

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

Investigation on the coast evolution around the Tenryu River Mouth based on stratum structure and deposit analysis

高川智博¹・深瀬祐太郎²・劉海江³・佐藤慎司⁴

Tomohiro TAKAGAWA, Yutaro FUKASE, Haijiang LIU, Shinji SATO

Stratigraphy of the coastal section about 4km west of the Tenryu River mouth was studied by using a Ground Penetrating Radar (GPR) and sediment cores. GPR profile reveals that the stratum is divided into two parts at horizontal boundary. The lower part was formed by the seaward progradation of foreshore and the upper part was formed by alongshore movement of aeolian dunes. Two types of reflecting surfaces were recognized in the lower part. One is an erosional surface which truncates underlying reflecting surfaces. The other is a depositional surface which concordantly covers underlying surfaces. Erosional surfaces with sharp contacts were also found in cores. These erosion surfaces in cores well correspond with the erosion surfaces in GPR profile. These are thought to be annual records of storm erosion.

1. はじめに

天竜川河口部海浜は、ダム建設などに伴う河川からの土砂供給の減少に伴い、現在急速に海岸侵食が進行して問題となっている地域である(宇多ら, 2007)。しかし、過去には天竜川から河口部に豊富な土砂供給があり、それが沿岸漂砂によって運ばれ、海岸に堆積することで、急速に海岸線が前進していた(加茂, 2003)。海浜の急速な前進によって形成された海岸部の地層は、過去の侵食や堆積イベントを高頻度に記録しているものと期待される。本研究ではこのような特徴をもつ現地海浜地層に対して地中レーダー探査と地下掘削調査を実施し、海浜の地層構造を連続的かつ高分解能で明らかにし、過去に遡って比較的長い時間スケール(数年～数十年)の海浜変動を明らかにすることを目的とした。

調査対象は天竜川河口の西方 4km に位置する中田島砂丘と隣接する海岸である。調査は海岸線の移動・形成過程を調べるため、海岸線にほぼ直交する南北方向に測線を設定し(図-1)、この測線に沿って地中レーダー探査および、ジオスライサーによるコア掘削調査を行った。

2. 地中レーダーによる地層構造の探査

地中レーダー(GPR: Ground Penetrating Radar)探査は10~1,000MHzの電磁波パルスを地中に放射し、地中から返ってくる反射波を計測することで、地下の構造を推定する非破壊探査手法の一種である。電磁波は誘電率の異なる

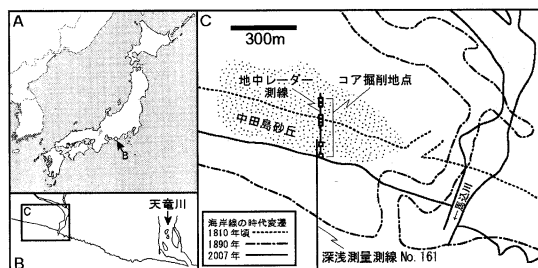


図-1 地中レーダー測線と柱状試料掘削地点

る物体の境界面で反射する性質がある。地層中の誘電率は堆積物の粒度や鉱物種、密度、含水率などによって変化するため(van Heterenら, 1998)、反射波を計測することで性質の異なる地層境界の分布を探査することが可能となる(図-2)。

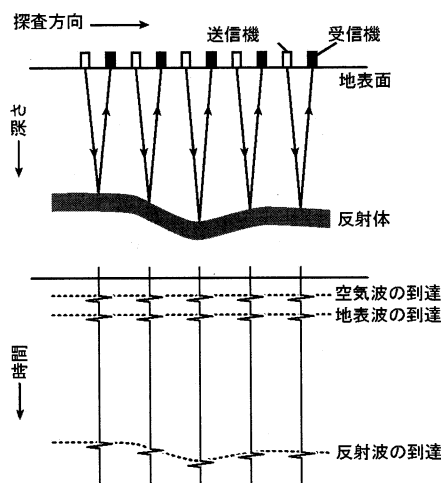


図-2 地中レーダーの測定原理と受信パルスの時間断面図

- | | |
|------------|-----------------------------|
| 1 正会員 博(理) | 東京大学助教 大学院工学系研究科
社会基盤学専攻 |
| 2 学生会員 | 東京大学修士課程学生 同上 |
| 3 正会員 工博 | 東京大学特任助教 同上 |
| 4 正会員 工博 | 東京大学教授 同上 |

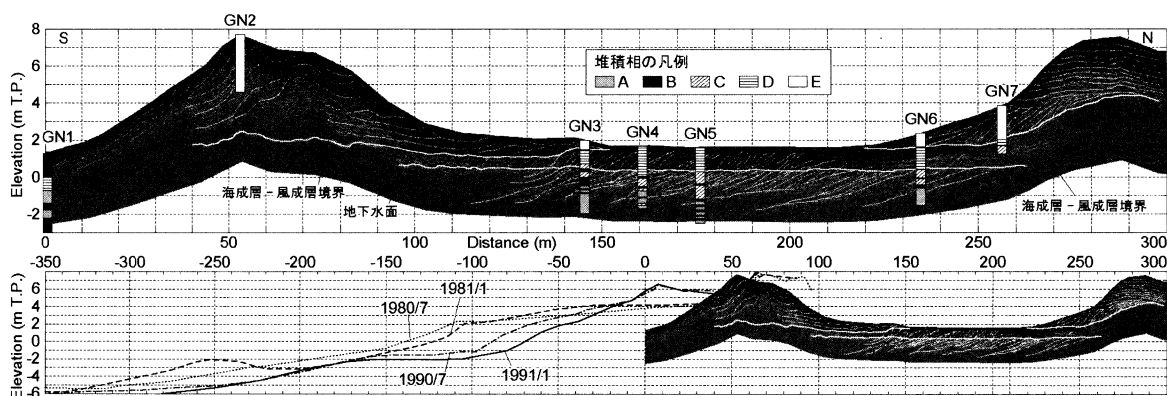


図-3 地中レーダー断面の層構造のトレースと柱状試料の堆積相鉛直分布(上), 近年の浅深測量結果に基づく地形断面との比較(下)

本研究ではNoggin plus 250レーダースystem (Sensors & Software Inc.製)を用いて2007年8月31日に測線上の海岸から300mの区間に渡って調査を行った。測定は送信・受信一体型のアンテナを地面に沿って低速度で牽引して行う。使用した電磁波パルスの周波数は250MHzで、5cmおきに電磁波の送受信を行い、受信パルスの時間断面図を得た。得られたデータは、著者らが開発したプログラムでゼロ時補正と速度-深度補正 (Jol・Bristow, 2003)を行い、さらにSandmeier Scientific Software製の解析ソフトウェアReflex2D-Quickを用いて地形補正、移動平均処理、ゲインの回復処理 (Jol・Bristow, 2003)を行い、深度断面図に変換した。得られた断面図を図-3に示す。深度変換に用いた地層中の電磁波の伝達速度は反射双曲線法を用いて推定した。反射双曲線法は地中に点状の反射体がある場合に、レーダーの時間断面図に双曲線型の波形が現れることを利用したもので、双曲線の位置と形状から電磁波の速度を推定する方法である。この方法で求めた伝達速度は標高+0.4m (以下標高は全てT.P.基準)に分布する地下水面の上下で異なり、それぞれ0.10, 0.05m/nsであった。これらの値はvan Heterenら(1998)によってまとめられた不飽和砂と飽和砂の一般的な伝達速度0.10~0.20, 0.05~0.08m/nsとも整合しており、妥当な値と言える。

得られた地中レーダー断面図には水平方向に連続する強い反射面が2つ認められた。それぞれは標高およそ+0.4mと+1.6mに分布し、後者の標高は砂丘間低地の標高と一致する(図-3)。標高+1.6mの反射面の上位では反射面が水平方向に伸びる反射面が多く、また、北側に傾斜したものや南側に傾斜したものも認められるのに対し、下位の反射面はほぼ全て南側に傾斜している。つまり、標高+1.6mの反射面は地層構造の境界となっている。一方、標高+0.4mの水平反射面の上下はともに南側に傾斜する反射面で、水平反射面を超えて連続的に分布している。このことから、この面は地層構造の境界とは一致せず、水平に発達した地下水面であると考えられる。

標高+1.6mの境界より下側に分布する反射面は、下位の反射面を切る侵食的な面と、そのような傾向を示さない

堆積的な面の2種類に区分される。侵食的な面は標高+1.6m付近から-1.5m付近まで連続的に分布し、直線的で比較的緩傾斜(1/25~1/10)である。標高-1m付近で強い反射強度を示し、面内の反射強度の側方変化が大きい。一方、堆積的な面は、標高+1m前後では比較的急傾斜であるが、下位に向かって傾斜が減少し、標高0m付近より下側では侵食的な面とほぼ同じ傾斜になり、下に凸の形状を示す。また、侵食的な面に比べると反射強度が一般に小さい。

これらの面は侵食面の上に堆積面が重なり、それらを侵食面が削るという繰り返しが南向きに繰り返しているため、侵食と堆積を繰り返しながら全体として南側へ堆積体が移動して形成したものと考えられる。さらに、反射面の傾斜や形状が、標高を合わせて表示した同じ測線上の浅深測量の結果とほぼ一致する(図-3)ことから、これらは、海岸の前進過程を記録したものと考えられる。

3. 柱状試料の堆積物調査

堆積物調査のため、ジオスライサーを用いて測線上の7点において地下3~5mの不擾乱柱状試料を採取した。採

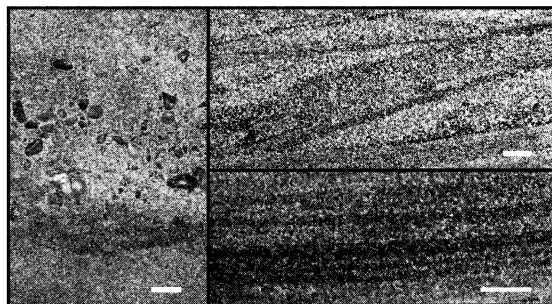


図-4 柱状試料に見られる堆積相の写真。(左)堆積相B: 侵食的な基底面を持つ礫層、(右上)堆積C: 下位の層理に対して層構造が斜めに発達する斜交層理が発達、(右下)堆積相D: 重鉱物が多い黒い筋をともなう平行葉理が発達する。スケールバーは全て2cm

取した試料は1~5cm毎に試料を採取し、粒度分析を行った。1mm以上の粒子を含む試料は篩を用いて計測し、その他はレーザー回折式粒度分布測定装置(SALD-3000S)を用いて測定した。使用したレーザー回折式粒度分布測定装置では篩試験に比べて平均粒径が約1.2倍になる点に留意して分析を行った。ここでは、粒度や鉱物種、堆積構造をもとに、得られた柱状試料をA~Eの5つの堆積相に区分した(図-4)。

堆積相Aは極細粒~中粒砂からなり、生痕化石を多く含み、層理が不明瞭である。標高-2.5~-0.5mと最も下位に分布する。堆積相Bは礫層で、~50mmの礫を含む。主に堆積相Aの上位に分布し、下位の地層を削る侵食的な基底面をもつ。標高-1.0m前後に多く分布する。堆積相Cは、中~粗粒砂からなり、細~中礫を含むこともある。南北両方向に傾斜する斜交層理が発達するのが特徴で、標高-1~0mに分布する。堆積相Dは中~粗粒砂からなり、細~中礫をまれに含む。磁鉄鉱などの重鉱物が濃集した黒色の平行葉理が発達する。堆積相Eは平均粒径0.3mm(篩換算)の非常に淘汰の良い中粒砂からなり、平行葉理が発達する。堆積相Dには粗粒砂が多く含まれ、礫が含まれる場合もあるのに対し、堆積相Eには粗粒砂より大きい堆積物粒子は含まれない。

堆積相と粒度の垂直変化を図-5に示す。下位から上位に向かって、堆積相AとBとCの互層、堆積相DとEの互層、堆積相Eというように変化する。このような堆積相の重なりは他の地点にも共通して見られた。

この地域の潮位変動が-1.1~+0.9mであることを考慮すると、各堆積相は次のような堆積環境で形成されたと考

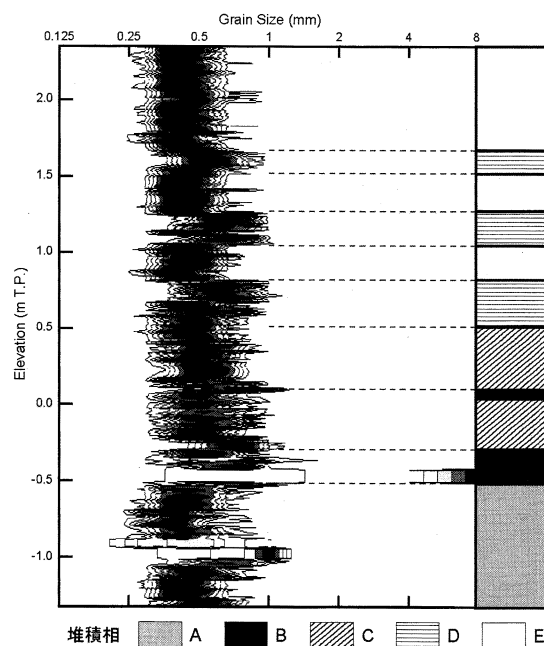


図-5 柱状試料GN6の粒度と堆積相の鉛直分布

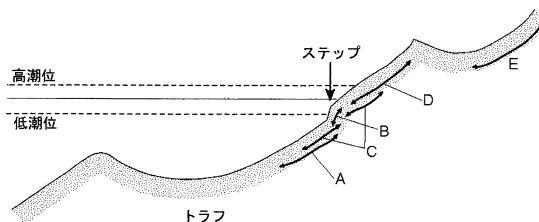


図-6 堆積相A~Eの堆積場の模式図

えられる(図-6)。堆積相Aは、主に低潮位線より下側に分布し、比較的細粒であることから、トラフの堆積物と考えられる。堆積相Bは低潮位線付近に分布し、礫を多産すること、基底が侵食面であることから、海浜が侵食された際にステップ付近に礫が残留して形成されたものと考えられる。堆積相Cは堆積相Bの上位に重なり、斜交層理を示すことから、侵食後の海岸の回復過程で小規模なバーが波浪作用によって岸沖方向に移動して形成されたものと考えられる。堆積相Dは重鉱物が濃集する平行葉理をもち、平均潮位~高潮位線付近に分布することから前浜で波浪作用によって形成されたものと考えられる。堆積相Eは高潮位線より高い位置に分布し、粗粒砂より大きい粒子を含まず、淘汰が極めてよいことから、後浜や風成砂丘において、堆積物が風で運ばれてきたものと考えられる。

4. 地中レーダー断面と柱状試料の比較

地中レーダー断面と柱状試料の堆積相の分布を比較すると、まず、地中レーダー断面の標高+1.6mにある層構造の境界面が、堆積相Eとその他の堆積相の境界となっている(図-3)。このことから、この境界面は海の波の作用で堆積物が移動して形成された下位の海成層(堆積相A~D)と風の作用で形成された上位の風成層(堆積相E)の境界であることがわかる。海成層が一貫して南に傾斜した層構造を示すのに対し、風成層の傾斜方向には特定の方向性が認められないのは、海成層を形成した海浜堆積体が測線と平行に南側へ前進して形成されたのに対し、風成層を形成した砂丘の移動方向が測線とほぼ直交する向きであったことを示す(図-7)。これは、現地の風による土砂移動の卓越方向が東南東(佐藤, 2008)であることと符合する。

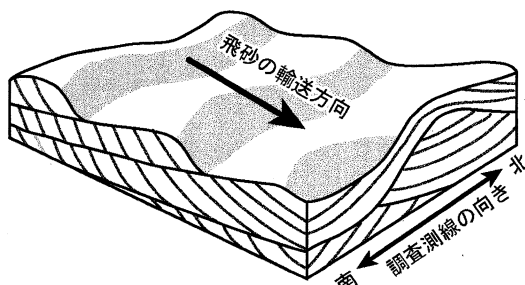


図-7 飛砂の移動方向と風成層の断面層構造

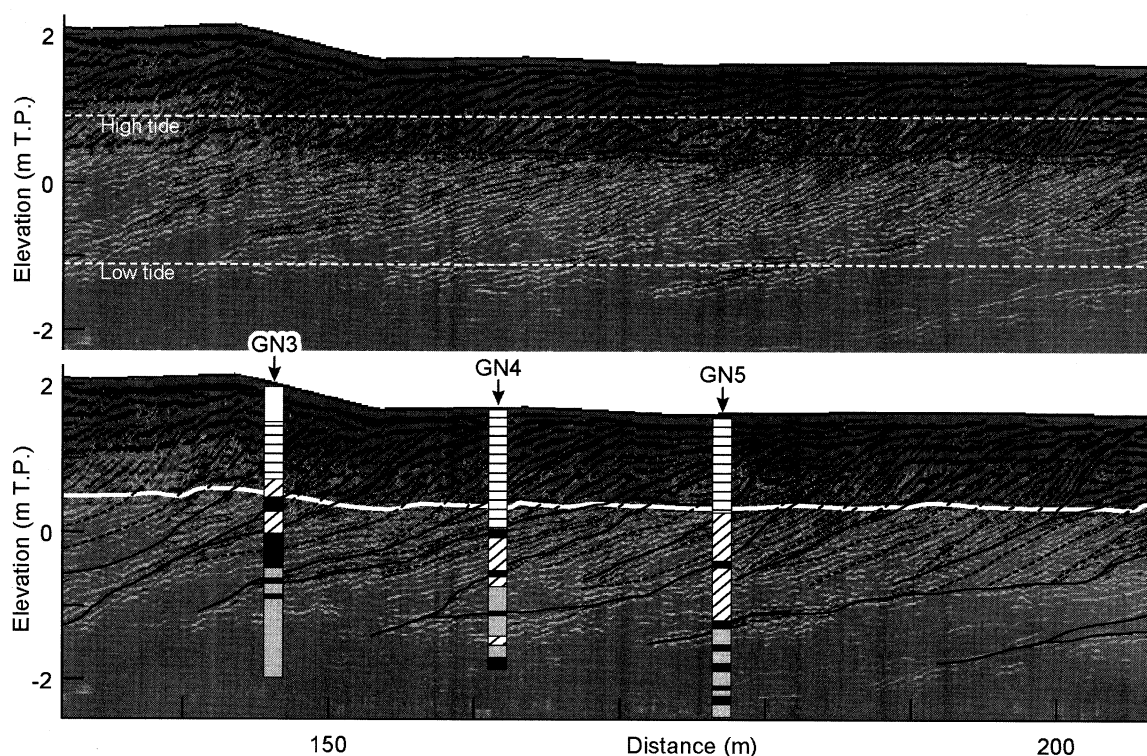


図-8 地中レーダー断面(上)と層構造のトレース(下)。下位の層構造を切る侵食面(実線)と下位の層に積み重なる堆積面(破線)が認められる。図中に示した柱状試料の堆積相の凡例は図-5 参照。

海成層内部では、レーダー断面の侵食面と柱状試料に見られる侵食的な基底を持つ堆積相 B がよく対応し、反射強度の特に強い部分と礫層の分布がほぼ一致する(図-8)。これにより、レーダー画像から読み取った侵食構造が柱状試料の観察から裏付けられ、地中レーダー探査が、海浜の地層構造探査に有効であることが確かめられた。

5. 汀線位置の変化と海浜の形成過程

地中レーダー断面と柱状試料で認められた堆積-侵食の繰り返し構造が、どのような時間スケールで形成されたのかを調べるために、測線上の汀線位置の変化を地図と国土交通省の深浅測量データを基に分析した。1810年頃に測量された伊能大図(日本地図センター、2006)は平松ら(2008)の方法を用いて座標系を現在のものに統合した、誤差は100m 以内である。分析の結果、1810年頃から1890年にかけて海岸線が430m 南側に前進していたことが明らかになった(図-9)。およそ年平均 5m の速度で海岸線が南に前進していたことになるが、この前進速度は古文書や堤防跡の分析から得られた既往の推定結果(加茂, 2003, 2006)とはほぼ一致する。当時の汀線の前進速度が一定であったと仮定すると、地中レーダー調査区間の海成層は1800年頃からおよそ60年かけて堆積したものと推定される。汀線の前進速度は年平均 5m 程度であり、これは地中レーダー画像に見られる海成層上部の侵食面の間隔とほぼ等しい。

このことから、これらの侵食面はほぼ 1 年間で形成されたものと推定される。現地海浜を侵食する 1 年周期の現象としては、夏から秋にかけての台風接近による高波浪の来襲が挙げられ、それぞれの侵食面は、夏から秋にかけての高波浪来襲時に前浜が最も後退した際の地形を示しているものと考えられる。実際、侵食面の形状は1990年 1 月に実施された地形とよく対応している。つまり、侵食面と堆積面の繰り返しパターンは、夏から秋にかけての高波浪時の侵食と通常波浪による前浜への堆積の繰り返しがあり、さ

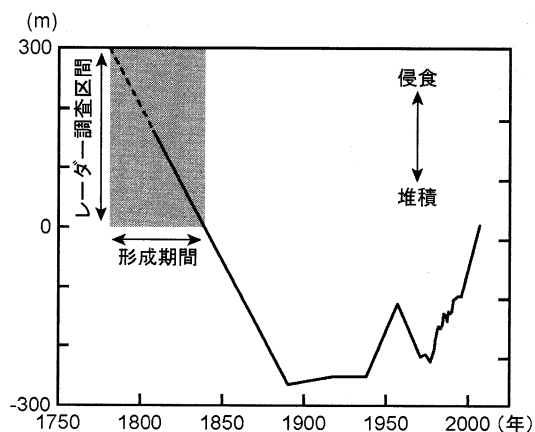


図-9 調査測線上における汀線位置の変化

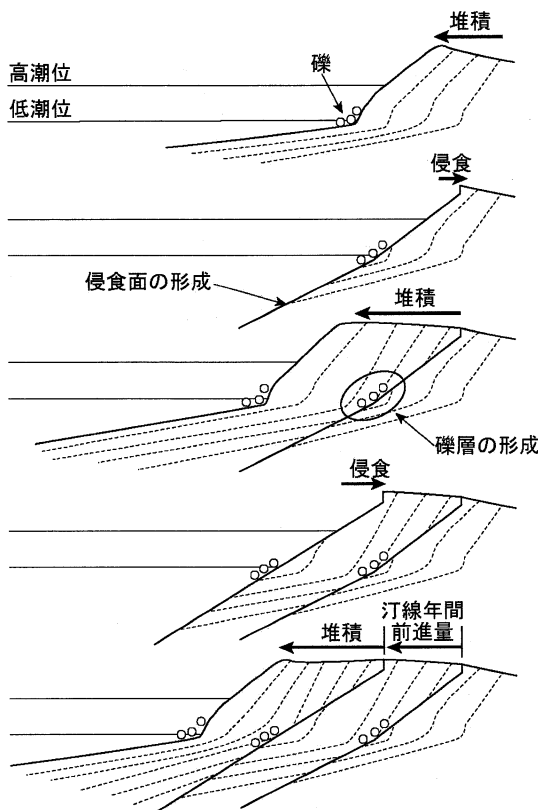


図-10 堆積—侵食の繰り返しの海浜地層の形成過程

らに、年間を通じて見ると侵食量を堆積量が上回っていたために形成されたと考えられる。海成層下部の低潮位線付近で侵食面の間隔が10~20m程度と広がるのは、数年に1度の規模の大きな侵食イベントによって、1年毎の変動の記録が上書きされた結果であると考えられる。つまり、海岸地形の変動特性が標高によって大きく異なることが明らかになった。

6. まとめ

天竜川河口周辺の中田島砂丘と隣接する海岸において地中レーダー探査と柱状試料の堆積物分析、地形データの分析を行なった。その結果、この地域の地層は標高+1.6mより上位の地層は風成砂丘が沿岸方向に移動することによって形成され、下位の地層は1800年前後にトラフやステップを含む前浜の地形が年平均約5mの割合で南に前進して形成されたことが明らかになった。特に下位の海成層におい

ては、地中レーダー断面にはほぼ1年間隔の侵食面が認められ、これは夏から秋にかけての高波浪によって形成されたものと考えられる。つまり、地層構造から地形の季節変動を読み取ることができた。このようなレーダー断面から認識される侵食面の分布は柱状試料に認められる侵食構造や礫層の分布とよく対応し、地中レーダー探査が海浜の地層構造探査に有効であることが確認され、海浜地形の季節変動も復元可能であることが明らかになった。今後このような調査手法をより広い範囲の海浜地層に適用することによって、海浜の長期的な変動に関する多くの知見が得られるものと期待される。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費重要課題解決型研究「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」の研究成果の一部である。現地調査においては、浜松市および静岡県との協力を得た。国土交通省浜松河川国道事務所からは貴重なデータをご提供いただいた。加茂豊策氏には天竜川河口部周辺の沿岸低地の地形変化に関する貴重な文献を提供していただいた。産業技術総合研究所の田村亨、村上文敏、両氏には地中レーダーの探査法についてご教示いただいた。また、中田島砂丘の地形測量にあたっては、豊橋技術科学大学片岡三枝子氏の協力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 宇多高明・青木伸一・三波俊郎・芹沢真澄・小池鋼・石川仁憲 (2007)：遠州灘海岸の馬込川河口部の地形変化と中田島砂丘の保全，海洋開発論文集，第23巻，pp. 1021-1025.
- 加茂豊策 (2003)：天竜川の変遷と浜松市南部の沿岸低地造成の関係について，静岡地学，第88号，pp.21-28.
- 加茂豊策 (2006)：明応（今切決壊）前・後の浜名湖南部の地形，静岡地学，第94号，pp. 39-54.
- 財団法人日本地図センター (2006)：伊能大図総覧，河出書房新社，512p.
- 佐藤慎司 (2008)：遠州灘浜松海岸の土砂移動実態，土木学会論文集B，第64巻，第3号，pp. 192-201.
- 平松遙奈・富田沙希・佐藤慎司・田島芳満・青木伸一・岡辺拓巳 (2008)：着色砂調査に基づく遠州灘馬込川河口周辺の砂移動機構の解明，海岸工学論文集（投稿中）.
- Jol, H.M. and C.S. Bristow (2003)：GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide, Ground Penetrating Radar in Sediments, Geological Society, London, Special Publications, Vol. 211, pp. 9-27.
- van Heteren, S., D.M. Fitzgerald, P.A. McKinlay and I.V. Buynevich (1998)：Radar facies of paraglacial barrier systems: coastal New England, USA, Sedimentology, Vol. 45, pp. 181-200.