

過栄養海域に位置する干潟での水質変動特性

徳永貴久*・松永信博**・工藤教男***・宗孝士****

干潟における栄養塩の季節変化に関する定期調査と干潟と周辺海域における DO 濃度の時間変化について現地観測を行った。その結果、干潟上で観測された貧酸素水塊は周辺海域から輸送されているものではなく、干潟上での酸素消費過程によって形成されると推察された。また、和白天潟のような過栄養海域に位置する干潟では、日中の日射量が高ければ、6 月においても赤潮が発生し、夜間に貧酸素水塊が形成されることが示唆された。さらに、鉛直一次元の解析を行った結果、和白天潟上の水柱 0.5 m において貧酸素水塊を形成させないためには、平均的な底泥の酸素消費速度を $145 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ 以下に抑える必要があることが明らかとなった。

1. はじめに

干潟は、生物生息機能、水質浄化機能、生物生産機能等を有しているといわれている。それらの中で、近年特に注目されているのが、干潟の水質浄化機能である。干潟では、植物プランクトンや底生微細藻類等による栄養塩の取り込み、それらを捕食するアサリ等の二枚貝の作用、鳥類や人間による系外への除去等、複雑な食物連鎖網を通して海域の水質浄化の役割を担っているといわれている(細川, 1999)。そのため多くの研究者によって干潟の物質循環過程の定量化が試みられている。例えば、児玉ら(2002a)は、タイダルプリズム内の一次生産の空間分布と季節変化について岸沖方向の一次元モデルを用いて解析し、夏季の一次生産に対しては、タイダルプリズムの先端部分では底生微細藻類の寄与が高く、沖では植物プランクトンの寄与が高いことを明らかにしている。桑江ら(2003)は三河湾に位置する造成干潟および自然干潟において現地観測を行い、干潟に飛来する鳥類群集の動態について検討した。その結果、シギ・チドリ類は採餌行動が活発であり、食物連鎖や物質循環の観点から特に重要な役割を担っていることを示した。しかしながら、和白天潟のような過栄養海域に位置する干潟では、夏季夜間に貧酸素水塊が発生し、多量のリンを溶出する場合があることを見玉ら(2002b)は示唆している。干潟の水質浄化機能はどのような環境の下で維持されるのか、また、多様な生態系はどのような水質環境および底泥環境の下で維持されるのか等について未解明な点が多く残されているように思われる。これらのことを明らかにすることは、沿岸海域の再生や干潟のミチゲーション等においても極めて重要である。本研究では、干潟における水質の季節変化と数時間スケールでの水質変化について現地観測をそれぞれ行った。また、和白天潟での貧酸素水塊の形成について考察を行った。

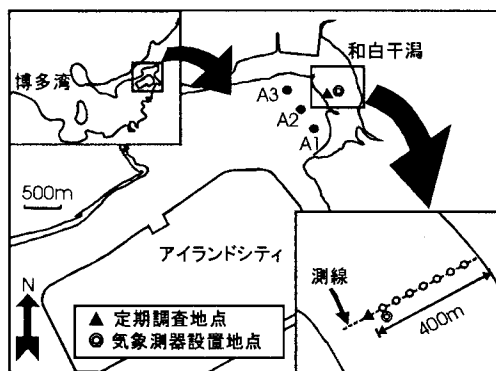


図-1 和白天潟および観測地点

2. 定期調査

(1) 調査概要

和白天潟における水質の季節変動を知るため、2003 年 4 月中旬から 11 月下旬まで約 1ヶ月間隔で調査を行った。干潮時に水深 30 cm 地点で干潟直上水の採水を行い、栄養塩濃度の分析を行った。なお、採水地点は図-1 の▲印で示すように、汀線の最大遡上位置から沖へ約 400 m の場所であった。サンプルの分析は、試料水を Millipore 社製 Millex-HV (孔径 $0.45 \mu\text{m}$) で濾過した濾液を用い、自動分析装置(Buran Luebbe 社製, TRAACS 800)を用いて行った。分析項目はアンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)である。また、同時に、和白天潟における底生生物の現存量調査を実施した。現存量調査の対象は和白天潟におけるマクロベントスの優占種であるホソウミニナおよび底生微細藻類とした。調査間隔は約 1ヶ月とした。汀線最大遡上位置を 0 m 地点とし、沖方向に測点を 50 m 間隔で 4 点設置した。ホソウミニナ現存量は、25 cm $\times$ 25 cm の範囲内の表層から深さ 5 cm までの干潟底質を 1 mm ふるいを用いてふるい、ふるい上に残ったホソウミニナの湿重量をバネばかりを用いて計測した。これをホソウミニナの有機炭素量と湿重

* 学生会員 修(工) 九州大学大学院総合理工学府博士後期課程
** 正 会 員 工 博 九州大学大学院総合理工学府博士課程
*** 正 会 員 修(工) 中外テクノス株式会社
**** 学生会員 修(工) 九州大学大学院総合理工学府修士課程

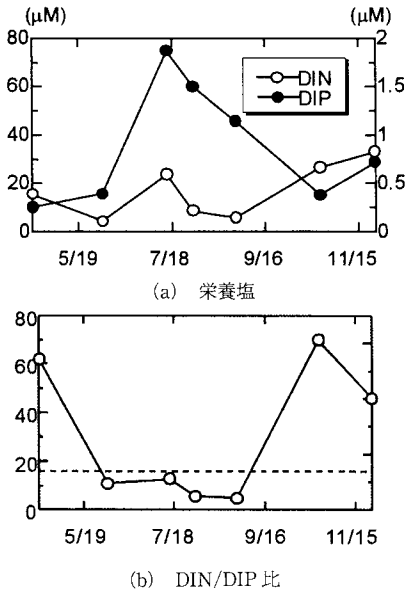


図-2 和白干潟における (a) 栄養塩および (b) DIP/DIP 比の季節変化, ただし, DIN は左軸, DIP は右軸を参照。

量の比率 $\text{gC/gwet}=0.018$, および炭素と窒素の比率 $\text{C/N}=4.87$ (中田・中根, 1986) を用いて, 単位面積あたりの炭素量 (gC/m^2) に換算した。底生微細藻類の現存量は, 内径 2 cm のシリンジを用いて表層下 0.5 cm までの試料を採取し, 試料中の Chl.a を 90% アセトンにより抽出し, Lorenzen (1967) の方法により分析した。分析には水質分析装置 (セントラル科学製, DR 2010) を用いた。

(2) 調査結果

図-2 (a) に DIN (溶存態無機窒素) および DIP (溶存態無機リン) 濃度, (b) に DIN/DIP 比の季節変化を示す。春季は, DIN の値は約 $10 \mu\text{M}$ を示しており, DIP は $0.25 \mu\text{M}$ 程度であった。また, DIN/DIP の値は 60 であった。博多湾で優先する珪藻類 *Skeletonema costatum* のリンの半飽和定数 $0.68 \mu\text{M}$ より DIP 濃度が低いことから, 春季の和白干潟においては, リンが植物プランクトンの一次生産を制限していることがわかる。これは, 児玉ら (2002c) の結果と一致している。DIN 濃度は 7 月に一度ピークをとり, 一旦減少した後, 秋季に再び増加していることがわかる。また, 7 月には, DIP も高い値を取り, $2 \mu\text{M}$ に達している。それに伴い, DIN/DIP はレッドフィールド比の 16 より小さい値をとっている。これは, バクテリアの活性が高まった結果, 干潟直上水が貧酸素化し, 多量のリンが底泥表面から溶出したためと考えられる。

秋季には DIN は増加し, DIP は減少している。これは, バクテリアによる有機物分解量が生産量より卓越してい

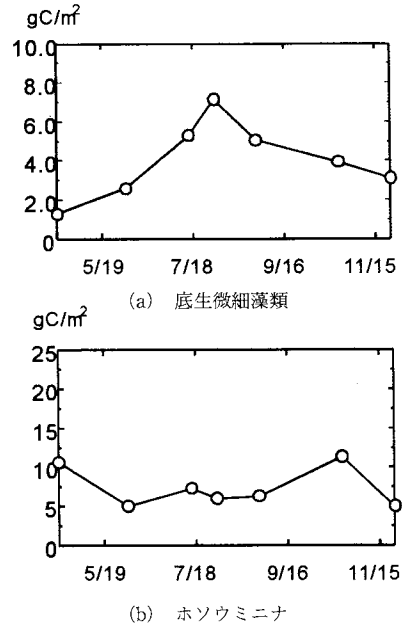


図-3 和白干潟における (a) 底生微細藻類および (b) ホソウミナ現存量の季節変化。

ることや海域の貧酸素化の回数が減少したためと考えられる。図-3 (a), (b) に和白干潟における底生微細藻類およびホソウミナ平均現存量の季節変化を示す。底生微細藻類の平均現存量は, 春季から夏季にかけて増加しており, 7 月中旬には約 7.0 gC/m^2 に達していた。その後, 現存量は減少している。ホソウミナの現存量は, 4 月から 5 月下旬にかけて減少し, 5 月下旬から 8 月下旬まではほぼ一定値をとっていた。また, 10 月下旬に最大値約 13 gC/m^2 をとっている。底生微細藻類を餌とするホソウミナの季節変動が底生微細藻類の分布とほぼ逆位相にあることは, 今後検討したい観測結果である。

3. 現地観測

(1) 観測概要

和白干潟上での溶存酸素濃度 (以下, DO 濃度) の空間分布および時間変化を知るため, 干潟上に測点を設け DO 濃度の計測を行った。干潟上での測線を図-1 に示す。測点は汀線最大遡上位置を 0 m 地点とし, 50 m 間隔で, 沖方向に 7 点設定した。計測は 2003 年 6 月 5 日 5:00 から 18:00 まで 1 時間おきに実施し, 各測点の中層で行った。観測当日の気象および海象条件を知るため, 気象測器と水位計を汀線最大遡上位置から 350 m 沖側に設置した。観測項目は日射量, 風向・風速および水位である。日射量, 風向および風速は 1 分毎に記録し, 水位は 10 分毎に記録した。また, 干潟上での観測と同時に博多湾縁辺部で水質観測を行った。水質観測地点を図-1

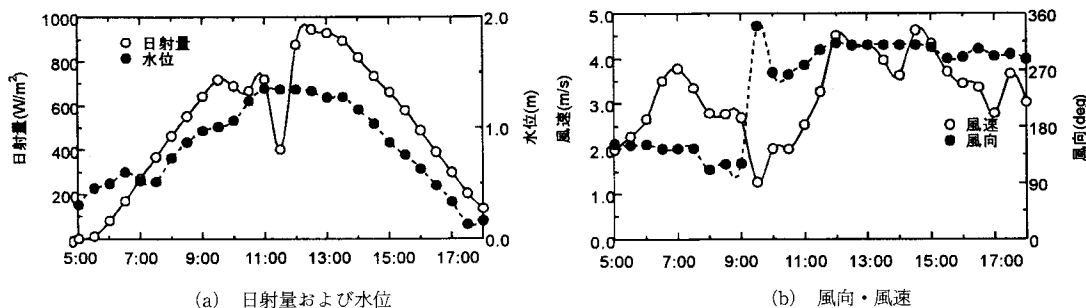


図-4 和白干潟における (a) 日射量、水位および (b) 風向・風速の季節変化。

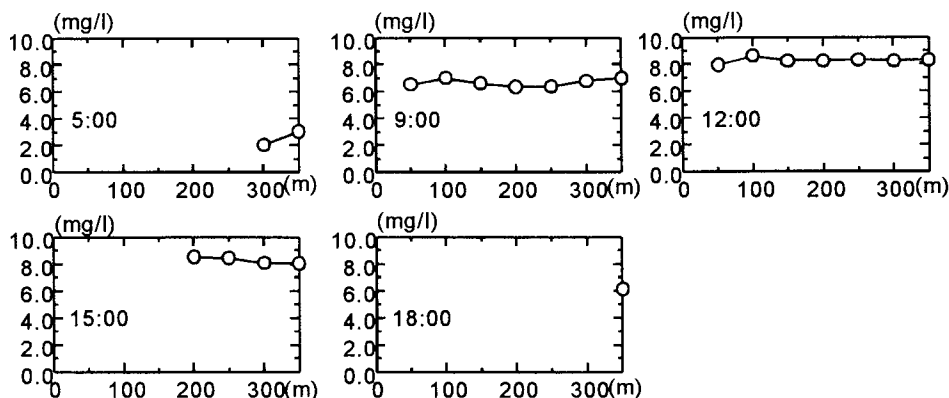


図-5 和白干潟における DO 濃度の時空間変化。

の A1~A3 に示す。水質観測には多項目水質計(アレック電子製: ACL 1182-PDK, 以下 STD)を用い、停止した船上から吊り下げ、0.5 m ピッチで水温、塩分、クロロフィル a (以下, Chl.a) および DO 濃度の計測を行った。測点 A における基本水準面から測られた平均水深は 2.5 m であった。

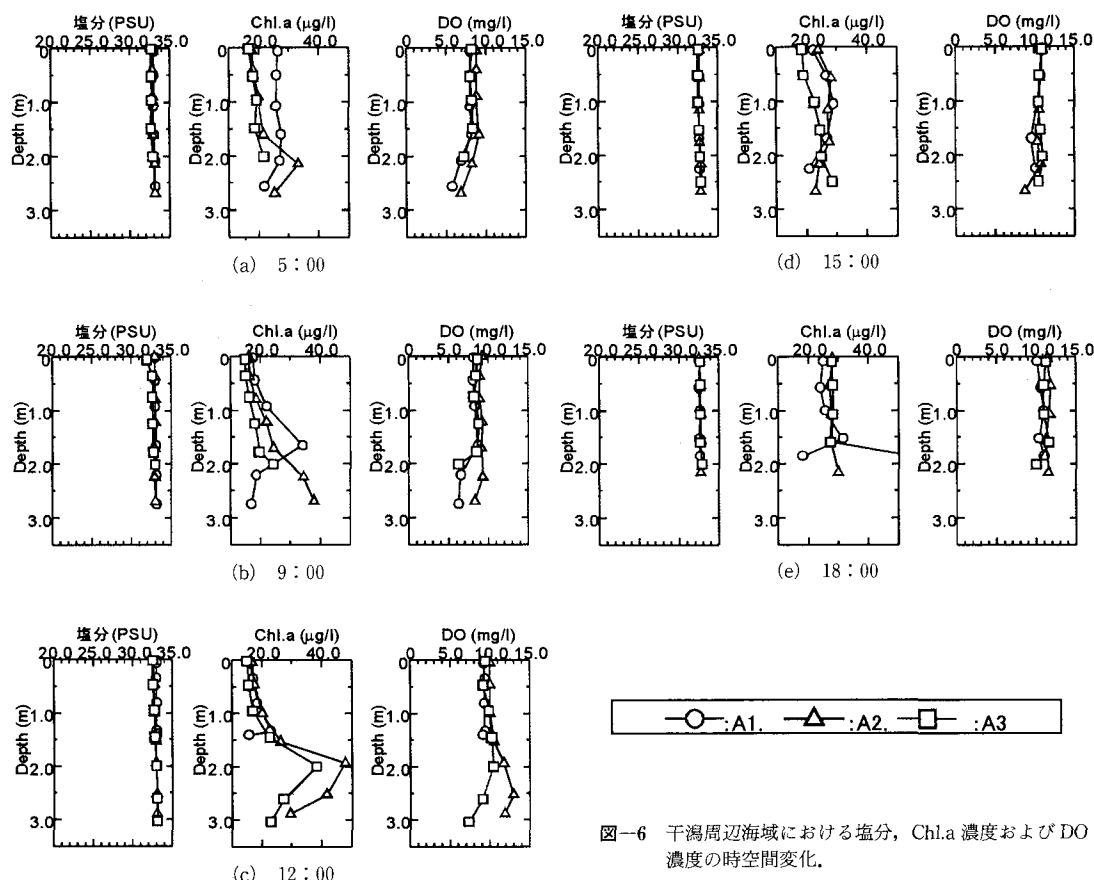
(2) 観測結果

観測期間中の天候はおおむね晴れで、降雨はみられなかった。図-4 (a) に観測当日の和白干潟における 30 分平均された日射量と水位の時間変化を、(b) に 10 分平均された風向および風速の時間変化を示す。観測日は 6 月初旬にもかかわらず、日中の最高日射量が約 1000 W/m² にも達している。10:00 から 12:00 にかけて日射量が減少しているが、これは雲により日射が遮られたためである。風向は北を 0° として時計回りに測られた。観測当日の和白干潟では 9:00 過ぎまで南南東の風がほぼ一様に吹いており、10:00 頃を境に風向が北西に変化していることがわかる。

図-5 に現地観測で得られた和白干潟における DO 濃度の時空間変化を示す。なお、5:00、9:00、12:00、15:00 および 18:00 はそれぞれ、干潮、上げ潮最強時、満潮、下げ潮最強時、干潮時に対応する。また、横軸は

汀線の最大遡上位置からの距離を表している。5:00 においては、タイダルプリズム先端で DO 濃度が 2~3 mg/l を示しており、貧酸素状態にある。これは、主に有機物分解に伴う底泥の酸素消費が過大であったためと考えられる。また、9:00 では、岸沖方向にほぼ一様な分布で 7 mg/l 程度となっている。さらに、満潮時である 12:00 になると、9:00 と同様に岸沖方向にほぼ一様な分布を示していることがわかる。これは、底生微細藻類と植物プランクトンの活発な一次生産により、タイダルプリズム全体が過飽和状態となったものと考えられる。18:00 になると、タイダルプリズム先端部は 6 mg/l 程度に減少している。これは日射量の減少により、一次生産量よりも底泥および水塊内の酸素消費量が卓越し始めたためと考えられる。

図-6 に 5:00、9:00、12:00、15:00 および 18:00 における A1、A2 および A3 での塩分、Chl.a 濃度および DO 濃度の鉛直分布を示す。塩分の分布は鉛直方向に一樣で、いずれの時間においても、32~33 PSU を示しており、干潟縁辺部では河川水の影響が小さいことがわかる。5:00 から 12:00 にかけて、水深 2~3 m の位置で Chl.a 濃度が増加しており、赤潮状態になっていることがわかる。この様な分布をとる理由として、強い日射の



図一六 干潟周辺海域における塩分, Chl.a 濃度および DO 濃度の時空間変化。

ために、強光阻害が起こっていることが考えられる。15:00 および 18:00 においては、水深 2 m 付近で $25 \mu\text{g/l}$ 程度を示しており 12:00 よりも低い値となっている。これは、15:00 および 18:00 の時間は下げ潮時であり、上げ潮時に生産された植物プランクトンが干潟上に沈降したためと思われる。5:00 における干潟縁辺部での DO 濃度は、表層で 8~9 mg/l、底層で 6~7 mg/l であった。この結果と図一五の 5:00 における干潟上の DO 濃度から、干潟上で観測された貧酸素水塊は周辺海域から輸送されているものではなく、干潟上で形成されると推察される。また、5:00 から 12:00 までは日射量の増加につれて全層で DO 濃度が増加していることがわかる。しかしながら、15:00 から 18:00 にかけての変化は小さくなっていることがわかる。以上の結果より、和白干潟のような過栄養海域に位置する干潟では、日中の日射量が高ければ、6 月においても赤潮が発生し、夜間に貧酸素水塊が形成されられると思われる。

4. 考 察

鈴木 (2002) は、貧酸素水塊の発生はベントスの斃死

等によって生態系および物質循環機能を変化させるだけでなく干潟の水質浄化機能を消失させることを示唆している。また、徳永ら (2003) は、干潟での貧酸素水塊の形成については、底泥の酸素消費が重要な役割を担っていることを明らかにしている。そこで、干潟上で貧酸素水塊が形成しないためには、底泥の酸素消費速度をどの程度に抑える必要があるかを現地観測結果や過去の室内実験結果をもとに評価する。解析では、DO の移流による水平フラックスに比べて鉛直フラックスの方が大きいと仮定し、基礎式に、

$$\frac{dC}{dt} = k(C_s - C) - \frac{\text{SOD}}{h} - \frac{R^*P}{h}$$

を用いた。ここでは、水表面からの再曝気、底泥の酸素消費、和白干潟におけるマクロベントスの優占種であるホソウミニナの呼吸が考慮されており、 C : DO 濃度 (mg/l)、 C_s : 飽和 DO 濃度 (mg/l)、 k : 再曝気係数 (h^{-1})、 SOD : 底泥の酸素消費速度 ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$)、 R : ホソウミニナの呼吸速度 ($\text{mg}/\text{gwet}/\text{h}$)、 P : ホソウミニナの現存量 (gwet/m^2)、 h : 水深 (m) である。飽和 DO 濃度と再曝気係数については、Lee ら (1991) と同様に、以

下の式で評価した。

$$C_s = 1.43[10.291 - 0.2809T + 0.006009T^2 - 0.0000632T^3] - 0.607(0.1161 - 0.003922T + 0.0000631T^2)S] \\ k = [3.9V^{0.5}/(3h - 0.8h^2)]^{1.5} + (0.728W^{0.5} - 0.317W + 0.372W^2)/(3h - 0.8h^2)(1.024)T^{-2}$$

ここで、 T : 水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 S : 塩分濃度 (%), V : 潮流流速 (m/s)、 W : 風速 (m/s) である。本研究では、水温、塩分濃度および潮流流速をそれぞれ、 30°C 、 33‰ 、 0.05 m/s に設定した。また、ホソウミニナの現存量と呼吸速度については徳永ら (2003) を参考にそれぞれ 325 gwt/m^2 、 0.06 mg/gwt/h とした。さらに、左辺については、現地観測結果より、夜間12時間における水柱 0.5 m での DO 濃度変化を 6 mg/l から 2.1 mg/l とした。ここで本研究では、柳 (1989) を参考に、貧酸素水塊の定義を貝類にとって危険な DO 濃度 2.1 mg/l とした。これらを用いて、鉛直一次元の解析を行った結果、和白天干潟上の水柱 0.5 m において貧酸素水塊を形成させないためには、平均的な底泥の酸素消費速度を $145\text{ mg/m}^2/\text{h}$ 以下に抑える必要があることが示唆された。児玉ら (2002c) は和白天干潟において現地観測を行い、物質収支を評価した結果、夏季の和白天干潟におけるタイダルブリズム内の平均的な酸素消費速度を $586\text{ mg/m}^2/\text{h}$ と見積もっている。また、徳永ら (2003) は、夏季の和白天干潟においてホソウミニナによる酸素消費量は $115\text{ mg/m}^2/\text{h}$ 、海水の消費する酸素量は $94.4\text{ mg/m}^2/\text{h}$ と見積もっている。この結果、底泥の酸素消費量は $377\text{ mg/m}^2/\text{h}$ と見積もられる。これらのことを考慮すると、和白天干潟での貧酸素水塊を抑制し、水質環境を改善するためには、底泥の酸素消費を大幅に削減する必要があると考えられる。

5. おわりに

干潟における栄養塩の季節変化に関する定期調査と干潟と周辺海域における DO 濃度の時間変化について現地観測を行った。以下に、得られた結果の要点を以下に示す。

- 1) 博多湾で優先する珪藻類 *Skeletonema costatum* のリンの半飽和定数 $0.68\text{ }\mu\text{M}$ より DIP が低いこと、 DIN/DIP がレッドフィールド比の16より大きいことから、春季の和白天干潟においては、リンが植物プランクトンの一次生産を制限している。
- 2) 今回干潟上で観測された貧酸素水塊は周辺海域から

輸送されているものではなく、干潟上での酸素消費過程によって形成されると推察された。

- 3) 和白天干潟のような過栄養海域に位置する干潟では、日中の日射量が高ければ、6月においても赤潮が発生し、夜間に貧酸素水塊が形成されることが示唆された。
- 4) 鉛直一次元の解析を行った結果、和白天干潟上の水柱 0.5 m において貧酸素水塊を形成させないためには、平均的な底泥の酸素消費速度を $145\text{ mg/m}^2/\text{h}$ 以下に抑える必要がある。

謝辞: 本研究を行うにあたり、九州大学大学院工学研究院の矢野真一郎氏、押川英夫助手、中央水産研究所の児玉真史氏および日本学術振興会特別研究員の鶴崎賢一氏には多大なる協力を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 桑江朝比呂・河合尚男・赤石正廣・山口良永 (2003): 三河湾の造成干潟および自然干潟に飛来する鳥類群集の観測とシギ・チドリ類が果たす役割, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1256-1260.
- 児玉真史・水田健太郎・松永信博 (2002a): 干潟における一次生産の空間分布, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1106-1110.
- 児玉真史・松永信博・水田健太郎・徳永貴久 (2002b): 和白天干潟における水質の動態に関する現地観測, 土木学会論文集, No. 720/VII-25, pp. 53-61.
- 児玉真史・徳永貴久・松永信博 (2002c): 干潟における水質の季節変化とその変動要因に関する研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1116-1120.
- 鈴木輝明 (2002): 貧酸素化が内湾の底生生態系および窒素循環に与える影響—三河湾における事例—, 陸水学会誌, 63, pp. 82-85.
- 徳永貴久・児玉真史・松永信博 (2003): 干潟の底生生態系が水質環境に及ぼす影響評価, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1076-1080.
- 中田喜三郎・中根 徹 (1986): 三河湾における懸濁態有機物, プランクトン, マクロベントスの化学組成と環境中の栄養素比, 公害資源研究所彙報, 16(1), pp. 45-58.
- 細川恭史 (1999): 干潟の水質浄化システムとその再生・造成の可能性, 沿岸海洋研究, 第36巻, 第2号, pp. 137-144.
- 柳 哲雄 (1989): シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ, 沿岸海洋研究ノート, 第26巻, pp. 141-145.
- Lee Joseph Hun-wei・平山彰彦・Lee Hok-shig (1991): 富栄養化した閉鎖性海域の短期的 DO 変動モデル, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 861-865.
- Lorenzen, C. J. (1967): Determination of Chlorophyll and Pheo Pigment, Spectrophotometric Equation, Limnology and Oceanography, 12, pp. 343-346.