

# 有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の形成特性

## Characteristics of hypoxia in the inner western area of Ariake Bay

徳永貴久<sup>1</sup>・児玉真史<sup>2</sup>・木元克則<sup>3</sup>・柴原芳一<sup>4</sup>

Takahisa TOKUNAGA, Masashi KODAMA, Katsunori KIMOTO and Yoshikazu SHIBAHARA

To investigate and verify the mechanism of occurrence of hypoxia in the waters of the inner western part of Ariake Bay, field observations were performed in summer (July to September) 2007. During the observation period, bottom DO decreased at neap tides, especially at the shallow station, and recovered to higher levels during spring tides. The hypoxic waters in the inner western part of Ariake Bay were essentially generated at two points: around the subtidal (between stations T1 and 14) and in the deeper offshore zone (around station P6). In some cases, hypoxic waters were found from stations T1 to P6 along the submarine valley of the Shiota River, suggesting that the two masses of hypoxia generated individually were unified because of long-term stratification and massive oxygen consumption by SPM and sediments.

### 1. はじめに

貧酸素水塊の形成は、有明海等の閉鎖性海域において解決すべき環境問題の一つである。有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の形成には、密度成層の形成による酸素供給量の減少および懸濁物質を含む底層水による酸素消費過程が重要な要因であることが指摘されている。速水(2007)は、有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊には2種類の形成機構、すなわち、(1)出水型および(2)沖合域からの低水温・高塩分水の底層貫入型があり、有機懸濁物質が沈降・再懸濁を繰り返しながら湾奥に輸送される過程において酸素消費を行っていることを指摘している。山口・速水(2009)は、河川流量履歴と貧酸素化の関係を示し、浅海定線調査によって捉えられた大潮期の貧酸素化のほとんどが継続的な出水にともなって生じることを示した。しかしながら、貧酸素水塊の形成が著しい干潟縁辺域と沖合域の関係等、細かな時空間スケールでの動態や酸素消費過程との関係については十分把握されていない。本研究は、詳細な現地観測にもとづいて有明海湾奥西部海域の貧酸素水塊の形成特性を明らかにすることを目的とする。なお、本研究は環境省請負調査「平成19年度有明海貧酸素水塊発生機構実証調査」および水産庁事業「平成19年度貧酸素水塊漁業被害防止対策」の一環として行われた。

### 2. 観測概要

2007年6月中旬から10月上旬まで有明海湾奥西部海域のT1, 14, P6において海面下0.5m (P6は海面下1m)に水温・塩分計(JFEアレック, ACT-HR)およびP6にクロロフィル・濁度計(JFEアレック, ACLW-CMP)を係留した。また、海底上20cmに多項目水質計(Hydrolab, MiniSonde5)を設置し、表層と底層の水質の連続観測を行った(図-1)。また、6月下旬から9月下旬まで約1週間毎に図-1に示すT1とP6を結ぶ測線上の6点で、多項目水質計(JFEアレック, AAQ-1183H)を用いて10cm間隔で水質を計測し、鉛直断面観測を行った。断面観測時に海面下1m, 中層, 底泥直上(B+0.2m)にて採水を行い、塩分, DO濃度, クロロフィルa(Chl.a)を分析し、連続観測および鉛直断面観測で得られたデータを校正した。塩分は懸濁物を除去した後、サリノメータ(YEO-KAL, 601MKIV)で分析した。DO濃度は自動分析装置(Metrohm, 726)を用いてウィンクラー法により算出された。Chl.aは、N, N-ジメチルホルムアミド(DMF)抽出を行い、蛍光光度計(TURNER Designs, 10-AU)を用いて測定を行った。さらに、断面観測時にT1, 14, P6地点において直径5cmのコアサンプルを潜水採取し、ORPセンサー(TOA DKK, RM-20P)を用いて直ちに底泥表層1cmの酸化還元電位を計測した。計測された値は、泥温によって標準水素電極の値に換算された。なお、本研究では貧酸素水塊を3mg/l以下の水塊と定義した。

### 3. 結果

図-2～図-4に断面観測で得られたT1～P6を結ぶ観測ライン上の大潮期および小潮期における貧酸素水塊の発生パターンを示す。小潮期にあたる7月24日は、水深が4m程度の干潟縁辺域(T1～14)から沖合域(14～P6)

1 正会員 博(工) (独法) 水産総合研究センター中央水産研究所海洋生産部  
2 正会員 博(工) (独法) 水産総合研究センター中央水産研究所海洋生産部  
3 (独法) 水産総合研究センター西海区水産研究所有明海・八代海漁場環境研究センター  
4 (株) 西村商会

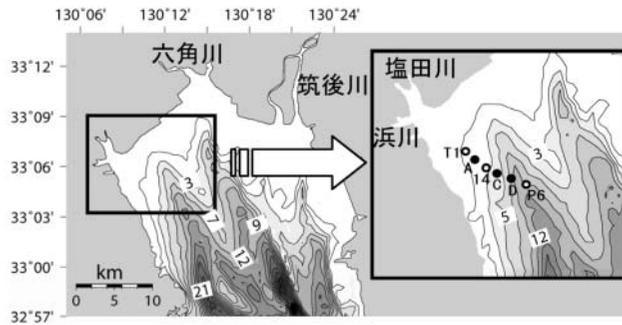


図-1 有明海奥部西部海域における断面観測地点 (●および○) と連続観測地点 (○)。図中の数字は最低低潮面 (m) を表す。

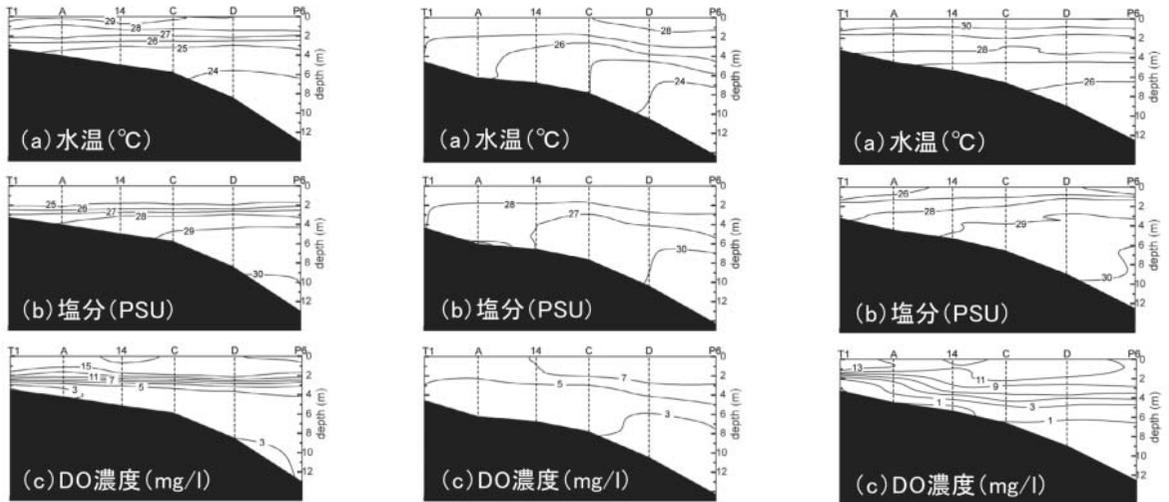


図-2 7/24 (若潮) の (a) 水温, (b) 塩分, (c) DO濃度の鉛直断面分布。

図-3 8/1 (中潮) の (a) 水温, (b) 塩分, (c) DO濃度の鉛直断面分布。

図-4 8/23 (若潮) の (a) 水温, (b) 塩分, (c) DO濃度の鉛直断面分布。

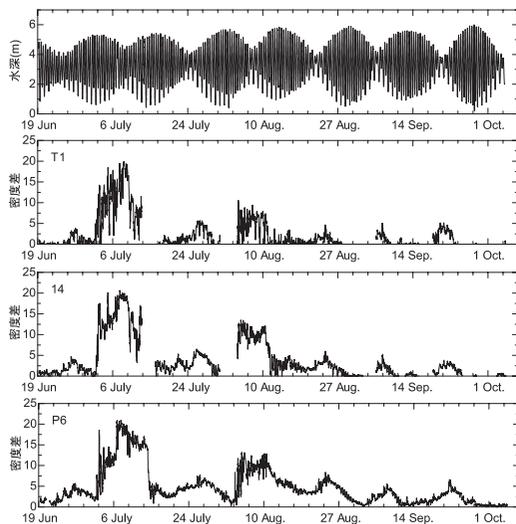


図-5 T1における水深とT1, 14, P6における表層(水表面下0.5m)と底層(底泥直上0.2m)の密度差 ( $\sigma_t$ ) の時間変化。(2007年6月19日～10月3日)。

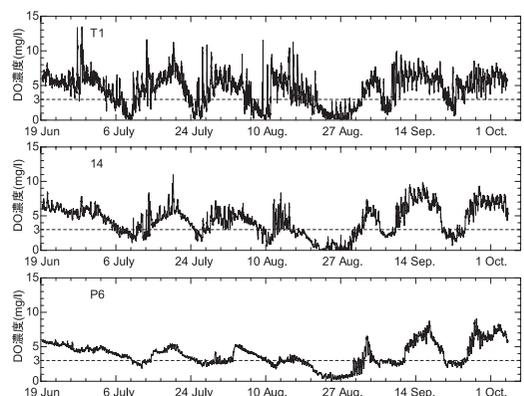


図-6 底泥直上0.2mのDO濃度の時間変化(2007年6月19日～10月3日)。

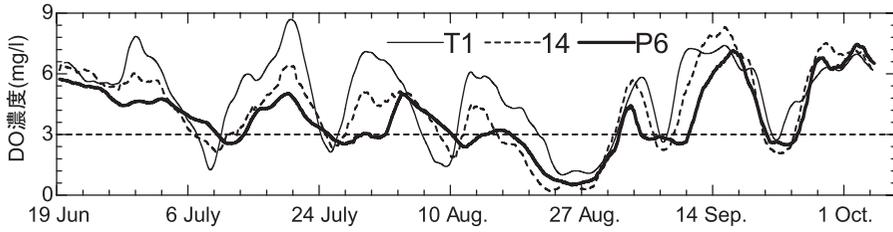


図-7 底泥直上0.2mのDO濃度の25時間移動平均。

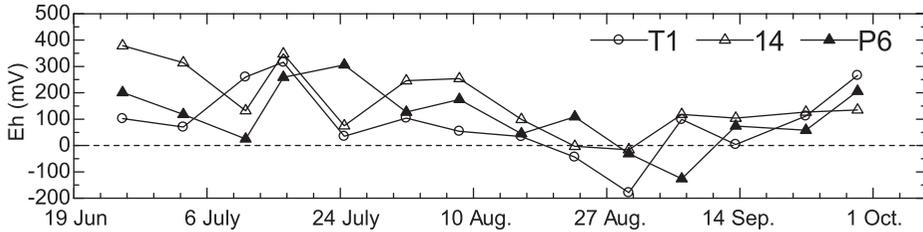


図-8 底泥表層の酸化還元電位 (Eh) の時間変化。

表-1 DO濃度の低下速度，回復濃度，最低DO濃度，貧酸素状態の継続時間。( ) は平均値を表す。

地点	DO濃度の低下速度 (mg/l/day)	回復濃度 (mg/l)	最低DO濃度 (mg/l)	継続時間 (day)
T1	0.61~1.90 (1.14)	5.9~8.7 (7.1)	0.5~2.5 (1.5)	0.6~9.4 (3.2)
14	0.56~2.75 (1.10)	4.4~8.3 (6.2)	0.1~2.5 (1.7)	0.6~15.2 (4.4)
P6	0.34~1.86 (0.90)	3.2~7.2 (5.3)	0.6~2.9 (2.2)	1.1~15.6 (5.2)

まで成層が形成されており，T1～Aにかけての干潟縁辺域と沖合域のD点付近の2カ所でDO濃度が3mg/l以下の貧酸素水塊が形成されていた。大潮期である8月1日は干潟縁辺域の成層・貧酸素水塊は解消し，沖合域のみで貧酸素水塊が形成されていた。8月23日は小潮期で，密度成層は7月24日より弱かったが，全域的に貧酸素水塊が形成された。図-5，図-6にT1，14，P6における表層と底層の密度差および底泥直上0.2mのDO濃度の時系列変動を示す。いずれの地点においても基本的に小潮期に密度差が大きくなり大潮期に小さくなる変動を繰り返していることがわかる。7月上旬と8月上旬の小潮期には特に密度差が大きくなっていた。8月中旬以降，T1では密度差が小さくなっているものの，14およびP6で8月下旬まで密度差が連続的に観測された。いずれの地点においても小潮—大潮期にDO濃度が上昇し，大潮—小潮期に低下する変動を繰り返した。また，半日スケールでの変動幅，すなわち干潮と満潮の差はT1が最も大きく，P6は最も小さかった。半日スケールの変動成分を除去するために，図-7に底泥直上0.2mのDO濃度の25時間移動平均した結果を示す。いずれの地点においても大潮—小潮周期での変動を示しながら，7月から8月下旬にかけて徐々に低下して最低値を記録した後，10月にかけて回復する長期的な変化が見られた。図-8に底泥表層1cmの酸化還元電位 (Eh) の時間変化を示す。酸化還元電位は6

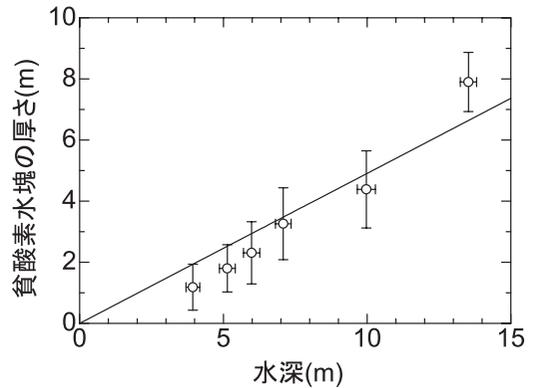


図-9 水深と貧酸素水塊の厚さの関係。Error Barは標準誤差を表す。

月下旬から低下傾向にあり，8月下旬ではいずれの地点も0mVを下回る還元的な状態にあった。その後は上昇傾向にあり，10月上旬には+200mV程度の好氣的な値を示した。この長期的な変動パターンは，DO濃度の長期変動(図-7)と類似していた。表-1に図-7から見積もられた日平均のDO濃度の低下速度，小潮期の最低DO濃度(貧酸素水塊の強度)，回復濃度，貧酸素化から回復までの時間(貧酸素状態の継続時間)を示す。日平均のDO濃度の低下速度は，大潮の最大値から小潮の最小値までを線形近似して算出した。また，本研究では貧酸素水塊

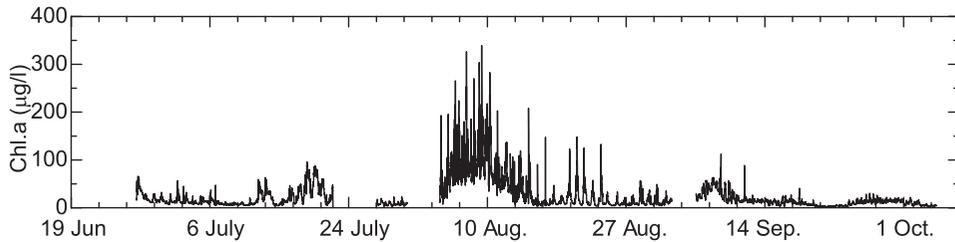


図-10 P6の水面下1mにおけるChl.aの時間変動。

を3mg/l以下の水塊と定義し、貧酸素水塊の強度、貧酸素状態の継続時間を算出した。干潟縁辺域 (T1, 14) では、沖合域 (P6) に比べてDO濃度の低下速度や小潮から大潮期に向かっでの回復濃度が大きかった。一方、沖合域ではDO濃度の低下速度が小さく、DO濃度の回復も小さくなっていることがわかる。小潮期の最低DO濃度は、干潟縁辺域が低くなる傾向が見られた。逆に、継続時間は沖合域で大きくなる傾向にあった。図-9に水深と貧酸素水塊の厚さの関係を示す。貧酸素水塊の厚さは、各観測地点におけるDO濃度の鉛直分布を用いてDO濃度が3mg/l以下になる水塊の海底面からの高さを読み取り算出された。T1では1m程度で最も小さく、P6では8m程度の厚さを持つことがわかる (いずれも全観測値の平均値)。また、貧酸素水塊の厚さは、水深が大きくなるにつれ大きくなることわかる ( $r^2=0.81$ )。

#### 4. 考察

貧酸素水塊の形成において重要な役割を果たす密度成層の動態は、潮汐周期や水深によって大きく変化する。郡山ら (2007) は、1972年～2000年の浅海定線調査データを用いて、2ボックスモデルによるDO濃度の解析を行った。その結果、貧酸素水塊の形成は、主に底層での生物化学的酸素消費量が鉛直拡散による表層から底層へのDO供給量より多いことに起因することを明らかにしている。干潟縁辺域では、小潮期に密度成層が発達し、大潮期に密度差が小さくなる変動を繰り返し、貧酸素水塊の形成・消滅も密度成層と対応した変動を繰り返した。これは、水深が小さく密度躍層以下の底層厚さが小さいためと考えられる (速水, 2007)。一方、沖合域については、大潮-小潮周期で密度差は変動するものの、大潮期でも完全に密度成層が解消していないため、DO濃度の回復も十分に起こらず、干潟縁辺域に比べ貧酸素状態が長く継続するものと考えられる (山口・速水, 2009)。また、半日周期のDO濃度の変動幅が干潟縁辺域に比べ小さくなっていることから、潮汐流程スケールの貧酸素水塊が形成されると考えられる。同時期の速水ら (2008) の観測結果においても、低水温・高塩分水のフロントが小潮期に干潟域にまで進入し、大潮期においても湾奥部

にあることを報告している。

小潮期の8月23日の、密度成層は、同じ小潮期の7月24日より弱いものの、全域的に貧酸素水塊が形成された (図-4)。このような全域的な貧酸素化は近年恒常的に観測されている深刻な現象である。8月10日以降、大潮に向かって干潟縁辺域では密度成層が解消され (図-5)、DO濃度が増加している (図-7)。一方、沖合域では大きなDO濃度の回復は見られないものの貧酸素状態にはない。大潮から小潮に向かって、14が最も早く貧酸素化し、その後P6, T1の順で貧酸素化している。したがって、14とP6付近で形成された貧酸素水塊は拡大しながら一体化し、小潮期に向かって徐々に底層フロントがT1に貫入することによってT1も貧酸素化したものと考えられる。ただし、観測前の8月上旬～中旬に300µg/lを超える極めて高濃度のChl.a濃度が観測されている (図-10)。同時期に *Skeletonema costatum* (最大細胞数6,860cells/ml) および *Chattonella* spp. (最大細胞数35,150cells/ml) という極めて高密度の複合種赤潮が観測されていることから (水産庁九州漁業調整事務所, 2008)、Chl.a濃度の値はこれを捉えたものと考えられる。8月23日の全域的な貧酸素水塊の形成にはこの赤潮の影響も大きいと推察されるが、その影響を定量的に明らかにするためには更に詳細な検討が必要である。

有明海奥部西部海域の貧酸素水塊は、基本的に干潟縁辺域と沖合域で形成する場合があることから、それぞれの酸素消費の特性と貧酸素水塊の形成特性との関係を明らかにすることは重要である。児玉ら (2009) は、チャンパーを用いた現場実験によって見積もられた底泥の酸素消費速度と底層水の酸素消費速度を比較し、全酸素消費に対する寄与率は底層水の寄与が56～87%と支配的であることが明らかにした。速水ら (2007) はエスチャリ-循環によって湾奥部へ有機物が沈降・再懸濁を繰り返しながら輸送され、干潟縁辺域に堆積することを明らかにしている。したがって、干潟縁辺域 (T1, 14) の懸濁有機物濃度 (POC) が高く (児玉ら, 2009)、沖合に比べ酸素消費ポテンシャルは高くなっているものと推察される。また干潟縁辺域は水深 (底層の厚さ) が小さい。したがって、沖合域に比べ大潮から小潮にかけてのDO

濃度の低下速度が大きく、貧酸素水塊の厚さや最低DO濃度が小さくなるものと考えられる。沖合域の底泥の消費速度についてはデータが限られているものの、底泥中の有機物の存在量（岡村ら，2006）を考えると酸素消費ポテンシャルは低く、水深（底層の厚さ）も大きいため、底泥による酸素消費の寄与やDO濃度の低下速度が小さいと推察される。

速水ら（2007）は、有明海湾奥西部海域でのDO濃度の低下速度を0.8～1.6mg/l/dayと見積もっており、一次生産の影響を含んだ見かけの酸素消費速度としては国内の内湾で最高レベルの値であることを報告している。観測期間中のDO濃度の低下速度は大きく変動しており、T1, 14, P6の最大値はそれぞれ1.90, 2.75, 1.69mg/l/day（表-1）と見積もられ、速水ら（2007）の値よりもさらに大きな値を示した。また、8月中旬～下旬にかけては貧酸素化した後、すなわち有機物の生物学的な分解（DOの消費）活性が低下したと考えられる後もDO濃度は減少し続けており、貧酸素状態での酸素消費を引き起こす主要因が生物学的酸素消費から化学的酸素消費（還元物質の酸化）に変化している可能性がある。特に、8月下旬には底泥表層のEhが0mV以下になっていることから、再懸濁された還元物質による酸素消費（徳永ら，2009）が重要な役割を果たしていると考えられるがその詳細は不明であり、今後酸素消費過程を明らかにするためには更なる検討が必要であると思われる。

## 5. おわりに

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 小潮期は、水深が4m以下の干潟縁辺域（T1, 14）から沖合域（P6）まで成層が形成されており、大潮期には干潟縁辺域の成層は解消し、沖合域のみ成層が形成されていた。有明海湾奥西部海域では密度成層の形成・消滅に対応して干潟縁辺域と沖合域の2ヶ所で貧酸素水塊が形成する場合と沖合域のみで形成する場合があることが明らかになった。
- 2) 全域的な貧酸素化は近年恒常的に観測されている深刻な現象であるが、8月上旬からの成層の長期形成や赤潮による大量の有機物の供給によって、(1)のように個別に形成された貧酸素水塊が一体化した結果であると考えられた。
- 3) 干潟縁辺域では、極めて高い酸素消費ポテンシャルによって短時間で貧酸素化する。また、沖合域

での貧酸素化は緩やかであるものの、大潮期の成層の解消が不十分であればDO濃度の回復は小さく、長時間貧酸素状態が継続することが明らかとなった。

- 4) 8月中旬～下旬にかけては貧酸素化した後、すなわち有機物の生物学的な分解（DOの消費）活性が低下したと考えられる後もDO濃度は減少し続けており、8月下旬には底泥のEhが0mV以下になっていることから、酸素消費を引き起こす主要因が生物学的酸素消費から化学的酸素消費に変化している可能性がある。

今後は、貧酸素水塊の形成に関わる3次元的な河川水流入・流出過程、気象条件、有機物の生産・輸送過程（起源推定）との関係、還元物質の動態、現場における化学的酸素消費の寄与等を明らかにする必要があると思われる。

**謝辞：**本研究を行うにあたり、独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所物質循環研究室山田圭子氏には多大なる協力を受けた。ここに記し感謝の意を表す。

## 参考文献

- 岡村和磨・田中勝久・木元克則・清本容子（2006）：有明海と諫早湾における表層堆積物中の有機物の分布と有機炭素安定同位体比。海の研究，第15巻，第2号，pp. 191-200。
- 郡山益実・瀬口昌洋・石谷哲寛・加藤 治（2007）：有明海奥部西岸域における貧酸素水塊発生時の鉛直拡散係数及び酸素消費速度について，水工学論文集，第51巻，pp. 1463 - 1468。
- 児玉真史・徳永貴久・木元克則・柴原芳一（2009）：夏季の有明海奥部における基礎生産速度と有機懸濁物質の分解特性，海岸工学論文集，第56巻（印刷中）。
- 水産庁九州漁業調整事務所（2008）：平成19年度九州海域の赤潮，pp. 31。
- 徳永貴久・磯野正典・松永信博（2009）：有明海泥質堆積物の再懸濁時における酸素消費 一室内実験による検討一，土木学会論文集（印刷中）。
- 速水祐一（2007）：有明海奥部の貧酸素水塊一形成機構と長期変動一，月刊海洋，39，pp. 22-28。
- 速水祐一・山口創一・真鍋智昭・濱田孝治・槻（加）玲美・吉野健児・大串浩一郎・平川隆一・万田敦昌・経塚雄策（2008）：有明海奥部における物質輸送と低次生態系の動態について一プロジェクト5年間の中間報告一，佐賀大学有明海総合研究プロジェクト成果報告集，第4巻，pp. 59-68。
- 山口創一・速水祐一（2009）：有明海奥部における出水後の低塩分水塊の挙動およびその水質への影響，沿岸海洋研究，第46巻，第2号，pp. 161-173。