

スキャニング式海底プロファイラーによる 外浜海浜地形の3次元計測

山下隆男*・土屋義人**・岩井 卓***・遠藤保彦****

1. 緒 言

近年、海洋開発、海洋土木、水産関係などの分野で、海底地形を精度良く効率的に測深することが望まれている。特に海岸工学の分野では、海底地形の計測は海浜変形結果の観測であり、波浪、海浜流のような外力(要因)の観測とともに現地海岸における重要な観測項目のひとつである。このため、京都大学防災研究所大瀧波浪観測所では、定期的な深浅測量のほか観測棧橋を援用したレッドによる長期間(約20年間)の線の測深を行い、これらの観測結果が海浜変形特性を知るうえで、有効なデータであることを示した。

海浜変形予測技術の進歩にともない、海浜変形問題の解を知るための海底地形の高精度の3次元計測が要求されるようになってきた。これまで、圧力センサーを取り付けた計測用のソリの開発を試みたが、線の測量であることと測位の精度が悪いため微地形を計測することができず実用には至らなかった。最近の海底の測深技術は、従来のシングルビーム音響測深装置による「線の測深」から、マルチ・ナロービーム音響測深機による「面の測深」へと発展しつつある(遠藤, 1990)。これは主としていわゆるクロスファンビーム方式によって、測量船の左右舷方向の複数箇所の海底水深を同時に測定することで、海底を面状に精度良くかつ効率的に、測深することができる。大陸棚の海底を対象とした HS-200 II および水深 11,000 m まで測深できる深海用の HS-10 の開発に続き、50 m 以浅の極浅海域を対象としたマルチナロービームによる電子スキャニング式の海底プロファイラーが開発され、実海域試験において、このシステムの有効性が検証されてきている。これは高い周波数(500 kHz)の超音波を用い、分解能は 1° 、測深幅 90° とし、小型測量船にも容易に装備できるように装置全体が可搬型に設計されているため、比較的安価なハードウェア構成で、短期間に広範囲、高精度の海底地形図を作成するこ

とが可能である。

本研究では、スキャニング式海底プロファイラー HS-500 II (古野電気社製) およびマイクロ波高精度測位装置マルチポンドーシステム3000 (セナー社製) との併用で、水深 10 m 以浅の外浜帯における海底地形の3次元計測を行う方法を確立し、海浜変形の現象の究明、モニタリング、予測法の精度向上に活用しようとするものである。今回は、現地海岸に造成した人工浅瀬の地形計測および人工リーフ工周辺の地形計測を行い、本測深システムの有効性を検討する。

2. スキャニング式海底プロファイラー

2.1 マルチナロービームの原理

超音波の送受信器は、送波用と受波用が別個になっており、船底または舷側に装備される。送受信器は多素子構造になっているが、これは図-1に示すように、ちょうど扇子を広げたような形のファンビームを実現するため、船体の動揺のピッチングに対して送波ビームを、ローリングに対して受波ビームを独立に電子的に制御するためである。送波用ファンビーム ($120^\circ \times 1^\circ$) と受波用ファンビーム ($20^\circ \times 1^\circ$) がクロスすることから、この方式をクロスファンビーム方式と呼ぶ。2つのファンビームがクロスしている部分(図-1の斜線部分)の海底反射エコーが受信されるが、ここで受波ビームを自船の左右方向に電子スキャニングさせることにより、各90本のビーム(前後・左右方向の分解能が $1^\circ \times 1^\circ$) で、左

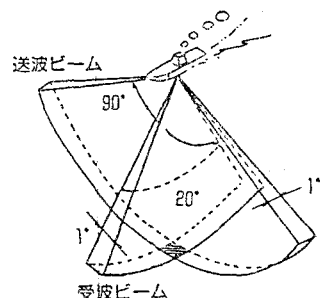


図-1 送受波ビーム

* 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所
 ** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
 *** 正会員 工修 出光エンジニアリング株式会社
 **** 古野電気株式会社 技術研究所主任技師

右舷方向 90° の間の測深データを得ることができる。探查幅は、 90° 以外に 60° 、 30° の選択ができ、探查幅によって測深分解能はそれぞれ 7, 5, 2.5 cm となっている。

2.2 プロファイラーの概要

本装置は、基本的には送受波器、送受信部、データ処理部（演算、制御、データ収録）、外部 I/F（船首方位、自船位置）から構成されており、測量船の左右舷方向の海底を連続的に幅広く同時に測深しながら、測深データからリアルタイムに海底地形をカラー表示管上に三次元表示、等深線図表示等をさせるとともに、カートリッジテープに測深データを収録することができる。測深データは、外部から入力される船首方位、自船位置等と組み合わせて三次元データとし、表示に必要な処理を行ってから、14インチ高分解能カラーディスプレイ上に8色のカラーで海底地形をリアルタイムに表示されるので、測量中に海底地形が容易に把握できる。また、送信毎の時刻、船位、水深、海底反射強度等の各データはデータ収録されるが、必要に応じて本装置で再生することも可能である。表-1 に本装置の主要性能を示す。データサンプリングレートは2回/秒であり、掃査幅は左右 90° であるほか船体の動揺（ピッチ、ロール、ヒープ）に対して動揺検出信号により、ピッチング補正は送波ビームに対して、ローリング補正は受波ビームに対して、ヒープ補正は海底エコー受信タイミングに対して電子的にリアルタイム補正を行うことで常に安定な測深が行えるように設計されている。

この計測法の実海域試験として、従来のシングルビーム測深機を測量船の左右舷方向に約 1.5 m 間隔に6台装着し、右舷側に HS-500 II の送受波器を仮装備して両者の比較実験を行った結果、HS-500 II では1回の送受信で水深の約2倍の幅が一度に測深できるため、海底地形を連続的にかつ広範囲に計測できるが、シングルビームでは装着間隔 1.5 m の点でしか地形を検出できないため計測結果の連続性の質に大きな差があることが示されている。

2.3 測位装置の概要

船舶に搭載した主局と陸上の座標基地点に設置した従局間の見通す距離をマイクロ波のパルスの往復時間により測定する測位装置で、往復回数20-100回の測定の平均値を1秒周期で更新し表示する。また、円偏波の放射により海面反射等の干渉による影響を軽減しており、測定精度は ± 0.5 m、最大測定距離 70 km、最小測定可能距離 0.1 km である。主局（送信周波数 9860 MHz）1台、従局（送信周波数 8860 MHz）2台の基本構成で、平面座標上での位置を表示し、これを HS-500 II の記録部へ RS232C で出力する。電源は 24 V で、乗用車用バ

表-1 プロファイラーの主要性能

1. 性能仕様	
1) 周波数	500kHz
2) 送信出力	4kW+0.2kW
3) 送信繰返し周期	1秒に2回
4) 送信指向角	1° (前後) $\times$ 120° (左右)
5) 受波指向角	1° (左右) $\times$ 20° (前後)
6) 探查幅	90, 60, 30°
7) 探知水深	泥海底質: 90° 探查幅で水深30m シルト // : // 50m
8) 測深分解能	90°モード: 7.5cm 60°モード: 5 cm 30°モード: 2.5cm
9) 音速補正	*最大10層の音速プロファイル入力 (受波器水温センサー内蔵) *バーチェックにより音速補正有り ピッチング、ローリング、ヒープ
10) 動揺補正	
11) 海底検出回数	1秒に2回
2. 機能仕様	
1) 指示器	14または20インチカラーブラウン管 640ドット (横) $\times$ 480ドット (縦)
2) 表示色	8色
3) 表示モード	●海底コンターグラフィック表示 等深線、三次元、横断面、縦断面、併記、映像併記 ●反射強度グラフィック表示 ●探索コース航跡表示 ●映像表示 (横断面)
4) データ収録・再生	●使用テープ: カートリッジテープ (ANSIX 3.55-1977 450ft) ●収録時間: 約8時間/テープ (1秒に2回) ●収録内容: 年月日/音速補正データ/水深データ/反射強度データ/ソナーパラメータ/航法データ ●データサーチ ファイルサーチ/時間サーチ/ブロックサーチ

ッテリー 2 個で約 1 日間の連続運転が可能である。なお、測量船の位置を誤差を少なく測定するためには、主従局の位置を考慮しなければならない。最小誤差は主従局の交角が 90° の時であり、交角 30° - 150° の範囲に目的海域が入るよう配置することが必要である。

3. 現地海岸での海底地形計測とデータ解析

3.1 大潟海岸での海底地形の計測

新潟県中頸城郡の大潟海岸においては、京都大学防災研究所大潟波浪観測所により、海浜変形特性の解明のため、定期的な深浅測量の他、種々の海底地形計測が試みられてきた。ここでは、図-2 に示す T 型観測栈橋を含む対象海域において、スキニング式海底プロファイラー HS-500 II による 3 次元海浜地形計測を行った。この海域には、極限状態に近い海岸侵食の防止のため、応急的に消波ブロックや離岸堤、人工リーフ工が設置されて

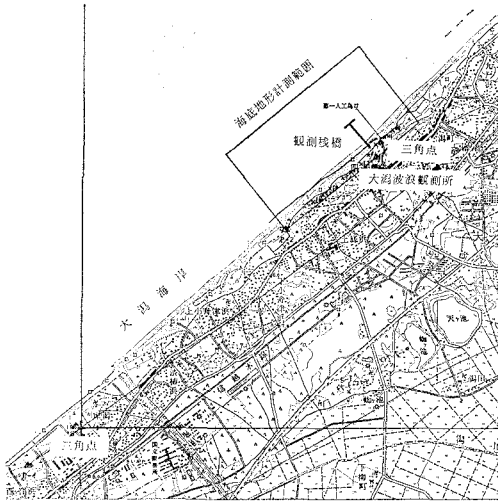


図-2 三角点の位置と海底地形計測範囲

いる。ここでは、このような人工構造物が存在する水深10m以浅の外浜帯において、HS-500 II による面的な海底測量がどの程度有効であるかを検討する。

対象とする海岸では、発達した砂丘上に松林があり、マイクロ波測位装置の陸上局を設置できる場所が限られているため、測位の精度を確保するためには、一度に計測できる範囲は限られてくる。まず、隣接三角点から陸上局の位置を出し、1:25,000の地形図上に計測領域およびT型棧橋を設定した。図中、第一人工島と記されている棧橋は、1985年に撤去された帝国石油所有のもので、大浜波浪観測所が長期間に渡り観測のために使用させて頂いた棧橋である。

今回の計測は、以下の3項目について行った。

- (1) 海底微地形の計測の可能性と変形過程を調査するため、T型棧橋の西側に500m³ずつ約1000m³の土砂を投入し、小さな人工浅瀬の造成を試みた。
 - (2) 人工構造物周辺の計測に及ぼす影響を調べるため、人工リーフ工、離岸堤背後の地形の計測を行った。
 - (3) さらに、計測の再現性(精度)を確かめるため、同一箇所を異なる日に計測した。
- 計測の項目と日程は表-2のようである。

表-2 観測項目と観測日

1991年6月22日	人工浅瀬造成前の海底地形の観測
6月25, 26日	土砂の投入(1000m ³)による浅瀬の造成
7月3日	浅瀬周辺の海底地形の観測
7月4日	人工構造物周辺の海底地形計測

3.2 データ解析方法

計測された水深データは、鉛直ジャイロにより測量船の揺動補正がなされているが、1スキャンデータには、

スパイクノイズが生じることがあるため、これらをフィルター処理する必要がある。これは、異常な標準偏差値データを検出することによりほぼ完全に除去できる。しかしながら、これを挿査方向に10分割して表示してみると図-6に示すように、サイドロープや測量船の進行方向のノイズが残る。この図は、航跡に示すように、人工リーフ上を4回横切った時の地形出力であり、リーフ天端上では正確な水深が得られていない。また、このノイズ除去は難しいため、格子点上に内挿した後、数値フィルターで除去するほうが容易である。まず、スパイクノイズを取り除いた1スキャン128データを、刻み幅が約1mメッシュになるように区間平均し観測面上にランダムに配置し、この不規則な点上にあるデータを、重み付き多項式近似法で、以下に示すように格子点上に内挿する。

いま、求めるべき点の座標を (a, b) とし、データのある点の座標を (x_i, y_i) 、とすると、 (a, b) 点から半径 r の範囲内にあるデータの重み関数 w_i を次式で与える。

$$w_i = \left[\frac{s-D}{D} \right]^2, \quad D = \sqrt{(x_i-a)^2 + (y_i-b)^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

さらに、データの内挿のため次式の多項式による関数 $h(x, y)$ のあてはめを行う。

$$h(x, y) = \alpha(x^2 + y^2) + \beta x + \gamma y + \delta \quad \dots\dots\dots (2)$$

あてはめは、式(1)の重み関数を用いた最小二乗法で、 α, β, γ および δ を決定する。すなわち、評価関数 ϕ が最小になるように係数を求める。

$$\phi = \sum_{i=1}^N w_i (\alpha(u_i^2 + v_i^2) + \beta u_i + \gamma v_i + \delta - h(u_i, v_i))^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$$u_i = x_i - a, \quad v_i = y_i - b \quad \dots\dots\dots (4)$$

以上の方法で内挿された水深に対して、沿岸方向にフーリエ級数による数値フィルターをかけ、測量船の進行方向のノイズを除去する。この場合、挿査角90°では、HS-500 II では水深の幅と同程度の範囲が左、右計測できるため、観測船は等水深線に平行して走る。このため、進行方向のフィルターは沿岸方向にかける。

また、以上の方法で除去できないノイズとして、天端水深の浅い人工リーフを横切った場合のノイズがあるが、これは水深2m以浅ではデータが得られずノイズとして記録されるため、データ処理に当たってはこれを検知し疑似データで置き換えるといよい。

3.3 計測結果の検討

以上の方法で計測され、処理された測深結果の一例を以下に示す。

a) 観測棧橋周辺の海底地形の計測結果

図-3に観測船の航跡、図-4に浅瀬造成前、後の海

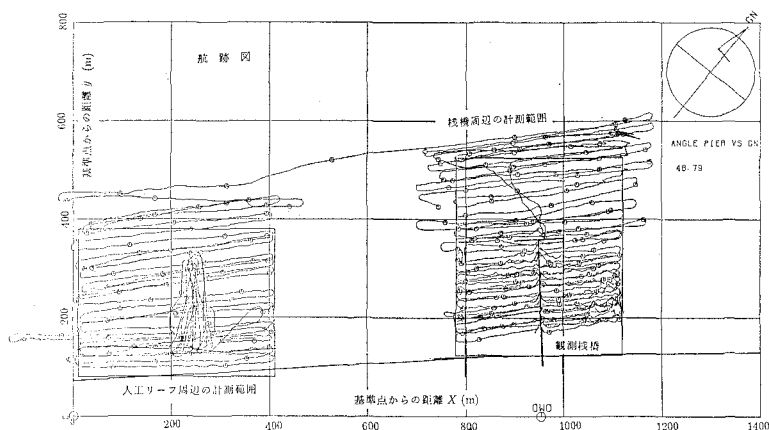


図-3 計測範囲と航跡図

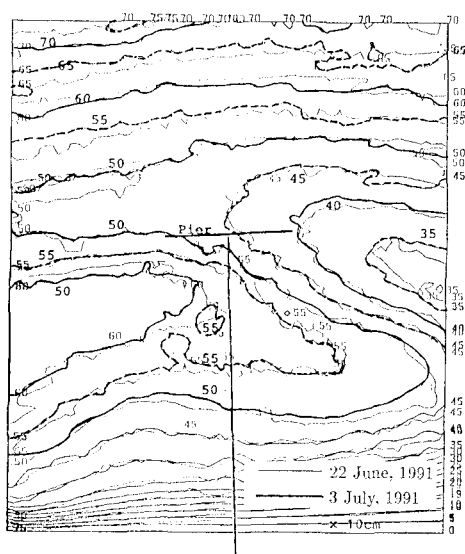


図-4 2回の測深データの比較

底地形の等水深線図を示す。これより、2回の測量における測定水深の差異がほとんど無いことがわかる。

図-5 は、両者の差を調べるために、土砂投入前後の水深データの差（侵食・堆積）の絶対値 Δh が 10, 20 および 50 cm の領域（侵食域に×印、堆積域に○）を求めたものであり、 $\Delta h=10$ cm では、土砂投入位置が検出できないが、 $\Delta h=20$ cm では、土砂投入位置が明確にわかる。さらに、 $\Delta h=50$ cm になると、2山の浅瀬が明確に検出される。

これより、2回の測量における測定水深の差異は、ほぼ全域に渡り 20 cm 以下であり、掃査幅で行った今回の測定の誤差はも 20 cm 前後であろうと推定される。図中、汀線近傍の測深不可能な領域ではこの海岸の平衡海浜断面形状で仮定した関数で近似してあるため、この領域での差が大きくなっている。また、造成した水深付近の2つの浅瀬は、沖側のものはほぼ円形で直径が約 30 m、頂部の高さが約 70 cm、岸側の浅瀬はやや楕円形で長径が約 30 m、短径が約 20 m で高さは約 70 cm であっ

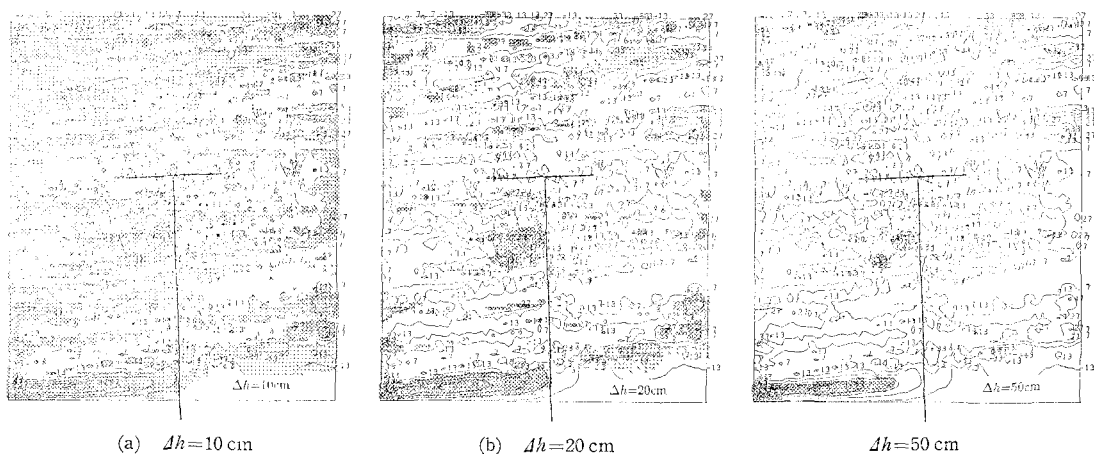


図-5 2回の測深データの差による海底地形

た。

b) 人工リーフ付近の海底地形計測結果

測量海域には天端水深が約2mの人工リーフ工が設置されており、この周辺の海底地形の計測を試みた。天端上では最小測定水深より浅いため、図-6に示すように、計測不可能もしくは精度の悪い記録が現れることになる。この場合、この種のノイズを水深2mの疑似データとして処理し、図-7の海底地形を得た。図中、リーフの中央部が局所的に掘られている箇所があるが、実際にはこの部分に切れ目が存在しており、ここできつい洗掘が生じている。しかしながら、観測船は汀線に平行に移動したため、リーフ上を進むことになったため、データが得られず、リーフギャップが検出できなかった。このようなトラブルを解消するためには、平行に設置された人工リーフ周辺の計測には、汀線に平行に測量するよりも潜堤に直角に測量する方法が有効である。

以上、3回の観測結果を示し、スキニング式海底プロファイラー HS-500 II の外浜帯における3次元海浜地形計測の有用性と今後改良すべき問題点を示した。今回の計測では挿査角 90° (計測誤差 ± 10 cm) の広範囲計測モードだけを対象としたが、 30° (誤差 ± 2.5 cm) の場合にはより正確な地形検出が可能である。なお、一回の観測に用する時間は準備時間約3時間を入れて、8時間程度である。

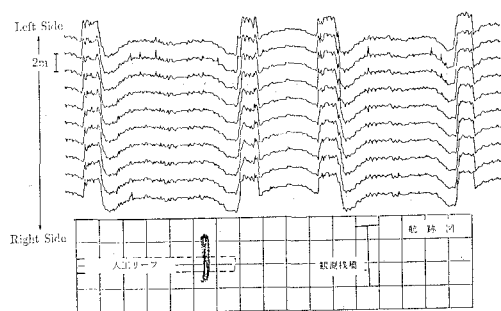
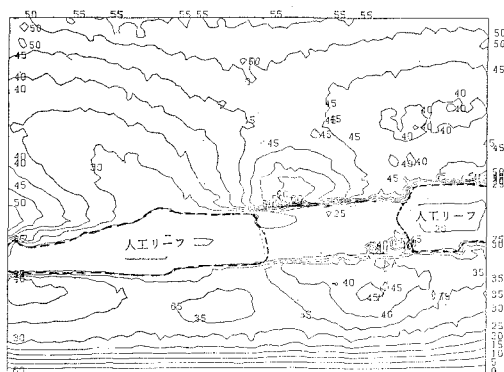


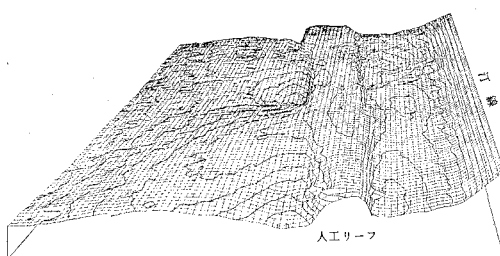
図-6 人工リーフを横切って計測した場合の水深データの一例

4. 結 語

以上、スキニング式海底プロファイラー HS-500 II による外浜帯における海底地形の3次元計測を行い、計測機器の有用性を示すとともに、その問題点を指摘した。特に、わが国の侵食海岸では人工構造物が多いため、海底地形の計測、データの解析方法を工夫しなければならない。今回は、本装置により高さ70cm程度の人工浅瀬の地形計測が十分可能であること、人工リーフ工のように汀線に平行に設置された潜堤の周辺の計測には、汀線に平行に測量するより、潜堤に直角に測量することが、有効であることがわかった。水深10m以浅の



(a) 等水深線図



(b) 鳥かん図

図-7 人工リーフ周辺の計測された地形

外浜帯においてもスキニング式海底プロファイラー HS-500 II による3次元計測が有効であり、この方法が今後の深浅測量の精度を大きく向上させてくれるものと思われる。

今後は、さらに広範囲の観測回数を充実させ、海浜変形の特徴を土砂収支の面から明らかにするとともに、掃査角 30° (誤差 ± 2.5 cm) のモードによる海底微地形の観測を検討したい。

最後に、本研究を推進するに当たり、土砂の手配にご助力頂いた建設省北陸地方建設局高田工事事務所の谷口清美調査課長、作業船ちどり(金子正雄船長、長さ8m)を測量船として御提供してくださった新潟県直江津港湾事務所の調査課の諸官には大変お世話になった。また、古野電気株式会社の山崎勝康課長をはじめ尾形正樹、今坂尚志、渡辺光昭氏他多くの技術者の方には計測機器の取り扱い、調整に御尽力頂いた。以上を明記し謝意を表すは次第である。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費一般研究(B)(代表者:土屋義人教授, No. 03452212)の援助を得た。

参 考 文 献

- 遠藤保彦・森松秀治他(1990):マルチナロービーム音響測深装置の音響屈折補正について, 信学技法, Vol. 89, No. 402, pp. 53-59.