

有明海における水質変動の支配要因

鯉 淵 幸 生*・佐々木 淳**・有田 正 光***・磯 部 雅 彦****

有明海では 1980 年頃から赤潮の発生が認められるようになり, 近年では発生時期および範囲が拡大し, 2000 年のノリ不作を招く等, 深刻な問題となりつつある。最近の観測では, 以前は見られなかった底層の貧酸素化が認められ, 二枚貝をはじめとする底生生物への影響が懸念されている。しかし連続観測の不足から, 有明海における富栄養現象の実体には不明な点が多い。そこで本研究では多項目水質の長期連続観測を実施し, 過去 2 年間に発生した赤潮や貧酸素化の過程を把握し, 水質変動の支配要因を明らかにした。諫早湾の水質には, 筑後川をはじめとする湾外からの淡水流入が調整池からの排水と同様に大きな影響を与えている。

1. はじめに

有明海では, 1980 年頃から赤潮の発生が報告されるようになり, その後, 発生期間と範囲が拡大し, 2000 年にはノリ不作を引き起こすに至る等, 深刻な社会問題となりつつある。赤潮の発生は底層水の貧酸素化を招き, 湾内の生態系にも悪影響を与えるため湾内の水質を考える上できわめて重要である。最近の調査によれば諫早湾湾口部で赤潮や貧酸素水塊が発生しやすいことなどが確認された(鯉淵ら, 2002)。この原因は諫早湾湾奥部に建設された潮受け堤防により潮流が減少すると共に, 干拓地からの栄養塩負荷量が増加したことにあるとする指摘もあるものの(村上ら, 2001), これまでは断片的な現地データしかなく, 有明海における水質悪化現象の実態には不明な点が多い(滝川ら, 2002)。そこで本研究では著者らが過去 2 年間に渡って実施した水質の連続観測結果や九州農政局諫早干拓事務所によって行われた様々な観測結果を統合することで, 有明海における赤潮発生機構やそれに伴う貧酸素化など一連の水質動態の実像を明らかにすると共に, その支配要因を明らかにすることを目的とする。

2. 観測方法

観測は図-1 に示す諫早湾沖に設置された観測樁 B6 にて, 2001 年 7 月より実施し現在も継続中である。この地点の平均水深は 17 m で, 有明海西側に沿った海底谷の中にある。測定には自記式の水質計を使用し, 海底から樁に立ち上げたワイヤーにセンサーを固定する方法で海底上 0.5 m, 5 m, 10 m において, また浮体を用いて水面下 0.5 m の深度で測定を行った。これら 4 深度での水

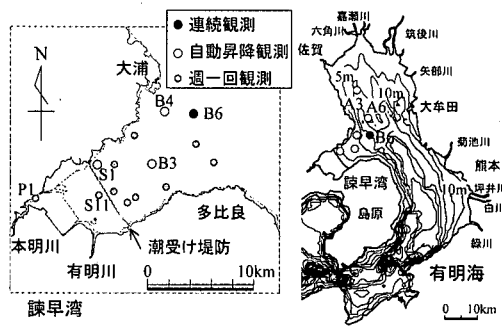


図-1 現地観測地点

温・塩分(MCT-I : 三洋測器)に加え, クロロフィル *a*・濁度(ACL 104-8 M : アレック電子)を水面下 0.5 m で, 溶存酸素濃度(Compact-DOW : アレック電子)を水面下 0.5 m 及び海底上 0.5 m において, いずれも測定間隔 10 分で計測した。

同時に, 2002 年 6 月末からは諫早湾内の 3 地点(S1, B3, B4)において, 九州農政局諫早干拓事務所(2003)による自動昇降装置を用いた観測が実施されており, これと併せることで合計 4 地点における連続測定が実施されている。さらに同事務所により, 上記の 4 地点を含む諫早湾内の 11 地点, 干拓地内の 2 地点において 1 週間間隔で, 水温, 塩分, 溶存酸素等の鉛直分布が観測されており, 栄養塩(全窒素 : T-N, 全リン T-P, 硝酸 NO₃-N, 亜硝酸 NO₂-N, アンモニア NH₄-N, リン酸態リン PO₄-P)についても表層・底層の 2 層で計測が行われている。さらに植物・動物プランクトン細胞数についても表層水について週一回の頻度で計測されている。これら全ての観測結果を統合することで, 当該海域の水質の時空間変動を詳細に把握することが可能となった。

3. 現地観測結果

(1) 赤潮発生の支配要因

2002 年の夏季における水質と気象の観測結果を図-2 に示す。クロロフィル *a* (図-2, d) は 7 月 3 日から 6 日

* 正 会 員 博(工) 東京大学講師 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻
** 正 会 員 博(工) 横浜国立大学助教授 大学院工学研究科システム創生部門
*** 正 会 員 工 博 東京電機大学教授 理工学研究部建設環境工学科
**** フェロー 工 博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

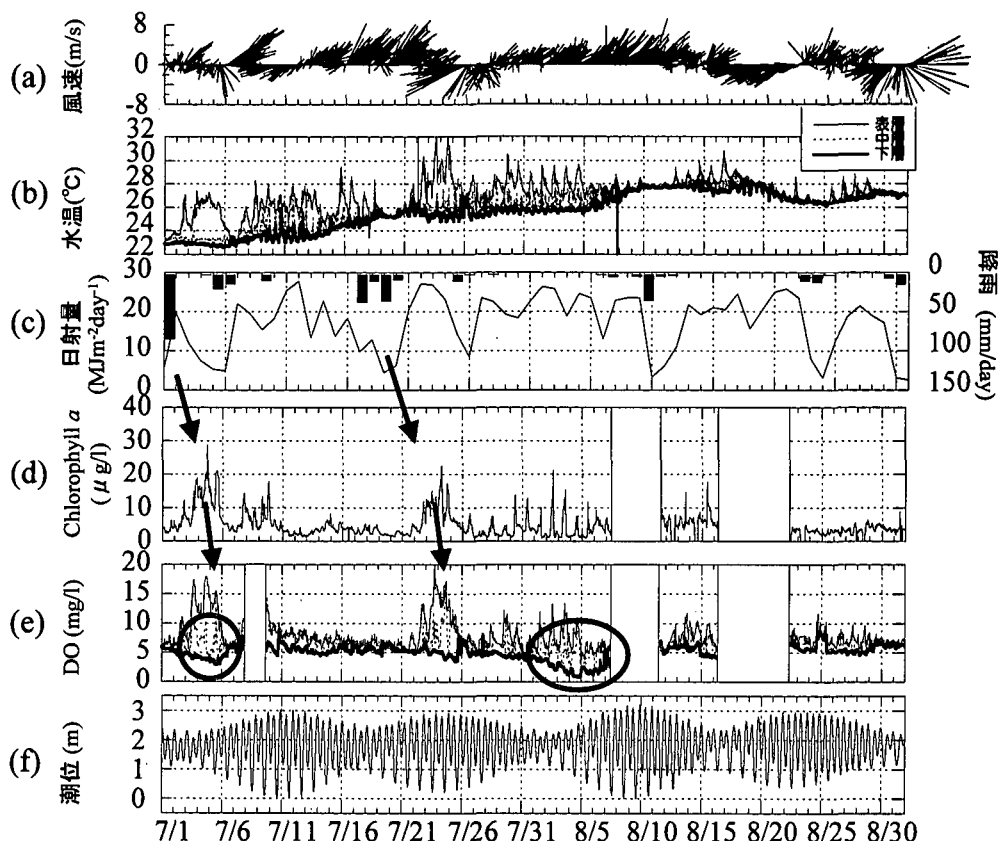


図-2 2002年の夏季の佐賀気象台における風速ベクトル(a), 水温(b), 佐賀気象台における日射量, 降水量(c), クロロフィルa濃度(d), DOの時系列(e), 口之津における潮位(f)の時系列

および7月23日から25日において大きく2回増加し、瞬間的には $20 \mu\text{g/l}$ に達した。このクロロフィルa増加のタイミングは日射量(図-2, c)が $20 \text{ MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$ 程度の場合であった。ところで、クロロフィルaの増殖が見られた2つの期間と同レベルの日射量は7月26日～8月10日や8月12日～25日においても観測されており、当該海域の植物プランクトンの増殖に日射以外の制限要因が存在すると考えられる。そこで植物プランクトンの増加が起きた場合と、起きない場合において、様々な要因を分析したところ、クロロフィルaの増殖が見られた2つの期間においては、増殖の数日前に比較的大きな降雨が観測されていることが明らかになった(図-2, c)。

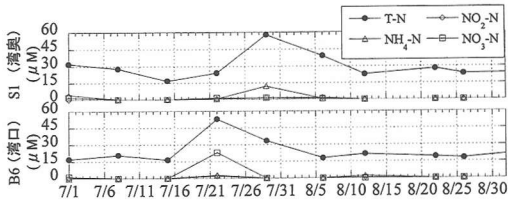
図-3は同期間における窒素の時系列である。この図から湾内の無機態窒素濃度が通常ではきわめて低い濃度に保たれ、降雨から数日後のきわめて限られた期間においてのみ定量されていることが分かる。さらにその増加のタイミングは調整池からの排水が行われる湾奥よりも湾口で早く濃度も高いことが分かる。一方、同様の検討はリンについても実施したが、リンは窒素と比べ高濃度となっていた。したがって諫早湾内においては、通常は

窒素によって植物プランクトンの増殖が制限され、降雨等によって窒素供給がなされ、さらに十分な日射が得られた場合において植物プランクトンの増殖が行われると考えられる。

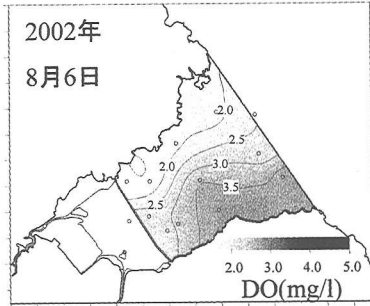
(2) 貧酸素水塊の発生メカニズム

海底の溶存酸素濃度は(図-2, e), クロロフィルaの増加から数日遅れて減少し、7月5日前後や8月5日において、生物の生息に影響を与えるとされる 3 mg/l を下回った。特に8月5日前後においては、最低で 0.5 mg/l 程度となるなど大きく減少した。7月5日前後における貧酸素化は、そのタイミングから、7月4日前後に増殖した植物プランクトンが沈降し、海底で酸化分解される際に、酸素が消費されたことが原因と考えられる。

ところで7月23日前後においては、貧酸素化を招いた7月4日前後と同程度の植物プランクトンの増加があるにもかかわらず、溶存酸素濃度の減少が小さく、貧酸素化には至らなかった。そこでこれらの時期における、潮位(図-2, f)を比較したところ、貧酸素化が顕著となった7月5日前後は小潮期、7月23日前後においては大潮期であることが分かった。このようなことから、7月23



図—3 諫早湾湾奥 S1 観測地点 (上段) および湾口 B6 観測地点 (下段) における全窒素、無機能窒素時系列 (九州農政局諫早干拓事務所 (2003) をもとに作成)



図—4 2002 年 8 月 6 日における底層 DO 分布

日前後においては潮流が大きかったことが、海底での貧酸素水塊の形成を抑制した一因と考えられる。

一方、8 月 5 日前後の貧酸素化は、対応する植物プランクトンの増加が見られないにも関わらず、溶存酸素濃度が大きく減少している。同様の貧酸素化は、佐賀沖 (図—1, A 3) や大浦沖 (図—1, A 6) においても観測され、諫早湾内より早い 8 月 2 日から急激に貧酸素化していたことが明らかになった (梶原ら, 2003)。同時期に南西風が長期間連吹していることから、有明海中央の滞筋付近で形成された貧酸素水塊が、エクマン輸送により表層では南東方向に吹き寄せられ、補償流として海底で北西向きの流れが生じた際に輸送され、諫早湾内に流入したために対応する赤潮が見られないにもかかわらず低い溶存酸素濃度が観測されたものと考えられる。図—4 は 2002

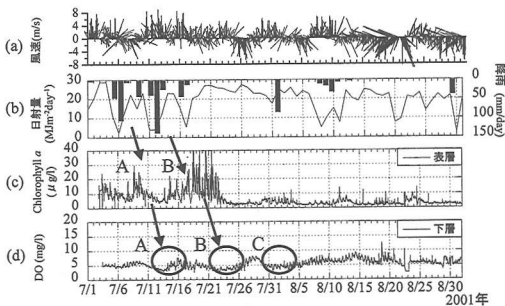
年の 8 月 6 日における海底溶存酸素濃度の平面分布である。溶存酸素濃度は諫早湾の北西部海域において低く、等値線が湾軸方向になっており、先に述べた風による流れによって説明がつく。一方、諫早湾内より有明海中央付近で大規模な貧酸素化が起きた原因としては、筑後川等の大きな河川に近く栄養塩の供給が豊富であるために赤潮が発生しやすいこと、水深が深いために海底で巻き上げられた濁度が表層に到達しづらく、同時に海底の流動が小さいことなどが複合的に作用していると考えられる。

(3) 2001 年と 2002 年の水質変動の比較

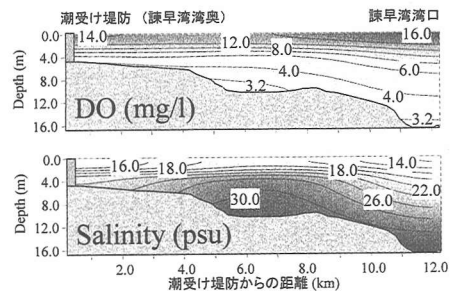
2001 年と 2002 年の水質変動を比較するため、2001 年における夏季の水質と気象の時系列を図—5 に示す。水質変動パターンは、2002 年における場合と同様で、クロロフィル *a* の増加は 2 回 (図中 A, B)、貧酸素化は 3 回 (図中 A, B, C) 発生していた (鯉渕ら, 2002)。両年を比較すると、2001 年における赤潮や貧酸素化は 2002 年と比べ大規模である。これは 2001 年には比較的降水量が多く、日射量・栄養塩とも豊富であったことから、植物プランクトンの増殖が促進されたためと考えられ、植物プランクトンが窒素制限となっているとする前述の結果を支持する結果となった。

(4) 水質の空間変動

図—6 は、2002 年に最大規模の赤潮となった 7 月 4 日における溶存酸素と塩分の諫早湾における縦断分布である。表層の溶存酸素は潮受け堤防前面と諫早湾湾口部で過飽和となっており、光合成が活発に行われている様子が伺える。一方、底層では、諫早湾湾口から湾央付近の高塩分水塊内において、貧酸素水塊が形成されており、いずれも表層が過飽和となっていることから、上層から沈降した有機物の影響と見られる。塩分との対応をみると、表層で溶存酸素が高い地点は、いずれも低塩分の地点に対応しており、河川からの栄養供給が植物プランクトンの増殖や分布に大きく影響していることが空間分布からも再確認出来る。



図—5 2001 年の夏季における風速ベクトル (a)、日射量、降水量 (b)、クロロフィル *a* 濃度 (c)、DO の時系列 (d)



図—6 赤潮の溶存酸素 (上段)、塩分 (下段) の縦断分布 (2002 年 7 月 4 日)

2002 年において最も大きな降雨が記録された 2002 年 7 月 1 日の表層塩分分布を図-7 (上段) に示す。塩分は湾口付近では 30 psu 程度と高いが、湾奥部の南排水門周辺では 26 psu と低塩分となっている。一方、比較的大きな降雨が計測された 7 月 19 日から 3 日後の表層塩分図-7, (下段) では、湾奥部で 30 psu 程度と高くなっているのに対し、湾口の B6 では 19 psu と最低となるなど、湾口側で低塩分化する傾向が見られた。塩分の空間分布について同様の検討を 2 年間にわたって実施した結果、湾内の塩分低下は、湾奥部の排水門周辺で起こる場合と湾口周辺で起こる場合の 2 パターンが存在し、特に湾口付近で塩分低下が見られた後には、湾全域での低塩分化に発展することが明らかになった。

図-8 は諫早湾湾奥 (S1), 湾央 (B3), 湾口 (B6) における塩分時系列である。この図から降雨量の大きい 7 月 2 日前後と 7 月 20 日前後の両期間において、低塩分化し、湾奥に比べ湾口の観測地点でより早く低塩分化し、濃度も低くなっていることが分かる。さらにこの塩分低下は降雨から 3 日程度後に発生しており、諫早湾外から淡水供給がなされていることが推察される。

図-9 に諫早湾湾口部の B6 における T-N と塩分の関係を示す。図中のプロットは 2001 年 4 月から 2003 年 3 月までの表層と底層における 1 週間間隔の計測結果である。T-N は塩分の増加に伴い直線的に減少しており、湾外から湾内に供給された淡水に含まれた窒素が海水混合により希釈されていると考えられる。

4. 諫早湾への物質流入

諫早湾の赤潮や貧酸素化に重要な影響をもたらす淡水が、どのように、そしてどの程度供給されるかを明らかにする目的で、湾内淡水量の推定を行った。

諫早湾の淡水量を算定するため、まず週 1 回の頻度で実施されている塩分の観測結果から 3 次元の塩分空間分布を水平方向 10 m、鉛直方向 10 cm の計算格子サイズで作成した。次に式 (1) を用いて各地点における淡水の層厚 D_s を求め、これを湾全域で合計することで淡水量を算定した。

$$D_s = \int_0^h \frac{S^* - S}{S^*} dz \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 S は塩分 (psu), S^* は淡水流入のない時期における湾内の塩分で図-8 より 34 (psu) とした。 h は各地点の水深、 dz は鉛直方向の計算格子サイズで 10 cm とした。

水質の空間分布を把握するための観測は、週 1 回の頻度で行われており、従来に比べ詳細な観測結果が蓄積されているものの、諫早湾内に淡水が侵入する様子をつえるには不十分であった。

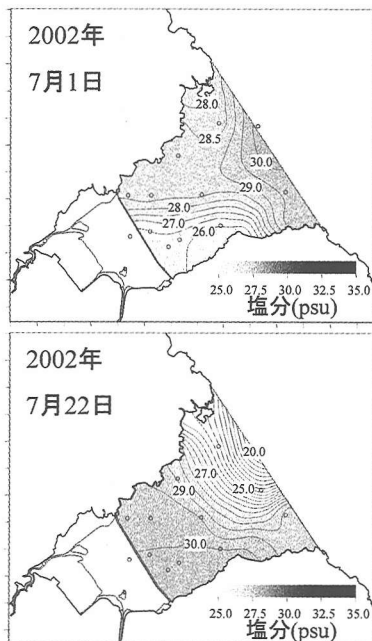


図-7 降雨直後の表層塩分分布 (上段) および降雨 3 日後の表層塩分分布 (下段)

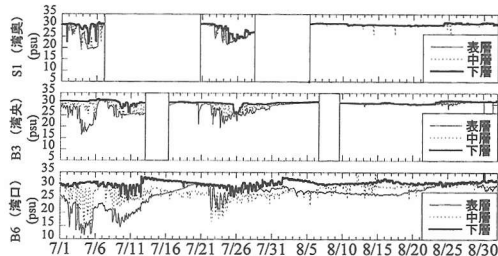


図-8 2002 年夏季における湾奥 S1 (上段), 湾央 (中段), 湾口 B6 (下段) の塩分時系列 (九州農政局諫早干拓事務所 (2003) をもとに作成)

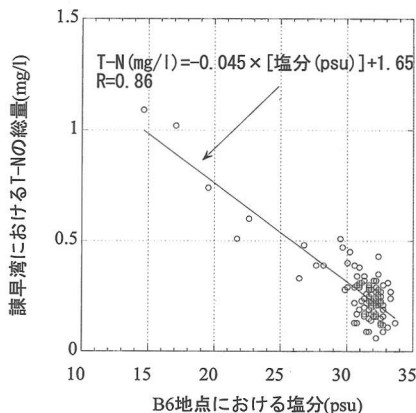


図-9 B6 地点における塩分と全窒素量の関係 (2001 年 4 月から 2003 年 3 月の観測結果)

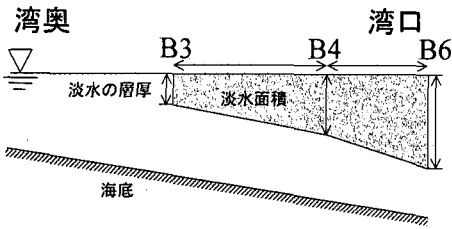


図-10 B3, B4, B6断面における淡水量の算定

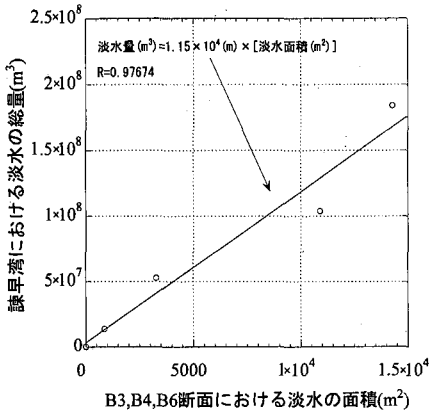


図-11 B3, B4, B6断面における淡水量と諫早湾全体の淡水量の関係

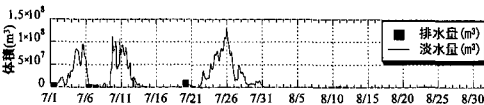


図-12 2001年の夏季における淡水量と締め切り堤防からの排水量の時系列

そこで2002年6月末より1時間間隔で塩分プロファイルが観測されているB3, B4と10分間隔で塩分を計測しているB6の3地点の観測結果を用いて、式(1)から各地点の淡水層厚を算出し、図-10のように地点間の層厚が直線的に変化すると仮定して、淡水面積を求め、湾内の淡水量と淡水面積との関係式から時々刻々の淡水量を算定することを試みた。淡水面積と淡水量との関係を図-11に示す。B3, B4の観測が行われて以降、週1回の空間分布観測で淡水分布を捉えたのは5回だけであったため、サンプル数が少ないものの、両者の相関はよく、3地点における淡水面積から、湾内における淡水の総量を推算できることが示された。図-12は図-11の関係をj用いて算出した湾内淡水量と調整池からの排水量の時系列である。湾内に流入した淡水は、潮汐の干満による増減を繰り返しつつ、降雨後1週間程度で最大となり、例えば7月25日には約1億2千万m³に達している。一方その周辺における調整池からの排水は7月21日前

後に行われ総量は2千万m³であった。従って排水量のおよそ6倍の淡水が諫早湾内に分布し、これらは湾外から諫早湾に流入したものと考えられる。なおこの時期に北東風が連吹したことは湾外からの淡水流入を促進したものと考えられる。同様に7月から8月までの積算の淡水量と排水量を比較したところ、諫早湾内の淡水総量が約3億m³に対して排水量は6千万m³で5倍程度前者の方が大きい。

全窒素や無機態窒素についても同様の算定を行ったところ、淡水量と同様の結果が得られ、排水量のおよそ6倍が湾外から淡水流入によって供給されると推定され、湾内の水質に対しては、湾外からの流入が排水量の数倍となっていることが示唆された。

5. まとめ

有明海における長期の連続観測により、赤潮発生や貧酸素化には日射や栄養塩濃度(窒素)の条件が極めて重要で、一連の水質悪化の主因が富栄養現象によることを明らかにした。これらの条件からノリ不作となった2000年を検討したところ、過去10年間で極めて例外的に冬季の日射量が大きく、窒素分も豊富であったことがその原因であると推察された。また、水質の時空間変動の検討から、諫早湾では湾奥部より湾口部で低塩分・高栄養塩となることが明らかになった。さらに河川水の侵入過程を検討した結果、諫早湾における栄養塩の約85%が、筑後川をはじめとする有明海に流入する河川から供給され、残り15%が調整池からの排水によってなされると推定された。このような知見は、有明海の水質改善や、排水制御を行う上でも重要と考えられる。

謝辞:本研究を進めるにあたり、農林水産省諫早湾干拓事務所にはB6観測櫓を係留地点として提供いただく等便宜を図っていただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 梶原義範・富田友幸・中野拓治・磯部雅彦(2003): 有明海湾奥部海域における2002年夏季の貧酸素水塊の発生状況について, 土木学会論文集, 印刷中
- 九州農政局諫早干拓事務所(2003): 海域環境基礎資料 平成15年3月, 印刷中。
- 九州農政局諫早干拓事務所(2003): 短期開門調査報告書 平成15年4月, 408p。
- 鯉淵幸生・佐々木淳・磯部雅彦(2002): 2001年有明海における水質の動態解明, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1056-1060。
- 滝川 清・田中健路・外村隆臣・吉村祥子・古市正彦(2002): 有明海の中部海域における環境変動の要因分析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1066-1070。
- 村上哲生・小寺浩二・程木義邦(2001): 有明海奥部における底層の溶存酸素濃度(速報), 日本自然保護協会, (<http://www.nacsj.or.jp/database/isahaya/isahaya-010817-hokoku.html>)