

夏季の伊勢湾における間欠的中層貧酸素水塊の 形成メカニズムに関する数値的検討

Numerical Analysis of Formation Mechanism of Intermittent Subsurface-layer Hypoxia in Summer in Ise Bay

川崎浩司¹・戸田圭亮²・藤原建紀³・吉岡典哉⁴

Koji KAWASAKI, Keisuke TODA, Tateki FUJIWARA and Noriya YOSHIOKA

This study is aimed at numerically discussing the formation mechanism of intermittent subsurface-layer hypoxia in summer season in Ise bay. The long-term variation of hypoxia was examined by using a quasi three-dimensional numerical ocean model with MOVE-WNP data, which are dataset of an ocean variational estimation system in Western North Pacific. The numerical result revealed that hypoxia in the subsurface-layer was formed by the intermittent intrusion of oceanic water into the bottom layer of the bay. The MOVE-WNP data were also confirmed to be useful in comprehending the influence of ocean on internal structure in a bay through the numerical experiments.

1. はじめに

閉鎖性海域における貧酸素水塊の動態に関して、現地観測を中心に、これまで数多くの研究が実施され、その季節変動特性が概ね明らかになっている。日本三大湾の一つである伊勢湾では、毎年夏季になると、底層に貧酸素水塊が発生する(川崎ら、2006)。また、高橋ら(2000)は、外洋系水の進入深度の変化が湾内の貧酸素水塊の消長過程に大きく寄与していることを明示した。さらに、寛・藤原(2007)は、長期観測データの解析から、夏季における海峡部の密度と湾内の溶存酸素DOには高い相関があることを明らかにした。

このように、伊勢湾における貧酸素水塊の変動に対しては、外洋からの海水進入の影響が大きいと考えられる。したがって、伊勢湾における貧酸素水塊の変動特性を数値的に再現あるいは予測するためには、外洋境界条件を適切に設定することが必須である。川崎ら(2010a)は、気象庁・気象研究所による新たな海洋データ同化システムMOVE/MRI.COM-WNP(Multivariate Ocean Variational Estimation system / Meteorological Research Institute Community Ocean Model - Western North Pacific)より得られた日本近海の外洋情報(MOVE-WNPデータ)の有用性を検討し、同データを内湾の流動・水質計算に活用可能であることを示した。そして、川崎ら(2010b)では、

同データを貧酸素水塊の長期再現計算における外洋境界条件として使用することを試みた。同計算では、河川からの淡水流入や風の効果を簡略化して与えたものの、貧酸素水塊の季節変動を概ね表現できることを示した。加えて、底層と中層の溶存酸素値が逆転する中層貧酸素水塊の存在が数値的に明らかとなった。

伊勢湾における中層貧酸素水塊の存在は、これまでに現地観測結果からも報告されている(赤石ら、2005;藤原、2007)。しかし、この間欠的な中層貧酸素水塊の形成メカニズムについては、時空間的な観測データ量の制約から、十分に解明されていないのが現状である。

本研究では、伊勢湾における貧酸素水塊の長期再現計算を行い、夏季に発生する間欠的中層貧酸素水塊の形成メカニズムについて数値的に検討することを目的としている。また、上述したように、貧酸素水塊の変動に対し外洋の影響が大きいことから、MOVE-WNPデータを長期再現計算に活用するとともに、川崎ら(2010b)で簡略化されていた諸条件に対して実測データを使用することで、計算の高度化を図る。そして、計算結果より、伊勢湾における水質構造、特に中層貧酸素水塊の形成に及ぼす外洋の影響の重要性について議論する。

2. 数値計算の概要

本研究では、寛・藤原(2007)による準3次元流動・物質輸送モデルを用いて貧酸素水塊の長期再現計算を行い、外洋境界条件にMOVE-WNPデータを用いた。以下に、MOVE-WNPデータと長期再現計算の概要を述べる。

(1) MOVE-WNPデータ

気象庁・気象研究所では、太平洋など日本周辺海域における海況予測や海洋現象の分析を目的として、2008年

1 正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
2 正会員 修(工) 東海旅客鉄道(株)
3 正会員 農博 京都大学教授 大学院農学研究科応用生物科学専攻
4 学(理) 気象庁予報官 地球環境・海洋部

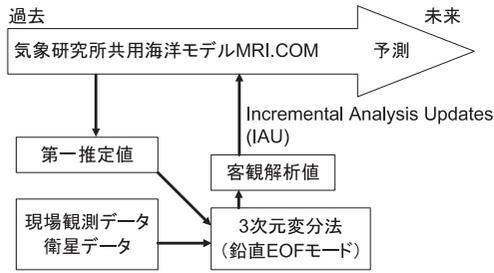


図-1 MOVEシステムの構成

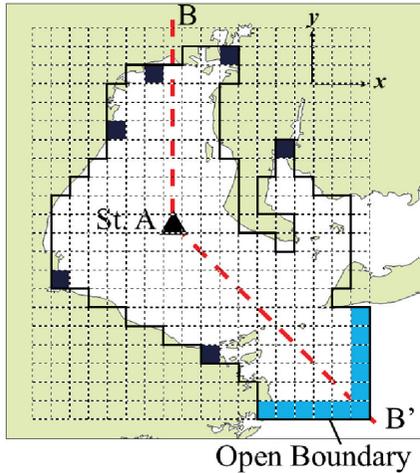


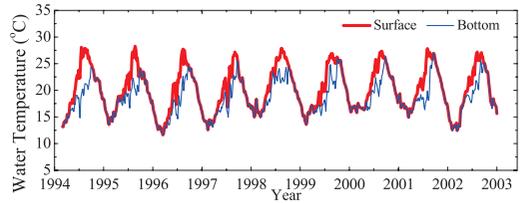
図-2 計算領域

より、海洋データ同化システムMOVE/MRI.COMの運用を開始した。MOVE/MRI.COMは、図-1に示すように、大きく分けて海洋モデルと客観解析システム（データ同化システム）で構成される。海洋モデルには、気象研究所共用海洋モデルMRI.COMを用いている。MOVE/MRI.COMでは、まず、MRI.COMにより第一推定値を算出する。そして、第一推定値と観測データによる客観解析を行ったのち、その結果に基づきMRI.COMを修正することで客観解析結果を反映させている。なお、MOVE/MRI.COMの詳細については、石崎ら（2009）を参照されたい。

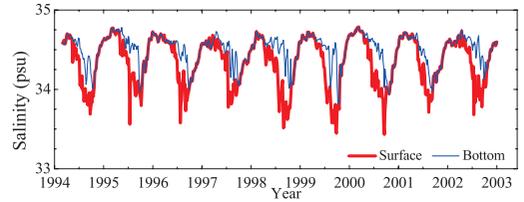
MOVE-WNPデータは、MOVE/MRI.COMによる長期再解析結果を集約したものであり、流速、水温、塩分、海面高度のデータセットとなっている。データ間隔は5日毎、日本近海における水平解像度は1/10度である。日本近海における同データの精度については、楳田ら（2009）によって確認済みである。また、伊勢湾近海の外洋における同データの有用性および伊勢湾への適用性については、川崎ら（2010a）で検証している。

(2) 準3次元流動・物質輸送モデル

貧酸素水塊の長期再現計算には、プリミティブ方程式系にDOの濃度変化を組み込んだ準3次元流動・物質輸送



(a) 水温



(b) 塩分

図-3 開境界南東端における水温・塩分の時系列変化

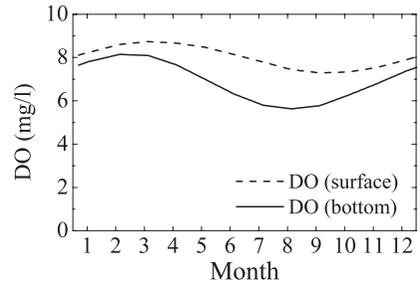


図-4 DOの開境界条件

モデル（笥・藤原，2007）を使用した。計算領域は図-2に示す伊勢湾であり、水平解像度は東西・南北方向とも1/30°（約3km）である。鉛直方向は格子幅4m、15層とした。初期条件は、水温・塩分・DOについて、湾全体で一定値とし、さらに水面変位なしの静止状態とした。外洋境界条件として、図-2中の開境界セルに、MOVE-WNPデータより得られた水温・塩分の値を5日毎に与えた。ここで、水温・塩分の境界値の一例として、図-3に計算領域の南東端における表層・底層それぞれの時系列変化を示す。同図より、水温・塩分の年ごとの差異が確認できる。また、DOの開境界条件に関しては、年ごとのDO変動を考えず、図-4に示す湾口部の観測値に基づくDO値を毎年繰り返し与えることとした。

貧酸素水塊の消長過程に対しては、外洋からの影響のみならず、海水中の生化学反応、河川流入や風からの影響も受ける。本研究では、いくつかの計算条件に実測データを用いるなど、川崎ら（2010b）と比較して計算の高度化を図った。まず、酸素消費速度は、図-5に示すように設定した。図中破線で示す海水の酸素消費速度は、水中の生物化学過程に伴う酸素消費速度であり、すべての海水セルに対して一様に課した。実線で示す海底の酸素消費速度は、底泥の酸素消費速度であり、海底直上の

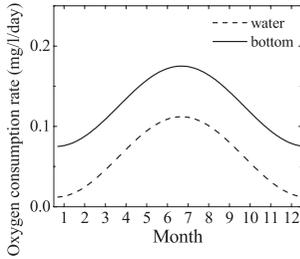


図-5 酸素消費速度の入力条件

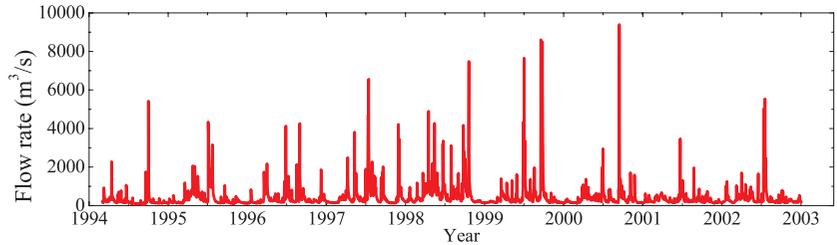
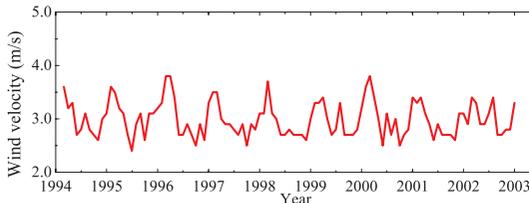
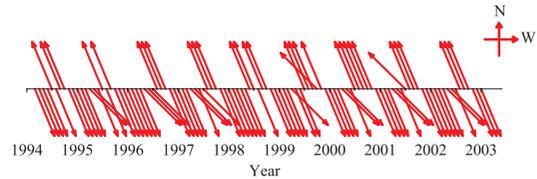


図-6 木曾三川における流量の入力条件



(a) 風速



(b) 風向

図-7 風速・風向の入力条件

セルにのみ与えた。どちらの消費速度も、初夏に最大値をとるように年周期の正弦関数でモデル化し、年ごとの偏差はなしとした。

海域への淡水流入は、河川のみを考慮した。河川流量は、河口が計算領域内に存在する主要9河川(図-2中の■印)に対して、実測データに基づき設定した。ここでは、代表して図-6に木曾三川における流量(木曾川・長良川・揖斐川の合計流量)を示す。

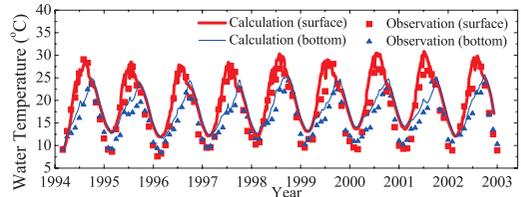
さらに、本計算では風の効果を導入した。図-7に示す名古屋における風速、風向の観測値を月ごとに設定した。なお、風の空間分布は考慮せず、計算領域内に一律な風を与えた。また、大気との熱のやりとりとして、季節変化を考慮した海面熱フラックスを表層セル全域に課した。

以上のような計算条件の下、1994年3月1日0時を初期時刻とし、2002年12月までの3200日間(約9年間)再現計算を行った。

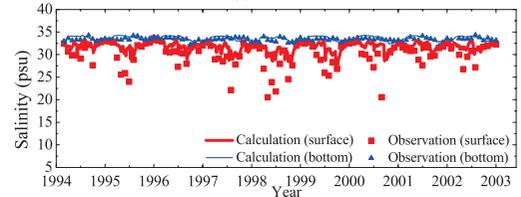
3. 貧酸素水塊の再現計算とその検証

貧酸素水塊の変動特性は、水温・塩分などの物理場の変動にも支配されることから、その検討のためには、まず水温・塩分・DOが数値モデルによって十分に再現されているかどうか検証する必要がある。そこで、まず観測値との比較により、数値モデルの妥当性を検証する。

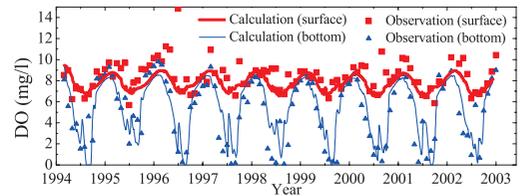
図-8に、湾中央部(図-2中のSt. A)の表層・底層(水深36m)における水温、塩分およびDOの計算値と観測値の時系列変化を示す。同図より、計算値は観測値を良好に再現していることが確認できる。また、夏季における水温成層、図-6に示す出水に対応した塩分低下、貧酸素水塊の発生・消滅など、密度場・水質場の季節変動が表現



(a) 水温



(b) 塩分



(c) DO

図-8 湾中央部(観測点St. A)における計算値と観測値の比較

されているといえる。また、MOVE-WNPデータより得られた外洋境界条件や河川流量など各種計算条件を導入したことにより、年ごとの差異の傾向も表現できている。なお、紙面の制約上図示しないが、湾奥部および湾口部についても計算値と観測値の比較を行い、概ね再現できていることを確認している。以上のことから、本計算結果は、水温・塩分およびDOの変動に対して、十分な再現性を有していることが判明した。よって、以降では、

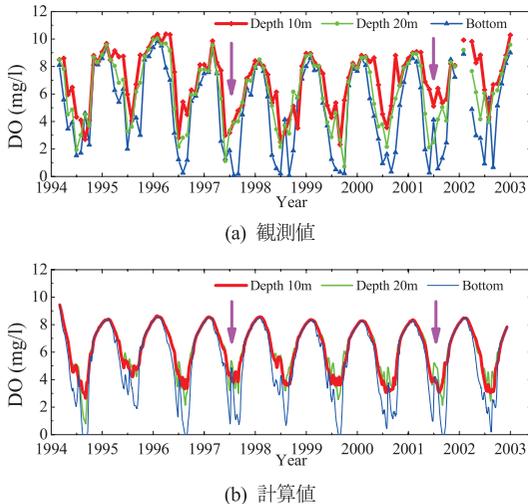


図-9 湾中部（観測点St. A）における中層・底層DOの時系列変化

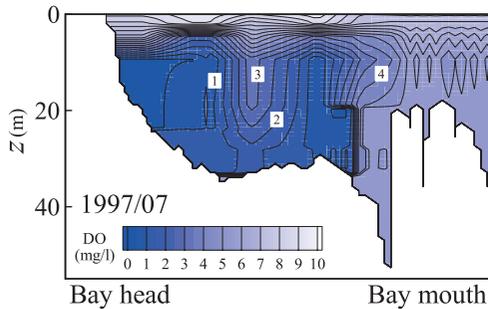


図-10 1997年7月の伊勢湾縦断面（B-B'断面）におけるDO分布（観測値）

本計算結果を用いて貧酸素水塊の変動特性、特に中層貧酸素水塊の形成メカニズムについて議論をすすめる。

4. 中層貧酸素水塊の形成メカニズム

先に示した図-8(c)をみると、夏季に底層で貧酸素水塊が毎年のように発達する様子が理解できる。しかし、ある年では、夏季において一時的に底層DOの値が上昇していることがわかる。ここで、図-9に、観測点St. Aの中層・底層におけるDOの時系列変化を示す。同図より、図中の矢印が示す期間では、観測値、計算値ともに、一時的に中層と底層のDO値が逆転し、中層が貧酸素化しているのが確認できる。本研究では、1997年7月に着目し、中層貧酸素水塊の形成メカニズムについて議論する。

図-10は、1997年7月の伊勢湾縦断面（図-2中のB-B'断面）におけるDOの観測値を表したものである（三重県科学技術振興センター水産研究部の調査による）。同図をみると、中層にDOの低い層が存在していることがわかる。以下に、このような中層貧酸素水塊の形成メカ

ニズムについて、数値的に検討する。

図-11は、1997年7月の伊勢湾縦断面（図-2中のB-B'断面）におけるDOの計算値であり、10日ごとのDO分布の変化を示している。図-11(a)の7月1日には、貧酸素水塊が底層に広がっていることが確認できる。7月11日から7月21日にかけては、底層の貧酸素水塊が湾奥に押し込まれるとともに持ち上がり、中層貧酸素水塊が形成されている様子が認められる。ここで、この期間の同断面における塩分分布を示す図-12をみると、湾口部から34psuの高塩分水塊が湾内底層に進入していることがわかる。外洋から進入した海水は酸素を豊富に含んでいることから、湾内底層に酸素が供給され、貧酸素水塊は湾奥部に押し込まれたものと考えられる。

以上のことから、外洋からの間欠的な底層への海水進入が、中層貧酸素水塊の形成に大きく寄与しているものと判断される。また、藤原(2007)においても、現地観測データから、外洋からの間欠的な底層進入により中層貧酸素水塊が形成されると推測されており、本研究においても、同様な中層貧酸素水塊の形成メカニズムを、数値計算の面から明示することができた。

これまでの議論から、中層貧酸素水塊の形成に対して外洋からの海水進入が大きな影響を及ぼしていることが判明したが、さらに外洋の影響の重要性を検討するため、MOVE-WNPデータを使用しない計算を実施した。これは、湾口部における1ヶ月毎の観測値に基づき、水温・塩分の外洋境界値を与えたものである。なお、DOの開境界条件など、その他の条件については変更していない。計算結果を図-13に示す。同図は、図-11と同様、1997年7月の伊勢湾縦断面（図-2中のB-B'断面）におけるDOの計算値である。MOVE-WNPデータを使わない場合、図-11のように中層貧酸素水塊が再現されていないことがわかる。この要因としては、観測データは1ヶ月毎の値であり、それ未満の時間スケールの密度場の変動を考慮できないことが挙げられる。一方、MOVE-WNPデータは5日毎のデータであるので、数日スケールの外洋の変化を考慮できるといえる。したがって、数日スケールの外洋の密度変動が、間欠的な中層貧酸素水塊の形成に寄与していると判断された。同時に、内湾の密度場・水質場の再現計算に対するMOVE-WNPデータの有用性が検証された。

5. おわりに

本研究では、伊勢湾における貧酸素水塊の長期再現計算を行い、夏季に発生する間欠的な中層貧酸素水塊の形成メカニズムについて数値的に検討した。その際、貧酸素水塊の変動に対し外洋からの海水進入の影響を考慮するために、気象庁・気象研究所によるMOVE-WNPデー

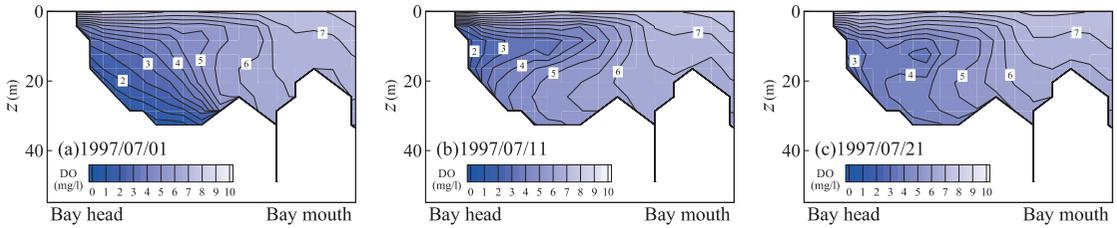


図-11 1997年7月の伊勢湾縦断面 (B-B' 断面) におけるDO分布 (計算値)

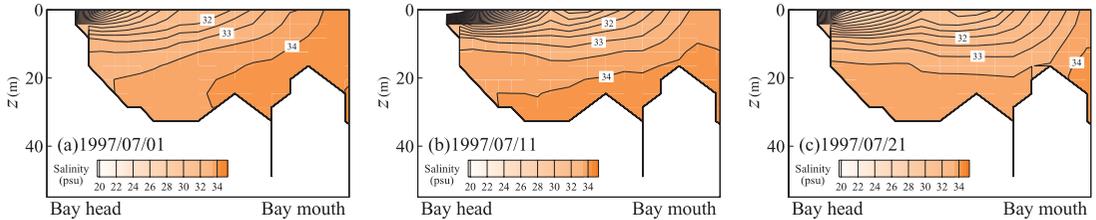


図-12 1997年7月の伊勢湾縦断面 (B-B' 断面) における塩分分布 (計算値)

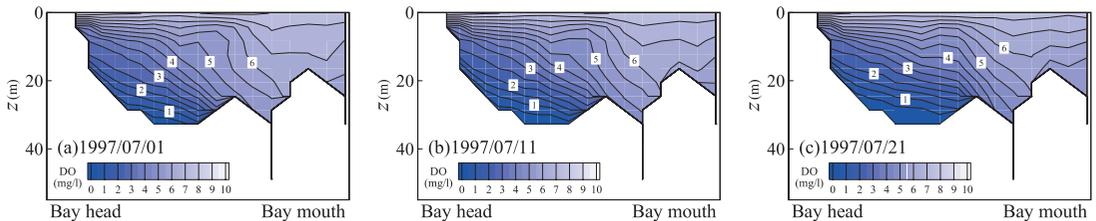


図-13 MOVE-WNPデータを用いない場合の1997年7月の伊勢湾縦断面 (B-B' 断面) のDO分布 (計算値)

タを長期再現計算に活用した。その結果、外洋からの高塩分水塊が間欠的に底層進入となることで、底層の貧酸素水塊が湾奥に押し込まれると同時に持ち上がり、中層貧酸素水塊となるのが数値計算から判明した。このことから、伊勢湾における水質構造、特に中層貧酸素水塊の形成に対して、陸域起源の影響のみならず、外洋からの海水進入の影響も非常に大きいことが明らかとなった。さらに、MOVE-WNPデータを使用することで、外洋における数日スケールの密度場の変動を考慮でき、間欠的な進入深度の変化を再現可能であることがわかった。よって、MOVE-WNPデータの内湾計算に対する有用性が証明された。

今後も引き続き、伊勢湾における水質構造に関する研究を進めるとともに、貧酸素水塊のみならず、栄養塩の挙動などにも研究を展開していく予定である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究(A) (研究代表者：名古屋大学・川崎浩司，課題番号：21686046)であることをここに付記し、感謝の意を表す。また、本論文の執筆にあたり、名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程1年生・鈴木一輝君に協力を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

赤石正廣・大島 巖・鶴飼亮行・青井浩二・黒田伸郎 (2005)：現地観測による伊勢湾・三河湾の貧酸素水塊の挙動の把握，海洋開発論文集，第21巻，pp.391-396。
 石崎士郎・曾我太三・碓氷典久・藤井陽介・辻野博之・石川一郎・吉岡典哉・倉賀野連・蒲地政文 (2009)：MOVE/MRI.COMの概要と現業システムの構築，測候時報，第76巻，特別号，pp.S1-S15。
 株田貴郁・菅野能明・今泉孝男・石崎士郎・木村未夏・大森正雄・吉岡典哉・服部宏之・齋藤幸太郎・倉賀野連 (2009)：日本近海におけるMOVE/MRI.COM-WNPの検証，測候時報，第76巻，特別号，pp.S17-S36。
 笈 茂徳・藤原建紀 (2007)：伊勢湾の貧酸素化をモデル化し予測するー貧酸素化はひどくなっているか良くなっているのかー，月刊海洋，Vol. 39, No. 1, pp.15-21。
 川崎浩司・戸田圭亮・藤原建紀・吉岡典哉 (2010a)：閉鎖性内湾における海洋データ同化システム情報の有用性について，海洋開発論文集，第26巻，pp.777-782。
 川崎浩司・戸田圭亮・藤原建紀・吉岡典哉 (2010b)：海洋データ同化システム情報を活用した伊勢湾における貧酸素水塊の長期再現計算，沿岸海洋研究，第48巻，第1号。(印刷中)
 川崎浩司・村上智一・大久保陽介 (2006)：長期現地観測データに基づく伊勢湾の密度・水質構造の季節変動特性，海岸工学論文集，第53巻，pp.946-950。
 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。
 藤原建紀 (2007)：伊勢湾の貧酸素水塊はどのようにしてできるか，月刊海洋，Vol. 39, No. 1, pp.5-8。