

天竜川河口部における砂礫の選択的移動特性と砂州の変形機構

Selective Movements of Sand and Gravels and Resulting Morphology Change around the Tenryu River Mouth

田島芳満¹・岡崎円香²・劉海江³・高川智博⁴・佐藤慎司⁵

Yoshimitsu TAJIMA, Madoka OKAZAKI, Haijiang LIU, Tomohiro TAKAGAWA and Shinji SATO

This study investigates physical mechanisms of eastward extension of the sand spit at the Tenryu River mouth. Shoreline profiles of the sand spit, extracted from successive still images recorded by a field camera, were first compared with hydrodynamic characteristics such as waves, river flows and tides. Color sand and gravels were used as tracers to capture the characteristic movement of sediments on and around the sand spit. Tracers placed in the swash zone around the middle of the sand spit moved westward while the ones around the east end of the spit moved eastward. Clear difference between sand and gravels was also observed especially in their moving directions. Image and numerical analyses were finally carried out to investigate the hydrodynamic characteristics that caused such characteristic movements of sediments.

1. はじめに

河口部で発達する砂州地形は、周辺の波、流れ場や、それに基づく砂礫の移動特性を規定するが、同時に複雑かつ活発な砂礫の移動は、河口砂州地形を絶え間なく変形させる。このように相互干渉しながら動的に変容する河口砂州周辺環境の特性は、水中設置型の計測機器による直接的観測が困難であり、現地実測データに基づく実証的な知見の蓄積が十分に進んでいるとは言い難い。

このような厳しい制約条件の下、河口域の観測には航空写真やビデオ画像、平常時の深浅測量データが用いられることが多い(例えば、佐々木ら, 1987; 真野ら, 1995; 宇多ら, 1994; 田島ら, 2008)。これらの研究により、出水時にフラッシュした河口砂州は、平常波浪時に砂州先端部を延伸するように回復することや、その変形特性は河口テラス形状と強い相関を持つことなどが報告されているが、実際の波、流れ、漂砂移動と河口砂州地形変化との関係について、詳細な検討はなされていない。そこで本研究では、天竜川河口砂州を対象とし、トレーサー追跡を含む高頻度観測に基づき、砂礫の移動特性と砂州の変形機構の解明を試みる。

2. 現地観測の概要

現地調査は天竜川河口砂州が大きく変形した2009年7月から10月を対象期間とした。図-1に天竜川河口域と調

査の概要を整理する。まず砂州地形の変形特性を把握する目的で、砂州先端部や2007年台風4号来襲時における決壊部(田島ら, 2008)を中心に合計7回の地形計測を実施した。さらに、図に示した3地点に定点観測カメラを、1地点にX-band radarを設置し、刻々と変化する天竜川河口周辺地形や周辺の波・流れ場を、それぞれ1.2秒、2秒間隔で、連続観測した。

また、7月28日には図に示した砂州上の2地点に、着色砂(粒径0.2~0.4mm)および市販の風水砂利(粒径1~3cm)をそれぞれ250kgずつ投入し、その後の移動状況を以下の方法で追跡した。まず着色砂については、表層約1cmの砂を無作為に約100gずつ採取し、上山ら(2009)と同様の手法を用いて、サンプル中に含まれる着色砂の含有率を推定した。この際、着色砂の計数には齊藤ら(2010)が改良を加えた自動計数装置を用いた。また採取地点について、沿岸部では投入地点を中心に汀線に沿って、採取時の波の最大遡上位置から海側に約1m入った地点を対象とした。一方、先端部では海浜部を10m四方の領域に分割した格子地点でサンプリングを行った。次にトレーサー礫については、発見地点の位置座標を記録するとともに、表層部の写真撮影を行い、単位

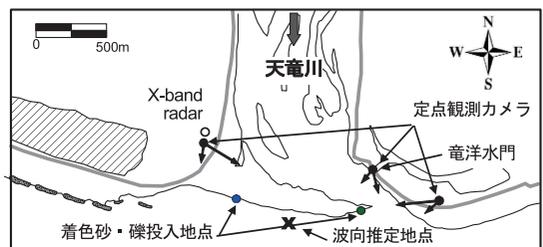


図-1 天竜川河口域と調査概要

- | | | | |
|--------|-------|----------|---------------|
| 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 |
| 2 | | (株)電通 | |
| 3 正会員 | Ph.D. | 東京大学特任助教 | 同上 |
| 4 正会員 | 博(理) | 東京大学助教 | 同上 |
| 5 フェロー | 工博 | 東京大学教授 | 同上 |

面積あたりのトレーサー礫の個数を数えた。

観測期間中の波・流れ場については、画像観測データの分析に加え、鹿島地点（河口から約25km上流）における水位データに基づく河川流量、図-1に示した竜洋水門における潮位観測データ、河口沖水深40m地点に位置する竜洋波浪観測点での波浪データをそれぞれ分析した。

3. 砂州の変形

(1) 変形特性の定量化

GPSを用いて計測した河口砂州全体の水際線位置の比較を図-2に示す。図に見られるように、砂州は、主に海側および先端部で顕著に変形している。ただし、10月には砂州の陸側で水際線位置が大きく北側に移動しているが、これは台風18号の通過に伴い来襲した有義波高10m強の高波浪によるものである（高川ら、2010）。また8月16日から9月24日にかけては、汀線が砂州西側で沖向きに前進、東側で陸向きに後退しており、この期間には西向き漂砂移動が卓越的であったことが推察される。

次に、特に変形が著しかった砂州先端部に着目し、定点観測画像に基づき先端部平面地形の時間変化をより高頻度に追跡した。平面地形の抽出に用いた画像は、竜洋水門での潮位がTP+0.0mであったときのもののみを用い、砂州先端部周辺での合計8点の基準点座標に基づき、原画像を座標変換して砂州先端部を上空から見た平面画像を作成した（図-3）。図には原画像（スナップ写真）とその変換画像の例を示すが、水際線の平均位置を抽出する際には、同じ潮位条件時（TP+0.0m）における1分間の平均画像を用いた。このようにして得られた107組の画像に対して水際線位置を抽出し、その一部を比較したものを図-4に示す。図中の数字は撮影日を示しており（例えば1002は10月2日）、水際線位置が日スケールで激しく変動しているのが分かる。

次に、砂州の変形と外力条件との関係を分析するため、砂州先端部を図-4に示した東西および南北の測線で、それぞれ2領域に分割し、各々の領域における陸域面積を算定した。得られた陸域面積と外力場の経時変化を図-5に比較する。図の波向は、河口砂州の変形に直接影響をおよぼす砂州前面地点（図-1）における値として、X-band radar画像（図-6）から波峰線追跡法に基づき推定した。図-6に示した時刻における波向の推定値はS12°Wとなっており、妥当な推定結果が得られていると考えられる。

(2) 砂州変形特性と外力場との関係

図-2～図-6の比較をもとに、砂州先端部の地形変化と外力場との関係を、時間経過とともに整理する。

まず、対象期間中に唯一有意な出水が見られた7月27日以降の数日間では、砂州先端部の主に北東部が削られており、波浪よりも河川流による影響が卓越的であった

ことが推察される。しかしながら、その後の有義波高2～3m程度の高波浪時と比べても、砂州面積の変化量は相対的に小さいことが分かる。

次に8月9日には台風9号に伴いやや西寄りからの高波浪が来襲し、領域SおよびNで、それぞれ大きく減少、増加した。これに対して領域Eにおける増加量は小さいことから、高波浪時には沿岸漂砂よりも、砂州上の越波に伴う北向きの漂砂移動の方が卓越的であったことが推察される。また、その後はしばらく低波浪が続き、8月15日には砂州先端部の南側に形成されていた浅瀬が陸上部に現れて領域Sを増大させた。この浅瀬の東西位置を境に先端部の南北への移動状況が著しく変化することから、浅瀬出現部よりも西側では、高波浪時にも越波が起こらず、高波浪によって沖側に運ばれた砂がその後1週間程度の低波浪によって汀線際に戻されたために、浅瀬が形成されたと考えられる。

また8月中頃から9月にかけては、東寄りからの来襲波が卓越し、図-2に見られた砂州西側における汀線の大幅な前進と符合する。その一方で、領域Eは比較的安定であり、週1回の頻度で来襲した有義波高2m程度の高波浪よりも、大潮の時期と連動して面積が周期的に変化しているように見える。これは、領域Eの標高が低く、越波による影響を強く受けたためであると推察される。

低波浪が長く続いた9月20日以降は、北側に押し込まれた砂州先端部が徐々に延伸し、領域NやEで継続的な増加が見られた。またこの期間はやや西寄りからの波が卓越し、他の低波浪期間と比べても領域Eの増大速度が大きかった。

最後に10月7日の台風18号の来襲により、有義波高が10mを超える高波浪が来襲し、砂州のほぼ全域で越波がみられた（高川ら、2010）。台風前後の深淺測量データから推定した北向き土砂移動量の沿岸方向分布は、砂州の標高と強い相関を有しており、このことから、高波浪時における北向きの土砂移動は、越波によるものであることが分かる。

4. 着色砂礫の追跡調査による移動特性の検証

次に7月28日に投入した着色砂および礫の追跡調査の結果を分析し、既に整理した外力場や砂州の変形特性との関係を考察する。

砂州中央部および先端部の遡上帯に投入した着色砂および礫の追跡結果を、それぞれ図-7および図-8に示す。図中の着色砂および礫の量はそれぞれサンプル中の重量含有率（ppm）、単位面積あたりの個数で表している。また図-8に示した様に、着色砂は一点に投入したのに対し、砂州先端部の礫は、図の破線に沿って均等に投入した。

図-7見られるように、砂州中央部に投入した着色砂は

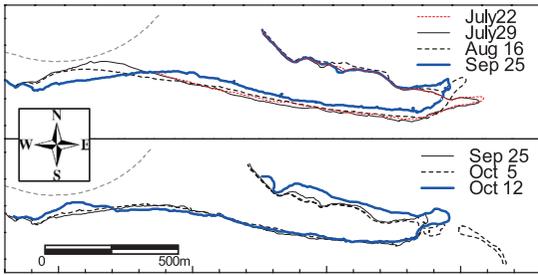


図-2 河口砂州形状の時間変化

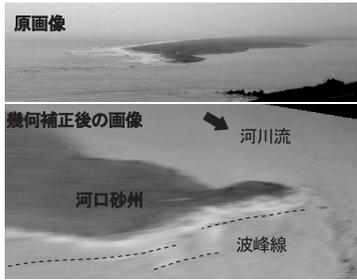


図-3 定点観測カメラによる静止画像と座標変換後の画像

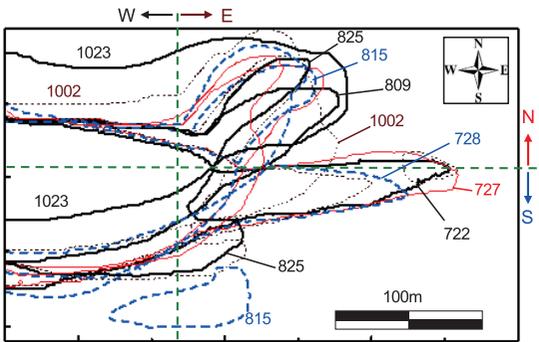


図-4 砂州先端部の変形と陸域面積の算定領域

全て西向きに移動し、その移動距離は10時以降に急激に拡大している。着色砂を投入した7時が上げ潮で潮位 TP+0.1mであったのに対し、10時から11時にかけて満潮 (TP+0.4m) となったことから、遡上帯に投入した着色砂の移動量が潮位による影響を強く受けていることが分かる。一方、礫は砂に比べて沿岸方向への移動量が小さかったが、その移動方向は全て西向きであった。7月28日の X-band radarによる砂州前面での波向きは真南からやや東寄りであり、また竜洋波浪観測点における平均波向の観測データはS12°Eであった。また砂州中央部の汀線は東西方向から時計周りに約17度傾いており、このことから、着色砂および礫の西向き移動は外力場や、図-2で見られた西向き漂砂による砂州の汀線変化とも整合している。

一方、砂州先端部における着色砂および礫は、北東方向に移動している。砂州東端部から20mほどの領域は標

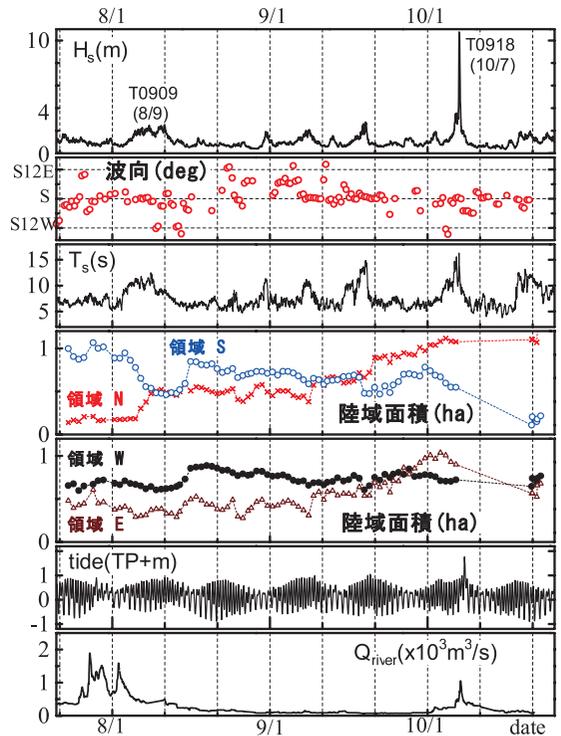


図-5 有義波高、波向 (砂州前面)、有義波周期、砂州先端部領域 (N,S,E,W) における陸域面積、潮位、河川流量の経時変化



図-6 X-band radarによる観測画像例 (8月8日2時)

高が低く、越波や潮汐による冠水が頻繁にあった地点で、サンプリングができなかった領域である。砂を採取して分析したが着色砂が含まれていなかった地点については、図-8中に黒丸で示している。

また砂と礫の移動状況の違いに着目すると、28日22時の満潮 (TP+0.7m) を経過した後の29日13時において、礫は着色砂に比べてより北側に運ばれている様に見える。これについては、次節の外力場の分析で考察を加える。

以上に見られたように、調査実施日はやや東よりの来襲波が卓越していたにも関わらず、砂州中央部では西向き、先端部では東向きと、砂礫の移動方向が異なっていたことが明らかとなった。また砂州中央部では前浜勾配が大きく、礫は海側へと流失する傾向が見られたのに対し、先端部では陸側 (北側) へと移動する傾向が見

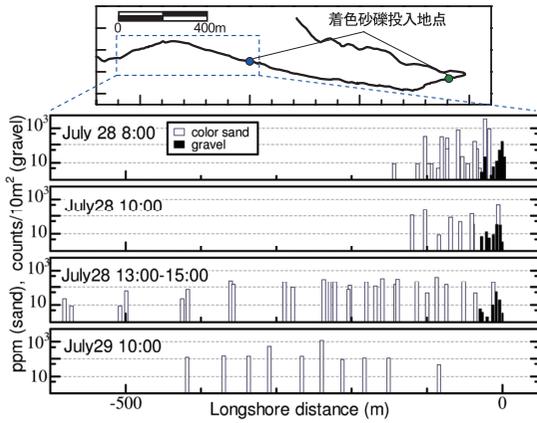


図-7 砂州中央部における着色砂・礫の追跡結果

られた。砂州先端部における砂礫の北向きの移動傾向は、高波浪時における砂州先端部の北側での堆積が、河川側からの土砂供給によるものではなく、越波に伴い砂州を越えて運ばれた海域からの土砂供給によるものであると演繹した前節の砂州先端部の変形特性の考察と符合する。

5. 河口砂州周辺における外力場の特性

砂州周辺部における砂礫の移動特性と砂州の変形特性を規定する波・流れ場について、画像データと数値解析に基づき分析する。本研究で着目する水理現象としては、河口域における波と流れの干渉や碎波、砂州上への遡上などが挙げられる。これらの水理現象を同時に効率良く再現可能な数値モデルとして、透水層を考慮した修正ブシネスク方程式に碎波減衰モデルを導入し、現地地形条件や潜堤周辺などの複雑な計算条件下での適用性も確認されている田島ら（2006）のモデルを用いた。計算領域は天竜川河口域を含む南北に1.25km、東西に2.5kmの範囲とした。地形条件は国土交通省による8月の詳細深浅測量データに基づき5m四方の正方形格子データを作成して用いた。入射波条件は、着色砂追跡調査時の7月28日の10時を想定し、竜洋波浪観測所における同時刻の波浪条件（有義波高80cm，周期7.8s，波向S12°E）を与えた。入射波特性は、有義値をそのまま用いた規則波と、周波数スペクトルをエネルギー等分割して算定した個々波を、ランダムに設定した位相差で重ね合わせて作成した単一方向不規則波の両者とした。また河川流については上流側境界で流量を与えて導入したが、波・流れ干渉による影響を検証するため、流量を変化させた複数の計算を実施した。

(1) 砂州先端部周辺の越波

15分間の連続画像データに基づき、次の手順で河口砂州先端部における浸水率を算定した。まず原画像における砂州先端周辺の陸・水域のRGB値を確認し、試行錯誤

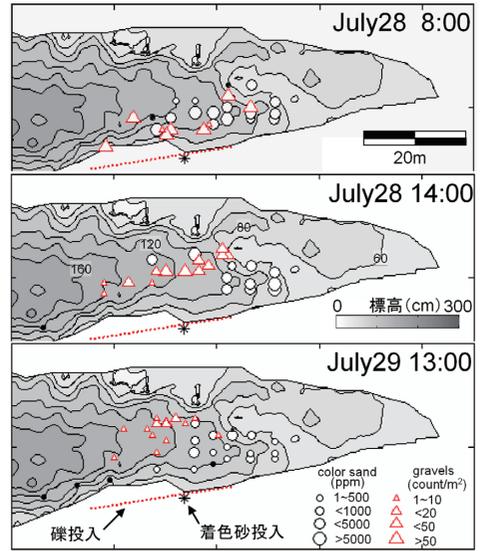


図-8 砂州先端部における着色砂・礫の追跡結果

により決定した閾値に基づき画素情報を二値化した。次に得られた画像に座標変換を施し、得られた連続静止画像から任意対象地点での浸水時間を数え、最後に作成した連続画像の全時間で除して浸水率を算定した。このようにして推定した28日7時および10時における浸水率の平面分布を図-9に示す。また図には、10時の条件において、規則波および単一方向不規則波を入射させて計算した浸水率も示した。

潮位の変化に伴い、先端部周辺の浸水領域は大きく変化し、特に緩勾配な海岸線前面および先端部で遡上域が拡大していることが分かる。また数値計算では、入射波の不規則性を考慮することによって、このような砂州先端部での遡上域の広がりや定性的に再現できている。さらに、砂州先端部における砂礫の追跡調査では、礫の方がより北向きに移動する傾向が見られたが、これは着色砂が常時移動するのに対して、礫は時折来襲する比較的周期の長い大きな波が砂州上を越波したときのみに移動したと考えれば、来襲波の不規則性による影響のひとつとして、ここで示した数値解析結果とも整合する。

(2) 河口域周辺の波向

規則波を入射させ、河川流量をゼロまたは竜洋水門前面の流速計測結果（1.4m/s）に整合させた280m³/sとした場合、また同じ流量で単一不規則波を入射させた場合における波浪変形計算結果の瞬間波形を図-10に比較する。また図には、計算に用いた計測地形の等深線も合わせて示した。図に見られるように、河川流の影響により、砂州先端部の沖側で波が集中し、河口砂州前面における波峰線や波高の分布に有意な影響を及ぼしていることが分かる。また不規則波を入射させた計算結果では、河口テ

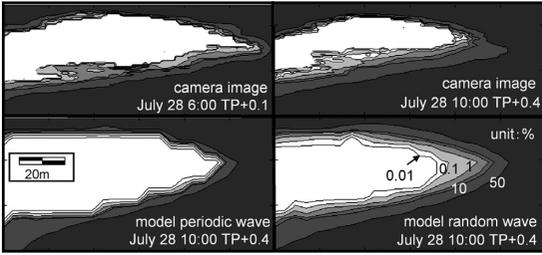


図-9 連続画像およびモデルによる浸水率 (%) の比較

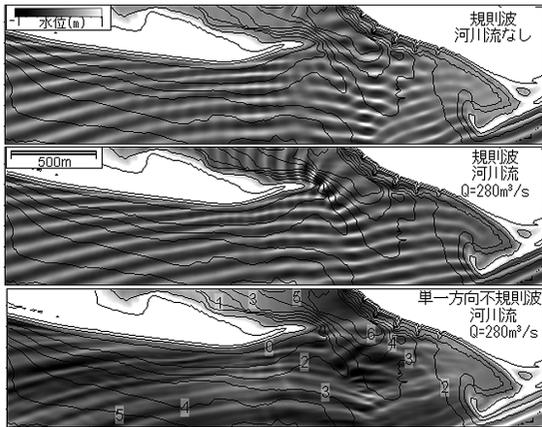


図-10 モデルによる河口域周辺での瞬間波形の比較

ラス部における屈折変形がより顕著に表れている。

次に時々刻々の流速の計算結果から、水深1m地点における平均波向を推定し、その沿岸方向分布を比較した(図-11(a))。図の横軸は砂州東端部(開口部)からの距離であり、Pは規則波、Rは不規則波を入射させた時、数字0~2は、河川流量を $Q=0, 140, 280\text{m}^3/\text{s}$ とした時の計算結果を示す。また太破線は、同時刻の座標変換画像(図-3)における波峰線の分布から推定した波向である。図-11(b)は波向と同定義の汀線法線方向、(c)は(a)と(b)の差分であり、正の値は法線に対して波向が反時計回り方向に傾き、結果として西向きの漂砂移動を引き起こす。図に見られるように、波向は先端部($x=0\text{m}$)から西に向かって、約100mの範囲で急激に増加し、ピークに達した後、西に向かってテラス地形の影響によって徐々に減少している。数値モデルでは、画像に見られたこのような定性的傾向を妥当に再現している。また河口付近($0 < x < 500\text{m}$)では河川流によって波向がより南寄りへと変化し、河川流が先端部の土砂の東向き移動特性を助長していることが分かる。また不規則波を入射させた条件では、河川流による影響範囲が拡大している。

一方で、東西方向の汀線角度の変化は波向に比べても大きく、両者の差(図-11(c))を比較すると、砂州先端部における東向きの土砂移動特性には、河川流による波

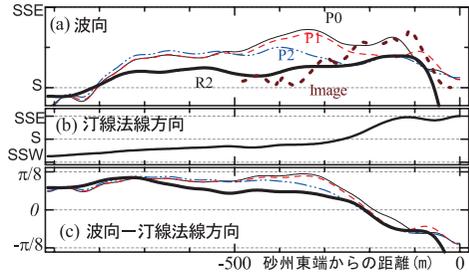


図-11 モデルおよび画像による砂州前面での波向分布

向の変化よりも越波に伴う砂州先端部の北向移動とその後の河川流の作用による東向移動の方が、より卓越的に寄与していることが推察される。

6. おわりに

天竜川河口砂州を対象とし、高頻度観測と着色砂礫の追跡調査に基づき、河口砂州先端部の延伸過程の解明を試みた。標高の低い砂州先端部では越波による陸向きの漂砂移動が卓越し、結果として生じる砂州先端形状の変化や河川流による影響は、来襲波向に寄らず先端部の延伸過程を助長していることなどが明らかとなった。

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り、国土交通省浜松河川国道事務所および静岡県より貴重なデータをご提供いただいた、記して深甚な謝意を表す。

参考文献

上山 聡・牛 小静・和田麻美・劉 海江・高川智博・田島芳満・佐藤慎司 (2009): 波浪の侵入が卓越する河口エスチュアリーにおける波・流れ場と土砂移動, 土木学会論文集 (海岸工学), B2-65, No.1, pp.456-460.

宇多高明・鈴木忠彦・大石守伸・山本雅彦・大谷靖郎 (1994): 天竜川河口砂州の伸長に伴う河岸侵食と海浜変形, 海工論文集, 第41巻, pp.481-485.

齋藤晴久・坂本 繁・鈴木 誠・尼崎貴大・加藤 茂・青木伸一・上山 聡・佐藤慎司 (2010): 土砂動態の高頻度モニタリングのための着色砂分析システムの開発, 土木学会論文集 (海岸工学), B2, (印刷中).

佐々木隆士・宇多高明・刀襦 賢・菅原信雄・海野 仁 (1987): 洪水流による河口砂州のフラッシュ観測, 第34回海工論文集, pp.327-331.

高川智博・斉藤正一郎・上山 聡・田島芳満・劉 海江・武若 聡・佐藤慎司 (2010): 台風0918号時の高波浪による天竜川河口砂州周辺の土砂移動実態の解明, 土木学会論文集 (海岸工学), (印刷中).

田島芳満・佐藤慎司・藤原弘和 (2006): Hurricane KatrinaによるBiloxi周辺の高潮被害分布とその外力特性の検証, 海工論文集, 第53巻, pp.406-410.

田島芳満・高川智博・浅野泰志・佐藤慎司・武若 聡 (2008): 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, pp.646-650.

真野 明・林 吉近・沢本正樹 (1995): 阿武隈川河口テラスと砂州の干渉作用, 海工論文集, 第42巻, pp.591-595.