

浦の内湾の DO 収支と貧酸素水塊の形成および消滅機構

宗景志浩*・木村晴保**・田島健司***

1. はじめに

浦の内湾は土佐湾中央部に位置しており、幅 1 km、奥行き 8 km、平均水深 8 m の内湾で、湾内はハマチ養殖、湾口部はアサリ漁場として広く利用されている。湾の中央部位奥は海水交換が悪いにもかかわらず、昭和30年頃から真珠やハマチの養殖が盛んに行われたため、残餌などによる自家汚染が進んでいる。そのため、成層期には表層では赤潮が頻発し、底層には強い貧酸素水塊が形成される。また、昨年9月初旬に養殖ハマチやアサリに壊滅的な被害が生じたため、これを契機に水質改良対策が検討されつつある。

ここでは、自家汚染や貧酸素化を防止し、適正な漁場管理を行うために、二層ボックスモデル（宗景・木村、1988）による海水交換量と負荷量を求め、酸素（DO）収支にかかわる諸項目を定量化した。さらに、海水および底泥の DO 消費速度、成層強度、透明度、海底の DO 濃度の季節変化、密度流による DO 補給の有無などを解析し、貧酸素水塊の形成と消滅の機構を調べた。

2. DO 収支の推算法

湾の DO 収支を決定する要因として、海水による輸送、大気からの溶出入、海水による消費、底泥による消費、養魚による消費、その他（植物 Plankton による生産の他に河川水の流入に伴う陸域からの供給、天然魚による消費と推算誤差も含む）が挙げられる。

（1）海水による輸送

図一に示すように湾内を上下二層に分け、各 Box 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 、上層①に流出した量を $D_{13} = D_{31}$ 、下層②のそれを $D_{24} = D_{42}$ で表わし、それらの割合が①、②の体積 $V_1(18.527 \times 10^6 \text{ m}^3)$ 、 $V_2(66.635 \times 10^6 \text{ m}^3)$ の比に等しく、

$$D_{13} = V_1 q_t / (V_1 + V_2), \quad D_{24} = V_2 q_t / (V_1 + V_2),$$

で与えられるものとする。潮汐交換率は上下で一様と

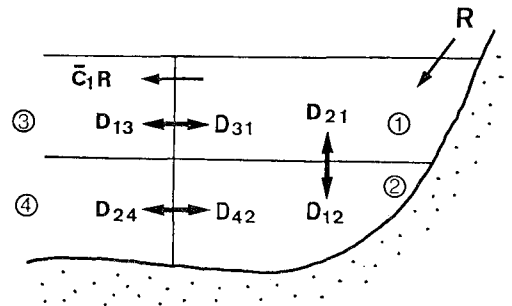
し、海水交換量を rD_{13} 、 rD_{24} で与える。また、①と②の物質輸送は拡散のみとし輸送量を $D_{12} = D_{21}$ で表わすと、①と②の塩分収支式として次式を得る。

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = rD_{13}(C_3 - C_1) + D_{12}(C_2 - C_1) - C_1 R + P_1 \dots \dots \dots (1)$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = rD_{24}(C_4 - C_2) + D_{12}(C_1 - C_2) + P_2 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 P_1 、 P_2 はそれぞれのボックスの中で生成または消滅する量で、物質負荷量と呼ぶことにする。また、 $C_1 \sim C_4$ は各ボックスの平均濃度を表わす。

湾口での拡散、鉛直混合および移流による上層ボックスへの物質輸送量は、それぞれ式（1）の右辺第1, 2, 3項から、下層ボックスへのそれは式（2）の右辺第1, 2項から求める。なお、式（2）右辺第1項は、差込み（密度流）による下層部への輸送量も含んでいる。



図一 二層ボックスモデル模式図

水温、塩分、DO などの基礎データは1987年4月から1988年3月にかけて計19回実施した環境調査資料に基づいて与えた。Rは淡水供給量で、高知市の降水量から推算した。成層期の浦の内湾には、水面下 2m 付近に水温、塩分、密度の強い躍層が生じる。そこで、これを境に分割し、各々のボックスでの体積平均濃度を求めて基礎データとした（高知県水産試験場、1988）。

（2）大気からの溶出入

Lewis・Whitman(1924)の二重境膜モデルによると、

* 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
 *** 農修 主任研究員 高知県水産試験場

海面を通して溶出入する酸素量は海水の溶存酸素不足量に比例し、次式で与えられる。

$$\frac{dm}{dt} = K_L(C_s - C) \quad (3)$$

ここに、 dm/dt は単位時間、単位面積当りの酸素溶入量 ($g-O_2/m^2 \cdot hr$)、 K_L は酸素溶入係数 (m/hr)、 C_s および C は海水の酸素飽和量と現存量 ($g-O_2/m^3$) である。酸素溶入係数 K_L は海面の性状、海水の流動特性によって大きく変わる。ここでは、Thames estuary での測定結果 (井上, 1974) を参考にし、 K_L を $0.1 m/hr$ とした。

(3) 海水による消費

海水中での DO 消費は、主として plankton の呼吸、溶存態あるいは懸濁態有機物の生物化学的分解による。これらの DO 消費速度は plankton や有機物の種類によっても異なり、同一海水でも DO 濃度や水温によっても影響される。ここでは、海水による生物学的あるいは化学的 DO 消費量を次式で与えた。

$$\frac{dO_2}{dt} = K_w O_2 \quad (4)$$

ここに、 O_2 は現場の DO 濃度 (ppm)、 dO_2/dt は海水の単位時間、単位体積当りの DO 消費量 ($g-O_2/m^3 \cdot hr$)、 K_w は DO 消費速度係数 ($g-O_2/m^3 \cdot hr \cdot ppm$) である。

木村らは、実験から K_w を水温 θ との関係で次のように表わした (高知県水産試験場, 1988)。

$$K_w(\theta) = K_w(\theta_{15}) \exp \{ \alpha_w(\theta - \theta_{15}) \} \quad (5)$$

ここに、 $K_w(\theta_{15})$ 、 $\alpha_w(\theta_{15})$ は $15^\circ C$ における DO 消費速度係数および温度係数 ($^\circ C^{-1}$) である。これらの係数は 1987 年 9 月 11 日、12 月 15 日、1988 年 5 月 11 日の 3 回、湾内 4 カ所から採水した試料を用いて実験的に求めている。

(4) 底泥による消費

海底での DO 消費の過程は、主として微生物による分解と化学的酸化である。それらは、底質、生物・化学的活性、接底水の DO 濃度、水温、海底での流れなどと複雑に関係しており、十分解明されてはいない。ここでは海水による DO 消費量の推算と同様の方法 (式 (4)、(5)) を用いて、底泥を試料とした実験から、底泥の接水面積、単位時間当り DO の消費速度係数 ($g-O_2/m^2 \cdot hr \cdot ppm$) と温度係数 ($^\circ C^{-1}$) を求めている。

(5) 養魚による消費

魚の酸素消費量 $T(g-O_2/尾 \cdot hr)$ は、水温 ($\theta^\circ C$) と魚体重 ($W kg$) に関係し、次式で推算される (井上, 1974)。

$$T = \alpha_{20} Q^{(b-20)} W^\gamma \quad (6)$$

ここに、 α_{20} 、 Q 、 γ は魚種によって異なるが、ハマチでは、それぞれ 0.803、1.065、0.773 である。浦の内湾での魚類養殖は、ハマチを主体とするもので、モジャコ時期 (4 月上旬) から飼育を開始し、翌年 1 月頃までに終わる。養殖業者の飼育記録からハマチの体重、小割周辺の水温、飼育尾数を割り出し、養魚による酸素消費量を式 (6) から推算した。

(6) そ の 他

DO 負荷量 P は、海水交換に伴う DO 輸送量を除いた生産と消費の総和である。上層ボックスでは大気からの溶入 (出) M 、海水による消費 C_w 、Plankton による生産 (消費) S_1 が、下層ボックスでは海水と底泥による消費 C_w 、 C_B 、養魚による消費 T 、Plankton による生産 (消費) S_2 が関与すると仮定した。そこで、次式が成り立つ。

$$P_1 = M - C_w + S_1$$

$$P_2 = -C_w - C_B - T + S_2 \quad (7)$$

これより、 P_1 、 P_2 、 M 、 C_w 、 C_B および T が正確に推算されれば、その他 S_1 、 S_2 は容易に求めることができる。

3. DO 収支の結果と考察

(1) 植物 Plankton による DO 生産量

浦の内湾では、養魚量に比較し天然魚の量は少なく、河川水に伴って運ばれる酸素もごく僅かである。従って、その他 S_1 は主として植物 Plankton による生産量と推算誤差と見なされる。下層ボックスにおいても同様に扱う。

DO 収支の推算結果を検証するため、明暗瓶法による DO 純生産量と収支計算から求めたその他 S とを比較し、図-2 に示した。両者の観測年度は異なるものの、真冬を除いて上下層ともよく一致した。そこで、その他 S は主として植物 Plankton による DO 生産量と見なし、上下それぞれのボックスにおける DO 収支の内訳を

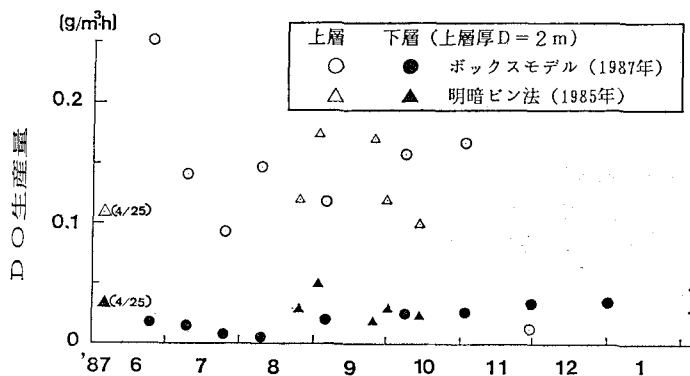


図-2 ボックスモデルと明暗瓶法による DO 生産量の比較

観測期間ごとに計算し、結果を図-3, 4 に示した。

(2) 上層部の DO 収支

上層部における海水の生物および化学的消費量は、約 550 kg/hr (全消費の 15~63%) で、周年を通して安定して推移している。

海水とともに湾外へ運ばれる DO 量は、湾内外での DO 濃度の差が大きい時期 (9/1~9/11) に約 225 kg/hr と増加するが、全消費量に占める割合 (11%) は小さい。また、上層から下層への輸送量は、秋季に僅かながら増大するものの、全消費量に占める割合は 18% (550 kg/hr) と比較的小さい。

大気への溶出は、DO 濃度の高い春秋期 (6/18~7/18, 10/2~11/16) には約 2000 kg/hr (全消費量の 70%) と大きい。しかし、夏季 (7/18~9/11) には DO 濃度が低下するため、約 1000 kg/hr (全消費量の 55%) に減少する。11月以降は主として水温の低下に起因して酸素飽和量が急増する一方で DO 濃度が低下するため、表層部は不飽和状態となり、逆に大気から溶入が始まる。

植物 Plankton による DO 生産は、春季 (6/18~7/18) に約 4500 kg/hr、秋季 (10/2~11/16) に約 3000 kg/hr で最も大きく、盛夏 (7/18~8/3) には 1700 kg/hr に減少するものの、いずれも生産のほとんどを占める。これは、内湾の季節的な並びに量的な Plankton 増殖傾向 (有賀, 1973) と一致している。春秋期の増大は、河川や鉛直循環に伴う下層からの栄養塩の補給、水温、照度 (透明度) の上昇に起因する。また、8月中旬~9月初旬の差込み (密度流) に伴う下層からの栄養塩補給も秋季の増大を助長する。

(3) 下層部の DO 収支

下層部での海水の生物化学的 DO 消費量には、若干の季節的差が見られるものの、どの期間でも DO 消費のうちの最も大きな割合を占める。海水の生物学的消費は、真冬 (12/14~1/19) を除き一定で、海水の化学的消費量 (約 900 kg/hr) に比較してやや小さい。

海水の化学的消費は、夏季 (7/18~8/17) にやや小さくなり、秋季以降徐々に増大する。真冬 (12/14~1/19) は水温の低下によって生物学的消費が減少するにもかかわらず、化学的消費は年間を通じて最も大きい。海水や底泥による DO 消費速度は冬季に低下するが、DO 濃度の上昇により消費量はむしろ増大する。

底泥による DO 消費量は、海水による DO 消費の 10% 程度で季節的变化は少ない。

養魚による DO 消費は、魚体の大きくなる秋~冬にかけて徐々に増大し (約 500 kg/hr)、全 DO 消費量の 20% 程度を占めるようになる。

湾外から湾内下層部に運ばれる DO 量は、成層期 (7/18

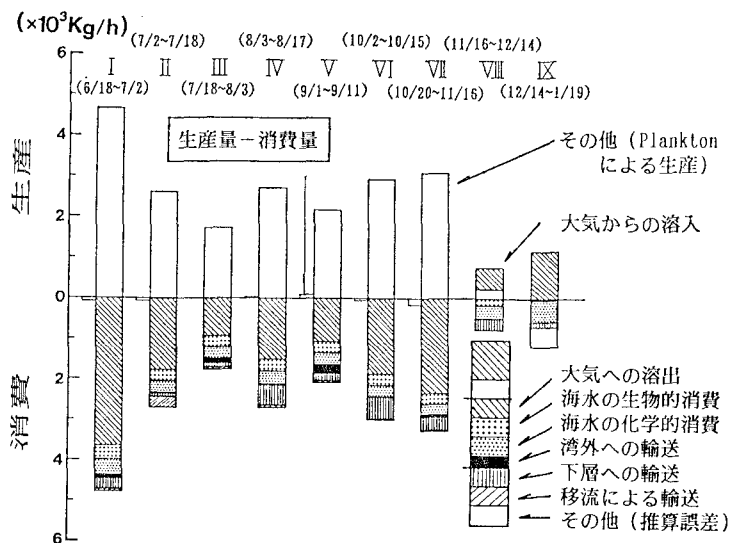


図-3 上層部の DO 収支

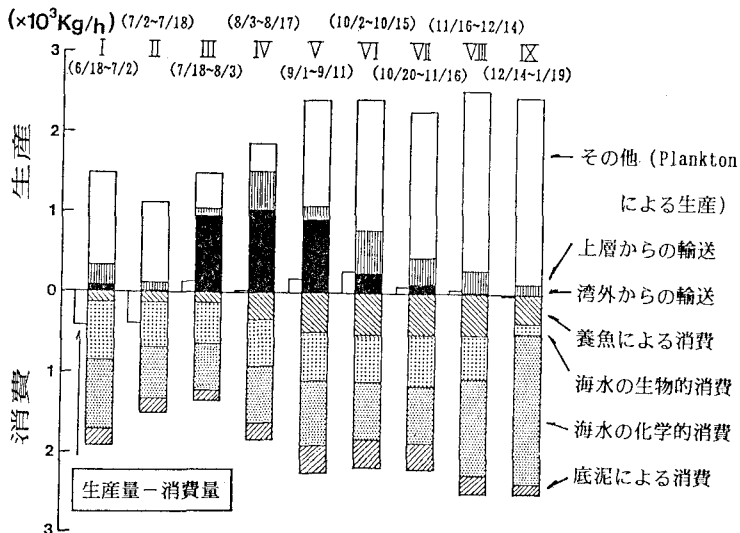


図-4 下層部の DO 収支

~9/11) には約 1000 kg/hr で DO 生産のうちで最も大きい割合 (50%) を占める。これは湾外水が密度流となって湾内底層部へ差し込み、海水交換が促進されるためである。しかし、その他の期間では湾外からの DO 輸送量はきわめて少ない。

上層から運ばれる DO 量は、秋季には約 550 kg/hr と僅かに増大するものの、生産に占める割合 (20%) は小さい。

植物 Plankton による DO 純生産量は、成層期 (7/18~8/17) を除き、1000~2000 kg/hr で全 DO 生産の大部分 (80%) を占める。成層期には DO 生産は約 400kg/hr (25%) に減少する。これは、表層での Plankton の増殖や河川水の流入に伴う懸濁物の増加によって透明度が低下し (図-6(a)), 下層で生産が抑えられることが考えられる。一方、秋季 (9/1~10/15) は光が弱くなるに

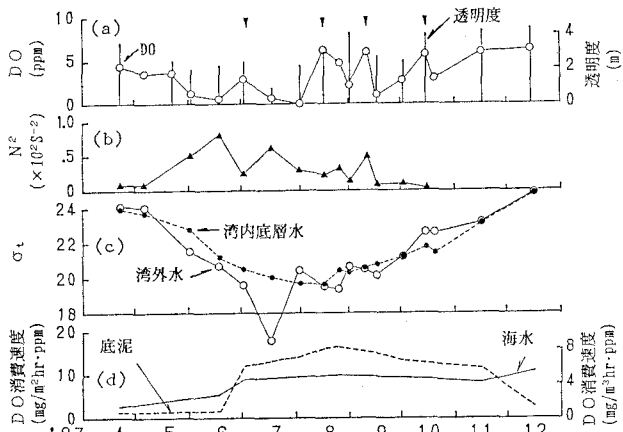


図-6 貧酸素水塊の形成要因

もかわらず、2000 kg/hr (80%) と再び生産が増大する。これは、8月から9月初旬の湾外水の差込み (密度流) に伴う海底からの栄養塩の補給と表層懸濁物の流出、赤潮 Plankton の減少による透明度の上昇に起因する。

4. 貧酸素水塊の形成と消滅機構

1987年の観測結果を基に浦の内湾の DO 縦断分布を作成し、図-5 に示した。また、湾中央部の海底直上の DO 濃度および透明度、 N^2 (N : バイサラ振動数) で表現した成層の強度、海水および底泥の DO 消費速度 $kw(\theta)$ の季節変化をそれぞれ図-6 (a), (b), (d) に、さらに図-6 (c) には湾外 (○) および湾中央部海底直上 (●) の海水密度の季節変化を示した。

浦の内湾では、降雨の多い6月から7月中旬ごろまで、湾外水の密度 (○) は湾内底層水のそれ (●) より軽く (図-6 (c)), 湾外水は中層に流入し底層水は滞留したままとなる。そして、この中層水と底層水との間 (水深 10 m 付近) は、成層が強く (図-6 (b)), その上下での海水混合は進まない。さらに、底層海水や底泥の DO 消費速度は6月頃から急激に上昇する (図-6 (d))。これらの原因が重なって、6月初旬頃、最も深い中央部の海底で貧酸素化し始め、次第に湾奥に広がる (図-5)。

図-6 (a) の8月17日、9月11日、10月15日には湾中央部の最下層で DO 濃度は上昇し、むしろ中層で低下している (図-5)。これは、大潮時に湾外水の密度が湾内底層水のそれより大きくなり、湾外水の差込み (密度流) が生じたためで、この時期にはボックスモデルの結果でも海水交換が活発で、多量の DO が湾口から輸送されている。しかし、差込みによって輸送された DO は海水や底泥の強い DO 消費速度によって次の小潮時にその多

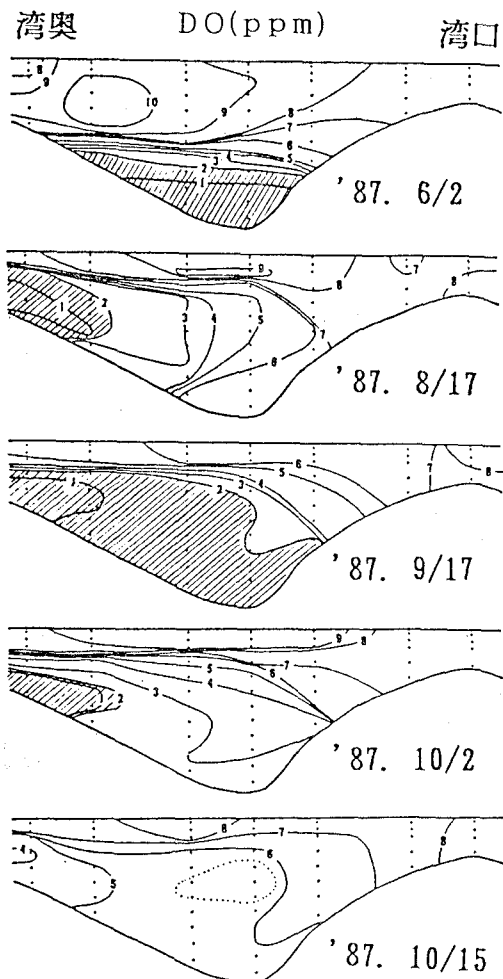


図-5 貧酸素水塊の形成と消滅

くが消費されてしまい、再び貧酸素水塊が形成される。このような、DO の消費と供給の過程を繰り返すうちに秋季鉛直循環が始まり、やがて湾中央部底層の貧酸素水塊は解消される。

浦の内湾の貧酸素化は、①閉塞性湾のため下層の海水の交換が弱く、②躍層の形成により鉛直混合が阻止されるという自然条件に加え、③汚染負荷の増大に伴う DO 消費速度の増大、④透明度低下による下層での DO 生産の減少という人為的条件が重なるためである。これらの原因は、三河湾(佐々木, 1989)、大阪湾(城, 1989; 中村, 1989)、久美浜湾(柏井, 1989)などの場合と共通している。なかでも、①と②の条件は久美浜湾に酷似している。

植田(1940)は、養殖の行なわれていなかった昭和18年頃に、弱いながら貧酸素水を観測している。海水の流動機構や成層化による鉛直混合の程度は当時と大差ないはずで、今日の大規模な貧酸素化を招いた主因は汚染負荷量の増加に伴う DO 消費速度の増大であろう。

5. ま と め

二層ボックスモデルを用いて DO 負荷量を求め、浦の内湾の酸素収支の季節変化を推算した。また、貧酸素水塊の形成と消滅機構について解析した。以下に主要な結果を列記する。

(1) 収支計算から推算される植物 Plankton による DO 生産量と明暗瓶法から求めた DO 純生産量とは、上下いずれの層においても真冬を除いてよく一致した。

(2) 水面下 2 m までの上層では、植物 Plankton により春秋 3000~4500 kg/hr、夏 2000 kg/hr と多量の酸素が生産されるが、その 60% は大気中へ放出される。

(3) 下層では、海水による消費は周年を通じてほぼ一定 (1500 kg/hr) で全消費の 70% を占めた。植物 Plankton による生産は、春秋には全生産の 80% (1000~2000 kg/hr) を占めるが、夏季の成層期には透明度の低下に伴って減少し、全生産量の 25% (400 kg/hr) となった。湾外からの輸送は、成層期に 55% (1000 kg/hr) と大きいですが、その他の期間ではごく僅かである。上層か

らの輸送は秋季に大きくなるが、生産の 20% (550 kg/hr) にすぎない。

(4) 栄養塩や汚染負荷の増加によって表層では Plankton による DO 生産が高まるものの、成層期には下層へ輸送されずに大部分が空气中に溶出し、有効に利用されていない。一方、下層では海水の DO 消費速度が高く、Plankton による生産も湾口からの補給も消費され尽くし、底泥の浄化にまでは活用されていない。

(5) 浦の内湾底層部の貧酸素化の原因には、①底層海水の交換の低下に伴う湾口からの DO 補給の減少、②成層化による鉛直混合の阻止、③海水や底泥による DO 消費速度の増大の他に、④透明度低下による下層での DO 生産の減少が挙げられる。つまり、5 月から 8 月にかけて、湾外水は湾内底層水よりも軽いため中層に流入する。そのため底層との境界に躍層が生じ、鉛直混合が阻止され貧酸素水塊が発達する。一方、8~9 月になると大潮時の差込み(密度流)と秋季循環によって底層部への DO 補給が増大して貧酸素水塊は消滅する。

参 考 文 献

- 有賀裕勝 (1973): 水界植物群落の物質生産 II, 共立出版, 91 p.
- 井上裕雄 (1974): ハマチ養魚場における DO 環境構造, 農水産分野における環境工学, 杉二郎教授還暦記念事業会, pp. 289~336.
- 植田 穂 (1949): 浦の内湾の研究, 日水誌, 15巻, 4号, pp. 190~198.
- 柏井 誠 (1989): 久美浜湾における無酸素水塊解消の試み, 沿岸海洋研究ノート, 26巻, 2号, pp. 129~140.
- 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.
- 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.
- 城 久 (1989): 大阪湾の貧酸素水塊, 沿岸海洋研究ノート, 26巻, 2号, pp. 87~98.
- 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.
- Lewis, W. K. and W. G. Whitman (1924): Principles of gas absorption, Ind. Eng. Chem., Vol. 16, pp. 1215~1220.