

地中レーダ探査データを用いた茨城県波崎海岸 の砂浜空間堆積過程の解析

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

有働恵子¹
Keiko UDO

¹正会員 博(工) 東北大学准教授 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 along three measurement lines were obtained at the Hasaki Beach, where long-term beach profile data were stored for more than 20 years from 1987 to 2008, in order to verify the GPR data analysis using ground water level, wave, tide, and wind data. The GPR data of the three measurement lines showed strong reflectors at the same positions and the position was corresponded with the shoreline position in 1965 when the Kashima port had been constructed; the strong reflectors indicated that the foreshore slope had been mild from 1960s to the present. Furthermore, the GPR data demonstrated that the ground water level can be detected accurately by using the GPR and that a height of border of the wave- and wind-induced sedimentation corresponded with the height calculated from the existing method using the wave data. 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、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⁾, 高川ら⁵⁾, 有働ら⁶⁾), 解析が進められている。

Neal³⁾は、海岸における堆積物についての研究例を 40 例以上挙げている。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。過去の研究例が定性的な解析に留まっているのに対し、有働ら⁶⁾は須田浜海岸 (波崎海洋研究施設, Hasaki Oceanographical Research Station (HORS)) における長期かつ高時間分解能 (1986 年以降ほぼ毎日) の岸沖断面地形データ⁷⁾を用いて地中レーダ探査データの検証を行い、波浪データとの関係から、GPR 探査データより読み取られる堆積過程の妥当性を定量的に示した。

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⁸⁾。

鹿島灘に面する茨城県須田浜海岸では、1986 年以降砂浜の平面地形計測が行われており^{9), 10)}, また、須田浜海岸から 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 の地形計測測線を含む 6 測線に沿った GPR 探査データの解析を行い、既存の地形や汀線位置データと比較することによって、GPR データより抽出される情報の有用性について検討することを目的とする。

2. 調査地の概要

調査地は、茨城県須田浜海岸に常設する HORS である (図-1)。須田浜海岸は砂浜幅 150m 程度、砂

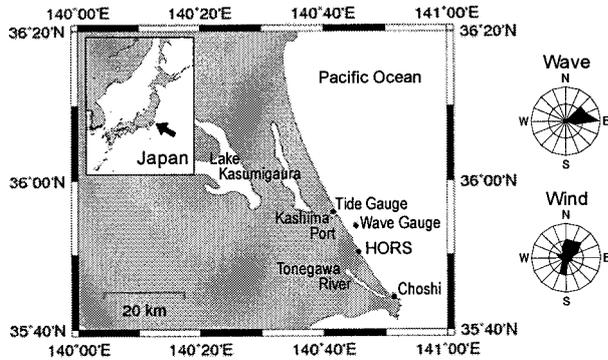


図-1 調査地（波崎海洋研究施設，HORS）の位置

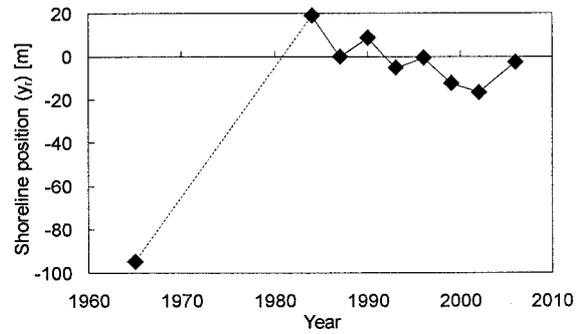


図-3 航空写真解析より得られた1965年から2006年にかけての須田浜海岸の汀線変化（茨城県，2006）．1987年の汀線位置を $y=0$ とした．

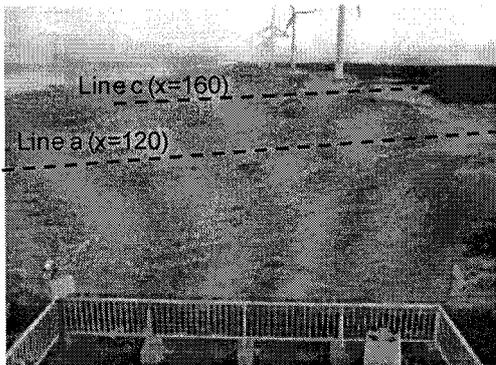


図-2 GPR データ取得日（2009年1月16日）の砂浜の写真．点線はGPR データ取得測線（Line a および c）を示す．

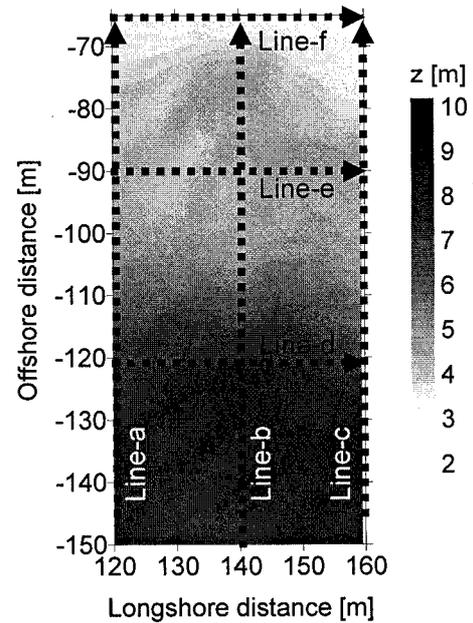


図-4 調査領域の地形とGPR データ取得測線 a~f

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（ $y=-65$ m）からは砂草が繁茂しはじめ，特に防砂林の海側に形成された海岸砂丘付近で群生している（図-2）．茨城県（2006）の航空写真測量結果によれば，須田浜海岸では，1960年代の汀線位置（ $y=-100$ m）からヘッドランド建設がはじめられた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が生じている（図-3）．1965~1984年の汀線前進は，鹿島港建設に伴う1965~1971年の掘削土砂約4611万 m^3 による養浜に起因するとみられる¹¹⁾．

調査対象領域は，有働ら⁶⁾がGPR探査データ解析を行ったHORS 栈橋に沿った測線（ $x=0$ m）より銚子側120~160 m（ $x=120\sim 160$ m）の領域で，6つの測線 a~f に沿ってGPR データを取得した（図-2，図-4）．測線 a（ $x=120$ m）および c（ $x=160$ m）においては，1987年以降毎月の地形データが蓄積されている．HORS 栈橋（ $x=0$ m）に沿って取得された約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-5参照； $y=-50\sim -100$ m付近）．

3. 地形計測による砂浜堆積過程の解析

測線 a および c に沿った岸沖断面地形，波高（NOWPHAS（鹿島）），潮位（鹿島港），風速（HORS 栈橋先端），ならびに汀線位置（HORS）および波の推定遡上位置の時系列を図-5に示す．断面地形，波高，潮位・風速，ならびに汀線位置の計測頻度は，それぞれ毎月，2時間毎，毎時，ならびに毎日である．波の遡上位置は，現存する1987年から2008年NOWPHAS（鹿島）の波浪データ（ H_0 ）および鹿島港の潮位データ（SWL）を用いてUdo・Yamawaki¹²⁾と同様に $z_R=0.38H_0+SWL$ より推定した．

測線 a（ $x=120$ m）および測線 c（160 m）における断面地形は，毎日計測が行われている $x=0$ m 測線上の地形¹³⁾と比べて計測頻度が低いものの，波浪条件の変化に伴う $y=-30$ m 付近のバーム発達や1991年頃以降見られた $y=-100$ m 付近の砂丘発達など，同様の变化特性が認められた．一方，1991

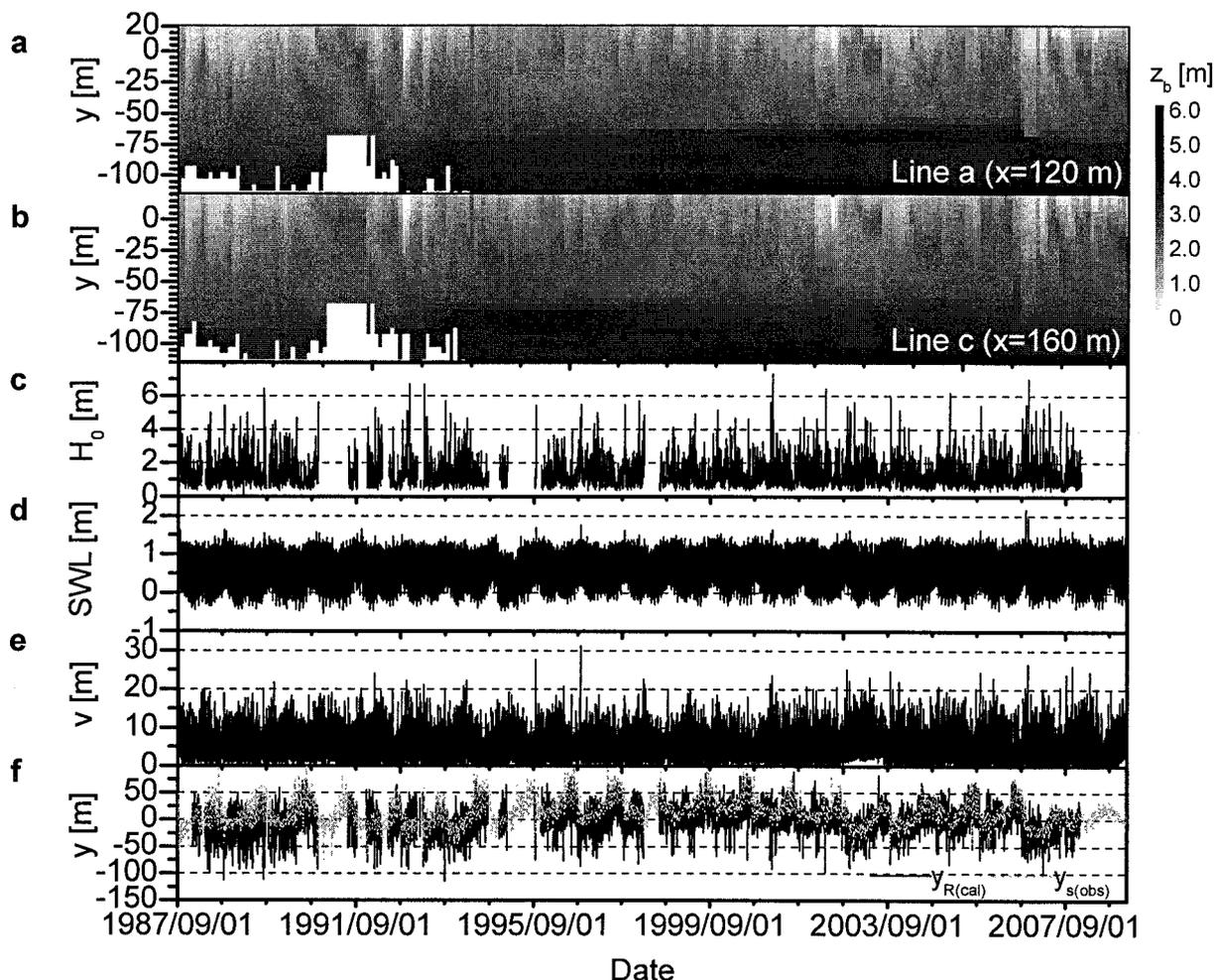


図-5 (a)測線 a ($x=120$ m) および(b)測線 c ($x=160$ m) における岸沖断面地形, (c)波高, (d)潮位, (e)風速, ならびに(f)汀線位置および波の推定遡上位置の時系列. $y < -50$ m における地盤高の白表示は欠測を示す.

年頃以降 2000 年頃までは $x = 160$ m 測線で $y = -75$ m 付近に前砂丘が発達し, 2000 年以降 2006 年までは $x=120$ m 測線で $y = -75$ m 付近に前砂丘が発達し, 異なる変化が生じた. この 2006 年までの変化は砂丘の 3 次元的変形によるものと考えられる. 2006 年の前砂丘の侵食は, 台風 0616 号の接近に伴う波高および潮位の増大に起因するものである¹⁴⁾.

4. 地中レーダ (GPR) 探査による砂浜空間堆積構造の解析

(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. このシステムは有働ら⁹⁾と同じもので, 電磁波の周波数は 250 MHz である. 前述した 6 測線 (図-2, 図-3 参照) 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. 測線 a および c は HORS の長期断面地形データ取得測線 ($x=120, 160$) と概ね一致し, 得られ

た GPR 探査データはこの地形データと比較した.

(2) GPRデータより得られる砂浜堆積特性

図-6 に各測線に沿った GPR 探査データのゲイン回復 (深部で反射強度を増大させる処理) ・ノイズ処理 (背景除去・バンドパスフィルタ) および地形補正後のデータを示す. 有働ら⁹⁾と同様, $y > -67$ m の領域では塩水の影響で探査が困難であった. 電磁波速度は 0.1m/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. 地盤高の基準は波崎 DL (=TP-0.687m) である. 探査可能深度は 4 m 程度であった. 以上の詳細については有働ら⁹⁾を参照されたい.

柳嶋ら¹⁵⁾の結果によれば, 地下水位は波の遡上位と降雨量に依存し, 内山ら¹⁶⁾および有働ら⁹⁾の結果より, $y = -115$ m 地点の地下水位は最大でも 3m 程度でその海側では地盤高の減少とともに若干低下すると考えられる. 図-6 の色の濃淡から判断して, 探査可能深度内にあるにもかかわらず標高 $z < 2 \sim 3$ m ($y = -65 \sim -100$ m) の領域で反射強度が小さくなっているが, この原因としては, 地下水面の影響

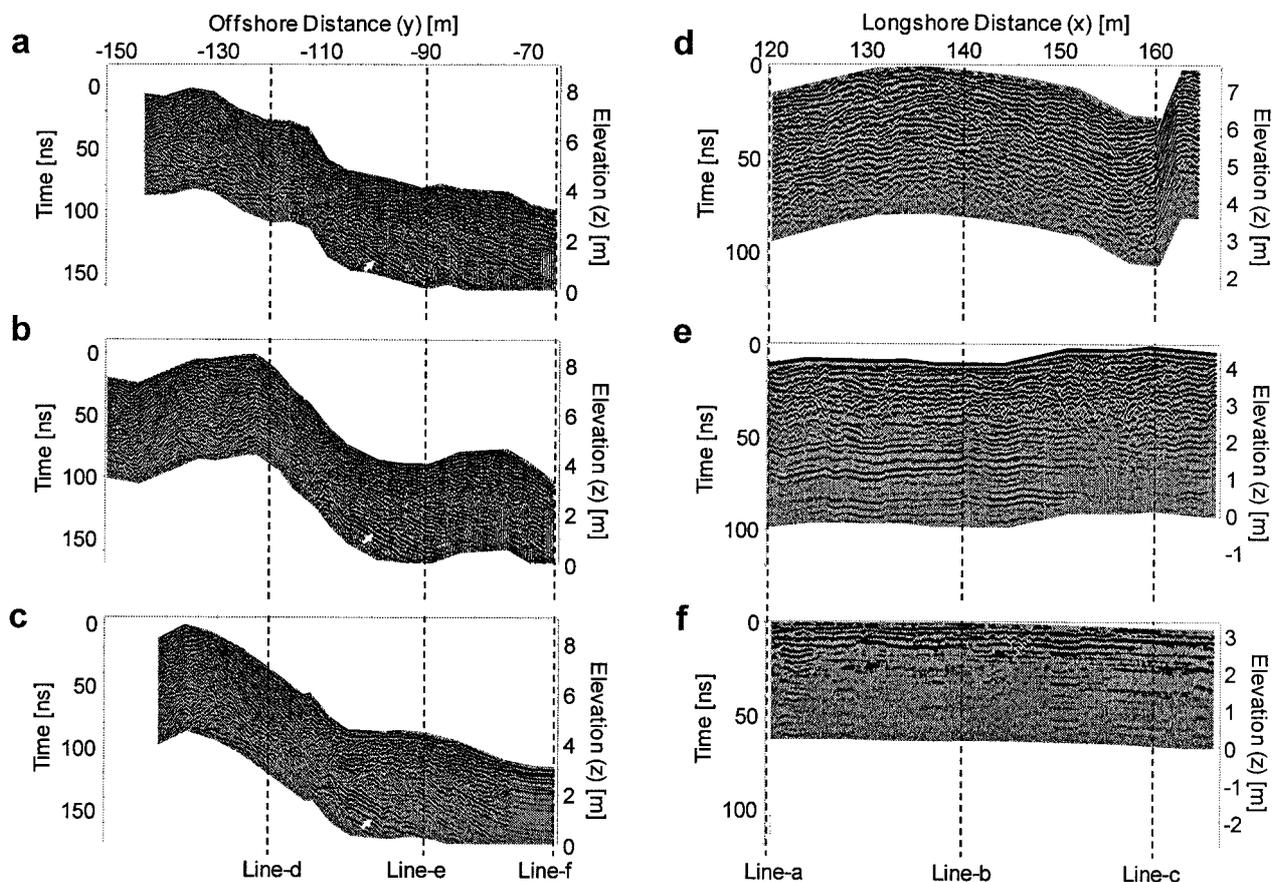


図-6 ゲイン回復・ノイズ処理および地形補正後の測線 a ($x=120$ m), b ($x=140$ m), c ($x=160$ m), d ($y=-120$ m), e ($y=-90$ m), ならびに f ($y=-65$ m) 上の GPR 探査データ (有働ら, 2009). 地盤高 z (右軸) の基準は波崎 DL (=TP-0.687m) で, 電磁波伝搬速度を 0.1m/ns として地形補正した. 測線 a~c では同位置に強反射面が捉えられていた (白矢印).

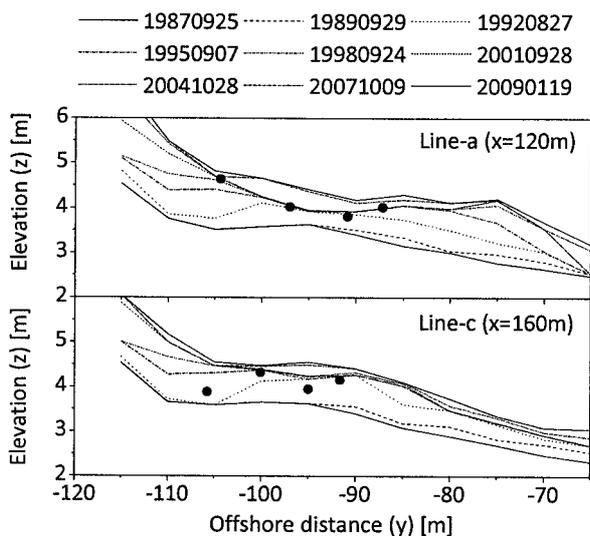


図-7 測線 a および c 上の HORS 地形データより得られた 2~3 年毎の堆積断面データ (図-5 (a) (b) 参照). 黒丸は, 図-8 の白丸の位置を示す.

が挙げられる.

全測線の堆積構造には, $z=3$ m 付近を境界としてこれの下方では現在の前浜形状に比較的平行な堆積

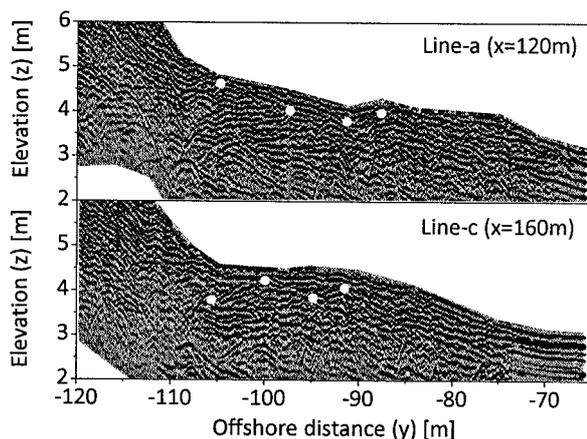


図-8 測線 a および c 上の堆積構造の拡大図. 白丸を直線で結んだ境界付近の上下で堆積構造に変化が認められる (図-7 参照).

構造であるのに対し, 上方では複雑な堆積構造であるという鉛直方向変化が捉えられ, この傾向は沿岸方向に共通していた. 有働・栗山¹³⁾は波の遡上率 P ($z_R > z$ を満たす時間の割合) が 0.1% 以上の場合に地形変化への波の影響が無視できないことを示している. 波浪データ取得期間において $P=0.1\%$ となる

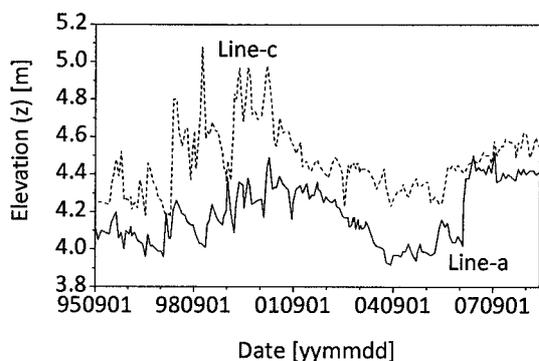


図-9 測線 a および c 上の $y=-95$ m 地点の地盤高変化。

のは $z=2.7$ m で、堆積構造の変化境界 ($z=3$ m) と概ね一致する。以上より、 $z=3$ m の上方では風の外力により、下方では波の外力により堆積が生じたと判断された。

図-7 に示す 2~3 年毎の堆積断面データは、各測点における対象日以降の地盤高の最小値を岸沖断面地形データ (図-5a, 5b) から求めこれを岸沖方向に直線で結んだもので、例えば 1987 年と 1989 年の堆積断面間の土砂は 1987~1989 年に堆積したことを示す。測線 a および c のいずれにおいても、概ね 1987~1992 年の堆積物は砂丘海側 ($y < -105$ m) で、1992~2004 年の堆積物は砂丘付近 ($y > -105$ m) とバーム ($a: y = -75$ m, $c: y = -90$ m) 付近で、2004~2007 年は砂丘とバームの間で残存していた。堆積物の残存は、堆積量とその後の侵食量と比べて大きいことを意味し、堆積量と侵食量のバランスにより堆積物残存量が増減する。

GPR 探査データについて堆積構造が変化する境界線の節点を抽出し (図-8)、これと堆積断面データを比較したところ、1995~2004 年の堆積断面データと概ね一致していた。1995~2004 年の堆積断面データが広範囲に渡って重なっている (堆積物残存量が少ない) のは、1995~2004 年の堆積量が侵食量以上となっていたためである (図-9)。その後約 1 年間は地盤高変化が小さかったことを考慮すると、堆積構造の境界は、2004 年の侵食面あるいは長期的な露出面を捉えたものと考えられる。

(3) GPR データより得られる前浜勾配の変化

測線 a~c のいずれの GPR データにも、 $(y, z)=(-100, 1)$ 付近を通過する勾配 0.13 程度の強反射面が検出された (図-6 参照)。1972 年の平均潮位が 0.83 m で、1972~2008 年の 36 年間の潮位トレンドが 5.5 mm yr^{-1} であったことを考慮すると、汀線位置が $y=-95$ m であった 1965 年の平均潮位は 0.8 m 程度だったと考えられ、1965 年の汀線位置 (図-3 参照) と強反射面は概ね一致する。これは、1960 年代に施工された養浜の砂 (鹿島港の掘削土砂) と養浜前の地形表面の砂の粒径の差異により、養浜直前の地形が捉えられたためと考えられる。さらに、測

線 a と c の GPR データには、 $(y, z)=(-75, 1)$ 付近を通過する勾配 0.09 程度の強反射面も検出された。現在の前浜勾配が 0.03 程度であることから、1965 年以降現在まで前浜勾配は 0.13, 0.09, 0.03 と減少しており、堆積の過程において勾配が緩やかになってきたことが読み取れる。Wiegel¹⁷⁾ の前浜勾配と中央粒径との関係から、1965 年頃の底質粒径は 0.4~0.7 mm で、0.3~0.5 mm、そして現在の 0.2~0.3 mm 程度¹²⁾ と堆積の過程において底質粒径が細粒化してきたと推定される。

GPR 探査データより得られた堆積構造は、航空写真測量により得られた汀線位置や HORS 地形データより得られた測線 a および c における堆積過程と矛盾せず定量的にも概ね対応しており、空間的な GPR 探査データの有用性が確認された。

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空間的な堆積構造の解析を行い、堆積構造と測量地形データおよび航空写真測量により得られた汀線位置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。

有働ら⁹⁾と同様に、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、 $z=3$ m 付近の上方と下方で GPR データの堆積構造が異なり海成-風成境界をおおよそ推定可能であること、ならびにこの堆積構造が地形測量結果より得られた侵食面あるいは長期的な露出面と概ね一致することを示した。これらに加えて、航空写真測量により得られた 1960 年代の汀線が、GPR データで捉えられた沿岸方向に一樣な強反射面上に位置すること、ならびに、この前浜高と概ね一致する強反射面の勾配が堆積過程において緩やかになってきており底質粒径が現在より粗粒であったと考えられることを定量的に示した。

以上は、これまで実測データとの比較による詳細な検証が行われてこなかった、砂浜における GPR 探査データの有用性について定量的な裏付けを示すものである。GPR データの空間分解能等の問題から、現時点では GPR データの情報を十分に活かすきれない部分もあるものの、長期的な情報が不足している砂浜 (後浜領域) においても有用な情報を抽出できる可能性があり、今後更なる GPR 計測技術の発展が期待される。

謝辞：須田浜海岸の地形および底質粒径データは、独立行政法人港湾空港技術研究所 沿岸土砂管理研究チームおよび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 海象情報研究チームに提供していただいた。記して謝意を表す。

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, pp. 11-27, 2008.
- 5) 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.
- 6) 有働恵子, 柳嶋慎一, 栗山善昭, 真野明: 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, *海洋開発論文集*, 第 25 巻, pp. 1221-1226, 2009.
- 7) Kuriyama, Y.: Medium-term bar behavior and associated sediment transport at Hasaki, Japan, *J. Geophys. Res.*, 107(C9), 3132, doi:10.1029/2001JC000899, 2002.
- 8) 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, pp.520-530, 2002.
- 9) 栗山善昭, 友田尚貴: 汀線近傍地形の沿岸方向の変動特性, *海岸工学論文集*, 第 53 巻, pp. 551-555, 2006.
- 10) 柳嶋慎一: 汀線付近における底質粒径の時空間変化に関する現地調査, *海岸工学論文集*, 第 52 巻, pp. 401-405, 2005.
- 11) 宇多高明: 日本の海岸侵食, *山海堂*, 443p, 1997.
- 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.
- 13) 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.
- 14) 武若聡, 笹倉慎也, Galal, E., 柳嶋 慎一: 2006 年秋季低気圧による鹿島灘の侵食, *土木学会論文集 B*, Vol. 65, No. 4, pp.277-284, 2009.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Wiegand, R.L.: *Oceanographical Engineering*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 531 pp., 1965.