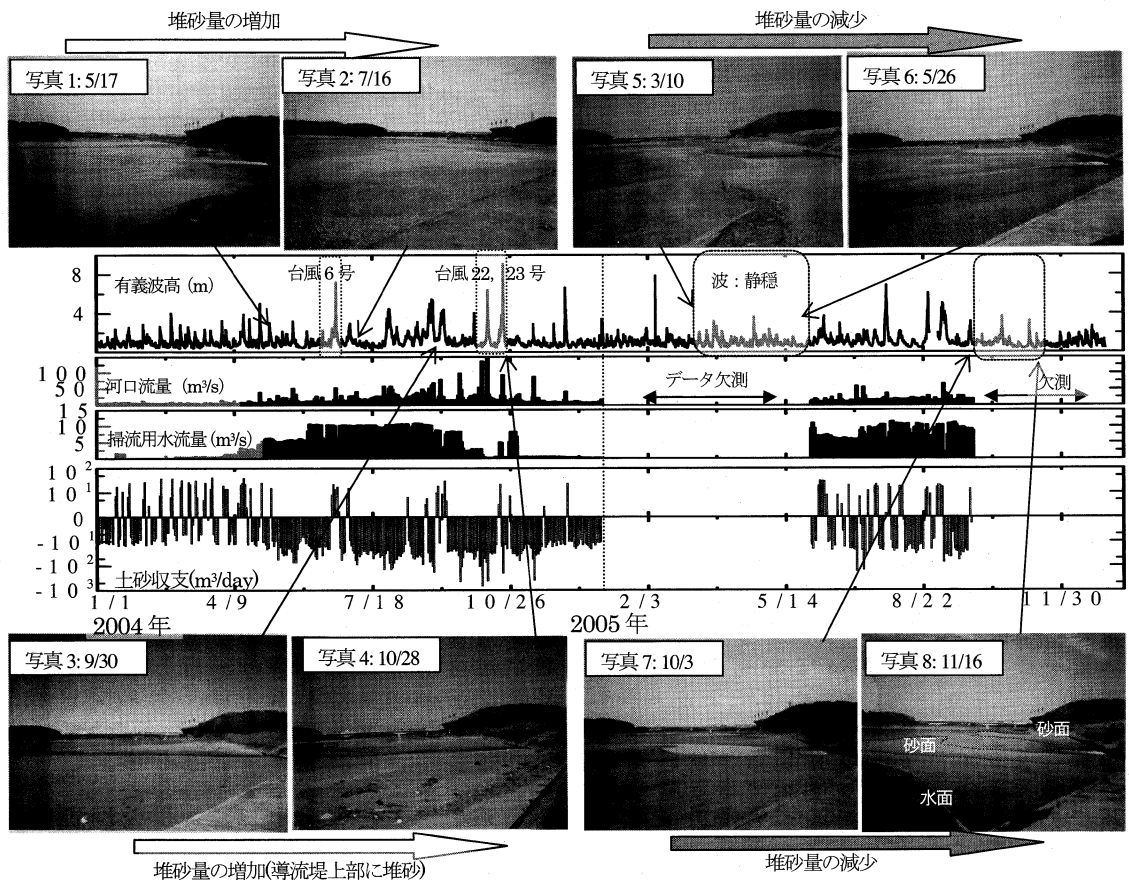


図-2 2004年、2005年の外力と堆砂状況の関係

流量と同じ規模の出水は9月と10月にも発生しているが、11月にのみ湛水被害が生じた原因は、河口流量では掃流しきれない越波による過剰な堆砂が台風の頻発によって徐々に水路内の堆砂標高を上昇させ、11月11日の出水時には異常な水位上昇を引き起こしたためだと考えられる。

このように馬込川では高波浪時に局所的かつ瞬間的に大量の土砂堆積が生じるが、写真5・6(3/1～5/26)と、写真7・8(10/3～11/16)より、馬込川では一方的に堆積するだけではなく、堆積した土砂を徐々に掃流する仕組みもあることがわかる。この2つの時期は共通して波が静穏である。河口流量データは欠測しているが、写真7・8の期間には掃流用水はほとんど注入しておらず(注入した日でも $1\text{m}^3/\text{秒}$ 以下)、馬込川の秋冬期における河口流量は平均的に少ないことから、高波浪が来襲しなければ河口流量はある程度小さくても土砂を掃流する効果があることがわかった。以上の分析より、馬込川では平常時には堆積した多量の土砂をうまく掃流する仕組みが存在するため、湛水被害を防ぐために高波浪が頻繁に来襲する夏期・秋期に特化した掃流対策が必要だと考えられる。

2004年および2005年の分析に加え、2007年の現地観測

期間中に来襲した台風9号によって越波と土砂堆積が生じ、その後河口流量によって堆砂が掃流される現象が観測された。図-3は2007年9月1日から10月11日までの有義波高、河口流量、掃流用水量、モデルによる土砂収支を示している。また、図-2、3から、越波による流入を考慮しなければ馬込川では年間を通して土砂流出傾向を示し、導流堤の入り口から土砂が流入することは少ないと考えられる。

4. 馬込川における堆砂特性と波・流れ場

(1) 河口域周辺における流況場の観測

馬込川における土砂掃流メカニズムの把握を行うため、2008年8月31日、9月1日、13日、14日に馬込川における流況調査を実施した。調査の詳細や流況場の特性については田島ら(2008)を参照されたい。以下に観測で得られた馬込川河口部周辺の流況特性に対する知見を整理する。(1) 馬込川の流況は潮汐の影響を強く受け、潮位によって流れの方向や流速が異なる。(2) 導流堤内の流れ場は横断方向に非対称になり、右岸側の方が左岸側よりも冲向き流速が大きくなる傾向がある。(3) 下げ潮時には特にこ

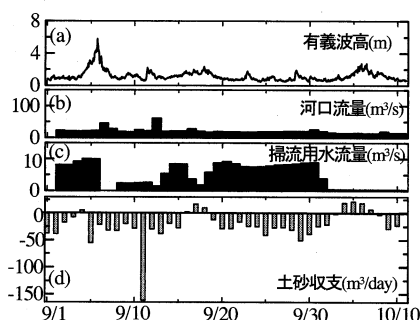


図-3 2007年9月～10月における外力場と土砂収支

の非対称性が顕著に現れ、右岸側の流速は左岸側より20～30%大きい値となる。(4)導流堤狭窄部の上流側における排水口付近においても、潮汐が流況に大きな影響を及ぼし、全体的に上げ潮時には観測範囲全体で上流向きの流れが卓越し、他の潮位条件では冲向きの流れが卓越する。(5)流路が広がっている排水口の南側の左岸導流堤沿いでは、潮汐によらず常に上流向きの流れがあり、下げ潮時には排水口付近で循環流が形成される。(6)海から入ってきた波は、流路が広くなり始める地点から左岸側へ屈折して集中し、左岸側で上流方向の流れが形成され、冲向きの流れは右岸側に集中する。(7)左岸側に集中して堆積した土砂はこの循環流によって流速の大きい右岸側に流れ、効率的な土砂掃流が実現し、排水口からの放水も堆積した土砂を右岸側へ流送する役割を果たしている。

(2) 高波浪の越波による堆積土量の推定

高波浪時に河口内に堆積する土砂は、水路内を流送されたものよりも、海浜を遡上し導流堤を越波して河道内に流入する波によって海岸から直接運ばれたものが多い。特に高波浪が続き、河口内への堆砂が顕著であった2005年夏期には堆砂部を中心に3度の地形計測が行われている。ここでは、2005年8月5日における堆砂部の標高分布と、平成2007年9月に著者らが実施した水深計測結果(田島ら, 2008)に基づき、堆砂量の推定を試みた。

2005年の堆積域の標高データと2007年の水深データを合成した水深と2007年の水深データを比較すると図-4の様になる。両者の水深差から堆積土砂量を計算すると約7,000m³となった。図に見られるように、2007年に比べて2005年では、排水口のやや南側における堆積が顕著である。さらに水門の南側周辺でも堆砂が見られることから、高波浪により排水口前面周辺に運ばれた土砂は、その後の河口内の循環流により、左岸に沿って河口上流方向へと輸送されることが推察できる。

5. 土砂収支と掃流用水効果の検証

高地ら(2002)の波・流れ共存場の局所漂砂量モデルを適用し、実際の来襲波浪条件における水路内の土砂の流

出入過程の再現を試みた。このモデルでは前傾化した波と川からの流れが重合する場合における、漂砂の掃流・浮遊移動が考慮されており、本研究で着目する漂砂移動特性を再現するのに適していると考えられる。

図-2および図-3に示した土砂収支(導流堤狭窄部における上流向きの漂砂量)の計算では、時々刻々の波浪観測データからエネルギー平衡方程式を用いて狭窄部(水深2.5m)での波浪条件を計算し、田島・Madsen(2004)のモデルを用いて波による非対称軌道流速波形を算定した。流れ場については、河口流量の実測値に、潮汐に伴う変動流速成分を加えた。潮汐流は田島ら(2008)の観測結果に基づき、大潮と小潮時における変動流速を与え、さらに狭窄部における横断方向の流速の非対称性も考慮した。モデルでは馬込川で見られる越波による土砂の流入は再現されておらず、図に示した計算結果は、狭窄部に流送可能な土砂が十分にある場合の、狭窄部からの流出土砂量を表しており、実際の河口内の土砂収支とは一致しないことに注意が必要である。

図-3に示した2007年9月1日から10月11日までの期間の土砂流送量を累積すると-1000m³(海へ流出)となった。一方、9月8日に来襲した台風8号による堆積土砂量を、画像データと堆積層厚の情報から概算すると約1000m³となった。この堆積土砂は10月11日の観測時には消失しており、図-3に示した流送量1000m³と符合する。以上よりモデルによる狭窄部における流送土砂量の算定精度が妥当なものであることが確認された。

図-5(a)はこのモデルを利用して求めた波高・河口流量の分布による土砂掃流量の違いを示す。波の周期は平均的な沖波波形勾配として H_0/L_0 を0.015で固定して算定した。図中の各線は1ヶ月あたりの掃流可能な土砂量を示している。図-5(b), (c)はそれぞれ2004年, 2005年の河口流量別頻度(日数)、図-5(d)は2005年における河口流量から掃流用水量を除いた河口自流量別の頻度を表している。流量データは2004年に関しては1年分、2005年

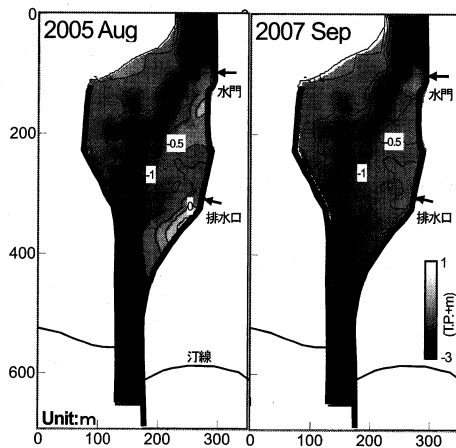


図-4 堆積部地形の比較土砂

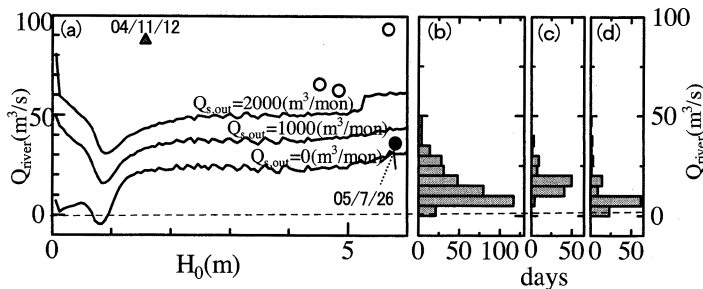


図-5 波高、河口流量、掃流砂量の関係(a)と河口流量の頻度分布、
(b)2004年、(c)2005年、(d)2005年(掃流用水なし))

に関してはデータが存在する6月1日から9月26日までの約4ヶ月分のデータを利用した。図-5(a)より、 $10\text{m}^3/\text{s}$ の河川流量の増加により狭窄部での月間土砂流送量は 1000m^3 増加し得ることから、掃流用水が効果を果たしていることがわかる。特に2005年は河口自流量が少なかったため、掃流用水量の注入の効果が大きかったといえる。

この図では、 1m を超える波高に関しては、土砂収支は波高に規定されないことがわかる。しかし、2.で紹介した2004年、2005年における波高と馬込川の堆砂状況の対応関係から、波高が 3.75m を超えるとモデルには反映されていない越波による大規模な土砂流入が起こっていると考えられるため、河口流量が多くても堆砂が生じてしまう。

図-5の○は水路内に顕著な堆砂が発生した日を表し、△は顕著な堆砂が見られなかった日を表す。黒く塗られたものは湛水被害が発生したことを表している。計算では○の位置では土砂は流出しているが、実際は越波によって流入している。また、2005年7月26日の●より、流量が少なくても堆砂と波高の大きさによって湛水被害が発生しうること示している。▲は2.で述べた2004年における湛水被害の日を表し、波高は小さく新たな堆砂は起こっていないが、累積していた堆砂と雨による大きな流量によって被害が発生した。

図-6は2004年から2006年における、有義波高が 2m 以上の年間日数を示している。図中の点線はこの3年間における越波による土砂流入が起こる限界波高 3.75m を表している。この図より、2004年は 3.75m を超える高波の来襲回数が特に多いことがわかる。図-2や図-5から2004年は河口流量が多く、土砂収支モデル上では年間を通して土砂流出が卓越しているものの、馬込川導流堤水路内の堆砂は高波浪時の越波によって規定されているため、図-6に示したような波高分布とその頻度が重要であることがわかった。

高波浪が頻発すると、そのたびに堆砂量が上昇していくことがわかっているため、高波浪から次の高波浪が来るまでの期間に可能な限り土砂を排出させることが湛水被害を防ぐ上で重要となる。そのため、導流堤水路内の

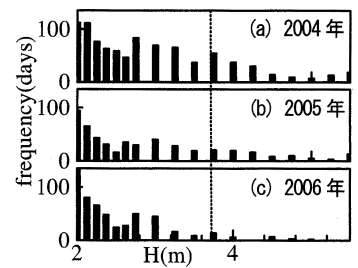


図-6 波高別頻度

堆砂状況をモニタリングしながら掃流用水の注入量を調節することで河口流量を増減させることが有効だと考えられる。

6. おわりに

馬込川では掃流用水の導入や導流堤の建設、さらに天竜川からの土砂供給量の減少により、河口閉塞被害はなくなったものの、導流堤水路内では高波浪時に局所的な堆砂が生じ、湛水被害のリスクは現在も存在する。高波浪時の越波は河口部へ大量の土砂を短期的に堆積させるのに対し、掃流用水を含む河川流は静穏時に数週間かけて徐々に河口内の土砂を海域還元する。2004年および2005年のデータによれば、大量の土砂堆積を引き起こす越波は沖波波高が 4.1m 以上のときに発生し、現在の掃流用水量($10.85\text{m}^3/\text{s}$)は、月間堆砂量で 1000m^3 の違いを生じさせる効果を持つ。以上より、湛水被害を抑止するためには高波浪が来襲する夏・秋期に、堆砂量に応じて掃流用水の注水量を調節することが有効である。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(B)および科学技術振興調整費重要課題解決型研究の研究成果の一部である。集中観測の実施には豊橋技術科学大学、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

- 小川由信・首藤伸夫(1983)：Swash zoneの観測，NERC TR. No.17, TR-82-1, 第7回合同総合現地観測報告書，pp.189-203.
- 高地潤，佐藤慎司，渡辺晃(2002)：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.
- 佐藤慎司(2008)：遠州灘浜松海岸の土砂移動実態，土木学会論文集(B, Vol.04, No.3, pp.192-201).
- 田島芳満・O. S. Madsen(2004)：碎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，海工論文集，第51巻，pp.21-25.
- 田島芳満・富田沙希・佐藤慎司(2008)：静岡県馬込川河口域における非対称な流況と堆砂特性，海洋開発論文集(Vol.24, pp.1279-1284).
- 浜松市立白鷺公民館編(1996)：川と海に育まれて，わが町文化誌しらわき，311P.
- 平松遥奈・富田沙希・佐藤慎司・田島芳満・青木伸一・岡辺拓巳(2008)：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，海岸工学論文集(投稿中).