

〈寄稿〉

小湾内における海底がれきの簡易的な探査手法

横山勝英^{1†}, 大野敦生², 畠山 信³, 田中 克⁴

An easy search method for submarine debris in a small bay

Katsuhide YOKOYAMA¹, Atsuo OHNO², Makoto HATAKEYAMA³ and Masaru TANAKA⁴

Almost all the villages along the coast of San-riku were destroyed by the tsunami on March 11, 2011. A huge amount of debris was produced and was deposited at the sea bottom. We propose an easy method to survey the debris distributed in a small bay. An echo sounder with a small side-imaging sonar device used for game fishing was employed to search for underwater debris. This device costs much less than special side-imaging sonar devices used for research work; moreover, it is capable of scanning just under the boat, referred to as down-scan imaging. The sonar images clearly showed the shape of the deposited debris, and the clarity of the images indicated the density (hardness) of the objects. When the objects were observed using an underwater camera, objective features such as branches and leaves of trees, artificial structures and fishing nets coincided with the estimation by the sonar. The down-scan image was used to determine the height of the debris, and the side-scan image was used to determine the horizontal distribution of the debris. Submarine debris was detected at 78 sites in the small bay having a width of 200m and length of 1km. We concluded that debris at 21 of these sites should have been removed. A series of tasks such as searching for debris, analyzing the size and shape of the debris, plotting the distribution of debris on a map, and deploying a buoy to mark a location was performed in only two days.

Key words: side-scan sonar, down-scan, distribution of debris, mapping, determination of shape

序 論

東日本大震災では未曾有の大津波により沿岸漁業が壊滅的な被害を被った。被害の様態としては、漁業活動基盤の喪失と漁場環境の悪化の2点が挙げられる。前者は陸上の漁港施設、水産加工施設、物流施設や養殖いかだが津波によって破壊され、また漁船が大破、漂流したことなどである。これらは目に見える被害であり、財政面の問題はあるにせよ計画的な復旧・復興が可能と考えられる。後者は津

波によって破壊された家屋、各種施設、自動車、樹木などが引き波で沖合へと運ばれ、大量の漂流ゴミや堆積ゴミ(海底がれき)となり海の環境を悪化させていることである。また、漂流ゴミでも時間が経てば海底に沈積するものもあると考えられるから、これらのがれき問題は目に見えないだけに対応が困難である。

本報告では、漁場環境の早期回復を目指して、海底がれきの効率的な探査方法について検討し、宮城県気仙沼市唐桑町での実際の取り組み事例を紹介する。なお、今回は既存の装置を活用した海底がれき探査方法を検討しており、手法の新規性よりも速報性や普及のしやすさに重点を置いている。

がれき探査に関する既存技術の整理

がれき撤去の考え方

漁場環境を復元するにあたりすべてのがれきを撤去できることが最善であるが、陸上でもがれきの量が膨大で撤去のめどが立たない中、海中のがれきは「どこに」「何が」「どのくらい」沈んでいるのかがわからず、対策は困難である。また、広域に散らばった膨大ながれきをすべてを撤去するのは労力や予算の面からほぼ不可能と思われ、特に漁

2011年7月21日受付, 2011年11月22日受理

¹ 首都大学東京都市基盤環境コース

Department of Civil and Environmental Engineering, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minamiosawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

² いであ株式会社国土環境研究所

Institute of Environmental Informatics, IDEA Consultants, Inc., 2-2-2 Hayabuchi, Tsuzuki, Yokohama, Kanagawa 224-0025, Japan

³ 水山養殖場

Mizuyama Oyster Farm, 133-1 Nishimoune, Karakuwa, Kesen-numa, Miyagi 988-0527, Japan

⁴ 財団法人国際高等研究所

International Institute for Advanced Studies, 9-3 Kizugawadai, Kizugawa, Kyoto 619-0225, Japan

† k-yoko@tmu.ac.jp

業の早期再開が望まれる状況にあつては効率的ながれき撤去計画が必要である。

海底がれきを撤去するか放置するかの判断にあたり、例えばがれきの山が魚礁として機能することも考えられ、またマガキやワカメの養殖であれば生育に必要な水深よりも深い場所のがれきは養殖に支障がないとして放置することも考えられる。また、樹木など有機質のものであれば数年後には分解して漁業の支障にならない場合もある。したがって、海中の状態を迅速かつ正確に把握し、漁業形態に応じて以下のように撤去・放置の分類を行い、効率的に作業を進めていくことが望ましい。

- ・ 早期に撤去すべき大きな物体
- ・ 当面、漁業の大きな支障にはならないが、撤去することが望ましい人工物
- ・ 放置しても問題とならない物体
- ・ 放置することで新たな魚礁を形成できる物体

直接的な目視探査

ダイバーによる潜水目視が最も確実にながれきを判別できる。一方、透明度が低いと作業は困難であり、水深が10mを超えると減圧症の関係から1日の潜水可能時間に制約が生ずるため、労力の割に搜索範囲が狭い。また、がれきは自然物ではないため、木材や漁網が複雑に絡み合っており、潜水機材が引っかかると浮上できなくなる危険性もある。

水中カメラロボットROVによる視認では水中の様子をビデオ録画して多数の関係者に配布できるので、「水中がどうなっているのか知りたい」というニーズに対して心理的な効果が大きい。例えばStein et al. (2005)は北極海カナダ海盆において水深800–2760mの5地点でROVにより底生魚を観察しており、実物の色・形を画像で明瞭に示している。ただし、見える範囲の情報であって面的な広がりがないので、がれき撤去の実務においては情報が限定的と言える。また、透明度が低い場合に搜索範囲はかなり限定される。

超音波探査

マルチビームソナーは航路測量などに用いられ、船に取り付けたソナーから音波を90–120度の幅で発振して海底面の地形凹凸を平面的に捉えることができる。おおむね水深の3倍幅の領域において水深と水平座標を点群として計測するので、測量においては強力なツールとなる。例えばLlanes et al. (2003)はスペイン領カナリア諸島での詳細測量を行って3Dマップを作成し、海底山地や土石流の特徴を示している。またKnaapen et al. (2005)は北海において波高0.09–0.14m、波長9–11mの中規模河床波や、より大きな波高1.8m、波長250mの大規模河床波を観測し、定期的得られたデータから河床波の移動速度を解析している。近年は地形変化よりもミクロな起伏（海中の立木、人工的な破片、岩、砂連など）を捉えることも可能になって

きているが、別途、研究的な解析手法を必要とする。

サイドスキャンソナーを用いる場合、探査範囲はマルチビームソナーと似ているが、水深を計測しているのではなく海底面の様子を映像のように捉えることができる。地形よりもミクロな凹凸を精細に見ることができるため、がれき探査には最も適している。ミサイル状のセンサーを海中に吊して高速曳航しながら海底面の擬似映像を取得する。Allen et al. (2005)は、映像のピクセル情報を解析して浅い湾におけるカキ床と底泥の分類方法を検討し、2m格子のカキ床分布図を作成している。

最近、レジャー用（ブラックバスフィッシングなど）に開発された廉価版のサイドスキャンソナーが市場に出ている。センサーの揺れ角度を補正する機能がなく、データを記録できない機種もある。また、データを記録できる場合でも解析機能は限定されている。一方、自船の直下を映像化する機能があり対象物の座標、水深、形状を正確に把握できる。調査研究用の機種と比べて格段に安価である。

三陸リアス式海岸に適した調査方法

志津川湾のような面積が20 km²を超える場所ではサイドスキャンソナーを用いることが望ましい。サイドスキャンソナーは高速曳航できることや、出力が高く探査範囲が広いので、短期間に調査できる利点がある。

一方、小さい入り江（1km²程度）では廉価版サイドスキャンソナーの方が便利である。廉価版ソナーはサイドスキャンソナーのように曳航するのではなく船の舷側に固定するので小回りが効く。また、安価であるため小規模な調査会社や漁業者でも新規に購入・運用しやすい。三陸は数km²以下の小さな湾・入り江が数多く点在するので、多地点で調査を同時展開して丁寧にがれきを発見することが可能になる。

なお、ソナーだけでも物体の大きさと素材の概略判別はできるが、例えば後述するように松の枝と漁網の束は似たソナー反応になるので、より詳細に実物を確認するには水中カメラを併用すると判別の確度が向上する。3–4気圧防水の安価なカメラでも確認は可能である。

材料と方法

対象海域

宮城県気仙沼市唐桑町の舞根（もうね）湾を対象とした（Fig. 1）。舞根湾では著者の一人（畠山）が震災前までカキ養殖を行っていた。湾の幅は200–400m、軸長が800m、最大水深は25mである。典型的なリアス式地形であり、奥まった場所で湾口が狭いため波があまり立たない。

津波の遡上高さは20–37mと言われており、舞根地区の集落は全52世帯中、44世帯が津波によって破壊されて流された。また、海岸の水産加工施設や重機、トラックなども流された。海面は中央の航路部分を除いて養殖いかだが多数設置されていたが、これらも1つを残して消滅した。

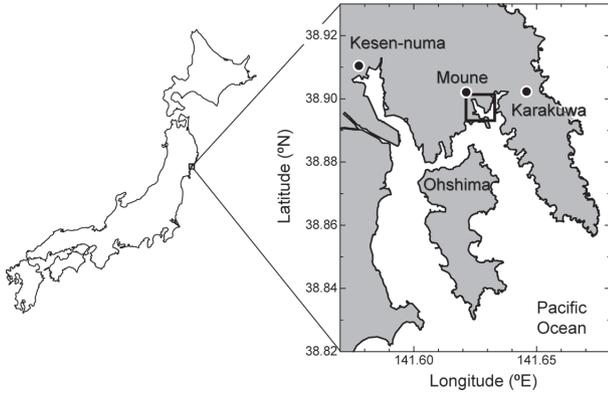


Figure 1. Location map. Survey was undertaken in Moune Bay, which is in the area delimited by the thick square (enlarged in Fig. 5).

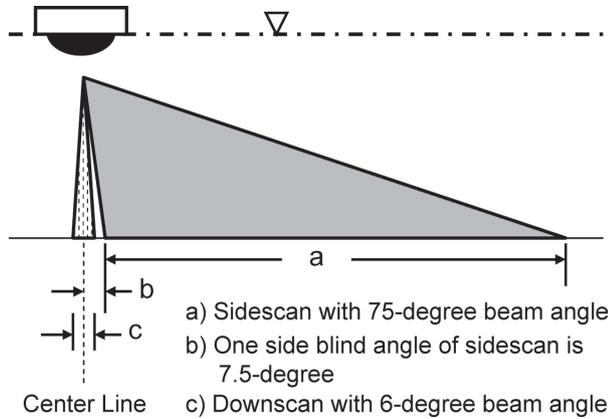


Figure 2. Schematic diagram of the sonar beam angle.

使用機材

廉価版サイドスキャンソナーががれき探査に適しているかどうかを確かめるため、ストラクチャスキャンソナー (Lawrance, StructureScan) を付加したGPS魚探 (Lowrance, HDS-8) を使用した。StructureScanは、魚探とは別の専用トランスデューサーから得た情報を用いてサイドスキャンおよびダウンスキャン画像を作成する。HDS-8はGPS座標とソナー映像を表示する。StructureScanのソナー周波数は800kHzと455kHzであり、高周波数ほど空間分解能は高いが到達距離(水深)が短くなり、目安としては水深が10m以浅の場合に800kHzが、10m以深の時に455kHzが適している。

サイドスキャンのビーム幅は片舷75度であり、自船の真下に半角7.5度のブランクがある (Fig. 2)。そのため、最大で垂直軸から82.5度までの範囲を見ており、走行することでFig. 3のような海底面の情報が得られる。水深と探査幅の関係で言うと、ブランクが水深の1/8、探査範囲が水深の7.6倍であるが、現場でのデータ取得状況からすると探査範囲は水深の約3倍が限界であった (いずれも片舷

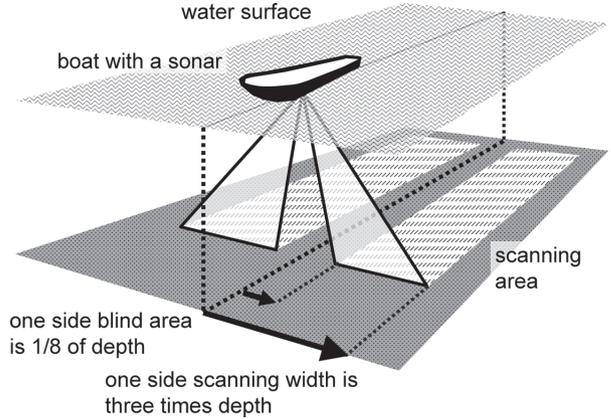


Figure 3. Schematic diagram of the detection area of the side-scan sonar.

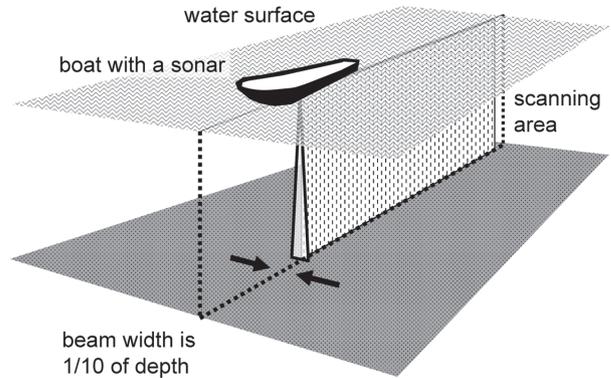


Figure 4. Schematic diagram of the detection area of the down-scan sonar.

の範囲)。

また、本機はダウンスキャンと呼ばれる直下を精細に映像化する機能を有している。ダウンスキャンは自船真下の半角3度(全角6度)を鉛直的に見ており、音波は水深10mに対して広がり幅が1mであるため、鉛直断面の明瞭な映像が得られる (Fig. 4)。走行することでちょうど海中の風景を横から見ているようなイメージになる。

調査方法

最初に地図と海図を用いて調査測線を設定した (Fig. 5)。サイドスキャンソナーは水深の約3倍の幅で海底面を探査できるが(片舷方向)、今回はサイドスキャンとダウンスキャンの性能比較を行うために水深の1-2倍間隔で測線を設定した。船の走行ラインは事前にGPSプロッター (Lowrance, LCX-27C) に入力しておき、プロッターを見ながら操船した。HDS-8にもGPSプロッター機能はあるが、サイドスキャン、ダウンスキャン、GPSプロッターの3種類を画面表示させると1つあたりの画面サイズが小さくなって見にくくなるため、GPSプロッターは別に用意した。

超音波振動子は全長2m、直径50mmのグラスファイ

バーポールに取り付けて、振動子が水深0.4mに位置するように小型作業船（幅2m, 全長8m）の舷側に固定した。GPSプロッターに入力した測線計画（Fig. 5）に従いながら、作業船を5-7km・h⁻¹で運転し、ソナーデータを内蔵SDカードに記録した。取得データはパソコンで再生し、がれきの大きさ（高さ）、形状と特徴、緯度経度座標を一覧表に整理した。さらに、座標情報をGPSプロッターにウェイポイントとして登録した。

ソナーで発見された物体を目視確認するために、水中カメラを用いた。本体の直径は73mm, 全長は132mm, であり、4気圧防水で50mケーブルが付属している。画角は約30度であり、透明度が2m程度の場合は直径1mの範囲

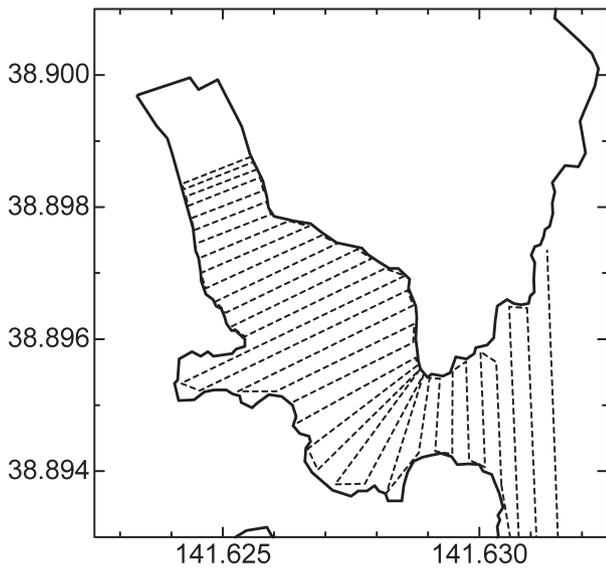


Figure 5. Survey lines in Moune Bay.

しか見えないので、がれきを搜索するのではなくソナー映像の確認用として補助的に用いた。なお、この作業は本調査手法の妥当性を検証するために行ったものであり、今後の調査においては省略して作業時間の短縮をはかることができる。

その後、撤去すべき大きながれき（後述）については目印ブイを設置した。がれきはその大半が半径数mの範囲に堆積しており、正確に目印を設置しないとガット船（砂利・石材運搬船）による除去作業の効率が落ちると考えられた。そのため、ダウンスキャン映像を見ながらがれきの存在を再確認して、がれきの真上に船が位置したときに目印ブイを投下した。

調査工程

2011年4月17日に現地を訪問して、作業船の大きさ確認や機器の動作チェック、データの試し取りを行い、それらの情報を研究室に持ち帰って調査計画を立てた。ついで、5月6日に現地入りして機材の艤装を行い、5月7日はソナー探査とがれき座標の抽出、GPSプロッターへのウェイポイント入力を行った。5月8日は水中カメラによる確認作業を行いつつ、カキ養殖いかだの妨げとなる大きな物体には目印のブイを設置した。

著者らは東京を拠点にして調査を実施したので事前踏査を含めて延べ6日を要しているが、今後は被災地やその近郊を拠点にして実施すれば舞根湾の規模に対して実働2日でがれき探査と目印ブイ設置が完了できると考えられる。

調査結果と考察

サイドスキャン映像の判読

Fig. 6画面右にアルファベット「F」字型の物体が映っている。水中カメラで確認したところH型鋼材がF字型に接合

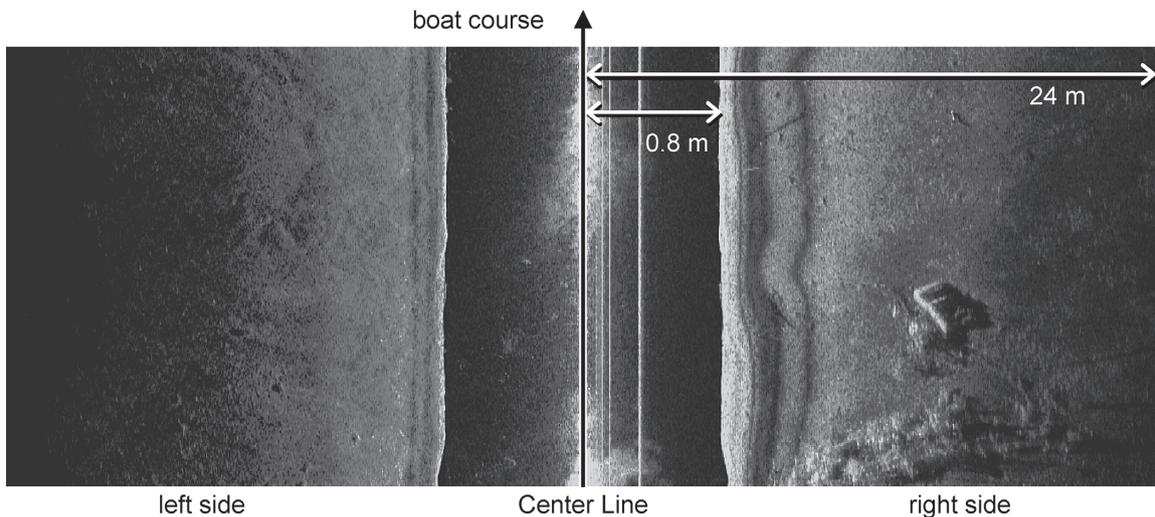


Figure 6. An example of images of side-scan. The water depth is 6m and one side blind width of sidescan under the boat is 0.8m. One side width of Fig. 6 is 24m, and one side blind area is displayed more widely than the actual width. A frame of F-shaped steel is seen in the right side.

された物が海底に斜めに刺さっていたことが確認された。カキ加工場の柱材の一部と思われる。また、画面右下には綿毛状の物体が映っていた。これは、カキ加工場から流出したと思われる配管類、カゴ、ロープその他の雑多なものの集合であった。

ダウンスキャン映像の判読

Fig. 7左のダウンスキャン映像（湾を横断走行して得られたもの）には、画面右側に高さ3mの反応が見られる。Fig. 7右の水中カメラ映像によれば樹木を主体として漁網が絡まったものであった。画面左側にも高さ1m程度の三角形がいくつか見られ、海底から斜めに伸びた樹木のようなものや、垂直に水面付近まで立ち上がるロープのようなものも見られる。

Fig. 8左のダウンスキャン映像の画面中央には三角形の人工物のような反応がある。Fig. 8右の水中カメラ映像によれば、これは足場パイプを組み合わせて作った仮設小屋のようなものであった。その左側には木の枝葉のような反応がある。超音波の反射強度は物体の密度に比例するので、くっきりとした反応は金属、コンクリートなどであ

り、ぼやけた反応は樹木や漁網と判別できる。

ダウンスキャンと魚群探知機の比較

標準的な魚群探知機（周波数200kHz）と比較すると、ダウンスキャンの方ががれきの形状を精細に映し出している（Fig. 9）。ダウンスキャン映像を見ると、A、E、Fは高さが1-2mの樹枝もしくは漁網のような物体、Bは高さ2m、全長10m程度の樹木の折り重なり、CとDはロープのようなものと判別できる。一方、同時に取得した魚群探知機の映像ではAとBの場所に何か物体があることはわかるが形状や材質は不明である。また、CとDは写っていない。Eは薄く写っているが、周囲の魚群反応との違いは明確でない。

魚群探知機は音波を円錐状に20度の広がり角で発振するので、物体が円錐の端にさしかかると弱い反応が出始め、中心部を通過すると強い反応になる。魚群探知機が物体の上を走行する場合は三日月状の反射映像が得られるため、海底地形や魚群を捉えることは可能であるが、津波で発生したがれきの形状や材質を詳細に判別するのは困難である。

ダウンスキャンとサイドスキャンの比較

ダウンスキャン映像では高さ約8mの樹木Aが海底から立

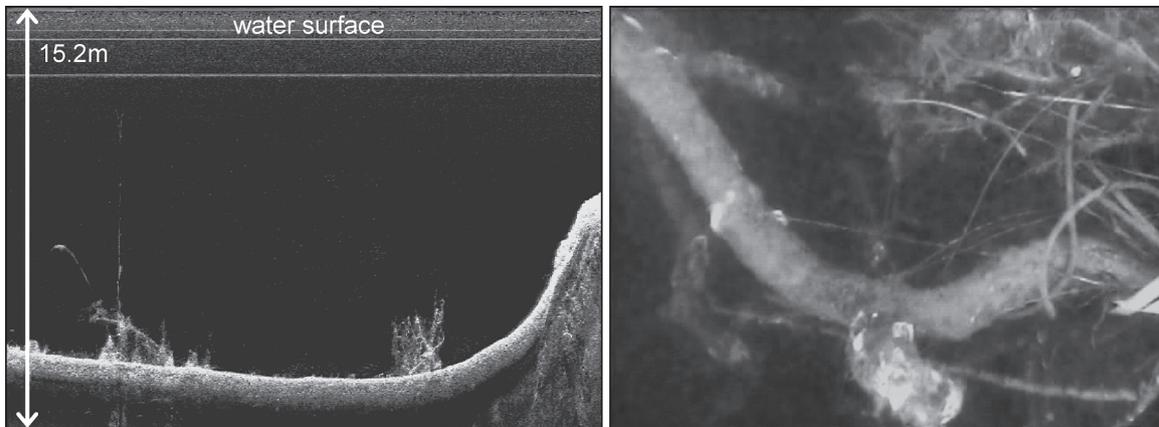


Figure 7. Images of down-scan and underwater camera. Branches and leaves of a tree with a piece of rope twined around are visible.

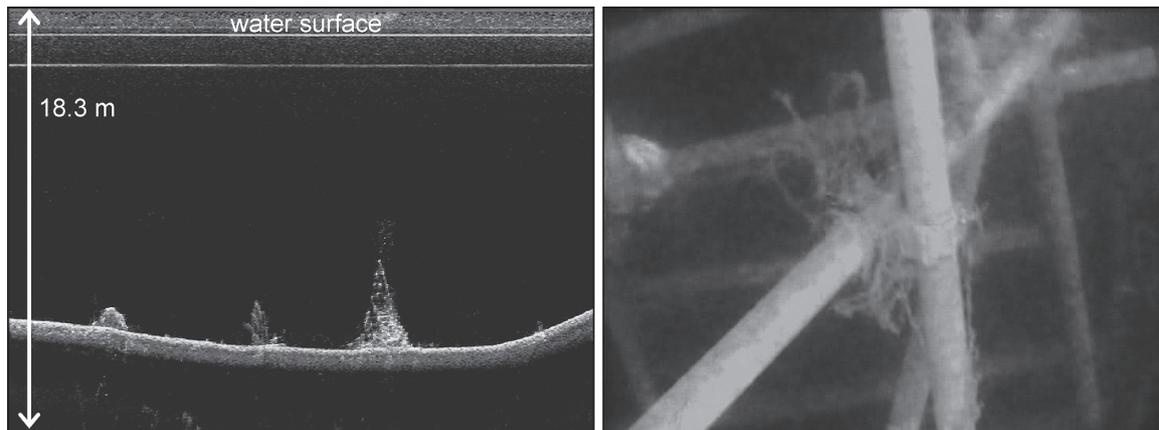


Figure 8. Images of down-scan and underwater camera. Beams of a shed built of steel pipes are seen.

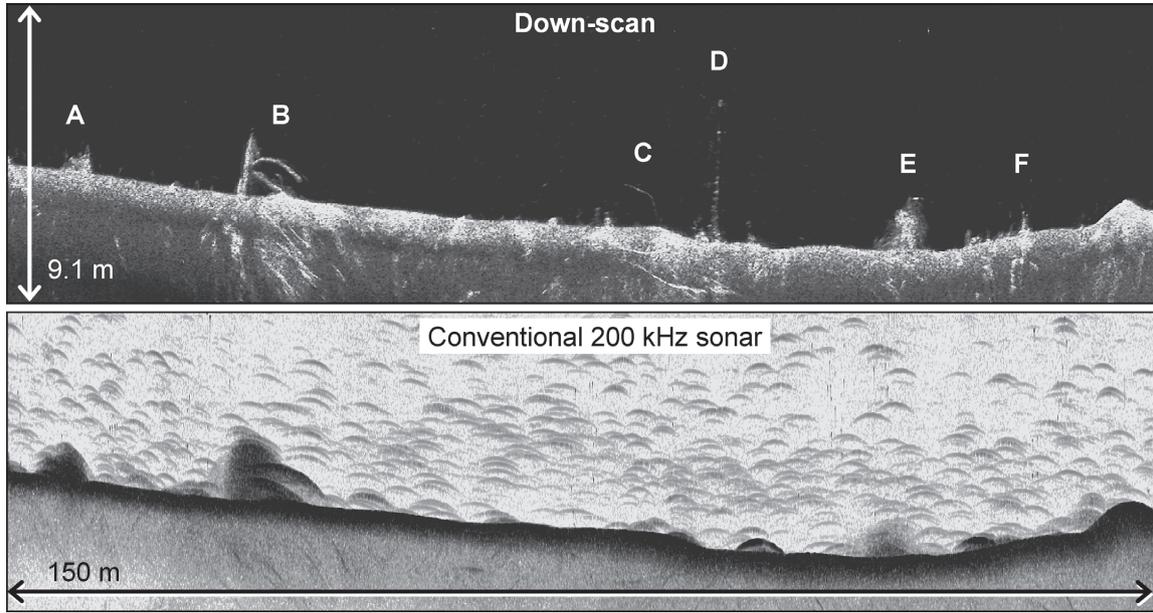


Figure 9. Comparison between down-scan image and conventional 200 kHz sonar image.

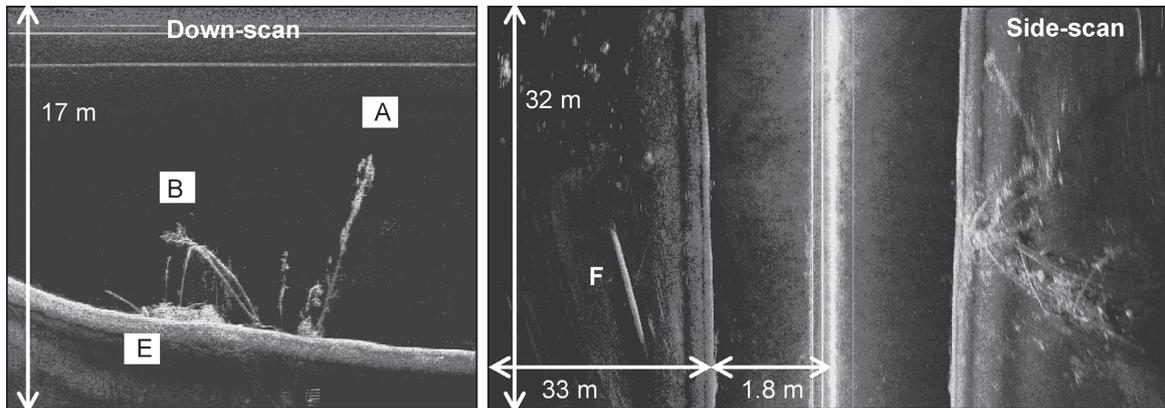


Figure 10. Comparison between down-scan image and side-scan image. Survey line of the left panel was set on debris shown in the right side of the right panel. A and B in the left panel are trees standing on the sea bottom, and E is tree branches and nets deposited on the bottom, respectively.

ち上がっている様子や、樹木Bが斜めに突き刺さっている様子がわかり、樹枝や漁網と思われる高さ1mほどのかたまりEが見られる (Fig. 10)。サイドスキャン映像では右舷方向に30m、進行方向に15mの範囲で樹木が十本程度折り重なっている様子が確認できる。また、左舷方向には全長が10m程度の丸太状の物体Fが見られる。このうち、右舷側の樹木群は海底に堆積しているのかダウンスキャン映像に見られるように立ち上がっているのかよくわからない。

そこで、映像の陰影を詳しく見るとFig. 11のようになる。図中のAは右側に影(A')が伸びており、超音波を横から照射したことにより音波の陰のような状態が生じているため、海底から立ち上がった樹木であると判断される。これは樹冠部の形状から判断して、ダウンスキャン映像

(Fig. 10) のAと同じものと考えられる。同様にBも画面上に形状が等しい2本の陰(B')があることから海底に斜めに突き刺さった樹木と考えられ、ダウンスキャン映像のBと同じものと考えられる。

物体Cも影が見られるために海底から立ち上がっていると判断されるが、ダウンスキャン映像との対応はつかない。不定形のDとEは陰がないことから、海底に堆積していると考えられる。このようにサイドスキャン映像でも音波の陰を判別することで、物体の海底での堆積状況を判断できる。ただし、このような判別を行うには画面を凝視しながら頭の中で立体構造を整理する必要がある、直感的には分かりにくい。

以上より、がれきの大きさ(高さ)を把握することが必

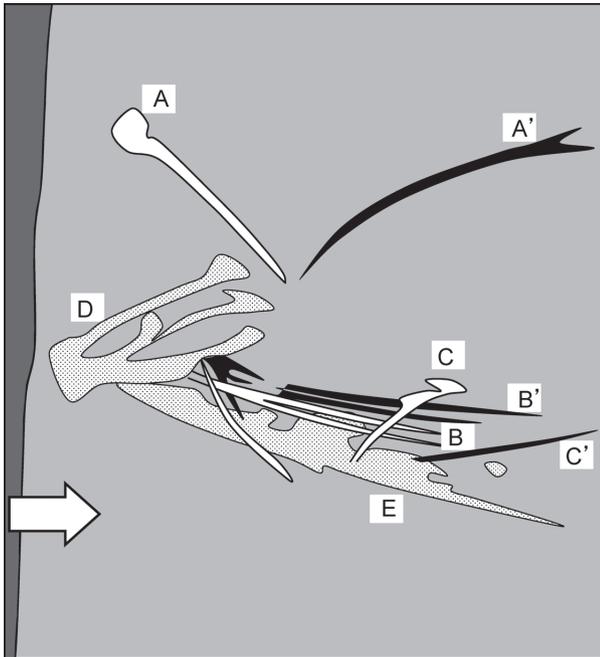


Figure 11. Sketch of the side-scan image of Fig. 10. Solid-dotted objects are estimated as optical shades of open- and shaded-denoted objects.

要な場合はダウンスキャンが優れていると判断される。ダウンスキャンは自船真下を見ているため、船に設置したGPSの測位座標がそのままがれき座標になり、撤去計画を立てやすい利点がある。養殖漁場の場合は海面付近のクリアランスを確保することが重要なので、ダウンスキャンによる判別が必要と言える。

一方、がれきの面的な散布状況の把握にはサイドスキャンが適している。サイドスキャン映像 (Fig. 10右) では樹木群の広がりがあり、丸太Fが海底に横たわっていることも判別できる。特に丸太Fをダウンスキャンで探した場合は高さが数十cmの円形にしか見えないので、これが大きな物体であるかどうかはわからない。また、今回は測線を水深の1-2倍幅で密に配置したため、ダウンスキャンでがれきの97%を発見できたが、測線間隔をより広くとる場合にはサイドスキャンでなければ海底面をカバーできない。底引き網漁場であればがれきの大きさよりも散在する状況の方が重要と考えられ、サイドスキャンが使いやすいと言える。

がれきマッピング

がれきは全部で78箇所発見されたが、このうち立木が最も多くて32箇所、ついで不明物が22箇所、ロープ類が13箇所、漁網が11箇所であった (Fig. 12)。トラックや自動車なども流されたが、それらは発見されなかった。また、家屋の残骸などもほとんど見あたらず、松や杉の生木が多いのが特徴であった。これら生木は湾の滞筋に沿って分布

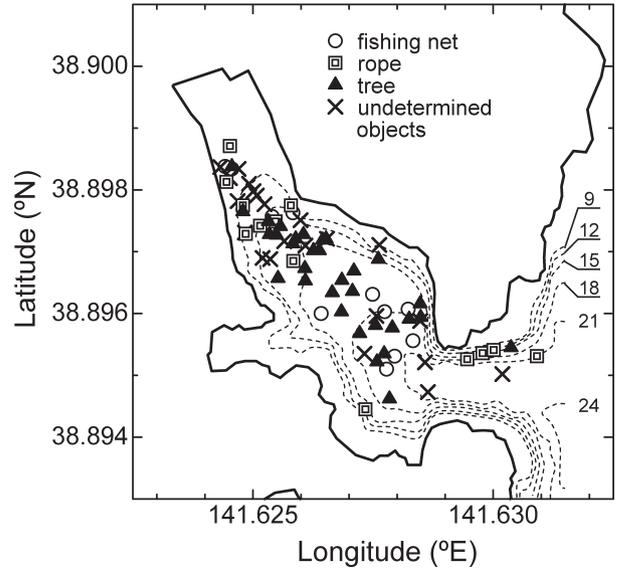


Figure 12. Distribution of all debris detected by sonar. Dashed lines with numbers are bathymetric contours. Debris is classified into four groups: fishing net (open circles), rope or hose (double squares), standing tree (solid triangles) and undetermined objects (crosses).

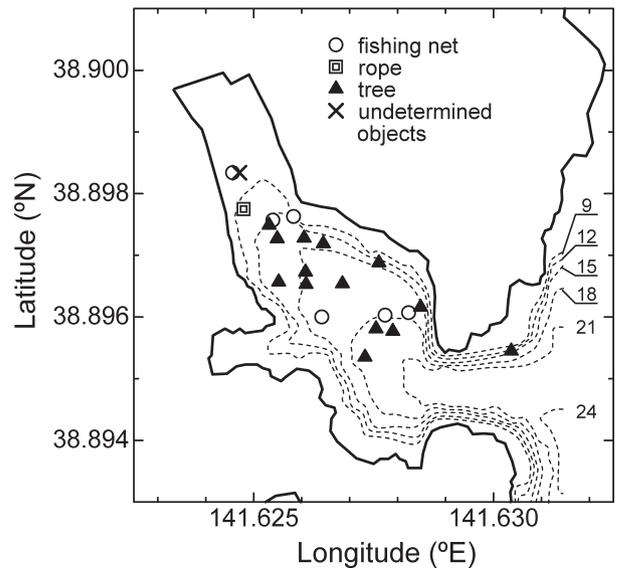


Figure 13. Distribution of big debris which should be removed. Dashed lines with numbers are bathymetric contours.

していることがわかる。湾の南西にはがれきはほとんど堆積していなかったが、水の流れが弱まる場所なので浮遊ゴミが多かった。

Fig. 13はカキ養殖の障害になる物体を抽出した結果である。カキ養殖筏は水深13mまでを利用するため、それより深い場所のがれきはあまり支障にならず、特に樹木など

の自然物であればいずれ朽ちるので撤去の必要性は低い。そこで、ソナー映像から判断して21箇所を撤去対象と考えて、目印ブイを設置した。

課 題

がれきの発見と大きさの判別、目印の設置といった一連の作業は今回の手法で迅速にできるが、これを撤去する際にはボリュームの情報があることが望ましい。がれきを吊り上げた後には、台船による輸送や処分地への搬入があり、事前にボリュームが判明していれば処分計画を立てやすい。

ダウンスキャン映像によりがれきの高さがわかり、サイドスキャン映像により広がり分かるので理論上は体積の計算が出来る。しかし、今回使用した機種はレジャー用のソナーであるためソフトウェアが充実しておらず、画面を見ながら手計算で一つ一つ求めることとなる。今回の災害復興ではスピードが重要であるため、体積を求める作業を丹念に行うかどうかについては、現場の実情に応じた対応が必要になる。

まとめ

三陸沿岸では津波被害により海底にがれきが堆積し、その撤去が漁業再開に向けての懸案事項になっている。本報告ではレジャー用の廉価版サイドスキャンソナーを海底がれき探査に活用することについて検討した。その結果、サイドスキャンではがれきの海底における面的な散乱状況が把握できるが、立体的な情報は即座に判断しにくいことがわかった。また、ダウンスキャンと呼ばれる自船の真下を映像化する機能を用いると、海底から立ち上がった樹木などの様子を精細に把握できることがわかり、通常の魚群探知機より形状判別の点で優れていた。養殖漁場では筏を浮かべるクリアランスの関係から障害物の高さが重要な情報であるため、ダウンスキャン機能が有用である。気仙沼舞根湾（幅300m、長さ800m、水深25m）において調査を実

施した結果、がれき探査に半日、データ解析とマッピング作業に半日、目印設置に半日を要し、実働2日で作業を完了できた。本報で提案した海底がれきの簡易的な探査手法は、三陸に多く見られる小規模な湾において実用性や迅速性の観点から有効である。

謝 辞

本調査は三井物産環境基金・2011年度東日本大震災復興助成（K11-F1-037）の援助を受けて実施された。調査実施にあたり、作業船はモリエコロジー株式会社の森 鐘一氏が舞根湾に搬入したものを使用させて頂いた。森氏は震災復興には漁船が最重要と考え、4月上旬に2隻の小型船を三重県から陸路で気仙沼港まで輸送し、そこから先は道路不通のため舞根湾まで海上搬送した。調査機材の調達に際して、廉価版サイドスキャンソナーはハイドロシステム株式会社の疋田 真氏に、水中カメラは中央工測の小栗保二氏に対応して頂いた。震災直後で物流等が混乱している中、迅速に対応して下さいのおかげで早期の調査が可能となった。ご協力頂いた皆様に感謝の意を表するとともに、三陸の水産業が早期に復興することを願っている。

引用文献

- Allen, Y. C., C. A. Wilson, H. H. Roberts and J. Supan (2005) High resolution mapping and classification of oyster habitats in nearshore Louisiana using sidescan sonar. *Estuaries*, **28**, 435–446.
- Knaapen, M. A. F., C. N. van Bergen Henegouw and Y. Y. Hu (2005) Quantifying bedform migration using multi-beam sonar. *Geo-Mar. Lett.*, **25**, 306–314.
- Llanes, P., A. Muñoz, A. Muñoz-Martín, J. Acosta, P. Herranz, A. Carbó, C. Palomo and ZEE Working Group (2003) Morphological and structural analysis in the Anaga offshore massif, Canary Islands: fractures and debris avalanches relationships. *Mar. Geophys. Res.*, **24**, 91–112.
- Stein, D. L., J. D. Felley and M. Vecchione (2005) ROV observations of benthic fishes in the Northwind and Canada Basins, Arctic Ocean. *Polar Biol.*, **28**, 232–237.