

# 天竜川河口砂州の透水特性と堆積構造

## GROUND WATER HYDRODYNAMICS AND SEDIMENTARY STRUCTURES ACROSS THE TENRYU RIVER SAND SPIT

鈴木一省<sup>1</sup>・田島芳満<sup>2</sup>・高川智博<sup>3</sup>  
Issei SUZUKI, Yoshimitsu TAJIMA and Tomohiro TAKAGAWA

<sup>1</sup> 修(工) トヨタ自動車株式会社 (〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町1番地)

<sup>2</sup> 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 (〒113-8656 文京区本郷7-3-1)

<sup>3</sup> 正会員 博(理) 東京大学助教 工学系研究科社会基盤学専攻 (同上)

This study aims to explore the sedimentary structures and corresponding ground water hydrodynamics under the sand spit of the Tenryu River mouth. Ground Penetrating Rader (GPR) was applied to capture the sedimentary structures of the sand spit. The obtained profiles of the reflected signals were compared with the core samples extracted at several locations along the cross-shore survey lines. This paper developed a new method for detection of ground water levels from GPR profiles and tested the validity of the developed method through comparisons with the data measured by pressure sensors placed under the ground water. Measured ground water levels were then applied for calibration of the numerical model in their spatially varying permeability that is consistent with the observed sedimentary structures. A sensitivity analysis of permeability distributions was conducted and it was revealed that the permeability distribution and corresponding ground water hydrodynamics were strongly related to the recent history of erosion and sedimentation of the sand spit.

**Key Words :** GPR, ground water movement, Sand spit, sedimentary structure

### 1. はじめに

河口域で発達する砂州の形状は周辺の波・流れ場や土砂移動特性を規定し、結果として砂州自身の形状も絶えず変化させる。また出水時のような激しい外力下では、決壊を含む砂州の大変形が周辺沿岸域への土砂供給に大きな影響を及ぼす。著者ら<sup>1)</sup>は2007年台風4号に伴う天竜川河口砂州の決壊過程の観測に成功し、河口域での流出流速と河口内外の水位差のピークには約1時間の時間差があったこと、砂州中央部の大崩壊は流速のピークではなくその後の河口内外の水位差がピークに達した時に起こったことなどを明らかにした。本研究では、このような砂州の崩壊・決壊過程に大きな影響を及ぼすと考えられる砂州の堆積構造と透水特性の関係を現地観測や数値実験を通じて明らかにし、遠州灘沿岸地域の沿岸環境改善に寄与することを目的とする。

### 2. 現地観測概要

2009年7月21日および22日に天竜川河口砂州において堆積構造・透水特性の調査を行った。河口砂州の堆積構造・透水特性を考察するには、砂州地

盤中の構造と地下水位の時間変化を把握する必要がある。そこで、前者の調査には地中レーダー(GPR: Ground Penetrating Rader)を、後者の観測には水圧式波高計を使用した。GPRは、地中に電磁波を照射し、その反射波を測定することで、地下構造を可視化するものである。電磁波は誘電率の異なる地層の境界面(例えば泥層と砂層の境界面)で強く反射する性質がある<sup>2)</sup>。高川ら<sup>3)</sup>はGPRを本研究で対象とする天竜川河口部の西側に位置する中田島砂丘における堆積構造の調査に適用し、柱状試料との比較を通じてGPRによって砂層と礫層を明確に区別できることを示した。また同研究では、遠州灘海岸におけるGPR観測では、遡上帯近傍で反射波強度が著しく低下して堆積構造の判別が困難になること、地下水面と推定される反射面が観察できることなどを確認している。

既往の研究成果を受けて、本研究では天竜川河口砂州にGPRを適用し、堆積構造を俯瞰するとともに、地下水面の時空間変動を把握することを目標に現地観測を実施した。観察測線は2007年台風4号来襲時に決壊した部分(以下、決壊部)と決壊しなかった部分(以下、残留部)とに分けてGPRを用いた観測を行った。また、GPRにより観測した地下水面位置の確認と地下水面の時間変動のより詳細な観測を目的とし、図-1に示したW1~W5、E1およびE2

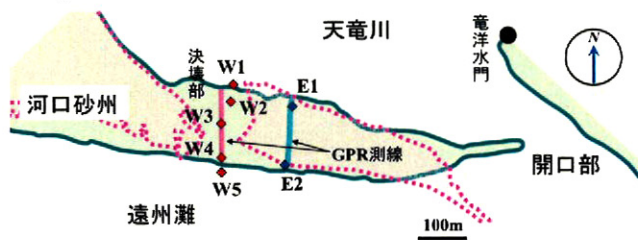


図-1 砂州形状と観測機器設置位置

には水圧式波高計を設置した。ここで W1～W5 は決壊部、E1 および E2 は残留部における観測地点であり、図-1 に調査日と台風襲来直後(2007 年 7 月 22 日)の砂州水際線を図示した。また全ての波高計で、7 月 21 日正午から 22 日 18 時まで記録した。一方、GPR 調査は 7 月 22 日の 6 時から 17 時にかけて、決壊部測線・残留部測線ともに、1 または 2 時間間隔で 8 回ずつの計 16 回行った。また GPR 画像を実座標上の画像に変換する目的で、両測線において断面地形測量も行った。

### 3. 画像データに基づく地下水面の抽出

決壊部と残留部の測線における GPR 調査は、それぞれ 8 回ずつ計 16 回実施した。各回の時間間隔は 1 時間または 2 時間であり、この間の GPR 画像に変化があるのは、地下水面の位置だけであると考え、各回の GPR 画像を比較し変化している部分に注目することにした。同じ測線における 2 枚の GPR 画像を比較し、地下水面を客観的に判別するために、画素毎の差分値分布を作成した。差分画像 C は、画像 A (時刻 a) と画像 B (時刻 b) の同じ大きさの 2 枚の画像において、ある座標 (i, j) の、画像 A と B の赤色成分の差、 $D=A_R(i, j)-B_R(i, j)$  をとり、D が 0 または正なら C(i, j) の色は白、D が負なら C(i, j) の色をグレースケールで表示することとし、全ての座標についてこの操作を行い、差分画像 C を作成した。2 枚の画像 A・B において地層構造等の時間的に変化の無いところは白く表示され、変化のあるところ

は上記の原理により表示されている。

このようにして残留部測線上の 2 枚の GPR 画像において、地下水面の抽出を行った例を図-2 (a), (b) に示し、またその元画像を図-2 (a'), (b') に示す。2 枚の画像の調査時刻は 6 時と 16 時で、図中に同日の御前崎における潮位波形を合わせて示した。図-2 の地表に近い領域においては、層構造の様子が消えて白く表示されており、地下水面が概ね良好に可視化できている。

他の時間帯についてもこの手法で地下水面の抽出を試み、時間変化をまとめたものを図-3 に示す。図中の③が沿岸部水域における潮位が最も低かった時間帯における地下水面分布を示しているが、図-3 では④の時に最も低い地下水面を示している。砂州地盤中の水位変動が潮位から遅れており、水面勾配も中央部と両端部では異なっている様子が見て取れる。この傾向は後述する W3 地点における波形が他の地点の波形から遅れていることとも合致する。

次に測線上に設置した波高計と、この手法に基づく地下水面高さを比較する。図-4 はこの手法を用いて、7 月 22 日 16 時半頃の決壊部測線の画像の地下水面抽出を行い、一部を図示したものである。GPR 差分画像から地下水面として判別できるところを矢印で示している。さらに、波高計観測による同じ時間の地下水面位置を棒グラフで示し T.P. を併記した。図-4 において、矢印で示した線と；波高計の観測値(棒グラフ)の分布が一致していることが分かる。

### 4. 砂州地盤の堆積構造

次に、砂州の堆積構造を分析する。図-5 は決壊部測線における GPR 画像を示し、図-6 には決壊部測線における 2005 年から 2009 年までの断面地形変化を示す。ここで画像の左右は南北方向(岸沖方向)であり、右が北、左が南である。これら画像を例に、決壊部測線の全ての GPR 画像に見られた地盤構造について考察する。

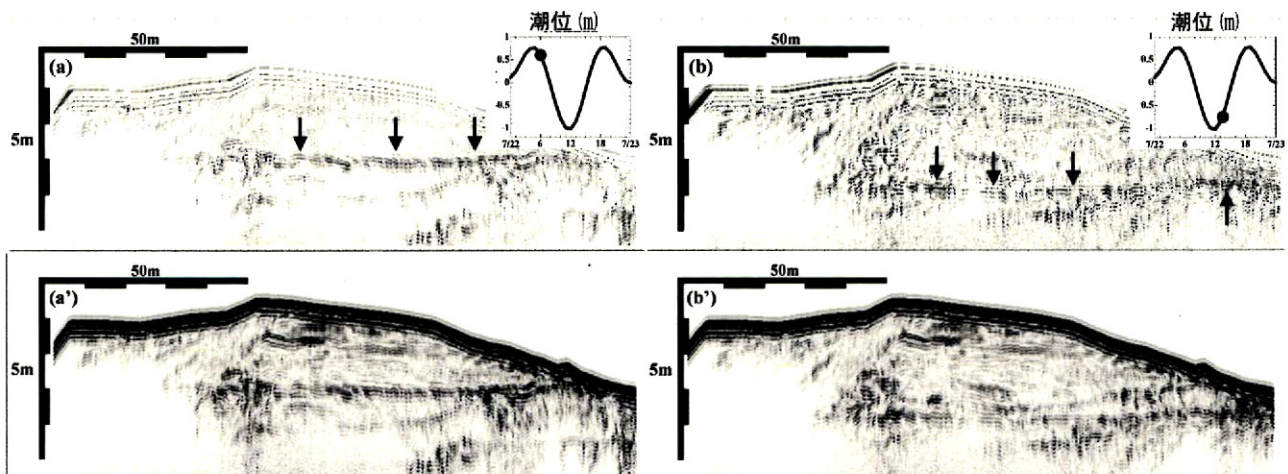


図-2 差分画像(aおよびb)と元画像(a'およびb')

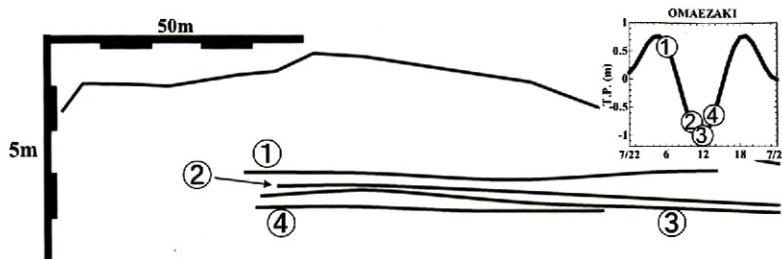


図-3 差分画像による地下水面の抽出

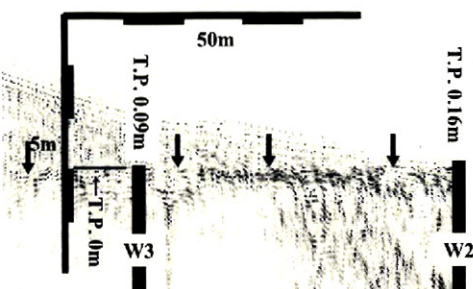


図-4 差分画像と波高計観測結果の比較

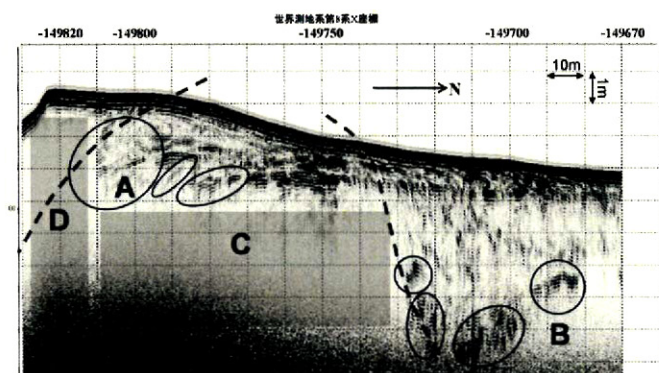


図-5 決壊部の堆積構造

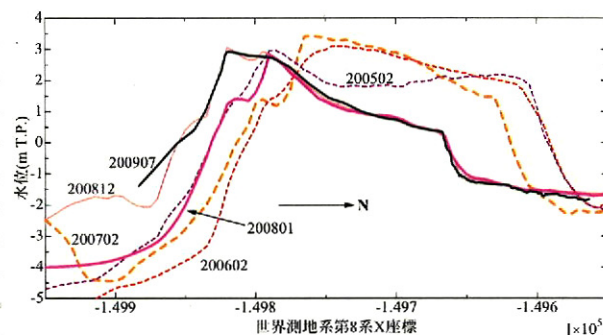


図-6 決壊部形状の経年変化

まず図に示した A 付近を見ると、左下に伸びる層構造が多く見られる。これは、砂州の南側(海側)斜面が南北に頻繁に移動して形成されたと考えられ、図-6 から、南側斜面地形の侵食・堆積の様子とも符合する。領域 A 近傍は、特に地形の変化が激しく、北側の領域に比べて堆積層が非常に新しいと考えられる。一方、北側(天竜川上流側)の B 付近には○で囲んだ位置に強い反応が点在している。これらの反応が一連の層構造を成しているとは考えにくく、砂地盤中に部分的に礫部やシルト部が点在しているものと思われる。

以上の観察より、決壊部の測線では南側斜面の侵食堆積の様子と礫部・シルト部の位置関係から、図-5 に示した破線周辺を境に南北に異なる 3 つ堆積構造を持っていると推察できる。

また、領域 B と C の間の破線位置では、反射波強度の違いによる明確な境界が見られた。同様に、領域 D についても地表近傍以外では急激に反射波強度が小さくなる領域が広がっている。GPR では海水を多く含む地盤では、反射波の減衰が激しく、画像にすると反応が見えにくくなる性質がある。C や D で反応が弱いのはこの性質によるものと考えられる。この反射波強度の違いが D から C、C から B へと段階的に変化していることも、これらの領域では海水および河川水の浸透速度が異なること、すなわち、堆積構造(特性)が異なることを示唆していると考えられる。

以上より、GPR 画像に基づく決壊部堆積構造の観察では、南北方向に異なる堆積構造、透水特性を持っていることが推察された。この透水特性の違いについては、数値解析による観測結果の再現を通じて

より詳細に検討する。

## 5. 決壊部における波高計波形

現地観測では図-1 に示した W1~W5, E1, E2 の合計 7 地点に波高計を設置し、水面高さの時間変化を 1 秒間隔で計測した。図-7 に各観測点における水面の時間波形を比較する。

図には各波高計の波形と共に、同日の御前崎の潮位も示した。砂州の中央の地点である W3 は最も振幅が小さく、他の波形から位相が約 2 時間遅れている様子などが見てとれる。

## 6. 数値解析に基づく透水特性の推定

以上の観測結果より、砂州内の堆積構造は岸沖方向に一樣ではなく、特に決壊部では透水性の違いにより大きく 3 つの領域に分けられることが推察された。ここでは、ダルシー則に基づく地下水変動場の再現計算を実施し、実測値との比較を通じて透水特性に対するより詳細な分析を加える。このモデルにおいて、透水係数と不透水面の深さを様々に変化したときの計算結果と、砂州地盤中に設置した波高計の観測結果を比較し、観測結果を最も良く再現する透水係数を求めることとした。

### (1) 数値モデルの概要

砂州砂礫層内における地下水面の変動、および、砕波帯、河道内における水面変動との応答は、田島

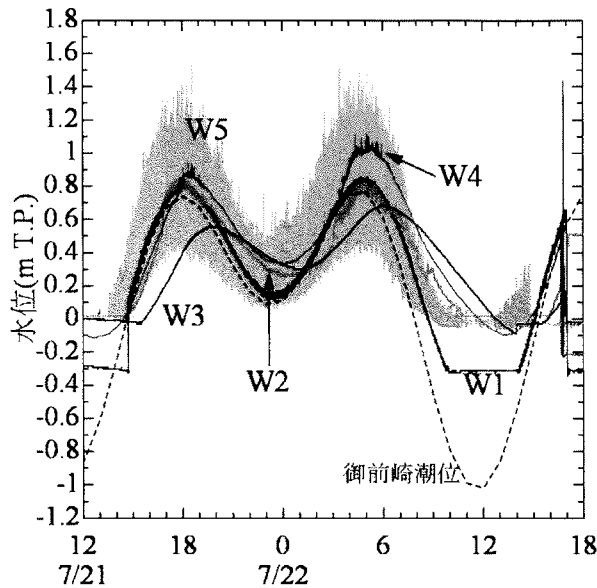


図-7 W1～W5 地点設置波高計の時間波形

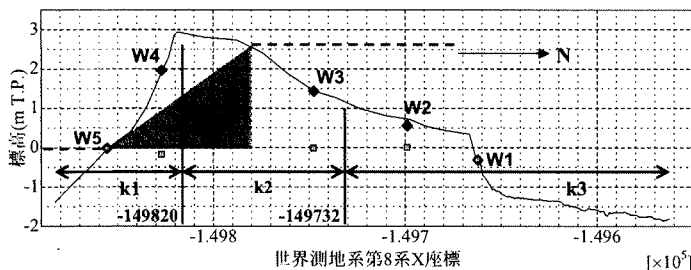


図-8 決壊部断面地形と透水係数の分け方(◆は W1～W5 地点, □は波高計設置位置を表す)

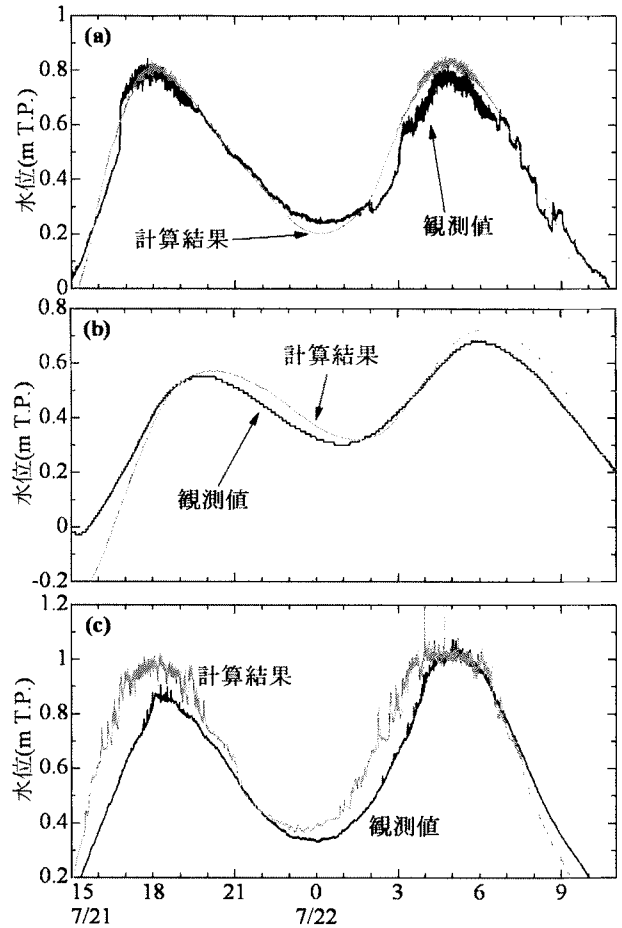


図-9 計算結果と観測値の比較

ら<sup>4)</sup>と同様の透水層モデルに倣ってモデル化した<sup>5)</sup>が、着目する透水層内での流速が非常に小さいことを想定して運動方程式中の非線形項は無視し、また、透水層内の抵抗則には Darcy 則を用いた。すなわち、数値モデルに用いた連続式および運動方程式は次式で表される。

$$\varepsilon \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{ng}{k} Z_s U_s = 0 \quad (2)$$

ここで  $\eta$  は水位、 $\varepsilon$  は水面における空隙率、 $P$  は線流量、 $A$  は不透水面高さ  $z=-h$  および、各地点での空隙率  $\lambda$  (地表面下で  $n$ 、地表面上で 0) 用いて次式で示される仮想全水深、

$$A = \int_{-h}^{\eta} \lambda dz \quad (3)$$

$k$  は Darcy 則に基づく透水係数、 $Z_s$  は透水層高さ、 $U_s$  は次式で別途求められる透水層内の流速である。

$$\frac{\partial U_s}{\partial t} + gn \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{ng}{k} U_s = 0 \quad (4)$$

水面が常に地表面下に位置する条件では、式 (2) と (4) は一致するが、水面が地表面よりも上に位置する場合には、このように運動方程式中の線流量と透水層内流速を分けて計算することによって波動成分の過剰減衰を防いでいる。また海側水域では碎波に

よる波浪減衰を考慮すべきであるが、本計算では碎波帯内における水変動を直接与えているため、運動方程式中での碎波減衰は考慮していない。

## (2) 計算条件

砂州の地形は測量結果に基づき、決壊部と残留部それぞれ図-8 と図-12 に示した地形を計算に使用した。地形測量地点の間は線形補完し、1m 間隔で標高を求め、両地形ともに岸沖方向に 320m の範囲を計算領域とした。堆積層内の間隙率  $n$  は一様に 0.3 として与え、透水係数と不透水面の高さについては、さまざまな条件を与え、計算結果を比較した。

境界条件としては、波高計によって計測した、碎波帯内、河道内の水域における波形を使用した。ただし、碎波帯内の波形については、透水層内の挙動に影響しない短周期成分波 (ここでは周期 10 秒以下) を除去した。再現計算の対象期間は潮位が計測できた 7 月 21 日 15 時から 22 日 11 時までとしたが、透水層内における潮汐応答を妥当に再現するため、御前崎 (海域) および竜洋水門 (河道内) における水位データに基づき 21 日 3 時から 21 日 15 時までの波形を加えた。

## (3) 透水係数および不透水面高さの検証

以上の計算条件に基づき、透水係数や不透水面高

さを変えながら地下水面の変動計算を実施し、計算した水位変動と実測値との RMS 誤差を比較した。このとき、前述したように決壊部では透水係数の異なる3つの領域に分けられると考え、図-8 に示した領域毎に断面平均透水係数を  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  として与えた。これらの透水係数の値は、それぞれ 11 段階の値を別々に与え、また不透水面の高さも TP-20 (m) から TP-5m まで 1m 間隔で変化させた。その結果、砂州内の W2, W3, W4 における実測波形を最も良く再現できた透水係数の組み合わせは  $(k_1, k_2, k_3) = (6.3, 1.6, 15.8) (10^{-3} \text{m/s})$  となり、不透水面高さ TP-16 (m) となった。ただし、不透水面高さが再現誤差に与える影響は小さく、不透水面高さの値によって最適な透水係数の絶対値は変化した。常に  $k_3 < k_1 < k_2$  の関係は保たれた。すなわち、砂州中央部では透水性が低く、海側と川側の透水性が高いことが分かった。これは中央部に比べて砂州の海側および川側の領域では地形変化が激しく、比較的新しい堆積層であることを示唆していると考えられる。また川側の透水係数が海側よりも大きくなったのは、今回の調査からでは、図-5 の B ように、礫など透水性の高い構造が点在しているからであると考えることができる。

最適透水係数及び最適不透水面位置を用いて計算した水位と観測値を比較したものを図-9 に示した。図-9 (a) では W2 に設置した波高計の観測結果と同じ位置における計算結果を比較した。波高、位相共によく一致していることが分かる。満潮時に水面が振動する様子も再現できている。図-9 (b) は W3 に設置した波高計の観測結果と同じ位置における計算結果を比較したものである。計算結果が、やや水位が高いが、位相・波高ともに良く再現できていると言える。図-9 (c) は W4 に設置した波高計の観測結果と同じ位置における計算結果を比較したものである。上げ潮時に計算結果の水位が高く評価されているが、位相や波高はほぼ一致している。全体的には、観測結果を概ね良好に再現できている。

## 7. T0704 来襲時の砂州地盤の挙動考察

砂州地盤には、2007 年台風 4 号以前の国土交通省による深さ 10m までのボーリング調査により、礫層が分布していることが分かっている。図-10 はボーリング調査の柱状試料を 1m 毎に短冊状にして横に並べたものである。また試料のイラストも併記した。なお、イラスト上斜線部は試料を採取できていないところである。この試料からイラストの網掛け部分に礫が堆積していることが認められ、その層厚の合計は約 2.1m であることが分かった。

ここでは、前章で推定した砂州決壊部の透水係数に基づき礫層内の流速を推定し、堆積層の安定性を与える影響について考察する。砂州決壊部の最高点 T.P. 2.9m の地点から、不透水面深さ T.P. -20, -15, -

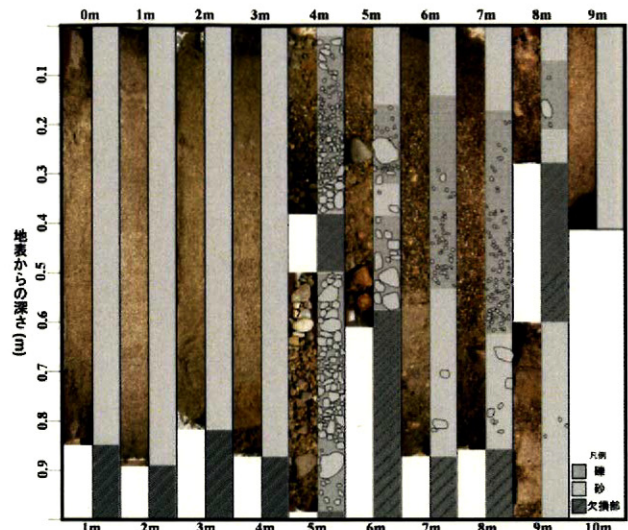


図-10 ボーリング調査の柱状図

10, -5m まで砂地盤の間に水平方向に広がる層厚 2.1m の礫層が存在していると仮定した。礫層内における流速算定の手順は以下の通りである。まず、ある動水勾配  $i$  に対する、透水層内の線流量を再現計算で求めた断面平均の透水係数および透水層厚を用いて算定する。次に、同じ動水勾配に対する砂層内の線流量を、砂層の透水係数を代表的な値<sup>5)</sup>である  $k_s = 0.0001 \text{ (m/s)}$  および前透水層厚から礫層厚 (2.1m) を差し引いた砂層厚を用いて算定する。最後に求められた 2 つ線流量の差から、礫層内における線流量と対応する流速を算定する。

このようにして算定した礫層内の流速の計算結果を表-1 に整理する。計算結果は仮定する透水層厚によって変化するため、異なる不透水面高さに対して同様の計算を行い比較した。また、台風 T0704 来襲時における動水勾配については、観測結果<sup>1)</sup>に基づき水位差を 2.7m、代表的な砂州の幅 70m として算定した。

表-1 異なる不透水面高さに対する礫層内流速の推定結果

| 不透水面高さ  | $k_l$  | 礫層内流速  |
|---------|--------|--------|
| T.P.(m) | (m/s)  | (m/s)  |
| -5      | 0.025  | 0.0242 |
| -10     | 0.010  | 0.0157 |
| -15     | 0.010  | 0.0217 |
| -20     | 0.0063 | 0.0174 |

ここで、粒径 0.3mm で土粒子比重 2.65 を与えたときの砂粒子の沈降速度<sup>6)</sup>は 0.0344 (m/s) となり、いずれの不透水面高さの場合も、礫層内の流速が沈降速度と同じオーダーとなっていたことが推定された。すなわち、礫層内の流速は表層の土粒子の巻上げに十分に寄与しており、天竜川河口砂州の透水特性が砂州崩壊の原因の 1 つであるといえることが明らかとなった。

## 8. 決壊部と残留部の透水特性の比較考察

残留部を決壊部と同じように 3 つの領域に分け (図-11), 決壊部と同じ透水係数および不透水面高さ (TP-16m) を与えて地盤中の水位変動を計算し, 波高計の観測結果を比較した (図-12). (a) と (b) はそれぞれ, E1 と E2 地点を示している.

(b) をみると計算結果は, 水位が高く激しく変動していることが分かる. よって, E2 地点は決壊部より透水性が低いということが読み取れる. また, (a) では, 計算結果が観測値より低く評価されている. (a) の②ときの砂州地盤中の空間波形を示したものが図-12 の破線である. ②は, 水位が下がりきった時なので, もし,  $k_3$  がもっと小さければ水位低下は遅れ, このときの水位は高くなる. そうすると, ①のとき (空間波形は図-12 の点線) の水位が上がりにくくなり, ①よりも水位が低くなることが起こりえるが, ①は②より水際線からの距離が 10m 以上近いいため, 影響は少ないものと考えられる. よって, E1 でも決壊部より透水性が低いということが読み取れる. 以上から,  $k_1$  および  $k_3$  は決壊部よりも残留部の方が透水性が低いと言えるので, 現在の決壊部は台風のような大規模出水時には決壊しやすい構造であることが明らかとなった.

## 9. まとめ

本研究の主要な成果を以下にまとめる.

①GPR 画像を元に差分画像を作る手法により, 地下水面を抽出することに成功した. ②天竜川河口砂州において, GPR 調査から透水特性の異なる領域が存在することが推定でき, その条件を与えた数値シミュレーションモデルからは, 高い再現精度を得られた. ③天竜川河口砂州は, 南北方向について 3 つの異なる透水特性を持つ領域に分けられ, 中央部の透水係数が最も小さく, 海側と川側とでは, 海側の透水係数の方が小さいということが分かった. また, 砂州地盤の近年の地形変化が透水性を裏付けていることが分かった. ④2007 年台風 4 号来襲時には, 砂州地盤に存在する礫層内の流速が, 表層砂の沈降速度と同じオーダーであり, 天竜川河口砂州の透水特性が砂州の決壊を助長する原因の 1 つであることが分かった. ⑤砂州内部の線流量は, 最大でも  $0.001\text{m}^2/\text{s}$  のオーダーで非常に小さく, 砂州を通じて通常の潮汐に伴う水のやり取りは, 河口を通じてのやり取りに比べ極めて小さいことが分かった. ⑥決壊部の透水性は残留部より低く, 決壊部は現在も台風のような大規模出水時には決壊しやすい構造であることが分かった.

謝辞: 本研究は科学技術振興調整費重要課題解決型

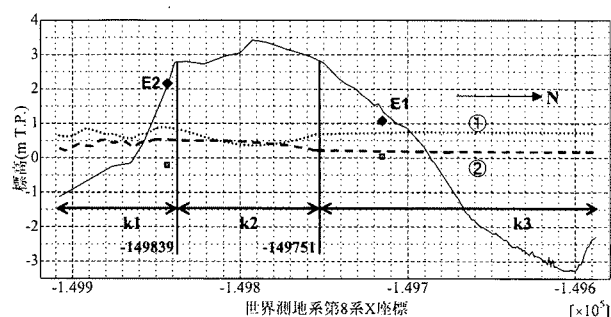


図-11 残留部断面地形と透水係数の分け方 (◆は W1 ~ W5 地点, □は波高計設置位置を表す)

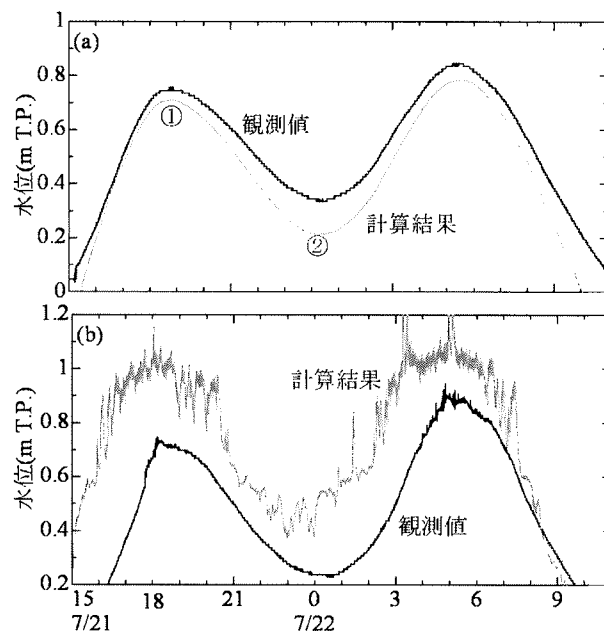


図-12 残留部における計算結果と観測値の比較

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す. ここに記して深甚なる謝意を表します.

## 参考文献

- 1) 田島芳満, 高川智博, 浅野泰史, 佐藤慎司, 武若聡: 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, 2008.
- 2) van Heteren, S., D.M. Fitzgerald, P.A. McKinlay and I.V. Buynovich (1998): Radar facies of paraglacial barrier systems: coastal New England, USA, Sedimentology, Vol. 45, pp. 181-200.
- 3) 高川智博・深瀬祐太郎・劉海江・佐藤慎司: 地層構造および堆積物分析による天竜川河口周辺の海浜形成過程の考察, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 681-685, 2008.
- 4) 田島芳満, 小塚将之, 大島香織: 透過式潜堤による非碎波波長の低減効果およびその評価手法について, 海洋開発論文集, pp. 499-504, 2005.
- 5) 石原研而: 土質力学 第 2 版, pp. 72-74, 2001.
- 6) Jimenez, J.A. and O.S. Madsen: A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 129(2), pp. 70-78, 2003.