

差し込みに伴う底層還元物質の巻き上げと水質悪化について

宗 景 志 浩*・長谷川 浩**・福家英乗***・大原 聡****

1. はじめに

夏季の浦の内湾は長期にわたって貧酸素化するため、底泥から栄養塩や還元物質が溶出する。その後、湾外水の差し込み（密度流）が発達すると、海面は黒色化した大規模な鞭毛藻赤潮が発生して上層の水質は著しく悪化し、しばしば漁業被害も生じる。

鞭毛藻赤潮の原因種でもある *Gymnodinium mikotoi* は、海底泥から供給される増殖促進物質に影響を受けたり、貧酸素化に伴って溶出する硫化水素によって、それまで生育を阻害していた銅イオン濃度が低下して増殖が進むという（岡市，1987）。また、夏季の東京湾で発生する青潮は、硫化水素を含む底層部の無酸素水が湾奥表層に浮上する現象（柿野ら，1987）で、アサリ的大量斃死が生じることもある。いずれも底層還元水（物質）が上層水中に浮上・拡散して水質を悪化させたり、赤潮プランクトンの増殖を促進させる点で浦の内湾の差し込み直後の現象に類似している。

本研究では、青潮の原因物質である硫化水素と、赤潮プランクトンの増殖の引き金とも言われるマンガン・鉄を中心に珪素・アルミニウム等の微量物質の分布を測定した。さらに、差し込みに伴う挙動と輸送について解析し、これらが底層から表層へ供給され、湾内の水質悪化に関与していることを明らかにしようとした。

2. 方 法

2.1 観 測

1995年8月11日，18日，9月7日，9日の4回，図-1に示す湾内7点，湾外1点で水温・塩分・溶存酸素(DO)・酸化還元電位(ORP)を表層より1m毎に測定し，4m毎に採水を行った。硫化水素(S^{2-} として)はメチレンブルー法，溶存態の鉄(Fe)及びマンガン(Mn)は原子吸光法で測定し，ろ過後フィルター上の懸濁態物質(鉄，珪素(Si)，アルミニウム(Al)など)については蛍光X線装置を用いて含有強度を測定した。これらの結

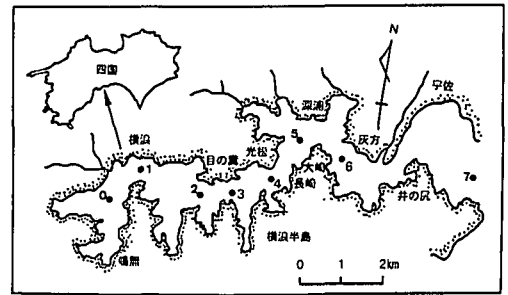


図-1 浦の内湾観測地点

果を用いて各物質の分布図を作成し，差し込み前後の挙動を調べた。なお，差し込み直後の水質悪化については，1992年8月27日，9月9日及び16日のORPとDOの観測結果を例示した。

2.2 差し込み時の物質輸送の推算法

差し込みに伴う底層微量物質の輸送と循環を明らかにするために6ボックスモデルを作成した。図-2に示すように湾内を水深11mで上下に，さらにSt.2とSt.3の間及びSt.6とSt.7の間で分割し，それぞれ湾奥，湾央，湾口側とする。各ボックスを①，②，③，④，⑤，⑥とすると，湾内における物質収支は以下ようになる。

$$QH_2 = QH + QH_4$$

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = QH_2(C_2 - C_1) + Q_{21}(C_2 - C_1) + r_1 q_1(C_3 - C_1) + R(C_0 - C_1) + P_1$$

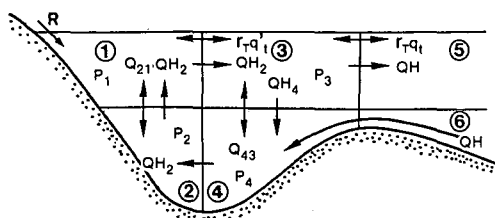
$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = QH_2(C_4 - C_2) - Q_{21}(C_2 - C_1) + P_2$$

$$V_3 \frac{dC_3}{dt} = Q_{43}(C_4 - C_3) + r_1 q_1(C_5 - C_3) - QH_2(C_3 - C_1) - r_1 q_1(C_3 - C_1) + R(C_1 - C_3) + P_3$$

$$V_4 \frac{dC_4}{dt} = QH_2(C_6 - C_4) - QH_4(C_6 - C_3) - Q_{43}(C_4 - C_3) + P_4$$

ここに， t は時間， C は指標物質平均濃度， P は負荷量(増加+減少)， V は体積，数字(1~6)はボックス番号である。 R ， C_0 はそれぞれ淡水流入量と淡水中の指標物質平均濃度である。 QH は差し込み流量， Q_{21} は湾奥側の， Q_{43} は湾口側の鉛直混合量である。 QH_2 は湾央断面で

* 正会員 農博 高知大学助教授 農学部生産環境工学科
 ** 理博 京都大学助手 化学研究所
 *** 理修 高知大学大学院 理学研究科
 **** 高知大学大学院 理学研究科



図一2 物質輸送モデル

の差し込み流, QH_i はボックス③④での差し込みに伴う連行流(下降流)を表す。 q_i 及び q'_i は湾口及び湾央部断面での潮流流量で、各断面以奥の水面積と潮位差で与える。 r_T は潮汐による海水交換率である。

計算は1995年8月11日～18日、8月18日～9月7日及び1995年9月7日～9日の期間について行った。

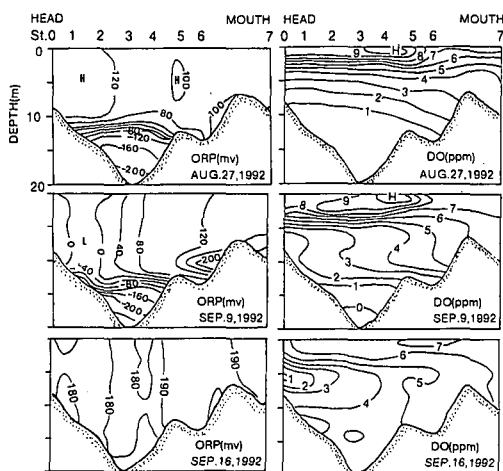


図-3 差し込み前後の ORP 及び DO の縦断分布

3. 差し込み前後の海洋環境

3.1 差し込み直後の水質悪化

図-3 には 1992 年 8 月 27 日、9 月 9 日及び 16 日における ORP と DO の縦断分布を示した。

8月27日には表層部のDOは過飽和となっているが、8m以深では1ppm以下の貧酸素水塊が広く形成され、底層部には硫化水素が蓄積されていた。ORPはDOの豊富な表層では100mv以上の値を示したが、無酸素水塊

中では -200 mV にも低下した.

9月9日頃から差し込みが発達して、底層部の貧酸素水塊は縮小し始め、湾奥斜面上の St. 2~3 では透明度はむしろ上昇した。しかし、海面は黒色化し ORP は底層から表層まで著しく低下 ($-20 \sim 0$ mv) した。差し込みはさらに進み、9月16日には底層部の貧酸素水塊は完全に消失し、湾奥部の水深 5 m 付近から低酸素水が湾口側に舌状に広がった。ORP は湾内全域で 180 mv 以上に回復

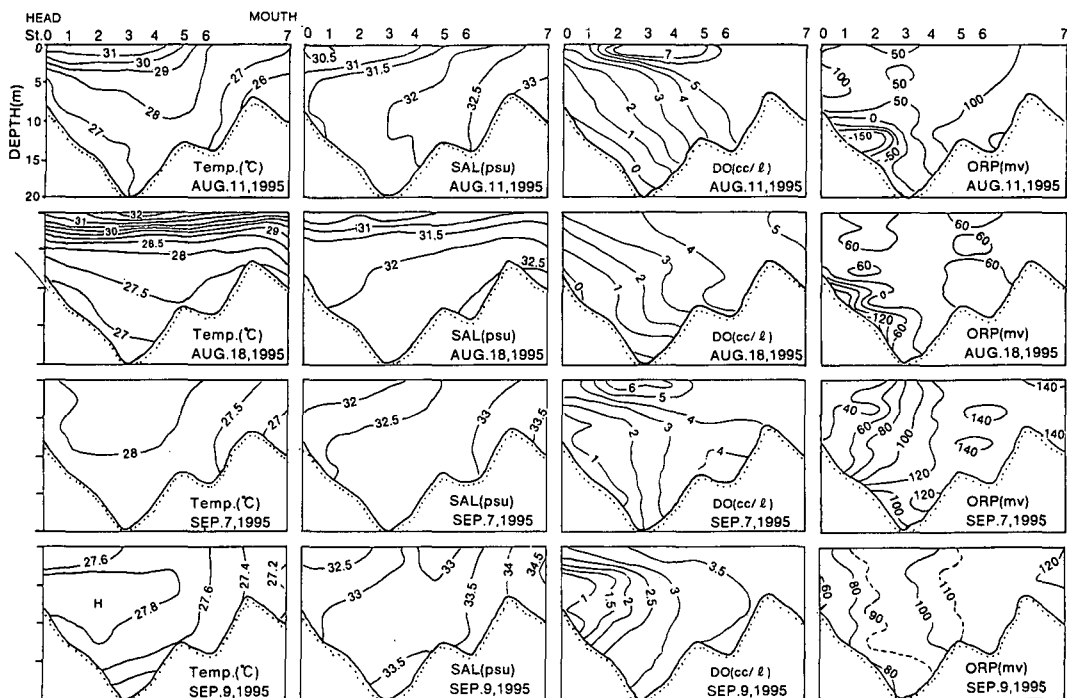


図-4 差し込み時の水温・塩分・DO・ORPの縦断分布

したが、水色は依然として黒色を帯びていた。その後9月21日には、光松(St.4)から湾口側では海面は黄褐色となり悪臭を放っていた。しかし9月26日にはこれらも消失し、水色も回復した。

浦の内湾では、このように差し込みを境にDO環境ばかりでなく、水色、ORP、透明度などにも大きな変化が見られ、水質の悪化を繰り返す。

3.2 水温、塩分、DO、ORP

図-4に1995年8月11, 18, 9月7日及び9日の水温、塩分、DO及びORPの湾内縦断分布を示した。

1995年度は、7月以後降雨が少なく晴天が続いたため、湾内の水温と塩分は例年に比べ高めに推移し、8月中旬まで表層部には強い成層が形成された。水温は8月下旬以後急速に一様化した。

塩分分布では、8月11日から18日にかけて32~32.5psuの高塩分水が湾内底層に進入しており、湾外水の差し込みが生じている。その後9月7日から9日にかけても塩分はわずかに上昇し、等塩分線も湾内底層に向かって下降していることから、差し込みが継続していると思われる。8月13日には140mm/日のまとまった降雨があったため湾奥から湾中央にかけて表層部はやや低塩分化し、表層直下に弱いながら塩分成層が形成されている。

DO分布をみると、8月11日には湾央表層部に高濃度域が広がっている。これは、上旬に湾奥部に見られたプランクトンパッチ(クロロフィル高濃度域)が湾中央部に移動し、酸素を生産したためであろう。一方湾奥から湾中央部にかけて等DO線は著しく下降し、底上部には1cc/ℓ以下の強い貧酸素水塊が形成されている。しかし、8月18日から9月9日にかけて湾口側底層部からDO濃度が上昇し、9日の分布には1cc/ℓ以下の水塊は湾奥部の水深5~10mに押し込められ、水深5m付近から2cc/ℓ以下の貧酸素水塊が湾口側に舌状に張り出している。これより、差し込みによって湾口側ではDOが補給されるが、底層部の貧酸素水が湾奥へ押し込められることを示している。

差し込み前後におけるORP分布の特徴は、1992年度(図-3)に見られたほど明瞭ではなかった。しかし、1995年度も差し込みが発達した8月11日には還元水塊は湾奥斜面上に押し上げられ、差し込み先端部の目の糞付近(St.2-3)では表層付近までORPは低下し、海面は黒色化した。

3.3 溶存態微量物質(S^{2-} , Mn)

図-5には差し込み前後の S^{2-} 及びMnの縦断分布を示した。これらの微量物質は貧酸素化の進行に伴って底泥上に溶出・蓄積されるが、 S^{2-} は酸化されやすいため、差し込みによってDOが補給されると速やかに失われる。 S^{2-} は、青潮(Takeda et al., 1991, 柿野ら, 1987)

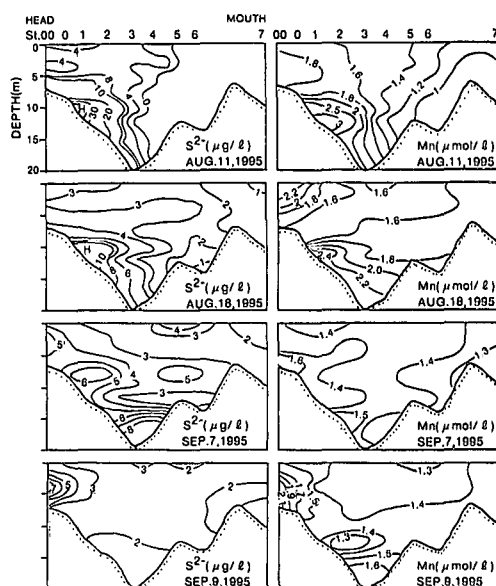


図-5 溶存態微量物質(S^{2-} , Mn)の縦断分布

が発達する東京湾では2~5ppm, 浦の内湾でも2~3ppm(mg/ℓ)の高濃度が観測されている(宗景ら, 1992)。

S^{2-} は、1995年度は貧酸素化の進んだ7月~8月中旬にかけて湾奥斜面底上部に高濃度域が見られるが、濃度はかなり低い。8月11~18日の分布では、差し込みによってDOが補給されたため、 S^{2-} は湾口側では失われている。差し込みはその後徐々に継続したため、9月7日、9日には高濃度域はさらに湾奥部に押し込められ、わずかながら表層部にも巻き上げられている。

Mnも S^{2-} に類似した分布を示した。すなわち、貧酸素水塊のあった8月上旬までは湾奥斜面底上部に高濃度域が見られるが、差し込み後の8月18日には、これらは巻き上げられ湾奥上層に移っている。逆に湾口側底層部では濃度は低下している。

3.4 懸濁態微量物質(Fe, Al, Si)

図-6には、蛍光X線分析装置で測定した懸濁態のFe, Al, Siの含有強度を示した。還元環境下で溶出したFe, Mnなどの溶存物質は、差し込みによってDOが補給されたり、表層の酸化環境下に巻き上げられたりすると、酸化されたり、植物プランクトンに吸収されたりしていずれも懸濁態に変わる。

Fe, Al, Siなどは8月11日には湾奥底上部にやや高濃度域がみられる。差し込み後の8月18日には湾内の濃度はいずれも低下しているが、湾口側底上部(St.5)には高濃度域が生じている。

9月7日には再び湾中央底上部に高濃度域が現れ、表層部にも湾奥から湾中央に向かって移動する高濃度域がみられる。差し込みによって巻き上げられた溶存態の微量物

質が湾奥から湾央表層部でプランクトンに吸収され、赤潮を形成しながら湾口側に移動し、St. 3~5の滞留域(宗景ら, 1995)で沈降(8月18日の分布)した後、再び差し込みに乗って湾央部底層に移動したものの(9月7日の分布)と考えられる。

4. 差し込みによる物質輸送

4.1 海水輸送量

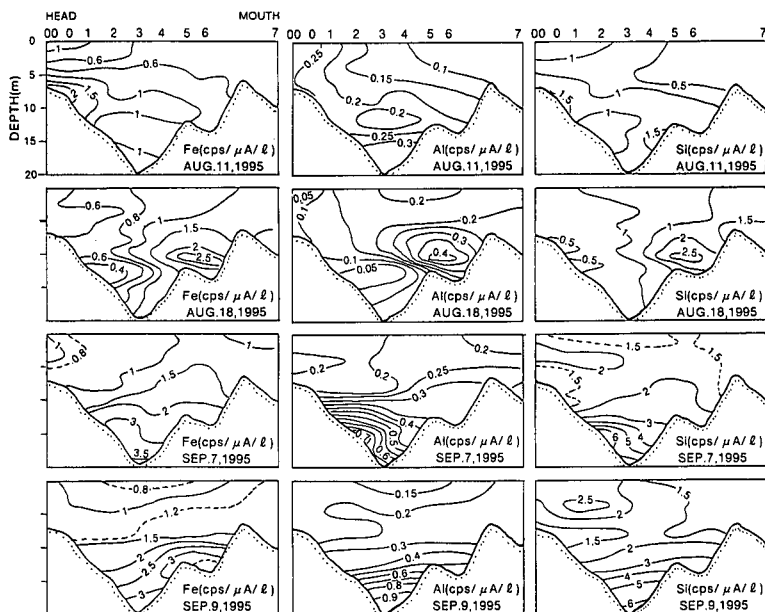
表一に各ボックス間の海水輸送量を計算期間ごとに示した。比較のために同様のモデルで求めた1993年8月5日~17日の結果(宗景ら, 1996)も載せた。95年度の差し込み海水量QHは $4.13 \sim 4.92 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$ で、93年度の推算値の1.8倍程度とかなり大きい。連行の発達する8月11-18日及び9月7-9日の期間には、底層部を湾口側から湾奥側へ輸送され、さらに湾奥底層から上層へ巻き上げられる海水量QH₂が差し込み量QHを上回る。

4.2 溶存態微量物質(S²⁻, Mn)の輸送

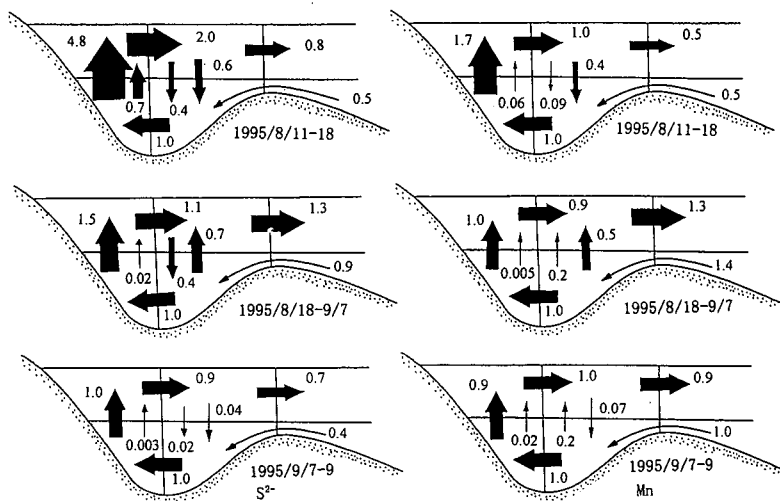
図一七には、下層部を湾口側から湾奥側へ運ばれる溶存態のS²⁻とMnの量を1として、各ボックス間の輸送量(比)を矢の太さと数字で示した。

8月11日~18日の期間には、湾奥部下層から上層への輸送比がそれぞれ4.8及び1.7で、もっとも卓越し、ついで表層部を湾奥から湾口側へ輸送される量(輸送比=2.0及び1.0)が大きい。これより貧酸素化直後には大量の溶存態の微量物質が湾奥表層に巻き上げられることが分かる。これらは表層部を湾口側に輸送される間に酸化されたり、植物プランクトンに吸収されたりして減少するものと思われる。

これらの輸送量(比)は、8月18日~9月7日及び9月7日~9日の期間には減少するが、底層間の輸送量とほぼ等量が湾奥部で巻き上げられ、表層部を湾口側に輸送されている。



図一六 懸濁態微量物質(Fe, Al, Si)の縦断分布



図一七 溶存態微量物質(S²⁻, Mn)の輸送

表一 海水輸送量(単位: $\times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$)

	QH	QH ₂	QH ₄	Q ₂₁	Q ₄₃
1995 8/11-18	4.13	7.25	3.12*	2.18	5.06
8/18-9/7	4.39	2.63	1.77	0.11	4.91
9/7-9/9	4.92	5.15	0.24*	1.24	14.80
1993 8/5-17	2.60	2.00	0.60	0.20	2.20

*連行流(下降)

4.3 懸濁態物質(Fe, Al, Si)の輸送

図一八には、下層部を湾外から湾口側ボックスへ輸送

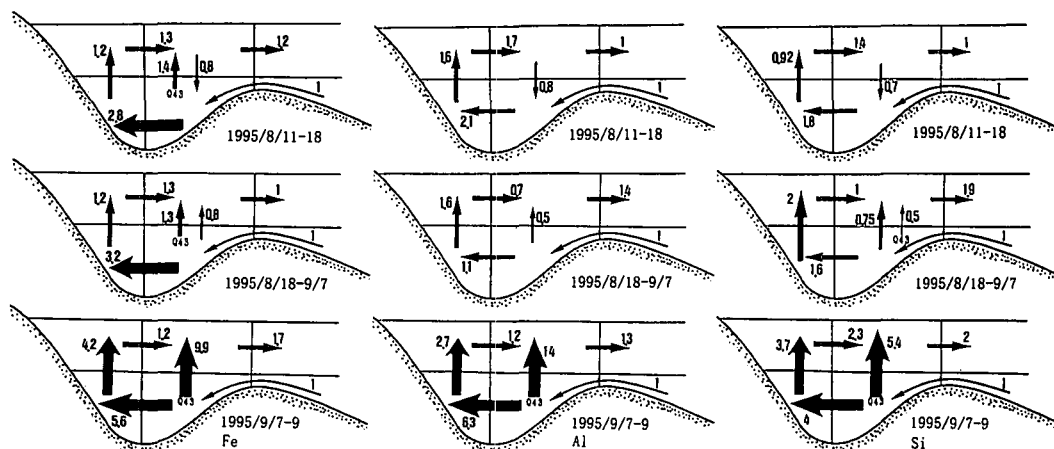


図-8 懸濁態微量物質 (Fe, Al, Si) の輸送

される懸濁態の Fe, Al, Si の量を 1 とし、各ボックス間の輸送比を矢の太さと数字で示した。

差し込み直後の 8 月 11～18 日、8 月 18 日～9 月 7 日の期間には、湾外から湾内底層に運ばれる輸送量 (比) に対し、湾奥底層への輸送量及び湾奥底層から上層に巻き上げられる量は 1～2 倍程度にすぎないが、差し込みによる DO 補給の進んだ 9 月 7～9 日の期間には 2.7～4.2 倍に増大している。これらは溶存態の S^{2-} や Mn とは対象的な輸送特性を示した。

5. 結 論

本研究で得られた結果は、以下のように要約される。

① 1995 年度は、7 月から 8 月上旬にかけて底層部の貧酸素化が進んだ。底泥から硫化水素やマンガンを溶出し、底層部の ORP は著しく低下して底層に還元水塊を形成した。

② その後 8 月 11 日～14 日に大規模な差し込みが発生したため、これらは湾奥上層へ巻き上げられ、硫化水素、マンガンを、溶存鉄などの濃度は底層では低下し、湾奥表層では高濃度水域が形成された。また、ORP も低下し、水質の悪化が認められた。

③ 硫化水素の巻き上げ量は、差し込みによって湾口側底層から湾奥底層に輸送された量の 4.8 倍にも達した。マンガンを底層間の輸送量の 1.7 倍が湾奥上層に運ばれた。

④ 8 月中旬～9 月上旬にかけて DO が補給されたため貧酸素化が弱まり、懸濁態鉄の濃度が高まった。この直後に発生した差し込みによって、懸濁態鉄は、湾内に流入した量の 4 倍が湾奥底層から上層へ、10 倍が湾口側底層から上層へ輸送された。この量は、貧酸素化直後の差し込みによる輸送量よりもはるかに大きい。これは、

貧酸素化直後は 2 価の溶存態鉄が多いのに対し、DO が補給され貧酸素化が弱まった時期には、溶存態鉄は酸化され 3 価の懸濁態鉄となるためである。その後、懸濁態鉄は上層を湾口側に運ばれ、湾口側滞留域で沈降して底層に高濃度水塊を形成した。

⑤ 珪素・アルミニウムは鉄と吸着した形で存在しているため、鉄の挙動に類似していた。

以上の結果、無酸素環境下で浦の内湾底層部に生成された還元物質は、湾外水の差し込みが始まると溶存態として湾奥～湾中央部の上層に巻き上げられるが、底層部に補給される DO によって酸化され、懸濁物となって輸送される。これらは差し込み直後の水質悪化や赤潮発生に関与しているものと考えられる。

最後に、蛍光 X 線分析装置を使用させて頂いた本学理学部付属水熱実験所長山崎伸道教授に感謝します。

参 考 文 献

- 岡市友利 (1987): 赤潮の科学, 岡市友利編, 恒星社厚生閣, pp. 32-33.
- 柿野 純・松村 卓・佐藤善徳・加藤信明 (1987): 風による流れと背潮との関係, 日水誌, 53 巻, 8 号, pp. 1475-1481.
- 宗景志浩・家田智之 (1992): 浦の内湾における硫化水素の溶出が貧酸素化に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 981-985.
- 宗景志浩・田村圭一・中川倫寿 (1995): ADCP 観測による浦の内湾の差し込みの流れ構造と浮遊物質分布, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 1091-1095.
- 宗景志浩・中川倫寿・長谷川浩・井関徹也 (1996): 浦の内湾における差し込み直後の水質悪化と物質輸送について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1106-1110.
- Takeda, S., Y. Nimura and R. Hirano (1991): Optical, Biological, and Chemical Properties of Aoshio, Hypoxic Milky Blue-Green Water, Observed at the Head of Tokyo Bay, Journal of Oceanographical Society of Japan, Vol. 47, pp. 126-137.