

機関番号：17401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540480

研究課題名 (和文) 音響機器・自律型水中環境観測ロボットによる潮汐卓越型海域の泥粒子堆積過程の解明

研究課題名 (英文) Acoustic equipments and AUV investigations for depositional process of the muddy particles in tide-dominated ocean.

研究代表者

秋元 和實 (AKIMOTO KAZUMI)

熊本大学・沿岸域環境科学教育研究センター・准教授

研究者番号：70222536

研究成果の概要 (和文)：

佐賀県竹崎沖の諫早湾において、泥粒子の沈殿—移動—堆積過程における形態や物性を定量化するために、音響機器・自律型水中環境観測ロボット (AUV) を用いて、地形、底質、水質を調査した。浮遊性懸濁粒子の濃度が、低塩分の沿岸水と高塩分の外海系水との境界と海底直上で極大であることが判明した。泥質堆積物内の詳細な音波断面から泥質堆積物が斜面上に堆積し、斜面下部に向かって拡散している状況が継続していることまでは明らかになった。

研究成果の概要 (英文)：

Acoustic equipments and AUV investigations of the topography, sediment and oceanography in the tide-dominated condition were to clear of the forms and physical properties of muddy particles in the depositional process. The concentration of the suspended particles was the maximum at the boundary between the low salinity offshore water and the high salinity oceanic water and above the bottom. Acoustic data suggest that the muddy particles are continuously accumulated on the slope and diffused toward the slope margin.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：海洋環境学

科研費の分科・細目：層位・古生物学

キーワード：古環境

1. 研究開始当初の背景

これまで、沿岸域における碎屑性堆積物の堆積過程、堆積環境の復元に関しては、主に砂質堆積物を対象として研究が行われてきた。これに対して、泥質堆積物の形成過程の研究は世界的に見ても極めて限られている。特に、洪水流に伴って高濃度の泥粒子が供給されることによって沿岸の海底面上に生じる浮泥が、その後定置し、泥層化する過程を明らかにすることは、地層生成プロセスや堆積環境の復元を議論する

うえに置いては不可欠な情報である (例えば, Dalrymple et al., 2003)。さらに浮泥は、海岸学、海洋工学、水産学、環境科学においても、重要な研究課題として扱われている点も注目される。

九州西岸の有明海・八代海には、国内最大の潮差 (約 4~6m) によって広域に泥質干潟が形成されている。ここでは、近年、泥質堆積物の分布域が急激に拡大し、かつ急激な泥の堆積により干潟沿岸部の底質や地形が大きく変化して

いることが問題化している。広大な干潟が分布する黄海沿岸域では、泥の堆積に潮汐が大きく関与していることが中国や韓国の海洋研究者によって報告されているが、有明海でも、底質の剝削に潮汐が、拡散に潮汐残差流が関係していることが判明している。特に泥粒子の拡散パターンと潮汐残差流のシミュレーションの結果が一致しており（佐藤・松田，2003），この手法は底質分布の予測において重要な手段といえる。しかし、海水中の泥粒子はフロックやペレットとして挙動し、さらに浮泥として潮汐流によって流動するため、その精度を上げるためには泥粒子の沈殿—移動—堆積過程で形態や物性の定量化が必要である。

2. 研究の目的

朝夕が卓越する有明海において、音響機器・自律型水中環境観測ロボット（AUV）およびコア試料を用いて、泥粒子の沈殿—移動—堆積過程における形態や物性を把握する。

3. 研究の方法

1) 調査海域の設定

研究計画の実施する諫早湾は、湾奥に碎屑粒子を供給していた河川流入が、1997年の防潮堤築堤後には阻害されている。ここでは、セディメントトラップによって、泥粒子が主に筑後川流域における降水の1潮汐後に流入していることが分かっている（滝川ほか，2005）。ここでは2002年から、農林水産省九州農政局、環境省、水産庁による観測櫓あるいはブイにより、毎正時に表層から海底直上10cmまで深度1m間隔で環境因子（水温、塩分、溶存酸素、濁度）が測定され、観測開始以来の資料が提供されている点がある。また、九州農政局からは、1963年に作成した1mオーダーの海底地形図（未公表資料）の利用許可も受けている。国土交通省は、筑後川の1時間毎の流量と濁度を測定し、洪水時には粒子組成も調査している。海域では、潮汐ドップラーレーダーによって、波浪時の波長記録も得られている。さらに、湾口では、ドップラー式超音波多層流向流速計（以下、ADCP）による潮汐の流向・流速観測が実施されている（中村，2002）。したがって、この海域には潮汐卓越型海域において泥粒子の挙動を調べるための基礎情報が、国内において最も揃っている、と言えよう。これに加えて、鎌田（1967）、木下ほか（1980）、近藤（2002）および秋元ほか（2004）が、詳細な底質分布図を公表している。諫早湾湾口大浦沖にある観測櫓B4は九州農政局がセディメントトラップを実施した地点であり、南東約2kmにあるB6までの底質は泥、その南は砂であることが分っている。

2) 機器の選定

従来の定点あるいは定時の水質および底質の調査では、観測した地点あるいは時刻の情報しか得られない。この間の変化を、連続した情報

として得るためには、短時間移動できる船舶やロボットに観測機器を搭載することが必要である。さらに、サンプリングでは時間がかかるため、高精度の情報を短時間に取得できる方法でなければならない。そこで、本研究では音響装置と自律型モニタリングロボット（AUV）を採用した。

a. インターフェロメトリサイドスキャンソナー

諫早湾のおよび多良—長洲以北の有明海では、公表された海底地形図がない。農林水産省九州農政局所有の海底地形図は、シングルビームソナー（SH20, 7kHz）で得られた地形断面情報に基づいて作成されている。しかしながら、音響反射のコントラストが弱い場合、この周波数では、泥質の海底では反射せず、海底下の音響インピーダンスの変化する深さで反射することになる。そこで、200kHz以上の音波を発射できる機器を検討した。

一方、水深が7mから20mまで変化する場合、広いスワッチ幅と水による音の減衰が少ないことが必要である。ビームフォーミング式ソナーでは、スワッチ幅が直下水深の7倍である。水深10m以下の浅海では、情報の空白を避けるために、間隔を狭めて側線を設置することになる。このため、測量に時間を要することになり、条件を満たさない。そこで、測量精度はマルチビーム測深器より劣る（測量精度はIHO標準を満たす）が、スワッチ幅が広く（直下水深の12倍）、パルス幅50mにおいて250kHzの音波を1秒で30回発射でき、1スワッチあたり5000点の測深データを取得（ビームフォーミング式の代表機器であるSeabat8125で500点）できる装置としてGeoswath plusを候補とした。

さらに、インターフェロメトリサイドスキャンソナーの水深分解能は、Geoswath plusで3mm、C3Dで5cmであった。そこで、前者を用いて調査した。

b. パラメトリック地層探査機

九州農政局所有の大浦沖音波断面図は、地下40mまで音波が貫通しているが、対象となる泥質堆積物の内部構造は確認できない。このため、小型船舶に艀装でき、地層を貫通できる高音圧が得られ、わずかな音響インピーダンスの違いで地層を識別できる高い分解能が求められる。

パラメトリック方式を採用しているSES2000では、100kHzの一次周波数と異なる周波数の超音波を同時に発信させて互いに干渉することで、高音圧の二次周波数（4・5・6・8・10・12・15kHz）が発生する。今回は、研究海域の同じ側線で、8、10、12、15kHzで音波断面図の比較を行い、10kHzを選択した。

また、従来の音波探査装置の多くは、指向性のない音波を発振しているため、地層の傾斜が急変する断層や褶曲で回折波が記録される。このため、音源から最も近いところで反射した記録を、調査船直下の記録として採用される。こ

の結果、実際の地層構造とは異なる記録が表現され、解析が困難なる。SES2000 は、サイドローブがほとんどない全角 3.6° の音波を発振しているため、高解像度の記録が取得できる。

さらに、従来の音波探査装置は、船の動揺も記録される。この動揺の記録は、後処理でも消去できない。このため、微細な地質構造の解析に支障をきたす。そこで、サイドスキャンソナーのモーションセンサーから、リアルタイムで計測している上下動の情報を取り込んで、船舶の動揺をキャンセルすることで、地質構造の明瞭な記録を取得した。

c. AUV

AUV の位置情報は、水中においては INS と DVL で、潜航前および浮上後には DGPS で取得する。浮上後には位置情報をイリジウム衛星携帯電話で母船に伝達するが、安全な回収には予定地点と浮上地点との差異を把握しておかなければならない。また、この誤差を減らすことは、水中測位の精度の向上にもつながる。本学の AUV は、トランスポンダーを用いないので、DVL による位置の補正が重要になる。海水密度が鉛直方向でほぼ一定の有明海南部（天草上島沖）で、CTD を装着した時は、ほぼ予定地点に浮上した。

次に、通常使用される水質計と同様に、温度、塩分、濁度、クロロフィル、溶存酸素、pH を計測するためのセンサー（耐圧 300m 以上）を、AUV の中性浮力を損なわないように配置した。

3) 現地調査

九州農政局が 2004 年に実施した底質調査の報告に基づいて、諫早湾の湾軸に直行（北西-南東）する 70 側線と、音波断面の各層をクロスチェックするための軸に平行（北東-南西）の 7 側線を、音響装置による地形、底質の調査用に選んだ（図 1）。北西-南東の側線が多いのは、九州農政局諫早干拓事務所所管の観測タワー（B4、B6）の資料において、波浪によって海底が攪拌された後に下げ潮によって B4 から B6 に向かう底層の粒子の移動が推定されているためである（秋元ほか、2006）。なお、北西の一部で側線が欠如しているのは、牡蠣の養殖筏が設置されているためである。AUV の側線は、B4-B6 の往復とし、1 回は海底から 2m 上を、1 回は水深 5m を、潜航した。

4. 調査結果

1) 海底地形

調査海域北西（竹崎）から南に向かって、緩斜面が扇状に広がる。海域東側には、頂部の水深が 9m のマウンドが存在する（図 1, 2）。緩斜面とマウンドとの間にある谷の水深は 18m を超え、北に向かって深くなる。この地形の特徴は、秋元ほか（2006）と一致した。

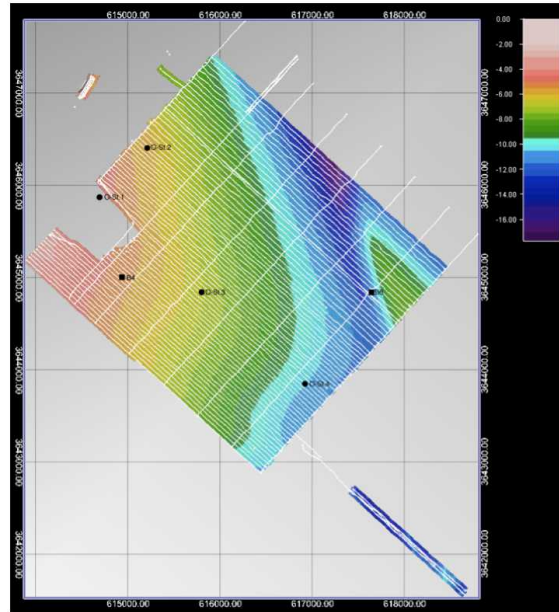


図 1 研究海域の海底地形図。白線は調査船の航路、B4、B6 は九州農政局所管の環境観測櫓（■）、St-1 から-4 は定方位の柱状試料採集地点（●）を表す。

2) 底質

一般にサイドスキャンデータの明暗は、平坦に近い地形において、反射強度の強弱と比例し、底質の密度あるいは粒子の粒度、形状、組成を反映する。このため、フィルターを調整して、一定の反射強度でイメージを加工して、モザイクを作成した（図 3, 4）。

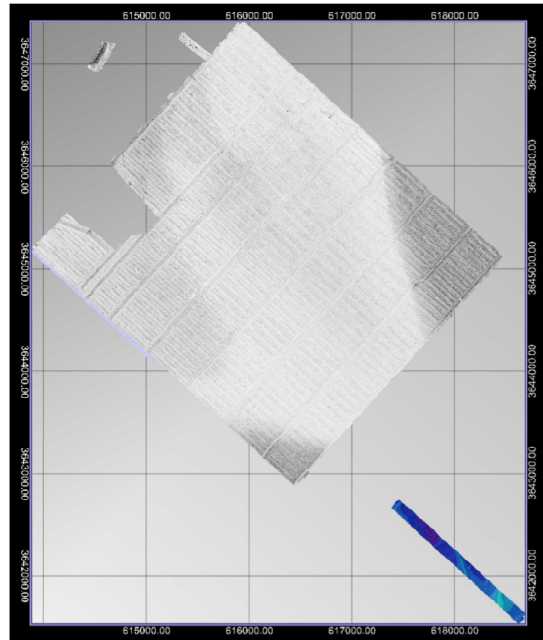


図 3 サイドスキャンイメージのモザイク図（南東のカラーで表示された諫早干拓地の堤防構築のための採砂場の跡地を除く）。暗色ほど砂の含有量が高い。左上の黒色の部分は、竹崎沿岸に露出している安山岩と一致している。

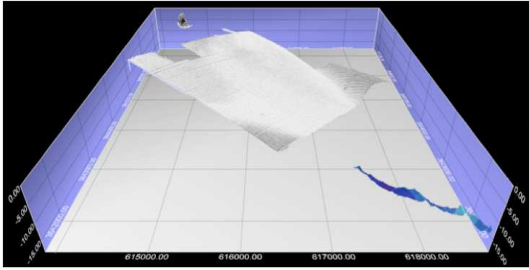


図4 サイドスキャンイメージの3次元モザイク図。暗色ほど砂の含有量が高い。

さらに、泥質堆積物の分布を音響特性から判断するためには、海底面における音響反射強度と表層堆積物の物性との関係をあらかじめ把握しておくことが必要である。そこで、粒度の異なる堆積物が分布する複数の海域で調査した。

最も暗い灰色は、調査海域の南と東に広がる。南東の情報が欠落しているが、同一の堆積物が分布している（滝川ほか、2005）。調査海域の西側1/3には、やや明るい灰色が分布する。この外側は白色であるが、北西から南東に向けて带状に延びる灰色が認められる。この帯の色調は、北西端では西側のそれと一致するが、南東に向かって白色に変化している。

南東からの俯瞰図では、西側緩斜面の浅所に

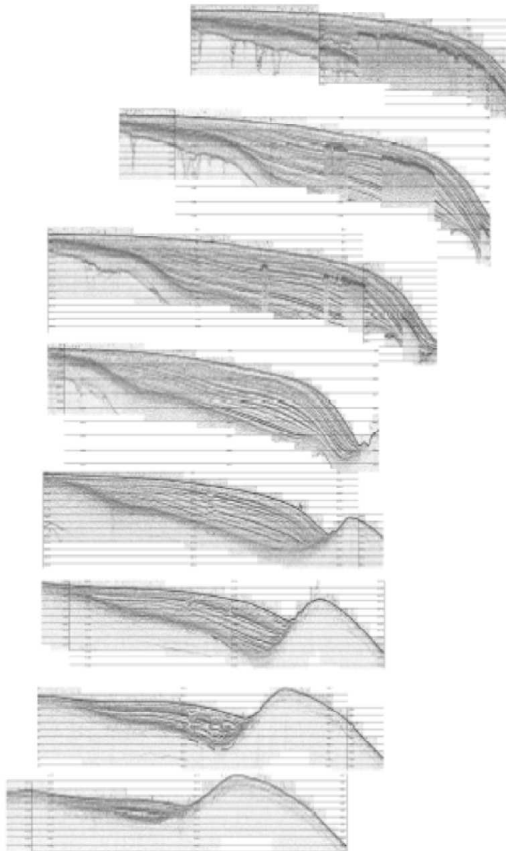


図5 音波断面図（東西：北から南に配列）。厚い泥質堆積物に多数の砂層が挟まる。

明灰色が分布する。その東側の白色は、暗灰色の東側急斜面の麓まで広がる。南からの俯瞰図

では、前述の灰色の帯が、西側緩斜面中部にあり、南東に向かって延びる状況が認められる。

3) 地質断面

低周波で収集した音波断面を、Median フィルター、ノイズ削減フィルターで処理した。その後、側線ごとに縦横1:12.5で出力した（図5）。

調査海域に広く分布する泥質堆積物には、反射の強い層厚約10-20cmの薄層が多数認められる。海域西端の北西-南東側線では分布せず、下位の地層が露出している。層厚は、斜面の東と南に向かって増加し、斜面下部で最大（7m）になり、斜面の基部で収斂する。この堆積物の下位には、同じ強度の明瞭な構造が認められない均一な地層が存在する。

0-St.1~4(図1)で採集したコアでは、泥の中に砂層が挟まれ、海域南部の高まりにおけるコアでは砂層が分布している。このことから、薄層の多くは泥層に挟まる砂層と推定される。反射強度のコントラストは、南北断面では南に向かって、東西断面では東に向かって、明瞭になる。これは、泥と砂の物性の差異を反映していると考えられる。B4における²¹⁰Pbと¹³⁷Csによる年代測定の結果から、堆積速度は0.63mm/年であり、表層は大きく削剥されていない。

下位の音響インピーダンスが均一な地層は、南東にある諫早干拓地の堤防構築用採砂場跡に分布する砂にも連続している。

4) 水質

a. 鉛直分布

多項目水質計（アレック電子 AAQ1183）で水温、塩分、濁度、溶存酸素を調査した（図6）。

低塩分の沿岸水と高塩分の外海系水との境界は、水深約5mに存在する。5-9月に河川流量が

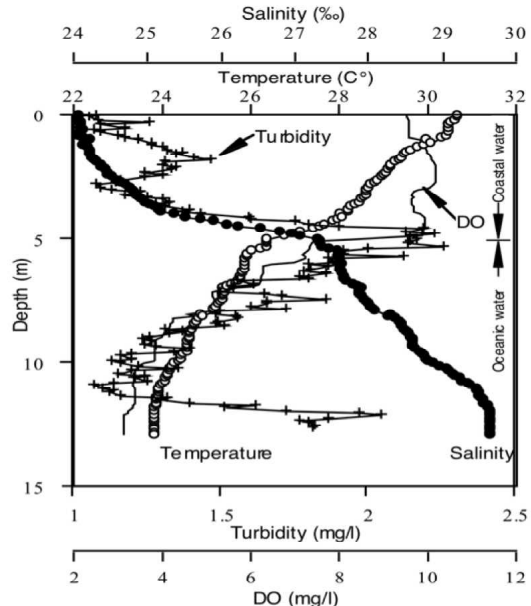


図6 水質の鉛直分布図（2010年8月4日に0-St4で測定）。

増加する有明海では、この層状構造がこの期間継続する。濁度は、この境界付近で極大であり、海底直上では低い。したがって、この境界付近の浮遊粒子を採集することで、河川から流入し、海底へ沈降する前の懸濁物質の状態を把握できると考えた。

b. 3次元分布

AUV が、2つの原因のために設定したコースを潜航せず、情報が得られなかった。

まず、大型の赤クラゲが夏期に大量に発生し、その密度は海水とほぼ同じであり、AUV の先端に装着している衝突防止ソナー（シングルビーム：指向角 0.75° ）では識別できない。衝突して肉片がAUV本体とCTDセンサーの間に挟まり、抵抗になった。これにより、予定の時間内にミッションが完了しないとAUVが判断し、途中でミッションの中止を繰り返した。そこで、CTDを外して潜航させたが、これでも途中で浮上して、調査できなかった。CTDを艦装した状態では問題なかったため、音速度の情報がないためにDVLが海底を捉えられなかったと推定される。

つぎに、AUVは推力によって潜航するため、必ず表層水に対して正の浮力であることが求められる。研究対象海域では、懸濁粒子が最も多く供給される夏期に、河川水起源の低塩分が表層を覆い、表層と底層で密度が大きく異なる。この状態で、表層水の密度にあわせてAUVの浮力を調整すると、浮力に対して推進力が足りず海底まで潜航できなかった。この潜航能力の制限から、浮遊粒子が最も供給される期間に、濁度の3次元分布を把握できなかった。

5) コア試料調査

潮汐の流向・流速との関係を解析するために、ダイバーによって、定方位の不擾乱のコア試料を4地点で採集した。しかしながら、現地でもコアの最上部を観察したが、浮泥は認められなかった。さらに、産業総合研究所で詳細に検討したが確認できなかった。

4. 主な成果

音響機器およびAUVを用いて、佐賀県竹崎沖の諫早湾において、地形、底質、水質を調査した。懸濁粒子の濃度が、低塩分の沿岸水と高塩分の外海系水との境界と海底直上で極大であることが判明した。さらに、斜面を形成している泥質堆積物の表層および内部からの音響反射強度の差異から、泥粒子が斜面上に堆積し、斜面の縁に向かって拡散している状況が継続していることを示唆していた。

本調査では、AUVの特性から、懸濁粒子の3次元分布を把握できなかった。今後、映像や懸濁粒子の捕集には、長時間にわたって水中あるいは海底で停止できる遠隔操作水中ロボット(ROV)の活用によって解決できると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

1. 秋元和實, 滝川清, 矢北孝一, 外村隆臣, 滝野義幸 (2012) 音響解析による気仙沼湾における津波襲来後の海中環境と堆積物分布特性の把握. 海洋開発, 68, I_180-I_185. (査読有)
2. 矢北孝一, 滝川清, 秋元和實, 増田龍哉, 森本剣太郎, 森敬介, 島崎英行 (2012) 底泥表色系による海域底泥表層の硫化物濃度の推定に関する研究. 海洋開発, 68, I_588-I_593. (査読有)
3. Kazumi Akimoto, Koichi Yakita, Takaomi Hokamura, Toshihide Takeuchi, Koji Shibata, Michiharu Shibata, Koichi Nakano and Ken Yoshizu (2011) Acoustic machine and AUV assessment of the debris flow disaster in the Sumiyo Bay coral reef aid in the recovery of the regional economy. Progress in Environmental Science and Technology, 3, 24-30. (査読有)
〔学会発表〕(計15件)
1. K. Akimoto, K. Yakita, T. Hokamura, T. Yoshinaga, M. Yoshioka, I. Sakamoto, Y. Takino, Submarine topography and sediment distribution after the 11 March 2001 tsunami impact in Kesen-numa Bay, Miyagi, Japan. Proceedings of International Symposium on Underwater Technology 2013.03.07, Univ. of Tokyo.
2. 秋元和實, 滝川清, 島崎英行, 矢北孝一, 外村隆臣, 森敬介, 坂本泉, 滝野義幸, 音響装置, 自律型モニタリングロボットおよび遠隔操作型ロボットによる水俣湾内外の地形、底質、動物相の評価. 日本古生物学会第162回例会, 2013.01.25, 横浜国立大学.
3. 安藤寿男, 大越健嗣, 秋元和實, 七山太, 坂本泉, 滝野義幸, 根本ゆかり, 八代海南部の海底水深30mのマウンド群に発達するカキツバタ(二枚貝)礁. 日本古生物学会第162回例会, 2013.01.25, 横浜国立大学.
4. 秋元和實, 滝川清, 矢北孝一, 外村隆臣, 吉永徹, 吉岡昌雄, 坂本泉, 滝野義幸, 20110311津波襲来後の気仙沼湾の海中環境. 日本地質学会第119年学術大会(大阪大会), 2012.09.15, 大阪府立大学.
5. 秋元和實, 滝川清, 谷口功, 東日本大震災における震災復興・日本再生支援事業(熊本大学・国立大学協会共催)の紹介. 日本地質学会第119年学術大会(大阪大会), 2012.09.15, 大阪府立大学.
6. 秋元和實, 滝川清, 矢北孝一, 外村隆臣, 滝野義幸, 音響解析による気仙沼湾における津波襲来後の海中環境と堆積物分布特性の把握. 2012.06.27, 函館国際ホテル.
7. 秋元和實, 滝川清, 矢北孝一, 外村隆臣, 滝野義幸, 気仙沼湾における20110311津波の地形、底質への影響. 日本地球惑星科学連合2012年大会, 2012.05.20, 幕張メッセ.

8. Akimoto K., Yasuda H., Ikehara M., Matsuoka K., Yokoze H., Yoshimura H., Morii Y. and Yamawaki N., Evaluation of oxygen isotope in the shallow benthic foraminiferal species (*Nonion japonicum* Asano). Sixth International Conference Environmental Micropaleontology, Microbiology and Meiobenthology, 2011.09.19 – 09.22, A. A. Borissiak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences.
9. 秋元和實, 奄美大島住用湾和瀬サンゴ礁における土石流災害後の変化. 日本地質学会第118年学術大会. (2011.09.09– 09.11, 茨城大学).
10. 秋元和實, 音響解析機器と自律型モニタリングロボットによる鹿児島県奄美大島住用湾の和瀬サンゴ礁における土石流災害の評価. 日本古生物学会2011年年会. 2011.07.01–07.03, 金沢大学.
11. K. Akimoto, K. Yakita, T. Hokamura, T. Takeuchi, K. Shibata, M. Shibata, K. Nakano and K. Yoshizu Acoustic machine and AUV assessment of the debris flow disaster in the Sumiyo Bay coral reef aid in the recovery of the regional economy. 2011 International Symposium on Environmental Science and Technology. (2011.06.01–06.04, Dongguan, Guangdong, China).
12. K. Akimoto, Y. Henmi, H. Shimasaki, K. Yakita, T. Hokamura, T. Masuda, T. Takeuchi, K. Shibata and M. Shibata, Autonomous underwater vehicle (AUV) investigations to protect valuable invertebrates. Technical Program Committee of the Symposium on Underwater Technology 2011 and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables & Related Technologies 2011 (UT11+SSC11), 2011.04.05–04.08, Univ. of Tokyo.
13. K. Akimoto, H. Shimasaki, K. Yakita, T. Hokamura, T. Takeuchi, K. Shibata, M. Shibata, K. Nakano, M. Sannoh, K. Yoshizu and K. Sato, Evaluation of the Natural Recovery in an Artificially Modified Geography. Technical Program Committee of the Symposium on Underwater Technology 2011 and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables & Related Technologies 2011 (UT11+SSC11), 2011.04.05 – 04.08, Univ. of Tokyo.
14. 秋元和實, 逸見泰久, 増田達哉, 島崎英行, 矢北孝一, 外村隆臣, 竹内俊英, 柴田耕治, 柴田成晴, 自律型環境モニタリングロボットによる天草上島沖ナメクジウオ生息域の3次元環境調査. 日本古生物学会第160回例会, 高知大学 2011.01.29.
15. 秋元和實, 竹内俊英, 柴田耕治, 島崎英行,

逸見泰久, 増田達哉, 矢北孝一, 外村隆臣, 柴田成晴, 音響機器および自律型環境モニタリングロボット (AUV)によるナメクジウオ生息域の3次元環境調査. 日本地質学会第117年学術大会, 富山大学, 2010.09.19.

〔図書〕(計2件)

1. 秋元和實 (共著) 海洋地質: 有明海 (担当部分), 日本地質学会編 地方地質誌 (九州), pp. 434-439, 朝倉書店
2. 秋元和實 (共著) 底質の変化 (担当部分), 楠田哲也編 蘇る有明海—再生への道程, pp. 59-67, 恒星社厚生閣.

〔その他〕

○報道

1. テレビ 東北放送ニュース: 2011年12月26日18:00-19:00, 仙台放送FNNスピーク: 2011年12月27日11:30-12:00, NHK総合クマロク: 2012年1月26日18:20-19:00, 2012年5月29日18:20-19:00, NHK総合ニュース845熊本: 2012年1月26日18:20-19:00, 2012年5月29日20:45-21:00, TBS Nスタ: 2012年5月3日, 17:45-18:15, NHK総合おはよう日本: 2012年6月3日4:30-5:00, TBCニュース: 2012年6月13日18:00-19:00
2. 新聞 河北新報: 2011年12月27日朝刊, 2012年6月14日朝刊, 三陸新報: 2011年12月29日朝刊, 2012年6月14日朝刊, 読売新聞: 2012年6月15日朝刊, 朝日新聞: 2012年6月15日朝刊, 熊本日日新聞: 2011年7月25日朝刊, 2012年1月26日朝刊, 西日本新聞: 2012年3月13日, 山形新聞: 2012年9月14日朝刊, 信濃毎日: 2012年9月14日朝刊, 新潟日報: 2012年9月14日朝刊.
3. ラジオ エフエム熊本「FMK Morning Glory」 2012年12月10日

○イベントでの紹介

文部科学省 東日本大震災復興支援イベント～教育・研究機関としてできること, そしてこれから～: 2013年3月11日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋元 和實 (AKIMOTO KAZUMI)

熊本大学・沿岸域環境科学教育研究センター・准教授

研究者番号: 70222536

(2) 研究分担者

七山 太 (NANAYAMA FUTOSHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・主任研究

研究者番号: 20357685