津波で発生した海底がれきの分布特性

Distribution of Underwater Tsunami Debris in a Small Bay

横山勝英¹・新谷哲也²・畠山 信³・大貫勇太⁴

Katsuhide YOKOYAMA, Tetsuya SHINTANI, Makoto HATAKEYAMA and Yuuta OHNUKI

Field study was carried out to investigate the distribution of submerged debris generated by the tsunami on March 11, 2011. We used a digital sonar to measure the distribution and amount of the debris scattered on sea floor of a small bay. The volumes of the debris were estimated from its lateral and base areas which were detected by down and side scans of the sonar, respectively. We identified a total of 147 debris and estimated the total volume of the debris on the sea floor inside the bay. The velocity distribution was computed in the bay in the phase of the tsunami rundown using 3D hydrodynamic model. We found the debris were mostly distributed along the thalweg where the computed velocity showed the maximum value about 3.5m/s.

1. はじめに

三陸沿岸は黒潮と親潮がぶつかり合うため世界の三大漁場と言われており、まき網漁、底引き網漁、定置網漁などあらゆる種類の漁業が存在する。また、内湾では静穏な海域を利用して昆布、ワカメ、牡蠣、ホタテなどの養殖が行われてきた。しかし、2011年3月に発生した東日本大震災の津波により漁港、水産加工場は破壊され、漁船や漁具、養殖施設は流され、漁業は壊滅した。

今後、漁業を再生させるためには、漁業インフラの整備と海の環境整備が必要であるが、特に後者については海底に堆積したがれきの処理に取り組む必要がある。膨大な量のがれきをすべて撤去することは労力などの面から困難であるが、例えばいかだ養殖業と底曳き網漁ではがれき撤去の考え方は異なり、漁法に応じて効率的にがれきを処理することが望ましい。

いかだ養殖においては、海面下10 m程度を利用して水産物を育てるため、海底のがれきを隈なく撤去する必要性は低い。ここでは、垂下物の邪魔になる背の高いがれきや、固定用アンカーの設置場所に堆積しているがれきを優先的に撤去することとなり、がれき形状に関する情報が重要である。一方で、底曳き網漁業や定置網漁では海底のがれきをくまなく撤去する必要がある、面的な散布状況に関する情報が必要である。

さらに、物体の容積が事前に判明していれば、海底のがれきを吊り上げて海上輸送し、陸上で効率的に処分を進めることが可能になる。

以上より海底がれきの処分計画を立案するためには、

がれきの形状、分布、体積に関する情報が必要であり、しかも広域災害に対処するには手法の簡便性も重要な要素となる。従来、海底の地形・地質調査などでマルチビームソナーやサイドスキャンソナーが用いられてきたが(例えばKnaapenら, 2005, Allenら, 2005), 津波で発生した海底がれきの調査は東日本大震災以前に行われた例がない。探査の原理は似たようなものであるが、判別手法や形状推定と体積計算の方法を確立する必要がある。

横山ら(2012)は廉価なサイドスキャンソナーを用いた海底がれきの探査手法を提案しており、がれきの高さと散布状況に関する検討方法が示されているものの、体積や分布特性については検討されていない。

そこで本研究では横山ら(2012)の方法を拡張して、がれきの三次元的な形状と体積を推定し、散布状況から種類別のがれき体積を求めることとした。さらに、引き波を再現した流動シミュレーションにより、流れとがれき分布の対応関係について考察した。

2. 調査方法

研究対象地は宮城県気仙沼市の舞根湾(図-1)である。舞根湾は唐桑半島の付け根に位置し、幅が300 m, 軸長が800 m, 最大水深が25 mのリアス式地形であり、湾口が狭いので小型貯水池のような形状をしている。湾内では牡蠣のいかだ養殖が行われていたが、津波により全てが流失した。

海底に堆積するがれきの調査は、デジタル音響測深機(Lowrance HDS-8)とストラクチャースキャンソナー(SSS)を用いる。これは基本機能としてHDS-8を用い、SSSを付加することでサイドスキャンとダウンスキャンのソナー機能が有効になる。サイドスキャンソナーは自船の両側の海底面を可視化する装置であり、真下の半角7.5度が不感帯となり、そこから半角75度が探査面に

1 正会員 博(工) 首都大学東京 都市基盤環境コース 准教授
2 正会員 博(工) 首都大学東京 都市基盤環境コース 助教
3 非会員 NPO法人森は海の恋人 副理事長
4 非会員 東京都下水道局

図-1 調査対象地域

なる。ダウンスキャンソナーは自船真下の全角6度の範囲を可視化し、鉛直断面の音響映像が得られる。

このセンサーを小型作業船に取り付けて湾内を横断・縦断走行し、水中の音響映像とGPS座標を内蔵SDカードに記録した。また、簡易水中カメラを用いて主要な12箇所のがれきを目視確認し、ソナー判読の参考に用いた。

3. 海底がれきの種類別分布状況と体積の推定

(1) 種類別の分布状況

ソナー映像からは物体の形状と反射強度が分かり、この両者から樹木（主に幹）、枝葉や漁網、ロープ、金属類やコンクリート片などが判別できる。横山ら（2012）は高さが2 m以上ある大きながれきを78箇所発見したが、小さな物体も含めて再精査するとがれきの堆積箇所は147となった。小さな物体は、金属缶やコンクリートの塊のようなもの（図-2(a)）、枝葉や漁網のような不定形のもの（図-2(b)）が多かった。

(2) がれきの立体形状の推定

がれきをソナーで見たとき、サイドスキャンでは海底面に投影した形状が、ダウンスキャンでは鉛直断面に投影した形状が分かるが、三次元的な形状は分からず体積が計算できない。そこで、同一の物体を2つの方法で見たときの両者の映像を用いて立体形状の推定を試みる。

舞根湾では水深が5～25 mに対して測量ラインは10～30 m間隔で設定したため、例えば図-3の模式図に示すよう第一測量ラインを走行した際にサイドスキャンソナーで捉えられた物体が、第二測量ラインを走行した際にはダウンスキャンソナーで捉えられる可能性がある。そこで、それぞれのソナー映像に映っている物体の座標が一

図-2 種類別のがれき分布図（樹木と金属類）

致するものを18個選び、サイズを求めた。

実際の映像例は図-4であり、サイドスキャン映像では右舷に倒木が見られる。図面下側に根が、上側では枝が二股に分かれている。本研究で用いたサイドスキャンソナーから得られる数値情報は、ソナーの座標 P_1 、 P_2 とソナーから物体までの斜め距離 a_2 、 a_3 、そして水深 H である。物体の底面形状を長方形と仮定すると、奥行き b は H 、 a_2 、 a_3 を用いて三平方の定理から求め、長さ l は P_1 、 P_2 の二点間距離から求まる。このようにして b と l から底面積を計算することが出来る。なお、 a_1 は自船真下のブランク領域までの斜距離であり、水深 H よりも1%大きい数値となる。

ダウンスキャン映像では画面中央部に複雑な形をした物体があり、高さが h の三角形断面と仮定できる。この物体（松の大木）は奥行き b が5.5 m、長さ l が10.1 m、高さ h が4.9 mであり、形状を三角錐とすれば体積は90.7 m^3 と推定される。

このようにして、2つのソナー映像から立体構造を円錐、円柱、四角錐、立方体いずれかの形状と仮定して体積を計算した。枝葉などの集合体に関しては、がれきが分散している範囲を1つのかたまりとして形状を仮定し

図-3 同一のがれきをサイドスキャンとダウンスキャンで捉えた場合の見方

図-4 海底がれきのソナー映像

た。この方法では物体そのものの体積ではなく、外周面で囲まれる体積を求めているためほとんどが空隙となるが、がれきを浚渫船などで輸送する際には海底から引き上げた形状のまま積み上げるので、実務上必要な数値を求めていると言える。

(3) 種類別のがれき体積

全てのがれきが2つのソナーに映っているわけではなく、また2つのソナー映像を比較しながら立体形状を推定するにはかなりの労力を要することから、どちらか片方の情報からがれきの体積を推定する。

先ほど求めた18個のがれきについて、サイドスキャン映像によるがれき底面積と体積の関係（図-5）、ダウンスキャン映像によるがれき側面積と体積の関係（図-6）を調べた。なお、杉のような丸太状の木については映像から長さが分かり、直径を仮定すれば体積が分かるのでこ

図-5 底面積（サイドスキャン）と体積の相関

図-6 側面積（ダウンスキャン）と体積の比較

の方法から除外した。

それぞれの面積と体積の間には比較的良好な関係性が見られ、相関係数は0.88, 0.84であった。底面積と体積の相関式（図-5）は係数が1.135であるが、これは形状が立方体の場合は高さが1.135 mであることを、円錐や四角錐の場合は高さが3.4 mであることを表している。

海底には様々な形状の物体が沈んでいるが、丸太状の大木を除いて、海底に横たわっている物体の高さはある程度揃っていることになる。ただし、この結果を舞根湾以外の水域で適用できるかどうかについては別途検討する必要がある。

2つの相関式から推定されたがれきの体積（図-7）は合計が2829 m³となり、小学校の25 mプールおよそ8杯分であった。このうち、樹木は18 m³で全体の0.6%、金属は183 m³で全体の6.6%、枝葉集合体は1255 m³で全体の44%、その他が1373 m³で全体の49%であった。いかに養殖の支障となる大きな物体は主に海底に垂直に突き刺さった全長10～20 mの樹木であったが、これらは体積としては少なく、海底にまんべんなく散らばった様々な物体の量が多いことが分かった。

以上より、サイドスキャンソナーおよびダウンスキャンソナーを併用することで、海底に堆積したがれきの座標とボリュームを推定できることが示された。

図-7 種類別のがれき体積

4. 津波流速分布の特徴とがれき分布の対応

(1) 計算方法

がれきの海底分布状況について詳しく考察するために、津波の引き波を対象とした三次元流動シミュレーションを実施した。被災者によれば舞根湾では水位上昇時よりも引き波の方が流れが強烈だったとのことであり、また舞根湾は湾口が湾央よりも狭くダム貯水池のような形状をしているため、ダムからの放流を模擬した流動シミュレーションで現象を再現できると考えた。

使用したモデルはFantom-3D (新谷, 2012) であり、以下に概要を述べる。基礎方程式は連続式と、非圧縮とブジネスク近似を施した3次元Navier-Stokes式である。鉛直方向は静水圧近似とし、大振幅の水面変動と冠水・干出に対応するためにpartial-step法を応用した陰的な水面変動計算を行った。乱流モデルとして、水平方向の渦動粘性係数の算定にはリチャードソンの4/3乗則を、鉛直方向には浮力効果を考慮したスマゴリンスキー型のLESを用いている。計算格子はセル中心に圧力とスカラー量、セル面に運動量を置くスタッガード格子である。

計算領域は湾口の外側から津波の遡上範囲までの1.3 km × 1.6 kmであり、格子サイズは水平が20 m、鉛直が1 mとした。初期水位は津波の痕跡調査に基づいて設定し、湾口で標高10 m、最大遡上点で14 mとして、水面勾配のある状態で計算を開始した。計算間隔は0.5秒である。

湾口放流量は開始時が0 m³/sで1分後に9,500 m³/sになるように直線的に増加させ、以後は9,500 m³/sで固定して10分間で計算終了とした。この値は、被災者が高台から撮影していたビデオ映像を参考にして、水面低下速度と表層浮遊物の移動速度が合致するように調整して得た。

(2) 流速の計算結果

引き波の流速は当初、上流部(陸地の奥)で大きく、ピーク領域は徐々に湾奥、湾央へと移動していった。流速が大きい時間帯は引き波開始から3~6分後であった。4分後の表層流速(図-8)は湾奥海岸から500 m上流の場

図-8 引き波開始4分後の表層流速

所でも3 m/s程度あり、津波が陸地を河川の洪水流のように退いていったことが分かる。2つの谷の流れが合流した湾奥の海岸付近では流速が最も大きくなり、この場所にあった防風林や住宅が一切消滅したことから、強い流れにより全てが破壊されて移動したと推測される。

(3) 流速分布とがれき分布の対応

発見されたがれきのうちサイズの大きいもの(樹木)と密度の大きいもの(金属等)の分布と、引き波開始後6分の流速分布を重ね合わせると(図-9)、がれきは引き波の主流付近に分布している。ただし、完全に流れの中心軸にあるわけではない。湾内の主流の東西には弱い反転流が見られるが、がれきは主流と反転流の境目付近に分布している。

舞根湾は途中が膨らんでおり、湾奥の幅が約150 mであるのに対して湾央の幅が約300 mであるため、引き波のときには湾奥部で急拡流れとなり、中心から隅角部に向かう弱い反転流が発生する。これは4分後の流速でも顕著に見られる(図-8)。上流部で引き抜かれた樹木や破壊された重量物は主流に乗って引きずられるが、途中で主流から少し外れると主流と反転流の境界付近に着底し、そこで停止するのではないかと推測される。

(4) 領域別のがれき堆積量

舞根湾を6つの領域に分割し、それぞれの領域におけるがれきの総体積を算出した(図-10)。各領域の樹木の割合は0.3~3%であり、図にはほとんど現れていない。湾の滯筋となる領域をa~dに分割し、湾央の東西領域をそれぞれe, fとした。急拡部滯筋のbでがれき体積は最も大きく、ここに全量の45%が堆積している。湾央の東西領域(e, f)に堆積したがれきはそれぞれ全量の約4%であり、小さい物体が散らばっているものの、ポリユー

図-9 計算流速と実測がれき分布の対応 (6分後)

ムとしてはわずかであることが分かった。これらの特徴は前述のとおり急拡大部の流速分布と対応していると考えられる。

滞筋のうち、湾奥のaよりも湾口に近いcの方ががれきが多く、湾外dではがれきがほとんど無い。湾奥aには幅一杯に強い流れがあり大きながれきは留まらなかったが、湾奥bで急拡大して湾口cで急縮するので、減速域でがれきがトラップされたと考えられる。このような流れの構造により沈降する物体は湾外に流出しにくく、領域dのがれきは全体の3%でしかなかったと推測される。

ただし津波の後、湾外には漂流した家屋や漁船などが見られた。これは、密度が軽い物体や内部に空気を含んで浮遊した家屋などは流れに乗って湾外に流れ出たことを表している。今回、津波で発生したがれきのうち海底に堆積したものについて検討したが、浮遊漂流したものの量は不明である。

5. 本研究のまとめ

津波で発生した海底がれきの早期撤去を支援する目的で、廉価版サイドスキャンソナーを用いた調査手法、物体の体積推定方法を検討し、流速分布とがれき分布の対応関係について考察した。

ソナーに備わっているサイドスキャン機能とダウンスキャン機能（自船真下の鉛直断面を映像化する）を併用

図-10 領域別のがれき体積

することで、物体の立体形状を推定することができることを示した。ただしこの方法による体積計算は煩雑なので、実際にはサイドスキャンもしくはダウンスキャンにより得られた面積情報から体積を推定すればよいことを示した。

舞根湾に沈む樹木などの大きながれきや金属・コンクリートブロックなどの重量物は、体積としては全体の7%にすぎず、樹枝、漁網、その他のこまごまとしたのがれきの集合体がほとんどであった。三次元流動シミュレーションにより流速分布を推定し、湾の形状と流速分布、がれき堆積分布には関係性があることを示した。

謝辞：本研究は三井物産環境基金「舞根湾のがれき清掃活動ならびに生物環境モニタリング」（代表者：畠山信）から援助を受けて実施された。作業船は震災直後に森鐘一氏が搬入した船を使用させていただいた。現地調査にあたり、いであ株式会社の大野敦生氏、八千代エンジニアリング株式会社の大村拓氏（当時学生）にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 新谷哲也・中山恵介・中本篤嗣 (2012): 環境流体解析のための簡易 Wetting and Drying スキーム, 水工学論文集, 56, pp.1249-1254.
- 横山勝英・大野敦生・畠山 信・田中 克 (2012): 小湾内における海底がれきの簡易的な探査手法, 水産海洋研究, 76 (1), pp.31-38.
- 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, pp.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, pp.306-314.