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 Sediment Movements due to Storm Waves during Typhoon 0918 around the Tenryu River Mouth

高川智博¹·齋藤正一郎²·上山 聡³·田島芳満⁴·劉 海江⁴·武若 聡⁵·佐藤愼司⁶

Tomohiro TAKAGAWA, Shoichiro SAITO, Satoshi UEYAMA, Yoshimitsu TAJIMA Haijiang LIU, Satoshi TAKEWAKA and Shinji SATO

In October 2009, the category-5 typhoon T0918 hit the Japan Pacific Coast and significant topographic changes occurred along the Enshu-nada coast due to the storm waves. Significant wave height was more than 10m and rapid landward migration of the sand spit of the Tenryu river mouth was observed. Based on X-band radar image analysis, spatial and temporal changes of overtopping waves and corresponding sediment flux across the sand spit were revealed. Spatial concentration of the sediment flux can be explained by the nonlinear relationship between wave height of overtopping waves and corresponding sediment flux across the relationship. Maximum flux was estimated by the model to be 51 m³/m/hour. It happened when high waves and high tide were observed simultaneously.

1. はじめに

河口域に発達する砂州は、河川と海岸の接点であり、 河川から沿岸域への土砂供給に重大な影響を及ぼす.近 年,海岸の侵食に伴って河口テラスが縮小し、砂州が陸 側へ進行することで沿岸域への土砂供給にも影響を及ぼ すことが懸念されている(例えば、宇多ら、1995、和田 ら、2010).

ここでは天竜川河口砂州の顕著な陸側進行が認められ た台風0918号の来襲時の地形変動を対象とし,有義波高 10m強を記録した高波浪による砂州周辺での土砂移動実 態を,来襲後の越波痕跡調査,来襲前後の地形測量,X バンドレーダを用いた波浪場の連続観測をもとに解明す る.特に,顕著な陸向きの土砂移動が認められた砂州上 については,土砂移動のメカニズムを解明し,それを考 慮した土砂移動量のモデル化を行なう.本研究では,越 波時の土砂移動モデルの確立により,荒天時にも適用可 能なXバンドレーダ観測により,河口砂州周辺の土砂移 動の定量的な把握を可能とすることを目的とする.

2. 越波の痕跡調査

台風通過後の2009年10月21日に天竜川河口砂州周辺 域(図-1)を対象として台風時の高波浪の痕跡調査を実 施し,地形測量とともに越波により砂州上に形成された 流路や越波によってなぎ倒された植物の傾倒方向の記録

1	正会員	博(理)	東京大学助教 工学系研究科社会基盤学専攻
2	学生会員		東京大学大学院 同上
3	学生会員		東京大学大学院 同上
4	正会員	Ph.D.	東京大学准教授 同上
5	正会員	工博	筑波大学准教授 システム情報工学研究科
			構造エネルギー工学専攻
6	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

を行った(図-2).海岸線から200mほどの距離にある図-1 の地点Pでは葦類の群落が北向きになぎ倒されていた. これは南向きの河川流とは逆の向きであり,越波により なぎ倒されたものと考えられる.倒れた葦の根元には厚 さ30cmほど新たに砂が堆積していることが確認され, 砂堆は北向きに開いた扇状の平面分布を示す.このよう な砂堆が,砂州上に沿岸方向に渡って複数認められた. 砂堆上にはなぎ倒された植物に加え,流路跡や障害物削 痕など北向きの流れを示す構造が多数認められ,越波に よる陸向きの土砂移動で形成されたものと考えられる. 特に,2007年の台風9号による出水の際に砂州の一部決 壊した区間で,砂州の天端高が周りと比較して低かった 区間(図-1のB区間)の北側には大量の土砂が堆積して







図-2 越波によりなぎ倒された葦の群落(図-1地点P)



おり,その前面には傾斜がほぼ安息角に等しい堆積地形 が認められた.これは北向きの急激な土砂移動を示すも のである.

3. 台風来襲前後の地形変化

河口周辺で継続的に実施している地形測量の結果と, 国土交通省による台風来襲前後の8,10月の地形測量デ ータの分析を行なった.図-3に示したのは8月から10月 にかけての標高の変化である.砂州の海側で標高が減少, すなわち侵食が生じ,それよりもさらに沖側や砂州の陸 側で堆積が生じている.結果として砂州全体がこの期間 に陸側へ進行したことになる.また,現地調査で認めら れた扇型の砂堆による堆積の様子も認められ,特にB区 間の北側の堆積域ではその特徴が顕著である.

台風来襲前後の8月と10月に国土交通省が計測した地 形データを用いて、双方のデータが得られた領域から護 岸内の陸上部分を除いた2.5×10⁶m²の領域(図-3)につ いて土砂量を分析した. 解析領域の東西は離岸堤群が位 置しており、沿岸漂砂を抑制しているため、出水時に天 竜川から河口域への土砂供給があれば、その影響が解析 領域内の土量変化として現れると考えられる。解析の結 果,この期間の解析領域全体での土砂収支は+3.0× 10³m³であった.これは平均標高にして+1.2mmという変 化に過ぎず,領域内の土量変化は極めて小さかったと言 える、さらに、領域北側の天竜川の河道において、顕著 な地形変化が認められないことも (図-3),河川流による 領域北端付近での土砂移動が限定的であったことを示唆し ている.特にこの期間において顕著な出水や砂州の越波が 生じたのは台風0918号が接近した際のみであり、通常の 波浪作用では土砂移動が生じない砂州の陸側の地形変動 は、ほぼ全てこの台風の影響によるものと考えられる.

台風0918号来襲時の砂州上の越波による北向きの土砂 移動を定量化するため、基準となる断面S-S'を設定した (図-3).この断面は8月の地形データに基づき、砂州の標 高が高い部分を沿岸方向に滑らかにつないだものである. S-S'断面を基準として、これより北側の土砂量の増加分 からS-S'断面の各地点における北向きの土砂通過量を算 定した.ここでは便宜的に、東西方向の土砂移動は無視 することとした.得られた各地点の土砂通過量を図-3に



図-4 砂州の標高変化と北向きの土砂流量の沿岸分布

ベクトルで示した.また図-4には、土砂通過量の沿岸方 向分布とともに、8月と10月の地形データから抽出した 砂州の天端高の沿岸方向分布を示した.比較的標高の低 い区間B,Dで北向きの土砂通過量が大きな値を示し、 土砂輸送が局所的に集中して生じていたことがわかる. そして、S-S'断面を通過した総土砂量は8.2万m³である. また、8月と10月の地形を比較すると砂州の天端高が東 側ほど大きく低下し、砂州先端では1m程度天端高が減 少している.すなわち、砂州は陸側へ進行するとともに 天端高の低い平坦な形状に変化したといえる.

4.Xバンドレーダ観測に基づく越波解析

(1) 観測概要と砂州の陸側移動時刻の特定

Xバンドレーダはアンテナを回転させながらマイクロ 波を海面に向かって照射し、その反射エコーを捉える装 置である.反射エコーは波峰で強く生じることが経験的 に知られており(図-5)、エコーデータを画像表示するこ とで波浪場の状況を知ることができる(武若ほか、2003). 著者らは天竜川河口右岸に位置する西遠浄化センターの 屋上に装置を設置し、2007年から連続観測を行っている. レーダのデータは1024×1024ピクセルの256階調の濃淡 画像データとして保存される(図-5).

本研究では台風0918号が接近した2009年10月7日10 時~8日14時を解析対象とし、毎正時より2秒間隔で得 られた520枚のレーダ画像の分析を行った.まず、1時間 毎に520枚の画像の各画素の輝度値を平均した画像を作 成した.平均画像により、波浪に伴う短周期の水際線の 移動の影響を排し、水際線位置を精度良く特定すること



図-5 Xバンドレーダ画像とライン画像に見られる越波(丸印)



図-6 平均画像から抽出した砂州の移動過程



図-7 天竜川の流量(掛塚地点)と波浪のデータ(竜洋観測所)

ができる(武若ら,2003). 平均画像から読み取った水 際線の位置の例を図-6に示す.このような分析から,砂 州の陸側進行の大部分が8日3時から6時にかけてのわず か3時間という短期間に生じていたことが特定された. これは有義波高10m超の高波浪と高潮位が重なった時刻 と一致する(図-7).

(2) 越波の波高分布と土砂輸送量

レーダ画像から越波状況を抽出するため,各時刻の画 像から岸沖方向の1列の画像を取り出し,横方向に並べ たライン画像(Hasan・Takewaka,2009)を作成した (図-5).図の下部から右斜め上方へ連続する輝度値の高 い部分は波の峰の北向きの進行を示す.多くの波の峰の 連続性が途切れる位置が波の遡上域に相当し,遡上域を 超えてより北側へ連続するものが越波によるものである. このような画像を沿岸方向に,50m間隔に設定した各列 で作成し,毎時の砂州上の越波の回数をカウントした.

越波と土砂輸送量の関係を考察するため、2009年10月 7日午前10時から28時間にわたって各地点で算定した越 波の総数と地点毎の陸向きの土砂流量を比較すると、両 者に顕著な正の相関が認められた(図-8).相関の良い部 分において一波当たりの土砂流量を求めると0.11m³/mで ある.また、砂州の標高が高い西側の地点のデータでは、 越波回数に比して極端に土砂流量が小さくなる傾向が認 められた.特に越波数が少ない領域においては、単純な 回数のみならず、越波の大きさや強度に基づく評価が必 要であると言える.そこで、ここではXバンドレーダ画 像から求めた越波数の時空間変動と波浪や潮位の時系列 データに基づき、時々刻々の各地点における遡上波の到 達高さ及び越波の波高分布の推定を試みた.

遡上波・越波に関係する諸元を図-9に示す. ここでは



遡上高さの扱いを単純化するため、遡上波が砂州を越流 するような場合にも、砂州の天端より上方へ連続的に延 びる仮想的な斜面を設定し、仮想斜面上の遡上高さをも って定義することにした.このような斜面上の波の遡上 高さRは一般に沖波波高H₀などを用いた無次元量R/H₀の 形で整理されることが多い(Hunt, 1959; Holman, 1986). また、波高の確率密度分布は一般にレイリー分布に従う ことから(Longuet-Higgins, 1952), Rもそれに近い分布 形をとるものと考えられる.ここではRの確率密度分布 がレイリー分布に従うものと仮定し、以下の手順で越波 率からRの分布を求めた.ここで越波率P_eは次のように 定義される.

$$P_e = \frac{N_e}{N} \quad \dots \tag{1}$$

ここに、N_eは単位時間当たりの越波数であり、Xバンド レーダの解析から値が得られる.Nは単位時間当たりの 波の数で,波の平均周期の逆数であり、波浪観測データ から求められる.ここで遡上波高の確率密度分布P(R) がレイリー分布に従うとすると以下の関係が成り立つ.

ここで、 \bar{R} はRの平均値を表す.このとき、 P_e は以下の関係を満たす.

$$P_e = \int_{R_{cr}}^{\infty} P(R) dR = \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{R_{cr}}{\overline{R}}\right)^2\right) \quad \dots \dots \dots \dots (3)$$

ここで、R_{cr}は遡上波が砂州の天端へちょうど到達する際



の遡上高さで,砂州の天端高 h_p と平均水位 $\overline{\eta}$ を用いて $R_{cr} = h_p - \overline{\eta}$ と表される.上式の関係からRが求められ, 式1より遡上波高の確率密度分布が得られる.

このようにして原理上 $P_e \geq R_e$ から \overline{R} を求めることがで きるが、 P_e が1に近づくと \overline{R} が無限大に発散するという 問題がある.つまり、ほとんどの波が越波するような状 況ではこの方法で \overline{R} を的確に推定することは困難である. 一方、Xバンドレーダ画像の解析においても越波率が 50%を越えると、遡上域において波浪同士の重なりが増 え、個々の遡上波の区別が困難になることから \overline{R} を P_e で はなく波浪データから算定することにした.対象となる データは、全体の7%程度である.越波率が50%以下の 場合に得られたデータに基づき \overline{R} と沖波波高 H_0 の関係を 示す(図-10).両者には明瞭な相関が認められ、最小二 乗法により以下の経験式を得た.

 $\overline{R} = 0.101 H_0 + 0.514 \cdots (4)$

ここで \bar{R} と H_0 の単位はmである. 越波率が高い場合はこの関係式を用いて \bar{R} を算定した.

次に,越波の波高分布から土砂流量を見積もることを 考える.漂砂量 $_q$ は一般に流速と底面剪断応力の積の形 で表され,底面剪断応力が流速の2乗に比例することか ら,漂砂量は流速の3乗に比例すると考えられる.一方, 遡上波の運動は放物運動で近似されるため(例えば, Shen・Meyer, 1963; Roberts 6, 2010),砂州の天端におけ る越波の流速は、図-9に示した超過遡上高 $_Re = R - R_{cr}$ の 1/2乗に比例するものと考えられ、以下の関係が成り立つ ものと推定される.

 $q \propto R_e^{\frac{3}{2}}$ (5)

そこで漂砂量を次のようにモデル化する

 $q = \kappa R_{e}^{\gamma} \quad \dots \qquad (6)$

ここで、 κ 、 γ は回帰パラメーターであり、 γ は式(5)から1.5に近い値であることが期待される.式(6)より各地点における岸向きの総土砂流量 O_{model} は



図-11 越波による土砂移動モデルと実測値の比較



図-12 越波率および陸向きの土砂流量の時空間変動

と表せられる.地形変化量から求めた各地点の土砂流量 Qと、各地点の Q_{model} との残差二乗和が最小となるようパ ラメーター推定を行ったところ、 κ =0.0911、 γ =1.71が得 られた.これらモデルパラメーターを用いて計算した Q_{model} とQの関係を図-11に示す.両者はよく一致してお り、 γ が1.5に近い値であることから、物理的な考察とも 整合する結果である.

このように、総土砂流量で漂砂モデルをキャリブレー ションすることにより、越波の観測から、時々刻々の土砂 流量を推定することが可能になった。得られた土砂流量の 時空間変動を図-12に示した.γ>1であることを反映し、 越波率の分布に比べて時空間上の狭い領域に局所的に集中 することが確認される。推定によると、砂州上の土砂流量 は砂州の先端部においてピーク時には51m³/m/hourに達 し、期間中の総土砂流量の約7割が高波浪と高潮位が重な った10月7日5時からのわずか4時間の間に砂州上を陸向 きに通過したと考えられる。これにより、砂州上の越波に よる土砂移動が時間的にも空間的にも極めて局所集中性の 高い現象であることが明らかとなった。

(3) 越波の局所集中特性

地形変動量の分析では、標高の低い部分で局所的に土 砂流量が大きな値を示すことが明らかになった.また, 越波率の分析から算定したRの分布に基づく土砂流量モ デルもこのような局所集中性を良好に再現することがで



図-13 レーダ画像よりPIV法で求めた波速の平面分布

きた.次に,Rの分布自体について見ることとする.

図-10においては、標高が比較的低い区間B, Dのデー タで沖波波高 H_0 に対して遡上高Rが比較的大きい傾向が 認められる.これは、単に標高が低い部分が、その低さ 故に越波しやすく、越波回数や越波波高が他の区間に比 して大きい値を示しただけではなく、これらの区間で波 の遡上高そのものが他のA, C区間に比べて高かったこ とを示している.

このような平面的な波の集中特性を調べるため、Xバ ンドレーダ画像を用いて、PIV法により波峰の移動ベク トルを求めた (図-13). 図は越波が最も激しく発生した 10月8日午前5時のデータを解析したものである.5時か ら17分間に得られた2秒間隔の画像計520枚のうち、連 続する200組みの画像を抽出し、PIV法により波峰の速 度, すなわち波速の分布を求め, 各地点で得られた速度 ベクトルを平均したものを図示している.砂州全面にわ たって流速ベクトルが得られており,砂州全面にわたっ て越波が生じていたことがわかる.また,比較的標高の 高い区間Cを避けるようなベクトル場が形成されており、 結果として隣接する区間BやDに波が集中する様子が認 められる.これは、地形の影響を受けて、地形の低い部 分に波が集中していることを示している。また、砂州先 端部においては,河川からの流れも作用していると考え られ、流れによる波の屈折によって波向きが東向きに曲 げられ,砂州先端部に集中する結果となっていると考え られる.以上のように、越波による土砂量には、砂州の 標高のみならず、地形による波そのものの集中機構や流 れによる屈折の効果の影響を受ける事がわかった.以上 から、土砂移動量の評価にあたってはこれらの効果を考 慮することが必要であると言える.

5. まとめ

本研究は台風0918号の来襲時の高波浪による天竜川河 口部の大規模な地形変化を対象とした.現地調査および, 地形データの分析・Xバンドレーダ観測に基づき,砂州 の急激な陸側進行をもたらした砂州上の土砂移動実態を 明らかにし,越波による土砂移動をモデル化した.主要 な結論は以下の通りである.

- (1) 台風0918号による出水では河川から河口部への土砂 供給は限定的であり、河口域内での岸沖方向の土砂移 動が卓越していた.砂州上では越波により土砂が北向 きに運ばれた結果、砂州全体が陸側へ移動するような 地形変化が生じた.このとき砂州の沿岸方向断面を通 過した土砂量は8.2万m³であった.
- (2) Xバンドレーダ画像の解析から越波回数の時空間変動を明らかにし、越波の波高分布を考慮した土砂移動 モデルを構築した.モデルは、砂州上の土砂通過量を 良好に再現しており、Xバンドレーダ観測により越波 をモニタリングすることで土砂移動を定量的に把握す ることが可能となった.
- (3)開発した土砂輸送モデルにより、台風来襲時の時々 刻々の土砂移動の実態を推定した.その結果、砂州上 の陸側への土砂移動のピークは、高波浪と高潮位が重 なった10月8日午前5時頃であり、土砂フラックスは、 砂州の先端部で51m³/m/hourに達した.また、この前 後の4時間で全通過量の約7割にあたる土砂が砂州上 を陸側へ通過したことが明らかとなった.
- (4) 地形や流れとの干渉による波の平面的な集中がXバンドレーダの連続画像のPIV解析と越波の波高分布の両面から確認された。観測された局所的な土砂輸送の集中はこれらの効果によるものと考えられる。

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.また,国土交通省浜松河川国道事務所と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・大谷靖郎・橋本 新(1995):阿賀野川河口におけ る大規模洪水による砂州フラッシュと地形応答,海岸工 学論文集,第42巻, pp. 571-575.
- 武若 聡・後藤 勇・西村仁嗣 (2003):Xバンドレーダを用い た前浜地形の観測,海岸工学論文集,第50巻, pp. 546-550.
- 和田麻美・田島芳満・佐藤愼司(2010):天竜川河口テラス地 形と沿岸域への土砂供給過程の長期変化,土木学会論文 集B2(海岸工学), Vol. 66,印刷中.
- Hasan, G.M. and S. Takewaka (2009): Wave runup analyses under dissipative condition using X-band radar, Coastal Engineering Journal, Vol. 51, No. 2, pp. 177-204.
- Holman, R.A. (1986): Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach, Coastal Engineering, Vol. 9, pp. 527-544.
- Hunt, I.A., Jr. (1959): Design of seawalls and breakwaters, Journal of the Waterways and Harbors Division, Vol. 83, No. 3, pp. 123-152.
- Longuet-Higgins, M.S. (1952): On the statistical distribution of the heights of sea waves, J. Marine Research, Vol. 3, pp. 245-266.
- Roberts, T.M., P. Wang and N.C. Kraus (2010): Limits of wave runup and corresponding beach-profile change from large-scale laboratory data, J. Coastal Research, Vol. 26, pp. 184-198.
- Shen, M.C. and R.E. Meyer (1963): Climb of a bore on a beach, Part 3: Run-up, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 16, pp. 113-125.