

震災復興・日本再生支援事業 —宮城県気仙沼湾における震災復興支援業務—

○矢北孝一，外村隆臣，上田誠，吉永徹，吉岡昌雄，有吉剛治，友田祐一，佐藤宇絃
熊本大学 工学部技術部

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災による津波が三陸沿岸域に來襲し、人的及び資産に甚大な被害が発生した。宮城県気仙沼湾では、船舶、自動車、燃油タンク等の流出物が瓦礫となり海底に堆積し、その分布が不明な状況で復興事業が急ピッチで進められた。しかし、湾内の海中に存在する瓦礫から流出した油が海産物を汚染した場合、その商品価値は大きく低下することが考えられ、早期の漁業復興のためには海中瓦礫の位置を特定し効率よく撤去する必要が求められた。また、長期的な漁業復興のためには、海底に残存する瓦礫が混在する砂泥の移動や貧酸素、栄養塩の循環、赤潮発生等に密接に関連する懸濁物質の動態把握が重要と考えられる。これらの状況を鑑み、熊本大学・国立大学協会の3年間（2011～2013年度）の共催事業として、秋元准教授を代表に「地域経済の回復・再生・創成に向けた世界最先端観測機器による水中環境調査」が実施された。本報告は、各調査で当技術部8名が担当した技術支援の概要について、これまでの年次報告に2014年度総合技術研究会での原稿及び2015年海洋開発シンポジウムの要旨を加筆したものである。

2. 気仙沼湾概要

図-1は、2011年7月の気仙沼湾画像に観測船の航跡を表示したものである。気仙沼湾は、湾口が南南西方向を向き、大川河口北側の狭窄部から湾奥に向かって海域幅が急激に狭くなる平面形状となっている。東湾は、湾軸方向約6km、水深約30mであり、西湾は、湾軸方向約9km、最大幅約2km、水深7～20mである。地理的特徴として、図に示すように東西湾を結ぶ長さ約1.5km、幅約0.3km、最大水深約40mの大島瀬戸がある。この大島瀬戸を潮汐流が東西湾方向に流れ、主要航路となっており漁船等の往来が激しい。また、東西湾の中央部に東北地方最大の有人島である面積約9km²の大島があり、湾内は常に穏やかである。そのため気仙沼漁港は天然の良港となっており「気仙沼の防波堤」とも呼ばれている。これら地形的な形状から外洋の影響が少なく、牡蠣、ホタテ貝、ワカメ、昆布等の養殖が盛んに実施され、震災前の気仙沼漁港は、マグロ、メカジキ、カツオ、サンマ等で日本有数の水揚げを誇っていた。



図-1 気仙沼湾と航跡図

3. 調査概要

表-1, 2に, 各調査期間と業務概要及び観測で使用した機器の一覧を示す. 表-1より調査回数は10回であり, 延べ日数は79日, 延べ担当者は27人であった. 2011年は, 調査初年度でもあり1回, 2012年3回, 2013年6回となり通常業務の調整を実施し担当者を決定した. 表-2に示すように, この調査では, GeoSwath, SES2000, AUV, ROV, ADCP, 多項目水質計等の機器が使用された. 2011年~2012年がGeoSwath, SES2000による瓦礫分布調査が主として実施され, 2013年は, ROV, ADCP等による水中環境調査が実施された. 瓦礫分布調査で使用されたGeoSwath, SES2000等のセンサーはステン製角棒に連結し, 写真-1に示す観測船の右舷に振動防止も兼ねて船首・船尾・左舷側でロープによって船体と一体化させた. 観測海域が湾軸方向に約9kmの距離があるため海域を6分割し, GeoSwath測線幅を50m, 観測期間での測線総数は約100測線である. 図-1に示す湾内の空白部は, 水深が5m以下の浅い海域と養殖等の筏のため観測船が航行出来なかった個所である. 図-2に, これまでの調査で得られた成果を示す. これは, 海底面および瓦礫表面で反射した音波の位相差より 400cm^2 の平均水深を求めメッシュ幅1mの水深とした. なおDGPSより得られた位置情報をUTM54系へ変換している. 図より, 海底にある瓦礫らしき物体の形状および海底の地形変化が詳細に確認でき, 対象物の位置特定が可能であることが分かる. これらの位置情報を基に, 図-2に示すように大島瀬戸入口海域に存在した石油タンク等の引上げが宮城県により実施された.

写真-1 センサー設置状況



表-1 調査期間及び業務概要

| | 観測期間 | 業務概要 |
|-------|--------------|--|
| 2011年 | 11月27日~12月8日 | 西湾外周を中心に音響, 地層探査による瓦礫分布調査 |
| | 4月12日~22日 | 東西湾での詳細な瓦礫分布調査 |
| 2012年 | 7月16日~21日 | 気仙沼で自律型モニタリングロボット(AUV)による海中環境の調査 |
| | 8月6日~12日 | 気仙沼湾奥及び大島瀬戸での音響解析装置による海中環境の調査 |
| 2013年 | 2月26日~28日 | 横浜鶴見区及び横須賀久里浜港でのROV訓練及びADCPテスト |
| | 3月18日~28日 | 湾奥, 大島瀬戸でのROV, ADCP, 多目的水質計(AAQ)による海中環境の調査 |
| | 4月20日~26日 | サイドスキャン700kHzによる大型瓦礫詳細調査 |
| | 7月23日~31日 | ROV, ADCP, AAQによる詳細観測 |
| | 9月3日~9日 | ADCP, AAQによる観測 |
| | 11月11日~16日 | ROV, ADCP, AAQによる詳細観測 |

表-2 観測機器一覧

| 機器名 | 型式 | メーカー |
|---|------------------|----------------|
| サイドスキャンソナー測深器 | GeoSwath Plus | K.GeoAcoustics |
| 地層探査機 | SES2000 | Innomar |
| 自立型無人潜水機 AUV (Autonomous Underwater Vehicle) | GA VIA | Teledyne-Gavia |
| 遠隔操作無人探査機 ROV (Remotely Operated Vehicle) | Seamor 600 | Seamor Marine |
| 超音波ドップラー流速計 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) | Workhorse 600kHz | TRDI |
| 多項目水質計 | AAQ1183 | JFEアドバンテック |

4. ROV 支援業務

これまでの観測によって大型瓦礫等の把握は、ある程度の成果を収めることができた。しかし、先に示したサイドスキャナソナー測深器での小型瓦礫のデータは、機器の分解能の限界に近いため3次元表示した場合、その判別が困難となる問題があった。これを克服するため図-2の上部に、ROVによる海底の小型瓦礫の写真が示されている。これは東海大学所有のROVを使用し、海底状況をビデオ撮影した一部をキャプチャーしたものである。このように、漠然とした対象物を判別し、海底状況の把握を実施するROVは、有効な機器と考えられる。そこで2013年に、熊本大学においても写真-2に示すSeamorROVを装備することになった。ROVとは船上から電源を供給し、モニター画像を頼りに遠隔操作する機器である。端的には移動式の水中カメラで、ケーブル経由で映像を地上に送り、水中で長時間作業が可能、高感度カメラによる撮影等の特徴がある。しかし、SeamorROVの大きな特徴は、写真-2に示している先端カメラ付7自由度マニピュレータである。ROVの操作には、本体とマニピュレータの2名のオペレータが必須であり、その熟練には訓練期間が必要となる。そこで、2013年に、横須賀でのトレーニングを経て、写真-3に示すように気仙沼湾内の調査を行った。

写真-2 Seamor ROV

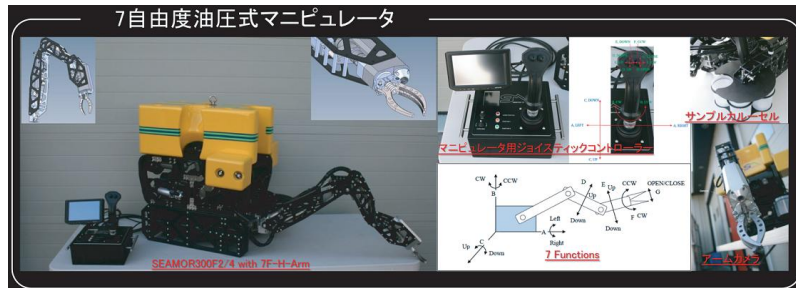


写真-3 気仙沼湾調査状況



5. ADCP 観測

先に述べたように、長期的な漁業復興のためには、貧酸素化、栄養塩の循環、赤潮発生等に密接に関係する懸濁物質の動態把握が重要となる。そこで ADCP を用い、流速と濁度の同時計測を実施することで、大島瀬戸海域における上げ潮、下げ潮期での懸濁物質の空間分布の検討を行った。

大島瀬戸海域において、懸濁物質の広域的な分布特性を検討するため図-3、図-4 に示す大島瀬戸海域において ADCP を用いた曳航観測を行った。観測は 2013 年 3 月の中潮上げ潮時 8:44~12:20 と 9 月の大潮下げ潮時 9:36~10:13 で実施した。各測線は、図-5 に示すように西湾南北方向を測線①~④、瀬戸中央の東西方向を測線⑤とした。傾斜角 20° の ADCP センサーヘッドを観測船右舷の水面下 0.4m 位置に艀装し、測定層厚 0.5m、船速 2~3m/sec とした。各測線において流速 3 成分と後方散乱強度の鉛直分布を同時観測した。懸濁態の後方散乱強度は、式 (1) に示すソナー方程式から算出し、伝搬損失は、式

(2) に示す海水の吸収係数を考慮した。なお、

浮遊粒子による減衰係数は、粒子体積濃度の空間分布が未知のため考慮していない。後方散乱強度 dB と濁度 FTU との関連性を検討するため、図-6、図-7 に大島瀬戸最深部約 40m の st2 において ADCP と AAQ との同時計測を実施した結果を示す。図-6 より dB と FTU の相関は、約 0.8 を示し FTU 鉛直プロファイルの関係も良好である。また図-8 に示すように、散乱強度に影響を与える珪藻等の影響をクロロフィル a ($\mu\text{g/L}$) の鉛直プロファイルより検討した。観測両日における結果より、表層 5m 以深より一様化を示すことから、クロロフィルが後方反射強度に与える影響は小さいと判断した。

$$Rc = 20\log r + 2\alpha r \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{f}{91500} \left[\frac{1.86 S f_T f}{(f_T^2 + f^2)} + \frac{2.86 f}{f_T} \right] \quad (2)$$

$$f_T = 21.9 \times 10^{(6.0 - \frac{1520}{273+T})}$$

ここで、 α : 水の吸収係数(dB/m), f : 周波数(kHz)
 f_T : 緩和周波数(kHz), S : 塩分濃度(psu), T : 水温(°C)
 r : トランスデューサーからの距離(m)

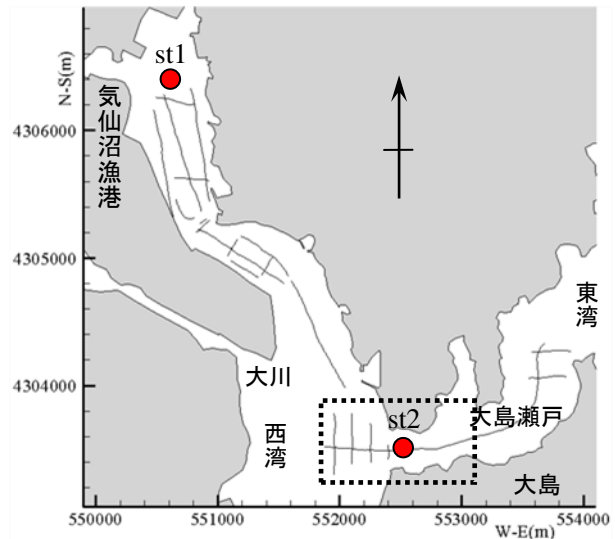


図-3 観測船航跡と対象海域

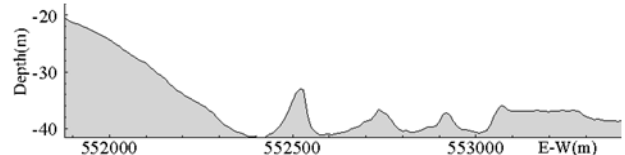
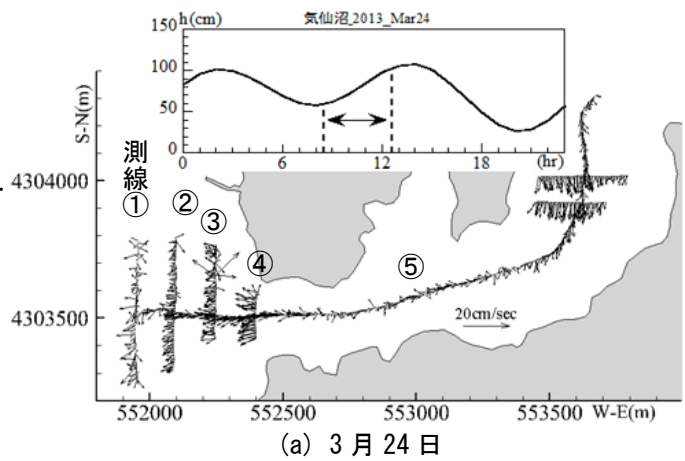
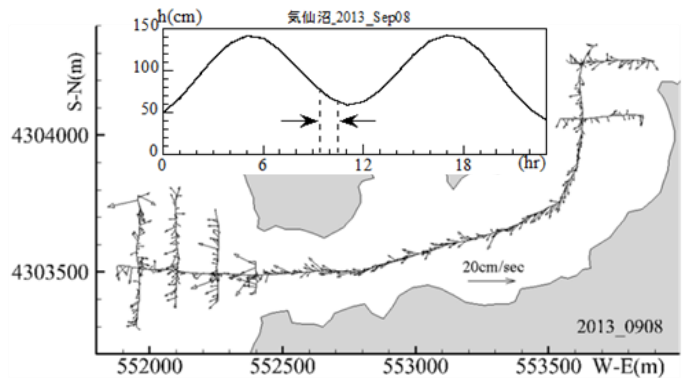


図-4 測線⑤の東西方向水深変化



(a) 3月24日



(b) 9月8日

図-5 測線と水深平均流速ベクトル

K14-16

大島瀬戸は、主要航路となっており定点観測・採水でのアンカーによる停船が厳しい状況である。そこで濁度 FTU と SS(mg/L)との関連性を検討する目的で、水深約 8m の st1 において 7 月 28 日に水質計観測と SS 試験用の採水を実施した。採水器より水面から 1m 毎に 1L を採水し、現地で濾過を行い、SS 試験は実験室で実施した。その結果を図-9 に示す。また st1, st2 近傍で採泥した底泥表層の中央粒径 d_{50} と粒子密度は、st1:0.014mm, 2.509g/cm³, st2:0.012mm, 2.512 g/cm³であった。この観測では、水温、塩分、懸濁成分、粒径等の環境条件が同様であると仮定し、各測線での懸濁分布は、得られた換算式より SS 値とした。この観測結果より、測定層厚、移動距離、流速を乗じ、水深方向に積分することで懸濁物質の移動量を推算した。その一例を図-10、図-11 に示す。図-10 より、測線③と④の底層付近に高濃度域が確認され、図-11 に示すように、SS の最大移動量は、約 200g/sec である。ここでの成果を下記に示す。

(1) 大島瀬戸の中央部は、勾配約 1/20 の斜面が水深約 40m まで連続し、東西方向 W-E : 553000m 付近まで約 200m 毎に急激な水深変化を繰り返している。

(2) 水深平均流速ベクトルは西湾側で放射状の分布を示し、上げ潮期が顕著である。

(3) dB と FTU との相関、ADCP から算出した FTU と AAQ の対応、FTU と SS の相関も良好である。また珪藻類の鉛直プロファイルは表層付近を除くと一様化し、その影響は小さい。

(4) SS の空間分布より測線④,③底層付近に高濃度域が確認され、上げ潮期での測線断面を西湾側に移動する最大量は、約 200g/sec であった。

6. おわりに

気仙沼市を含めた東北沿岸域の復興は、4 年を経過しても遅々として進まない現状がある。震災以前より高度な生活環境の実現を切に願わずにはいられない。その復興支援事業に微力ながら従事した事は、技術部にとって貴重な財産となるはずである。

最後に、通常業務の調整を行い慣れない船上での調査等に参加した各技術職員に心から感謝申し上げる。

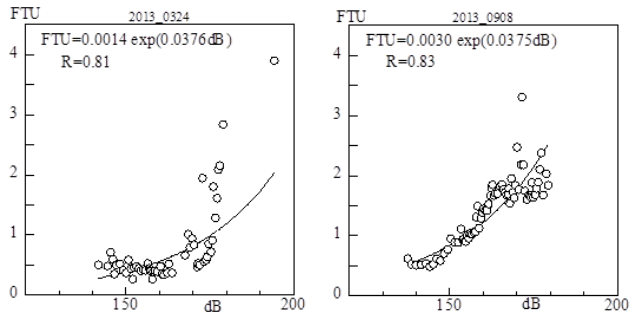


図-6 dB と FTU の相関

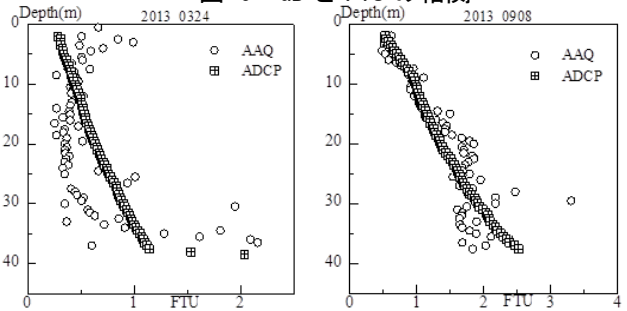


図-7 FTU 鉛直プロファイルの比較

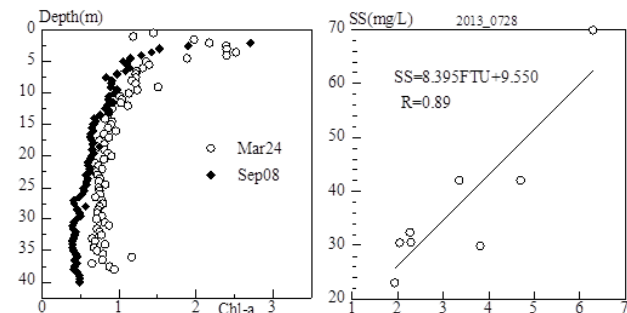


図-8 Chl-a の鉛直分布

図-9 FTU と SS の相関

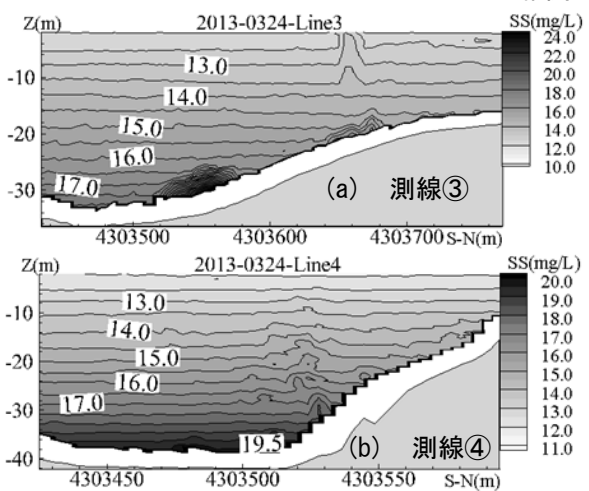


図-10 SS の移動量分布の一例

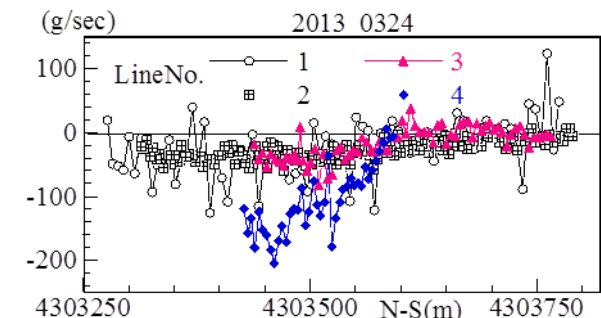


図-11 SS の空間分布の一例