

海浜堆積物の地中レーダ記録

田村 亨¹⁾・村上 文敏¹⁾・七山 太¹⁾・齋藤 文紀¹⁾・渡辺 和明²⁾

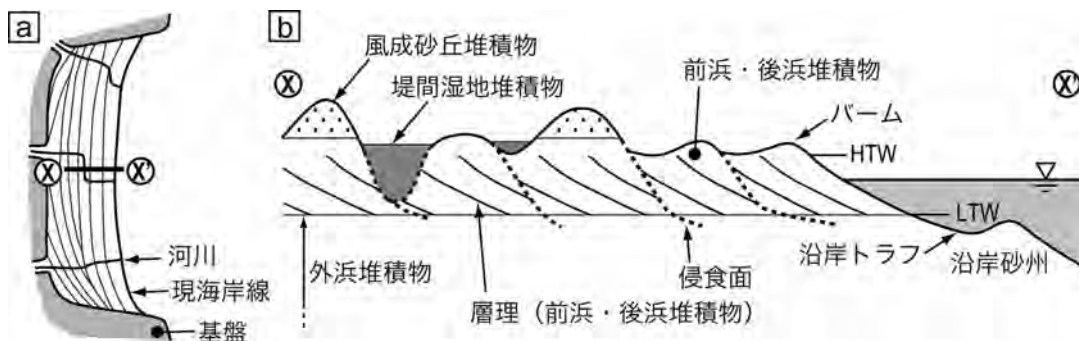
1. はじめに

海浜堆積物は、地中レーダ探査の適用対象として主要なものの一つである。外洋に面した海岸の砂浜や礫浜に土砂が集積することで形成される海浜堆積物では、地中レーダによって堆積構造を探査できることが知られている。さらにその堆積構造は、比較的単純明瞭で、過去のストームおよび巨大地震の履歴や海岸線前進方向の変化、海水準の変動などを記録していることが期待される。1990年代以降、地中レーダを用いた海浜堆積物の研究が盛んに行われるようになってきた(例えば, Jol *et al.*, 1996; Meyers *et al.*, 1996)。我々のグループでも、千葉県九十九里浜や宮城県仙台平野といった、沖積層が海浜堆積物より構成される浜堤平野において地中レーダの適用を行い、探査手法の向上や探査記録の理解に努めてきた。ここでは、海浜堆積物への地中レーダの適用例、およびその結果得られる記録が過去の環境やイベントの復元にどのように用いられるかについて紹介する。

2. 海浜堆積物と浜堤平野

地中レーダ探査について述べる前に、適用対象である海浜堆積物と浜堤平野の一般的特徴について簡単にまとめる。第1図に、浜堤平野の地形と表層付近の地質断面を模式化したものを示す。海浜は、陸側から砂丘、後浜、前浜、外浜の要素からなる。砂丘は海浜から砂が風で運搬されて発達する。後浜より沖が波浪の作用が及ぶ部分で、ストーム時の高波により、砂丘の海側斜面は侵食される。後浜では風やストーム時の波により砂が堆積し、表面は海側に傾く場合と、陸側に傾く場合がある。前浜では普段から打ち上げ波(*swash*)が作用し、海側に傾斜する平滑面が発達する。低潮位線より沖の外浜は、砕波が作用して沿岸砂州およびトラフが発達する上部外浜と、その沖の平滑な下部外浜に分かれるが、地中レーダ探査では探査深度の限界から普通は上部外浜の堆積物までが対象である。

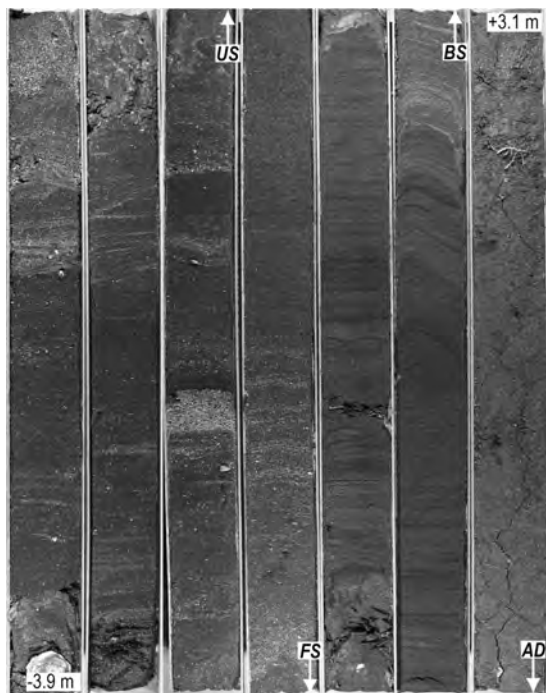
浜堤平野は、海浜に土砂が運搬され堆積することにより形成される。浜堤平野の微地形は、主に海岸



第1図 浜堤平野の(a)平面および(b)地形・地質断面の模式図。浜堤平野の平面図における線は、浜堤と堤間湿地の伸び方向を表す。前浜・後浜堆積物の層理は、外浜堆積物まで連続する場合と、不連続な場合がある。HTW:高潮位線, LTW:低潮位線。

1) 産総研 地質情報研究部門
2) 産総研 地質調査情報センター

キーワード: 海浜, 地中レーダ, 堆積物, 堆積構造, 海面変動, 浜堤平野, ストーム



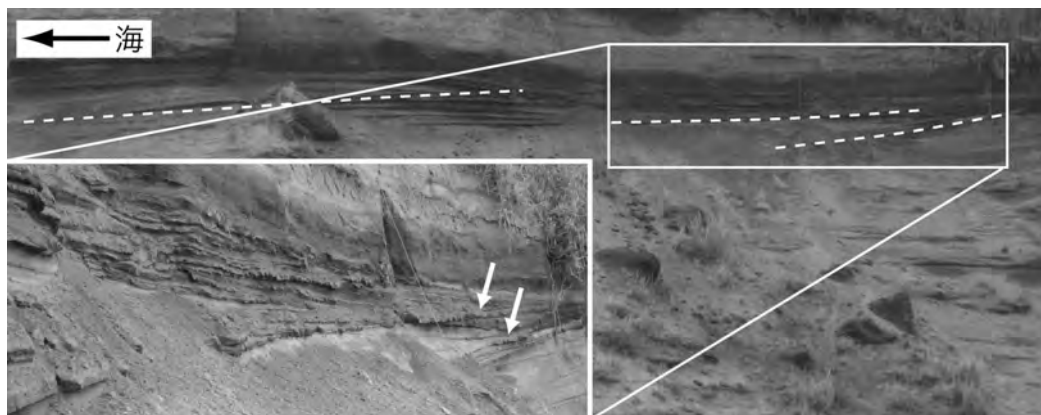
第2図 現在の海浜(九十九里浜, 作田海岸)において採取したボーリングコアの断面。右上が上位で、それぞれ長さ1mごとに分割されている。AD: 風成砂丘相, BS: 後浜相, FS: 前浜相, US: 上部外浜相。

線と平行からやや斜交する方向に発達する浜堤 (beach ridge, 砂堤), およびその間の堤間湿地である。浜堤は陸側のものほど形成年代が古く, 海岸線が平野の拡大とともに海側へ移動していったことを表している。わが国では最終氷期以降の海面上昇が終

わった5,000~6,000年前以降に, 多くの浜堤平野が拡大している(森脇, 1979; 松本, 1981)。表層が砂からなる浜堤は泥で覆われる堤間湿地より高い。この理由としては, 海岸線が前進する過程で砂丘が連続的ではなく間欠的に発達すること, 後浜が陸側に傾斜する場合にバーム(汀段)の峰部がそのまま残留していることが挙げられる。成因に応じて名称を区別することもあるが, 総じて浜堤と呼ぶのが一般的である(Otvos, 2000)。これら2つの場合では, 堤間湿地の地下にも前進性の海浜堆積物が見られる。一方, 堤間湿地の凹みは, 河川が河口閉塞により沿岸方向に流れ, その流路が放棄されて泥質堆積物に重点されることでも形成される。この場合, 地下には海浜堆積物の上部は見られない。

浜堤や現海浜の上でボーリングコアを採取すれば, 海浜堆積物の地層を観察することができる(第2図)。第1図に示すように, 地層は海岸線の前進に対応して形成されるため, 下位より外浜堆積物, 前浜および後浜堆積物, 砂丘堆積物の積み重なりが見られる。上部外浜堆積物はトラフ型斜交層理を示し, 前浜・後浜堆積物は重鉱物の濃集する平行葉理や上部ではリップル斜交葉理を示す。最上位の砂丘堆積物は根痕などが見られる。このように堆積相から海浜堆積物は堆積環境ごとに区分される。

更新世以前の海浜堆積物の堆積構造は, 露頭で面的に観察することができる。前浜堆積物の層理は, 海側に傾斜する(第3図)。この勾配は元の前浜の勾配(おおむね1/10~1/100程度)に等しい。また傾斜する層理は海側に傾く下に凸の侵食面によって切られ,



第3図 海浜堆積物の露頭断面。左が海側。海側に傾斜する, 前浜堆積物の層理は, 同じく海側に傾斜する侵食面(破線)で切られる。拡大写真において矢印で示すのが, 侵食面である。下総層群木下層。



第4図 浜堤平野における地中レーダ探査風景。a) 現在の海浜での探査。宮城県仙台市若林区荒浜海岸。b) 舗装道路の路肩での探査。千葉県一宮町。c) 未舗装農道での探査。宮城県仙台市若林区。d) 未舗装農道での探査。千葉県大網白里町。

さらに海側の層理が侵食面に対してオンラップしたりダウンラップしたりする。この侵食面は、大規模なストーム時や堆積物供給の不足による砂浜の侵食によって形成される。侵食面によって区切られるくさび型のユニットは、前浜の平滑面に砂が堆積することによる、海岸線の一時的な前進を示す。

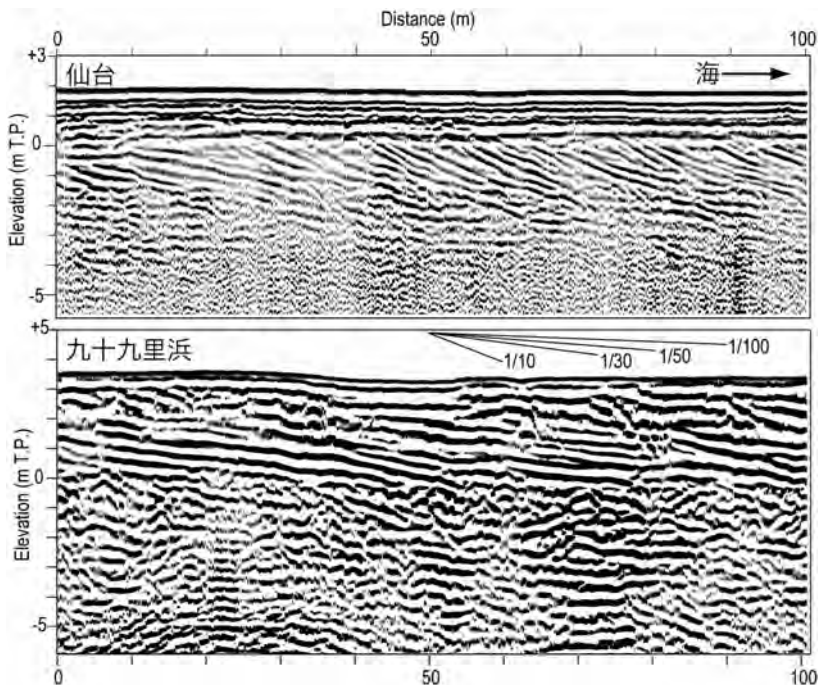
以上のように海浜堆積物を面的に調査すると、海岸線の前進や停滞の間隔、過去のストーム履歴や海浜勾配など様々なことが分かる見込みがある。しかし、完新世の海浜堆積物は浜堤平野の地下に存在するため、大掛かりなトレンチ調査がないと面的な観察は難しい。そこで用いられるのが次に述べる地中レーダである。

3. 地中レーダ探査

地中レーダは、電波を地中に向けて発信し、地下

の電気的特性が変化する点で跳ね返ったものを受信・解析して地下の構造を調べる物理探査手法である。この電気的特性とは誘電率であり、空気や、岩石や砂など固体では低い一方、水など液体では高い。誘電率はまた、堆積物でも砂や礫よりも細粒な粘土やシルトで高く、水を含むと乾燥している場合よりも高くなる。概して誘電率が高い物質ほど、電波の減衰率が大きく電波速度は小さくなる。また、清水と海水の誘電率は同程度であるが、減衰率は海水においてはるかに大きい。このため、堆積物中に海水を多量に含む現在の汀線近くでは、地中レーダ探査は電波が浅層ですべて減衰してしまうために有効ではない。層理や葉理は、粒度、鉱物、粒子配列、さらには水分含有量などの違いを伴う。このため、堆積物の電気的特性を調べる地中レーダにより、地下の堆積構造の傾向をとらえることができる。

海浜堆積物に対する地中レーダ探査は、主に浜堤



第5図
仙台および九十九里浜平野における2,500年前の海浜堆積物の地中レーダ断面。

と現海浜(第4図a)において行われる。一般に水田として利用される堤間湿地では、表層の泥と道路建設のための盛り土が電波を減衰させてしまい、概して良好な結果が得られない。浜堤は宅地、森林および畑に利用されていて、探査測線は舗装道路の路肩(第4図b)や未舗装の農道上(第4図c, d)に設置する。同時期の海浜堆積物は海岸線と平行方向に伸び、海側へと付加するように発達していくため、測線は海岸線または浜堤の伸びと直交方向にとることが多い。

海浜堆積物に用いる地中レーダの電波周波数は、探査深度や分解能の兼ね合いから、100MHzが最も多く使われる。CMP(Common Mid Point)法により求められる電波速度は、およそ0.05~0.1m/nsで、これに対応する100MHzの電波の波長は、0.5~1.0mであり、鉛直方向の分解能はこの波長の4分の1に相当する(Reynolds, 1997)。測線(水平)方向の分解能は、パルス電波のショット間隔で決まるが、100MHzの場合は25cmまたは50cm程度にすることが多い。

4. 探査記録の特徴と意味

九十九里浜平野と仙台平野の浜堤地下の海浜堆

積物に対する探査記録を例として第5図に示す。探査測線はどちらも海岸線および浜堤に直交する方向で、海浜堆積物の堆積年代は約2,500年前である。

探査記録の中で最も分かりやすいのは、九十九里浜では標高0~+3m、仙台では-2~0mの高度に見られる、海側へ傾く反射面である。ボーリングコアでは、これらの高度では前浜から後浜の堆積物が見られる(Tamura and Masuda, 2005; Tamura *et al.*, 2007)。さらに、反射面の勾配は、九十九里浜では1/30、仙台では1/10であり、現在の前浜面の勾配に等しい。したがって、これらの反射面は、露頭で観察されるような、海側に傾斜する前浜堆積物の層理を反映したものである。海側に傾く反射面の中には、より陸側の反射面を切っているものがある(例えば、九十九里浜の20~45m間、仙台の25~30m間)。九十九里では海側へ急傾斜する侵食面(80mおよび90m地点)も見られる。これらはやはり露頭に見るように、前浜堆積物をくさび型のユニットに分ける、ストームなどにより形成される侵食面と考えられる。貝殻などの放射性炭素年代に基づくと、九十九里浜では、海岸線の前進速度は最近6,000年間の平均で、約1.5m/年である。侵食面で区切られるくさび型ユニットの幅は10~50m程度であることから、数年~数十年につき1つの

ユニットが形成され、浜堤平野を拡大させていることが分かる。

前浜堆積物より下位の外浜堆積物での探査記録の特徴はつかみにくい。仙台では、前浜の侵食面の一部が外浜まで連続し、徐々に勾配を緩くして下に凸の形をなしている。この構造は、仙台の海浜においては、海浜の侵食が前浜と上部外浜で同時に起ることを表している。上部外浜において侵食面以外の反射面は若干連続して前浜よりも緩く海側に傾斜している。一方の九十九里浜では、前浜と上部外浜の間で反射面はほとんど連続せず、標高0mの高度にある前浜堆積物の基底面に対して前浜の反射面はダウンラップしている。上部外浜の反射面は連続性が悪く、傾きの方向も不規則である。このように九十九里浜ではこの前浜堆積物と外浜堆積物との境界が明瞭である。この境界はボーリングに見る堆積相境界とも一致し、平均海面高度よりも約1m下の、大潮時の低潮位面に対応することが分かっている(Tamura *et al.*, 2008)。九十九里浜平野中央部では、沖積層のボーリングコアで得た前浜堆積物の分布高度と堆積年代から過去6,000年間で約5mの相対海面変動があった(増田ほか, 2001)。第5図に示した断面でも、2,500年前の前浜堆積物の基底が、現在よりも約1m高く、相対海面の低下があったことが示される。田村ほか(2007)では、地中レーダ探査に基づき、南部および最南端部においては中央部よりも大きな相対海面低下があったことを見出し、それぞれ1,000年あたりに0.42m、0.94mの割合で中央部に対して隆起していることを明らかにした。一方、仙台の断面では、前浜と上部外浜の境界がはっきりしないが、海側に傾く反射面の下に凸の形態を元に現在の海浜の探査結果と第4図に示す2,500年前のものとおおよそ比較してみると、ほぼ同等の高度に前浜堆積物がある。仙台平野は九十九里浜ほど隆起しておらず、過去5,000年間の相対海面の低下量も1~3m程度とされる(松本, 1981)。以上のように、海浜堆積物の地中レーダ探査記録は、勾配など地域ごとに多少の多様性を伴いながらも、過去における相対海面高度の指標や、海岸線の前進過程の復元に用いることができる。

最後に諸外国の研究例について紹介する。九十九里浜と同様に、海浜堆積物の地中レーダ記録を相対海面変動の復元に用いた例としては、van Heteren *et al.* (2000)がある。ただし、この例では後浜および前浜

と、風成砂丘との境界を地中レーダ断面に見出し(van Heteren and van de Plassche, 1997)、その高度を指標とし、OSL年代を組み合わせることで完新世の相対海面変動を復元した。Bristow and Pucillo (2006)は、南オーストラリアの浜堤平野において、前浜堆積物で明瞭な反射面が見られるものの、現海面付近よりも下では信号が減衰してしまうことから、泥質堆積物が分布していると判断し、表層の砂質堆積物の体積を求め、やはりOSL年代との組み合わせから、千年オーダーでの砂質堆積物供給量の変動を評価した。また、地中レーダ記録に見られる侵食面から、巨大地震やハリケーンの再来周期を求める試みもなされている。Meyers *et al.* (1996)では、アメリカ西海岸の砂嘴において、過去5,800年間に8枚の、下に凸の形態で磁鉄鉱の濃集を伴う侵食面を認め、同地域で715年から855年の周期で発生する巨大地震に伴った海岸沈降、すなわち相対海面の上昇により形成されたものと解釈した。一方、巨大地震のないアメリカ東海岸でも磁鉄鉱やガーネットといった重鉱物の濃集する侵食面が見出され(Buynevitch *et al.*, 2004)、巨大なハリケーンにより形成されたものと解釈されている。Buynevitch *et al.* (2007)ではOSL年代との組み合わせから、1,500年前から500年前まではハリケーンの活動がなく、それが最近500年間では活発になり100~130年の周期で侵食面を残していると結論づけている。これらの成因に加え、アメリカのメキシコ湾岸の砂嘴で報告される(Rodriguez and Meyer, 2006)ように、浜堤の発達方向が変化する境界でも連続的な侵食面が見られる。浜堤の発達方向が変わる時、堆積傾向であった海浜の一部では、堆積物のバイパスやそれに伴う海岸線の停滞もしくは侵食が起こるためである。以上のように、各地域の特性に応じて、海浜堆積物の地中レーダ記録は、完新世の海岸環境および地質イベントの復元に用いられている。

5. おわりに

九十九里浜および仙台平野での調査結果を例に、海浜堆積物の地中レーダ記録について紹介を行った。海浜堆積物の地中探査記録の解釈では、上でもあらかじめ説明したように、現在の海浜に見られる堆積過程や、露頭に見られる堆積物の一般的特徴を参考にしている。これまでのところ、海浜の前進により

できる海側傾斜の反射面の東、およびそれを所々切る下に凸の侵食面が、探査記録の解釈や意味付けのために最も重要な特徴となっている。これらは、前浜堆積物に共通する一般的な特徴にすぎず、各地の海浜堆積物の探査記録に見られる多様性については、あまり目を向けられていない。例えば、九十九里浜では前浜基底面を認めやすく、海面高度の指標として用いることができる一方、全体に海浜勾配が急な仙台では前浜から上部外浜にかけての侵食面が連続的になり、両者の境界がはっきりしないが、その原因については明らかではない。度々注目される下に凸の侵食面の成因としても、巨大地震に伴う海面上昇や津波、ストーム、堆積物供給の減少など複数があられ、これらを各地域の背景や研究の目的に合わせ、悪く言えば場当たりの、十分な検討がなく結論づけられている印象もある。現時点の理解は、成因ごとに侵食面を分類したり、侵食面のみを見て成因を特定したりできる、といったレベルには到達していない。巨大地震やハリケーンといった重要な現象に関連するだけに、十分な注意が必要である。このような問題もあるが、砂礫質で電波が減衰しにくく、堆積構造も明瞭な海浜堆積物にとって、地中レーダは相性の良い、有用な探査・研究手法である。

文 献

- Bristow, C.S. and Pucillo, K. (2006) : Quantifying rates of coastal progradation from sediment volume using GPR and OSL: the Holocene fill of Guichen Bay, south-east South Australia. *Sedimentology*, 53, 769-788.
- Buynevitch, I.V., FitzGerald, D.M. and van Heteren, S. (2004) : Sedimentary records of intense storms in Holocene barrier sequences, Maine, USA. *Mar. Geol.*, 210, 135-148.
- Buynevitch, I.V., FitzGerald, D.M. and Goble, R.J. (2007) : A 1500 yr record of North Atlantic storm activity based on optically dated relict beach scarps. *Geology*, 35, 543-546.
- Jol, H.M., Smith, D.G. and Meyers, R.A. (1996) : Digital ground penetrating radar (GPR): an improved and very effective geophysical tool for studying modern coastal barriers (examples for the Atlantic, Gulf and Pacific coasts, U.S.A.). *Jour. Coast. Res.*, 12, 960-968.
- 増田富士雄・藤原 治・酒井哲弥・荒谷 忠 (2001) : 房総半島九十九里浜平野の海浜堆積物から求めた過去6000年間の相対的海水準変動と地震隆起. *地学雑誌*, 110, 650-664.
- 松本秀明 (1981) : 仙台平野の沖積層と後氷期における海岸線の変化. *地理学評論*, 52, 72-85.
- Meyers, R.A., Smith, D.G., Jol, H.M. and Peterson, C.D. (1996) : Evidence for eight great earthquake-subsidence events detected with ground-penetrating radar, Willapa barrier, Washington. *Geology*, 24, 99-102.
- 森脇 広 (1979) : 九十九里浜平野の地形発達史. *第四紀研究*, 18, 1-16.
- Otvos, E.G. (2000) : Beach ridges - definitions and significance. *Geomorphology*, 32, 83-108.
- Reynolds, J. M. (1997) : *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester, U.K., Wiley-VCH., 796p.
- Rodriguez, A.B. and Meyer, C.T. (2006) : Sea-level variation during the Holocene deduced from the morphologic and stratigraphic evolution Morgan Peninsula, Alabama, U.S.A. *Jour. Sed. Res.*, 76, 257-269.
- Tamura T. and Masuda F. (2005) : Bed thickness characteristics of inner-shelf storm deposits associated with a transgressive to regressive Holocene wave-dominated shelf, Sendai coastal plain. *Sedimentology*, 52, 1375-1395.
- Tamura, T., Nanayama, F., Saito, Y., Murakami, F., Nakashima, R. and Watanabe, K. (2007) : Intra-shoreface erosion in response to rapid sea-level fall: depositional record of a tectonically uplifted strand plain, Pacific coast of Japan. *Sedimentology*, 54, 1149-1162.
- Tamura, T., Murakami, F., Nanayama, F., Watanabe, K. and Saito, Y. (2008) : Ground-penetrating radar profiles of Holocene raised-beach deposits in the Kujukuri strand plain, Pacific coast of eastern Japan. *Mar. Geol.*, in press.
- 田村 亨・村上文敏・渡辺和明 (2007) : 九十九里浜平野における相対海面変動の空間多様性: 地中レーダを用いた復元. *地学雑誌*, 116, 664-672.
- van Heteren, S., Huntley, D.J., van de Plassche, O. and Lubberts, R.K. (2000) : Optical dating of dune sand for the study of sea-level change. *Geology*, 28, 411-414.
- van Heteren, S. and van de Plassche, O. (1997) : Influence of relative sea-level change and tidal-inlet development on barrier-spit stratigraphy, Sandy Neck, Massachusetts. *Jour. Sed. Res.*, 67, 350-363.

TAMURA Toru, MURAKAMI Fumitoshi, NANAYAMA Futoshi, SAITO Yoshiki and WATANABE Kazuaki (2008) : Ground-penetrating radar profile of the beach deposits.

<受付: 2007年11月30日>