

差込み現象が浦の内湾の海洋環境に及ぼす影響

宗 景 志 浩*・木 村 晴 保**

1. はじめに

水質汚濁・貧酸素化・赤潮など、都市化と産業の発展に伴う環境破壊が各地の内湾や沿岸域に広がり、深刻な問題となっている。そのため、例えば貧酸素化についても、その実態だけでなく原因や機構に関する研究がかなり蓄積されている (Takeoka, 1986; 武岡, 1989; 中村ら, 1988; 佐々木ら, 1977; 佐々木, 1989)。

浦の内湾でも、毎年6月初旬から9月末にかけて 2 ppm 以下の強い貧酸素水塊が形成され、しばしば底棲生物や養魚に大きな被害を及ぼしている。しかし、貧酸素水塊はその間定常的に維持されるのではなく、湾外水の差込み(密度流)が発達する度に消滅し、これが弱まれば再び形成されるなど複雑な経過をたどる(宗景ら, 1989)。また、1988年9月初旬には、差込み後に強い貧酸素水塊と大規模な赤潮が発生して、養殖ハマチやアサリの大量斃死が生じた。

ここでは、差込みと鉛直混合による 10 m 以深の海水交換を二層ボックスモデルを用いて推算し、これらが浦の内湾の貧酸素水塊の消長にどのような影響を及ぼしているかを明らかにする。さらに、1988年9月初旬の海況を差込みを考慮して解析し、養殖ハマチの大量斃死の原因となった大規模な貧酸素化の機構を明らかにする。

なお、底層部の海水交換の推算に用いたデータは、

1987年4月からほぼ1年にわたる観測から得(宗景ら, 1988)、1988年度の環境異変時のデータは、新たに高知県(1989)の提供を受けた。これらの観測点を図-1に示した。

2. 差込み前後の海洋構造

1987年8月3日および17日の水温、塩分、密度および DO の湾軸に沿う縦断分布を図-2に示した。これらは、大潮時の8月4日から10日にかけて発達した差込みの前後の海洋構造である。

8月3日の水温は、湾内の表層直下で 27°C~29°C、底層で 25°C 程度である。湾口部 (St. 11) にはやや高温 (27°C) の水塊が見られるが、さらに湾外に行くと、これより水温は逆に低くなる。湾内に少し入った St. 9 付近の下層水温は不連続で、等値線はこの付近で降下している。底層部は8月17日には 27~28°C に上昇している。

塩分は水面直下に 28~29‰ の躍層が見られるが、中層以深では塩分成分層は弱い。また、湾口から 30~31‰ の高塩海水が底層を這うように差し込んでいる様子が見られる。その後8月17日には湾内表層の低塩水は流出し、全層 30~31‰ に高塩化した。

密度は塩分分布に類似している。8月3日には水面直下でやや強い密度躍層 ($\sigma_t=16\sim18$) が見られるものの、

中層以深の密度は $\sigma_t=18.5\sim19.5$ で、成層は弱くなっている。 $\sigma_t=19$ の等値線は湾内ではほぼ水平であるが、湾口部の St. 11 に近付くにつれて急激に水面に近付き、St. 11~13 の下層には高密度水塊 ($\sigma_t=20$) が見られる。8月17日には、湾内は $\sigma_t=18\sim19$ と高密度化している。

一方、湾内の DO の分布は水温のそれに類似している。8月3日には、St. 7 以奥の底層に 1~2

ppm の貧酸素水が広く分布しており、中層部の等値線は湾中央 (St. 7) から湾口側 (St. 9) にかけて下層に若干

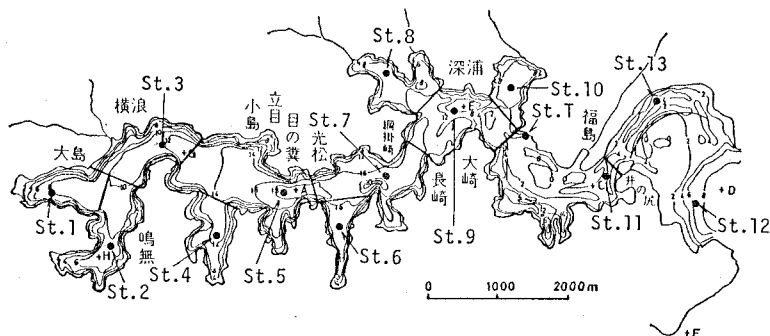


図-1 浦の内湾の地形と観測点

* 正会員 農修 高知大学助教授 農学部栽培漁業学科

** 正会員 農博 高知大学教授 農学部栽培漁業学科

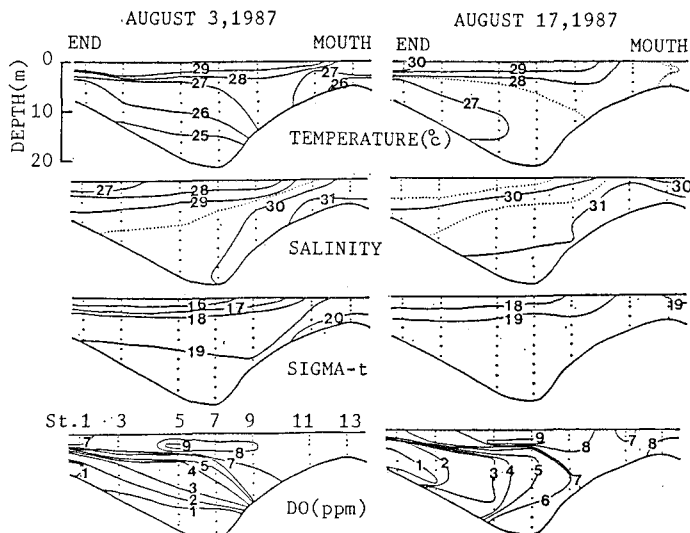


図-2 差込み前後の海洋構造

沈み込んでいる。8月17日には、高濃度のDOを含む水塊が湾中央部の底層に潜り込む様子が明瞭に見られる。逆に湾奥から湾口側に向かって中層～表層を貧酸素水塊が舌状に張り出し、湾口方向に拡張している様子が窺われる。

3. 湾内底層部の海水交換の推算法

3.1 差込みモデル基礎式

図-3に示すように湾内を水深10m(湾外は6m)で上下二層に分け、各ボックスを①, ②, ③, ④と表示する。 ΔT 期間に潮汐によって湾に流入した海水量を q_t 、湾口での潮汐交換率を r として、湾内上層①に流入した海水量を $Q_{13}(=Q_{31}=rq_t)$ で与える。差込みによって湾外下層④から湾内下層②に流入した海水量を Q_H で表わす。差込みを移流として扱うため、等量の海水量 Q_H が②から①へ、さらに①から③へ移動することとする。また、ボックス①と②の間での物質輸送は拡散(鉛直混合)と移流(差込み量 Q_H に等しい湧昇)を考慮し、拡散による海水交換量を $Q_{12}(=Q_{21})$ で表わすと、ボックス①と②物質収支式として次式を得る。

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = rq_t(C_3 - C_1) + Q_{12}(C_2 - C_1) + Q_H(C_2 - C_1) - C_1 R + P_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = -Q_{12}(C_2 - C_1) + Q_H(C_4 - C_2) + P_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $C_1 \sim C_4$ は各ボックスの指標物質平均濃度、 R は淡水供給量、 P は物質負荷量、 V は体積、 t は時間である。また、 Δt 期間に湾に流入した海水量 q_t は、潮位差 η と湾内水面積 S とから与える。St. 9 以奥を湾内として平均濃度を求め、湾外塩分は St. 12 のデータを用いた。

3.2 潮汐交換率 r の与え方

指標物質濃度 C (塩分) と淡水供給量 R を与え、 Q_{12} および Q_H を未知数として式 (1), (2) を解くためには、さらに湾口での潮汐交換率 r を与えねばならない。ボックスモデルではボックス①と③の間の拡散係数を D_{13} 、輸送係数を Q_{31} 、 Q_{13} 、潮汐交換率を r_{13} とすると、拡散係数と輸送係数との間には次式が成り立つ(木村ら, 1986)。

$$D_{13} = \frac{L_{13}}{A_{13}} \{Q_{31} + r_{13}(Q_{13} - Q_{31})\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 A_{13} は①と③の境界面の面積、 L_{13} は①と③の中心間距離で、それぞれ 747.5 m^2 、 $5.24 \times 10^3 \text{ m}$ とする。いま、 $Q_{13} = Q_{31} = rq_t$ と仮定し、水面積を 10^7

m^2 、平均水位差を 1 m とすると、 $q_t = 222.22 \text{ m}^3/\text{sec}$ となる。それゆえ上式は、

$$D_{13} = 1.56 \times 10^7 \times r \quad (\text{cm}^2/\text{s}) \quad \dots\dots\dots (3')$$

となる。

また、海洋での水平拡散係数は次式で表わされる(宇野木, 1984)。

$$K = 0.01 \times L^{3/4} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 L は現象のスケールで、単位は C.G.S. 単位系を用いる。これに従い、 L を湾軸長 10.24 km にとると、浦の内湾の水平拡散係数は、 $K = 1.03 \times 10^6 \quad (\text{cm}^2/\text{s})$ となる。

そこで、式 (3') および (4) を等置して潮汐交換率を求めると、 $r = 0.066$ となる。この値は、前報(宗景ら, 1988)で推算した二層ボックスモデルによる差込みのない時期の平均潮汐交換率とも近似していたため、それに近い $r = 0.06$ を用いることにする。

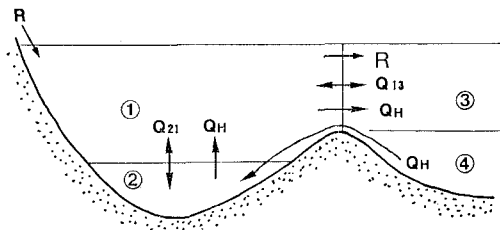


図-3 差込みを考慮した海水交換モデル

4. 推算結果とその考察

4.1 底層部の海水交換量

図-4(a)には、下層ボックス②の海水交換量の季節変化を示した。差込みによる海水交換量 Q_H は、春冬季には $0.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{hr}$ と小さいものの、夏季には $2 \sim 3 \times 10^5$

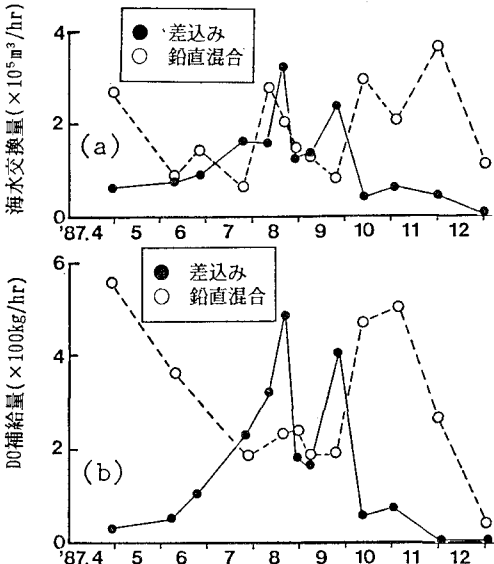


図-4 海水交換量および DO 補給量

m^3/hr 程度に増大している。差込みは潮汐振動に対応して起こるが、潮流流のような往復流とは異なり、移流による海水交換が期待できる。いま、成層期の差込み量を $2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{hr}$ とすると、10 m 以深の底層海水 (容積 $V = 161.811 \times 10^5 \text{ m}^3$) を差込みによって交換するには僅かに 3.4 日で足りる。一方、鉛直混合による海水交換量 Q_{12} は、春秋季には $3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{hr}$ 程度に増大し、底層部での成層化が強まる 6~7 月には $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{hr}$ 程度に減少する。

4.2 底層部への DO 補給量

差込みと鉛直混合による湾内底層部への DO 補給量の季節変化を図-4(b) に示した。これらは式 (2) の右辺第 1, 2 項で推算できるが、いずれも DO 濃度差と海水交換量に比例する。6~9 月には、差込みによって多量の DO が下層に輸送されるが、その量は春秋季の鉛直混合による DO 補給量に匹敵する。一方、鉛直混合による輸送は成層化の始まる 5 月頃から減少し始め、7, 8 月には 200 kg/hr まで低下するものの、DO 濃度差が大きいため完全に消失することはない。秋季 (10, 11 月) には 400 kg/hr と再び増大する。

なお、湾口から St. 9 の範囲に濃密に分布するアサリによる DO 消費量はかなり大きいことが分かったが (高知県水産試験場, 1988), 正確な季節変化までは推算できない。そこで、St. 9 の DO 値を差込み海水の DO 値とすることでアサリの影響を除き収支を求めた。

4.3 貧酸素水塊の消長に及ぼす差込みの影響

浦の内湾の底層部の DO 濃度は 5 月ごろから低下し始め、6 月初旬には 1 ppm 以下の強い貧酸素水塊に発達する (宗景ら, 1989)。このころの海洋構造を見ると、5 月頃から水面下 10 m 付近で密度成層が生じるため、鉛直混合によって底層部へ輸送される海水と DO は、それぞれ循環期の 40% および 50% 程度に減少し、周年を通じて最も小さくなる。また、6 月頃に水温上昇や投餌量の増加によって DO 消費活性が増大するため、鉛直混合だけでは底層部の DO 消費を賄うことはできない。

しかし、6 月中旬からは差込みによる補給が始まる。差込みは夏季の大潮時に発達し、多量の DO が底層部に運ばれる。両者による底層への DO 補給は循環期のそれに匹敵する。そのため、差込みがあれば、湾中央部から湾口側では底層の DO が上昇し、一時的に DO 環境は改善されるが、差込みの及ばない湾奥側では貧酸素状態が長く続く。また、差込みは底層の水温を $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 上昇させ、海水や底泥の DO 消費活性を高める。さらに、それまで底層にあった貧酸素水を浮上させ、湾奥に押し込めようとする。そのため、中層から表層の DO 消費を高めるうえに、差込みが弱まれば、湾奥に押し込められた貧酸素水は湾口方向に流出し始める。そして次の小潮時には再び貧酸素化すると考えられる。

差込みは秋季になると弱くなり、かわりに鉛直混合が卓越するようになる。鉛直混合は 10 月から 12 月頃まではきわめて活発で、多量の DO が底層へ補給されるため、やがて DO は湾内全域で一様化し、貧酸素化が解消される。

5. 差込みに伴う異常環境現象

浦の内湾では、1988 年 9 月 5 日から 7 日にかけて、湾中央部を中心に全養魚の 20% (10 万尾) にのぼる大量の養殖ハマチが斃死した (高知県, 1989)。ハマチの死因は貧酸素化によるもので、このような事例は過去にも数回 (1981 年, 1971 年) 同時期に発生したが、予測が困難であるため、それに充分対応した観測ができず、原因と発生機構を解明するには至っていない。

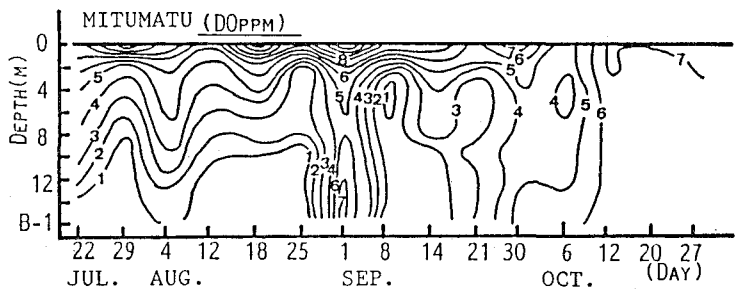


図-5 光松における DO 鉛直分布の季節変化

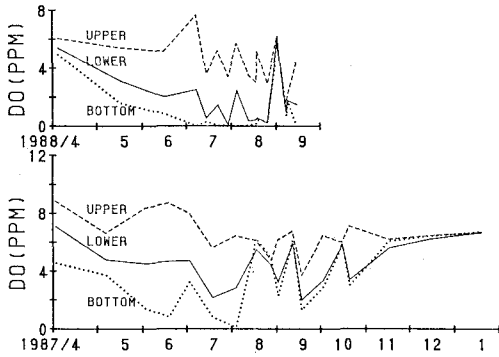


図-6 光松の平型 DO 濃度の季節変化 (1987, 1988 年)

5.1 1988 年成層期の海象および気象

湾中央部 (光松) での DO 鉛直分布の季節変化を図-5 に示した。8 月末には底層部の DO 上昇と全層にわたる DO の一様化が見られる。このような水質の一様化は、水温や塩分にも見られ、典型的な差込み現象による特徴と考えられる。

図-6 には、1987 年および 1988 年の光松付近の DO 濃度の季節変化を比較して示した。1987 年に比較して、1988 年は平均 DO 濃度で 2 ppm 程度低い。これには、①夏季の日射量が 1987 年や平年値に比較して明らかに少なく、②植物 Plankton の量も 1987 年の 40% 程度と少なかったこと、③ 1987 年は底層への差込みが 6 月ごろから頻繁に見られたが、1988 年度は 8 月末までなかったことなどが原因となっている。このように 1988 年度は気象と海象の両面で DO 生産が不足し、湾全体が長期にわたって還元状態に置かれたため、とくに底層部での有機物分解が充分行われなかったと考えられる。

5.2 差込みに伴う異常環境とその発生機構

図-7 は 1988 年 8 月 25 日から 9 月 6 日にかけて環境が急変した頃の DO と塩分の縦断分布を示している。

塩分は 8 月 25 日には表層で 28‰、底層で 31‰ である。水面下 16 m 付近に見られる 31‰ の等値線は湾奥に向かって海底に潜り込むように傾斜しており、8 月 29 日にはこの等値線は水深 8 m 付近まで上昇している。そして、9 月 1 日には底層部に 32‰ の等値線が現れ、この等値線は 9 月 5 日にはさらに上昇し、湾全体が 30‰ 以上に高塩化している。しかし 9 月 6 日には降雨により表層は急激に低塩化し、底層でも 32‰ の等値線が前日に比較してやや低下している。湾口側のデータがないため差込み量を推算することはできないが、塩分等値線の変化から見ても、差込みは大潮となる 8 月 25 日頃から始まり、9 月 1 日頃にピークとなり、その後弱まりながら 9 月 5 日頃まで続いたと推測される。

一方、DO は 8 月 25 日には表層は 8 ppm 以上と高濃

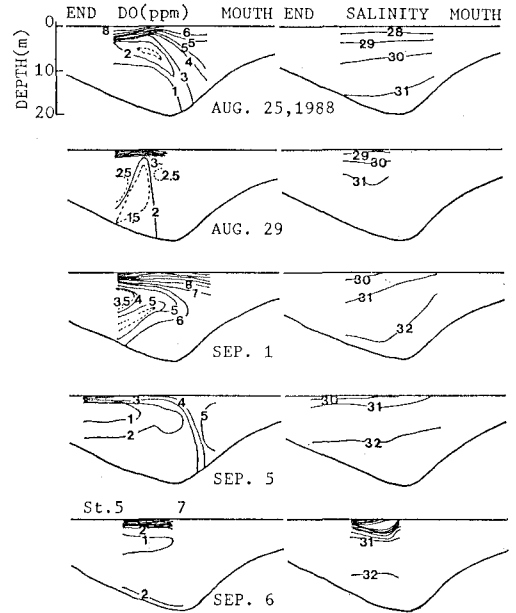


図-7 海洋環境異常時の DO および塩分縦断分布

度であるが、8 m 以深には 1 ppm の強い貧酸素水塊が見られる。しかしいずれの等値線も湾口側で降下し、差込みによる湾外からの DO の補給がすでに始まっていることが分かる。8 月 29 日には 2 ppm の等値線は湾奥側に若干移動していることから、DO の補給が進んだと思われるが、塩分の等値線にみられるほど明瞭ではない。9 月 1 日には差込みによる DO 補給は目の糞付近まで進み、海底部は 6 ppm 以上、中層部は 3~4 ppm となった。しかし、9 月 5 日には一転して差込み初期の 8 月 25 日頃の分布に逆戻りし、1 ppm 以下の強い貧酸素水塊が表層直下 2 m 付近に見られる。

8 月 25 日頃から差込みによって多量の DO が運ばれ、9 月 1 日頃には一旦高濃度化したものの、これらの DO は差込みが弱まる 9 月 1 日から 9 月 5 日にかけて消費されてしまい、再び貧酸素化する。しかも差込み前よりもさらに浅い水深まで、かつ広い範囲できわめて大規模に発達した。これは、①差込みが下層の水温を 1~2°C 上昇させ DO 消費活性を高めたうえに、②それまで底層にあった貧酸素水を浮上させ中層~表層での DO 消費を促進させ、さらに、③差込みによって湾奥に押し込められていた貧酸素水が表層直下を流出したことなどが原因と考えられる。

1987 年の場合も、差込み直後の 9 月 11 日から 17 日 (図-6) にかけて、DO 濃度の短期間の急激な減少が見られる。光松付近での水塊の DO 濃度の経時変化からこれらの期間の水塊の見かけの DO 消費速度を推算し、表-1 に示した。1987 年度の場合、見かけの DO 消費速度は推算式 (宗景ら, 1989) から求めた海水の真の消

表一 光松における見かけの DO 消費速度
(mg/m³/hr)

年度・期間 層	1987 9/11~9/17	1988 9/1~9/5
0 ~10m	21.1	42.7
10m~Bottom	27.2	36.7
全層平均	23.2	40.6

費量にほぼ等しく、全層平均で 23 mg/m³/hr となった。しかし 1988 年度の場合は、1987 年の同時期に比較して 2 倍も大きい。また、差込みのピークを過ぎたとは言え、実際には差込みや鉛直混合による補給がさらに加わるため、真の DO 消費はこれよりさらに大きくなる。

6. ま と め

夏季の浦の内湾の底層部の海水交換と DO 収支を差込み現象を考慮したモデルから推算し、差込みが湾の海洋環境に及ぼす影響を調べた。さらに、1988 年 9 月初旬に生じた養殖ハマチの大量斃死の原因を差込み現象から探った。

(1) 浦の内湾では、表層水温の上昇にともなって、4 月頃から下層部に密度躍層が形成されるが、これにやや遅れ、5 月頃から湾中央部の最深部で DO は減少し始め、6 月初めには 1 ppm 以下のきわめて強い貧酸素水塊に発達する。貧酸素水塊は、その後 9 月末まで断続的に形成されている。

(2) 成層期の浦の内湾では、大潮期の上げ潮時に高密度の湾外水が湾内底層部に浸入する（差込む）が、湾口部が浅いため、これらの海水は底層部にトラップされ、かわりに下げ潮時には低密度の上層水が流出する現象が見られる。差込みは、湾内に比較し湾外が高塩分となった場合に発達する。

(3) 浦の内湾底部の貧酸素化は、① 6 月初旬に鉛直混合による DO 補給が循環期の約 50% に低下したことと、② 有機物負荷（投餌量）の増加や水温上昇による DO 消費速度の増大に起因する。

(4) 夏季に差込みがあれば、底層部の貧酸素水塊は一時的に消滅するが、差込みは底層水温を上昇させ DO 消費活性を高めるうえに、それまで底層にあった貧酸素水

を浮上させ、さらに湾奥部に押し込める。そのため、中層から表層の DO 消費を高め、差込みが弱まれば、湾奥に押し込められた貧酸素水は湾口方向に流出し始める。これらが原因となって、次の小潮時にはさらに大規模に貧酸素化が進むと考えられる。

(5) 1988 年度は豪雨が続いたため差込みが少なく、湾内底部には強い貧酸素水塊が長期にわたって発達していた。ところが、8 月 25 日頃から始まる差込みによって多量の DO が補給され、9 月 1 日には底層部の貧酸素水塊は一時消滅した。しかし差込みが弱まると、(4) の機構によって以前よりさらに大規模に貧酸素化し、養殖ハマチの大量斃死が発生したと推論された。

謝 辞： 本研究の基礎データを得るに際し、高知県水産試験場漁場環境科の村田宏科長、森山貴光・田島健司両主任研究員から多大な協力を頂いた。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 宇野木早苗 (1984): 内湾の環境科学, 上巻, ——内湾の物理環境——, 西条八束編, 培風館, 167 p.
- 木村晴保・宗景志浩・渡辺久芳 (1986): 高知県古満目湾に適用したボックスモデルの精度について, 日水誌, 52 巻, 8 号, pp. 1359~1363.
- 高知県水産試験場 (1988): 昭和 62 年度赤潮対策技術開発試験報告書, 146 p.
- 高知県 (1989): 浦の内湾漁業環境緊急対策調査報告書, 68 p.
- 佐々木克之・佐藤善徳・松川康夫 (1977): 渥美湾の貧酸素水塊の形成機構, 躍層下部の酸素収支, 東海区水研報告, 89 号, pp. 43~56.
- 佐々木克之 (1989): 三河湾における貧酸素水塊の形成機構, 沿岸海洋研究ノート, 26 巻, 2 号, pp. 109~118.
- 武岡英隆 (1989): 貧酸素水塊の物理モデル, 沿岸海洋研究ノート, 26 巻, 2 号, pp. 101~108.
- 中村由行・西村 肇 (1988): 沿岸域における貧酸素水塊の形成機構, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 802~806.
- 宗景志浩・木村晴保 (1988): 二層ボックスモデルによる浦の内湾の海水交換と DO 負荷量について, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 827~831.
- 宗景志浩・木村晴保 (1989): 浦の内湾の DO 収支と貧酸素水塊の形成および消滅機構, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 864~868.
- Takeoka, H. and T. Ochi (1986): The Anoxic Water Mass in Hiuchi-Nada, Part 2. The Heat and Oxygen Budget Model, J. Oceanogr. Society of Japan, Vol. 42, pp. 12~21.