

地中レーダ探査データを用いた茨城県波崎海岸 における砂浜堆積過程の解析

ANALYSIS OF BEACH PROCESSES AT THE HASAKI BEACH USING GROUND-PENETRATING RADAR DATA

有働恵子¹・柳嶋慎一²・栗山善昭³・真野明⁴

Keiko UDO, Shin-ichi YANAGISHIMA, Yoshiaki KURIYAMA and Akira MANO

¹正会員 博(工) 東北大学助教 災害制御研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

²正会員 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (同上)

⁴正会員 工博 東北大学教授 災害制御研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

Ground-penetrating radar (GPR) data was obtained at the Hasaki Beach, where long-term beach profile data was stored for more than 20 years from 1986 to 2008, in order to verify the GPR data analysis using ground water level, wave, tide, and wind data. The GPR data was attenuated significantly below the ground water level and it was demonstrated that the ground water level can be detected accurately by using the GPR. Furthermore, it was also demonstrated that border of the wave- and wind-induced sedimentation corresponded with the maximum wave run-up level and the sediment structure shows similar processes as the measured results. These facts support quantitatively that the GPR analysis is a useful technique to investigate the beach processes.

Key Words : GPR, wave run-up, sedimentation, beach erosion

1. 緒言

地中レーダ (Ground-Penetrating Radar; GPR) は、地層や埋設物などの地下構造を高速・高精度で可視化できるイメージングレーダとして 1980 年代以降実用的に利用されており、近年は 2000 年頃からは数十年程度の比較的短期の砂浜堆積物についても多くの探査例が発表されるなど (例えば, van Overmeeren¹⁾, Clemmensen et al.²⁾, Neal³⁾, Tamura et al.⁴⁾), 解析が進められている。

地中レーダシステムでは、レーダを測線に沿って移動させながら地中に放射した電磁波の反射強度を計測する。電磁波は砂礫や空洞を含む媒質による減衰は生じないものの、地下媒質中で同一波長では減衰が大きく探査能力に限界がある。土壌や岩石など地中媒質の電磁波伝搬特性は導電率、誘電率、透磁率によって定まるが、通常使用される周波数帯域 (10MHz-10GHz) で媒質の誘電率依存性は小さく、強磁性体が含まれることも希であるため、比誘電率が重要なパラメータとなる⁵⁾。

Neal³⁾によれば海岸における堆積物についての研究例は 40 例以上挙げられている。堆積構造を解析する際には、地下水面および海成層-風成層境界を正確に把握することが重要であるものの、過去の地

形データや波浪・風況等の外力データが十分に存在しないことから既存の研究の多くは反射強度の変化等をもとに可視化した画像から視覚的に決定しており、GPR 探査データの堆積構造に関する定量的検証が必要とされる。

鹿島灘に面する茨城県波崎海岸 (須田浜海岸) では、観測栈橋に沿った断面地形の計測が 1986 年以降ほぼ毎日行われており⁶⁾、また、HORS から 10km 以内の地点で 1972 年以降約 36 年間にわたり波浪および潮位データが取得されている。本研究では、HORS の地形計測断面に沿った GPR 探査データの解析を行い、波および風の外力の影響を考慮して砂浜堆積過程を解析すると同時に、解析結果の定量的検証を行うことを目的とする。

2. 調査地の概要

調査地は、茨城県須田浜海岸に常設する波崎海洋研究施設 (Hasaki Oceanographical Research Station; HORS) である (図-1)。須田浜海岸は砂浜幅 150m 程度、砂浜勾配 1/50~1/25 の逸散型海岸 (dissipative beach) である。汀線より 65m 程度陸側からは砂草が繁茂しはじめ、特に海岸林の海側

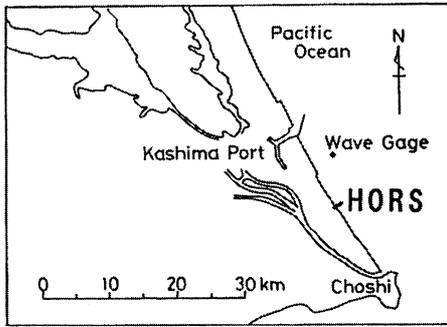


図-1 調査地（波崎海洋研究施設，HORS）の位置

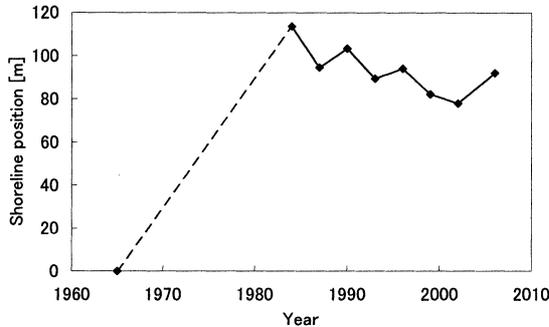


図-2 航空写真解析より得られた 1965 年から 2006 年にかけての汀線変化（茨城県，2006）．1965 年以降 1984 年頃までに汀線位置は 100m 程度前進した．

に形成された海岸砂丘付近で群生している．汀線位置は 1965 年以降 1984 年頃までに 100m 程度前進した後，波崎南部海岸（須田浜海岸の南側）におけるヘッドランド群建設以降は若干の汀線後退に転じている（図-2）．HORS で取得された約 23 年間の長期断面地形データには，荒天時の波の作用や植生の繁茂の効果による砂堆形成と，風の作用による砂堆周辺への堆砂という 2 つのプロセスにより，海岸砂丘が発達する様子が捉えられている⁷⁾（図-6 参照）．

3. 地中レーダ（GPR）探査による堆積構造の解析

(1) GPR探査の概要

地中レーダ探査は，Noggin Plus 250 レーダシステム（Sensors & Software Inc. 製）を用いて 2009 年 1 月 16 日に行った．このシステムは高川ら⁸⁾と同等のもので，電磁波の周波数は 250 MHz である．平均汀線より陸側 65 m～140 m ($y = -65 \sim -140$ m) の範囲の HORS の長期断面地形データ取得測線（図-3 黒点線）上で 5 cm 毎に電磁波の送受信を行い，反射波形の地中垂直断面を取得した．

(2) GPR探査データ

図-4 に GPR 探査データの生データ，ゲイン回復・ノイズ処理後のデータ，処理後堆積構造境界を加えたデータ，ならびに地形補正後のデータの比較

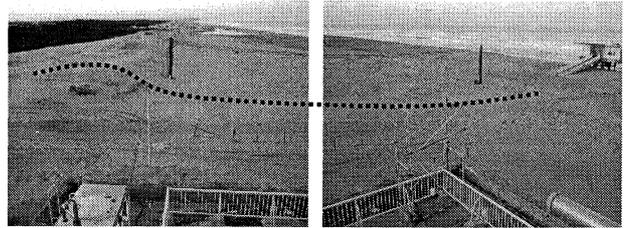


図-3 GPR データ取得日（2009 年 1 月 16 日）の砂浜の写真．点線は GPR データ取得測線を示す．

を示す． $y > -67$ m の領域では塩水の影響で探査が困難であった．生データでは地表面（ $TIME = 0$ ns）の GPR 探査データは深度方向に反射強度が減衰するものの（図-4(a)），ゲイン回復処理（深部で反射強度を増大させる処理）を行うことで 250MHz の電磁波を使用した場合 4m 程度の深さまで堆積構造を把握することが可能である（図-4(b)）．この図から反射双曲線法^{5), 8)}によって電磁波伝搬速度の推定を行ったところ， $0.08 \sim 0.12$ m/ns となり，地表面付近では比較的速度が大きく，下方では比較的速度が小さかった．van Heteren ら⁹⁾が示した一般的な不飽和砂の電磁波速度 $0.1 \sim 0.2$ m/ns および飽和砂の $0.05 \sim 0.08$ m/ns の範囲内にあり，土壤水分の鉛直方向の変化により電磁波速度に変化が生じたと考えられる．植生群落の分布等も考慮すると，砂浜における土壤水分の空間分布は複雑になっていると考えられるため，ここでは電磁波速度は 0.1 m/ns で一様に分布していると仮定し，電磁波到達時間からこの値を用いて深さの換算および地形補正を行った（図-4(d)）．地盤高の基準は波崎 DL（ $=TP - 0.687$ m）である．

図-5(a)および(b)に 1991 年と 2002 年の $y = -65$ m および -115 m 地点における地盤高および地下水位変化を示す．1991 年と 2002 年の年平均地下水位は $y = -65$ m 地点でそれぞれ 1.91m および 1.61m， $y = -115$ m 地点でそれぞれ 2.22m および 2.03m であった．1991 年と 2002 年の年平均地盤高は $y = -65$ m 地点でそれぞれ 2.62m および 3.18m， $y = -115$ m 地点でそれぞれ 4.06m および 6.36m で，11 年間の間に堆積が生じたもののこの地下水位への明確な影響は認められなかった．この 1991 年の地下水位データについて解析した柳嶋ら¹⁰⁾の結果によれば，地下水位は波の遡上位と降雨量に依存する．図-5(c)に GPR 探査（1 月 16 日）前後の $y = -65$ m 地点における地下水位変化を示す．1 月 12 日から 13 日にかけて高波浪により地下水位が最大 2.8m まで上昇しており，この影響で探査日においても 2.1m と過去の平均地下水位より上昇していた．須田浜海岸における内山ら¹¹⁾の結果および図-5 に示した過去のデータ特性を考慮すると $y = -115$ m 地点の地下水位は最大でも 3m 程度と考えられ， $y = -65 \sim -100$ m の領域の標高 $z < 2 \sim 3$ m の領域で反射強度が小さくなっている原因としてはこの地下水面の影響が挙げられる（図-4(d) 白破線）．推定地下水面の 0.2m 程度上方

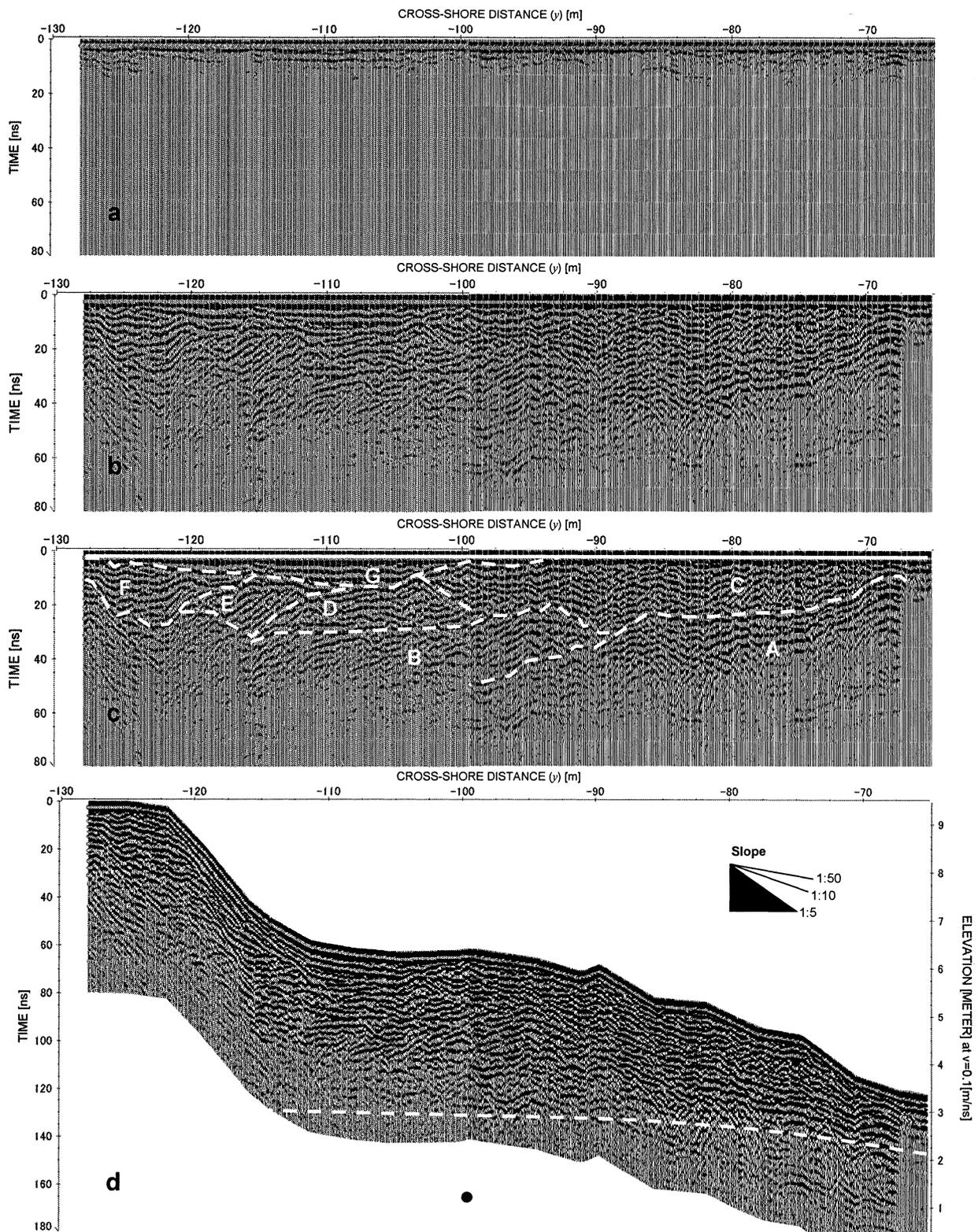


図-4 GPR 探査により得られた (a) 生データ, (b) ゲイン回復・ノイズ処理後のデータ, (c) 堆積構造の変化境界, ならびに (d) 地形補正後のデータ (Wiggle モード) の比較. (d) の地盤高 z (右軸) の基準は波崎 DL (=TP-0.687m) で, 電磁波伝搬速度を 0.1m/ns として地形補正した. 黒丸は 1965 年の推定平均遡上位置を, 白破線は $y = -65\text{m}$ 地点における計測地下水位と内山ら (1997) の結果に基づいて推定した地下水面を示す.

に水平な反射面が存在し, 地下水面が GPR 探査により捉えられた可能性が高い.

図-4 (c) に示す堆積構造の変化境界は, 堆積構造

を示す黒線のうち他の線により切られる構造となっている線に着目し表示したものである. これと図-4 (d) に示す地形補正後のデータより, 堆積構造の上

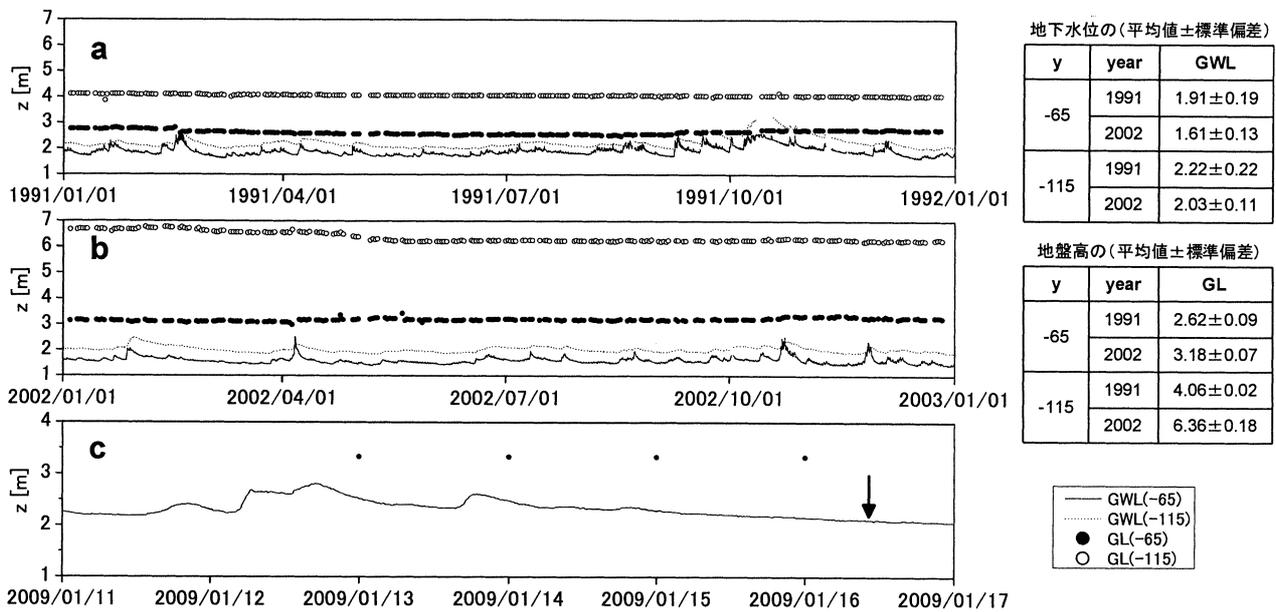


図-5 (a) 1991年と(b) 2002年の $y = -65\text{m}$, -115m 地点における地下水位 GWL および地盤高 GL 変化と (c) GPR 探査前後の $y = -65\text{m}$ 地点における地盤高 GL および地下水位 GWL 変化。 図中矢印は探査時の地下水位を示す。

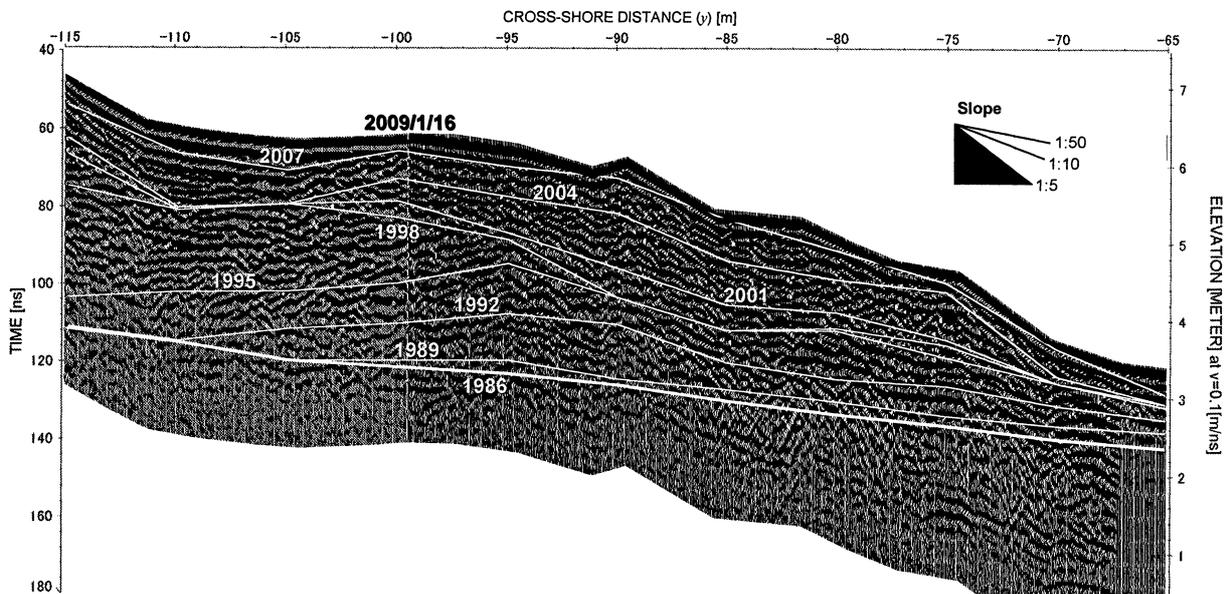


図-6 地形補正後の GPR 探査データと HORS 地形データより得られた 3 年毎の堆積断面データとの比較。1986 年～2007 年の堆積断面データは、各対象日（ここではいずれの年も 9 月 30 日）について対象日以降の各測点における地盤高の最小値を HORS 地形データから求めこれを岸沖方向に直線で結んだもので、堆積時期を示す（図-7 参照）。

下関係から堆積過程を推察すると、堆積構造が判読可能な領域では $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$ の順に堆積過程が進み、C は D と G の間の堆積物と推察された。また、A 領域では比較的前浜形状に平行な堆積構造となっていたのに対し、それ以外の領域では複雑な堆積構造となっていた。

HORS 地形データより求めた 3 年毎の堆積断面データを図-4(d)に重ね合わせたものを図-6 に示す。一時的に堆積が生じて、それ以降に侵食があれば堆積物としての残存量が変化することを考慮し、各測点における対象日以降の地盤高の最小値を HORS

地形データから求めこれを岸沖方向に直線で結んだものを堆積物の堆積時期を示す堆積断面データとした（図-7 参照）。1986 年～1995 年と 2004 年～2007 年の堆積物の残存範囲は前浜から後浜まで広範囲であるものの、1995 年～1998 年は砂丘付近 ($y < -95\text{m}$) に限定され、1998 年～2004 年は砂丘の海側 ($y > -105\text{m}$) に限定される。1986～1989 年および 1998～2001 年の堆積物の残存量（堆積物量）は他の期間と比べて比較的小さく、また、砂丘付近においては 1995 年～1998 年の堆積物量が大きかった。堆積物量が小さいことは他期間と比べて堆積量が小

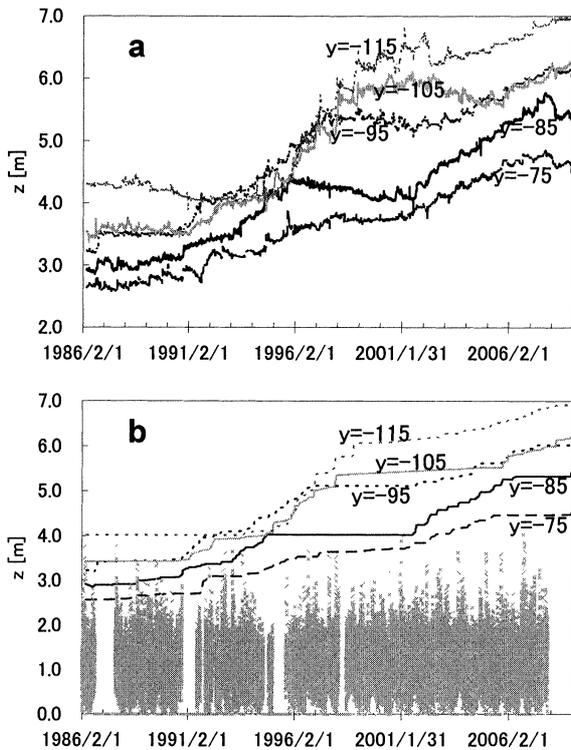


図-7 (a) $y=-75\sim-115\text{m}$ 地点における地盤高の観測結果と (b) 堆積時期 (図-6 参照) および波の遡上位 (波崎 DL 基準, 灰プロット表示) の推定結果. 波浪データとして NOWPHAS (鹿島) データを, 潮位データとして鹿島港潮位データを使用した. 遡上位の非表示部分は波浪・潮位データの欠測を示す. 1998 年以前は $y=-95\text{m}$ より陸側で, それ以降は $y=-95\text{m}$ より海側で堆積物の残存量 (堆積物量) が大きい.

さいかあるいは侵食量が多いことを意味し, 堆積物量が多いことは他期間と比べて堆積量が多いか, あるいは侵食量が少ないことを意味する. HORS 地形データより得られた堆積過程 ($-115\text{m} < y < -65\text{m}$) は GPR 探査データより得られた堆積過程 (図-4(c)) と矛盾せず定量的にも概ね対応しており, GPR 探査データの信頼性が確認された.

4. 砂浜堆積過程に及ぼす波および風の外力

図-4(c) の A 領域では前浜形状に比較的平行な堆積構造であるのに対し, それ以外の領域では複雑な堆積構造で, 鉛直方向の変化が認められた. 波および風の外力と堆積構造との関係について議論する.

(1) 砂浜堆積過程

図-7(a) に, $y=-75\sim-115\text{m}$ 地点における地盤高の観測結果を示す. 1991 年以降いずれの地点においても徐々に堆積が生じたものの, その後の変化にはタイムラグがあり, $y=-75\sim-85\text{m}$ 地点では 1996 年頃, $y=-95\text{m}$ 地点では 1997 年頃, $y=-105\sim-115$

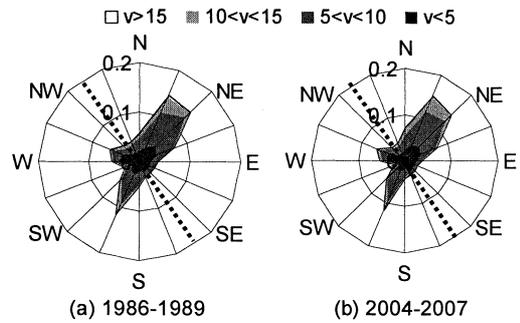


図-8 (a) 1986 年 10 月～1989 年 9 月および (b) 2004 年 10 月～2007 年 9 月の風配図 (風速別の出現風向割合). 黒点線は海岸線方向を示す. 過去 21 年間で風配に顕著な差異は認められない.

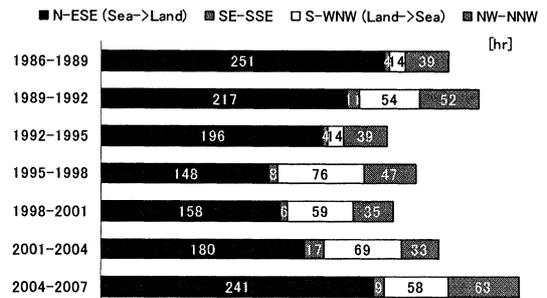


図-9 1986 年～2007 年の $v > 15 \text{ m/s}$ の風向別出現頻度 (図-8 参照).

m 地点では 2001 年頃に地盤高がピークとなった. また, いずれの地点においてもピーク後地盤高が若干低下し, $y=-75\sim-85\text{m}$ 地点では 2001 年頃, $y=-105\sim-115\text{m}$ 地点では 2004 年頃から再び地盤高が上昇傾向となった.

(2) 波による堆積過程と堆積構造との関係

波の外力の影響を議論するため, 波の遡上位の時系列変化を推定する. Udo・Yamawaki¹²⁾ が提案した須田浜海岸における波の遡上高 R_T に静水位 SWL を加えて, 波の遡上位 z_R が得られる.

$$z_R = R_T + SWL = 0.30H_S + 0.12 + SWL \quad (1)$$

ここで, H_S は有義波高である. この式より, 現存する波浪・潮位データを用いて 1986 年から 2007 年の波の遡上位を推定した. 波浪データとしては NOWPHAS (鹿島) のデータを, 潮位データとして鹿島港の潮位データを使用した.

図-7(b) に, 堆積時期 (図-6 参照) および波の遡上位の推定結果を示す. 対象期間中の波の遡上位の平均値, 最大値, ならびに最小値はそれぞれ 1.18m, 4.31m, ならびに -0.39m であった. 近年は荒天イベント時の波の遡上位が若干増大している. 1993 年頃までは -85m 地点まで波が遡上していたものの, これ以降は -75m 地点まで波が遡上することも少な

くなつたと推定され、1991年以降にみられた地盤高の上昇は主に風の外力によるものと考えられる。これは、GPR探査データ解析で得られた堆積構造変化境界のA領域における最大高さ(4m程度)と概ね一致し、堆積過程の外力を定量的に説明可能であることを裏付けるものである。

(3) 風による堆積過程と堆積構造との関係

風の外力の影響を議論するため、須田浜海岸に最も近い観測地である「銚子」の1986年～2007年のアメダスデータを用いて風況特性の解析を行う。

図-8に1986年10月～1989年9月および2004年10月～2007年9月の風配図(風速別の出現風向割合)を、図-9に同時期の $v > 15\text{m/s}$ の風向別出現頻度を示す。過去21年間で風配に差異は認められず、特にNNE～NE方向(海風)およびSSW方向(陸風)が卓越していた。強風時には海風である場合が多い。

HORS計測データおよびGPR探査データより得られた堆積過程や堆積構造と、強風の出現頻度との間に明確な相関関係は認められなかった。これは風速の空間分布の非一様性と卓越風向の多方向性により地形が3次元的かつ複雑に変化するためと考えられる。また、後浜の地盤高は年々上昇しており、後浜の地形勾配は大きくなる傾向にある。過去の写真判読によれば地盤高の上昇により植生の繁茂境界が海側へ広がっており、植生の侵食抑制・堆積促進効果が飛砂量の空間分布の非一様性や地形勾配の増大に大きく寄与しているようである。

今後さらに3次元的なGPR解析を行う、あるいはボーリングコアの調査も同時に行うことにより、堆積方向等のより詳細な堆積過程を推察できる可能性がある。GPR探査データを用いることにより、地形データ解析のみでは限界のある、詳細な堆積過程の解明が期待される。

5. 結論

茨城県須田浜海岸に常設する波崎海洋研究施設(HORS)の地形計測断面に沿ったGPR探査データを用いて堆積構造の解析を行い、波の遡上位を推定することによって堆積構造と波および風の外力との関係について調べ、須田浜海岸の砂浜堆積過程について定量的に議論した。

GPR探査時の計測地下水位より推定した地下水面より深部でGPRの反射強度が急激に減衰しており、GPR探査データから地下水面のおおよその推定が可能であることを定量的に示した。

堆積構造における海成層-風成層境界については、これまで多くの研究者がボーリングコア等の解析も併用した定性的な解析結果より判断を行ってきた。ここでは、現地計測により得られた地形変化と波の遡上位の関係から波の外力により地形変化の生じる鉛直方向高さやGPR探査データとの関係について定量的に議論し、荒天イベント時の波の遡上位付近よ

り下方では前浜形状に比較的平行な堆積構造であるのに対し、それより上方では複雑な堆積構造であるという鉛直方向変化を定量的に検証した。これにより、GPR探査データ解析によって堆積過程の外力を説明することが可能な解析例を示した。

以上は、これまで外力との関係について議論されることの少なかったGPR探査データの解析において定量的な裏付けを示すものであり、今後のGPR解析において貴重な知見となる。

謝辞：波崎海岸の地形および底質粒径データは茨城県土木部河川課に、潮位データは国土交通省鹿島港湾工事事務所に、波浪データ(NOWPHAS)は独立行政法人港湾空港技術研究所海象情報研究室に提供していただいた。GPR探査データ解析を行うにあたり、東京大学高川智博氏、産業総合研究所田村亨氏に有益なご助言を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) van Overmeeren, R.A.: Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands: a radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology, *J. Appl. Geophys.*, 40, pp. 1-18, 1998.
- 2) Clemmensen, L.B., Andreasen, F., Heinemeier, J. and Murray, A.: A Holocene coastal aeolian system, Vejers, Denmark: landscape evolution and sequence stratigraphy, *Terra Nova*, 13, pp. 129-134, 2001.
- 3) Neal, A.: Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, *Earth-Science Reviews*, 66, pp. 261-330, 2004.
- 4) Tamura, T., Murakami, F., Nanayama, F., Watanabe, K. and Saito, Y.: Ground-penetrating radar profiles of Holocene raised-beach deposits in the Kujukuri strand plain, Pacific coast of eastern Japan, *Marine Geology*, 248, 11-27, 2008.
- 5) 佐藤 源之：地中レーダによる地下イメージング, 電子情報通信学会論文誌 C, vol.J85-C, No.7, 2002.
- 6) Kuriyama, Y.: Medium-term bar behavior and associated sediment transport at Hasaki, Japan, *J. Geophys. Res.*, 107(C9), 3132, doi:10.1029/2001JC000899, 2002.
- 7) 有働恵子, 栗山善昭：後浜変形過程に及ぼす波の影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 546-550, 2006.
- 8) 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, 681-685, 2008.
- 9) van Heteren, S., Fitzgerald, D.M., McKinlay, P.A., Buynevich, I.V.: Radar facies of paraglacial barrier systems: coastal New England, USA, *Sedimentology*, 45, pp.181-200, 1998.
- 10) 柳嶋慎一, 加藤一正, 福田 真人：現地海岸における前浜地下水位の変動特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.411-415, 1993.
- 11) 内山雄介, 灘岡和夫, P. Rolke, 足立久美子, 仲宗根琢磨, 八木宏：海岸地下浸透流およびそれに伴う沿岸域への栄養塩供給過程の解析, 土木学会海岸工学論文集, 第45巻, pp.1076-1080, 1998.
- 12) Udo, K and Yamawaki, S.: Short-term backshore processes under wave and wind actions, *Journal of Coastal Research*, SI 50, pp. 237-241, 2007.