

サイドスキャンソナーによる東日本大震災後の松島湾海底調査

長尾正之¹・西村 修²・西村清和¹・佐々木久雄²・千葉信男²・鈴木 淳¹

¹ (独) 産業技術総合研究所 地質情報研究部門、² 東北大学大学院 工学研究科

要旨

2011年3月11日に起きた東日本大震災と大津波で被害を受けた松島湾の海底生物環境の回復過程を研究するには、海底生物環境の被害実態をまず知り、次いで長期追跡調査を行う必要がある。我々は、小型サイドスキャンソナーを使用した海底生物環境の調査を実施した。調査は、潜堤(人工リーフ)、カキ養殖施設に囲まれたアマモ場、浦戸諸島寒風沢水道の海底で5時間実施した。その結果、潜堤については、上流側だけに土砂が堆積していたことがわかったほか、長軸方向の石積みが曲がっていた。アマモはアマモ場だった場所から完全に流されていたほか、海底上の津波で破壊されたカキ養殖施設の一部を可視化することができた。寒風沢水道海底には、紡錘形の溝が形成されていた。このように、5時間の調査で異なる3箇所の海底生物環境の被害実態を小型サイドスキャンソナーで明らかにすることができた。また、小型サイドスキャンソナー等の超音波海底探査装置が、松島湾全域での海底生物環境の長期追跡調査において、極めて有効であろうことがわかった。

1 はじめに

松島湾(Fig. 1)は、230の島々(塩竈市 2012)や、平均水深が3 mと浅いことによるアマモ場の広がりのおかげで、海底環境の多様性に富んだ内湾である。平成19年6月に宮城県が行った現地確認(Fig. 1c)に基づいて推定した松島湾のアマモ場面積は4.9 km²で、松島湾全面積35.3 km²(国際エメックスセンター 2001)の14%を占める。松島湾の環境の多様性により、同湾ではカキ養殖業や食用海藻等の水産加工業が盛んである。しかし、2011年3月11日に起きた東

日本大震災と大津波で、松島湾の海底生物環境は大きく変わってしまい、カキ養殖施設の大部分が流出してしまった。

この大津波により、大半のアマモ場も流出してしまった。たとえば、東北区水産研究所(2011)は、2011年4月12日に松島湾内のヨバワリ崎地先で潜水調査を行い、10年以上維持され続けていたアマモ場が跡形もなくなり、砂泥が広がる裸地になっていたことを明らかにした。

東日本大震災と大津波以降の松島湾の海底生物環境の回復過程を研究するには、まず、海底生物環境の被害実態を知る必要がある。そして、その結果に基づいて、長期追跡調査を行う必要がある。そこで我々は、2011年9月13日に、松島湾内の海底地形が異なる3つの海域で、小型サイドスキャンソナーを使った海底生物環境の緊急調査を行い、それぞれの海底の震災被害実態を明らかにした。

本報告は The 22nd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference (ISOPE-2012 Rhodes) Tsunami and Safety Symposium のプロシーディングスに投稿中である(Nagao et al. 投稿中)。

2 方法

2-1 サイドスキャンソナー

サイドスキャンソナーは、海洋や湖沼の底に沈んでいる特定物の探索や地形の調査によく利用される(海洋音響学会 2004, Capone 2007)。また、サイドスキャンソナー画像から物体の影の長さを読み取れば、その物体の高さが推定できる。さらに、底質の違いに応じて変化する超音波の海底反射強度を用いれば、底質判別図を

作成することもできる (Anderson et al. 2008)。

本研究では小型サイドスキャンソナー Imagenex 社の Model 872 “YellowFin” を、鮮明な海底画像を得るために使用した (Fig. 2)。YellowFin の直径は 114 mm、全長は 833 mm である。また、重量は、大気中で 5.4 kg、海中で 1.8 kg である。

本調査では、サイドスキャンソナーを船体固定して使用した。一般的にサイドスキャンソナーは曳航方式で使用される。しかし、最大水深が 4 m しかない浅い松島湾 (国際エメックスセンター 2001) で曳航方式を採用した場合、未撤去の海底ガレキにサイドスキャンソナーが衝突する恐れが高かった。そこで、西村ら (2006) の方法にならい、支持棒の下端に YellowFin を取り付け、YellowFin が海面下 50 cm に設置されるように指示棒を丸廣丸 2011 の舷側に固定した (Fig. 3)。YellowFin の周波数、レンジ、レンジ分解能は、それぞれ 330 kHz、30 m、3 cm にそれぞれ設定した。

本調査では、サイドスキャンソナーデータの収録プログラムとして YellowFin.exe (Imagenex Technology Corp. 2011) を使用した。調査測線の設定と操船支援には、地図ソフト「カシミール 3D」を使用した (吹田・西村 2005)。SonarWiz5 (Chesapeake Technology Inc.) を、サイドスキャンソナー画像データのモザイク図作成等の後処理に使用した。図の作成の一部に ArcGIS 10 (Esri) を利用した。また、結果と空中写真とを対比させるために Google Earth (Google Inc.) を使用した。

2-2 調査水域

様相が異なる三つの海底地形を調査した (Fig. 1b)。それぞれ、桂島離岸堤 (以降、潜堤と呼ぶ) (Area A)、カキ養殖施設に囲まれたアマモ場 (Area B)、浦戸諸島寒風沢水道 (Area C) である。なお、津波被災以前には、褐藻の一種のアカモク (*Sargassum horneri*) (中庭正人 2008) が、Area A の潜堤とその周囲に自生していたと言わ

れていた (Fig. 1b, 1c)。

2-3 調査日と潮汐

調査は 2011 年 9 月 13 日 9:56 から 15:12 までの約 5 時間内で行った。この日の潮汐は大潮だった (気象庁 2011) (Fig. 4)。

2-4 潜水調査によるクロスチェック

公益財団法人日本生命財団環境問題研究助成からの支援を受けて、特定非営利活動法人環境生態工学研究所は、2011 年 12 月 12 日と 13 日に Area A と Area C で潜水士による調査を実施した。その調査速報 (特定非営利活動法人環境生態工学研究所、私信) を、我々が取得したサイドスキャンソナー海底画像のクロスチェックに使用した。

3 結果と考察

3-1 Area A : 潜堤

Area A の潜堤では、北側 (桂島側) と南側 (太平洋側) の海底画像の様相が大きく異なっていた。Area A のサイドスキャンソナー画像のモザイク図 (Fig. 5) において、濃い茶色は、海底からの超音波反射強度が弱く、柔らかい底質、たとえばシルトや泥に対応すると考えられる。一方で、明るい茶色は、海底からの超音波反射強度が強く、固い底質、たとえば砂や岩に対応すると考えられる。

潜堤の北側では、海底は一様ではなく、超音波反射強度が非常に弱い場所が多かった。これらの場所は、非常に柔らかい底質か起伏による超音波の影を示している。一様でない海底は、推定された潜堤の天端の縁から 20 m まで上流側に広がっていた (Fig. 6b)。おそらく、津波到達時に潜堤の南側と北側で大きな水位差が生じて強い流れを起こし、北側の潜堤法面上の堆積物を洗い流し、その後の津波引き波が堆積物を再移動させたためと考えられた。Area A での潜水調査速報 (特定非営利活動法人環境生態工学

研究所 私信)は、この推測と矛盾しなかった。潜水調査速報によると、潜堤法面の縁から北に20 m までの距離の間に多数の巨石が確認され、これらはおそらく潜堤の基礎を構成していた捨石が津波で流されたためではないかと報告されている。

この北側の津波被害とは対照的に、南側の海底は比較的滑らかに見えた。ただし、南側では複数の細長いひびが潜堤長軸に平行に伸びていた。松島湾に隣接する塩竈市では、大津波到達前に震度6強の強い地震が観測されていた。したがって、潜堤南側のこれら多数のひびは、地震による地盤の液状化等で生じたのではないかと考えられた。

一方で、潜堤周囲には、濃い茶色の弱い超音波反射強度を持つ場所がまだら模様で存在している(Fig. 5b)。これらの場所はおそらくシルトや泥であり、津波により輸送されたと考えられた。弱い反射強度を持つ場所が不均一に存在していることは、津波による水平流が一樣ではなかったことを示唆する。また、モザイク図を潜堤近傍に関して拡大表示すると(Fig. 6)、石積み曲がっていることがわかった。これも恐らく津波によるものと推定された。

3-2 Area B: カキ養殖施設に囲まれたアマモ場

アマモ場 (Area B) のサイドスキャンソナー画像のモザイク図 (Fig. b) によると、シルトか泥に対応する弱い海底反射強度を持つ海底 (図中では濃い茶色で表示) が広がっているため、調査範囲では大半のアマモは津波で流されてしまったと考えられた。

サイドスキャンソナー画像から底質判別図を作成することができる (例えば、Anderson et al. 2008)。一例として、SonarWiz 5 で作成した6分類の底質判別図を Fig. 8 に示す。Fig. 8 により、海底上の特異的な場所を識別することができる。Fig. 8 で判別された特異的な場所と、2011年4月6日に撮影された空中写真 (Fig. 7a)

とを比較した結果、Fig. 7b のモザイク図で明るい茶色で示されている強い超音波反射強度を持つ場所が海底上のがれきであることがわかった。たとえば Fig. 7b の中の一つのがれき (Fig. 9) は、津波で破壊されたカキひびの残骸だった。

さらに、松島湾の別の海底でサイドスキャンソナー画像を取得し、超音波海底反射強度によりアマモ場を識別する方法 (例えば、谷本・星加 2003, Anderson et al. 2008) を、それらの画像に適応できるなら、津波から生き延びたアマモ場を今後発見できる可能性がある。

3-3 寒風沢水道

寒風沢水道 (Area C) のサイドスキャンソナー画像モザイク図 (Fig. 10) によると、長さ187 m の細長い紡錘形の影が認められた (Fig. 10b)。この影は、細長い丘、または切れ込んだ溝を示している可能性がある。もし丘だった場合、SonarWiz 5 によると、丘の最大高さは1.2 m と推定された。しかし、潜水調査速報 (特定非営利活動法人環境生態工学研究所 私信) は、Fig. 10b が示す場所には堆積物やがれきが無かったと報告していた。したがって、Fig. 10b に映る細長い紡錘形の影は、切れ込んだ溝と考えられた。我々は、このトレンチが津波が原因で生じたものか、津波到達前から存在していた自然地形かを確認する必要がある。

4 まとめ

2011年東日本大震災と大津波による松島湾海底の被害実態を明らかにするために、サイドスキャンソナーによる調査を2011年9月13日に行った。その結果、一部が崩壊した潜堤の被害実態、ほぼ完全にアマモが流出したアマモ場、津波で破壊されたカキ養殖施設の一部、そして水道内の紡錘形の切れ込んだ溝が確認された。

我々は、今回の大震災と津波で大きな被害を受けた松島湾の海底生物環境を回復させるためには、長期追跡調査を行う必要があると考えて

いる。今回報告したようなサイドスキャンソナー等による超音波海底探査装置による海底調査および底質判別は、湾スケールの海底環境調査において非常に有効な方法と考えている。

謝辞

赤間廣志船長は、丸廣丸 2011 の的確な操船を行ってくださったほか、調査を支援していただいた。宮城県庁からは、アマモ場・アカモク場の現地確認資料と平成 9 年度松島湾リフレッシュ事業で建設された桂島離岸堤（潜堤）横断面図をご提供いただいた。特定非営利活動法人環境生態工学研究所からは、同研究所が公益財団法人日本生命財団環境問題研究助成からの支援を得て行った松島湾海底環境調査の速報をご提供いただいた。猪瀬昭治氏（ビジオテックス株式会社）からは、SonarWiz 5 によるモザイク図作成にご協力をいただいた。斎藤文紀上席研究員（産業技術総合研究所 地質情報研究部門）からは、調査へのご支援をいただいた。香川絵里氏（ESRI ジャパン株式会社）からは、ArcGIS 10 の応用について有益なご助言をいただいた。安永恵三子氏（産業技術総合研究所地質情報研究部門 地質情報研究部門）からは、図作成と原稿とりまとめへのご協力をいただいた。杉本智彦氏は、フリーな地図ソフト「カシミール 3D」を公開しており、本調査でも使用させていただいた。以上の方々に深く感謝する。最後に、本研究の一部が次に示す外部研究費で行われたことを付記し、謝意に代えさせていただく。平成 23 年度科研費基盤研究 (C) (No. 21580238)、住友財団 2010 年度環境研究助成、環境省公害防止等試験研究費、平成 23 年度第 3 次補正予算。

参考文献

Anderson J. T., D. V. Holliday, R. Kloster, D. G. Reid, and Y. Simard, 2008, "Acoustic seabed classification: current practice and future Directions," *ICES J. Mar. Sci.*, 65, 1004–1011.
Capone V., 2007, *Not in the manual guide to side scan sonar image interpretation (2nd ed.)*, Black Laser Learning, DVD.

吹田 歩・西村清和, 2005, "フリーソフト「カシミール 3D」を利用した汽水・沿岸域調査用ナビゲーションシステム", *海洋理工学会誌*, 11(1), 81-87.

Imagenex Technology Corp., 2011, *IMAGENEX MODEL 872 "YELLOWFIN" SIDESCAN SONAR*, http://www.imagenex.com/YellowFin_manual_v2.pdf (最終閲覧日: 2011 年 9 月 27 日).

海洋音響学会 (編), 2004, "海洋音響の基礎と応用", 成山堂.

気象庁, 2011, "潮位表 塩釜(SHIOGAMA)", <http://www.data.kishou.go.jp/db/tide/suisan/suisan.php?stn=SG> (最終閲覧日: 2011 年 9 月 27 日).

国際エメックスセンター, 2001, "日本の閉鎖性海域", <http://www.emecs.or.jp/closedsea-jp/closedsea-jp.htm> (最終閲覧日: 2012 年 1 月 7 日).

Nagao M., O. Nishimura, K. Nishimura, H. Sasaki, N. Chiba and A. Suzuki, "Seabed Environment Damage of Matsushima Bay (Miyagi Prefecture, Japan) after the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami," *Proc. of ISOPE-2012 Tsunami and Safety Symp.*, Rhodes (Greece) (投稿中).

中庭正人, 2008, "茨城の海藻", 76, 暁印書館.
西村清和・上嶋正人・徳岡隆夫・吹田 歩, 2006, "汽水域におけるコンパクトサイドスキャンソナーの記録例", *LAGUNA*, 13, 109-118.

塩竈市, 2012, "塩竈市の浅海漁業", <http://www.city.shiogama.miyagi.jp/html/kurasi/suisan/senkai.html> (最終閲覧日: 2012 年 1 月 14 日).

谷本照巳・星加 章, 2003, "超音波による藻場分布の計測", *超音波テクノ*, 15(1), 24-27.

東北区水産研究所, 2011, "松島湾のアマモ場が消失", *東北水産研究レター*, 20, 2.

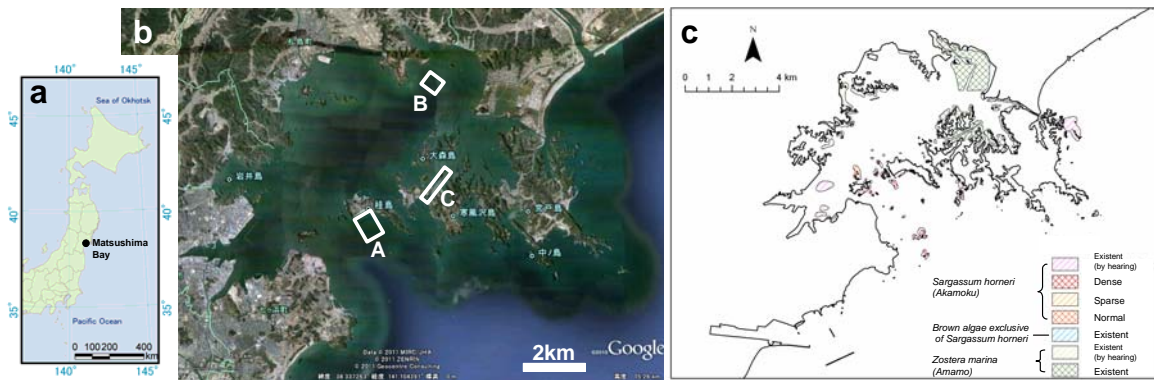


Fig. 1 a. 東北地方と松島湾の位置. b. サイドスキャンソナー調査を行った3つのエリア：Area A. 潜堤, Area B. カキ養殖施設に囲まれたアマモ場、Area C. 寒風沢水道（浦戸諸島）。空中写真は Google Earth (Google Inc.)より。c. アマモ場とアカモク場の分布域（出典：2007年6月18日と19日に宮城県が行った現地確認調査）（Nagao et al. 投稿中）。



Fig. 2 小型サイドスキャンソナー Imagenex Model 872 “YellowFin” (Imagenex Technology Corp., 2011)。



Fig. 3 指示棒を使って丸廣丸 2011 に舷側固定された YellowFin (Nagao et al. 投稿中)。

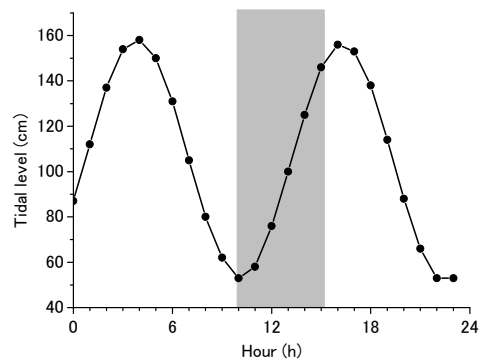


Fig. 4 2011年9月13日の塩釜港の天文潮位（気象庁2011）。影を付けた時間帯（約5時間）にサイドスキャンソナー調査を行った。天文潮位の基準面は潮位観測基準面（D. L.）である（Nagao et al. 投稿中）。

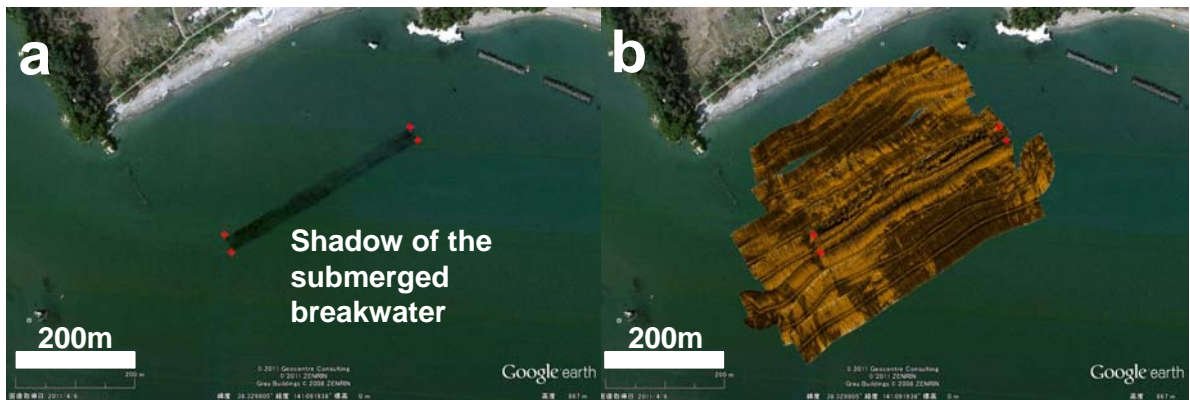


Fig. 5 a. Area A の空中写真に映る潜堤の影（撮影日：2011年4月6日。出典：Google Earth）。
 b. サイドスキャンソナー画像のモザイク図。赤十字は Fig. 5a の潜堤の影から推定した潜堤天端の四隅を表す（Nagao et al. 投稿中）。

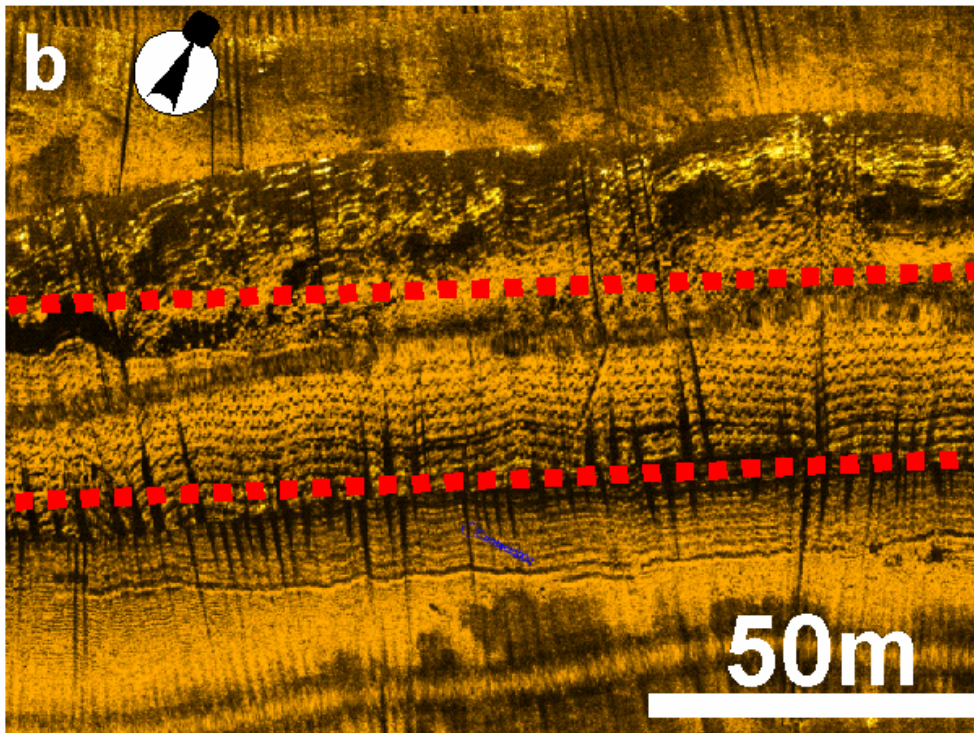
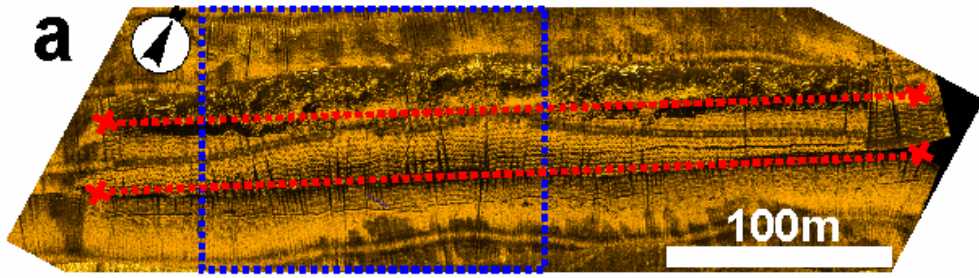


Fig. 6 モザイク図 (Fig. 5b) の潜堤付近の拡大図。 a. 潜堤周辺部。赤十字は Fig. 5a の潜堤の影から推定した潜堤天端の四隅を表す。 b. Fig. 6a の青点線枠内の拡大図。赤点線は推定された潜堤天端の縁の位置を示す (Nagao et al. 投稿中)。

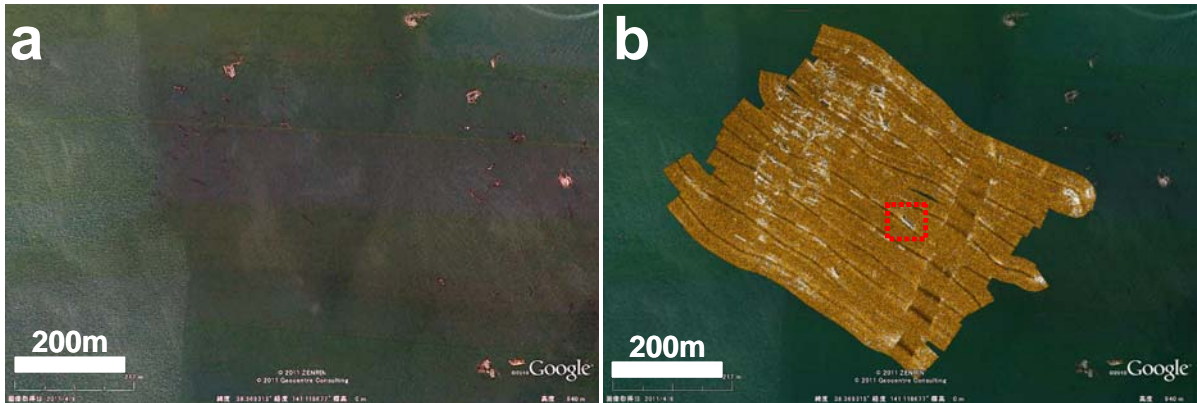


Fig. 7 a. Area B の空中写真（撮影日：2011年4月6日。出典：Google Earth）。破壊されたカキ養殖施設の位置をはっきりさせるため、元の空中写真に強調フィルターをかけた。b. Fig. 7aと同じ空中写真にサイドスキャンソナー画像モザイク図を合成したもの。赤点線枠は Fig. 8で拡大表示されている領域を示す（Nagao et al. 投稿中）。

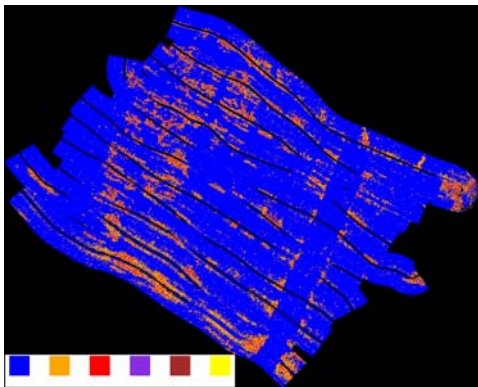


Fig. 8 Fig. 7b のモザイク図と SonarWiz 5 による Area B の 6 分類底質判別図の例（Nagao et al. 投稿中）。

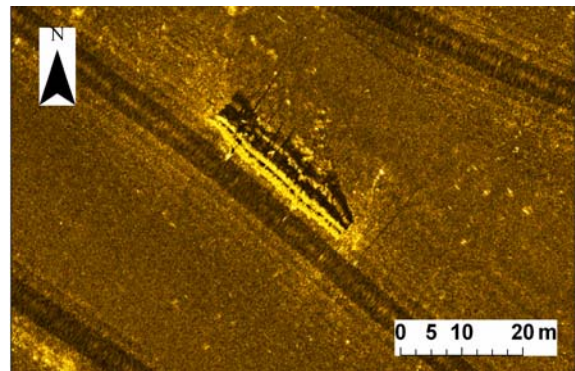


Fig. 9 Fig. 7b の赤点線枠内の拡大図。空中写真（Fig. 7a）と底質判別図（Fig. 8）を比較した結果、この物体は津波で破壊されたカキ養殖施設の一部であると考えられた（Nagao et al. 投稿中）。



Fig. 10 a. Area C のサイドスキャンソナー画像モザイク図と空中写真（撮影日：2011年4月6日。出典：Google Earth）との合成図。b. Fig. 10a の赤破線枠内の拡大図。細長い紡錘形の影の長さは187 m（Nagao et al. 投稿中）。