

九十九里浜平野における相対海面変動の空間多様性

地中レーダーを用いた復元

田 村 亨* 村 上文敏* 渡 辺 和 明**

Reconstruction of Longshore Variation of the Relative Sea-level History in the Kujukurihama Strand Plain using Ground-penetrating Radar

Toru TAMURA*, Fumitoshi MURAKAMI* and Kazuaki WATANABE**

Abstract

The longshore variation of the relative sea-level history in the southern half of the Kujukurihama strand plain, eastern coast of the Boso Peninsula, is reported and discussed in terms of differing rates of uplift. The central part of the plain has experienced a 5 m fall of relative sea level during the last 6,000 years. The relative sea-level fall is marked by the seaward lowering of the facies boundary within the subsurface beach deposits, which is recognized in drill core sections and ground-penetrating radar profiles. A ground-penetrating radar survey was performed to reconstruct relative sea-level curves at the southern and southernmost parts of the strand plain. The relative sea-level history during the last 6,000 years varies alongshore with the net sea-level fall being larger southward. The difference in the relative sea-level curve between the central and south parts temporally decreases from 2.4 m at 5.7 ka, through 1.6 m at 3.5 ka, to 0.9 m at 1.7 ka, becoming zero at present. The trend was caused by the uplift of the southern part relative to the central part, of which the average rate is 0.42 m/ka. The rate is equivalent to that inferred from the distribution of the last interglacial marine terrace surrounding the Kujukurihama strand plain.

Key words : beach, beach ridge, ground-penetrating radar, Holocene, Kujukurihama, sea level, strand plain, uplift

キーワード : 海浜, 浜堤, 地中レーダー, 完新世, 九十九里浜, 海水準, 浜堤平野, 隆起

I. はじめに

海岸平野の沖積層には、ユースタシーと地殻変動との和である、その地域の経てきた相対的な海

面変動が記録される。浜堤平野地下の海浜堆積物では、風成相と後浜・前浜相との境界 (Knight *et al.*, 1998; van Heteren *et al.*, 2000)、ビーチロック (Caldas *et al.*, 2006)、および前浜相と外浜相

* 産業技術総合研究所地質情報研究部門

** 産業技術総合研究所地質情報センター

* Institute of Geology and Geoinformation, AIST

** Geological Information Center, AIST

との境界（増田ほか, 2001a）の高度が、過去の海水準の指標となる。

地下の堆積物に記録される海水準の指標はボーリングコアにより認識可能だが、地中レーダーによっても検出される（例えば, van Heteren and van de Plassche, 1997; Bristow and Pucillo, 2006; Rodriguez and Meyer, 2006; Tamura *et al.*, submitted）。地中レーダーは、電波を送信し、地下の電気的特性が変化する境界で反射したものを受信し、その往復走時と受信波形に基づいて地下の構造を可視化する手法である。海岸平野地下の沖積層に適用する場合、周波数が 100 MHz 以上の電波を用いることが多い。この場合探査深度は概して 10 m 以下とあまり大きくないが、鉛直方向の空間分解能は 50 cm 以下と高いのが長所である。Tamura *et al.* (submitted) では、九十九里浜平野中央部の海浜堆積物に対して地中レーダーを適用し、探査記録中に海水準の指標となる前浜相と外浜相との境界を認識できることが確かめられた。

九十九里浜平野中央部では、ボーリングコアによる調査から、過去 6,000 年間に於いて約 5 m の相対海面の低下が知られているが（増田ほか, 2001a）、隆起速度の違いから、同平野内でも南部では相対海面の低下が大きかった可能性がある。平野周辺の最終間氷期における海成段丘面の高度は、中央部から南に向かって上昇し、隆起速度が大きくなっていくことを示している（貝塚, 1987）。そこでこの研究では、地中レーダー探査から九十九里浜平野南部における相対海面曲線を復元し、中央部との違いについて検討する。

II. 地域概況

房総半島東岸の約半分を占める九十九里浜平野は、海岸線の長さ 60 km、最大幅 10 km の、わが国では最大規模の浜堤平野である（図 1A）。更新統下総層群、および鮮新 更新統上総層群が分布する台地と丘陵（宇野沢ほか, 1983）に囲まれ、それらと平野との境は、約 6,000 年前の海岸線にほぼ相当する（森脇, 1979）。6,000 年前以降、現在の沿岸域に見られるような海浜に土砂が堆積

し、平野が形成・拡大されてきた。平野の微地形としては、浜堤、砂丘、堤間湿地、氾濫原、自然堤防が認められる（図 1C; 森脇, 1979）が、河川は一般に小規模であり、自然堤防は目立たない。九十九里浜平野における微高地の大半は、現在の海岸線と平行から若干斜交するように伸びる浜堤列である。浜堤の堆積年代は陸側のものほど古く、平野の拡大とともに海岸線が陸側から海側へ移動してきたことを示している。平野地下の沖積層は、概して層厚 10 ~ 20 m で、海浜堆積物から構成されている（増田ほか, 2001b; Tamura *et al.*, 2003）。

九十九里浜平野は、鹿島 房総隆起帯（貝塚, 1987）に位置し、完新世においても隆起にともなう相対海面の低下を経てきた。平野を取り囲む、約 12 万年前の最終間氷期の海成段丘面は、海拔が +30 ~ +100 m 以上に及び（図 1B）。平野中央よりやや北の栗山川流域においては +40 m 以下と比較的低く、そこから北東、南西に向かってそれぞれ +60 m、+100 m 以上まで高くなり、海岸線と平行方向に隆起速度が異なることが示される。増田ほか（2001a）では、九十九里浜中央部における沖積層について、19 箇所のボーリングを行い、重鉱物の濃集をともなった平行葉理を示す前浜堆積物とその下位の上部外浜堆積物の境界高度、および貝殻の放射性炭素年代に基づいて、6,000 年前以降の相対海面曲線を復元した（図 2A）。その結果、平野中央部においては、合計 5 m と、関東平野中央部（遠藤ほか, 1989）に比べて相対海面低下量が大きく、また間欠的に 1 回につき 1 m 程度の低下が数回認められるということから、1,000 年周期の地震隆起によるものと推定した。この相対海面の低下は、平野面の標高分布にも現れている（図 1B）。浜堤の標高は、年代が古い陸側縁で +7 ~ +10 m 以上であるのに対して、新しい海側のものでは +2 ~ +3 m 程度である。また全体的に中央部で低く、北部および南部において高い傾向が認められる。

III. 手 法

九十九里浜平野南部の沖積層最上部に分布する

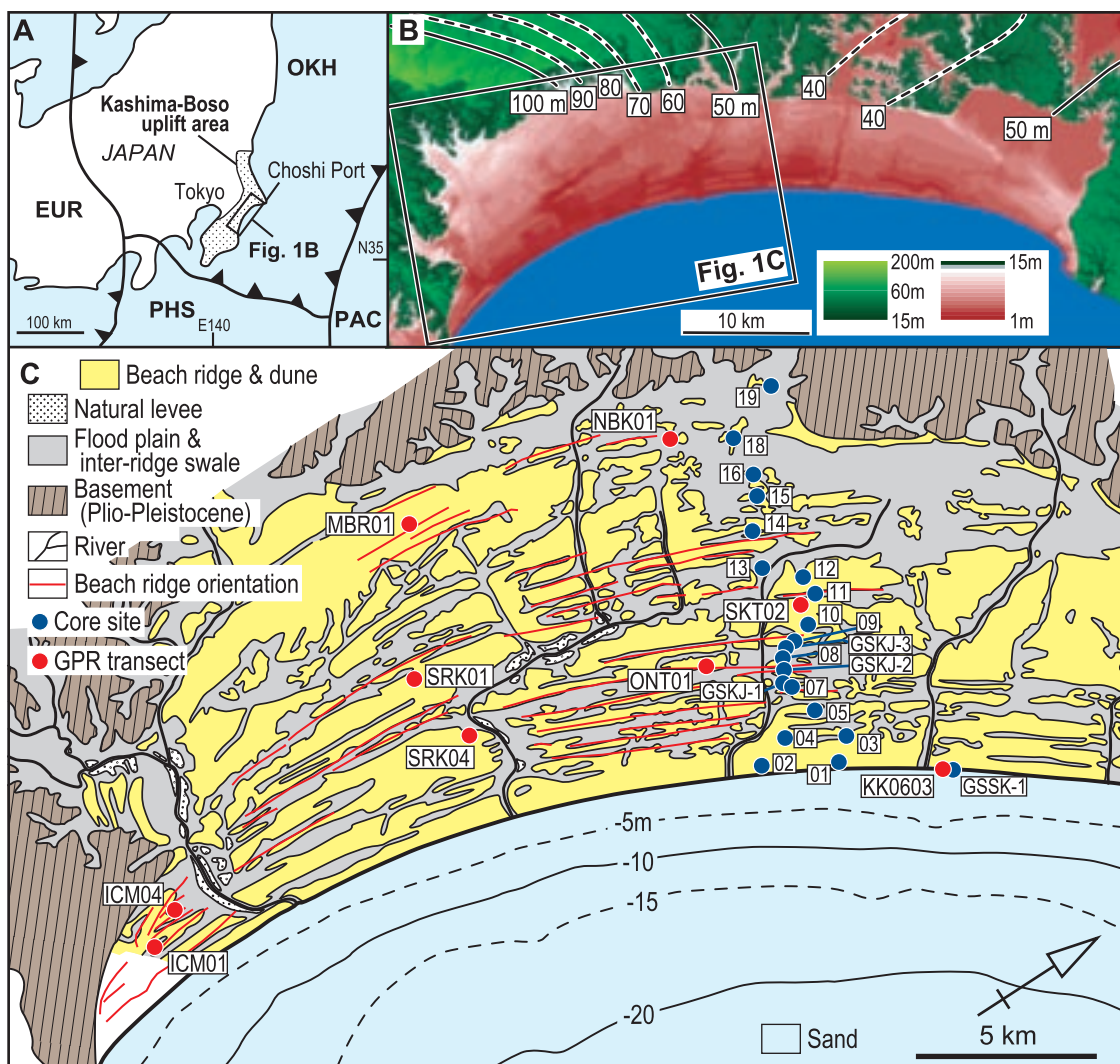


図 1 A: 九十九里浜平野の位置図。B: 九十九里浜平野とその周辺の数値標高図。国土地理院発行、数値地図 50 m メッシュから作成。C: 九十九里浜平野中央部から南部にかけての地形分類図（森脇, 1979 を簡略化）。浜堤の伸長方向、ボーリングコア掘削地点（増田ほか, 2001a; Tamura *et al.*, 2007）および地中レーダー測線（Tamura *et al.*, submitted）の位置を示す。

Fig. 1 A: Location map of the Kujukurihama strand plain. B: Digital elevation map of the Kujukurihama strand plain and its surrounding area. C: Map showing the geomorphology of the Kujukurihama strand plain (simplified from Moriawaki, 1979), orientation of beach ridges, and locations of drill cores (Masuda *et al.*, 2001a; Tamura *et al.*, 2007) and GPR transect (Tamura *et al.*, submitted).

海浜堆積物に対して、地中レーダー探査と、浜堤地形の解析とを行い、同地域における 6,000 年前以降の相対海面変動を復元した。

地中レーダー探査は、Sensor & Software 社製

の PulseEkko100 を用い、茂原市から白子町にかけての平野南部で 3 測線（陸側より MBR01, SRK01, SRK04）、一宮町の平野南端部において 2 測線（ICM01, ICM04）について行った。測線

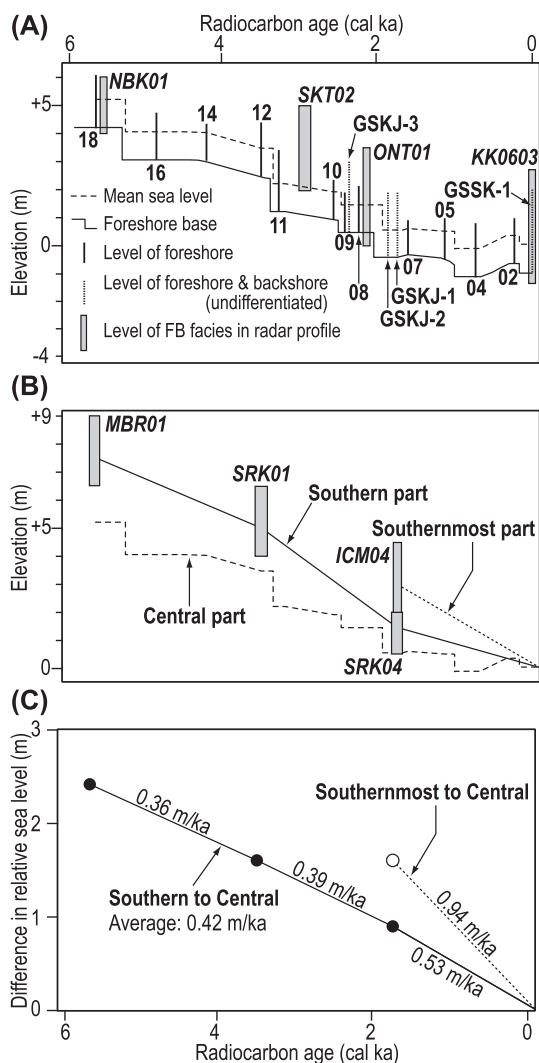


図 2 A : 九十九里浜平野中央部における過去 6,000 年間の相対海面曲線。ボーリングコアは増田ほか (2001a) および Tamura *et al.* (2007), 地中レーダーの探査記録は Tamura *et al.* (submitted) による。B : 平野中央部, 南部, 南端部における過去 6,000 年間の相対海面変動。C : 中央部と南部, および中央部と南端部の間の相対海水準の差と, それらから計算した相対的な隆起の速度。

Fig. 2 A : The relative sea-level history of the central Kujukurihama strand plain. Results of drill cores and GPR are from Masuda *et al.* (2001a), Tamura *et al.* (2007), and Tamura *et al.* (submitted). B : The relative sea-level history of the central, southern, and southernmost parts of the Kujukurihama strand plain. C : The difference in relative sea level among the central, southern, and southernmost parts of the Kujukurihama strand plain, and rates of relative uplift.

は全て浜堤の伸びに直交方向, すなわち海浜堆積物が形成された当時の海岸線と直交する方向にとり, 測線長は 120 ~ 180 m である。またオートレベルによる測線の標高測定も行った。地中レーダー装置は, 送受信アンテナ, コンソール, データ記録用パソコンから構成される。送信アンテナよりパルス電波を送り, 地中の堆積物の電気的特性が変化する面で跳ね返るのを受信アンテナで受け, その波形と往復走時をもとに地中の構造を探索する。測線上において始点から 25 cm の点ごとに電波の送受信を繰り返し, 全ショットのデー

タをつなげることで二次元断面の構造を明らかにする。現地で得たデータは, 信号処理ソフト Reflexw (Sensor & Software 社製) により周波数フィルターをかけ, また深部から反射して減衰している信号の増幅 (ゲイン・コントロール) を行った。探査で得られる断面の深度情報は, 電波の往復時間として表されるが, 現地では上記の探査とともに, 送受信アンテナを徐々に引き離しながら送受信を繰り返す, CMP (Common Mid Point) 法を行うことで, 地中における電波の伝達速度を求め, 絶対深度に変換した。送信アンテナ

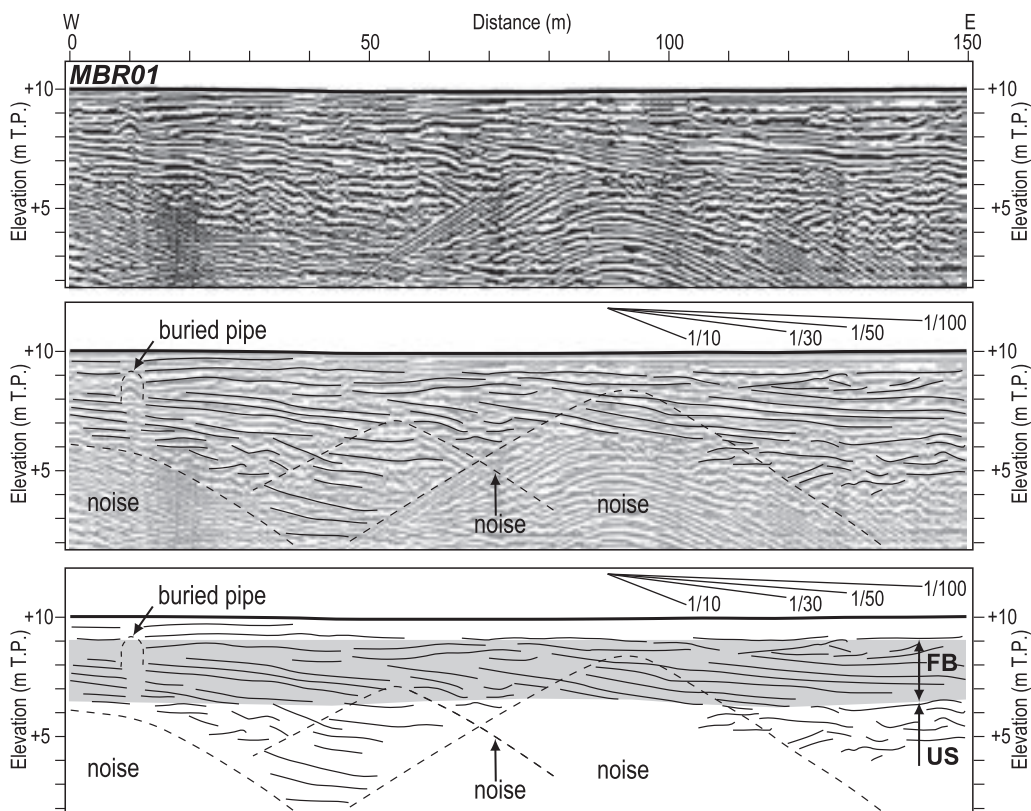


図 3 地中レーダー探査断面 MBR01 の記録と解釈 . FB : 前浜・後浜ユニット, US : 上部外浜ユニット .

Fig. 3 Results and interpretation of the GPR transect of MBR01. FB: Foresore and backshore unit, US: Upper shoreface unit.

ナは、電波周波数が 100 MHz のものを用いた。CMP 法から計算した電波速度は、0.05 ~ 0.06 m/ns で、電波波長は 50 ~ 60 cm となり、1/4 波長に相当する鉛直方向での分解能 (Reynolds, 1997) は、12 ~ 15 cm 程度である。

浜堤地形の解析は、探査した海浜堆積物の堆積年代を推定するために行った。浜堤は海岸線に沿って発達するため、連続する 1 つの浜堤の地下に存在する海浜堆積物は、同じ時期に形成されたものと仮定できる。国土地理院発行の 1:30,000 カラー空中写真と 1:25,000 地形図に基づいて浜堤の伸び方向を調べ (図 1C)、各測線が位置する浜堤の延長から得られたコアを選んだ。これまでの研究により、コアに含まれる堆積物の放射性炭素年代が得られているため (増田ほか、

2001a; Tamura *et al.*, 2007)、上記の仮定から地中レーダー探査を行った堆積物の年代を推定した。

IV . 結 果

地中レーダーの探査記録では、2 つのユニットが認められる。ここでは例として測線 MBR01, ICM04 の記録を示す (図 3, 図 4)。探査断面の地表から約 1 m 程度は、地表と平行な反射面が見られるが、この部分は道路建設など人工的な改変を受けた可能性がある。以下で解析するのは、それより下位についてである。認められた 2 つのユニットは、九十九里浜中央部における探査記録でも見られ (Tamura *et al.*, submitted)、ボーリングコアとの比較から、上位のユニットが前

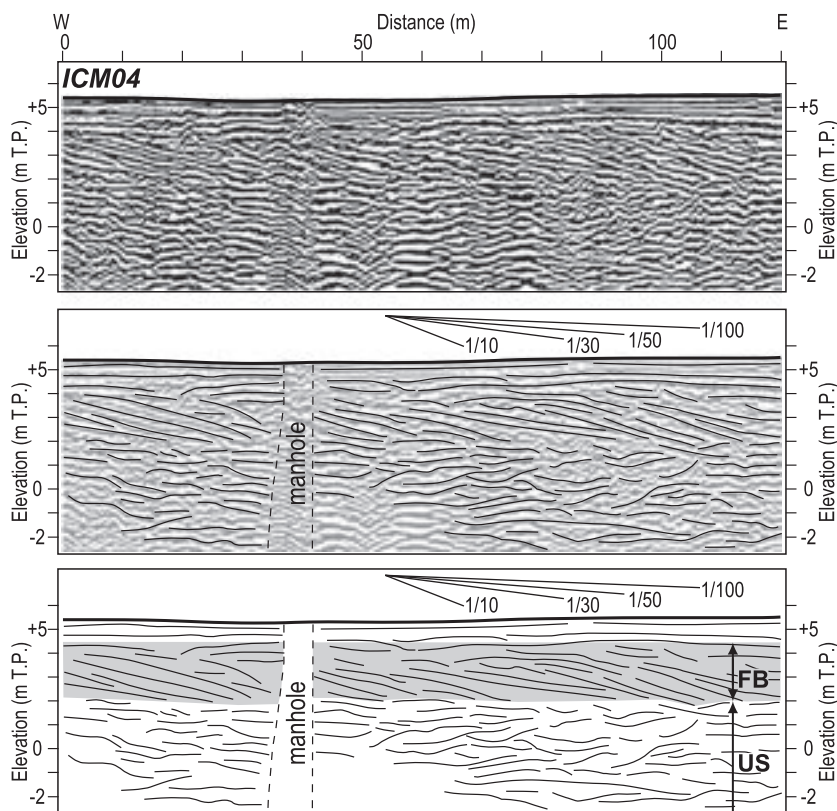


図 4 地中レーダー探査断面 ICM04 の記録と解釈 . FB : 前浜・後浜ユニット , US : 上部外浜ユニット .

Fig. 4 Results and interpretation of the GPR transect of ICM04. FB: Foreshore and backshore unit, US: Upper shoreface unit.

浜・後浜，下位が上部外浜の堆積物に相当する。前浜・後浜ユニットでは，海側に $1/100 \sim 1/30$ 程度の勾配で傾斜してよく連続する反射面の連なりが特徴である。この勾配は，現在の後浜から前浜の勾配に相当することから，反射面の連なりは平坦な後浜から前浜での堆積と地形面の前進を表している。反射面は所々で海側に傾く侵食面（例えば，ICM04 の $80 \sim 100$ m 間；図 4）に削剥されていて，侵食面に対してより海側の反射面はオンラップおよびダウンラップする。この侵食面は間欠的な暴浪によって形成され则认为られる。前浜・後浜ユニットの反射面は，一定の深度で下方に連続しなくなり，下位の上部外浜堆積物との境界面にダウンラップする。上部外浜堆積物では

一般に反射面の連続性が悪いのが特徴である。上部外浜では沿岸砂州およびトラフ，その上に発達するデューンの移動により堆積物が形成される（Clifton, 2007）ため，前浜・後浜ユニットとは対照的に，層理の形態が複雑で，反射面の連続性が悪くなると考えられる。

探査から得られた，各測線における前浜・後浜ユニットと上部外浜ユニットの境界面，すなわち前浜基底面の標高を表 1 にまとめる。陸側ほど高い傾向が認められる。また，各測線における海浜堆積物の年代についても，表 1 に示す。

自然の堆積物からの信号に加え，探査記録には若干のノイズが認められる。例えば，MBR01 の 10 m 付近（図 3）と ICM04 の 40 m 付近（図 4）

表 1 地中レーダー探査測線の高度、前浜堆積物基底（前浜・後浜ユニットと上部外浜ユニットとの境界）高度、推定される相対海水準、同時期の海浜堆積物を含む九十九里浜平野中央部のボーリングコア、およびコアに認められる前浜堆積物基底高度と堆積年代。

Table 1 Elevations of the GPR transect and foreshore base in the radar profile, inferred relative sea level, reference core obtained from the central part of the Kujukurihama strand plain, and the elevation and depositional age of the foreshore deposits in the core.

GPR transect	Elevation of transect start (m)	Elevation of foreshore base (m)	Inferred relative sea level (m)	Reference core in central Kujukuri	Elevation of foreshore base in reference core (m)	Inferred age (ka)
MBR01	+ 10.0	+ 6.5	+ 7.5	M18	+ 4.1	5.7
SRK01	+ 7.0	+ 4.0	+ 5.0	M12	+ 2.4	3.5
SRK04	+ 2.7	+ 0.5	+ 1.5	GSKJ-1	- 0.4	1.7
ICM01	+ 5.5	+ 1.5	+ 2.5	M07	- 0.3	1.5
ICM04	+ 5.4	+ 2.0	+ 3.0	GSKJ-1	- 0.4	1.7

のように、パイプやマンホールなどの埋設物に起因するもので、これらは現地探査時に確認した。もう 1 つは、MBR01 に顕著に見られるような左右対称の双曲線状の反射面である。これは、用いた地中レーダーのアンテナには絶縁体でのシールドを施しておらず、地中だけでなく側方で反射した電波もある程度受信してしまうためである。MBR01 においては、これらは主に測線周辺に建つ家屋からのノイズであることを確かめた。

V. 考 察

1) 九十九里浜南部における相対海面変動

地中レーダー探査記録と推定した海浜堆積物の年代に基づき、九十九里浜平野南部における相対海面変動を求める。Tamura *et al.* (submitted) では、現海浜での地中レーダー探査とボーリングコアの比較から、前浜・後浜ユニットと上部外浜ユニットとの境界は、平均海面高度よりも約 1 m 下の、大潮時における低潮位面高度に相当することが明らかになった（図 2A）。このことから、探査断面における前浜・後浜ユニットと上部外浜ユニットとの境界面の 1 m 上方が、堆積当時の海水準であったと推定できる。堆積時期が 5.7 ka の MBR01 において、前浜基底が +6.5 m である（表 1）ことから、当時の海水準は +7.5 m と見積もられる。それぞれ 3.5 ka, 1.7 ka の SRK01, SRK04 についても同様に、海水準は +5.0 m,

+1.5 m となる。これら 3 測線がある平野南部においては、過去約 6,000 年間に於いて、約 7.5 m の相対海面低下があったことになる（図 2B）。ただし、測線数が 3 箇所と少ないため、この相対海面低下が中央部のような間欠性だったか、また間欠性としても 1 回あたりの低下量はどのくらいであったか、については、現時点では明らかではない。このため図 2B においては、平野南部の相対海面曲線として、3 測線での結果を直線で結んだ、平均化したものを示す。平野南端部は幅が狭く、浜堤の形成は約 2,500 年前以降と見られる。ICM01 と ICM04 の 2 測線が得られたが、両測線の堆積物の年代差が小さいことから、ここでは古い方の ICM04 のみを用いた。これによると、南端部では過去約 2,000 年間に、約 3.0 m の相対海面低下があったことが示される。

2) 相対海面変動の空間多様性

九十九里浜平野の中央部、南部、南端部における 6,000 年前以降の相対海面高度の差は、隆起量の差に起因している。上記の通り、南部や南端部では、中央部のような時間分解能の高い海面曲線は得られていないため、中央部での代表値として、5.7 ka のコア 18, 3.5 ka のコア 12, 1.7 ka のコア GSKJ-1 の前浜堆積物基底高度（表 1）に基づいた相対海面高度、+5.1 m, +3.4 m, +0.6 m を比較に用いる。これら 3 つの時期における中央部と南部、および中央部と南端部の間

の、相対海面高度の差を、図 2C に示す。南部と中央部との間の高度差は、5.7 ka に 2.4 m、3.5 ka に 1.6 m、1.7 ka に 0.9 m と次第に減少して現在の 0 m に収束する。これは、6,000 年前以降、南部が中央部に対して、相対的に隆起し続けていることによる。結果として、時期が古いほど、相対的な隆起の累積量が大きくなり、堆積物に記録された相対海面高度の差が拡大している。図 2C におけるプロットを結ぶ直線の傾きが相対的な隆起速度に対応し、南部と中央部との間では、0.36 ~ 0.53 m/ka、平均で 0.42 m/ka となる。この傾向が過去 12 万年間にわたって継続したとすれば、隆起量の差は、約 50 m となり、中央部と南部における最終間氷期の海成段丘面の標高差とほぼ一致する。一方で、南端部の中央部に対する隆起速度は、0.94 m/ka と見積もられ、南部の 2 倍程度である。測線の位置関係から（図 1）、隆起量は中央部から南へほぼ線形に増加しているようにとれる。ただし、一宮川を挟んで平野面の標高が南にはっきりと高くなる傾向があり（図 1B）、南端部のみが急激に隆起している可能性も残される。

VI. おわりに

ここでは、海浜堆積物の地中レーダー記録に認められる海水準指標と、浜堤の伸長方向に基づいた堆積年代の推定から、九十九里浜平野中央部～南端部における 6,000 年前以降の相対海面変動は沿岸方向に異なり、それは周辺の最終間氷期の海成段丘の高度分布に整合するように南ほど隆起速度が大きいことが原因であることが、明らかになった。九十九里浜平野において海水準指標となる前浜堆積物基底の深度は、多くの場合地表より 3 m 以深であり、大がかりなボーリングやトレンチ調査でないと堆積物を得ることができない。この研究では、中央部でのボーリングコアと放射性炭素年代値の結果を利用し、地中レーダーを用いることで迅速に前浜堆積物基底の高度分布を求めることができた。従来、相対海面曲線は、一つの沖積平野で一つずつしか復元されてなかったが、わが国のような変動帯では小さな範囲内でも地殻変動速度が異なり、それは相対海面変動の記録に

も反映される。南端に向かって隆起速度が大きくなる房総半島東岸の大部分を占めている九十九里浜平野は、その一つの典型的な例といえる。ここで用いた手法は、他の浜堤平野にも適用可能で、各地の沖積平野における相対海面変動、すなわち地殻変動の空間的多様性を明らかにする可能性がある。

謝 辞

この研究は、平成 18 年度東京地学協会・調査研究助成金を使用して行った。西田尚央氏、浦本豪一郎氏、酒井亮太氏、島野恭史氏（千葉大学大学院理学研究科）には、現地調査でご助力いただいた。ここにお礼申し上げます。

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.
- Caldas, L.H.O., Stattegger, K. and Vital, H. (2006) Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. *Mar. Geol.*, **228**, 39–53.
- Clifton, H.E. (2007) A reexamination of facies models for clastic shorelines. in *Facies Models Revisited* edited by Posamentier, H.W. and Walker, R.G., *SEPM Spec. Publ.*, **84**, 293–337.
- 遠藤邦彦・小杉正人・松下まり子・宮地直道・菱田量・高野 司 (1989) 千葉県古流山湾周辺域における完新世の環境変遷史とその意義．第四紀研究, **28**, 61–77.
- 貝塚爽平 (1987) 関東の第四紀地殻変動．地学雑誌, **96**, 223–240.
- Knight, J., Orford, J.D., Wilson, P., Wintle, A.G. and Braley, S. (1998) Facies, age and controls on recent coastal sand dune evolution in North Norfolk, eastern England. *J. Coast. Res.*, **26**, 154–161.
- 増田富士雄・藤原 治・酒井哲弥・荒谷 忠 (2001a) 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.
- 増田富士雄・藤原 治・酒井哲弥・荒谷 忠・田村亨・鎌滝孝信 (2001b) 千葉県九十九里浜平野の完新統の発達過程．第四紀研究, **40**, 223–233.
- 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.
- Reynolds, J.M. (1997) *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester, U.K., Wiley-VCH.
- 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. *J. Sediment. Res.*, **76**, 257-269.
- Tamura, T., Masuda, F., Sakai, T. and Fujiwara, O. (2003) Temporal development of prograding beach-shoreface deposits: The Holocene of Kujukuri coastal plain, eastern Japan. *Mar. Geol.*, **198**, 191-207.
- 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*, in press.
- Tamura, T., Murakami, F., Nanayama, F., Watanabe, K. and Saito, Y. (submitted) Ground-penetrating radar profiles of Holocene raised-beach deposits in the Kujukuri strand plain, Pacific coast of eastern Japan. *Mar. Geol.*
- 宇野沢 昭・岡 重文・坂本 亨・駒沢正夫 (1983) 20 万分の 1 地質図「千葉」. 地質調査所 .
- 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. *J. Sediment. Res.*, **67**, 350-363.
- 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.