

有明海の過去 25 年間に於ける海域環境の変動特性

滝川 清* ・田中健路**・外村隆臣***
西岡律恵****・青山千春*****

環境悪化の悪循環に陥っていると懸念される有明海の環境変化の要因分析を行なうにあたり、水質特性や底質特性、気象などの過去 25 年間のデータを用いて整理と解析を行なった。その結果、水質環境の変動特性により 5 つの海域に分類でき、以前より湾奥では夏季に密度成層が形成され、海底面近傍では貧酸素化現象が起っていたこと、海域全体の窒素循環において硝化能力が低下していること等が明らかとなった。また、ノリの色落ちが顕著であった 2000 年には、春・夏期の高日射量と秋・冬期の高雲水量、および冬季の高水温と降水による栄養塩の流入等、気象要素の異変などが明らかとなった。

1. はじめに

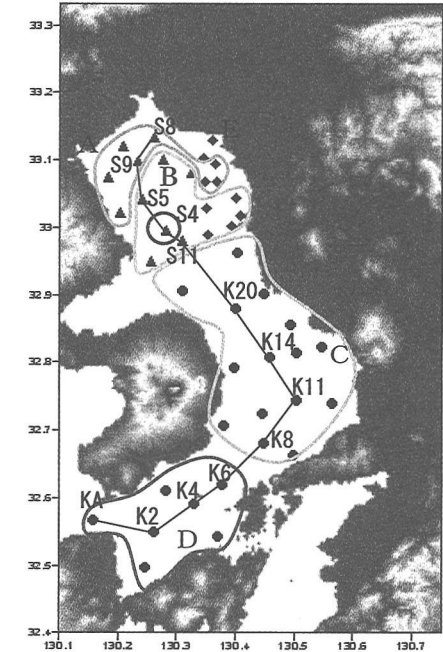
代表的な閉鎖性内湾である有明海の環境は、1980 年代より、生息生物の種および数が減り始め、赤潮の発生、漁獲量の減少や水質の悪化など環境悪化が顕著になって来ており、特に 2000 年 7 月には「大量の赤潮発生」、2001 年 1 月には「ノリの色落ち」により莫大な被害が生じている。本研究では、このような有明海域の環境悪化の原因解明にあたって、過去 25 年間の有明海域の生物・水質・底質および気象などの観測データの経年変化記録から、有明海の環境変動特性を把握することを目的として研究をおこなっている(滝川他 2002 a, 滝川他 2002 b, 滝川他 2003)。

2. 有明海域の環境変動特性

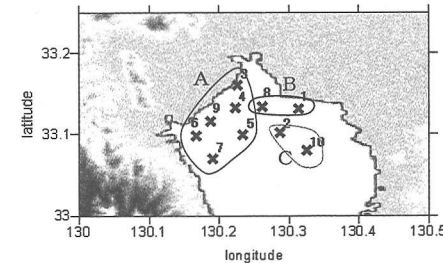
1976 年から 2000 年の 25 年間に於ける有明海の浅海定線調査データ(熊本、福岡、佐賀の 3 県)および気象庁データ(気象庁年報、アメダス観測年報)をもとに、有明海域の水質および気象特性について調べた。浅海定線調査地点は、図一1 に示すように熊本県 22 点、佐賀県 11 点、福岡県 10 点である。調査項目は水温、塩分濃度の他に、溶存酸素(DO)、化学的酸素要求量(COD)やリン酸態リン($PO_4\text{-P}$)、硝酸態窒素($NO_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($NO_2\text{-N}$)、アンモニア態窒素($NH_4\text{-N}$)、珪酸態珪素($SiO_2\text{-Si}$)、溶存三態窒素(DIN)といった栄養塩濃度、プランクトン沈殿量、透明度、pH が毎月 1 回の間隔で計測、分析されている。底質生物モニタリング調査地点は、図一2 に示す湾奥の 10 地点で、調査項目は強熱減量、硫化水素、COD であり、こちらは 1990 年より年 2 回(5 月、8 月)実施されている。

(1) 解析方法

浅海定線調査データについて、地点毎の分布特性を明



図一1 浅海定線調査地点(クラスター分類と縦断線)



図一2 底質モニタリング調査地点(クラスター分類)

確化するために、水質項目データを用いてクラスター分析を行い、グループ毎の典型的な変動パターンを見出すことで水質環境の変動特性を調べた。また、赤潮発生のメカニズムに赤潮が関与することから、湾軸方向に沿う形で調査地点を抽出して、水温、塩分、密度、溶存酸素

* 正会員 工 博 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター
** 正会員 理 修 熊本大学助手 工学部環境システム工学科
*** 正会員 熊本大学技官 工学部環境システム工学科
**** 正会員 例 jimos
***** 正会員 博(水産) 独立総合研究所

などの鉛直分布特性を調べることで、有明海の水質環境の時空間的な変動特性の把握を試みた。底質生物モニタリング調査も、浅海定線調査と同様、クラスター分析によって地域的特性を見出して、その変動傾向について解析を行った。

(2) クラスター分析による海域特性

有明海の海域特性を調べるため、河川による影響が大きいと思われる夏季のデータについて25年間の水質データを平均しクラスター分析を行った。その結果、夏の水質項目の平均特性は図-1に示す湾奥北部A、湾奥南部B、湾中央部C、湾口部D、筑後川河口Eの5つの海域グループに分類された。また、分類グループの水質項目ごとに図-3に示すような平年値の変動特性が明らかになった。透明度表層の年間変動は湾奥部が低く、湾口部になるほど高くなっており、各グループ毎に年間を通じてほぼ一定の値を示す(図-3(a))。これは、透明度が主に水深と潮汐活動の大きさに左右されているためと考えられる。塩分表層の濃度は湾奥側ほど低くなっており7月に著しい低下が見られる。これは、梅雨における大量の降水により、河川流入量も増加することが原因と考えられる。また、図-3(b)に示す水深5m地点の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、分類Eの筑後川河口域を除くと湾奥部ほど高く、その年間変動は冬季から夏季にかけて低濃度となり、夏季から秋季に高濃度となる傾向にある。この $\text{PO}_4\text{-P}$ が低濃度の時期は図-4に示すように潮汐の年間変動のうち平均潮位が低くなって干潟干出面積の広がる時期とほぼ一致する。

(3) 海域の窒素循環

海域に流入した有機態の窒素は、微生物によって無機物に分解される。無機態となった窒素は脱窒されて窒素ガスとなり大気中に分散したり、栄養塩として生物の体内に取りこまれたりする。生物に取りこまれた窒素は排泄されて溶存態の窒素となり、微生物によって分解される。また、その生物の死骸が再び微生物によって分解されて無機化される。

図-5は、 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比、 $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比、 $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比の1年移動平均の推移をそれぞれ表している。海域A～Fのうち、表層のデータのそろっている、海域A～Dのデータ(福岡・佐賀)について解析する。

$\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比(図-5(a))、 $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比(図-5(b))のグラフを見ると1993年以降急激に減少していることが分かる。このことから、アンモニア態窒素→亜硝酸態窒素→硝酸態窒素に変化する過程で、硝化能力が十分に発揮されなくなっていると推測される。また、 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比、 $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比から、ここ数年海域分類ごとの差が小さくなっていることから、全域的に硝化能力が衰えてきている可能性が指摘される。

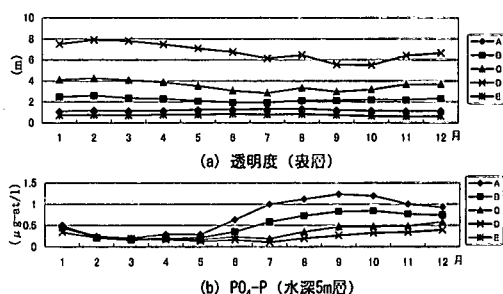


図-3 水質項目の年変動特性(平年値)

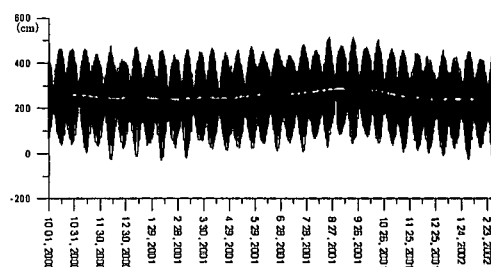


図-4 平均潮位の年変動(熊本港)

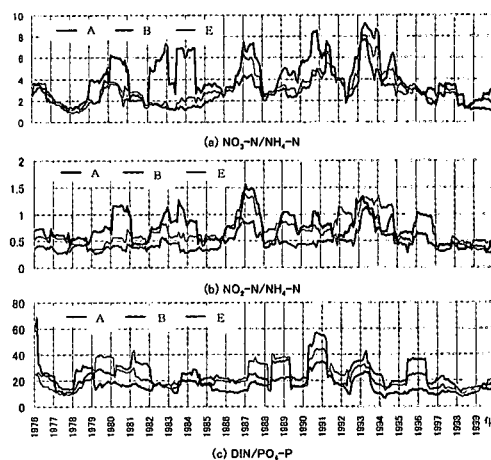


図-5 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比の1年移動平均の推移

$\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ 比(図-5(c))はほぼ横ばいの値を示しているが、海域Aを除いて植物プランクトンの平均的なN/P比16(鯉渚ら, 2000)を超過している。陸域から窒素が過剰供給されていたことが言える。しかしここ数年、N/P比は減少傾向が見られ16に近づいてきている。リンが窒素以上に過剰供給されている可能性が指摘される。

以上のことから生活廃水や工場排水などの汚染混入の増加や、自然浄化作用の衰えなどにより、広い範囲にわたって水質が悪化してきていることが明らかになった。

(4) 海域の成層化と貧酸素化現象

有明海の成層化の状況を把握するために、図-1 に示すように湾軸方向に断面を設定し、縦断面における水温と塩分濃度の鉛直分布特性を調べた。その結果、夏場には水温、塩分ともに長年にわたって成層化が多く観測された。例として図-6 に 2000 年夏(7月)と冬(12月)の水温と塩分濃度より求めた密度分布(σ_t)を示す。夏季には水深 0~10 m 付近から湾奥まで密度成層が起こっていることが明らかとなった。

有明海における、貧酸素化現象を把握するために、水深方向のデータが揃っている湾奥の 1 点(S4 地点(図-1))について分析を行った。S4 は縦断軸の点で、河川からの影響が少ない一般的な点として選んだ。図-7 は、S4 地点の底層について溶存酸素(DO)の水産用水基準値 6 mg/l (底層においては 4.3 mg/l 以上が目安) 以下が観測期間中にどれだけ出現したかを表したものである。点線は 4.3 mg/l を示す。この図から観測当初の 1970 年代より夏から秋にかけて貧酸素化現象が見られることが判る。観測当初と近年を比較しても DO の極小値や貧酸素化の期間には大きな違いは見られない。また、他の湾奥の地点でも観測当初から貧酸素化が起こっており、湾奥では以前から広範囲で貧酸素化現象が起こっていたことが明らかとなった。

図-8 は、赤潮が増加してきた 1995 年以降の月別赤潮発生件数(九州漁業調整事務所, 1985-2000)、図-9 は、同じく 1995 年以降の S4 地点における DO と $\text{NO}_2\text{-N}$ の水深方向の時系列である。DO は 5 月~7 月にかけて徐々に濃度の低下が見られ、貧酸素水塊が発生していることが分かる。1998 年を見ると表層の濃度は 6 月から 7 月下旬にかけて夏場 10 mg/l 以上(飽和酸素濃度の 150% 以上)の値を示しており、底層では 3.5 mg/l 以下の貧酸素水塊が観測できる。図-8 より、この時期に植物プランクトンによる赤潮が発生していることから、植物プランクトンが光合成により酸素を放出したことにより表層の DO 濃度が高くなり、大量に発生した植物プランクトンは死骸となって沈殿し、分解する際に酸素が使われ底層での貧酸素現象が起こったと推測される。他の年でも、夏季において、表層で DO が過飽和になっている地点と底層で貧酸素水塊がみられる地点はほぼ一致していることが観測される。このことから、夏季の赤潮発生と底層の貧酸素化は密接に関係していることが分かる。DO と $\text{NO}_2\text{-N}$ (図-9)の時系列を比較すると、底層において DO 濃度の低い地点と $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度の高い地点が一致している部分が多く観測できる。アンモニア態窒素の一部は亜硝酸態窒素・硝酸態窒素と変化する。硝化過程の中間物質である $\text{NO}_2\text{-N}$ があるということは近くに汚染源があるということを示しており、この汚染物の分解に酸素が

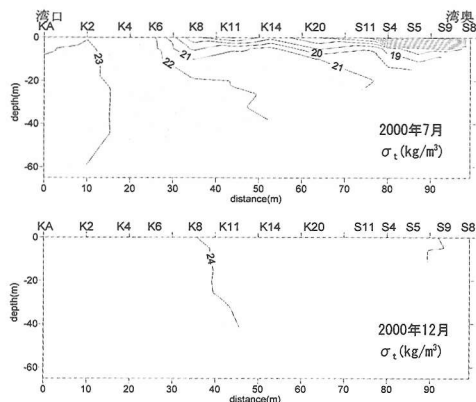


図-6 湾軸方向の密度縦断分布

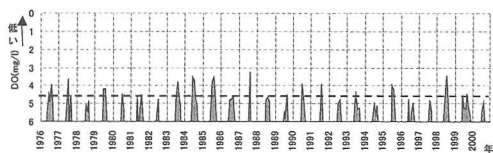


図-7 底層における DO の経年変化 (S4 地点)

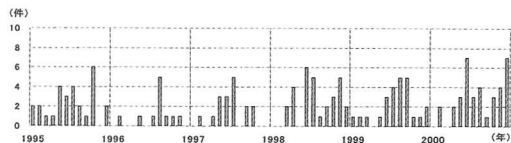


図-8 赤潮発生件数 (1995~2000 年)

使われ DO 濃度は低下する。その結果、夏季における $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度の上昇と DO 濃度の低下が同じ場所で行ったと考えられる。

(5) 底質データによる海域特性

底質特性は底生生物が棲む環境そのものの変化を示し、近年底質の悪化(泥質化、汚泥化)が示唆されている。そのため底質特性を把握するため底質(硫化水素、強熱減量, COD)のデータのある湾奥の調査地点(図-2)について、クラスター分析を用いて解析を行った。その結果、図-2 のように海域 A, B, C に分類され、図-10 に示す変動特性が明らかになった。(a) 図に示す COD は水産用水基準によると 20 mg/g 以上は汚染泥である。海域 A では汚染が進んでおり、海域 B も近年値が高くなってきている。強熱減量の値は試料中に含まれる有機物等の目安になり、有機物の負荷量が多いと分解が追いつかず、酸素も不足し、腐敗した有機物が増えて環境に悪影響を与える硫化水素が発生するようになり、有機物に含まれる栄養分の窒素やリンが多量に海に溶け出すようになる。(b) 図の硫化水素では、海域 B の上昇がみられ同

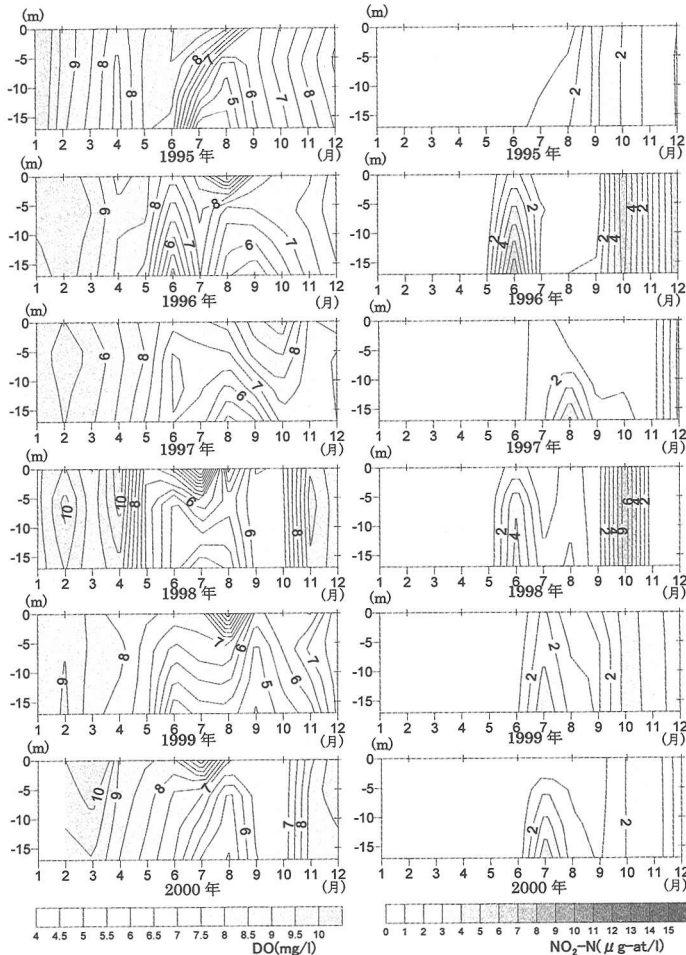


図-9 S4地点の鉛直断面の時系列 (1995~2000年)

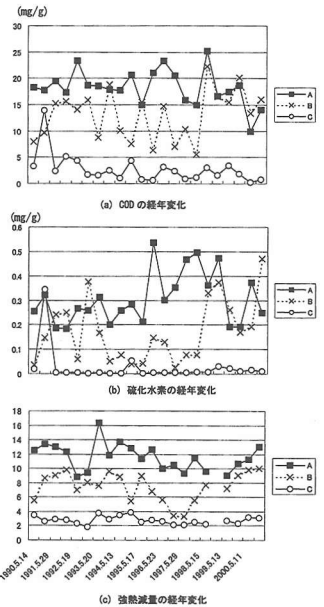


図-10 湾奥底質の経年変動特性

時に (c) 図の強熱減量でも増加が見られる。これらの変動特性から、筑後川からの流入の影響が大きい領域を除き、西側の方に徐々に COD, 硫化水素, 強熱減量が増加し、汚染が深刻化してきていることが明らかとなった。

3. 地上観測データによる熊本・佐賀の気候変動

有明海沿岸域での地上気象観測データを基に、気象要素の変動を解析した。使用したデータは、気象庁年報の CD-ROM (気象庁提供) に収録されてある熊本・佐賀地方気象台の月別統計値データである。

図-11 は、熊本気象地方台における全天日射量と月平均気温および月降水量の偏差を示している。全天日射量の対年値との偏差 (図-11 (a)) は、2000 年、2001 年の 2 月~9 月にかけて、平年より 10~20% 大きい。2000 年 10 月~11 月は全天日射量が平年より一旦下回るが、12 月に入ると、再び平年よりも 15% 大きくなる。月平均

気温の月別偏差 (図-11 (b)) は、2000 年 10 月~11 月は (全天日射量が平年より少ないにもかかわらず) 平年よりも約 2 度ほど高いことが分かる。また、月別の降水量の偏差 (図-11 (c)) から、2000 年 10 月~11 月は例年よりも降水量が多いことが分かる。

また、アジア・モンスーン域全体における有明海とその周辺域全体の気候変動について、NCEP (National Center for Environmental Prediction) 客観解析データと熱帯降雨観測衛星 (TRMM) の雲、海水温データを用いて解析を行った結果 (田中・滝川ら, 2003) によると、1999 年 2~6 月および、2000 年 2~6 月のいずれにおいても下向き短波放射 (日射量に相当する) の偏差の値は、九州から東シナ海全域にわたって平年よりも大きく、とりわけ、2000 年では平年より 10% 以上日射量の大きい領域が東シナ海上に存在しており光合成による植物性プランクトンの大量増殖が起こり易い環境下にあったといえる。一方、2000 年 10 月~11 月の日射量は東シナ海海域は平

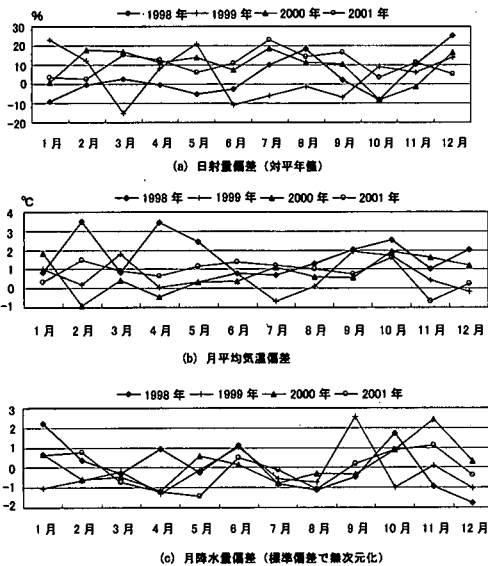


図-11 熊本地方気象台における気象観測記録

年よりも 10%以上低く、例年よりもこの時期の雲量が多いことが指摘されており、2000 年の東シナ海における雲の発生状況は、他の年とはかなり異なった様相であることが分かった。

すなわち、夏季の赤潮の大量発生、冬季の海苔の色落ち被害と、環境悪化に伴う重大な被害が顕著であった 2000 年においては、春～夏の高日射は、光合成の活性化、ひいては、植物性プランクトンの大量発生へと結びつく可能性を持つとともに、秋～冬にかけての雲の被覆は、特に夜間における放射冷却を抑制し、冷却されきれない海水が東シナ海を北上し、有明海に達することで、特定種のプランクトンの発生に寄与した可能性が指摘される。また、大量の雲に伴う降水が沿岸域河川からの栄養塩とともに流入したと考えられる。

4. おわりに

過去 25 年間の有明海の水質・底質・生物及び気象の観測データを分析し、膨大な資料の数値データ化および図表化とともに、環境変動の時空間特性の把握を行った。その結果、夏季の水質環境の変動をクラスター分析するこ

とによって、特徴ある 5 つの海域に分類できた。有明海では大潮位差のため貧酸素水塊は発生しにくいと考えられていたが、以前より湾奥部を中心にして夏季に密度成層が形成され、海底面近傍では貧酸素化現象が起っていたことが分かった。また、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の割合の経年変化の分析結果から、海域全体の窒素循環において硝化能力が低下していること等が明らかとなった。気象観測記録の分析から、ノリの色落ちが顕著であった 2000 年には、春～夏期に高日射量があり、逆に、秋～冬期には雲水量が多かったことが分かった。この結果、冬季における熱放射が抑制され、冬季の高水温とともに例年以上の降雨が発生し、降水による栄養塩の流入等、気象要素の異変が生じていたことなどが明らかとなった。

本研究を行うに際して、熊本県水産研究センター、佐賀県有明海水産振興センター及び福岡県水産海洋技術センターから貴重なデータの提供を戴きました。ここに記して感謝致します。また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (A) (2) (代表：滝川清；課題番号 14208072：平成 14～17 年度) の補助によるものであり記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 鯉淵幸生・小倉久子・安藤晴夫 (2000): 東京湾湾奥部における栄養塩の周年変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1066-1070.
- 九州漁業調整事務所 (1985-2000): 有明海赤潮発生件数.
- 滝川 清・田中健路・外村隆臣・吉村祥子 (2002 a): 有明海の中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.
- 滝川 清・古川恵治・鈴木敦巳・北園芳人・原田浩幸・田中健路・柿本龍治・山下隆男 (2002 b): 有明・八代海沿岸域の自然環境評価と環境共生型社会基盤整備に関する研究, 平成 10～13 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (A) (2)) 研究成果報告書, (課題番号 10308026), 453 p.
- 滝川 清・田中健路・外村隆臣・増田竜哉・森岡三郎・酒井勝 (2003): 有明海干潟環境の改善・回復に向けた対策工とその効果, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1226-1230.
- 田中健路・滝川 清・成松 明 (2003): 有明海とその周辺地域における近年の気候変動の傾向, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1171-1175.