

潮汐卓越環境における浚渫窪地の埋積に関する効果の評価

秋元和實¹・矢北孝一¹・島崎英行²・三納正美²・柴田成晴³

1: 熊本大学 〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1 e-mail: akimoto@kumamoto-u.ac.jp

2: 日本ミクニヤ株式会社 〒213-0001 川崎市高津区溝口 3 丁目 25-10

3: 株式会社東陽テクニカ 〒103-8284 中央区八重洲 1-1-6

Environment assessment of dredged-hollow filling under high velocity tidal current in Ariake Sea, Kyushu, Japan

Kazumi AKIMOTO¹, Koichi YAKITA¹, Hideyuki SHIMASAKI¹, Masami SANNOH² and Michiharu SHIBATA³

1: Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Chuo-ku, Kumamoto City, 860-8555 Japan

2: Nihon Mikuniya Corporation, 3-25-10 Mizonokuchi, Takatsu-ku, Kawasaki City, Kanagawa 213-0001 Japan

3: TOYO Corporation, 1-6, Yaesu 1-chome, Chuo-ku, Tokyo 103-8284, Japan

Abstract

A dredging hollow is buried to keep out occurrence of anoxic water mass during summer at the coastal region under the influence of a sluggish current. The filling is also performed in fast-current condition, but the effect in the environmental improvement is unknown.

In order to evaluate of improvement effect, we investigated the environment of the dredged area under the fast bottom current in the middle part of Ariake sea. In the deepest hollow, dissolved oxygen is more than the standard value (4.3mg/l) by strong vertical circulation, and organic matters were removed by fast bottom current. The hollow isn't a source of anoxic water mass.

In the condition that the water and sediments is mixed by the bottom currents in the hollow, the hollow filling is ineffective to the remediation, and is an economic loss.

Keyword: Environment assessment, Geography, Oceanography, Hydrodynamics, Dredged hole, Ariake sea

はじめに

浚渫によって生じた窪地は、全国の沿岸-沖合の海底に存在する。九州沿岸も海砂利の採取が盛んであり（樋田ほか、1991）、有明海では、長崎県（諫早湾の湾口南側）や熊本県（長洲町沖と三角町沖）に、多数の窪地が存在する。

熊本県が長洲町沖で採砂を許可した海域（長洲町沖合海域：熊本県土木部、1992）は、菊池川河口から南西に約 7km 離れた場所を起点に、北西に 10km、幅 1-2km の範囲である（Fig. 1）。この範囲は、起点から北西に伸びるサンドリッジの分布（国土地理院、1982）にほぼ一致している。この海域では、既に浚渫は行われていないが、1970 年代には大規模に採砂が行われていたことが音波断面でも認められる（木下ほか、1980）。秋元ほか（2008）によれば、菊池川、白川、緑川から流出したほとんどの碎屑粒子は、長洲町沖海域のサンドリッジまでは到達していないので、この浚渫窪地が自然に埋積されることは通常では考えにくい。

海水の循環が滞る東京湾や三河湾の湾奥では、浚渫後に残された窪地で青潮が発生して、生物相に影響し（金子ほか、2011）、沿岸では漁業被害を被っている（武田、石田、2007）。このため、環境修復するために、窪地を埋めて、海底の平坦化が検討された（例えば、環境省総合環境政策局環境影響評価課環境影響審査室、2006：中村、2009）。三河湾では、窪地を埋積して貧酸素水塊の発生を抑制して、浚渫地に近接したアサリ漁場の環境改善が実施された（愛知

県、2011）。

熊本県では、アサリの漁獲量は、1977 年をピークに、それ以降急減している（水産庁、2005、2013）。この漁獲量の減少の原因を、海砂採取による浚渫窪地の形成とし、対策として窪地の埋積が検討されている。しかし、漁獲量の減少の前から浚渫窪地が存在していたこと、浚渫窪地による貧酸素水塊の発生については不明であることから、窪地の減少がアサリの漁獲量の回復につながると判断できていない。そもそも有明海は橘湾から外海系水が流れ込み（滝川ほか、2005a）、大潮における潮汐の流速は水深平均で約 60cm/秒に達する（安達、2002）。このため、有明海は閉鎖性が強いが、潮汐が卓越し、海水交換が活発な環境である。

有明海における貧酸素水塊は、佐賀県沖で 1980 年に初めて発生した（大島、2009）。諫早干拓地の潮受け堤防工事後（1997 年 4 月）、諫早湾湾口にある浚渫域が発生源とされていた（西ノ首、2002）。しかし、この浚渫の開始は 1989 年であり、貧酸素水塊が初めて出現した 1980 年より後であり、貧酸素水塊が発生した年とは一致しない。西ノ首（2002）が指摘した窪地における夏季の小潮時の水質の実測では、底層でも貧酸素ではなかった（Akimoto, et al., 2011）。

東京湾・三河湾と有明海とでは、潮流の特性が異なり、沿岸域での流速の差が有機物の集積に影響を与えていることが予想される。窪地の分布域に東接する諫早干拓事務所所管の水質自動観測タワー B5 では、大潮の上げ潮最速時に、堆積物が削剥・懸濁・再堆積していた。一方、夏季の貧酸

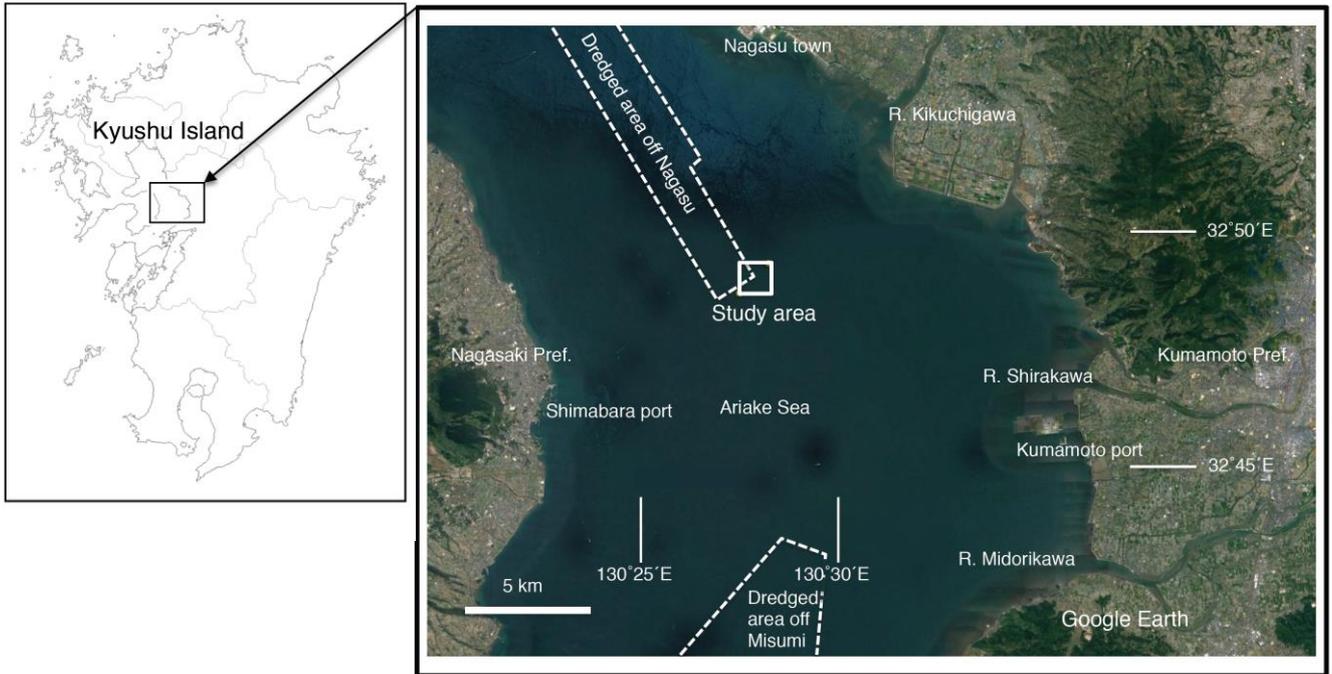


Fig. 1 Study area and the dredged areas off Kumamoto prefecture (after Google Earth).

素水塊の原因は、諫早湾外から流入した有機物による酸素の消費であった（滝川ほか，2005b）。このことから、窪地が貧酸素水塊の発生源とは断定できない。

そこで、小論では、潮流の早いことで知られている、有明海中部（熊本市沖）の長洲沖の大規模な浚渫窪地のうちこの海域の南端にあったサンドリッジ（地元では「ガッツの洲」と呼称）付近を調べることににより窪地の有無と貧酸素水塊の実態を調べることにした。なお、この海域では熊本県環境立県推進課未公表資料により、夏季の小潮（2017年8月29日および9月14日）の水質と底質の情報が得られていたので、今回得られた夏季の大潮の結果と合わせて、大潮・小潮における影響の評価が可能となった。

方法

対象海域の浚渫による窪地が貧酸素水塊の形成に与える影響や潮汐による環境変化を捉えるために、流向・流速調査に加えて、海水の酸素濃度・浮遊懸濁粒子量、堆積物の粒度組成と有機物含有量を調査した。

まず、地形変化を把握するために、大潮の2017年4月23日と5月25日に、長辺800m・短辺600mの範囲で、水深（R2Sonic：400kHz）を測定（UTM座標52帯Nを使用）した。測位とヒープ補正には、POS/MV慣性GPSジャイロ（DGPSの測位精度は0.5m-2m、ヒープとヒープ振幅は5cmと5%）を用いた。2回の地形調査は、同一測線、同一機器、同一精度で実施した。東西600m、南北550mの範囲で、水深データの差分を取り、そのXYZの値を用いて、3次元視覚化ソフト（Fledermaus）で地形変化を視覚化した。

つぎに、窪地とその周辺の地形が短期間に変化していたので、日中に干潮と満潮になる大潮直前（2017年6月22

日）に、窪地とその周辺において、流動、懸濁物、堆積物の特性を調査した。

3次元で潮流の挙動を把握するために、大潮の上げ潮と下げ潮の流速最大時に、超音波ドップラー多層流向流速計（Workhorse ADCP：600kHz）で、流向・流速を測定した。3側線（LINE-1～3）での断面図は、数値流体力学可視化ソフト（Tecplot360 2013）を用いて作成した。ただし、海底直上約5mまでは、乱反射で測定精度が著しく低下するため、ベクトルを表示していない。水深35m以深は、機器の測定範囲を超えるため、空白である。

海水の攪拌状況と底層の懸濁粒子を把握するために、堆積場を南北に縦断するLINE-1の7地点（St-1からSt-7）で、水質計（JEFアドバンテック社製直読式総合水質計AAQ-RINKO171）を用いて、密度と懸濁粒子量の鉛直分布を把握した。このうち、St-1からSt-3は下げ潮で、St-4からSt-7は上げ潮で、測定した。

加えて、海底の泥質堆積物による被覆、底層直上の海水中的懸濁粒子の種類、表層堆積物の粒度組成、COD、強熱減量および硫化物を、未浚渫および堆積場である比較地点（満潮時の目視観測ROV-R、ならびに採水と採泥St-R）で、削剥場である浚渫窪地の最深部（干潮時の目視観測ROV-D、ならびに採水と採泥St-D）で、それぞれ調べた。なお、地点St-1は、ROV-RおよびSt-Rと同じ地点であるが、観測時刻が異なる。

海底の目視観測には、ハイビジョンカメラを搭載した遠隔操作型無人探査機（ROV：Seamor300）を用いた。

懸濁粒子の粒径分布を解析するために、St-DおよびSt-Rにおいて、それぞれ中層（水深15-20m）および底層（海底から1-3m上方）で、バンドーン採水器を用いて、12Lの海水を採集した。ミリポアフィルターで濾過して、残渣の含

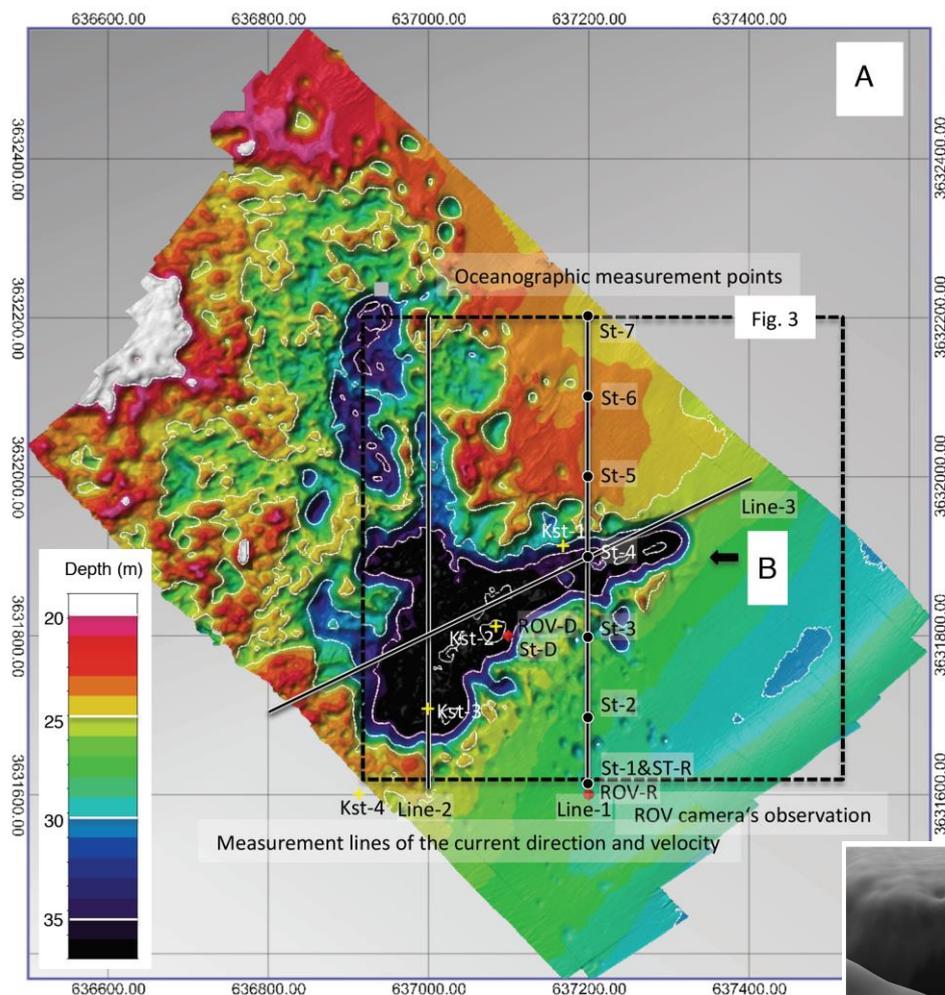


Fig. 2 A: Topography in south end of dredged area off Nagasu town. Color bar shows 1 m, and a contour line (white-thin-solid line) is 5 m interval of water depth. A black arrow indicates the small rises in the margin of a hole. The water quality was investigated at St-1 to -7, -D and -R. The sediment samples were collected by a grab sampler and bottom was observed by ROV camera system at St-D and St-R. The direction and velocity of tidal current were measured along line-1 to -3 by ADCP. The water quality and sediment data of Kumamoto prefecture were obtained at Kst-1 to -4. (modified Akimoto et al., 2017)
B: Enlarged 3D drawing of small sand ridges.

有量を計測した。その後、フィルターの横 1.5mm、縦 1.0mm の範囲を、デジタルマイクロスコープ(キーエンス社 1.0mm の範囲を、デジタルマイクロスコープ(キーエンス社製 VHX-D500)で撮影(倍率 20 倍、超解像度 HRD モード)し、画像データにした。パラメータを調整(明るさ: 50, テクスチャー強調: 50, コントラスト: 0, 色調整: 0)した画像を基に、約 35000 の粒子について最大径を計測した。

表層堆積物の粒度組成は、エクマンバージ式採泥器で採集後に、レーザー回折法/散乱式粒度分布測定装置(Horiba 社製 LA-950V2: 測定範囲は粒径 0.001mm~3mm)で分析した。

なお、水質、底質、懸濁粒子量、粒度、COD、強熱減量および硫化物の測定は、株式会社同仁グローバルに依頼した。

熊本県環境立県推進課(未公表資料)は海面から海底まで水深 10cm 間隔で、水温、塩分、溶存酸素、濁度を、水質計(JEF アドバンテック社製直読式総合水質計 AAQ-176)

を用いて測定している。同時に、溶存酸素量を、バンドーン採水器で採水して補正(方法は不詳)している。堆積物の粒度組成を、篩を用いて分析している。

調査結果

地形の特徴

窪地の地形: 本浚渫域には、1979 年には浚渫によって高さ 2-3m の不規則な凹凸地形になっていた(木下ほか, 1980)が、浚渫前には大規模なサンドリッジが存在し(国土地理院, 1982), 2007 年でも木下ほか(1980)と同様の地形が認められた(秋元ほか, 2008)。2015 年まで熊本県は採取を許可していた(熊本県, 2013)ため、現在ではそのリッジは消失している。

現在、調査地には、半球状の窪地が多数存在し、その直径は約 10m であり、水深も周囲より約 10m 深い(Fig. 2)。加えて、調査地の中央には、南北に伸びる長さ 600m の窪地(南北性)と、西南西-東北東に伸びる長さ 600m の窪地

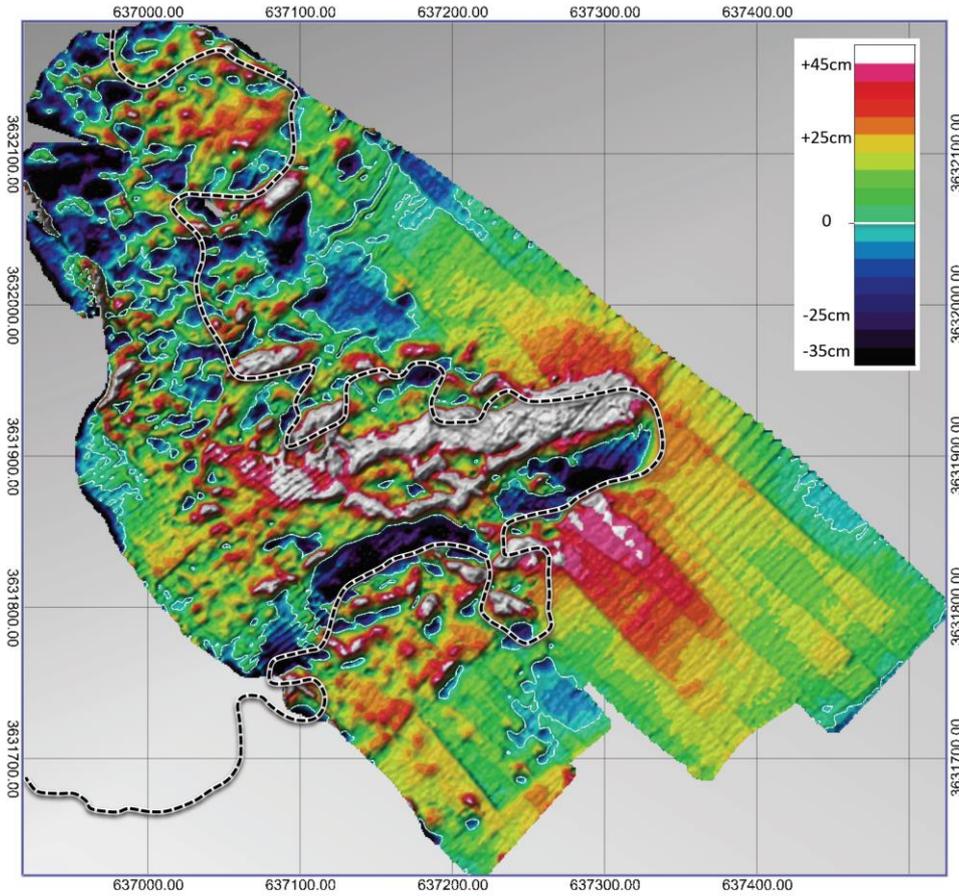


Fig. 3 Topographic change during about 2 months. Color shows the amount of the change in 5 cm interval. White thin-solid line indicates 0cm. Black thick-dot line shows the rough boundary (mostly parallel with 25m depth-contour line) of the biggest dredged hole on figure 2. (modified Akimoto et al., 2017)

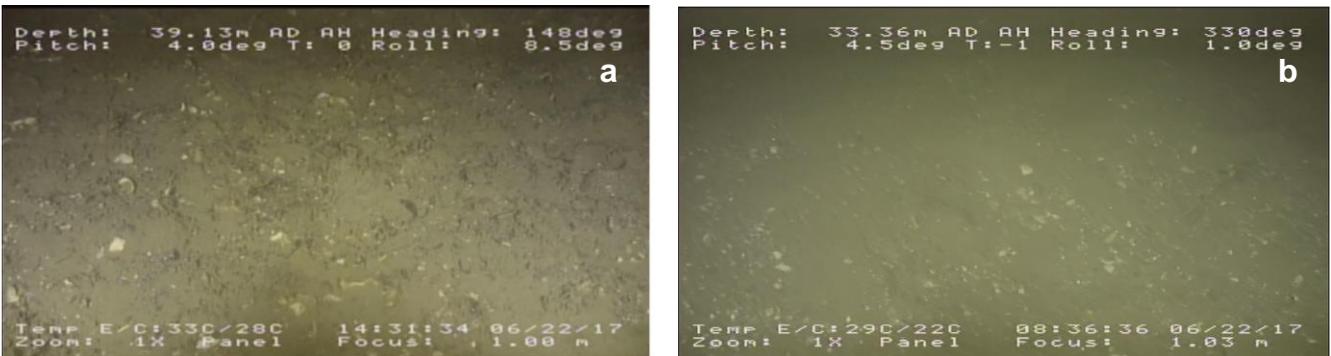


Fig. 4 Photograph of bottom surface at St-D (a) and St-R (b) obtained by ROV's camera.

(東西性) からなる大規模な浚渫跡が存在する。両者は南西端で接していて、カタカナの「レ」に似た形である。東西性窪地が最も深く、特に南縁に沿って水深 45m を超える場所が並ぶ。

この東西性窪地の東端には、小規模(最大で、長さ 28m, 幅 21m, 高さ 1m) なリッジが、数個存在する (Fig. 2 の黒矢印)。このリッジは、円錐の底部が窪地の縁にあり、頂部が外側に向かって倒れた形状である。

短期の地形変化: 共通する範囲 (東西 600m, 南北 550m) において、大潮を挟む 2 回の調査で得られた 0.5m 間隔のグリッド毎に、水深の差分を求めた (Fig. 3)。水深の変化を 3 次元視覚化し、「レ」字型の窪地の外周 (黒の点線: 概ね Fig. 2 の水深 25m の等深線に一致) と比較した結果、

南北性窪地と東西性窪地の北斜面および東西性窪地の南側に広がる未浚渫区域で堆積、南北性窪地東側の未浚渫区域および東西性窪地の南斜面で削剥していた。最も顕著な変化 (最大で 40cm) は、東西性窪地の北斜面であった。窪地の縁から外に向かって伸びる高まりが分布している東西窪地の東端でも、最大で約 20cm 浅くなっていた。

底質の特徴

海底面: ROV による目視観察では、最深部 (ROV-D) と比較地点 (ROV-R) の堆積物は、類似していた (Fig. 4)。表面は泥の被覆はなく、内部は貝殻を含む分級不良の泥質細粒砂からなる (Fig. 5)。

熊本県の粒度分析 (篩法) では、シルトの含有量は、窪

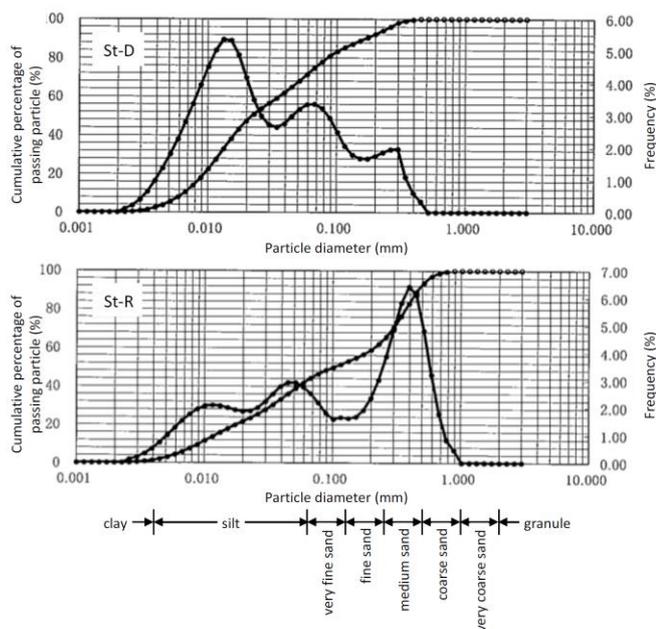


Fig. 5 Diameter distribution of sediment at St-D (a) and St-R (b) measured by Laser Particle Size Analyzer.

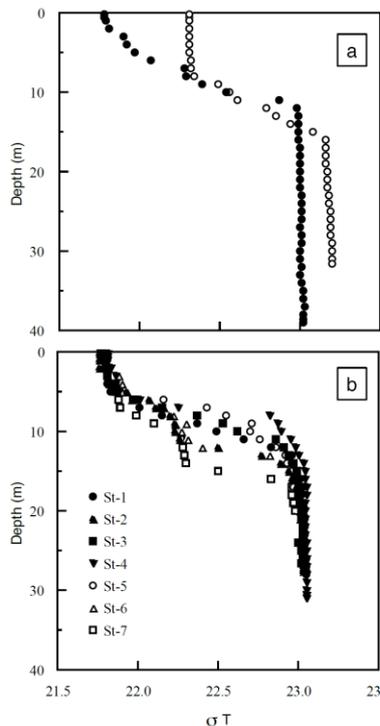


Fig. 6 Profile of σT in the spring tide (22 June, 2017). (a) White circle: high tide at St-R, black circle: low tide at St-D. (Akimoto et al., 2017) (b) Open mark: flood tide, close mark: ebb tide.

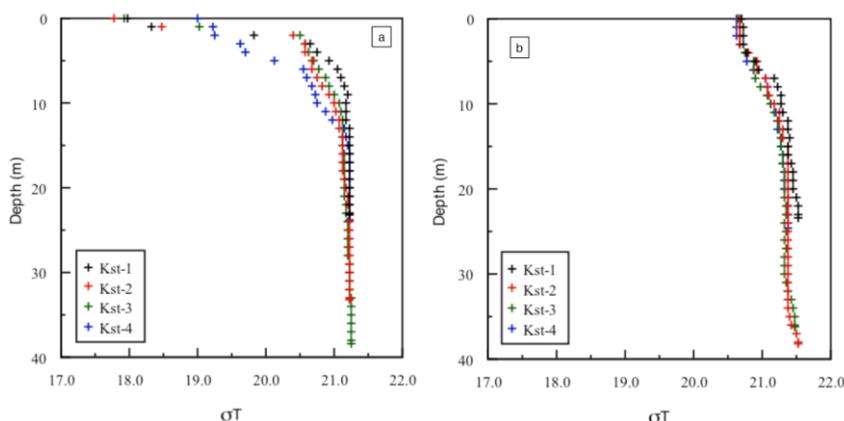


Fig. 7 Profile of σT in the neap tide at 29 August, 2017 (a) and 14 September, 2017 (b) based on the data provided from Kumamoto

地斜面 (Kst-1) で 4%, 窪地内 (Kst-3) で 10%であった。さらに、両試料とも、粒径 0.25mm-0.5mm の割合が高く、Kst-1 で約 50%, Kst-3 で約 40%である。

本調査と熊本県の結果が異なるのは、目視観測では大きな差異がなかったことから、分析が基質を選択した試料と全体の試料との違いを反映したと思われる。

有機物含有量 : St-D において、COD は 6.7mg/g、強熱減量は 11%、硫化物量は 0.07mg/g であった。St-R における値は、それぞれ 5.3mg/g、11%、0.07mg/g であった。

熊本県環境立県推進課の資料では、COD は Kst-1 で 1.3 mg/g、Kst-3 で 7.0 mg/g であり、硫化物量は Kst-1 で 0.01mg/g、Kst-3 で 0.03mg/g であった。

水質の特徴

密度の鉛直分布 : 海水の鉛直混合を検討するために、満潮 (St-R)、干潮 (St-D)、および干潮の前後に Line-1 に沿う 7 点 (St-1~St-7) で、密度 (σT) の鉛直分布を求めた。

干潮では、 σT は、水深 10m-15m で 21.7 から 23.0 まで

急増するため、水塊はこの水深を境に成層していて、表層と下層に 2 分される (Fig. 6a)。一方、満潮では、上げ潮によって、高塩分の外海系水が流入するため、 σT が表層水塊では 22.3、下層水塊では 23.3 に増加する。 σT の差が、干潮では 1.3 であったが、満潮では 1.0 である。下げ潮、上げ潮の σT の差が、干潮とほぼ同じ値である (Fig. 6b) ことから、満潮に近い時には密度成層が弱まると判断される。

8 月と 9 月の小潮における密度の鉛直分布は、熊本県の水深 10cm 間隔の水温と塩分の値から、1m 毎に算出し、 σT で示した (Fig. 7)。

8 月と 9 月の σT は、6 月の値より 1 以上低い。さらに、同じ小潮でも、水塊の鉛直分布が異なる。8 月 29 日は、水深 13m を境に、強い層状構造を示し、 σT は境界より上では水深とともに 17 から 21 まで増加するが、境界より下では 21.2 でほぼ一定である (Fig. 7a)。9 月 14 日は、鉛直変化に乏しく、表層の 20.6 から、水深とともに増加して、最深部では、21.5 に達する (Fig. 7b)。8 月 29 日は 2 層構造

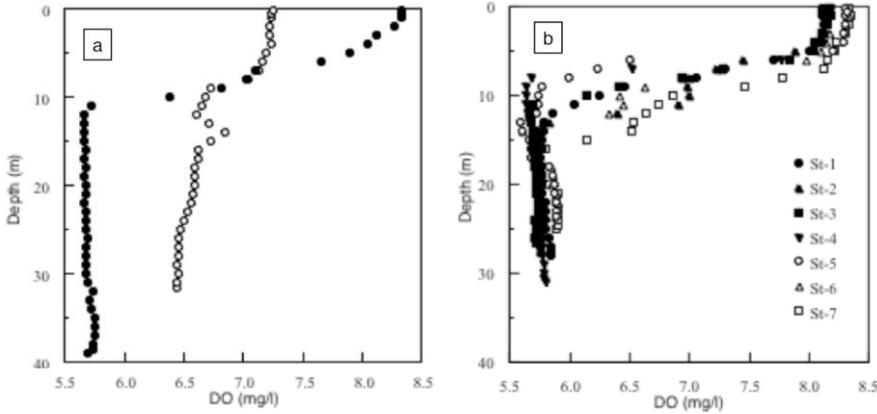


Fig. 8 Profile of dissolved oxygen (mg/l) in the spring tide (22 June, 2017). (a) White circle: high tide at St-R, black circle: low tide at St-D. (b) Open mark: flood tide, close mark: ebb tide.

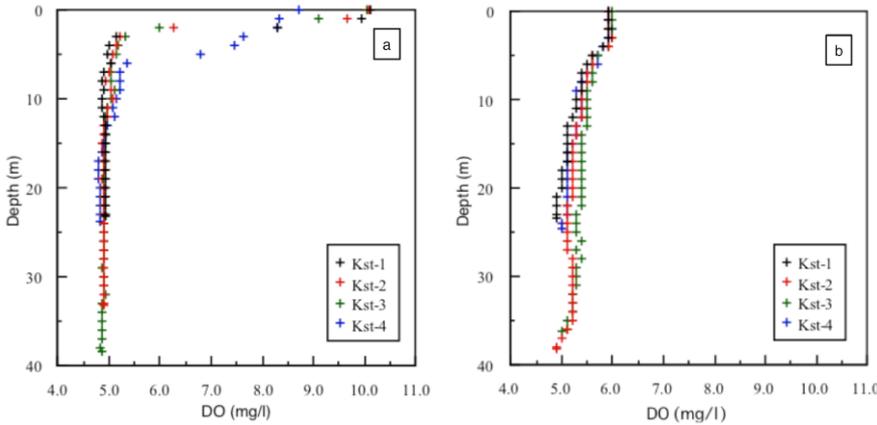


Fig. 9 Profile of dissolved oxygen (mg/l) in the neap tide at 29 August, 2017 (a) and 14 September, 2017 (b) based on the data provided from Kumamoto prefecture.

が、9月14日は鉛直混合が生じていたと判断される。

表層での密度は、河川からの淡水流入量に影響される。そこで、調査日より4日前からの24時間流量 ($\text{m}^3/\text{秒}$) を、有明海・八代海流入一級河川水質等データをもとに検討した (菊池川は欠測のため除外した)。

8月29日に関して、白川では河口から12.1kmにある代継橋で、102.55 (25日)、62.57 (26日)、35.6 (27日)、27.43 (28日)であった。緑川では河口から13.4kmにある城南で、221.95 (25日)、94.01 (26日)、56.17 (27日)、40.13 (28日)であった。同年の8月の24時間平均流量が、白川は21.82、緑川が36.09であったことから、この期間は、河川から淡水の流入が多かったと判断される。

一方、9月14日に関して、白川では河口から12.1kmにある代継橋で、20.29 (10日)、17.87 (11日)、16.92 (12日)、16.48 (13日)であった。緑川では、27.58 (10日)、24.57 (11日)、24.48 (12日)、23.13 (13日)であった。同年の9月の24時間平均流量は、白川が23.22、緑川が34.52であった。このことから、この期間は、河川から流入した淡水の影響が少なかったと判断される。

酸素濃度：大潮では、干潮時に、水深約10mを境に、上層では $8.0\text{mg/L} \sim 8.3\text{mg/L}$ 、下層では $5.8\text{mg/L} \sim 6.0\text{mg/L}$ であり、上層と下層で大きく異なる (Fig. 8)。値が顕著に変わる水深は、密度が変化する水深と一致している。一方、満潮時には、水深10m付近での変化は小さく、海面から海底に向

かって、 7.3mg/L から 6.5mg/L まで、ほぼ単調に減少する。小潮でも、水深5mを境に強い密度成層が形成された8月29日は、表層から水深5mまでは 6mg/L 以上であったが、水深6m以下ではほぼ一定 (最深部でも 4.85mg/L) であった (Fig. 9)。密度成層が形成されなかった9月14日は、濃度に明瞭な変曲点はなく、表層で約 6mg/L 、単調に減少して最深部で 4.92mg/L であった。

浮遊物質量：満潮 (St-R)、干潮 (St-D)、および干潮の前後に Line-1 に沿う7点 (St-1~St-7) における浮遊物質量の鉛直分布は、懸濁している不溶性物質が、海底直上で上昇すること、海底直上でも下げ潮で低く、上げ潮で高いことを示していた (Fig. 10)。採水による懸濁物濃度も、干潮時は、中層で 2mg/L 、底層で 3mg/L であった。しかし、満潮時は、中層で 1mg/L 、底層で 39mg/L である。これらのことは、上げ潮の時に、底層で不溶性粒子が懸濁していることを示している。

底層の海水に懸濁している不溶性粒子の粒径と組成を、ミリポアフィルター上の残渣で解析した。満潮時には、不溶性粒子が懸濁し、その約4%は砂 (直径 0.1mm 以上) であった (Fig. 11)。この粒子には、ウニおよび二枚貝の殻の破片も含まれていた。これらは、上げ潮で、堆積物が削剥されて、懸濁することを示している。

熊本県環境立県推進課の資料でも、海底から3mまでで、窪地および周辺のいずれにおいても、濁度の値が急増して

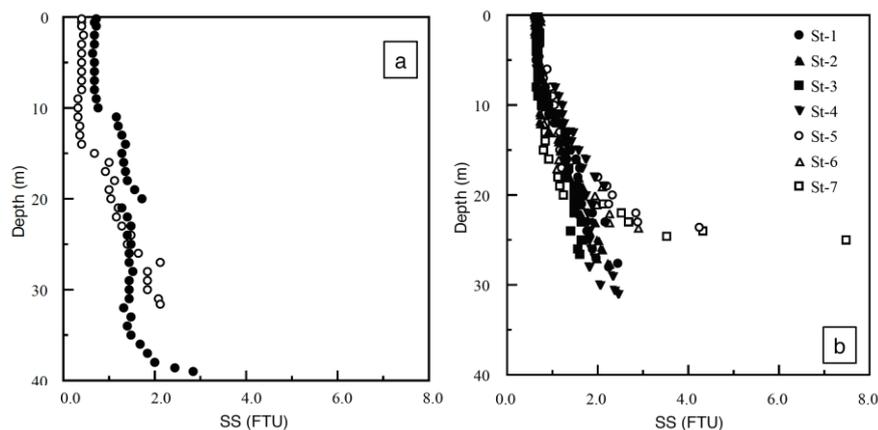


Fig. 10 Diameter distribution of the suspending particle included in bottom water in the spring tide (22 June, 2017). (a) White circle: high tide at St-R, black circle: low tide at St-D. (b) Open mark: flood tide, close mark: ebb tide.

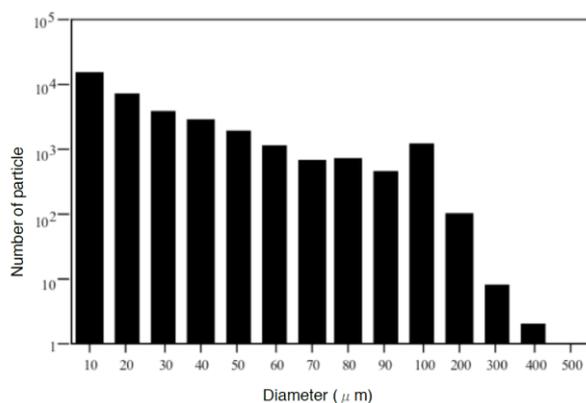


Fig. 11 Diameter distribution of the suspending particle included in bottom water obtained at St-R.

いる。これらのことから、大潮、小潮に関係なく、堆積物が削剥されて海底直上の海水に懸濁粒子として含まれていることが推定される。

流向・流速の特徴

測線 LN1：この測線は、地形変化から、潮汐による堆積物の削剥・移動・再堆積が予想され、採水と濁度測定から海底直上の碎屑物の浮遊が認められた場所を中心に、潮汐流の向きに合わせて設定した (Fig. 12)。

下げ潮では、流向は概ね同じであり、水平方向への偏向もない。窪地では、下層 (水深 20-30m) に、弱い下降流と上昇流 (流速 6cm/秒以下) が生じている (Fig. 12,L1-a)。

上げ潮では、窪地の南縁で表層から水深 32m まで達する下降流 (最大流速 20cm/秒以上) と、北縁で表層まで達する上昇流 (最大流速 16cm/秒以上) が存在する。さらに、窪地内で、この流れは、下層では西に 30cm/秒以上、上層では東に 10cm/秒以上、それぞれ偏向している (Fig. 12,L1-b)。

これらのことから、上げ潮と下げ潮で、流速の鉛直分布が大きく異なり、堆積物の削剥・移動・再堆積に上げ潮が関与していることが明らかになった。

測線 LN2：「レ」の字形窪地を構成する南北性窪地で、潮汐によって、泥粒子および懸濁性有機物が堆積せず、堆積しても懸濁・再移動することを検討した。

下げ潮では、流向は概ね同じであるが、窪地に限れば、

南斜面上の水深 20-30m には上昇流 (流速 8cm/秒以上) が生じている (Fig. 12, L2-a)。

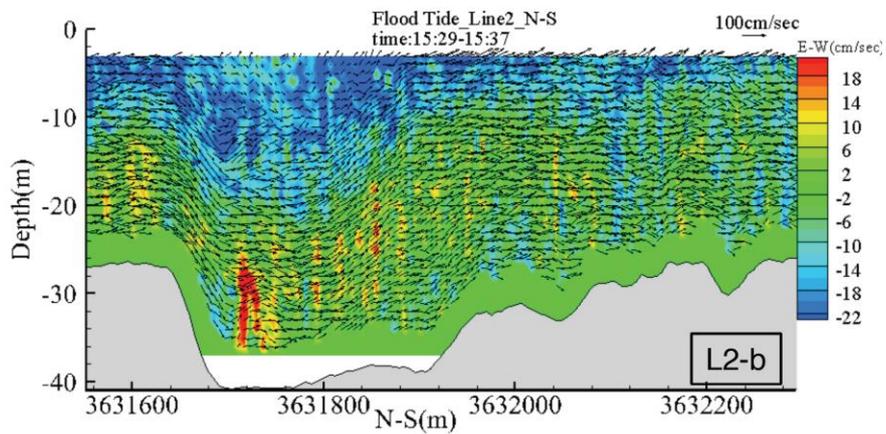
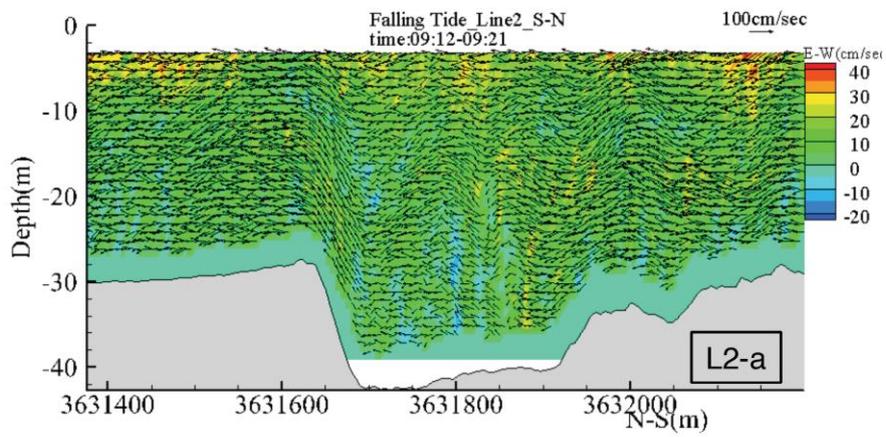
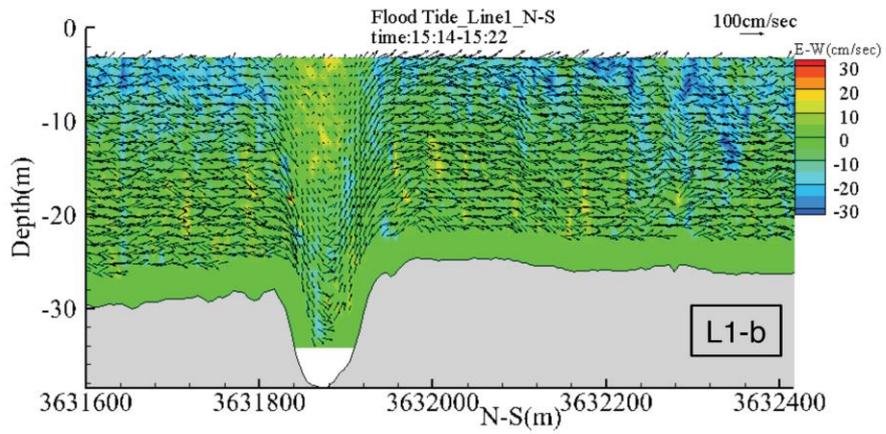
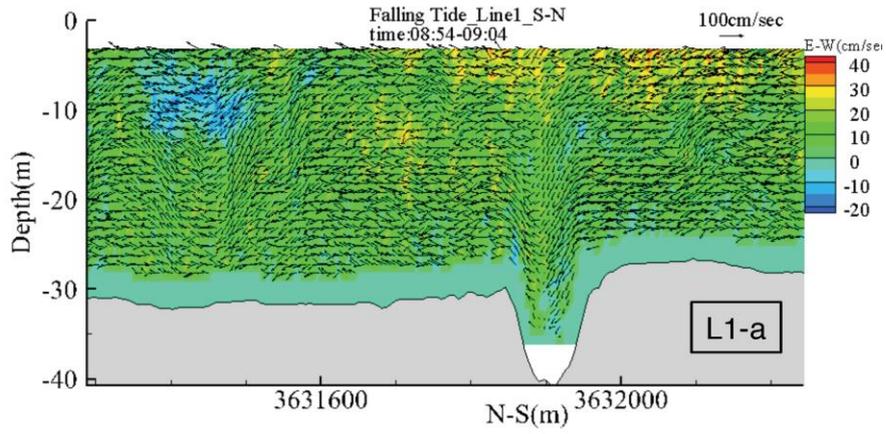
上げ潮では、下層では、窪地の南斜面以南は海底から 20m まで、北斜面以北は海面まで、平行に流れる。窪地内では、南斜面上で最速 20cm/秒に達する下降流が、北斜面上で 4cm/秒以上の上昇流が認められた。下層の流れの水平成分は、東に 10cm/秒以上である。一方、窪地内の上層では、鉛直流は停滞しているが、水平成分は西に 20cm/秒以上である (Fig. 12, L2-b)。

測線 LN3：「レ」の字形窪地を構成する東西性窪地で、東端での堆積物の削剥・移動・再堆積を検討した。なお、船舶誘導用ソフト (Hypack) が停止したため、座標 637100m から 637200m までを重複するようにして再測定し、両図を並べて表示 (一致点を矢印で指示) した。

下げ潮では、流向は海底地形に概ね平行であるが、窪地に限れば、下層 (水深 20-30m) の流れの水平成分は流速 30cm 以上/秒であり、2つの窪地の間 (水深 15-25m) では上昇流 (8cm/秒以上) が生じている (図 12, L3-a)。

窪地中央以東 (637200 以東) では、東向きの上昇流 (10cm/秒以上) が卓越する (Fig. 12,L3-b)。特に、Fig. 2 の小規模なリッジの直上にあたる、東縁 (637300m) では、14cm/秒に達する上昇流があり、その流れの水平成分は北向きで最大 70cm/秒に達する。

窪地の西端 (636900mE) 斜面上には下降流 (12cm/秒以



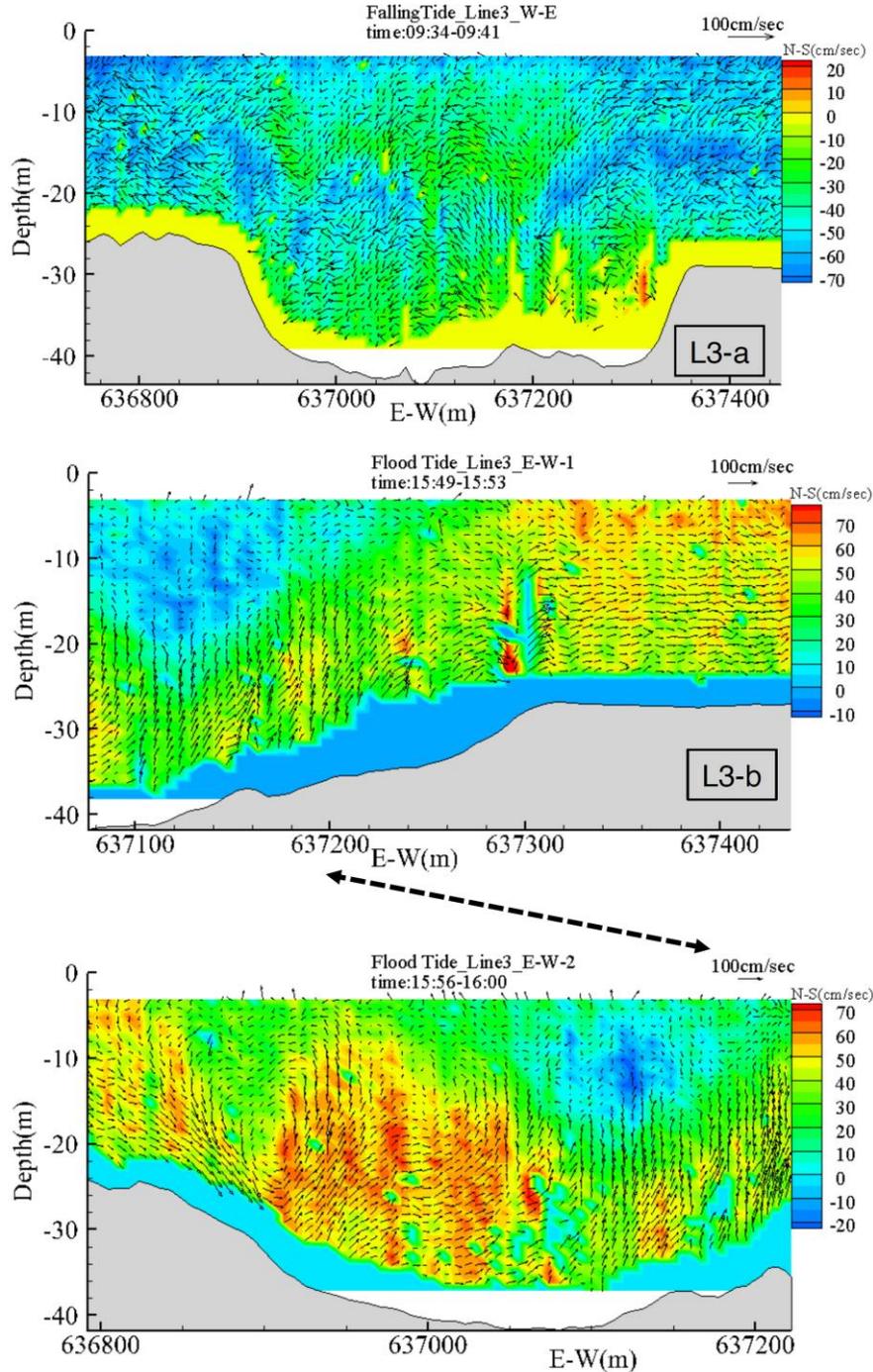


Fig. 12 Cross section of tidal current direction and velocity along the traverse line. (L1-a): falling tide, (L1-b): flood tide along Line 1, (L2-b): falling tide, (L2-b): flood tide along Line 2, and (L3-a): falling tide, (L3-b): flood tide along Line 3.

上)が、窪地中央には低速だが水深10mまで達する上昇流が分布する。ベクトルの分布から、636900mEから637200mEにかけて、海底から海面までに広がる鉛直の渦流が生じている。加えて、下層では北向き、上層では南向きの水平成分が卓越する。

潮汐卓越型海域における浚渫窪地の環境

窪地内の酸素濃度の変化と潮汐との関係

本研究の目的の一つは、底層の酸素濃度が極端に低下す

る夏季の小潮時に、高速の潮汐流の影響下にある窪地で、貧酸素水塊が発生するかを確認することであった。

大潮の干潮では、酸素濃度は、密度成層していても、下層(水深約10m以下)で5.8mg/L以上である。満潮では成層は解消され、最深部でも6.5mg/L以上である。

小潮では、成層化しても、下層(水深6m以下)ではほぼ一定であり、最深部でも4.85mg/Lであった。成層していない時は、表層から海底に向かって単調に減少して、最深部で4.92mg/Lであった。この値は、貧酸素水塊の基準であ

る 4.3mg/L (水産用水基準) より高く、夏季の小潮でも貧酸素水塊の発生しないことを示している。

窪地内の流動特性と有機物の堆積との関係

本研究の第 2 の目的は、酸素濃度の著しい低下が生じない原因の把握であった。

窪地の最深部の St-D と別の窪地の Kst-3 で、COD が 6.7mg/g と 7.0 mg/g、硫化物量が 0.07mg/g と 0.03mg/g と、ほぼ同じ値であった。このことから、窪地内であっても、酸素の低下の原因となる有機物がほとんど堆積していないことが示された。

また、窪地最深部 (St-D) と周辺部 (St-R) の堆積物でも、強熱減量は 11%、硫化物量は 0.07mg/g と、差がなかった。このことから、窪地の有機物負荷が高くないと判断され、窪地で貧酸素水塊を発生させるような有機物負荷はないと結論づけることができる。

さらに、潮流の流向・流速は、強い海水の鉛直循環と窪地内の海底での堆積物の懸濁を示していた。

地形変化が最も著しかった場所を通過する測線 (LN1) では、上げ潮において、海面から水深 32m まで達する、南斜面上の下降流、北斜面場での上昇流が発生し、その流速は 20cm/秒以上であった。窪地内部における流れの水平成分を考慮すると、底層の流速は 40cm/秒以上になる。流向と流速から、窪地の南斜面で堆積物の削剥、北斜面での堆積が推定される。これは、海底直上の海水の懸濁物量の増加、懸濁粒子に貝殻やウニ殻の破片が含まれることから支持される。

円錐状の小規模なリッジが存在する、東西性窪地の東端を通過する LN3 でも、強い上昇流が存在する。これらのことから、大潮の上げ潮によって、堆積物表面が削剥されたことが明らかになった。

さらに、小潮でも、窪地内において、海底直上での懸濁物量の増加している。このことから、大潮、小潮に関係なく、海底面の削剥が生じていると推定され、有機物は供給されても堆積せず、たとえ沈積しても懸濁して窪地外に除去されると判断される。

密度の鉛直分布からも、海水の鉛直混合が認められた。大潮では、海水の密度差は、干潮では 1.3 であるが、満潮では 1.0 に低下している。上げ潮での鉛直変化が少なくなることから、鉛直混合が推定される。田中ほか (2004) は、塩分の 3 次元分布から、熊本市沖有明海では低塩分の表層水と高塩分の外海系水に由来する下層水の 2 層構造であるが、満潮では成層が弱まるとしている。調査結果は、田中ほか (2004) の結果を追認するとともに、満潮と干潮での溶存酸素の鉛直分布の違いとも良く一致する。

これらの事実は、高速の底層流によって窪地内に有機物が堆積せず、表層水との鉛直混合によって酸素の著しい低下が防がれることを示唆している。

埋積の環境修復への効果

本研究の第 3 の目的は、速い底層流の影響下にある窪地

で、環境修復に対する埋積の効果の評価である。

長洲町沖合域の北端 (多比良-長洲) において、大潮の潮汐流最強時における平均流速は 30cm/秒である (小松ほか, 2004)。さらに、上げ潮と下げ潮で最大流速の水深が異なり、下げ潮では表層、上げ潮では水深約 10m である (小松ほか, 2003)。南端における本調査の結果と、この報告の内容はよく一致している。このことから、本浚渫域は、全域で類似の流動特性を有すると判断される。

加えて、高速の底層流が堆積物の挙動に影響していることは、堆積物表面の形状にも現れている。本調査地に北接する菊池川河口沖では、リップルが形成されていた (秋元ほか, 2008)。浚渫域北端でも、1979 年にリップルの存在と堆積物の南への移動が報告されている (木下ほか, 1980)。この場所の大潮の最大流速は、水深平均流速で 80cm/秒を超える (安達, 2002)。したがって、潮汐流は堆積物の削剥・懸濁に必要な流速を上回ると判断される。

今回の実測値も、窪地の最深部で、潮汐流によって有機物の堆積を妨げられ、極端な酸素濃度の低下が妨げられている。この窪地での貧酸素水塊の発生が認められないことから、同様に高速の潮汐流の下にある長洲町沖海域の窪地でも貧酸素水塊が発生する可能性は低い。

熊本県では、アサリの漁獲量減少が、窪地で生成される貧酸素水塊が原因との意見がある。しかし、熊本県のアサリ漁場沖での浚渫は 1979 年にはかなり進められており (木下ほか, 1980)、同海域のアサリの最大漁獲量が 1978 年 (関口・石井, 2003) であることと矛盾する。漁獲量の変動は浚渫の進行と無関係であり、漁場沖の窪地が貧酸素水塊の発生源になる可能性も低いことから、この窪地を埋積しても漁獲量の回復は期待できない。アサリの漁獲量の減少の原因については、他の要因を究明した上で対策を講じる必要がある。

さらに、アサリの最盛期であった 1970 年代後半の状態まで環境を回復するには、海底の平坦化では不足であり、原地形に近い大規模なリッジの造成が必要となる。しかし、比較的水深のある海底の平坦化には、技術上の制約 (埋め戻しの材料、経費など) がある (例えば、内藤ほか, 2006)。

高速の潮汐流によって貧酸素状態にならない窪地では、工学的対策を講じなくても問題にならず、放置が最も経済的負担が少ない。

まとめと今後の展望

全国の沿岸-浅海域に残る浚渫窪地が、環境特性を考慮せずに、埋積されている。

小論の目的は、各海域で異なる環境特性に基づいて、費用対効果比を検討することの必要性であった。

小論の結果は、潮汐が卓越し、底層流が速い海域では、海底を平坦化しても効果が限定されることを示唆していた。貧酸素水塊が発生しない窪地まで埋めることは、経済的損失になる。このことは、特定の窪地の埋め戻しの是非に止まらず、人為的改変された環境の修復事業において基礎情報の重要性を示している。

今後、海域に限らず水圏環境の保全・修復における対策を講ずるにあたり、地球科学的手法による環境情報の取得が、一層重要になると考えられる。

謝辞: 小論の概要は、日本地質学会第124年学術大会(2017年愛媛大会)および社会地質学会第27回環境地質学シンポジウムの要旨に基づいている。内容は、要旨で割愛せざるを得なかった情報、熊本県から提供された小潮における環境情報を加えて、大幅に改定されている。

環境地質学シンポジウムの参加者からは有益なご助言を、風岡修氏(千葉県環境研究センター)には小論を投稿する機会をいただいた。匿名の査読者からは、丁寧なコメントを賜り、原稿を改善することができた。

本調査に関わる経費は、熊本大学熊本水循環保全プロジェクト経費および文部科学省特別経費「有明海・八代海の自然環境の再生・創生を目的とする総合的・実践的研究(代表:逸見泰久)」の一部である。

株式会社同仁グローバルには、分析費用の一部をご負担いただいた。

熊本県環境立県推進課には、未公表資料の提供していただいた。熊本県土木部熊本港管理事務所ならびに熊本県沖新漁業協同組合には、港湾施設を利用など多くの便宜を賜った。

これらの方々に、記して感謝する。

引用文献

- 安達貴浩, 2002, 2-4 ADCP による流況観測の結果. (小松利光編) 有明プロジェクト中間報告(その1), 72-92.
- 愛知県, 2011, 三河湾里海再生プログラム. www.pref.aichi.jp/soshiki/mizu/0000045057.htm
- 秋元和實・七山 太・安間 恵・滝川 清, 2008, 音響および底質特性に基づく熊本市沖有明海の海域環境の解析. 海洋開発論文集, 24 巻, 639-644.
- Akimoto, K., Shimasaki, H., Yakita, K., Hokamura, T., Takeuchi, T., Shibata, K., Shibata, M., Nakano, K., Sannoh, K., Yoshizu, K. and Sato, K., 2011, Evaluation of the Natural Recovery in an Artificially Modified Geography. *Proceedings of UT11+SSC11*.
- 秋元和實・矢北孝一・島崎英行・三納正美・柴田成晴, 2017, 潮汐卓越型海域(有明海)における浚渫窪地の環境評価. 第27回環境地質学シンポジウム論文集, 107-112.
- 金子健司・橋口晴穂・宮向智興・今尾和正・和久光靖・石田基雄・鈴木輝明, 2011, 浚渫窪地における底質の極度の悪化と底生生物群集の動態—三河湾の事例—. 水環境学会誌, 34 巻, 47-55.
- 環境省総合環境政策局環境影響評価課環境影響審査室, 2006, 海域における深掘り跡等の埋め戻しに関する考え方(案). 13p.
- 木下泰正・有田正史・小野寺公児・大嶋和雄・松本英二・西村清和・横田節哉, 1980, 有明海および周辺海域の堆積物. 通商産業省工業技術院公害特別研究報告書, 29-67.
- 国土地理院, 1982, 1/2.5 万沿岸海域土地条件図(熊本).
- 小松利光・安達貴浩・金納 聡・矢野真一郎・小橋乃子・藤田和夫, 2003, 有明海における流れと物質輸送に関する現地観測. 海岸工学論文集, 50 巻, 936-940.
- 小松利光・矢野真一郎・齋田倫範・松永信博・鶴崎賢一・徳永貴久・押川英夫・濱田孝二・橋本彰博・武田 誠・朝位孝二・大串浩一郎・多田彰秀・西田修三・千葉 賢・中村武弘・堤裕 昭・西ノ首英之, 2004, 北部有明海における流動・成層構造の大規模現地観測. 海岸工学論文集, 51 巻, 341-345.
- 熊本県, 2013, 有明海・八代海における海砂利採取に関する方針. 4p.
- 熊本県, 2017, 有明海・八代海等の再生に向けた熊本県計画. 32p.
- 熊本県土木部, 1992, 熊本県海域海底砂賦存量報告書. 267p.
- 内藤了二・中村由行・今村 均・佐藤昌宏, 2006, 浚渫跡地の修復に関する施工上の影響と研究開発課題の抽出. 海洋開発論文集, 22 巻, 649-654.
- 中村由行, 2009, 全国の浚渫窪地の現況と三河湾における埋め戻し修復. 水産工学, 46 巻, 229-233.
- 西ノ首英之, 2002, 諫早湾における海砂採取跡の海底地形測定および貧酸素水塊の形成状況. (小松利光編) 有明プロジェクト中間報告(その1), 135-138.
- 大島 巖, 2005, 有明海湾奥部での貧酸素水塊形成要因についての一考察, 海の研究, 14 巻, 459-462.
- 関口秀夫・石井 亮, 2003, 有明海の環境異変: 有明海のアサリ漁獲量激減の原因について. 海の研究, 12 巻, 21-36.
- 水産庁, 2005, 熊本県アサリ資源回復計画. www.jfa.maff.go.jp/j/suisin/s_keikaku/pdf/kumamoto_asari.pdf.
- 水産庁, 2013, 二枚貝漁場における問題点と環境改善技術. 25p. www.jfa.maff.go.jp/j/kenkyu/pdf/pdf/3-1.pdf.
- 武田和也・石田基雄, 2007, 三河湾における苦潮によるアサリ大量死と浚渫窪地内部の貧酸素化の状況. 海洋理工学会誌, 12 巻, 51-58.
- 滝川 清・秋元和實・平城兼寿・田中正和・西村啓介・島崎英行・渡辺 枢, 2005a, 有明海熊本沖の水塊構造と表層堆積物分布特性. 海岸工学論文集, 52 巻, 956-960.
- 滝川 清・秋元和實・吉武弘之・渡辺 枢, 2005b, 有明海大浦沖における海底攪拌の効果. 海岸工学論文集, 52 巻, 1141-1145.
- 田中正和・島崎英行・長谷義隆・松田博貴・小松俊文・小田真優子・大久保功史・平城兼寿・秋元和實, 2004, 有明海の春季の水塊分布と海底環境との関係—2003年5月の海洋調査と河口域の環境資料に基づく解析—. 熊本大学理学部地球科学科紀要, 18 巻, 1-9.
- 樋田 操・松永信博・宗方鉄生・小松利光, 1991, 九州における海砂採取の現状と沿岸環境に及ぼす影響調査. 海岸工学論文集, 38 巻, 916-920.