

# 閉鎖性内湾における秋期の水止まり現象に関する現地観測

山 本 潤\*・時 吉 学\*\*・佐伯信哉\*\*\*・上野成三\*\*\*\*

養殖の盛んな閉鎖性の内湾である高知県の野見湾において、夏期と秋期に水質・流況を観測した。その結果、夏期には成層化し大規模な内部潮汐が確認されたが、秋期には躍層が消滅し、湾内流速が夏期に比べ激減した。それは、地元養殖漁業者らの間で漁業被害をもたらす「水止まり」と呼ばれ警戒されている現象を指す。夏期には見られなかった貧酸素の状態が秋期には何度か観測され、再現計算による海水交換量や溶存酸素収支の検証の結果、貧酸素水塊の発生に伴う漁業被害が通常予想される夏よりも秋に多く発生する大きな原因は、「水止まり」現象によるものであると結論づけることが出来た。

## 1. 序 論

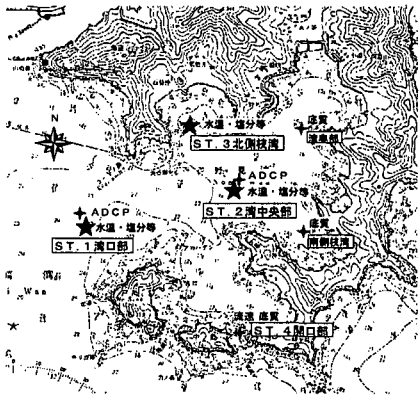
閉鎖性の内湾では、一般的に、夏期には水温上昇により有機物が腐敗しやすく、水質が悪化する例が多い。また、表層と底層との温度差から形成される躍層により、上下層の混合が阻害され、底層で貧酸素水塊が発生する。やがて秋期になると密度成層が破壊され上下層の混合が促進されると言われている。しかしその一方で、夏期には内部潮汐によって表面潮汐の数倍の海水交換があるが、秋期になるとその内部潮汐が起きなくなり、「水止まり」と呼ばれる現象によって水質が悪化する事態も懸念されている。著者らは養殖の盛んな閉鎖性内湾である高知県の野見湾において、2001 年夏期に、成層が発達した状況を対象に現地観測を行い、大規模な内部潮汐を観測した。さらに、内部潮汐が海水交換量を増大させ、湾内水質の維持に寄与していると推測できることを数値計算により示した(山本ら, 2002)。本研究では、地元漁業者らが警戒する「水止まり」現象とそれに伴う貧酸素水塊の発生について、2002 年秋期に同様の観測を行い、そのメカニズムの解明を試みた。

## 2. 現地観測の方法

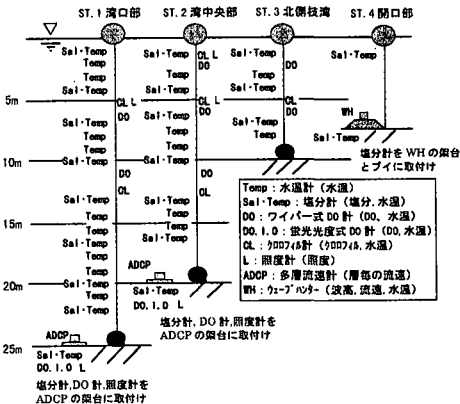
図一に示す野見湾の湾口部 (ST. 1)、湾中央部 (ST. 2)、北側枝湾 (ST. 3) の 3 カ所に連続観測用の係留系 (図一2) を設置した。それぞれの場所では鉛直方向に 1 m 間隔で水温計、概ね 3 m 間隔で塩分計を配置した。この他、生物付着対策を施したワイパー式 DO 計 7 台、蛍光光度式 DO 計 2 台、水中照度計 5 台、クロロフィル計 6 台を適宜配置し、2002 年 9 月 25 日より 10 分間隔で約 40 日間の連続観測を行った。湾口部及び湾中央部には超音波ドップラー流速計 (ADCP) を設置し、流速分布を同様に計測した。同時に採水・採泥、垂下式水質計による水温、

塩分、DO、クロロフィル、濁度の鉛直分布の多点観測を行った。水質分析は、COD、全窒素、全磷、クロロフィル等、底質分析は粒度組成、強熱減量、COD、硫化物、全磷、全窒素等を行った。

なお、比較対象としての夏期のデータは、2001 年 7 月 12 日よりほぼ同様の手法 (山本ら, 2002) により取得し、データ全般の検証は野見湾漁場環境情報システム (上野ら, 2002) を用いた。



図一 調査位置図



図二 係留系設置状況

\* 正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所  
\*\* 正会員 復建調査設計(株)環境技術部環境技術課 [元水産工学研究所研修生]  
\*\*\* 正会員 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所研修生 [荒谷建設コンサルタント(株)より出向]  
\*\*\*\* 正会員 工修 大成建設(株)技術センター土木技術研究所

3. 現地観測の結果と考察

(1) 水温・塩分の鉛直分布

水温の時系列データの一例を図-3, 4 に示す。(a) は湾口部, (b) は湾中央部のデータ, (c) は湾口部のデータの折れ線表示である。横軸は日付で図-3(a) (b) は 7 月 12 日から, 図-4(a) (b) は 9 月 25 日からそれぞれ 10 日分表示した。縦軸は 1 目盛りを水深 5 m とし, 水温 20~30℃を濃淡で表示した。図-3 に示す夏期のデータでは表層と底層で大きい日で 10℃近くの水温差が生じ, 成層していることがわかった。また, 色の境界線の上下変化から躍層が上下変化をしていることがわかり, 大規模な内部潮汐の存在を確認できた。

一方, 秋期になるとすべてが同一色となり, 表層から底層まで水温差がなく, 時間的にも約 26℃程度で一定であることが図-4 より明かである。このことは, 躍層が完全に消滅し, 夏期に見られた大規模な内部潮汐が秋期には存在しないことを意味する。(c) では表層のみ若干の日変動をしていることがわかるが, 表層と底層との水温差は夏期のようには見られない。また, 底層の水温のみ

に着目すると, 夏期よりも秋期の方が水温が高いことが判明した。このことは, 夏期よりも秋期の方が底質の酸素消費速度が大きく, 秋期の方が底層の貧酸素化が起きやすい状況にあることを意味する。

図-5 では, 横軸に塩分, 縦軸に水温を取り, 1 日毎に T-S ダイアグラムを示す。図中の斜線は等密度を表す  $\sigma_t$  曲線であり, 図中の左上が軽く, 右下が重いことを意味する。凡例は水温・塩分計の設置水深であり, 水深毎に濃淡で形を変えた印を付けた。この分布から, 1 日あたりの水塊の挙動を見ることが出来る。図-5(a) は 2001 年夏期のデータである。夏期には表層では水温が高く塩分が低い状態であり, 底層では外海水の特徴である水温が低く塩分が高い状態と表層の状態との間を行き来している様子が見られる。底層に外海水が流入してきたため, 高塩分, 低温を意味する右下方向に値が広く分布したものと考えられる。

秋期では (図-5(b) (c)), 表層から底層まで水温と塩分は変化せず一定値となる。また, (c) の降雨時には表層のみ塩分濃度が低下しているが, 中層や底層はほとんど変化していないことがわかる。

水温と塩分の鉛直分布を図-6 に示す。(a) は夏期の調査結果, (b) は秋期の結果である。(a) では, ある水深で急激に値が変わるような明確な躍層は存在しないが, 表層から底層にかけてほぼ一定の傾きで変化する連続成層の状態にあるといえる。表層と底層の水温・塩分濃度差

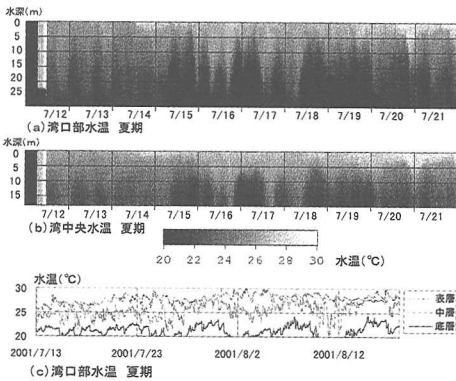


図-3 夏期の水温の経時変化

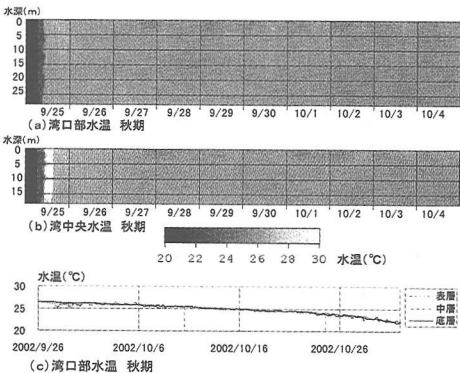
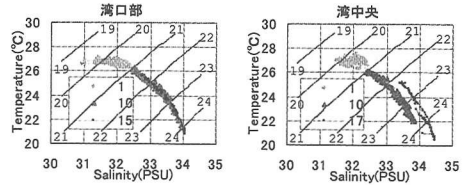
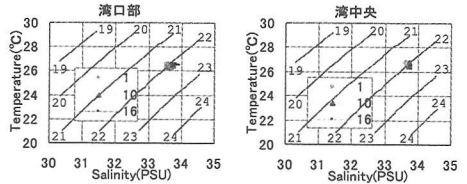


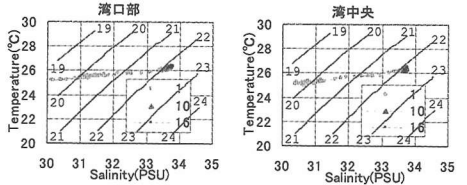
図-4 秋期の水温の経時変化



(a) 2001年夏期(7/17)晴天



(b) 2002年秋期(9/26)晴天



(c) 2002年秋期(9/27)雨天

図-5 T-S ダイアグラム

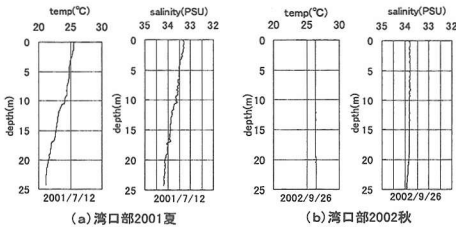


図-6 水温と塩分の鉛直分布の一例

はかなり大きい。一方、秋期では(b)のとおり表層から底層までほぼ同じ値を示している。このことは夏期の躍層が完全に破壊された混合状態を示す。

## (2) 湾内多層の流速データ (ADCP データ)

図-7 は、湾口部における ADCP により計測した湾内多層の湾軸方向流速の時系列データの一例を示す。横軸はすべて時間(日)で、(a)では7月12日から、(b)では9月25日から10日分を表示した。縦軸は底面からの高さとし、1目盛りは5mである。色は湾内方向流速を正にとり、±200 mm/s を上下限として濃淡で表現した。

夏期(a)では、底層で湾内方向の流れがある時は、表層では湾外方向へ、底層で湾外方向の流れがある時は、表層では湾内方向へそれぞれ逆向きの流れが生じており、二層流を形成している。また、それらは半日程度の周期で交互に繰り返している。流速は±20~30 cm/s 程度であり、最大値は40 cm/s に達した。一方、秋期(b)では流速が±5 cm/s 程度以内に小さくなっている。これが「水止まり」現象を指すデータといえる。

## (3) 水質分析結果

表-1 より、COD についてはほとんど2.0 mg/l 以下の値を示している。これは、環境基準の類型 A に該当する。2001 年夏期調査結果と比較すると、ほぼ同等か、7月、9月、11月の順に若干良好となっている傾向を示す。一方、全窒素では0.5 mg/l、全燐では0.07 mg/l を上回る結果が11月に多く見られ、環境基準では最悪の類型4に該当する。夏期調査結果と比較すると、7月、9月、11月の順に悪化していることが明らかである。通常、水温上昇や躍層形成に伴う上下層の混合阻害等によって水質悪化は夏期に起きることが多い。ところが、ここで得

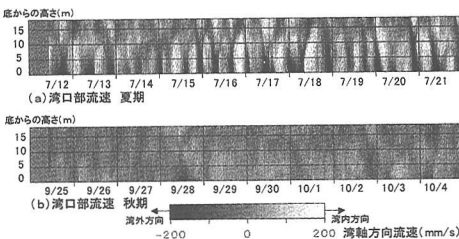


図-7 湾軸方向流速の経時変化

られた分析結果では、秋期に栄養塩類が増大している。即ち、夏期よりも秋期の方が水質悪化を引き起こしやすいとの結果が得られた。

## (4) 底質分析結果

湾内各点の底質の COD と硫化物の分布を図-8 に示す。野見湾の底泥汚濁の特徴として、湾口部や北部枝湾では底泥汚濁はほとんど進行しておらず、湾中央部から湾奥部にかけて広範囲(湾中央、南枝湾、湾奥部)において底泥汚濁がやや進行している状態にある。しかし、これらの底泥汚濁度を、底泥汚濁の判定基準(COD 20 mg/gDW 以上、硫化物 0.2 mg/gDW 以上、日本水産資源保護協会、1995) で評価すると南枝湾のみが「汚染が始まりかけている底泥」と判断される程度である。さらに、貧酸素化が慢性的に発生する英虞湾の底質(上野ら、2000)と比較しても、野見湾の底泥汚濁状況はそれほど深刻な状況にないことが明らかになった。これより、野見湾の貧酸素化は、一般に貧酸素化の要因と言われる底泥汚濁に起因しているのではない可能性が高い。底泥汚濁以外の貧酸素化要因としては、魚類養殖の給餌の残存物質により水中の酸素消費が増大している可能性が上げられる。

## (5) 溶存酸素濃度の時系列データ

図-9 に、溶存酸素濃度の時系列データを示す。横軸は時間(日)で、(a)は7月13日から、(b)では9月28日から10日間である。縦軸は、DOmg/l である。凡例は、機器の設置水深である。夏期の観測では、表層、底層、すべての点で概ね高い値を維持しており、貧酸素水塊の発生は認められなかった。秋期でも、湾口部では底層でも高い値を維持していたが、湾中央部底層において貧酸素状態が度々認められた。(b)の湾中央底層では、光合成の影響を受ける表層とは逆に、日中に低下し、夜間に回

表-1 水質分析結果

(a) 採取日:平成13年7月12日

| 採取場所            | 湾口部表層 | 湾口部   | 湾口部   | 湾中央表層 | 湾中央   | 湾中央   |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 分析項目            | 表層    | 中層    | 底層    | 表層    | 中層    | 底層    |
| COD (mg/l)      | 1.3   | 1.3   | —     | 2.9   | 2.3   | 1.1   |
| 全窒素 (mg/l)      | 0.45  | 0.35  | 0.39  | 0.32  | 0.34  | 0.19  |
| 全燐 (mg/l)       | 0.013 | 0.016 | 0.022 | 0.023 | 0.028 | 0.013 |
| クロロフィル a (μg/l) | 1.9   | 2.4   | <0.5  | 4.6   | 4.2   | 0.7   |

(b) 採取日:平成14年9月26日

| 採取場所            | 湾口部表層 | 湾口部   | 湾口部   | 湾中央表層 | 湾中央   | 湾中央   |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 分析項目            | 表層    | 中層    | 底層    | 表層    | 中層    | 底層    |
| COD (mg/l)      | 1.9   | 1.7   | 1.6   | 2.0   | 1.6   | 1.8   |
| 全窒素 (mg/l)      | 0.36  | 0.40  | 0.37  | 0.33  | 0.36  | 0.33  |
| 全燐 (mg/l)       | 0.023 | 0.047 | 0.015 | 0.035 | 0.036 | 0.038 |
| クロロフィル a (μg/l) | 6.6   | 4.9   | 1.2   | 10    | 7.3   | 2.3   |

(c) 採取日:平成14年11月6日

| 採取場所            | 湾口部表層 | 湾口部   | 湾口部   | 湾中央表層 | 湾中央   | 湾中央   |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 分析項目            | 表層    | 中層    | 底層    | 表層    | 中層    | 底層    |
| COD (mg/l)      | 1.2   | 1.4   | 1.8   | 1.4   | 1.3   | 1.1   |
| 全窒素 (mg/l)      | 0.33  | 0.41  | 0.53  | 0.55  | 0.57  | 0.55  |
| 全燐 (mg/l)       | 0.033 | 0.042 | 0.075 | 0.067 | 0.071 | 0.071 |
| クロロフィル a (μg/l) | 3.6   | 3.6   | 3.8   | 3.9   | 4.7   | 3.5   |

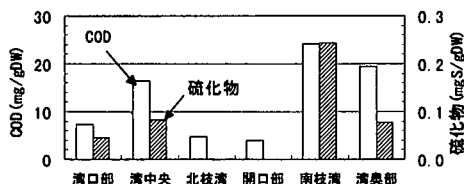


図-8 底質分析結果

復する傾向が見られた。これは、給餌時刻や養殖魚の活性、表層水の冷却による鉛直混合等が影響した可能性がある。一方、底層の貧酸素が急激に回復する現象が何度か発生した。それらは図-9(c)の矢印で示したように、外海から湾奥方向への5~10 cm/s程度の僅かな流れが底層で認められた時間帯の後に見られる。このことから、外海水の若干の流入が一時的な貧酸素の回復をもたらしたと言え、さらに、底層で20~40 cm/s程度の湾内方向流速が生じている夏期には、その流れが存在する限り貧酸素化が生じにくいことを示唆している。

#### 4. 再現計算による水止まり現象の影響の検証

##### (1) 計算方法

観測当日の潮汐や気象、湾口部の観測データを境界条件として用い、マルチレベルモデルで潮流計算を行った。内部潮汐やDO収支を再現するために、湾口部(ST.1)で観測された水温と塩分濃度及びDO、水平流速の鉛直分布データを鉛直1 m間隔及び時間1.5 s間隔に線形補完し、各時間ステップ毎に強制的に上書き入力した。その他の計算の諸条件は山本ら(2002)と同様とした。これにより、内部潮汐や水止まり現象を再現するとともに、海水交換量の比較と貧酸素水塊の発生原因について考察した。

DO収支計算においては、過去の野見湾における研究

成果(高知県水産試験場, 1977, 1999)を用いた。単位水塊あたりの養殖魚の呼吸による消費量 $D_1$ (mg/l/s)は、養殖魚類の総呼吸量推算値4802 kg/hを湾内容積 $4.8 \times 10^7 \text{ m}^3$ で割り、日中に負のピークが来る三角関数を乗じることにより(1)式のとおり算出した。光合成による酸素生産量 $D_2$ (mg/l/s)も同様に、高知水試が明暗瓶によって得た0.017 mg/l/hに対し、日中に正のピークが来るように三角関数を乗じ、さらに、水深 $z$ による光の減衰の影響を負の指数関数的に考慮した(2)式とした。その際に用いる透明度 $D_s$ は照度の観測結果から6 mとした。水中の酸素消費量0.006 mg/l/h、底質の酸素消費速度0.056 g/h/m<sup>2</sup>は一定として計算に用いた。大気からの溶入量 $D_3$ (mg/l/s)は、観測期間中の風速の平均値(約2 m/s)から、藤原ら(1993)と同様の手法により物質移動係数 $k$ として $3.35 \cdot 10^{-6}$ を求め、(3)式により算出した。なお、以上の値は夏期と秋期とで同じものを用いた。

$$D_1 = 2.78 \cdot 10^{-5} \cdot (\cos(2\pi t/T) - 1)/2 \quad (1)$$

$$D_2 = 4.72 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - \cos(2\pi t/T))/2 \cdot \exp(-1.7/D_s \cdot z) \quad (2)$$

$$D_3 = k \cdot (DO^* - DO) \quad (3)$$

ただし、 $t$ : 計算ステップNo.

$T$ : 1日あたりの計算ステップ数

$DO^*$ : 飽和溶存酸素濃度

$DO$ : 各時点での溶存酸素濃度

##### (2) 海水交換量の計算結果

計算開始時に湾内に配置しておいたマーカーの残留率を逐次カウントすることによって、夏と秋の海水交換量を比較する。図-10より、夏には内部潮汐によって大きな海水交換量が得られたが、秋期では表層から底層まで流速が小さくなっている観測値を用いているため、海水交換量が大幅に減少している。

##### (3) 底層の貧酸素化の計算結果と考察

夏期と比較して秋期には湾内流速が小さくなり、海水交換量が大幅に減少する計算結果が得られている。また、湾口部のDOが表層から底層まで概ね高い値を示す観測結果が得られている。この状況において湾内のDO収支を計算すると、夏期には湾口部の高いDOを示す水塊が湾内底層へと大量に流入するため、湾中央部のDOは湾口部の水塊の影響を受け、底層でも貧酸素化は生じない。一方、秋期には夏期と同等の酸素消費の条件ではあるが、外海から高いDOの水塊があまり流入しなくなるため、結果として特に底層で貧酸素化が生じることが図-11からわかる。以上により、通常予想される夏期よりも、秋期に底層で貧酸素水塊が発生する原因が明らかとなった。

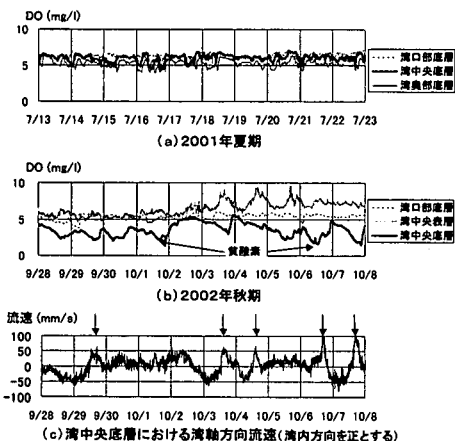


図-9 溶存酸素濃度の経時変化

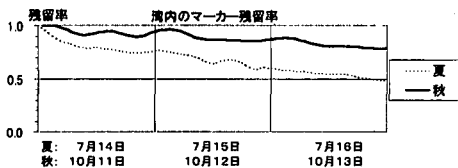


図-10 計算された海水交換率の夏・秋比較

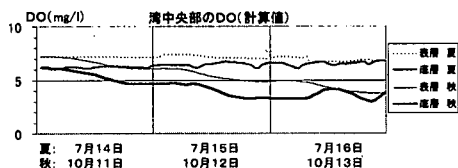


図-11 計算された溶存酸素濃度の夏・秋比較

## 5. おわりに

本研究では、秋期の水止まりと貧酸素化を示すデータを取得し、それらの因果関係を考察してきた。夏期と秋期の観測結果の比較から、水止まりによる海水交換不足が底層の貧酸素化の主な要因であると結論づけた。今回の調査では、水温の違いによる底質の酸素消費速度を計測していないため、夏期と秋期で同条件で単純化して計算に用いた。実際には秋期の方が夏期よりも底層の水温が高く、底質の酸素消費が大きいため、さらに顕著に秋期の貧酸素化が算出される。

なお、底質が比較的良好であったため、底質の酸素消費以上に、給餌と養殖魚の活性の高まり、残餌の沈降とその分解がより大きな酸素消費を引き起こしている可能性がある。貧酸素化に関する現象をより正確に再現するには、養殖魚の活性や給餌量等の漁業活動の経年変化等を可能な精度で定量的に解明することが必要となる。

謝辞：本調査・研究は、数値計算等の基礎部分が運営費交付金「閉鎖性水域における流動・水質変動機構の定量的評価手法の開発」、現地観測等の現場応用的部分が水産基盤整備調査費委託「漁港水域における水質・底質改善技術の開発」により行われた。底質分析に関しては、平成14年度民間結集型アグリビジネス創出技術開発事業の支援を得た。

本調査を進めるにあたり、須崎市水産課、高知県水産試験場、高知県漁港課、野見漁業協同組合、大谷漁業協同組合の方々には多大なる協力を頂いた。底質の採取では、芙蓉海洋開発(株)の協力を得た。紙面にて心よりお礼申し上げます。

## 参考文献

- 上野成三・永田良助・山崎英活・中山哲蔵 (2002): 赤潮・貧酸素をリアルタイムに観測する野見湾漁場環境情報システム (nomi BAY WATCH STSTEM) の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1531-1535.
- 上野成三・灘岡和夫・片倉徳男・勝井秀博・山田二久次 (2000): 英虞湾の真珠養殖漁場における底泥の汚濁流動層に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1046-1050.
- 高知県水産試験場 (1977): 魚類養殖環境自家汚染防除技術開発試験-III-, 昭和51年度指定調査研究総合助成事業研究報告書, 48 p.
- 高知県水産試験場 (1999): 平成9年度高知県水産試験場事業報告書, 第95巻, 333 p.
- 社団法人日本水産資源保護協会 (1995): 水産用水基準 (1995年版), 68 p.
- 藤原正幸・久保 敏・山本正昭 (1993): 砂浜海岸に造成された中間育成池の水質環境, 水産工学研究所技報, 水産土木第15号, pp. 17-30.
- 山本 潤・中山哲蔵・時吉 学・宮地健司 (2002): 野見湾における夏期の流況と水質変動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1086-1090.