# 伊勢湾での陸域負荷削減が一次生産量と貧酸素水塊の規模に与える影響

Effects of Riverine Load Reduction on Primary Productivity and Hypoxia in Ise Bay

田中陽二<sup>1</sup>·中村由行<sup>2</sup>·井上徹教<sup>3</sup>·鈴木高二朗<sup>4</sup>·内田吉文<sup>5</sup>·澤田 玲<sup>5</sup>·内藤了二<sup>6</sup>

Yoji TANAKA, Yoshiyuki NAKAMURA, Tetsunori INOUE, Kojiro SUZUKI Yoshifumi UCHIDA, Akira SAWADA and Ryoji NAITO

Ise Bay is still suffering from eutrophication and hypoxia frequently occurs in the hypolimnion, whereas discoloration of cultivated laver has been repeatedly found in recent years. In this paper, sensitivity analysis was conducted to assess the effect of riverine load reduction on primary productivity and occurrence of hypoxia in Ise Bay using a numerical model. Although riverine load reduction caused a local decrease in primary productivity around river mouths and a delay of hypoxia development, the bay-scale improvement was hardly found from the analytical results. Moreover, internal load of phosphorus, which was equivalent to 58% of riverine load, was hardly affected by the reduction. To summarize, riverine load reduction was considered to be less effective regarding primary production and hypoxia in Ise Bay.

## 1.序論

伊勢湾では水質総量規制が1970年代から行われてお り、水質改善に一定の成果が得られたものの、近年の水 質は横ばい傾向であり(環境省,2010),特に底層の貧酸 素化は依然として深刻な状況にある(大島ら,2005).一 方で、陸域負荷を削減し過ぎることによって、ノリ養殖 への被害や生態系の弱体化を引き起こすことも懸念され る.ノリ養殖に関しては、実際に溶存態窒素の枯渇によ る色落ち問題が報告されている(坂口ら,2009).

今後の水質保全施策の方向性を決定するには、海域の 物質輸送場を正確に把握し、陸域負荷削減の効果を定量 的に予測する必要がある.特に、本研究では海域の物質 循環の中心となる一次生産量と、生物への影響が深刻で ある貧酸素水塊の規模に着目した.本研究の目的は、陸 域負荷の削減が伊勢湾の一次生産量と貧酸素水塊の規模 に与える影響を、数値実験により把握することである.

## 2. 陸域負荷の分画比の検討

詳細な物質循環の解明や生物生産への影響の解析には 陸域からの負荷量を精度良く求める必要がある.ところ が,既往の数値計算では,COD(または全炭素:TOC),全 窒素(TN),全リン(TP)をL-Q式で推定し,各形態の分 画比については一定比率を仮定することが多い(例えば,

1	正会員	博(環)	横浜国立大学大学院 研究教員
2	正会員	工博	(独法)港湾空港技術研究所 研究主監
3	正会員	博 (工)	(独法)港湾空港技術研究所 上席研究官
4	正会員	修(工)	(独法)港湾空港技術研究所 チームリーダー
5			名古屋港湾空港技術調査事務所
6	正会員	博 (工)	名古屋港湾空港技術調査事務所(現清水
			港湾事務所)

田中ら, 2011).しかしながら,陸域負荷は一般的に,流 量が増加すると懸濁態の負荷が増加するため(國松・村 岡, 1989),負荷の分画を一定比率とすることには問題が ある.

そこで、木曽川・庄内川・豊川・矢作川での出水時の 調査結果をもとに、流量に応じた負荷量の分画比率の経 験式を作成した.出水調査は中部地方整備局によって、 木曽川・庄内川は2009~2010年、豊川・矢作川は2011 年に、それぞれ行われた(中部地方整備局、2011).

流量と各分画比率の関係式は流量の累乗関数を用いた.

ここで, yは分画比率, a, bはモデルパラメータである.

また,流量と分画比の傾向は上記4河川でほぼ同様で あったため,求めたパラメータを他の一級・二級河川に も適用した.解析結果の一例を図-1に,分画比のパラメ ータを表-1に示す.なお,TOC/CODの変換比率は観測 結果の平均値である0.405(重量比)を用い,流量との関 係性は見られなかったため一定値とした.



分画比:y	а	b	決定係数
DOC/TOC	8.821	-4.50×10 <sup>-1</sup>	0.840
DTN/TN	5.895	-3.53×10 <sup>-1</sup>	0.971
DON/DTN	0.365	-8.93×10 <sup>-2</sup>	0.006
NH4/DIN	0.217	-1.58×10 <sup>-1</sup>	0.022
NO <sub>3</sub> /(NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> )	0.984	5.12×10 <sup>-4</sup>	0.000
DTP/TP	5.435	-4.56×10 <sup>-1</sup>	0.866
DIP/DTP	0.492	7.39×10 <sup>-2</sup>	0.046

表-1 各分画比の経験式のパラメータ(y = aQ<sup>b</sup>)



図-2 浮遊生態系-底生生態系結合モデルの概要(点線は計 算されないコンパートメント)

## 3. 数値モデルの概要と計算結果の検証

#### (1) 数値モデルの概要

数値モデルは著者らが開発した浮遊生態系-底生生態 系結合モデル(STOC-LT,別称:伊勢湾シミュレーター) を用いた(図-2).流動モデルの特徴として,非静水圧近 似,レベル座標系,TVDスキームを使用していることが 挙げられる.生態系モデルの特徴として,微生物ループ を考慮していること,マルチGモデル(有機物を多段階 の分解速度に変数を分け,易分解性や難分解性の有機物 を考慮できるモデル),および底泥内の詳細な物質循環 モデルを浮遊生態系モデルと結合していることが挙げら れる(田中ら,2011).

## (2) 計算条件

現状再現計算では、流入河川は一級・二級河川(計41



図-3 伊勢湾・三河湾の計算メッシュと水質観測地点

河川)を考慮した.気象データは伊勢湾周辺の気象観測 値を空間補間して1時間毎に与えた(気象庁,2012).外 洋の潮汐は主要13分潮を与えた.計算メッシュは水平 2km格子,鉛直方向に28層(水深41mまでは1~2m間隔) とした(図-3).計算期間は2004~2005年とし,解析に は2005年の結果を用いた.

浮遊生態系モデルの生物構成として,植物プランクト ンはサイズの大きい順に,珪藻・渦鞭毛藻・独立栄養性 微小鞭毛虫・シアノバクテリアの4種類に分類した.原生 動物は繊毛虫と従属栄養性微小鞭毛虫の2種類に分類し た.好気性細菌は1種類とした.動物プランクトンは1種 類とし,粒子状有機物質 (POM)・珪藻・渦鞭毛藻・繊毛 虫を捕食する,ろ過食性動物プランクトンとした.有機 物の分解速度は3種類(易分解,準易分解,難分解)に区 分した.また,魚による捕食は無視した.生態系モデル のパラメータは観測結果に合うように決定された.

陸域負荷削減の応答解析では,陸域負荷を一律10~ 50%削減させた計算を行った.その他の計算条件は現状 再現計算と同じである.

#### (3) 現状再現計算の検証

2005年の現状再現計算(Case Oとする)について,湾 奥部での観測結果(St.1,図-3)と比較を行った(図-4). 観測値は三重県水産研究所の浅海定線観測データを用い た.計算結果の水温・塩分はともに観測結果を良好に再 現していた.溶存酸素(DO)についても夏場に発生す る底層の貧酸素化が計算で再現できていた.

植物プランクトン (クロロフィルa) については, 2005年は高頻度の観測データがないため比較できなかっ た.ただし,既往の研究結果(田中ら,2012)から,使 用したモデルでの計算値が2010年のクロロフィルaの観 測値を良好に再現できたことが確認されている.

なお,ここでは示さないが,三河湾では全体的に計算 結果のクロロフィルaが観測値よりも低かった.理由は



図-4 伊勢湾湾奥部 (St.1) での計算結果と観測値の比較

不明確であるが,三河湾に流入する河川負荷が少ないこ とが一因として考えられる.したがって,今回の検討で は狭義の伊勢湾のみを対象とした.

## 4. 陸域負荷の削減に対する応答解析

#### (1) 伊勢湾の春期における水質場の特徴

2005年6月の月平均流動・水質場を図-5に示す.表層 の流動場は湾奥から西側を蛇行しながら湾口へ向かう流 れとなっていた.また,湾央部に時計回りの弱い循環流 が形成されており,これは既往の研究(佐藤,1996;田中 ら,2010)でも報告されている循環流である.

表層の溶存態無機リン(DIP)は河口部と湾口部で高 い分布であった.河口から離れた場所ではDIPが少なく なっており,河川から供給されたDIPが植物プランクト ンによって急速に消費されたことを示している.湾口部 でDIPが高くなっているのは,知多湾および外洋からの 流入と伊良湖水道や師崎水道での強い鉛直混合が原因で ある.実際に,伊良湖水道付近では潮流によって強い鉛 直混合が発生することが報告されている(大澤ら, 2003).

表層のクロロフィルaは河口部,特に湾奥部で高くなっており,湾口部に向かうにつれて減少する分布となっていた.水柱平均の一次生産量も表層のクロロフィルaと同じく,河口部で高い値となっていた.一方で,伊良湖水道から知多半島南部にかけて一次生産量が比較的高くなっており,表層のクロロフィルaの分布と異なっていた.これは,知多湾や外洋からの栄養塩供給が鉛直混合によって有光層にリンが供給されるとともに,植物プ







図-6 伊勢湾湾奥部(St.1)の表層における現状再現ケースと負 荷50%削減ケースの水質時系列変化

ランクトンも鉛直混合によって拡散されるため,水柱平 均での一次生産量が高くなったものと考えられる.

#### (2) 陸域負荷の削減と一次生産量への応答

伊勢湾湾奥部(St.1)の表層における負荷50%削減ケ ース(Case R50)とCase Oの水質時系列変化を図-6に示 す. DIP・溶存無機態窒素(DIN)ともに負荷削減によ る濃度低下が見られるが,DINの方が負荷削減による濃 度低下が比較的大きかった.理由として,DIPは河川か らの供給に加えて,底泥からの溶出による供給も多いこ



図-7 2005年6月平均での現状再現ケースと負荷10%削減ケースとの差分(Δ=Case R10 - Case O):表層クロロフィルa
(a),水柱一次生産量(b)



図-8 伊勢湾における貧酸素水塊体積の絶対値 (a)と現状再現ケ ースとの差分 (b)

とが考えられ、これについては後ほど考察を行う.クロ ロフィルaは、4月から11月にかけて負荷削減ケースで 減少幅が大きかった.一方、冬期では水温の低下が植物 プランクトンの制限因子となることから、クロロフィル aの低下は少なく、負荷削減の効果が小さかった.なお、 他の負荷削減率の計算結果でも上記と同様の現象が見ら れた.

2005年6月における,負荷10%削減ケース(Case R10) とCase Oの表層クロロフィルaと水柱平均の一次生産量 の差分(Case R10-O)の分布を図-7に示す.Case R10で はCase Oと比較して,クロロフィルaと一次生産量は全 体的に低下し,特に湾奥部で大きく減少していた.また, 知多半島南部から湾口部にかけて一次生産量がやや低下 しており,これは知多湾からの栄養塩供給が減少したた めと判断され,知多湾(三河湾)での負荷削減が伊勢湾 にも影響を及ぼすことを示している.

#### (3) 陸域負荷の削減と貧酸素水塊の規模への応答

各計算ケースと貧酸素水塊の体積の時系列変化を図-8 に示す.ここで、貧酸素水塊はDOが3mg/L以下と定義 した.現状再現ケースでは6月頃から底層で貧酸素水塊 が形成され始め、7月から急激に貧酸素水塊の体積が増 加する.これは、6月では湾奥部などの一部海域で貧酸 素水塊が形成されていたが、7月には湾全域で底層に貧 酸素水塊が形成されたためである.

負荷削減ケースでは,現状再現ケースと比べて貧酸素 水塊の体積が急激に拡大する7月ではその差分が大きい けれども,8月以降は両者の差が縮まった.これは負荷 削減が貧酸素水塊の形成時期を遅らせる効果があるもの の,貧酸素水塊の最大体積を減少させる効果が少ないこ とを意味している.

#### 5.考察

陸域の負荷削減が一次生産量と貧酸素水塊の規模に与 える影響について考察する.負荷削減率に対する春期 (4~6月)の一次生産量の分布状況を図-9に示す.負荷 削減率の上昇に伴い,一次生産量の最大値の低下が著し く,標準偏差も低下していた.しかしながら,一次生産 量の湾平均値は負荷削減率に対してほとんど低下してい ない.

また,貧酸素水塊の規模に与える影響も,貧酸素水塊 の形成を遅らせていたが,貧酸素水塊の規模のピーク値 には削減効果が小さかった.貧酸素水塊の最大体積を負 荷削減率と比較すると(図-10),負荷50%削減に対して 減少した貧酸素水塊の最大体積の低下率は9%であった.

これらの原因として、底泥からの栄養塩供給が関係し









ていることが考えられる.一般的に, 富栄養化した閉鎖 性内湾では陸域からの栄養塩供給(外部負荷)の他に, 海底に堆積した底泥からの溶出による栄養塩供給(内部 負荷)が存在する.もし,内部負荷が外部負荷と同程度 に大きい場合は,外部負荷の削減効果が表れにくくなっ てしまう.

図-11に負荷削減に対するTPの流入出量を示す.現状 再現ケースでは正味の底泥とのフラックス(内部負荷) は陸域負荷の58%に相当していた.また,陸域負荷が減 少しても,内部負荷の変化は微小であった.これは負荷 削減によって底泥へ沈降する有機物量が減少しても,リ ンの溶出量も有機物の沈降量の減少と同程度に留まった ため,正味の底泥とのTPフラックス(内部負荷)が変わ らなかったことを示している.この結果は図-6で示した ように,陸域の負荷削減に対して,DIPの減少量が少な い結果とも符号する.

すなわち,伊勢湾では底泥からのリンの溶出が大きい ため,外部負荷の削減を行っても,その影響は河口付近 に留まり,湾平均で見た場合では,一次生産量に対する 削減効果は比較的小さくなっていた.そのため,外部負 荷の削減は貧酸素水塊の形成を遅らせるものの,貧酸素 水塊の規模のピークを抑えることにはあまり寄与しなか った.この結果は,伊勢湾の環境修復には外部負荷を削 減するだけではなく内部負荷も抑えること,すなわち, 底泥環境の改善が必要であることを示唆している.また, 序論で述べたように,伊勢湾でDINの減少によるノリの 色落ち被害が報告されていることを踏まえると,陸域負 荷の削減については慎重に対応するべきであろう.

## 6. 結論

本研究では、伊勢湾において陸域負荷の削減効果が水 質環境,特に一次生産量と貧酸素水塊の規模に及ぼす影 響について,数値モデルを用いて応答解析を行った.本 研究で得られた成果は以下の通りである.

- (1) 出水時の観測から,流量に応じた陸域負荷の形態 比率を求める経験式を提案した.
- (2)陸域負荷の削減は河口付近での一次生産量を減少 させたが、湾平均での一次生産量を低下させる効 果は比較的少なかった。
- (3)陸域負荷の削減は貧酸素水塊の形成時期を遅らせる効果があった。しかしながら、貧酸素水塊の最大体積を減少させる効果は比較的少なく、負荷50%削減に対して貧酸素水塊の最大体積は9%の低下に留まった。
- (4) 現状再現ケースではリンの内部負荷は外部負荷の 58%に相当していた.加えて、外部負荷を減らし ても内部負荷はほとんど変化しなかった.そのため、陸域負荷の削減は一次生産量と貧酸素水塊の 規模に与える影響が少なかった.このことは、伊 勢湾での水質環境保全を考える場合、底泥環境の 改善が必要であることを示唆している.

謝辞:本研究を進めるにあたり,関係機関の方々には関 連資料のご提供を頂いた.ここに記して謝意を表す.

#### 参考文献

- 大澤輝夫・伊藤秀文・水谷英朗・西部隆一郎・安田孝志(2003): 成層期における伊勢湾口での海面温度低下と鉛直混合,海 岸工学論文集,第50巻, pp.946-950.
- 大島 巌・鵜飼亮行・赤石正廣・青井浩二・黒田伸郎(2005): 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,海岸工学論文集,第52巻,pp.901-905.
- 環境省(2010):第7次水質総量削減の在り方について,中央環境 審議会水環境部会 総量削減専門委員会(第9回)議事次 第・資料.
- 気象庁 (2012): 気象観測データ, http://www.jma.go.jp/jma/menu/ obsmenu.html.
- 國松孝雄・村岡浩爾 (1989):河川汚濁のモデル解析, 技法堂出版, 266p.
- 坂口研一・岩出将英・藤田弘一 (2009): 伊勢湾の栄養塩環境とノ リ養殖, 海洋と生物, Vol.31, No.2, pp.158-160.
- 佐藤 敏(1996):伊勢湾表層の循環流について,沿岸海洋研究, 第33巻,第2号, pp.221-228.
- 田中陽二・鈴木高二朗・内田吉文・白崎正浩(2010):伊勢湾・三 河湾における海洋短波レーダーを用いた表層平均流に関す る研究,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.1431-1435.
- 田中陽二・中村由行・鈴木高二朗・井上徹教・西村洋子・内田吉 文・白崎正浩 (2011): 微生物ループを考慮した浮遊生態系 モデルの構築と伊勢湾への適用, 土木学会論文集 B2 (海岸 工学), Vol.67, No.2, pp.I\_1041-I\_1045.
- 田中陽二・神野有生・篠原隆一郎(2012):全天日射量の増加が伊 勢湾での一次生産と貧酸素水塊に与える影響,土木工学論 文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I\_1603-I\_1608.
- 中部地方整備局(2011):平成22年度伊勢湾再生行動計画の中間 評価業務報告書.