海岸工学論文集，第50巻（2003）
土木学会，546-550

Xバンドレーダを用いた前浜地形の観測

武若　聡*・後藤　勇**・西村仁嗣***

Xバンドレーダを用い，広域の前浜地形（汀線位置，断面形状，平均前浜勾配）を観測する方法について検討した．観測はHORS観測桟橋で実施した．レーダはマイクロ波を海面に向かって照射し，その反射（エコー）を捉える．エコーは波峰から強く発生し，その分布から波浪場を知ることができる．エコーを時間平均した画像を作成し，これから約2kmの範囲の汀線位置を読み取った．満潮位から干潮位にかけての時間帯に観測を行い，汀線位置，前浜の断面形状と勾配を求めた．観測結果と測量データと比較し，汀線位置をおおよそ10m以内，地盤高さを0.5m以内程度の精度で，また，前浜勾配を良好に測定できることを確認した．

1. 緒　　言

現在行われている深浅測量は，計測点では正確なデータが得られるものの，広範囲，また，高頻度にデータを収集するための人的コストは大きく，また，荒天時のデータを得るのは困難である．本研究では，船舶用のXバンドレーダを用い，リモートセンシングで広範囲の前浜地形（汀線位置，断面形状，前浜勾配）を測定する手法について検討した．

Xバンドレーダを用いた海岸波浪の観測は，国内では小林ら（2001，2002）により行われており，荒天時の広域波浪場の方向スペクトル，表層流の分布推定などに成果を上げている．海外ではドイツGKSS研究所のZiemerらの研究グループが1980年代より船舶用のレーダを用いた波浪観測に精力的に取り組んでいる（海岸工学研究レビュー小委員会，2001）．

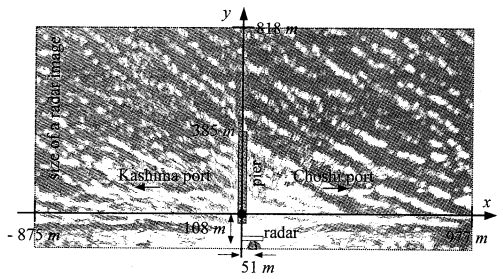
航空写真を用いた汀線位置の読み取りは古くより行われている方法であり，例えば，黒澤・田中（2001）は写真撮影と同期した測量を行い，空中写真から読み取った汀線位置の精度について検討している．また，航空写真解析の延長として，衛星リモートセンシングデータを用いた汀線位置の読み取りも行われている（例えば，浅野ら，2000）．稲葉ら（2001）は係留ビデオ（武若ら，2000）を用い，ビデオ画像の解析から浅海域の水深分布を求めることを試みている．これらの可視領域の観測に関する問題点は，観測が日中の晴天時に限られる点，航空写真と衛星リモートセンシングでは一回の観測で取得されるデータが波浪場のある瞬間のスナップショットである点などである．これに対して，Xバンドレーダは夜間，荒天時の観測にも対応でき，また，連続観測により波浪場の時々刻々の変化を追跡することが可能である．

* 正会員　工博　筑波大学助教授　機能工学系
** 学生会員　筑波大学大学院理工学研究科
*** 正会員　工博　筑波大学教授　機能工学系

表—1　観測日と海況

観測日時	有義波高	有義周期
2002年7月11日4時～11時	3.03m	5.94s
2002年8月9日6時～10時	0.42m	6.33s
2003年1月16日14時～21時	1.50m	7.53s

有義波高・周期は観測時間帯中の最大値



図—1　座標系とレーダ設置位置．レーダ画像との重ね合わせ表示

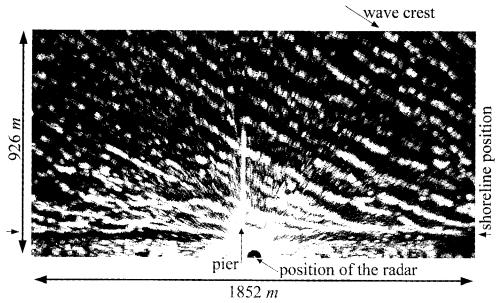
2. Xバンドレーダによる波浪の観測

Xバンドレーダはアンテナが回転しながらマイクロ波を海面に向かって照射し，その反射（エコー）を捉える．エコーは波峰から強く発生することが経験的に知られており，エコーデータを画像表示（レーダ画像）することにより波浪場の状況を知ることができる．

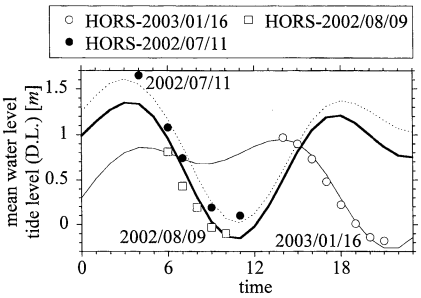
レーダ観測は（独法）港湾空港技術研究所の波崎観測桟橋HORSで行った．後浜にある研究施設の屋上にレーダ（日本無線(株)JMA-3925-9）を設置した．**図—1**にレーダと桟橋の位置関係，本論の説明に用いる座標系を示す．座標系の原点は桟橋上にある．

観測は2002年7月，8月，ならびに2003年1月の大潮の時に行った．2002年7月の観測時には台風6号が鹿島灘を通過した．本研究で使用するデータを取得した観測日時を**表—1**に示す．

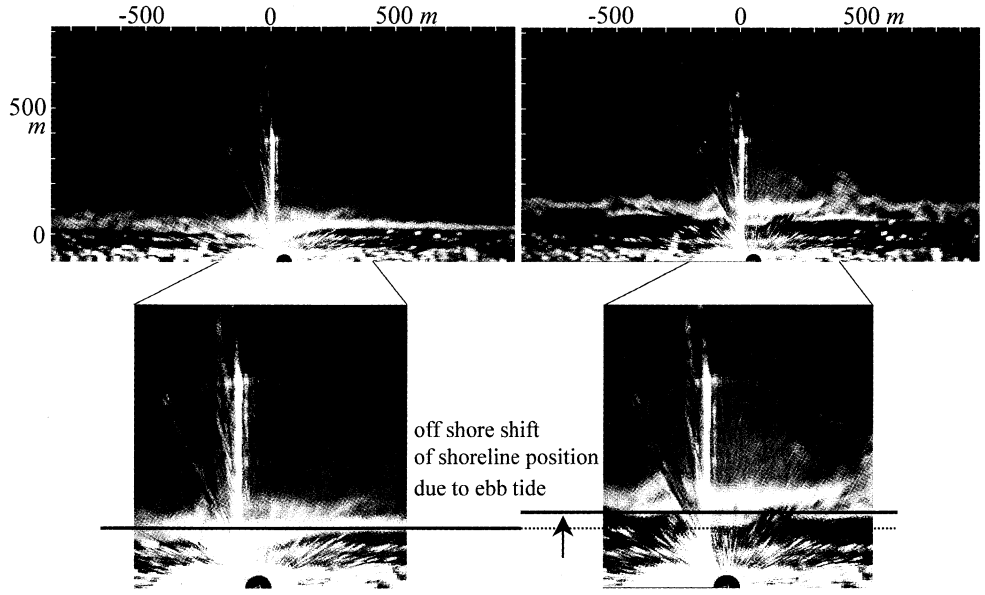
沿岸方向約1850m，岸沖方向約930mの範囲のエコーデータを2秒毎にレーダデータサンプリングボード（日



図—2　レーダ画像の例（2002年7月11日4時，台風6号通過時）



図—3　桟橋で計測された平均水位（記号）と銚子漁港の観測潮位（実線，破線）



(a)　2002年8月9日6時，潮位：0.81 m　　(b)　2002年8月9日10時，潮位：−0.10 m

図—4　潮位の異なる時間帯の平均画像

本無線(株)製)を通じてPCに収録した．エコーデータは1024×512ピクセル，1ピクセルあたり256階調の画像として記録した．1ピクセルの大きさは約1.8 mに相当し，輝度がレーダエコーの相対的な強度に対応する．なお，レーダ機器の測定原理上の空間分解能は7.5 mである．また，レーダのアンテナは約2.5秒で一回転するので，2秒毎に収集されたレーダ画像の一部には更新されない領域がある．

図—2に台風6号通過時のレーダ画像を例示する．斜め右上方から波が入射し，これらが海浜上で屈折する状況が鮮明に捉えられている．

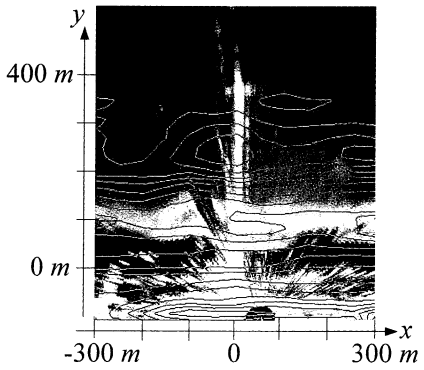
レーダ観測は潮位が満潮位から干潮位まで，あるいは干潮位から満潮位まで変化する間に連続的に実施し，同時に水位変化を桟橋に設置された波高計（y=40, 80, 145, 230, 380 m）で計測した．観測時間帯に見られたの最大有義波高と有義周期を**表—1**に，桟橋先端（y=380 m）で計測された平均水位（1時間平均値）と気象庁により観測された銚子漁港の潮位を**図—3**に示す．なお，平均水位と潮位は（独法）港湾空港技術研究所が使用する基準高さ(DL表示）を用いて表示する．

2002年8月のレーダ観測を実施した日時とその前後には，桟橋周辺の深浅測量（$-300 \leqq x \leqq 300$ m, $-120 \leqq y \leqq 900$ m）が行われており，エコーデータの解析から求めた地形情報の妥当性の検討に使用した．

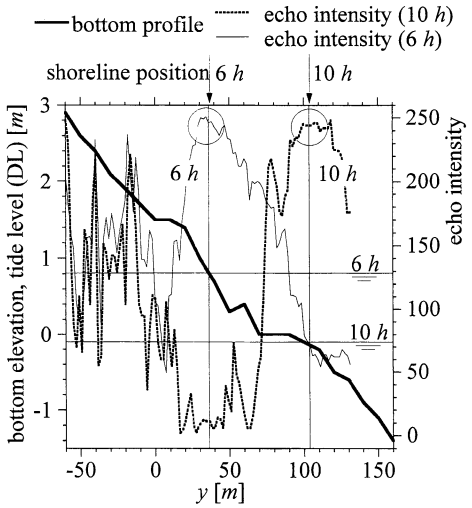
3.　平均画像を用いた汀線位置，前浜地形の観測

(1)　潮位と汀線位置

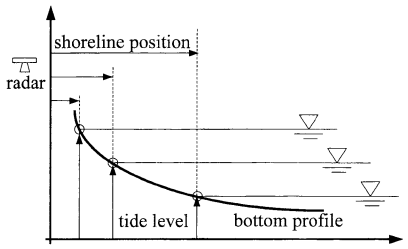
ここでは，潮位と汀線位置を次のように定義する．次節で説明する平均画像を作成したのと同じ時間帯に，桟



図—5　平均画像と深浅測量結果の重ね合わせ表示（2002年8月9日10時）．等値線間隔：0.5 m



図—6　平均画像の岸沖輝度分布（y=200 m）と地形の関係

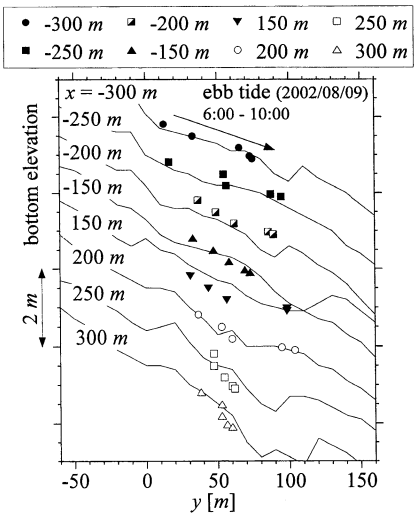


図—7　レーダを用いた前浜地形の観測

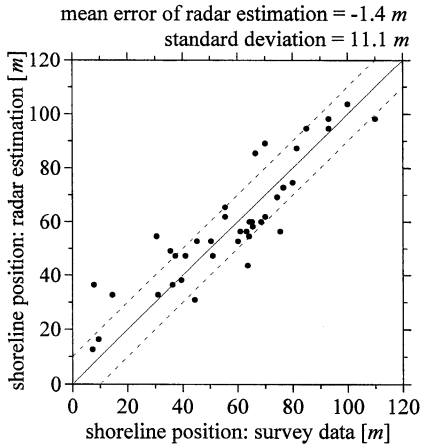
橋の最も沖側で計測された平均水位をその時間帯の潮位とする．深浅測量の結果を用い，潮位と測量された海底地形が交わる位置を求め，これを各時間の汀線位置の真値とする．

（2）平均画像

個々のレーダ画像を1時間にわたって平均した画像



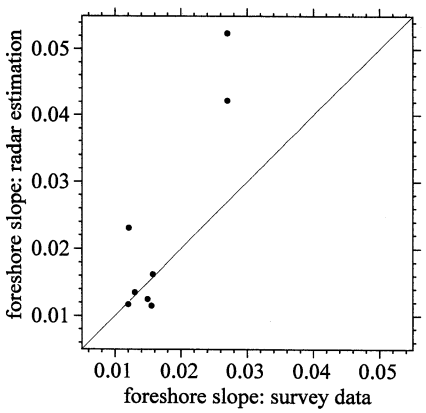
図—8　前浜地形の推定結果（2002年8月9日，6時～10時）



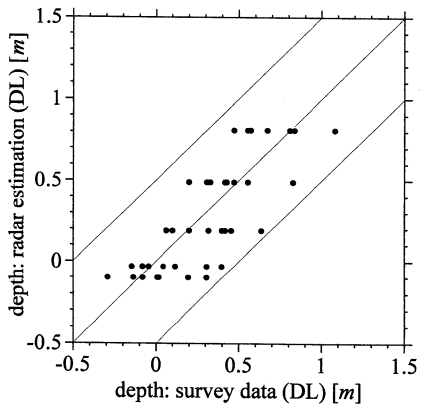
図—9　汀線位置の推定精度（縦軸：レーダ観測，横軸：深浅測量，平均誤差：−1.4 m，標準偏差：11.1 m）

（以降，平均画像とする）を作成し，次節に説明する汀線位置の読み取りを行った．図—4に2002年8月に観測された，潮位の異なる時間帯の平均画像を示す．エコー強度の大きい領域が白く表示されている．同図中の拡大枠内の実線付近に汀線があると考えられる．潮位の低下に伴い，汀線位置が沖側に移動している状況が読み取れる．また，この移動量は沿岸位置により異なり，海浜勾配に分布があることが読み取れる．

深浅測量の結果と平均画像の重ね合わせ表示を図—5に示す．平均画像中の高輝度領域の分布はある等深線に沿っており，輝度分布の解析から汀線位置を読み取れることが期待される．



図—10　前浜勾配の推定精度（縦軸：レーダ観測，横軸：深浅測量）



図—11　地盤高さの推定精度（縦軸：レーダ観測，横軸：深浅測量）

（3）　汀線位置の読み取りと前浜地形の観測

潮位が異なる時点で取得された平均画像の $y=200$ m に沿っての輝度値の岸沖分布，海底地形，汀線位置を**図—6** に表示する．図中の○で示したように，輝度分布のピーク位置の近くにその時間帯の汀線位置があり，これを各時間帯の平均画像から読み取り汀線位置を求めた．

この平均画像から抽出する輝度ピーク位置と実際の遡上帯の波動運動との関連付けは行っていないが，次のような関係にあると考えている．個々のレーダ画像はある瞬間の波の遡上状況を捉えている．遡上先端で位置はボアの発達があり，エコー強度が大きくなっている．遡上波の最高到達点と遡上開始位置の間にある波からのエコーデータの平均が輝度ピークとして現れる．入射波の波高が大きい時には，遡上波の往復運動が大きくなり，このピークの存在が，入射波の小さいときに比べて不鮮明になる．

以上の手順で平均画像から読み取った汀線位置には wave setup の影響が含まれており，特に入射波高が大きい時には汀線位置を岸側に読み誤る可能性がある．観測された波高値から wave setup の大きさを見積もり，次節に述べる前浜勾配の推定結果とあわせて，その位置を修正することも可能であるが，ここでは検討しなかった．

満潮位から干潮位にかけての海岸地形（以降，前浜とする）を観測する手順を説明する．汀線位置の沿岸分布を潮位の異なる時間帯に平均画像から読み取り，潮位は別途に計測する．これにより，**図—7** に示すように，満潮位から干潮位にかけての前浜地形，すなわち，汀線の水平位置をレーダ観測より，鉛直位置を潮位観測より求める．

（4）　汀線位置，前浜勾配の観測精度

以上の手順に従って求めた前浜地形の観測結果と深浅測量によって求められた海底地形を**図—8** に示す．推定された前浜地形は，例えば，前浜勾配の緩急に対応して汀線位置が変動する範囲が変化する状況など，深浅測量結果の特徴を捉えている．なお，レーダ設置位置の近くではエコーが強く，輝度データが飽和していた．このために $-100 \leqq x \leqq 100$ m の地形は求められなかった．

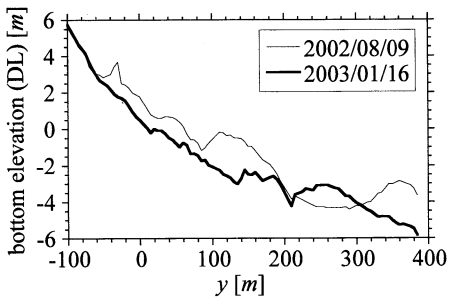
深浅測量結果から求めた汀線位置とレーダ観測から求めた汀線位置を比較した結果（8 測線，5 時点，総計 40 点）を**図—9** に示す．汀線の位置はおおよそ 10 m の誤差内で推定されている．また，岸寄りにその位置を推定する傾向が若干見られるが，これは先に述べた wave setup の効果の現れであると考えている．

潮位が満潮から干潮まで変化する区間の地盤高さを直線回帰して前浜勾配とした．**図—10** に深浅測量結果とレーダ観測から求めた前浜勾配の比較を示す（8 測線）．勾配の大きい測線についての不一致が顕著であるものの，勾配が 0.02 までの測線についてはほぼ妥当な結果を与えていると判断される．なお，局所勾配が変化する前浜地形を直線で近似して比較することの合理性については検討の余地がある．

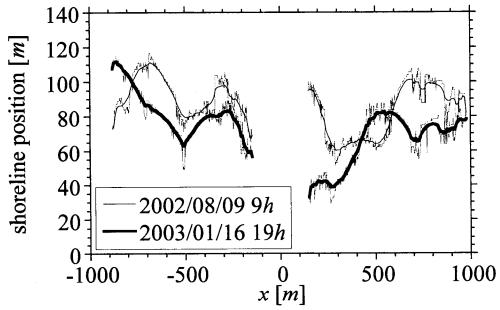
本手法を用いて前浜地形を観測する場合には，レーダ画像から汀線位置を求め，その高さを潮位観測の結果から定めることになる．ここではこれに対応して，推定された汀線位置における地盤高さを深浅測量結果から求め，これと観測された潮位との差を地盤高さの観測誤差として**図—11** に示した．地盤高さは ± 0.5 m 以内の精度で観測されている．

4.　高波浪作用後の前浜地形変化

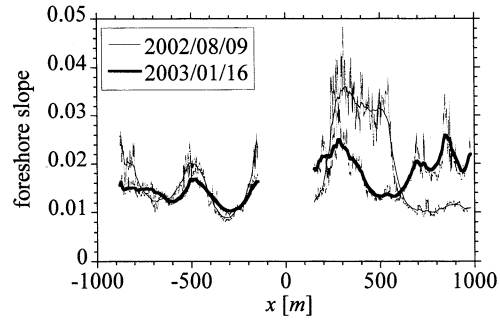
2002 年 8 月から 2003 年 1 月の間には，秋季の高波浪により大規模な侵食があった．**図—12** に 8 月と 1 月の桟橋に沿っての地形を示す．前浜領域の平均地盤は約 1 m 低下している．ここでは，8 月と 1 月のレーダ観測結果



図—12　桟橋沿いの海底地形変化（2002年8月9日，2003年1月16日）



図—13　汀線位置の変化（2002年8月9日9時，潮位：−0.03 m，2003年1月16日19時，潮位：0.01 m）



図—14　前浜勾配の変化（2002年8月9日，2003年1月16日）

を示し，前浜地形と勾配の変化について説明する．

図—13 に潮位がほぼ等しい時間帯の汀線位置の分布を示す．一部の領域（$400<x<600$ m）では汀線位置が沖側に前進しているが，全般には8月から1月にかけて汀線位置は岸側に後退している．汀線が後退した後にも，$x<0$ m（鹿島港側）の領域には，$x=-250$ m付近で汀線位置が相対的に沖側に，$x=-500$ m付近で相対的に岸側にある，という汀線位置分布の特徴が残っている．

図—14 に示す前浜勾配の沿岸分布には，変化の見られない領域（鹿島港側），緩・急勾配化した領域（$x>0$ m，銚子港側）がある．鹿島港側の相対的な緩急の分布（$x=-250$ m付近で緩勾配，$x=-500$ m付近で急勾配）は，先に説明した汀線位置分布の特徴に対応している．

航空写真で確認したところ，$x=-250$ m付近には，砂浜と海岸林の境界に排水口があり，背後の集落からの雨水，生活水が排出されている．汀線と前浜勾配分布に見られる$x=-250$ m付近の地形の特徴はここからの流れの影響を受けていると推測される．

5. 結　　言

Xバンドレーダを用い前浜地形を観測する手法について検討した．汀線位置をレーダ画像から求め，さらに潮位の変化を利用して前浜勾配を求め，観測精度について検討した．汀線位置はおおよそ10 m以内，地盤高さを±0.5 m以内程度の精度で，また，前浜勾配を良好に測定できることを確認した．

ここに示した観測方法では約2 kmの範囲の前浜地形を連続的に計測できるが，観測精度は深浅測量に劣る面がある．今後この方法を発展させるには，広域の前浜地形測量に要求される観測精度を検討し，面的把握に優れたレーダ観測と観測精度に勝る深浅測量の適切な空間・時間的な組み合わせを考えることになる．

謝辞：（独法）港湾空港技術研究所漂砂研究室にはレーダ観測，海岸地形データの提供などで便宜を図って頂いた．岐阜大学助教授小林智尚氏にはレーダ観測に関するアドバイスを頂いた．本研究の一部は（財）漁港漁村建設技術研究所研究助成金ならびに日本学術振興会科学研究費補助金の支援の下で実施された．以上，ここに記して謝意を申し上げます．

参考文献

浅野敏之・幸野淳一・佐藤孝夫・嶺　泰宏（2000）：衛星画像データを用いた台風時波浪による汀線変化の解析，海岸工学論文集，第47巻，pp. 671-675.

稲葉　徹・森本佳緒里・武若　聡・西村仁嗣（2001）：波浪場画像の解析による水深分布推定，海岸工学論文集，第48巻，pp. 1416-1420.

海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会（2001）：陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測，土木学会，212 p.

黒澤辰昭・田中　仁（2001）：空中写真による海浜汀線形状の判読に関する研究，海岸工学論文集，第48巻，pp. 586-590.

小林智尚・河合篤司・小塚将之・安田孝志（2001）：Xバンドレーダによる沿岸域の観測，海岸工学論文集，第48巻，pp. 1431-1435.

小林智尚・山崎将史・湯本大輔・渡辺章人・安田孝志（2002）：Xバンドレーダによる冬期日本海沿岸海洋観測，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1516-1520.

武若　聡・中村　崇・三崎尚一郎（2000）：係留ビデオシステムを用いた砕波帯水理現象の解析，海岸工学論文集，第47巻，pp. 126-130.