解説

海中ロボットによる被災地沿岸海域の瓦礫堆積状況の海底調査

Sea Floor Survey by ROV on Debris Accumulation of the Earthquake-attacked Coastal Area

高川 真一^{*1} 巻 俊宏^{*1} 浦 環^{*2}

^{*1}東京大学生産技術研究所海中工学国際研究センター ^{*2}九州工業大学

Shinichi Takagawa^{*1}, Toshihiro Maki^{*1} and Tamaki Ura^{*2} ^{*1}The University of Tokyo ^{*2}Kyushu Institute of Technology

1. 概要

2011年3月11日に発生した東日本大地震では、東北地方の太平洋岸が津波で甚大な損害を被ったが、復興に向けての礎となる産業、とりわけ水産業が早急に立ち直れるかが重要な要素であった。特にリアス式海岸が続く被害地域では、従来から養殖業が盛んであるが、これらの養殖関連のイカダなど主要な設備が津波によってほとんど持ち去られ、壊滅的な打撃を受けていた。設備がなくなっただけでなく、この地域で水産業に携わる人々には二つの大きな心配が残っていた。一つは、今回の津波でさらわれて亡くなった人がこの漁場の海底に眠っているのではないかというものである。この状況ではとても漁業を再開する気持ちになれないため、もし遺体があるなら早急に引き上げて弔ってあげたい、そして憂いなく漁業を続けたいという切実な気持ちである。

もう一つは、津波の引き波で地上にあった建物や橋梁、自動車そのほか様々なものが海に引き込まれていったが、これらが漁場の海底に沈んだままであれば漁の再開は非常に厳しくなるという心配である。このような大型の人工物が足の踏み場もないくらい大量にかつ無秩序に海底に沈んでいると、新たに投入する漁具の損傷が頻発して、水産業の復興は非常に厳しくなる(図1参照)。

これらの心配を払拭するには、漁場となる海底をくまなく視認して、遺体が見つければ回収して弔い、障害物があれば撤去していけばよいのであるが、地震がない平穏なときでも海水の透明度は一般によくなく、普通で10[m]先が見えればかなり良い方である。それに加えて地震の影響で海水は濁っており、透明度は悪くなっている。このため、潜ったからと言って自分の周辺のわずかな範囲が見えるに過ぎない。しかも養殖の対象となる漁場は陸にかなり近い場所

図1 津波による瓦礫堆積の悪夢

ではあるが、それでも非常に広い面積があり、ダイバーが短時間潜って観察した程度ではカバーできる範囲はほとんど点にしか過ぎない。さらに瓦礫にダイバーが引っかかって二次災害を誘発しかねない。

水の中を観察することは、上記のように陸上と異なって平穏なときでも遠目が効かないというハンディがあるため、陸上と同じ感覚で調査・観察計画を立てることができない。

そこで技術が十分に成熟していて信頼性の高い遠隔操縦式の小型海中ロボット(カメラロボット)を用いて被災地沿岸域の海底の状況の観察・調査を行うことになった。地震発生直後の2011年4月から5月まで東京大学海洋アライアンスが単独でこの調査・観察を実施し、同年7月から9月までは東京大学海洋アライアンスと日本財団、全国漁業協同組合連合会が協力して「海の再生力探査プロジェクト」として実施した。

本稿ではこれらの調査・観察結果について紹介するとともに、得られた膨大な量の動画の扱いについても紹介する。

2. 調査海域と使用した海中ロボット

調査海域を図2に示す。黒丸は東京大学海洋アライア

原稿受付 2013年11月29日

キーワード: Earthquake, Coastal Area, ROV, Sea Floor Survey, Debris Accumulation

^{*1}〒153-8505 目黒区駒場 4-6-1

^{*2}808-0196 北九州市若松区ひびきの 2-4

^{*1}Meguro-ku, Tokyo

^{*2}Wakamatsu-ku, Kitakyusyu-shi, Fukuoka

スが独自に実施した分であり、白抜き丸は7月から9月にかけて「海の再生力探査プロジェクト」として全国漁業協同組合連合会からの呼び掛けに応じて調査を希望した漁業協同組合と調整の上で決めていったものである。これらの地点はいずれも養殖が盛んであり、そのためのイカダが多数設置されていた場所である。

東京大学海洋アライアンス単独による調査日程を表1に、「海の再生力探査プロジェクト」の調査日程を表2に示す。

大槌湾赤浜地区ではGPSとジャイロを組み合わせで高精度な海底地形マッピングができるマルチビームソナーを取り付けた無人の小型ボートを遠隔操縦で運転し、崩れた

防波堤周辺の海底調査を行った。この結果をGoogle Earthの航空写真と合成して図3に示す。

この地域は岸壁付近やスロープ部を除くと水深6~8[m]程度の平坦な海底面が広がっているが、防波堤の先端付近に大きさ数m規模の塊が複数沈んでいる。同図左上に示し

表1 単独調査日程

回次	海域	地区	日程
1	大槌湾	赤浜地区	2011/04/29-5/01
		湾内	2011/04/29-05/01
2	南三陸町志津川湾	志津川湾	2011/05/14-19

表2 共同調査日程

回次	海域	地区	日程
1	あじしま 網地島 周辺海域	網地島、鮎川	2011/07/05-06
		表浜	2011/07/07-08
		狐崎	2011/07/10-11
2	宮古・おもえ 重茂海域	宮古	2011/07/16-17
		重茂	2011/07/19
3	おぎらい 越喜来海域	越喜来	2011/07/30-31
4	気仙沼大島	気仙沼大島	2011/08/02-05
5	南三陸町志津川湾	志津川湾	2011/09/27-30

図2 海中ロボットによる海底観測調査地点

図3 Google Earth 航空写真と合成したソナーによる海底地形調査結果

図 4 ブイが集まってできた島のような塊

定置網やイカスを係留するためのおもりとなる土嚢

図 5 ロープなどによる大きな瓦礫の形成

た被災前の写真と見比べると、被災後は防波堤が 20 [m] 程度短くなっていることから、これらの塊は津波で流された防波堤ブロックと推定される。

大槌湾内をカメラロボットで観察調査したところ、コンクリートブロックや自動車等いくつかは見つかったが、全般に大きな瓦礫はなかった。引き波が強く、沖合に持って行かれたものと思われる。

ここでは 2 体の遺体を発見し、位置を海上保安庁に連絡して引き上げてもらった。

養殖場ではイカダは多くの場合海底におもりあるいは錨として設置された土嚢によって係留されているが、引き波で引きずられたようで多くの土嚢が集合している場所がしばしば見受けられた。また海面では普通は均等に分散され

主要目

使用深度	最大	150m
外形寸法	長×幅×高	約 84×53×36cm
空中重量		約 25kg
前進速力	最大	2.9 ノット
TV カメラ	カラー 1/3"CCD	
ケーブル	長×外径	150m×φ12mm
水中照明灯	ハロゲン灯	150W×2 灯

図 6 三井造船（株）が運転する水中ロボット

るはずのブイが集まって一つの大きな島のようなものを形成している場所も多数みられた（図 4）。

ブイとおもりをつなぐロープは、切れずに残っているものあれば切れて海底でとぐろを巻いているもの、海底から立ち上がっているもの、海底で横にピンと張った状態の横走りロープ等様々である。そしてこのロープに陸から流されてきた立ち木や漁網などが絡みついて異様な光景を作り上げている（図 5 参照）。

この調査・観察に使用した海中ロボットを図 6 と図 7 に示す。いずれも普段は発電所の管路内の調査などに用いられることが多いロボットであり、最大潜航深度は 150～200 [m] の有索遠隔操縦式ロボット（Remotely Operated Vehicle: ROV）である。ケーブルは継ぎ足して 400 [m] まで伸ばせる。管路の調査では管路に沿って走ることから、水平位置を把握する必要はなく、入り口からどれだけ入ったかをケーブルの長さで判断する。管路と異なって海でこれらのロボットを用いるにあたっては、水平位置の把握が困難である（音響機器を装備すれば水平位置は把握できるが、その分だけ装備が大掛かりになる）が、操縦者が搭乗している支援船から見てどの方向にケーブル長で何 m 進んだかで位置を把握する方法を採った。ただしこの手法では潮流の影響で必ずしも狙った方向には進めないため、水平位置の把握はいまいにならざるを得ない。

表 1 並びに表 2 における 1～4 回次までの水中ロボットによる調査ではこの手法であったが、第 5 回次においては

主要目

使用深度	最大	200m
外形寸法	長×幅×高	約 109×75×67cm
空中重量		約 85kg
前進速力	最大	約 2 ノット
TV カメラ	カラー 1/2"CCD	
ケーブル	長×外径	200m×φ15.4mm
水中照明灯	ハロゲン灯	150W×4 灯

図 7 (株) 東京久栄が運転する水中ロボット

表 3 使用したサイドスキャンソナー GeoSwath+500 [kHz] の主要目

最大探査水深・探査幅	50m・190m
送受波器寸法	225×110×60(mm)
デッキユニット寸法	380×300×220(mm)
電源容量	DC25V/40W

新たな手法を用いた。すなわち、ロボットを潜航させる前にまずサイドスキャンソナーで調査海域の海底の状況を探り、大きな物体が検知された位置（緯度・経度）を把握しておくもので、この地点にロボットを潜航させ、この「大きな物体」が何であるかを確認する手法である。使用したのは Geo-Swath + 500 [kHz] であり、その主要目を表 3 に示す。この湾内ではクレーン船による瓦礫回収が行われており、クレーン船が海底からつかんできたものが泥だった場合はそのまま海に投棄されるため、この泥がバケットの形そのままに海底に鎮座することになり、ソナーで見るとあたかも人工物のように見える。ところがロボットで近寄って見ると、実際には単なる泥の塊だったということもしばしばである。しかし何か大きそうなものがあるということがはっきりと分かるので、非常に有効であり、これを用いることで調査は非常に効率的になる。

図 8 海底の砂地に産み付けられたジンドウイカと思われるイカの卵

この海域（志津川湾）ではまずサイドスキャンソナーで海底探査を行い、その日に得られた目標物の位置をもとに翌日ロボットが潜航調査を行い、ロボットが潜航中にサイドスキャンソナーで別の場所を探査するという形で調査が行われた。ロボットの潜航にあたっては、支援船が目標の緯度・経度の地点を通過する際におもりとロープのついたパイを投入し、ロボットはこのパイロープに沿って潜航して目標点に容易に到達する方式である。この方式によって 3 日間で 60 箇所の潜航調査を遂行し、車や橋桁のような構造物を発見した。

これらの調査結果については、調査終了日の夕刻に地元の方々に集まっていただいて報告会を開催している。特にこの志津川湾の場合、発見物の緯度・経度がはっきりしており、このデータを地元の方々に手渡したが、この報告会に参加していたクレーン船の関係者もこのデータを使えばすぐにでも大物瓦礫が回収できると喜んでいて。

3. 海の再生力

これらの調査を実施した結果、当初予想されたような海底が瓦礫で足の踏み場もないほど埋もれているということはないことが判明した。津波の引き波がよほど強かったのか、養殖を行う海域には多少の瓦礫は残っているものの、きれいな海底面が見られることのほうが多かった。このことは逆に、従来あった海底の底質が持ち去られてしまったことも意味する。また、やはり引き波でさらわれてしまったのか生物の数そのものは多くなかった。復元にどれくらい時間がかかるかは専門家の検討結果を待つしかないが、それでもイカの卵が産み付けられていたり（図 8）、小魚ではあるが大群の乱舞が見られたりで、海の生産力は確実に再生しつつあると思われる。

4. 動画記録のノーカットオープン

このようにして 7 月から 9 月までに 100 時間を超える潜

航時のビデオ録画を行ったが、支援船に乗ってビデオを直接見ている人は限られている。多くの人に実際の海底の瓦礫の様子を知ってもらうことは非常に重要である。

広報活動に用いられる動画は一般にビデオ画像を編集して一般の方々が興味を持ちやすく、かつ短時間で容易に見ることができるように、かなりの部分が切り捨てられることになる。この切り捨ては編集者の判断によるものであるが、この切り捨てられた部分に編集者には分からない重要な事象が録画されていることは大いにあり得る。したがって、記録は基本的にすべてをオープンにしたいところであるが、編集されていない長時間のビデオ画像を見ようという人はほとんどいない。

そこで、ノーカットの長時間記録ビデオを多くの人々に興味を持って見ていただくにはどのようにすればよいかについて、情報関係の専門家と相談しつつ検討を進めた。そして以下のような手法を用いることにした：

① どの編集作業でも必ず行われることであるが、日付と潜航場所ごとにビデオを分割し、それぞれのビデオに出てくる主要な事象を書き出す。

② この分割されたそれぞれのビデオから例えば 10 秒あるいは 15 秒ごとに（この時間は任意で設定）静止画を取り出し、この静止画を画面上に目次のように並べる。10 秒ごとであっても 1 時間物のビデオはわずか 360 枚の静止画に置き換わることになる。動画のままであれば 1 時間物のビデオは 1 時間かけてみないと全容が分からないが、静止画に置き換えられていれば一瞥俯瞰するだけでこの 1 時間物のビデオにどのようなものが収録されているかが分かる。そして特に動画として見たい部分があれば、その部分をクリックすると次の静止画像までの時間だけ動画として表示される。

この手法に基づいて、東京大学海洋アライアンスと日本水産学会が協力して、日本水産学会のホームページ (<http://suisan-archive.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/eqinfo/utoa.html>) に今回の調査結果である平成 23 年 7 月～9 月に撮影した海底の動画をノーカットで掲載した。そしてまたこの方法について、シンポジウム（第 50 回海中海底工学フォーラム、主催：同フォーラム運営委員会、於東京大学大気海洋研究所）で紹介したところ、やはり大量の動画資料を死蔵していて、何らかの方法でアーカイブの活用を考えているので、この方法を試してみたいという方々が多かった。また、家族の動画を大量に持っている人からもその整理方法の一つとして参考にしたいというコメントもあった。

広報活動として多くの人々に知ってもらうことは非常に重要であるが、実施は一般に難しい。しかしこのようなホームページを使い、かつ短縮編集ではなくノーカットの動画をアクセスしやすい形で提供することは、アーカイブの扱い方の一つの方法として有効であると思われるので、活用

していただければ幸いである。

5. ま と め

水産養殖業に対する津波の影響は相当ひどいと予想されたが、引き波が非常に強かったせいか、漁場が瓦礫で埋め尽くされているようなことはなかった。魚などの生物の数は確かに激減したと思われるが、それでも新しい生命が誕生しつつあり、海は再生しつつあるように思われた。

また、ダイバーによる調査では二次災害の危険があり、調査にも限界があるような今回の状況で、水中ロボットが非常に有効に活用できた。さらにサイドスキャンソーナーと組み合わせることで広い調査領域を効率的に調査することができた。

この調査の記録はすべてビデオ映像であり、広報活動として動画を前面に打ち出す必要があるが、編集すると必ず切り捨て部分が生ずる。切り捨てをせずに全動画を公開するには、ここで示したような静止画による目次形式で全容が分かるようにする方式は非常に効果的であると思われる。読者諸氏の御意見をたまわりたい。

謝 辞 本調査を遂行するに当たっては、多くの方々のご協力をたまわった。とりわけ、宮城県と岩手県の漁業協同組合連合会、並びに調査地点の各漁業協同組合の方々のご協力なくしては実施し得なかった。ここに記して感謝の意を表する。

また東京大学・黒倉寿教授、福島朋彦准教授、北里大学・井田斉名誉教授、林崎健一准教授、山田雄一郎講師、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター環境情報統括員・熊谷道夫博士、大阪府立大学・有馬正和准教授には、調査に当たっていろいろご協力をいただいた。

さらに、三井造船株式会社・野口正男氏をリーダーとする同社海中ロボット運用チーム、並びに株式会社東京久栄・藤田伸也氏をリーダーとする同社海中ロボット運用チームの巧みなロボットの操縦で海中・海底の様子をつぶさに観察することができた。また志津川湾の調査では株式会社東陽テクニカ・柴田成晴氏のサイドスキャンソーナーデータが非常に有効に機能した。

そして長時間動画のノーカットオープンについては、東京大学生産技術研究所・喜連川優教授と生駒栄一特任准教授、並びに日本水産学会にお世話になった。

ここに記して各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] 巻俊宏：東日本大震災日本機械学会記録集—水中ロボットと自律船による港湾の被害状況調査，日本機械学会，2011。
- [2] 高川真一：東日本大震災日本機械学会記録集—海中ロボットによる津波被災地養殖場の被害調査，日本機械学会，2011。
- [3] 高川真一：“海中ロボットのカメラによる漁場海底の津波被害状況観察”，O plus E, vol.34, no.12, pp1140-1145, 2012。

高川真一 (Shinichi Takagawa)

海洋科学技術センター（現・海洋研究開発機構）にて「しんかい 6500」に代表される深海有人潜水調査船システムや世界最深部マリアナ海溝に潜航できる無人探査機「かいこう」の開発の後、科学掘削船である地球深部探査船「ちきゅう」の開発に従事。1999 年より東京

大学客員教授、2009 年より東京大学特任教授。

浦 環 (Tamaki Ura)

1977 年東京大学工学系研究科船舶工学専攻博士課程修了。1997 年より東京大学生産技術研究所講師。1992 年同教授。2014 年九州工業大学社会ロボット具現化センター長、特任教授。2007 年より総合海洋政策本部参与。専門：海中ロボット学。主な受賞：日本機械学会技術賞

（1999 年）、IEEE Distinguish Technical Award（2010 年）。主な著書：海中ロボット（成山堂書店）。（日本ロボット学会正会員）

巻 俊宏 (Toshihiro Maki)

2008 年 3 月東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻博士課程を修了。同年 4 月より東京大学生産技術研究所海中工学研究センター助教。2010 年 4 月より同准教授。現在に至る。専門は海中プラットフォームシステム学。特に自律型海中ロボットを中心とする知的

探査システムの研究開発に取り組んでいる。