

養浜砂浜海岸域における不圧地下水の動態観測とその意義

Field Observations of Unconfined Groundwater Dynamics in a Nourished Sand Beach

関口秀雄¹・東 良慶²・クリヨ サンボド³

Hideo SEKIGUCHI, Ryoukei AZUMA and Kriyo Sambodho

This paper describes the evolutions of sea level and unconfined groundwater table in a nourished sand beach that were measured over one year. Careful time-series analyses identified seasonable variations of the sea level and of the groundwater levels at the three observation wells installed. The groundwater levels proved to be consistently higher landwards, indicating the fresh groundwater discharge (FGD) into the sea. The rate of the FGD was evaluated in two steps. First, the transmissivity of the unconfined aquifer was assessed through analyses of the measured fluctuations of the groundwater levels that responded systematically to four major tidal constituents. Then the identified aquifer constant was incorporated into theoretical equations of FGD and of the related seawater intrusion into the beach.

1. はじめに

海崖-波食台システムによって特徴づけられる東播海岸は、波食による海岸侵食が著しく、その対策として、養浜工が実施されてきた。このような砂浜海岸システムにおいて、不圧地下水の動態は、砂浜地形の変化および砂浜域と浅海域のそれぞれの生態系と密接に関係していると考えられる。

例えば、砂浜地盤内の土中水分や間隙水圧は、波や風による侵食に対する砂浜の抵抗力に影響を与えるパラメータである。すなわち、地下水面の変動、地下水の浸潤や蒸発は砂浜地形ダイナミクスとも密接に関係する。関口ら (2006) は間隙水圧などの砂浜物理環境諸量の連続観測を行い、台風イベント時の地下水位変動と土中サクシジョンの動態が整合していることを見出している。土中サクシジョンは、内部侵食にともなう空洞の形成・保持を通じて、砂浜の安全性に関わることに留意したい。

砂浜表層に保持された水分は、前浜・後浜の植生を定着させ、生態系の形成に貢献している。これらの植生は飛砂による侵食抑制に活用できる可能性がある。また、浅海域への淡水地下水の流出は、汽水帯を形成させ、栄養塩の供給源となり、豊かな生態系の形成に寄与する可能性が高い。したがって、生態系を考慮した砂浜の環境保全および健全な海域利用にとって精査に値する。

上述のように、砂浜域の不圧地下水の動態に関する理解を深めることは、砂浜地形の保全のみならず、多様な生態系の再生にも資するものと考えられる。そこで、本研究では観測水面変動の時系列解析を通じて、定常地下

水面情報を抽出し、淡塩水境界面の予測につなげる。さらに、地下水位変動特性の分析に基づいて、帯水層パラメータを同定し、海域への淡水地下水流出量の定量的な評価を行う。

2. 養浜砂浜域における不圧地下水動態の現地観測

(1) 観測サイトの特徴

観測サイトとして選定した東播海岸の谷八木砂浜は、明石海峡から約 10 km 西に位置している。東播海岸の地形的な特徴である海崖-波食台システムは、波浪による侵食に対して脆弱であり、谷八木砂浜においても海崖の後退をもたらす海岸侵食が進行していた。その対策として、養浜工が近年実施された地区である (図-1)。観測サイトは二つの突堤に挟まれた長さ 200 m の養浜砂浜域である (図-2(a))。

(2) 養浜砂浜の微地形変化

谷八木砂浜において行った測量結果にもとづく等高線図を図-2(a)に示す。養浜工完了時点の汀線は概ね直線状であった。現在では、汀線は緩やかな凹曲線になっているが、この地形変化は、当地の卓越波向と密接に関係していると考えられる (門松ら, 1990)。

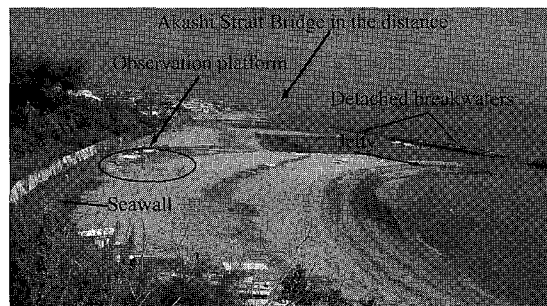


図-1 海崖上から東に谷八木砂浜を望む
(2005 年 5 月 14 日干潮時撮影)

1 フェロー 工博 京都大学教授防災研究所
2 正 会 員 工(博) 京都大学助教授防災研究所
3 学生会員 工(修) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

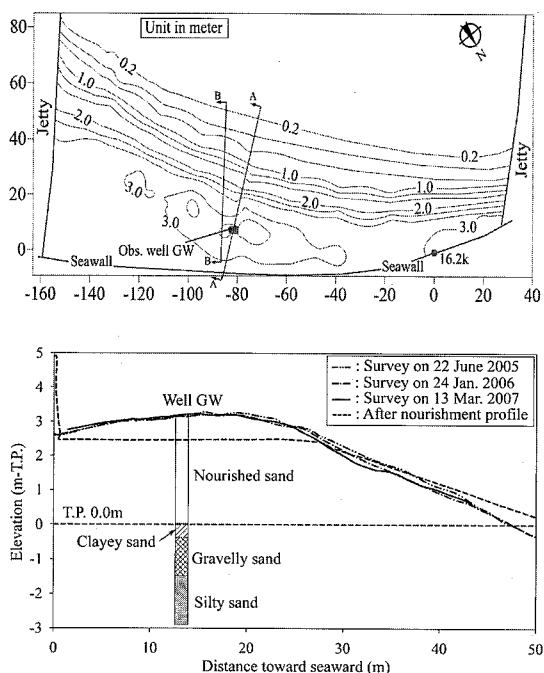


図-2 (a) 谷八木砂浜の等高線図; (b) 測線 A-A における砂浜表面地形変化と地層区分

汀線とはほぼ直交する、測線 A-A に沿う砂浜表面プロフィールを図-2(b)に示す。養浜工の施工天端高さは T.P.+2.5 m であった。著者らの第 1 回測量結果 (2005 年 6 月 22 日) によると、砂浜天端高さは T.P.+3.2 m にまで増加していた。この地形変化は、当海域に大きな影響を及ぼした台風 0416 号の風浪によるものと推定される。この推論は、テンショメータ (UNSUC) 設置のための掘削時に、地表面から 50 ~ 60 cm の深さに草本の枯れた根が埋積されていた観察結果と整合的である。それ以降、第 2 回測量時 (2006 年 1 月 24 日) および第 3

回測量時 (2007 年 3 月 13 日) を通じて、砂浜の地形はほとんど変化していない。

(3) 砂浜域の地層構成

観測井 GW 設置時に採取したボーリングコアの観察によると、当砂浜の地層は、T.P.-1.6 m 以深は在来地盤である明石累層 (推定)、T.P.-1.6 m ~ T.P.0 m 間はエスチャリー性の水底堆積物、T.P.0 m より上部は養浜砂で構成されている (図-2(b)参照)。観測井の設置に先立ち、砂浜内に異物が無いことを確認するために、表面波探査を実施し、S 波速度構造を求めた (図-3)。図中の実線は測線 B-B (図-2(a)) に沿った在来地盤 (養浜工実施以前) の地形プロフィールである。その結果によると、地表近傍の養浜砂層の S 波速度は 0.12 km/s 以下と小さく、緩く堆積していることがわかる。一方で、海岸堤防に近い T.P.-2.0 m 付近では、S 波速度が 0.28 km/s 以上の値を示す領域が見てとれる。これは、堤防脚部に設置されたマウンドの捨石等を捉えていると推測される。非破壊物理探査手法により養浜砂層とその下位の在来地盤を明瞭に区別できることは興味深い。

(4) 現地観測システム

汀線に対してほぼ直交する地下水位観測アレイを設置した (図-4)。潮位の観測は、当該砂浜の約 1.4 km 東に位置する藤江漁港に、データロガー内蔵方式の観測センサを設置することにより、実施している。

さて、現地観測システムを構成するセンサ群を大別すると、海岸域の気象水文諸量の測定用センサ群と、砂浜地盤-水理環境諸量の測定用センサ群に大別できる。データロガー内蔵方式のセンサ (潮位、海水温、観測井 H17-3, H17-4 における地下水位・水温センサ等) を除くセンサ群については、1 分間隔で観測データの取得を行い、データロガー CR10X (観測架台上に設置) に取

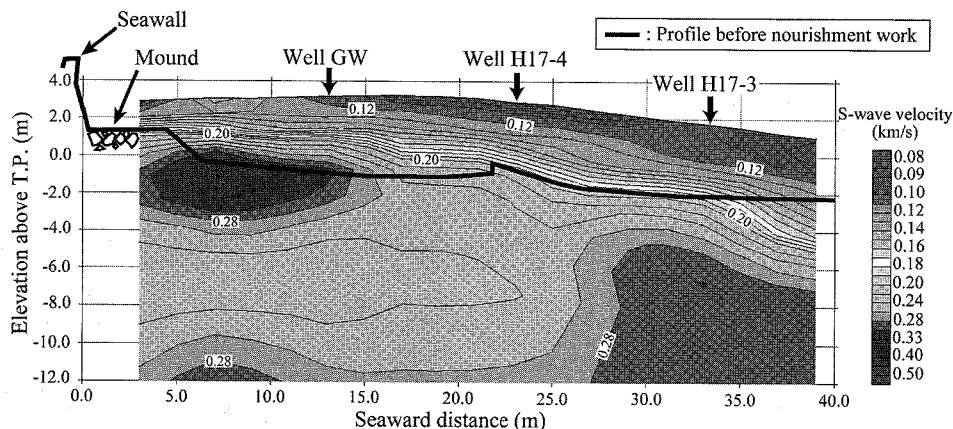


図-3 測線 A-A に沿う養浜砂浜断面内の S 波速度構造

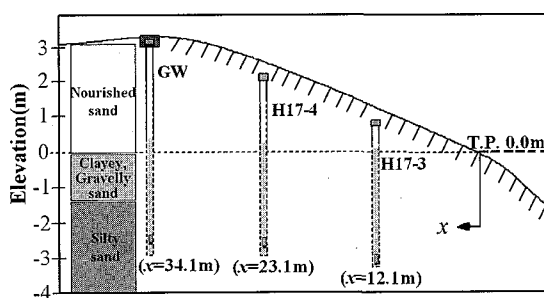


図-4 地下水位観測井の設置位置および砂浜の地層構成

集・格納した。合わせて、携帯電話方式の遠隔データ伝送システムにより、京都大学防災研究所までデータ転送を行っている。詳細については、Azuma *et al.* (2005) に譲る。

3. 潮位および地下水位変動の現地観測結果

(1) 観測水面変動の時系列解析

2006年2月から2007年3月までの期間、10分間隔で取得した潮位と各観測井の地下水位の時系列を図-5に示す。各水面変動 η は、天文潮による水位変動成分 η^* 、それより格段に長周期のトレンド成分 η^{**} の和として

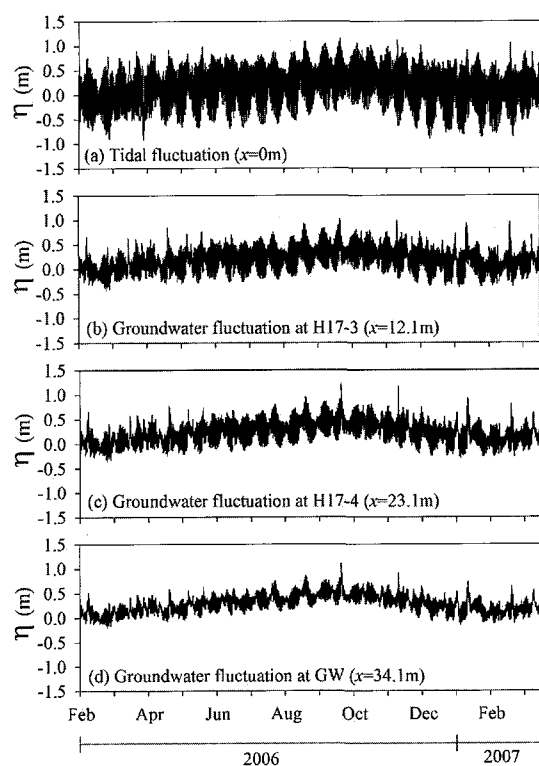


図-5 水面変動観測結果：(a)潮位変動；(b)～(d)観測井アレイにおける地下水位変動

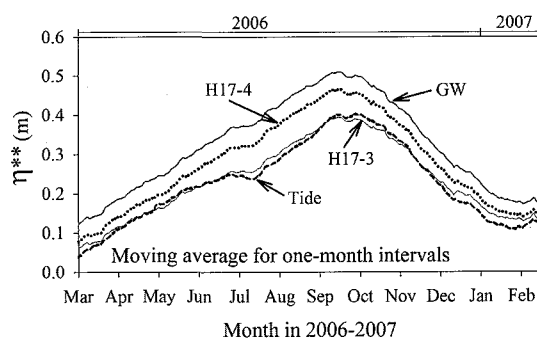


図-6 移動平均によって抽出した潮位変動および地下水位変動の各トレンド成分

記述できる。すなわち、 $\eta = \eta^* + \eta^{**}$ 。トレンド成分 η^{**} を求めるために、それぞれの観測地下水位および潮位のインターバル1ヶ月の移動平均を求め、図-6に表示している。図-6の結果によると、陸側の観測井における地下水位が潮位よりも系統的に高いことが分かる。言い換えると、陸側から海側に向かう定常的な地下水流出が存在する。

(2) 日周潮と半日周潮に対する地下水位変動特性

2006年2月から2007年3月までの期間の潮位変動および観測井GWの地下水面変動の時系列 η （インターバル10分）からトレンド成分 η^{**} を除き、変動成分 η^* を求める。次いで、フーリエ変換によるスペクトル解析を行った結果を図-7(a)および(b)に示す。主要4分潮である主太陰半日周潮(M_2)、主太陽半日周潮

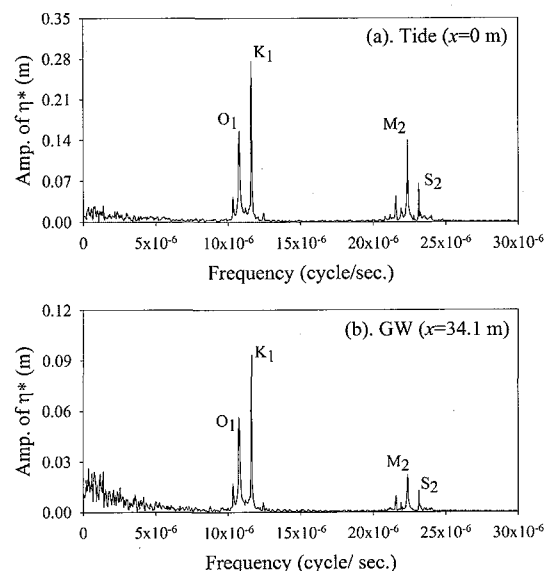


図-7トレンド成分を除いた水面変動に対するスペクトル解析の結果：(a)潮位変動；(b)観測井GWの地下水面変動

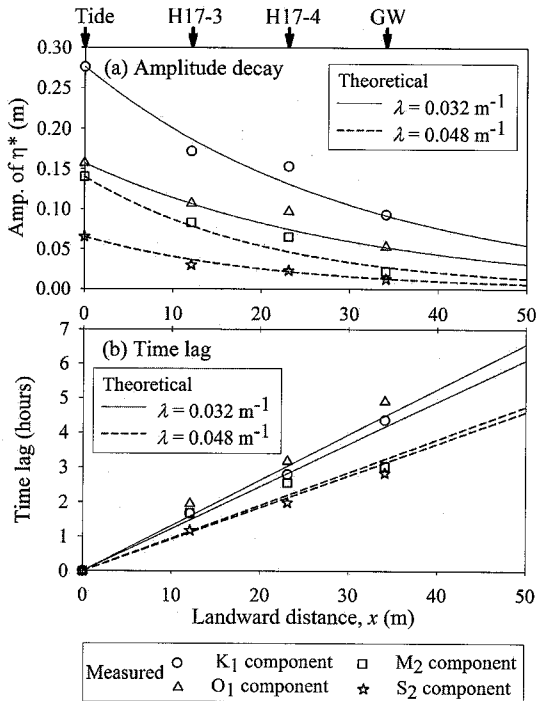


図-8 日周潮および半日周潮に対する地下水変動特性：
(a) 振幅減衰；(b) 応答の時間遅れ

(S_2), 主太陰日周潮 (O_1) および日月合成日周長 (K_1) のそれぞれに対応するピークが, 図-7(a), (b) どちらにおいても明瞭である。

主要4分潮のそれぞれに対応する地下水位変動 η^* を抽出し, 振幅と位相特性を調べた結果を図-8に示す。同図中には, 日周潮 (K_1 , O_1) と, 半日周潮 (M_2 , S_2) に対応する理論曲線 (宇野木, 1993) も合わせて示してある。すなわち,

$$\eta^* = \eta_0^* \cdot e^{-\lambda x} \sin(\omega t - \lambda x); \lambda = (\omega/2C)^{1/2} \dots (1)$$

ただし $C = k \cdot d/n$

ここに, ω は各分潮の角振動数, λ は特性波数, C は透水係数 k , 不圧帯水層厚 d および間隙率 n によって決まる帯水層パラメータである。図-8(a)の結果より, 汀線からの距離 x の増加にともない, 系統的に地下水位変動振幅は減衰することが分かる。また, 図-8(b)より, 潮位に対して地下水位変動の位相が系統的に遅れることが分かる。

結局, 帯水層パラメータの値として, $C = (k \cdot d/n) = 0.0334 \text{ m}^2/\text{s}$ と同定できる。

4. 淡塩水境界に関する考察

(1) 定常地下水面と淡塩水境界面の推定

前章までに述べたように, 陸側から海側に向かう定常

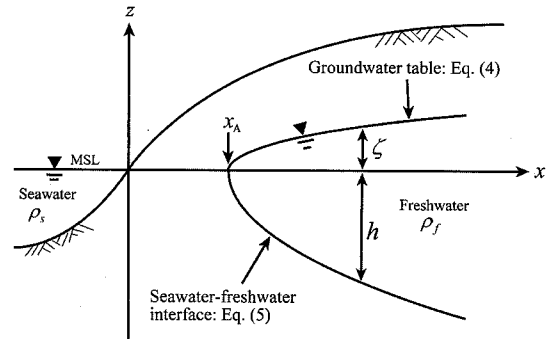


図-9 定常地下水面と淡塩水境界面の概念図

的な地下水流が存在することが観測結果から明らかとなった (図-6)。そこで以下では, シンプルな定常地下水流動理論 (佐藤・岩佐, 2002) を参考にして, 当砂浜域での淡塩水境界面を推定する。

当該砂浜における淡水流出が定常一方向流 (水平方向; $-x$ 方向) で動水勾配に比例するものと仮定すると, 砂浜 1 m 当たりの流出量 Q は式 (2) で表すことができる。

$$Q = \int_{-h}^{\zeta} (-u) dz = -u \cdot (h + \zeta) \dots (2)$$

ここに, ζ は地下水位と潮位との偏差, h は淡塩水境界面と潮位との偏差である (図-9)。浸透流速 u はダルシーの法則により次式で表される。

$$u = -k \cdot \left(\frac{d\zeta}{dx} \right) \dots (3)$$

式 (3) を式 (2) に代入し, 境界条件を $x = x_A$, $\zeta = \zeta_A = 0$ とし, 積分すると, 偏差 ζ は式 (4) で表される。

$$\zeta^2 = \zeta_A^2 + 2 \frac{Q}{k} \frac{(x - x_A)}{(1 + \beta)} = 2 \frac{Q}{k} \frac{(x - x_A)}{(1 + \beta)} \dots (4)$$

ここに, $\beta = \rho_f / (\rho_s - \rho_f) = 40$, ρ_f , ρ_s は淡水および海水の密度である。

次に, 各観測井における地下水位変動の年平均 $\bar{\eta}^{**}$ を算定し, 潮位変動の年平均 $\bar{\eta}_{\text{tide}}^{**}$ (すなわち平均海面 $\text{MSL} = \text{T.P.} + 0.23 \text{ m}$) との偏差 $\zeta (= \bar{\eta}^{**} - \bar{\eta}_{\text{tide}}^{**})$ を算定した。その偏差 ζ を汀線からの距離 x に対してプロットし, 式 (4) に基づいて求めた不圧地下水面予測曲線を図-10に示した。それによると, $Q/k = 0.0069 \text{ m}$ と推定された。

淡塩水境界面に着目する。ここで, 淡塩水境界面と平均潮位の偏差 h について, $h = \beta \cdot \zeta$ の関係式が成立すると仮定する。 $\zeta = h/\beta$, $\zeta_A = h_A/\beta$ を式 (4) に代入すると, 偏差についての関係式 (5) を導くことができる。

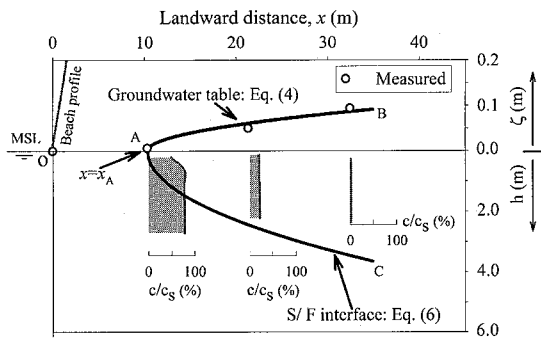


図-10 砂浜内の定常地下水面，対応する淡塩境界面の予測結果および実測の相対塩分分布

$$h^2 = h_A^2 + 2 \frac{Q}{k} \cdot \frac{\beta^2}{(1+\beta)} \cdot (x - x_A) \quad (5)$$

ここで， $x - x_A$ において， $h_A = 0$ とおくと，式 (5) は

$$h^2 = 2 \frac{Q}{k} \cdot \frac{\beta^2}{(1+\beta)} \cdot (x - x_A) \quad (6)$$

となる。上式中の Q/k の値として，定常地下水面の推定により求めた値 (0.0069 m) を式 (6) に適用し，具体的な淡塩水境界面を推定した (図-10)。図-10 中には，電気伝導度計測に基づく相対塩濃度 C/C_s の分布も示してある。それらの分布形は，概ね，予測された淡水地下水域と調和的である。

(2) 淡水地下水流出量 Q の評価

帯水層パラメータ C の定義式に留意して， Q/k を変形すると，淡水流出量 Q について次式を得る。

$$Q = \frac{Q}{k} \cdot \frac{C \cdot n}{d} \quad (7)$$

これまでに同定した， $Q/k = 0.0069$ m，帯水層パラメータ $C = 0.0334$ m²/s を式 (7) に適用し，淡水流出量 Q を算出した。その際，帯水層厚 $d = 5.0$ m，間隙率 n は 0.4 と仮定した。その結果，砂浜 1 m あたりの淡水地下水流出量 Q は 1.6 m³/day となる。

年間降水量に砂浜面積を乗じることにより，砂浜への直接降雨量を算定した。その降雨量がすべて地下水へ浸透したと仮定しても，直接降雨浸透量はたかだか 0.17 m³/day に過ぎない。したがって，淡水流出量の大部分は後背地からの地下水涵養によるものと判断できる。

5. 結 論

谷八木砂浜の海崖前面の養浜砂浜域において，汀線に対してほぼ直交する地下水位観測アレイを設定し，不圧

地下水環境の連続観測を行った。地下水面変動の観測データの時系列解析を通じて，定常地下水面情報を抽出し，淡塩水境界面の推定した。さらに，地下水位変動特性から帯水層パラメータを同定し，淡水地下水流出量を評価した。得られた主要な結論は以下の通りである。

- 1) 砂浜海岸において不圧地下水位変動および潮位変動を 2006 年 2 月から 2007 年 3 月の期間にわたって観測し，これらの観測データの時系列解析を行うことにより，トレンド成分と天文潮 (1 日周潮および半日周潮) による成分に分離・抽出することができた。
- 2) 観測データをインターバル 1 ケ月の移動平均することにより求めたトレンド成分により，年間を通じて陸側の地下水位は潮位よりも高く，その偏差は汀線からの距離に比例して，系統的に増加していることがわかった。すなわち，当該砂浜地盤内には安定した不圧地下水面が形成されていることを確認した。
- 3) 陸側から海側に向かう定常的な地下水流出が存在することをふまえ，シンプルな定常地下水流動理論を適用し，不圧地下水面および淡塩水境界面を推定した。
- 4) 不圧地下水面の予測曲線にもとづいて推定した淡塩水境界面は，電気伝導度計測により求めた帯水層内部の塩分構造と概ね調和的であった。
- 5) 以上の結果と整合する淡水地下水流出量の推定値は，砂浜幅 1 m あたり 1.6 m³/day に達した。

謝辞：現地観測を実施するにあたり，国土交通省姫路河川国道事務所関係各位の多大なるご配慮を賜りました。また，当該砂浜域において表面波探査を実施するにあたって，京都大学防災研究所釜井俊孝教授にご助力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 宇野木早苗 (1993)：沿岸の海洋物理学，東海大学出版，pp. 67-138。
- 門松 武・宇多高明・藤原 要・時沢真一 (1990)：東播海岸における養浜後の海浜地形変化，海岸工学論文集，第 37 巻，pp. 484-488。
- 佐藤邦明・岩佐義朗 (2002)：地下水理学，丸善株式会社，390p。
- 関口秀雄・東 良慶・Kriyo Sambodho・酒井哲郎・石井克尚 (2006)：海崖前面の養浜砂浜域における地下水環境動態，海岸工学論文集，第 53 巻，pp. 1131-1135。
- Azuma, R., K. Sambodho and H. Sekiguchi (2005)：Beach groundwater responses to tidal and meteo-hydrological forcing, Proc. 1st Fluvial and Coastal Disasters Symp., Kyoto (CD-ROM)。