

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

Dynamic Morphology Changes around the Tenryu River Mouth due to Two Different Typhoons

田島芳満¹・高川智博²・浅野泰史³・佐藤慎司⁴・武若聡⁵

Yoshimitsu TAJIMA, Tomohiro TAKAGAWA, Taishi ASANO, Shinji SATO and Satoshi TAKEWAKA

In the summer of 2007, typhoons T0704 and T0709 hit the Pacific Coast of Japan and caused significant topography change around the Tenryu River mouth. While the wave heights generated by these two typhoons were similar, resulting topography changes were clearly different, i.e., T0704 collapsed the sand bar and widened the cross-sectional flow area of the river mouth while T0709 let the sand bar recovered by filling sands and gravels in the collapsed area. This paper explores physical mechanisms of observed characteristic topography changes during these two typhoons based on uniquely obtained new data sets such as images of X-band radar, rectified camera images, core samples at the collapsed sand bar, cross-sectional distributions of bed level and recorded waves and currents.

1. はじめに

砂州を含む河口域周辺地形は、周辺の波・流れ場や、それに伴う土砂輸送特性を規定している。このため、河口から供給される土砂の周辺沿岸域への分配を予想し、必要に応じて漂砂制御を施しながら持続可能な河口環境を具現化するためには、刻々と変化する河口周辺地形の影響を勘案した土砂輸送特性の把握が重要となる。宇多ら(1994)は、複数年の航空写真や深浅測量データに基づき、年スケールでの河口砂州周辺地形の変形特性を分析し、多くの有益な示唆を与えている。しかしながら、特に土砂の排出・輸送特性に大きな影響を与える出水直後の短期的な地形変化については、高頻度でのデータ取得が困難なこともあり、多くの知見が得られていない。

著者らは、天竜川河口に定点観測カメラとXバンドレーダを設置し、2007年7月から9月までの間に来襲した台風4号および9号による大規模な河口砂州周辺地形変形の観測に成功した。台風4号は、鹿島観測地点におけるピーク流量では戦後6番目の規模となる約8,700m³/sの出水を引き起こし、河口砂州の一部を決壊させたのに対し、台風9号は4号と同等の高波浪を引き起こしたものの、河口砂州地形をむしろ回復させる傾向が見られた。そこで本研究では、特性が異なるこれら2つの台風の来襲時期を含む、約2ヶ月間における河口砂州周辺地形の大変形に着目し、様々な観測データに基づき河口砂州周辺地形の比較的短期的な大規模変形機構を解明することを目的とする。

2. 天竜川河口における観測の概要

2007年台風4号および9号の経路を図-1に、天竜川河口域周辺に設置した観測機器の配置を図-2に整理する。2つの台風の規模は同程度であったが、その経路は大きく異なり、外力場とそれに伴う河口域の地形変化には特徴的な違いが見られた。本研究ではこれらの特徴を明らかにするために、まず、河口域周辺の水位や波浪場、河川流量などの外力場の実測データを既設の観測機器から入手して整理した。次に、図-2に黒丸で示した3地点に定点観測カメラを2台ずつ、それぞれ矢印の方向に向けて設置し、河口部および沿岸域を1.2秒間隔の連続静止画

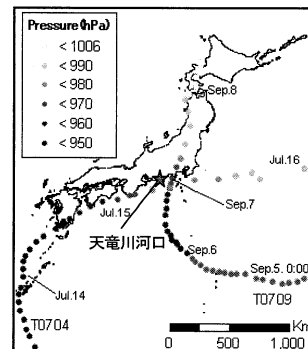


図-1 台風4号(T0704)および9号(T0709)の経路

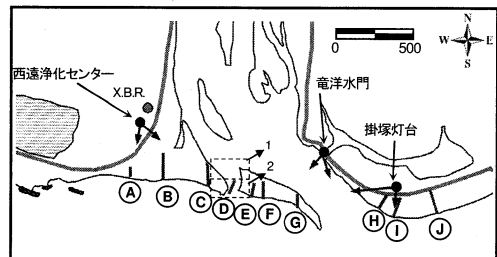


図-2 天竜川河口周辺と観測機器設置位置の概要

1 正 会 員	Ph.D.	東京大学准教授 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻
2 正 会 員	博(理)	東京大学助教 同上
3		東京大学修士課程学生 同上
4 フェロー	工博	工博 東京大学教授 同上
5 正 会 員	工博	筑波大学准教授 大学院システム情報 工学研究科

像で記録した。また右岸側にはXバンドレーダを設置し、地形や波浪場を俯瞰する河口周辺領域を連続観測した(武若ら, 2008)。さらに台風4号来襲後には、曳航式超音波ドップラー流速計(ADP)を用いて河口域周辺の水深および流速分布を計測した。また、地形測量を複数回実施し、図-2に示した10本の代表測線上の標高分布を計測した。最後に、砂州決壊後に自然に埋め戻された地点において、ジオスライサーを用いて柱状試料を採取した。

3. 観測結果および取得データの整理

本節ではまず、様々な観測データの取得・解析方法とその結果を整理し、次節でこれらのデータを有機的に組みあわせた分析・考察を加える。

(1) 画像データによる平面地形変化の分析

Xバンドレーダは広領域を捉えるのに適しているが、解像度や色彩情報などの情報量がカメラ画像に劣る。一方、カメラ画像は座標変換により撮影対象の平面形状や実座標位置の推定も可能であるが、特にカメラアングルが小さい場合は遠方での座標推定精度に限界がある。本研究では、両者の画像を組み合わせ、比較的広い領域における平面形状を高精度に推定する手法の構築を試みた。

定点観測カメラにより得られた複数のデジタル画像を実座標系に変換し、Xバンドレーダによる画像と結合して作成した平面図を図-3に示す。ここで、カメラ画像の座標変換にはHollandら(1997)と同様の手法を用いたが、カメラ遠方での座標推定精度を向上させるために、以下に整理する手法を新たに構築して用いた。

まず、Holland(1997)によれば、画像座標 u_i ($i=1,2$)と実座標 x_j ($j=1,2,3$)の関係は次式で表される。

$$u_{ij} = \lambda_i (u_i - u_{0i}) = -f \frac{m_{ij} (x_j - x_{cj})}{m_{3j} (x_j - x_{cj})} \quad (1)$$

ここで画像座標 u_i 方向のレンズ歪み λ_i や画像中心 u_{0i}

はレンズ固有のパラメタであり、ここでは推定対象外とする。また係数 m_{ij} や m_{3j} はカメラの姿勢を表す3つの角度 ϕ_k ($k=1,2,3$)の関数、 x_{cj} はカメラ設置位置であり、右辺は j に対する総和規約に従う。以上より、一般化した画像座標 u_{*i} は、 x_{*j} ($j=1,2,3$)、 ϕ_k ($k=1,2,3$)、 f の7つの変数をパラメタとする関数で表される。Hollandら(1997)は、(1)式をTaylor展開して得られる次式に基づき、非線形最小自乗法を用いてパラメタの最適値を推定している。

$$\Delta u_{*i} = \frac{\partial u_{*i}}{\partial x_{*j}} \Delta x_{*j} + \frac{\partial u_{*i}}{\partial \phi_k} \Delta \phi_k + \frac{\partial u_{*i}}{\partial f} \Delta f \quad (2)$$

すなわち、パラメタそれぞれの予測値に対して右辺の偏微分項と u_{*i} の予測値を計算し、既知の実際の値との差分から Δu_{*i} を求め、最後に Δx_{*j} 、 $\Delta \phi_k$ などのパラメタ修正量が右辺で求められる。パラメタは7つあるので、基準点(実座標と画像座標との対応が既知の点)が4つあれば、 $i=1,2$ に対して合計8本の方程式(2)が求まり、最小自乗法により最適なパラメタ修正量が計算できる。ここで基準点の決定が重要となるが、カメラから遠方の基準点では、実座標の変化に対する画像座標の変化量が小さく、式(2)のまま最小自乗法を用いると、遠方ほど実座標の推定精度が過小に見積もられることになる。そこで本研究では、次式で定義する重み関数 W_i を式(2)の両辺に乗じてから最小自乗法を用いることにより、各基準点のカメラから距離に伴う重みの違いの除去を試みた。この重み関数は、前述した実座標の変化に対応する画像座標の変化量の逆数であり、カメラから遠い点ほど重みが大きくなる。

$$W_i = \left((\partial u_i / \partial x_1)^2 + (\partial u_i / \partial x_2)^2 + (\partial u_i / \partial x_3)^2 \right)^{-1/2} \quad (3)$$

図-4に、重み関数を導入した場合としない場合における砂州水際線位置の推定精度を比較する。図の白い実

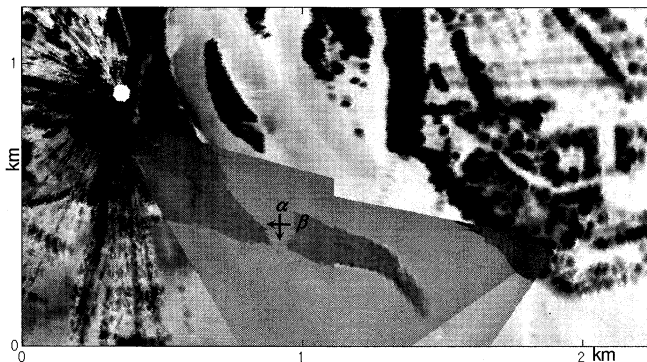


図-3 カメラ画像とXバンドレーダ画像の重ね合わせ (矢印は図-7の断面水深データの測線)

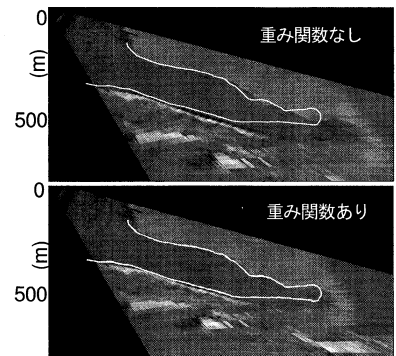


図-4 重み関数の有無による座標変換精度の違いの比較 (白線はGPSによる計測水際線位置)

線は、画像撮影時に GPS を用いて計測した水際線位置を示している。図に見られるように、重み関数を導入することにより、特にカメラから遠い砂州先端付近における水際線位置の推定精度が向上していることが分かる。以上の手法を用い、台風来襲前後で潮位が TP+0m であった時刻を対象に河口周辺域の水際線位置を抽出した(図-5)。図に見られるように砂州は7月の台風4号来襲直後に西側の一部が決壊し、その後大変形を伴いながら9月の台風9号来襲後に決壊部は平面的にはほぼ完全に埋め戻されたことが分かる。

(2) 断面地形の変化

台風4号来襲から1週間後の7月22日、8月10、31日、11月30日に、図-2に示した代表10測線での断面地形計測を実施した(図-6)。ただし測線 D は砂州決壊部であり、埋め戻されて陸域が現れた後の11月30日の断面地形のみを示している。図の横軸は南向きを正とした測線方向の距離を示し、原点は7月22日計測時における汀線位置とした。また、曳航式 ADP による水深および流速の計測結果のうち、決壊部における南北および東西方向の断面地形を図-7に比較する。図の原点および軸方向は図-3に示した。図-7より、決壊部の水深は最大 T.P-2.5m 程度

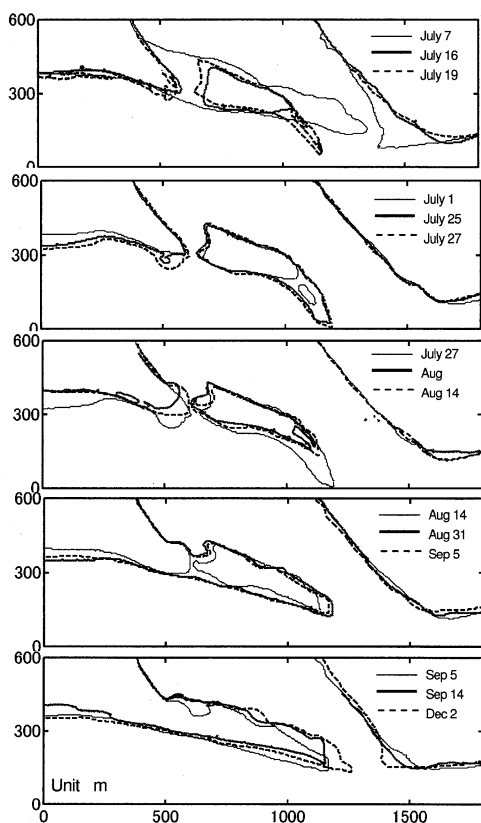


図-5 画像データに基づく河口平面地形の時間変化

であったことが分かる。

(3) 深浅測量による河口周辺の土量変化

2007年2月、8月、10月における河口周辺の詳細地形測量結果から算定した、2月～8月、8月～10月の2期間における水深変化量分布を図-8に示す。図中の太実線はそれぞれ2月、8月における水際線位置を、コンター線は対応期間の水深差を表す。コンターに囲まれた灰色の領域は侵食域を、白い領域は堆積域を表す。また最初のコンター線は $\pm 50\text{cm}$ とし、その後のコンター線は正負ともに1m間隔とした。

(4) 外力場の時間変化

出水時における外力場のデータとして、波浪場は河口沖の水深40m地点に位置する竜洋波浪観測点における観測値を、河口内の水位には竜洋水門前に設置した超音波水位計による計測値を、さらに出水時の河川流量については、河口から約25km上流に位置する鹿島地点での水位データと同地点における H-Q 曲線から推定した値を用い、その時系列変化を図-9に整理した。また外力場の変化に伴う地形変化を定量的に分析するために、図-2

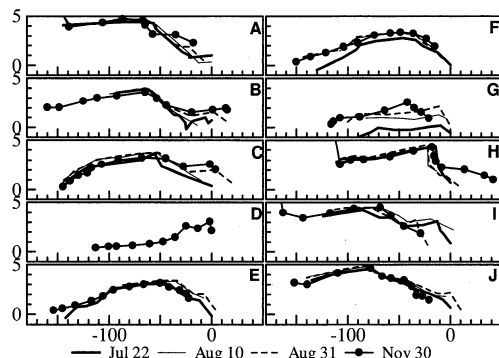


図-6 代表測線上(A-J)の断面地形変化

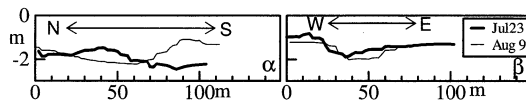


図-7 決壊部測線(α , β)上の断面水深変化

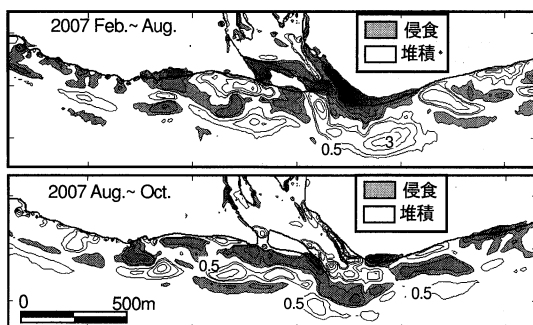


図-8 深浅測量結果に基づく2期間の侵食堆積分布

に示した領域1および2における水位 TP+0m を基準として算定した陸域面積を求め、その時間変化を図-9に示した。図では、台風4号来襲前の7月9日の地形を基準とした陸域面積の変化量を示した。

(5) 砂州決壊・回復部におけるコアサンプリング

砂州回復後の11月2日に、決壊後に埋め戻された図-3の矢印の交点にて、ジオスライサーを用いて定方位の柱状試料を採取した。図-10に抽出した堆積層の南北断面の鉛直構造と、5~30cm 間隔で採取した堆積土砂の粒度分析に基づく、代表粒径の鉛直方向分布を示した。

4. 観測結果の総合的考察

(1) 大規模出水を伴う台風4号時の地形変化

図-9に整理した外力場の時間変化より、対象期間中における大きな出水は台風4号来襲に伴う出水一度のみであったことが分かる。図-5の平面地形の時間変化より、この出水前後の7月7日から16日にかけて開口部の両岸が大きく削られて拡幅し、砂州西側基部が決壊した。特にこの期間では砂州背後側(上流側)の水際線位置が沖方向へ大きく移動し、逆に海側の汀線位置はほとんど変動していない。図-9に示した領域2(砂州の海側)における陸域面積の変化に着目すると、面積が大きく変化するのは出水時のみであり、砂州上流側の地形変化は、河川流による影響が支配的であることが分かる。また、16日と19日の平面地形を比較すると、わずか3日間で砂州先端付近の陸域が沖に張り出すように拡大しており、出水による流出土砂の一部は比較的海岸線近くに堆積し、その後の波の作用により岸付近に再移動したことが推察される。

図-8に示した2月から8月までの侵食堆積分布図に着目すると、特に砂州背後や開口部での侵食が顕著な点や、堆積域が開口部近傍を取り囲む様に分布している点など

で、上述した平面地形の観察結果に基づく考察と整合している。また、河口テラス上の堆積域は開口部から東寄りに偏って分布している。これは、台風来襲時の波向はSSWであり、河口付近では東向きの沿岸流が卓越していたと推察されることと符合する。また、侵食堆積分布より推定した河口から東側での総土砂堆積量は約24万 m^3 であった。この土砂量は河口開口部における侵食量を含んでおらず、天竜川上流域からの土砂排出量は、数万~十数万 m^3 オーダーであったと推測される。佐藤(2008)によれば、過去の同規模出水時には100万 m^3 オーダーの土砂が排出されており、2007年台風4号に伴う出水では、土砂排出量が例外的に少なかったと考えられる。

(2) 出水後平常時における砂州の回復過程

次に台風4号の来襲後から9号の来襲前までの期間における砂州の回復過程に着目する。台風4号来襲以後8月初旬までは河口沖での有義波高が1m程度で、図-5の平面地形では海岸線の前進が顕著に見られ、図-9に示した海岸側の代表領域1における陸域面積の増加が顕著である。次に8月1日から3日にかけては有義波高4m程度の高波浪が来襲し、海岸線が後退して領域1の面積が減少している。次に8月3日から台風9号来襲までは、有義波高が1m強の比較的穏やかな期間が続き、砂州決壊部や海岸線周辺で緩やかな堆積傾向が見られた。これらの地形変化は領域1の面積変化と良く整合しているのに対し、領域2では台風9号が来襲するまで微小な単調増加傾向を示

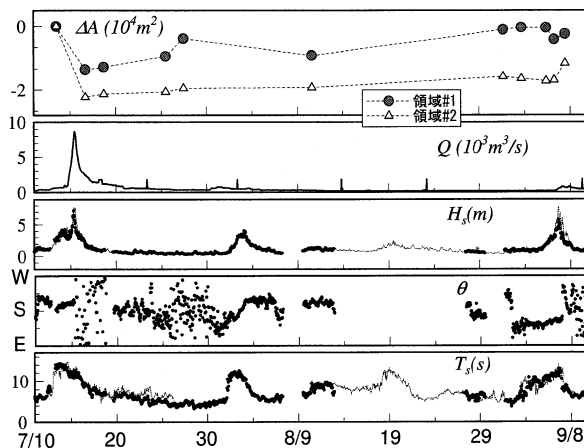


図-9 河口決壊部代表領域1, 2における陸域面積、鹿島地点における河川流量、竜洋波浪観測点における有義波高、波向、および周期の時間変化

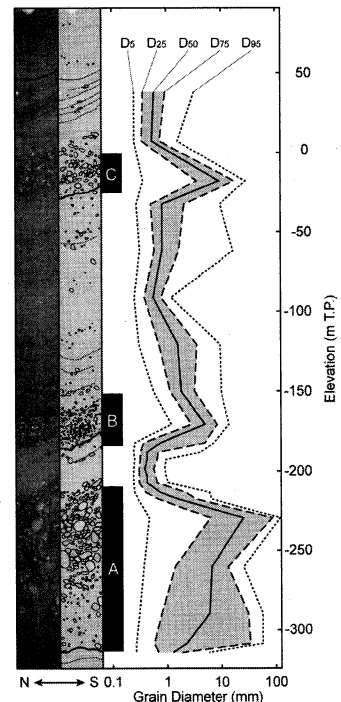


図-10 柱状試料と深度別代表粒径分布

しており、波による影響が比較的小さかったことが推察される。

また図-6に整理した砂州周辺の断面地形変化について、波浪が静穏だった8月10日から31日までの変化に着目すると、決壊部の西側の測線 B, C や決壊部東側直近の E などでは浜の前進が顕著である。同様に図-7に示した決壊部での断面水深分布を見ると、7月23日から8月7にかけて岸沖方向には海側で堆積し、沿岸方向には流路が西へ移動しており、静穏時に海側から土砂が運ばれて決壊部が徐々に埋め戻された様子が見て取れる。これらの観測結果も、砂州の回復過程には波による漂砂移動が卓越的に寄与していたとする推察を支持している。

(3) 台風9号に伴う地形変化

台風9号来襲時には、4号来襲時と同様に有義波高が5 mを超えたものの、河川流量が小さく、波向はSESが卓越していた。これにより、河口周辺の漂砂移動方向は西向きとなり、特に河口左岸側の水際線が9月5日から14日以後にかけて西側に張り出している。また砂州先端部は北方に少し移動しており、先端部の測線 G (図-6) の断面分布は北方へ移動するとともに、全体の標高が高くなっている。また、図-9に示した領域1の面積変化に着目すると、8月初旬の高波浪来襲時と同様に、波高の増大に伴い海岸線が後退して陸域面積が減少しているところが、さらに波高が大きくなると砂州上の越波が起り、砂州決壊部の上流側が埋め戻され、代表領域2の陸域面積が急激に増加している。図-11には台風9号来襲時の9月6日15時の座標変換画像を示すが、越波は決壊部だけでなく砂州先端付近でも起こっており、上述した砂州先端部の地形変化に大きな影響を与えていると考えられる。以上より、台風9号に伴う東寄りからの高波浪は、西向きの沿岸漂砂に加えて砂州上の越波を伴い、砂州背後側の回復を促進させたと考えられる。

(4) 砂州回復部における砂礫の堆積特性

ここまでの観察結果より、砂州の決壊には河川流が、回復には波動運動が卓越的に寄与していることが分かった。ここでは観測した砂州決壊・回復部の柱状試料に基づき、砂礫の堆積構造と外力場との関係を分析する。

図-10に示した柱状試料では、侵食面に始まる上方粗粒化礫層と、その上に重なる上方細粒化を示す粗粒砂層の繰り返し3回認められる(図中、A, B, C)。これらの構造は、高波浪時における陸域面積の減少と対応する侵食面の形成と高波浪による礫の運搬・堆積、および静穏時の砂成分の陸域への輸送によるものと考えられる。3回の繰り返し構造は、決壊後の高波浪来襲回数と一致しており、かつ、来襲波高と礫層中の最大粒径にも相関が認められる。また、柱状試料には北傾斜の葉理が認められた。これは土砂が北向きに移動して堆積層が形成さ

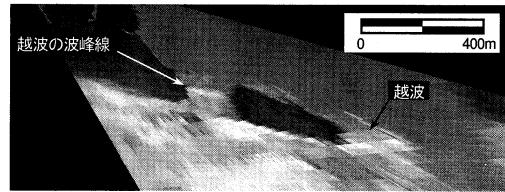


図-11 砂州先端および決壊部の越波状況(9月6日15時)

れたことを示す構造(Allen, 1982)であり、越波が発生していたことを示唆する。さらに、砂州回復後の調査で、埋め戻された部分の表層に、南傾斜の覆瓦構造(Allen, 1982)を示す礫が確認された。これも越波による北向きの流れが作用したことを示している。これらの堆積構造は、砂州の回復過程が波による影響を強く受け、特に砂州上部の堆積が越波による海域からの土砂輸送によるものであるとする上述の推察結果と符合する。

5. おわりに

特性の異なる2つの台風の来襲時とその前後における天竜川河口周辺地形の大規模変形機構について、定点観測カメラやXバンドレーダによる連続画像、水位や波浪などの観測データ、さらに柱状試料などから得られる様々な情報に基づき、総合的な分析を試みた。その結果、砂州の決壊を伴う崩壊過程には、大規模な出水による外力が卓越的に作用し、その後の回復過程には平常波に伴う岸向きの漂砂移動が大きく寄与していることが明らかとなった。また高波浪は砂州上の越波を伴いながら礫を輸送し細砂を侵食することにより、砂州上で顕著に見られる砂礫の層状の堆積構造を形成していることが分かった。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、静岡県より貴重なデータをご提供いただいた。記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 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.
- 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.
- 武若聡・高橋悠・田島芳満・佐藤慎司(2008)：Xバンドレーダによる天竜川河口域の地形と流動の観測，海工論文集，第55巻(印刷中).
- Allen, J.R.L. (1982) : Sedimentary structures: Their character and physical basis, vol. I, Elsevier, 593p.
- Holland, K.T., Holman, R.A., Lippmann, T.C., and Stanley, J.(1997) : Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies, IEEE J. of Ocean. Eng., 22(1), pp.81-92.