

伊勢湾・三河湾における貧酸素水塊の長期間の挙動とその要因

大島 巖* ・鵜飼亮行** ・赤石正廣***
青井浩二**** ・黒田伸郎*****

伊勢湾・三河湾においては、夏季を中心に底層近傍の DO 濃度が 3 mg/l を下回る貧酸素水塊の発生が恒常化し、漁業や環境に大きな障害を及ぼしている。この 2 つの海域環境を改善するうえで、この貧酸素水塊を軽減・改善することが最も重要な課題と考えられるが、対応策を検討するうえで重要となる貧酸素水塊の発生から消滅までのプロセスと、その要因について十分に把握されていない。そこで、本研究では特徴の異なる両海域における貧酸素水塊の発生・成長・消滅までのプロセスを 1 年間の詳細な現地調査によって把握するとともに、約 10 年に及ぶ三重県と愛知県の既存調査結果から、長期間の変動とその要因について統計解析手法なども行なって把握したものである。

1. はじめに

伊勢湾・三河湾は、我が国の代表的な閉鎖的内湾であり、東京湾などと同様に夏季を中心にして底層近傍の DO 濃度が 3 mg/l を下回る貧酸素水塊が毎年のように発生し、漁業生産や生物の生息、水質などの海域環境に大きな障害を及ぼしている（石田ら、1996；鵜飼，2002）。伊勢湾・三河湾の生物を含めた海域環境を改善する上では、夏季を中心に発生する貧酸素水塊を軽減・改善することが最も重要な課題と考えられる。しかしながら、対応策を検討するうえで重要となる貧酸素水塊の発生から消滅までのプロセスは必ずしも十分に把握されているとは言えない。そこで、本研究では特徴の異なる両海域における貧酸素水塊の発生・成長・消滅までのプロセスを 1 年間の詳細な現地調査によって把握するとともに（赤石ら，2005），約 10 年に及ぶ三重県と愛知県の既存調査結果から、長期間の変動とその要因について統計解析手法を用いて解析したものである。

2. 伊勢湾・三河湾の概要

伊勢湾・三河湾の主な緒元を表-1 示す（環境省，2004を改変）。伊勢湾の湾軸は南北方向、湾口は南東向きにあり、水域面積は 1738 km²、平均水深は 20 m である。一方、三河湾の湾軸は東西方向、湾口は西向きであり、水域面積は 604 km²、平均水深は 9 m である。容積を河川流量で割った値は、伊勢湾を 1.0 とすると、三河湾は 1.5、東京湾は 3.8 となり、伊勢湾の海水交換能が高いと考えられる。COD 負荷量/水域面積比と COD 濃度との関係をみても、伊勢湾は他の海域よりも COD 濃度

が低い³、三河湾は他の海域よりも COD 濃度が高い。

3. 調査方法

本研究の調査方法を以下に示す。

(1) 1 年間の詳細な現地調査方法

本研究における現地調査は、関係研究機関である愛知県水産試験場および三重県科学技術振興センターの現地調査と連携できるように調査地点、時期、および回数を設定して実施した（図-1）。伊勢湾では、既存調査を補間するとともに、二枚貝の漁場のある木曾三川河口域へ至る海域の貧酸素水塊の挙動を把握するために湾北部を重点とし、三河湾では主要な貧酸素水塊発生場である湾東部を重点に調査を行った。調査期間は、貧酸素水塊の発生から消滅までを捉えるため、2003 年 6 月～11 月とした。調査地点および調査回数は、伊勢湾では 11 地点について 14 回の調査を、三河湾では 14 地点について 23 回の調査を行った（赤石，2005）。

(2) 既存資料による長期間の解析方法

三重県と愛知県による約 10 年におよぶ月 1～2 回の既

表-1 伊勢湾・三河湾の緒元（環境省，2004を改変）

項 目	単位	伊勢湾	三河湾	東京湾	大阪湾
水域面積	km ²	1738	604	1380	1447
流域面積	km ²	12621	3569	7597	5766
平均水深	m	20	9	45	30
容 積	億 m ³	339	55	621	440
浅海域面積 (水域面積に占める割合)	km ²	323 (18.6)	289 (47.8)	308 (22.3)	106 (7.3)
干潟面積 (水域面積に占める割合)	km ²	14 (0.8)	15 (2.5)	17 (1.3)	1 (0.1)
藻場面積 (水域面積に占める割合)	km ²	17 (1.0)	6 (0.9)	14 (1.0)	1 (0.1)
河川流量	億 m ³ /年	180	20	86	87
COD 負荷量	ton/日	173	48	247	180
COD 濃度	mg/l	2.5	3.1	3.6	3
COD 負荷量/水域面積	—	99.5	79.5	179.0	124.4
COD 負荷量/容積	—	0.51	0.87	0.40	0.41
容積/河川流量	/年	1.88	2.75	7.22	5.06

注) 河川流量は一級河川の昭和 57 年から平成 11 年までの 20 ケ年平均
COD 負荷量は平成 11 年度値
COD 濃度は上層の平成 11～15 年度の 5 ケ年平均

* 修(水) (財)港湾空間高度化環境研究センター
** 正会員 修(工) (財)港湾空間高度化環境研究センター
*** 正会員 国土交通省 中部地方整備局
名古屋港湾空港技術調査事務所
国土環境 (株)
**** 愛知県水産試験場

存調査結果をもとに、底層の貧酸素水塊の面積と潮位、降水量、河川流量、上層と底層の密度差、底層水温などの環境因子の時系列データから、年毎の貧酸素水塊の発生域、分布、面積、消滅域との関連を解析した。

伊勢湾は、平成元年度～14年度のデータ（三重県，1990～2002）を用いた。地点数は全部で20点（調査時期によって地点数が異なる）であり、これらの地点の月1回の水温、塩分、DOを用いた。降水量は名古屋地方気象台の月合計値を、河川流量は流量年表の木曾三川の月合計値を、潮位は潮位年報の鳥羽の月平均値を用いた。

三河湾は、平成6年度～14年度のデータ（愛知県，1990～2002）を用いた。地点数は全部で23点（調査時期によって地点数が異なる）であり、これらの地点の月1～2回（6～10月）の水温、塩分、DOを用いた。降水量はアメダス蒲郡観測所の月合計値を、河川流量は流量年表の豊川と矢作川の月合計値を、潮位は伊勢湾と同様の値を用いた。

また、年毎の貧酸素水塊の規模の違いをマクロ的に解析するために、貧酸素水塊の年毎の累積面積を算出し、各年の平均的な降水量、河川流量、密度差、底層水温、CODなどの因子との重回帰分析を行なって、どの因子が効いているのかを解析した。用いた各環境因子の季節は4～12月とし、伊勢湾では平成元年度～13年度、三河湾では平成6年度～14年度の期間のデータを用いた。

4. 1年間の現地調査による貧酸素水塊の挙動とその要因

本研究での観測結果から、貧酸素水塊の挙動に関して興味深い知見を得ることができた（赤石，2005）。両海域の貧酸素水塊の発生から成長、そして消滅までのプロセスにはいくつかの因子が関わっているが（高橋ら，2000；青山ら，2002；藤原，2002），本観測結果も踏まえてその因子を整理するとともに（赤石ら，2005），その特徴の概要を示した。

[物理的因子]

- ・窪地などの停滞水域
- ・流動面からみた停滞水域（湾奥・湾央の環流域）
- ・鉛直方向の水温・塩分差による大きな密度勾配
- ・気象擾乱の及ぶにくい深い水深
- ・外海水の中層貫入による底層の隔離水塊の形成

[生物的過程]

- ・底泥の有機汚染が高い海域
- ・水中の微生物の有機物分解活性を助長する高水温
- ・赤潮プランクトンなどの死骸の沈降・堆積

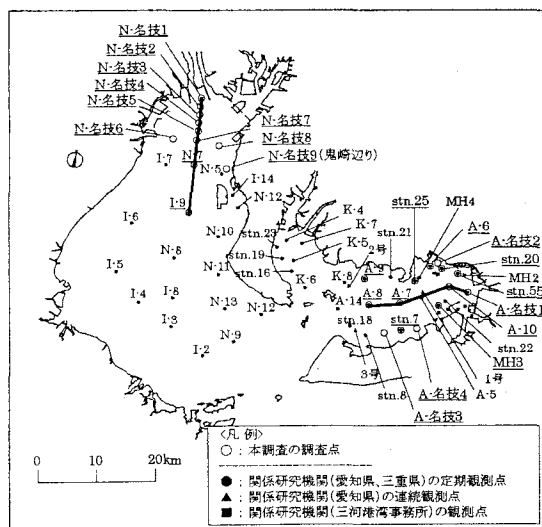
(1) 伊勢湾

地形的側面、流動面を反映したものと考えられるが、底質のCOD含有量30 mg/g・dry以上の海域が、水深

20～30 m以深の湾央部の一部と津・松阪沿岸の湾西部海域に形成されており（図-2），貧酸素水塊の分布域の主体はこの区域と一致していた。また、湾央部がやや深い鍋底状になっていることから、湾口から流入する外洋系水が同じ密度の中層へ貫入することで、底層には水温の低い高密度の隔離水塊が形成され、これが貧酸素水塊として発達するという特徴がある。この外洋系水が底層へ流入する場合には、押し上げられた貧酸素水塊が中層貧酸素を形成するが（高橋ら，2000；藤原，2002），湾北部でも同様な現象が確認された。

(2) 三河湾

伊勢湾と同様に、地形的側面と流動面を反映したもの



と考えられるが、底質のCOD含有量 $30\text{ mg/g}\cdot\text{dry}$ 以上の海域が湾東部に形成され(図-2)、観測された貧酸素水塊の分布域の主体はこの区域と一致していた。三河湾は伊勢湾に比べて水深が浅いことから、強風日数の多い年は貧酸素となる日数が少ないといわれているが(青山ら, 2002)、今回の面的調査によって、風向きの変化によっても貧酸素水塊が大きく移動していることが確認された。また、躍層 5 m 付近を境に、底層では貧酸素水塊が発生しているが、上層では同時に赤潮状態であることが度々あり、両者が同居しているという結果が得られた。

5. 長期データに基づく貧酸素水塊の挙動と要因

前述の長期間にわたり観測されている既存資料をもとに貧酸素水塊の挙動を考察し、統計解析によりその主要因について検討した。

(1) 伊勢湾について

まず、伊勢湾における貧酸素水塊の発生状況を把握するため、図-3に底層貧酸素水塊の形成面積の月別変化を平成元年から平成14年までについて示した。ここに示されるように、伊勢湾の貧酸素水塊は5～6月に発生し、その後成長と変動を繰り返して10～11月に消滅するパターンが多くみられる。この期間中で発生期間が長い年は平成2年の4～12月の9ヶ月であり、逆に短い年は平成7年の7～9月の3ヶ月である。図-4には、伊勢湾の底層貧酸素水塊面積と環境因子(降水量、河川流量、潮位、平均密度差、底層平均水温)の経時変化を示したが、これをみると先の両者の大きな違いは底層水温の月平均値であり、前者のピークは 23.5°C であるのに対して、後者は 21.0°C と低いことであり、貧酸素水塊の規模と底層水温に相関があると考えられる。図-5は、貧酸素水塊面積と底層水温平均値の相関図であるが、月毎の値を基にした相関ではばらつきが大きく明瞭な関係が見られなかったので貧酸素水塊の発生規模を発生面積と発生期間を考慮した指標として貧酸素水塊の年間累積面積で表し、

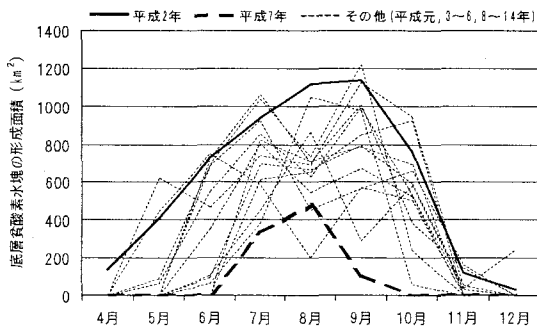


図-3 伊勢湾の底層貧酸素水塊面積の季節変化

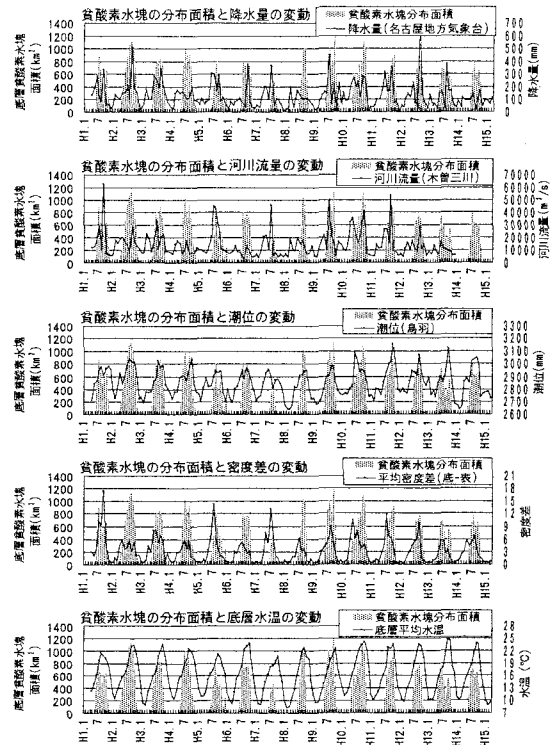


図-4 伊勢湾の底層貧酸素水塊面積と環境因子の経月変化

底層水温の年平均値との関係を見ると明瞭な正の相関が見られた。年平均という長期的なスケールでみることで貧酸素水塊と底層水温の関係が明確となった。

そこで、その他の環境因子との関係を把握するため、貧酸素水塊の年間累積面積とその他の環境因子の年平均値およびそれぞれの組み合わせについて相関係数を求め、表-2にまとめた。相関係数からみると貧酸素水塊との相関は底層水温が 0.66 と最も高く、その他では降水量が 0.49 、平均潮位が 0.42 であった。

伊勢湾では、成層期にみられる湾口からの外洋系水の中層貫入によって形成される底層の隔離水塊が貧酸素化しやすいと言われている。上記では、底層水温が高い年ほど貧酸素水塊の発生規模が大きい結果となっているが、隔離水塊の形成と底層水温の高いことは矛盾するようにも考えられる。中層貫入の程度の多い年とか、外洋系水の水温が高い年には底層水温が高くなるようにも考えられるが、この点に関しては黒潮の流路等も含めて今後の検討課題としたい。

(2) 三河湾について

伊勢湾と同様に三河湾についても、平成6年から平成14年での底層貧酸素水塊の形成面積の月別変化を図-6に、三河湾の底層貧酸素水塊面積と環境因子の経時変化を図-7に示した。

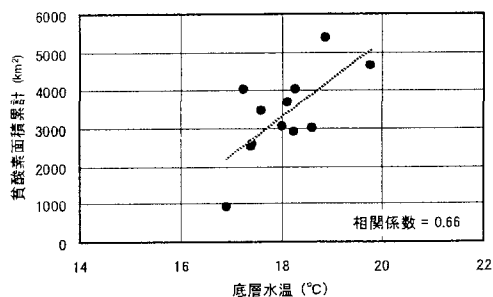


図-5 貧酸素水塊面積と底層水温の関係

表-2 伊勢湾における貧酸素水塊累計面積および環境因子の相互相関

	貧酸素水塊累計面積	降水量	河川流量	平均潮位	平均密度差	底層水温	COD 消失表層
貧酸素水塊累計面積	1.00	0.49	0.28	0.42	0.24	0.66	-0.01
降水量平均	0.49	1.00	0.73	0.41	0.70	0.27	0.06
河川流量	0.28	0.73	1.00	0.18	0.87	0.00	0.35
平均潮位	0.42	0.41	0.18	1.00	0.45	0.50	-0.39
平均密度差	0.24	0.70	0.87	0.45	1.00	-0.03	0.26
底層水温	0.66	0.27	0.00	0.50	-0.03	1.00	-0.03
COD 消失表層	-0.01	0.06	0.35	-0.39	0.26	-0.03	1.00

三河湾の貧酸素水塊は6月に発生し、その後成長と変動を繰り返して10月に消滅するパターンが多くみられる。発生期間が長い年は平成10年と11年であり、逆に短い年は平成14年である。図-7 から両者の大きな差異は密度差と降水量とみることができる。平成14年の河川流量データが未取得であるものの降水量と河川流量の関係から推測すると、河川流量も同様の傾向であると考えられる。

貧酸素水塊と環境因子の関係として、図-8 に貧酸素水塊面積と河川流量の相関図を例示した。この場合も月別の平均値を用いた場合では相関が見られなかったが、貧酸素水塊の発生規模の指標として年間累積面積をとることで両者に明瞭な相関が見られた。他の環境因子についても同様な傾向が見られたので、伊勢湾と同様に底層貧酸素水塊の年間累積面積とその他の環境因子の相関について表-3 にまとめた。貧酸素面積との関係は河川流

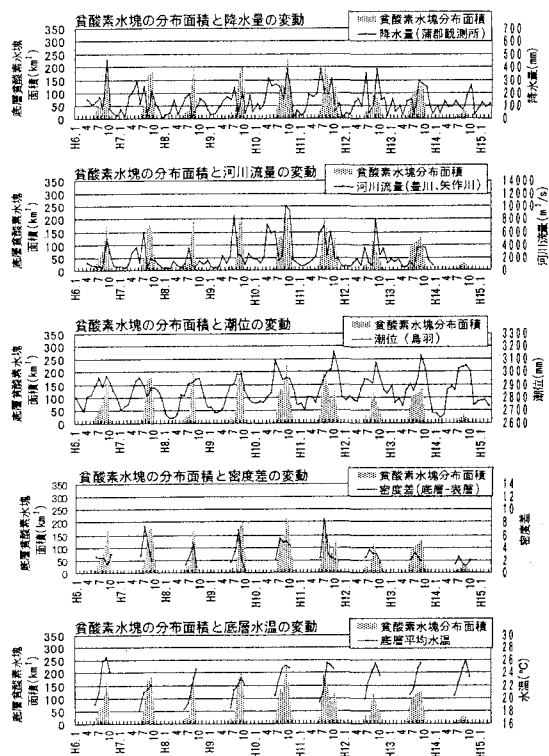


図-7 三河湾の底層貧酸素水塊面積と環境因子の経月変化

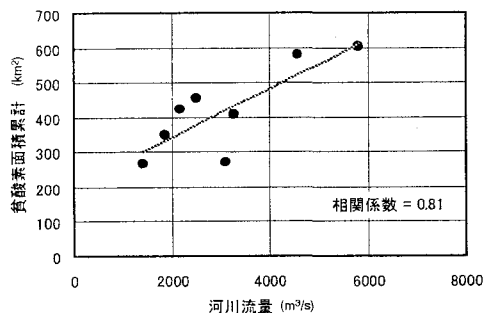


図-8 貧酸素水塊面積と河川流量の関係

量の相関係数が0.81、密度差が0.70、降水量が0.61と他の環境因子に比べ相関が高かった。

湾の容積に対する河川流量の量は表-1 に示したように伊勢湾に比べて三河湾が少ないといえるが、これに反して河川流量の貧酸素水塊への影響は三河湾の方が大きいと考えられる。これは三河湾が伊勢湾に比べ地形的に閉鎖性海域となっているため外洋系水などの影響を受けにくく、湾内の密度差を形成する上で河川流量の影響が大きくなっているものと考えられる。

(3) 環境因子の貧酸素水塊への影響度

伊勢湾および三河湾において貧酸素水塊と各種環境因

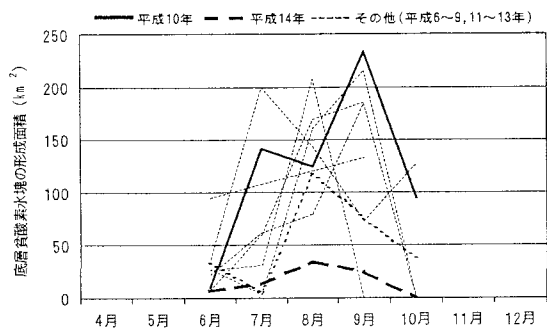


図-6 三河湾の底層貧酸素水塊面積の季節変化

表-3 三河湾における貧酸素水塊累計面積および環境因子の相互相関

	貧酸素 累計面積	降水量	河川流量	平均潮位	平均密度差	底層水温	COD 湾奥表層
貧酸素累計面積	1.00	0.64	0.81	0.56	0.70	0.37	-0.14
降水量平均	0.64	1.00	0.78	0.92	0.39	0.89	0.12
河川流量	0.81	0.78	1.00	0.64	0.67	0.53	-0.30
平均潮位	0.56	0.92	0.64	1.00	0.35	0.81	0.09
平均密度差	0.70	0.39	0.67	0.35	1.00	-0.04	-0.37
底層水温	0.37	0.89	0.53	0.81	-0.04	1.00	0.41
COD 湾奥表層	-0.14	0.12	-0.30	0.09	-0.37	0.41	1.00

子との関係を調べ、伊勢湾では底層水温や降水量、三河湾では河川流量や密度差との相関が高いことを示した。ここでは、それらの環境因子の貧酸素水塊への影響の度合いを把握するため、重回帰分析を行った。

対象としたデータは、表-2 および表-3 の相関係数の算出に用いたデータのうち、貧酸素水塊の年間累積面積を目的変数として、その他の環境因子のうち相互の相関が小さいものを説明変数として選択した。伊勢湾に対する解析では、説明変数として降水量、底層水温、密度差、COD（湾奥表層）および潮位とした。三河湾に対しては、降水量、河川流量、密度差、COD（湾奥表層）とした。

それぞれの重回帰分析結果を表-4 および表-5 に示した。伊勢湾に対する結果は、重相関係数0.74、自由度を調整した重相関係数が0.48、三河湾については、重相関係数が0.85、自由度を調整した重相関係数が0.61であり、両者は必ずしもよい推定結果とはいえないが、今回は環境因子の寄与率の把握を目的とした解析なので問題ないと判断した。

表-4 重回帰分析結果（伊勢湾）

項 目	標準偏差	偏回帰係数	標準化偏回帰係数
降水量平均	29.10	9.17	0.24
底層水温	0.79	929.87	0.67
COD 湾奥表層	0.53	-214.09	-0.10
密度差	1.24	161.35	0.18
潮 位	32.03	-4.72	-0.14
切 片	—	-1679.74	—
貧酸素水塊年間累積面積	1097.17	—	—

表-5 重回帰分析結果（三河湾）

項 目	標準偏差	偏回帰係数	標準化偏回帰係数
降水量	46.97	-0.10	-0.04
河川流量	1471.28	0.06	0.68
COD 湾奥表層	1.85	12.83	0.19
密度差	0.80	51.91	0.33
切 片	—	-1.66	—
貧酸素水塊年間累積面積	126.08	—	—

伊勢湾においては、底層水温の標準化偏回帰係数が0.67、ついで降水量が0.24となっており、貧酸素水塊の発生規模に対して底層水温の寄与率をもっとも高かった。また、三河湾については、河川流量の標準化偏回帰係数が0.68と最も大きく、ついで密度差が0.33となった。

このように、貧酸素水塊発生規模への寄与率の高い環境因子は、重回帰分析からも先に示したものと同様な項目と推測されたが、伊勢湾では底層水温が、三河湾では河川流量が特に寄与率が高いことがわかった。

6. おわりに

①伊勢湾と三河湾の両海域の地形・水深などの差異による貧酸素水塊の発生・成長・消滅に至るプロセスのちがいを1年間の詳細な現地調査によって確認した。

②貧酸素水塊の年間累積面積に着目して長期スケールでの環境要因との関係を調べたところ、伊勢湾では底層水温、三河湾では河川流量の寄与率が高いという結果が得られた。

参 考 文 献

- 赤石正廣・大島巖・鶴飼亮行・青井浩二・黒田伸郎(2005)：現地観測に基づく伊勢湾・三河湾の貧酸素水塊の挙動，海洋開発論文集，第21巻，pp. 391-396。
- 青山裕晃・石田基雄・木村仁美(2002)：海況自動観測ブイ10ヶ年観測結果(1991～2000)からみられる三河湾の赤潮と貧酸素，愛知県水試研報告，第9号，pp. 1-10。
- 石田基雄・原保(1996)：伊勢・三河湾における水質変動と富栄養化について，愛知県水試研報告，第3号，pp. 29-41。
- 鶴崎直文(2002)：三河湾における1989年から2000年にかけての苦潮発生状況，愛知県水試研報告，第9号，pp. 11-18。
- 環境省 HP(2004)：水質総量規制の指定水域における灘別水域環境基礎データ集，中央環境審議会水環境部会，総量規制専門委員会(第5回)議事次第・資料。
- 国土交通省中部地方整備局三河港湾事務所(2003)：三河湾データブック2003，pp. 39-40。
- 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山陽一(2000)：伊勢湾における外洋系水の進入深度と貧酸素水塊の季節変動，海の研究，Vol.9，No.5，pp. 265-271。
- 中部国際空港株式会社，愛知県(1999)：中部国際空港建設事業及び空港島地域開発用地埋立造成事業に関する環境影響評価書，pp. 251-270。
- 藤原建紀(2002)：貧酸素水塊の発生機構解明，伊勢湾の生態系の回復に関する研究，三重県科学技術振興センター共同研究事業報告書，pp. 23-27。
- 三重県科学技術振興センター水産研究部(1990～2003)：漁海況データ集。
- 三重県科学技術振興センター：伊勢湾貧酸素情報(オンライン)，<http://www.mpstpc.pref.mie.jp/SUI/hinsanso/index.htm>，参照2005-04-20。