

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

Sediment Movement Mechanism around the Magome River Mouth based on Color Sand Tracer Experiments

平松遥奈¹・富田沙希¹・佐藤慎司²・田島芳満³・青木伸一⁴・岡辺拓巳⁵

Haruna HIRAMATSU, Saki TOMITA, Shinji SATO, Yoshimitsu TAJIMA, Shin-ichi AOKI and Takumi OKABE

Mechanism of sand movement was investigated around of the Magome River mouth located on the Enshu-nada by the comparison of old geographical maps in about 200 years and by a color sand tracer experiment. The long term advancement of the shoreline as well as the rapid retreat in the last 20 years were identified. The movement of four color sands placed on the updrift and the downdrift sides of the river mouth jetty and in the jetty channel was monitored for three months. Entrapment of westward longshore transport by the jetty was found to be significant. A sand bypassing system was found to be feasible by utilizing an existing sewage discharge channel connecting the Tenryu River mouth to the Magome River.

1. はじめに

天竜川右岸の浜松海岸では深刻な海岸侵食が河口から西へ進行し、現在は天竜川河口から西へ約3kmの馬込川河口下手側の中田島砂丘前面に及んでいる。天竜川流砂系では、ダム再編事業により貯水池排砂などの具体的な施策が検討されているが、その効果や影響は、沿岸における土砂移動機構の正しい理解に基づいて具体的に検討する必要がある。馬込川河口は古くから河口埋没が課題であり、全国的にも珍しい掃流用水を導入するとともに1964年に導流堤が建設された。導流堤は建設当初は内水排除と沿岸漂砂の通過を両立するものであったが、その後天竜川からの土砂供給減少、1970年から1990年にかけての離岸堤・消波堤の建設などを経て海岸の土砂環境が変化し、現在は沿岸漂砂を捕捉して下手海岸の侵食の一因となっているようにも見える。

本研究では、伊能大図を含む古地図分析により馬込川河口周辺地形の長期的な変遷を理解したうえで、台風来襲をはさむ時期に着色砂調査を実施することにより、波と流れによる漂砂、掃流用水による流砂、砂丘地の飛砂など複雑な移動モードが重合する場における土砂移動機構を解明することを目的とした。さらに、下水処理水の放流管渠を利用した持続的な土砂輸送策の可能性についても検討した。

2. 馬込川周辺の海浜地形変化

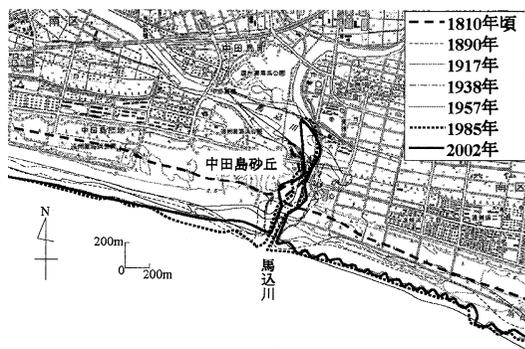


図-1 伊能大図以後の地形図の比較

伊能大図(日本地図センター, 2006)から現在までの地形図を収集・スキャンし、全ての図に共通して描かれている東海道などを基準として重ね合わせて、海岸線の変化を抽出した。古地図の分析ではアフィン変換などを用いる幾何補正手法が提案されているが(清水ら, 1997, 高橋ら, 2006など)、対象領域では伸縮・回転のみで街道筋のマッチング誤差が100 m以内であったので、それ以上の補正は施さなかった。明治以後の地形図の誤差は格段に小さい。

すべての地形図において馬込川の河口位置はほとんど変化していないが、海岸線の位置は、近年の200年間で300 m以上前進し、最近20年では150 m程度急激に後退している。このように馬込川河口周辺は年間数mの割合で海岸線の前進・後退を繰り返す土砂環境変化の激しい場所であることがわかる。地形変化が激しい理由は、天竜川からの豊富な土砂供給が沿岸漂砂となって西向きに輸送されていること、第二次大戦後天竜川流砂系に建設されたダム群により海岸への供給土砂量が減少したこと、1960年代以後導流堤や海岸保全施設が建設され、土砂の

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 フェロー 工博	東京大学大学院教授 同上
3 正会員 Ph.D.	東京大学大学院准教授 同上
4 正会員 工博	豊橋技術科学大学教授 工学部建設工学系
5	豊橋技術科学大学産学官連携研究員 工学部建設工学系

移動状況が変化したことなどが原因と考えられる。

図-2は馬込川導流堤の先端位置における水深の経年変化を示したものである。先端位置の水深は、静岡県が管理する深浅測量データを内挿して求めた(佐藤, 2008)。同図より、1985年頃から先端水深が深くなっており、図-1で確認した海岸線の後退が始まった時期と符合する。導流堤の存在が下手海岸地形の変化に密接に関係していることを示唆している。

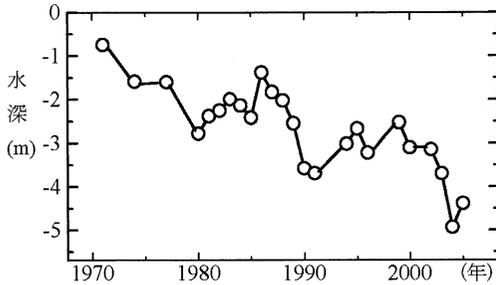


図-2 馬込川導流堤の先端位置の水深 (T.P.基準)

3. 着色砂調査の概要

(1) 着色砂の特性と投入方法

馬込川導流堤周辺の土砂移動機構を解明することを目的として2007年8月31日～9月1日に着色砂調査を含む集中観測を実施した。使用した着色砂は赤、緑、黄、青の全4色とし、赤色と緑色を馬込川左岸側導流堤と離岸堤の中央付近のT.P. 0m地点に、青色を中田島砂丘養浜工西端前面のT.P. 0m地点に、それぞれ500kgを1m四方の範囲に厚さ30cmで投入した。黄色着色砂500kgは馬込川水路内の、西側導流堤の先端から上流側に約110mの位置に投入した。導流堤間水路部の流れは強いので、袋に入れた着色砂を導流堤エプロン部から降ろし、着底後に袋を底部から引き上げることで投入時の着色砂の散乱が少なくなるように配慮した。粒径による挙動の違いを確認するため、緑、黄、青色着色砂は現地の砂とほぼ同じ0.4～0.5mmの粒径とし、赤の粒径は現地の砂より大きい0.9mmとした。現地の底質の粒径は、海浜、水路内とも0.3～0.7mmであった。図-3は現地砂と着色砂の粒度分布であり、レーザー回折式粒度分布測定装置を用いて分析した結果である。別途実施したふるい分け試験と比較すると、1.3～1.4倍大きめの粒度となっている。

図-4は集中観測期間の潮位変化(舞阪地点)を示したものである。着色砂の投入は、8月31日12時の干潮時とした。投入日の波は南東から波高約1mのうねりが来襲しており、投入後の潮位の上昇により海浜の着色砂も15

時頃には視認できなくなった。調査では、9月1日14時までは高い頻度で底質を採取するとともに、12月まで約2週間おきに追跡した。

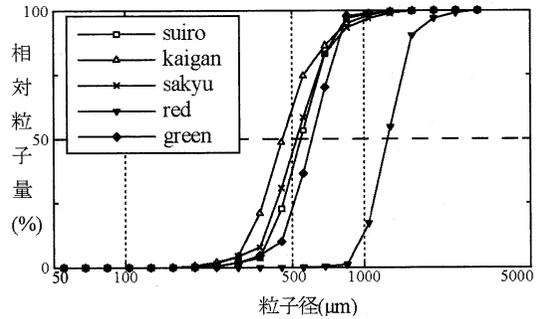


図-3 現地砂(水路, 海岸, 砂丘)と着色砂の粒度分布

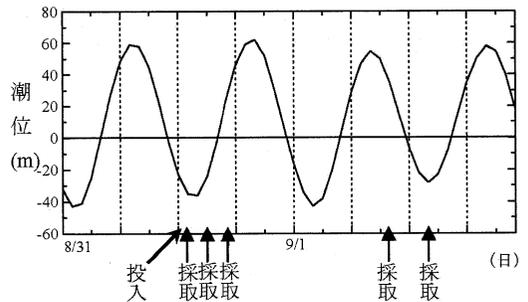


図-4 集中観測周辺の潮位変化 (T.P.基準)

(2) 底質採取

着色砂移動追跡のための底質採取は、馬込川左右岸の海浜部では図-5に▽で示す地点で実施した。投入後の二日間は投入点から25mおきに東西100mの範囲を対象とした。導流堤水路部では図-6に示すように左右岸の堤防の水路内外で投入地点を挟む上下流約100mの範囲の計18地点で採取した。海浜部における底質採取位置は、採取時における波の最大遡上高さから海側に1mの位置とした。最大遡上高さは、漂流物の漂着高さなどから判断した。直径4.5cmの円管を用いたスキミング法で、表層深さ1.0cm程度の範囲の砂を採取した。水路内外の底質採取は、導流堤から長さ約20cmの単管パイプと軍足で作成した底質採取器を投入して実施した。波と流れが強い条件で大がかりな器具やダイバーの助けを借りず短時間で効率的に高い頻度の採取を行うことができた。水路内左岸側の導流堤先端から250m上流側の地点は、台風9号来襲前は底面が礫で覆われており、採取できた土砂はごく微量であったため、分析の対象としていない。

8月31日の10時, 13時, 15時, 17時の4回, 9月1日の10時, 14時の2回, その後9月5日から12月4日まで約2週間おきに採取した試料を本研究の分析対象とした。9月5日以後の採取では, 採取地点を間引くとともに採取対象区間を拡大し, 東側では離岸堤を越えた地点, 西側では中田島砂丘を越えて投入点から西へ約1.3kmの米津浜まで底質採取の対象とした。

採取した底質試料は, ごみや塩類を除去するため水道水で洗浄し, 乾燥させた。120gから200gの乾燥試料から四分法により無作為に取り出した30gから50gを計数対象

とした。着色砂の個数が少ない試料についてはさらに計数対象試料を増やし, これらから各色着色砂の重量含有率を求めた。なお, 底質採取と同時に採取地点の表層海浜の約1m四方の領域をデジタルカメラで記録した。記録した高精細画像を用いて着色砂の計数を試みたが, 画素の色彩情報のみでは着色砂の抽出が困難であった。計数には, 1地点あたり平均して1時間必要で, 多大な労力がかかるので, 自動計数システムの開発は今後の課題である。

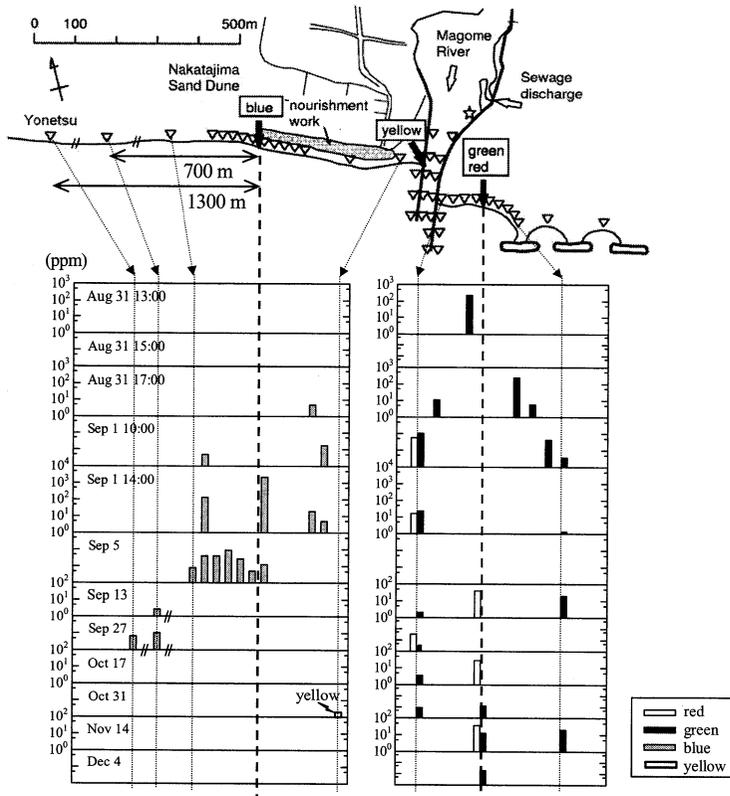


図-5 海浜部の着色砂の追跡結果

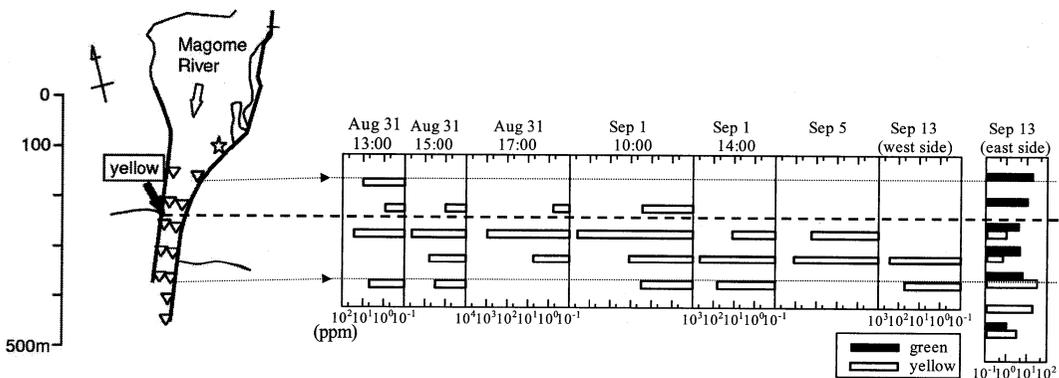


図-6 導流堤水路内における着色砂の追跡結果

4. 着色砂の移動分析

(1) 導流堤左右岸海浜部

図-5は海浜部の着色砂の追跡結果の一部を示したものである。西側の海浜では時間が経過するにつれて検出範囲が西へと拡大しているのに対し、東側海浜では導流堤と離岸堤の間で移動を繰り返していることがわかる。離岸堤を越えてさらに東側の地点では着色砂は一切検出されなかったことから、東側海浜の着色砂は少なくとも数ヶ月の時間スケールでは離岸堤と導流堤で挟まれた区域に閉じ込められていることが確認でき、西向きの沿岸漂砂が卓越する環境においても構造物の土砂捕捉効果が高いことが確認できた。また、10月31日の中田島砂丘側の試料から水路部に投入した黄色着色砂が1.97ppm検出された。水路から流出した土砂は西側の海浜にも輸送されることを示すものである。ただし、後述するように水路からは土砂が沖へ流出しているものの、黄色着色砂は一地点以外では検出されておらず、導流堤から下手海岸の汀線付近への土砂輸送は限定的であると考えられる。

海浜部での着色砂の移動は速く、投入翌日には、投入点からそれぞれ約100m離れた東側の離岸堤と西側の導流堤まで着色砂が移動したことが確認できた。導流堤西側の海浜では、投入から4週間後には投入点から約1.3km西側の米津浜でも青色着色砂が検出されている。粒径の異なる赤色と緑色着色砂の挙動を見ると、現地海浜砂とはほぼ同粒径の緑は投入点の両側で検出されているのに対し、やや粗い赤は投入点の西側のみで検出されている。8月31日と9月1日の検出数をさらに詳細に見ると、緑は流されるのが早く、赤は海浜上部に打ち上げられる傾向が強いことが確認できた。検出数についても投入翌日の9月1日では、赤も緑も検出量は同程度であったが、9月27日以降は、赤の重量含有率が緑の10倍以上であった。1ヶ月近くたつと、粒径の大きい赤は岸に打ち上げられるが、緑は浮遊砂となって沖に流される傾向にあるためと考えられ、粒径の違いによる選択的な輸送を確認できた。

(2) 馬込川導流堤水路部

図-6は導流堤水路内における黄色着色砂の検出結果である。底質は水路左右岸で採取したが、着色砂は台風9号が来襲するまでは、着色砂を投入した右岸側でのみ検出された。水路内では田島ら(2008)が指摘するように、河川流は右岸に集中する形で流出しており、左右非対称な流れが発達している。また流量としては、潮汐による流出入量と馬込川に導入されている掃流用水はほぼ同程度であるため、ほぼ常に海向きの流れが卓越している。図-6によると、台風来襲時までは、着色砂は右岸側堤防に沿って沖向きに移動していることがわかる。また、海浜部に投入した赤色と緑色着色砂は水路内では一切検出されておらず、導流堤の土砂捕捉効果が高いことが確認

できる。一方、台風来襲後の9月13日では、それまで検出されなかった水路左岸側でも導流堤先端付近で黄色着色砂が検出されているうえ、左岸側内陸部で緑色着色砂が検出されている。これは、台風9号による高波で、水路内でも底質の混合が進んだことと、南東から入射した高波が左岸側導流堤を越波して、水路内に着色砂を含む海浜砂をもたらしたためと推定される。黄色の着色砂は台風来襲後も海側でしか検出されていないことから、台風9号来襲時も水路内の砂移動は沖向きが卓越していたものと推定される。

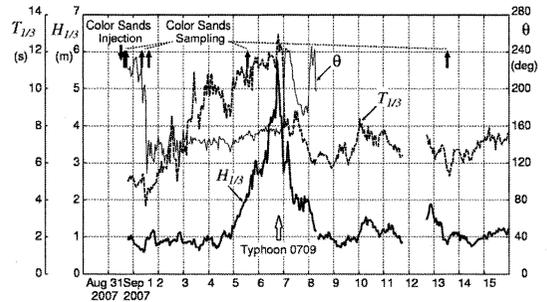


図-7 竜洋観測所の波浪記録

図-7は天竜川河口口の竜洋観測所の波浪記録である。集中観測期間は波高約1mのうねりが来襲していたこと、9月6日前後には波高5mを超える台風9号のうねりが来襲していたことがわかる。卓越波向きはほぼS25度Eであり、海岸にはかなりの角度で東寄りから入射するため、西向きの沿岸漂砂が卓越することになる。9月8日以後の波浪記録はノイズが多く分析していない。

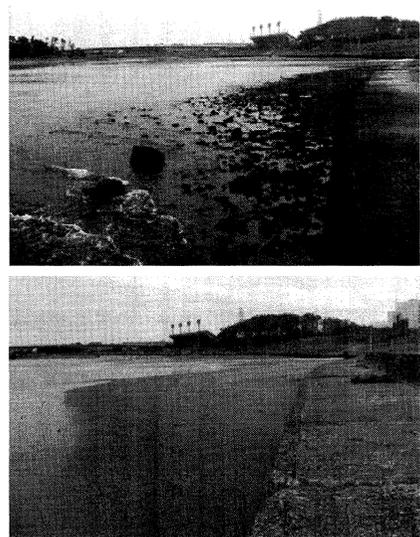


写真-1 台風9号の越波によって侵入した砂
(2007年7月2日(上)と9月13日(下))

写真-1は台風9号来襲前後の左岸側導流堤の内陸部分である。7月には礫が露出していた部分が約150mの長さになり砂で覆われていることがわかる。同砂層の厚さは50~70cm程度であり、この区域の図-6中☆印地点で採取した底質コア試料を分析したところ、表層から底層まで1.5~7.2ppmの緑色着色砂が検出できた。同コア試料には黄色着色砂は含まれていなかったことから、台風来襲時にも水路内の砂移動は沖向きであり、これに東側海浜から越波とともに海浜砂が侵入してきたことが裏付けられる。馬込川河口付近に設置したビデオ映像でも台風9号来襲時の越波の様子が記録されているうえ、導流堤に沿って設置されていた木柵が破壊されたことから越波の激しさを伺い知ることができる。

5. 持続的な土砂輸送策の検討

現在馬込川には、天竜川河口右岸に位置する西遠浄化センターからの下水処理水が排水されている。天竜川は河川水位が高く、安定した排水が困難なことなどから、1995年以後、図-8に示すように馬込川まで海岸堤防に沿った暗渠で輸送して排水することにされたものである。暗渠の放流渠は一辺1.6mの矩形断面ボックスカルバートであり、ヘッド差0.72mで最大約 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{日}$ の処理水を輸送できる。侵食の激しい中田島砂丘前面には今後年間 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ の養浜が計画されているが(宇多ら, 2006)、下水処理水放流渠を用いて土砂を輸送できれば、環境負荷が小さく持続可能な侵食対策となる。

管路内を開水路で水が流れるものとし、摩擦速度から掃流限界粒径を求めたところ、限界粒径は1.6mmとなり、現地海浜砂は十分掃流可能であることが確かめられた。さらに流速は対数則、浮遊砂濃度はRouseの平衡分布に従うとして輸送可能な土砂量を試算した。底面に砂層が発生する状態を限界状態と考え、その状態での土砂輸送量を輸送可能最大土砂量とした。基準点濃度 C_a は、シートフローに対するHerrmann・Madsen(2007)の提案式を見習い、基準点高さ(粒径の7倍)の濃度とし、次式で与えた。

$$C_a = 0.0022 \times \left(\frac{\Psi}{\Psi_c} - 1.0 \right) \quad (1)$$

ここで、 Ψ はシールズ数、 Ψ_c は限界シールズ数である。輸送する土砂の粒径としては、やや粗めの0.6mmと考えることとし、現行のヘッド差0.72mで試算したところ、地盤体積換算で $1.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{年}$ 程度の土砂輸送量となった。管渠の呑み口を浄化センターの地盤高である5mまで持ち上げた場合には $9.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{年}$ 程度の土砂輸送を実現できることがわかった。このときの基準点濃度 C_a は0.045であった。継続的な養浜を実現する持続的な対策として

今後詳細かつ具体的な検討を進める必要がある。

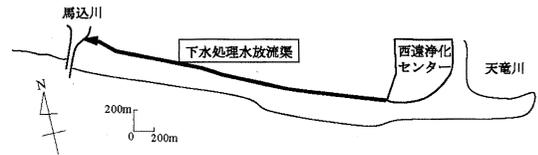


図-8 天竜川河口と馬込川をつなぐ放流管渠

6. おわりに

- (1) 伊能大図以後の地形図分析より、馬込川河口周辺の海岸線は、過去200年間に約300m前進し、最近20年間に約150m後退したことがわかった。当該地域の海岸地形は沿岸漂砂量の変動により大きく変動することが確認された。
- (2) 着色砂の追跡より、西向きの沿岸漂砂が卓越するとともに、構造物による漂砂の捕捉効果が高いこと、導流堤水路内には高波による越波により土砂が侵入するもの水路から沖へ流出する傾向が強いことが確認された。
- (3) 下水道処理水排水管を利用して沿岸漂砂の不足を補う持続的な土砂輸送を実現する方策を提案した。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費重要課題解決型研究「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」の研究成果の一部である。集中観測の実施には浜松市、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。

参考文献

- 宇多高明・石井 隆・内田光一・甲賀 肇・影山安秀・古池 綱・石川仁憲 (2006)：遠州灘海岸における長期的海浜変形予測と養浜の効果検討，海岸工学論文集，第53巻，pp. 666-670.
- 財団法人日本地図センター(2006)：伊能大図総覧，河出書房新社，512 p.
- 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. 64，No.3，pp. 192-201.
- 清水英範・布施孝志・森地 茂 (1997)：古地図の幾何補正に関する研究，土木学会論文集，第625巻，pp. 89-98.
- 高橋元氣・田中 仁・松富英夫・泉 典洋(2006)：古地図を用いた長期海浜変形の評価，海洋開発論文集，第22巻，pp.643-648.
- 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場と堆砂特性，海洋開発論文集，第24巻，pp. 1279-1284
- Herrmann, M.J. and O.S. Madsen (2007), Effect of stratification due to suspended sand on velocity and concentration distribution in unidirectional flows, J. Geophys. Res., Vol. 112, C02006.