

— 寄稿 —

シンポジウム「有明海貧酸素水塊の実態と要因」の報告\*

佐々木 克之†

要 旨

近年、有明海奥部では干潟縁辺やその沖および諫早湾で顕著な貧酸素が頻発し、漁獲量も減少している。この貧酸素水塊出現の主たる原因は、近年の赤潮の大規模化であることが確認された。赤潮の大規模化の原因に関しては、潮流、密度流（内部モード）の変化及び成層度の強化などの物理的要因の変化、ならびに泥分輸送や栄養物質循環の変化について議論され、今後の課題が抽出された。

キーワード：有明海奥部、諫早湾、赤潮の多発、貧酸素水形成機構

1. シンポジウムの概要

海洋環境問題委員会は、有明海で2000年から2001年にかけて起きたノリ大不作以降に、有明海異変問題について沿岸環境関連学会連絡協議会（沿環連）のシンポジウムを3度企画してきた（2002年：「諫早湾締切が有明海環境に及ぼす影響の検討」、2003年：「有明海生態系異変原因解明の到達点」、2005年：「有明海再生をめざして」）。このように検討を重ねてきたが、有明海の漁業生産はいまだに回復せず、魚種によっては減少傾向が続いている。漁業にとって特に深刻なのは、貧酸素水塊の広がりや長期化であるので、今回は、有明海の貧酸素の実態を広く知ってもらうとともに、貧酸素水の原因解明について幅広く議論をしたいと考えて、堤裕昭、松川康夫、佐々木克之の三委員がコンビーナとなって、第21回沿環連ジョイント・シンポジウム「有明海貧酸素水塊

の実態と要因」を2009年10月31日、佐賀大学において開催した。最初に広石伸互沿環連代表、次に佐賀大学有明海総合プロジェクト 速水祐一氏からあいさつがあり、佐々木から趣旨説明を行った。

講演者（敬称略）と発表課題は以下の通りである。

- 児玉真史（中央水研）・他：連続モニタリングからみた有明海奥部における貧酸素水塊の特徴
- 山口敦子（長崎大）：底生魚類減少要因の解明に向けた最近の研究から
- 堤裕昭（熊本県立大）：海水構造と海底環境の調査より導き出される貧酸素水発生のメカニズム
- 田井明（九州大）・他：潮汐・潮流および成層強度の長期変化に関する最新の研究
- 速水祐一（佐賀大）・他：海洋構造・物質輸送からみた有明海の貧酸素水塊形成機構
- 田中昌宏（鹿島建設）：数値シミュレーションによる有明海湾奥部の貧酸素水塊形成機構の検討
- 総合討論（90分間）

（冒頭報告……松川康夫（元中央水研）：貧酸素水塊形成機構の整理）

閉会のあいさつ：今井一郎沿環連副代表

参加者は78名で、内訳は大学39、国立研5、自治

\* 2010年6月15日受領；2010年8月11日受理

著作権：日本海洋学会，2010

† 〒064-0807 札幌市中央区南7条西23丁目1-15-422

電話 & FAX 011-532-5851

E-mail address : katusa@dia-net.ne.jp

体7, 民間16 (うちマスコミ4), 市民・漁民8, その他 (退職研究者・所属不明)3で, 大学関係者が半数, 民間の調査会社, 市民・漁民, 自治体関係者, 国立研の順であった。7名から寄せられた感想文を簡単に紹介する。

- 貧酸素水を題材としたシンポは有意義であり, このような場を増やしてもらいたい
- 講演者同士の考え方に不一致点がみられたので, その詰め作業が必要である
- 是非とも数年後にまた開催していただきたい
- 漁業者の私どもと一致するところがありますが, 残念ながら原因の特定にいたっていないので, 決定打がほしい
- 国が開門しなかったのは疑問, 有明海の研究の進展に期待したい
- この5年間に有明海について新事実や判明し, 解明が進んだ, 今後は水温上昇の影響に関するシンポを期待する
- 諫早市民として, 開門すればこんないい結果になるというシミュレーションをしてほしい, 次は赤潮についてのシンポを期待する
- 非常に勉強になり面白いシンポだった, 赤潮の発生要因について有明海の個々の海域ごとに検討していく必要がある。

シンポジウム開催にあたって, 速水祐一博士をはじめとする佐賀大学の方々にたいへんお世話になり, 感謝いたします。

## 2. 講演内容の概略

**2.1** 児玉は, 筑後川河口から塩田川河口にいたる有明海奥部の8点で, 2007年6月から2007年9月の間に週一回の頻度で水温, 塩分, DO観測を行った結果を報告した。夏季には小潮時に貧酸素, 大潮時に回復のパターンとなること, 沖側に比べて干潟域の酸素減少が大きいこと, 東側の福岡県側と比較して西側の佐賀県側で酸素減少速度が大きいことなどが明らかにされた。酸素消費速度は, 底層水中の有機懸濁態炭素(POC)濃度と対応していること, POCによる酸素消費速度は, 懸濁物のC/N比と反比例することが示された。また, この酸素消費速度が大きい試料は, シャトネラ赤潮発生後に得

られたものであり, 海域で生産された比較的新鮮な有機物が貧酸素化に寄与していることが示唆された。まとめとして, 近年の著しい貧酸素水形成の原因としては, 酸素消費の主体となる有機物の増大であり, 具体的には海域の一次生産量の増加, 有機物の集積機構(例えば残差流によって懸濁物質が湾奥へ輸送される)の強化と除去機能の低下を考察した。

**2.2** 山口は, 底層を主な生活の場としている魚類の事例としてシログチを取り上げた。諫早湾干拓事業開始年を基準とすると, 有明海の底層を生活の場としているカレイ類の漁獲量は約15%に, ニベ・グチ類(シログチを含む)は40%に, ヒラメは50%に減少している。シログチ成魚は周年島原半島沖から湾外に至る海域に分布する。産卵盛期は7月~8月の間で, 産卵場所は有明海中央部から湾口部の水深40~60mの間の底層である。全長10cm程度までの稚魚は6~10月にかけて主に水深の浅い奥部に出現する。有明海奥部で成長した稚魚は, 成長にともなって次第に深い海域へ移動し, 秋から冬にかけて有明海中央部で成魚と合流する。満1歳を迎える翌年の夏にはすべての個体が成熟に達し, 産卵に加わる。このときの全長は16cmである。

シログチは底層に生活しているので, 貧酸素の影響を受けやすいと考えられるが, 生活史に沿って細かく検討する必要がある。稚魚は主に湾奥部の河口域に出現する。近年の有明海奥部の干潟域は頻繁に貧酸素となるので, その影響が危惧される。漁民が述べているように流れの減少も生活史初期の生残を著しく悪化させている可能性がある。また, 貧酸素や流れの減少による餌生物の種組成が変化することにより餌が減少する可能性もある。河川環境の悪化, 干潟面積の縮小, 底質の悪化, 海砂採取などによる成育場の破壊や減少も生残悪化へ導くと考えられる。近年の海水温上昇も懸念される。これらに加えて, 漁獲や, 飢餓と被食(とりわけ生活史初期の減耗は致命的に大きい)がある。これらのさまざまな環境変化が産卵や初期減耗にどのように影響を及ぼしているのか検討を進めている。

**2.3** 堤は, 2001年以降有明海縦断面観測を実施している結果を報告した。大浦と大牟田を結ぶ線の内側の有明海奥部では夏季の海底直上のDOが, 2001年の3.5 mgL<sup>-1</sup>が2005年には2.0 mgL<sup>-1</sup>となり, 2006年と

2007年の夏季にはほとんど無酸素状態が発生するまで年々低下したが、2008年は約 $3.0\text{ mg L}^{-1}$ に回復した。有明海奥部の底質をみると、2002年のある観測点の泥分が20%であったが、2004年以降では同じ観測点で92%と急激に泥化した。同時に有機炭素濃度も $18\text{ mg C g}^{-1}$ から $27\text{ mg C g}^{-1}$ に増加した。

環境省有明海・八代海総合調査評価委員会(2006)は、「奥部の干潟縁辺部においては、赤潮の大量の有機物が底質に供給されて、底泥・底層水の酸素消費により小潮時に急速に貧酸素化する。……沖合域では浅海域に遅れて貧酸素化が起こり、小潮時に浅海域で形成された貧酸素水塊が潮汐により沖合域へ移流・拡散しているものと推察される」と述べているが、堤は違う考えを示した。干潟浅海域に沖合域から供給される海水は、沖合域ですでに酸素が少なくなっていて、赤潮などで底質に有機物が堆積すると、海水容量の小さい干潟域でより早く貧酸素化する。その後、より容量の大きい沖合域下層で水中および底質の有機物を消費して沖合域でも貧酸素化すると考えた。沖合域底層を貧酸素化するには、干潟域で起きた貧酸素水塊だけでは量的に無理で、赤潮の沈降によって供給された大量の有機物が貧酸素化には重要である。

**2.4** 田井は、有明海奥部(ここで、湾奥部とは大浦沖以北のことで諫早湾ならびに以南の海域は含まない)の貧酸素水塊の大規模化のシナリオと関連して有明海奥部の潮流および成層強度に影響する要因として、1) 諫早湾干拓事業以前および干拓事業による潮汐の減少、2) 干拓事業以前と干拓事業による入退潮量の減少、3) 18.6年周期の月の昇交点運動による潮汐の変動、4) 外海の潮汐の変化について検討した結果を報告した。A) 諫早湾干拓事業およびそれ以前の湾奥部における干拓事業による潮汐の減少は、月の昇交点運動による潮汐の変動より小さいこと、B) 成層強度については諫早湾干拓事業よりも、それ以前の干拓事業により広い範囲で流速が減少し、成層化しやすくなったこと、C) 湾奥部における諫早湾干拓事業以前と干拓事業以後の流速データを比較すると、ほとんど差がないことや月の昇交点運動の影響が小さいこと(ただ、流向は変化した)、D) 数値シミュレーションでも湾奥部における諫早湾干拓事業の影響はほとんど検出されないこと、が示された。田井は、貧酸素水塊の大規模化と関連すると想定される湾奥部に

おける成層強度と関連する潮流の変化が小さいので、C) で述べた流向の変化の要因と堤防建設によるバロクリニックなモードの変化やラグランジュ的な物質輸送の変化について検討を行う必要があると述べた。

**2.5** 速水は、貧酸素化が生じる要因として、1) 酸素消費速度の増加、2) 上層からの酸素供給速度の減少、3) 沖側から供給される酸素濃度の減少、の3つを考えた。有明海奥部では小潮時に貧酸素化が進行し、大潮時には回復することが知られているが、観測結果から、有明海中央部底層に形成された冷水塊が小潮時に湾奥部に進入し、成層を強化して貧酸素化することが示された。湾奥でも特に浅海域で貧酸素化する原因として、沖から流入した下層の海水は酸素を徐々に失って浅海域に達する時に強い貧酸素となる機構を考えた。さらに、植物プランクトン起源の有機物がエスチュアリー循環によって湾奥部に輸送されることも湾奥で酸素消費が大きい原因であると考えた。これらの観測と想定した貧酸素化のメカニズムから、速水は貧酸素化を引き起こす3つの原因のうち、2) の上層からの酸素供給の減少は2.4で述べたことから除かれること、3) の沖側から供給される酸素濃度の減少については今後の課題であることとして、貧酸素化を大規模化した原因として妥当なのは、植物プランクトン起源の有機物増加による1) の酸素消費速度の増加であると推論した。一方、諫早湾の貧酸素化の進行は、干拓事業によって潮流が弱まり、原因の2) 酸素供給速度の減少と、赤潮の多発による1) 酸素消費速度の増大によると結論した。

**2.6** 田中は、浮遊系と底泥系の生態系モデルを取り入れたモデルを用いて解析を行った。水温、塩分の再現性はよい。クロロフィルは7月中旬の出水後の珪藻赤潮は再現できたが、8月に入ってからシャトネラ赤潮の再現性は不十分であった。しかし、DOは比較的良く再現されていた。DOに関わる収支を検討した結果、1) 貧酸素化を引き起こす有機物は一次生産由来である、2) 植物プランクトン増殖について検討すると出水後の珪藻赤潮とその後のシャトネラ赤潮の2種類が貧酸素化の要因である、3) 貧酸素化にはベントスの死亡も関与している、4) エスチュアリー循環によって有機物が干潟縁辺に輸送されることを示した。

### 3. 総合討論

最初に、コンビナーの一人松川が、総合討論のための報告を行った。佐賀県浅海定線調査データの経年変化を検討した結果、夏季の海底直上水 DO は、1970 年代から 1980 年代初頭にかけて調査点全般において減少し、2000 年前後から諫早湾口に近い調査点で減少している。18.6 年周期の月の昇降点変動や海水面の一貫した上昇に対応する変動は、DO のみならず塩分、栄養塩、COD においても殆ど見られない。このことは、1960 年代と 1970 年代に進められた奥部の干拓と 1997 年の諫早湾堤防閉切りが貧酸素に深く関係していることを物語る。したがって、日本海洋学会海洋環境問題委員会が提案した有明海異変の機構（海の研究、10 巻（2001）、241-246. および 11 巻（2002）、631-636.），すなわち第一に潮汐流の減少と第二に物質循環の変化は誤っていないと思う。

一方、これまでのシミュレーションでは、堤防閉切りによって有明海奥部全般に及ぶような目立った潮汐流の変化は得られていない。これは、シミュレーションの解像度が不十分なために、海底地形と海岸地形ならびに成層の効果あるいは非線形効果を表現しきれていない、ということではないか。解像度を上げたシミュレーションを期待したい。

以上の報告を受け、総合討論を行った。近年赤潮が大規模化したことが有明海の貧酸素化の主たる要因であることを確認して、赤潮の大規模化の原因について物理面についてまず議論して、ついで物質循環について討論を行った。以下に、総合討論の個々の発言を要約したものを紹介する（記載内容は発言者に確認済み）。発言者は、五十音順に、今井一郎（北大）、経塚雄策（九州大）、児玉真史（中央水研）、田中昌宏（鹿島建設）、堤裕昭（熊本県立大）、速水祐一（佐賀大）、松川康夫（元中央水研）、松野健（九州大）。発言の最後に姓を記してある。

#### 1) 流れの変化

○ 有明海では過去 40 年間ほど、栄養塩の流入に大きな変化がない。栄養塩が増えて赤潮となり、貧酸素となるという常識が通じない。そうすると物理的変化があるとしたか考えられないが、今日の報告では物理的変化がない

とのことで、話の筋道が見えない。（堤）

○ 有明海の赤潮は海域ごとに見る必要がある。また、珪藻赤潮なのか、鞭毛藻赤潮かを分けて考える必要がある。諫早湾は干拓事業によって流動が弱まり、干潟が失われて、透明度が上がることによって珪藻赤潮だけでなく、鞭毛藻赤潮が増える条件が整ってきた。締め切りの影響ははっきりしている。湾奥のシャトネラは年変動が大きく、よくわからない。シャトネラは物理的条件が同じでも発生したりしなかったりする。シードがあるかないかも関係しているかもしれない。湾奥では秋と冬は珪藻、夏は珪藻の場合もありシャトネラのこともある。（速水）

○ 昔、九州大学の石尾さんが有明海ではシャトネラや鞭毛藻赤潮が出ないと述べたが、これがプランクトン研究者の常識だった。赤潮は、発生する速度と減少する速度の差で決まるので、発生するには流れが緩くないといけない。また光が必要である。濁度が大きいと赤潮にならない。流れと透明度が赤潮発生に基本的だ。有明海は栄養塩から見ると、いつ赤潮がおきてもおかしくない海であるが、流れと濁度の関係で赤潮が起きなかったと考えられてきた。最近赤潮が起きてきたのは、このような関係に変化が起きたと考えている。（今井）

○ 月に関わる 18 年周期によって 2004 年頃は一番潮汐が下がっている時期であることをとらえるのは重要。物理的变化で今まで言われてきたのは流れが弱まったということで、それをすべてとしてきた。しかし今日の報告ではそれは小さいということだったので、例えば成層度問題、すなわち三次元的に見るなど、少し考えを変える必要がある。（田中）

○ 浅海定線調査を調べてみると、18.6 年周期や外海の変化の影響などは見られない。諫早湾の締め切りによって物質循環系が変化して、諫早湾の中および諫早湾と有明海の関係が変わったことが一つと、もう一つは運動学の問題で、締め切りによって諫早湾内と湾口周辺の潮汐流が弱まったので、メッシュを細かくしたモデルを用いて乱流場の変化を吟味する必要がある。物質循環について言えば、今日は生態系モデルの話があったが、潮受け堤防の締め切りがない状態のシミュレーションを行って締め切り後との差をとると因果関係の方向性が見えてくるのではないか。（松川）

○ 今述べられたモデルの比較をすぐやるというわけにはいかないが、諫早湾と有明海のやりとりを物理的に調べるのは重要なことであり、締め切りの前後で諫早湾湾口付近の平面的な渦が変化することは十分あり得ると考えている。成層が強くなることによって三次元的なやりとりが変わることもあり得る。(田中)

○ 湾奥のあるポイントで流れの変化が小さいので締め切りの影響が小さいというのはおかしいと思う。島原半島沿いでは締め切り後潮流が遅くなっている。湾奥へ流入する流れの一部は諫早湾へ、一部は湾奥へ行くので、これらの流れは締め切りによって変化している可能性が高い。湾奥と湾中央部はつながっているため、湾奥のある点で変化がないから締め切りの影響がでないというのはおかしいと思う。(経塚)

○ 漁民は流れが遅くなったと感じていることが観測で簡単にでてこないことに悩む。底質のコアーをとって歴史的に見ることによって、結果として流れが弱まったということがわかるのではないかと考えて、検討している。(堤)

○ 漁民が、流れが弱くなっていると感じていることを説明する必要がある。潮位変化に見られる数%の減少を感覚的にとらえているのではないとすれば、他に理由があるはずである。潮汐起源の流れを考えると、一般的な潮流以外に内部潮汐と潮汐残差流があるが、両方ともきちんと評価されていない。物理が説明されていないのに、生物を説明できるわけがない。流れがローカルに減ったところがあるかもしれない。そういう目で海の調査をする必要がある。(松野)

## 2) 流れ以外の物理変化

○ 公害等調整委員会の報告について簡単に紹介する。出水後の過渡的な現象を扱っていて、出水時の筑後川の河川水プリュームの拡大する速度が諫早湾締め切り後速くなったことを示している。準定常的な成層を扱ったものとは違う。7月の筑後川の出水時に計算している。小潮時の表層と底層の塩分差を見ると、プリュームが外側に広がって成層が強化された部分があることが示されている。大潮時にはフロントの外側は成層が強まっているが、中側はむしろ弱まっている。我々のデータ解析では、締め切り後に流向が変化したことをとらえているので、

湾奥で何らかの変化があった可能性はあると思う。(速水)

○ 諫早湾の湾口付近の潮流が締め切りによって弱まったことは、運動学的原理からいえば地球自転の効果がより効く方向に変化したことを意味する。そうすれば、筑後川の淡水が今より西側に寄るということは起ると思う。従って、成層は諫早湾口近傍では今より強くなるはずだし、同時に、シミュレーションのメッシュを細かくして解像度を上げれば、諫早湾の潮流と同調が失われた有明海奥部の潮流がブレーキを受けて弱まることかわかるかもしれない。(松川)

○ 夏の成層期に諫早湾口の急な斜面上で潮流が流れると内部潮汐が発生する。内部波には成層構造が大きく影響するが、成層強度に対して流速は三乗で効くので、諫早湾口付近では締切にともなった成層構造の変化はかなり大きい可能性がある。よって、内部モードの変化も大きく、特に底層の流れが変化した可能性はある。(速水)

○ このような公共事業をするときは、今述べられたことなど前もってわかっていたいかなければならなかったはずなのに、それをしないでできてしまった。研究者の立場からすれば、一度締め切りを開けて調べなおせば全てがわかるので、かなりの額の税金を使うことになるが、社会的合意を得て調査することをやってみる必要がある。学問的にもすぐ進むと思う。(堤)

○ 今述べられた内部波に関することは、アセスの時はだれも考えなかったと思う。内部波は伝搬するので、成層構造に影響するかもしれない。調べる必要がある。(松野)

## 3) 物質循環の変化

○ 諫早湾は締め切りによって環境が悪化したのは明瞭だと思うが、湾奥の環境の悪化はひとつの要因というより、いくつかの要因が重なって起きたとみるべきではないか、何か一つのことだけで理解しようというのは本質を見逃すのではないか。(田中)

○ 二枚貝の濾水を考える必要がある。湾奥部の海水交換量と湾奥のサルボウの大まかな濾水量を比較すると、海水交換量とサルボウの濾水による交換量はほぼ同じなので、サルボウの量が1/3になったら濾水量は大きく減ることになり、評価する必要がある。(速水)

○ 赤潮の発生が、沿岸域の同じ雨量に対して締め切り後は規模が2倍、3倍になっているという結果を得ている。これを論理立てて説明する必要がある。(堤)

○ 締め切り前の諫早湾では潮汐流が強く赤潮が起きないし、懸濁物は湾奥の干潟に運ばれていて、湾外に排出されない状況にあった。締め切り後は赤潮が多発するとともに、懸濁物が湾外に排出される場になり、懸濁物を排出しない湾から排出する湾に変わった。そして、諫早湾から排出された懸濁物が有明海奥部のエスチュアリー循環に組み込まれるようになった。つまり、諫早湾から排出された懸濁物が有明海の底層流の北上に乗って輸送され、有明海の奥で上層に回帰して赤潮発生のための栄養供給を上積みするような循環系に変わったと考えられる。そのような物質循環を再現するシミュレーションが必要と思う。(松川)

○ 締め切り前に島原半島沿いに流出していた懸濁物が減って、透明度が上がるのが数値計算と観測の両方出ている。締め切り前には懸濁物は湾奥の諫早湾干潟に運ばれ潟が成長していたが、締め切り後はほとんど運ばれなくなった。それも数値計算ではっきり出てくる。諫早湾内に溜まった懸濁物が巻き上げられて諫早湾口から湾奥に運ばれるという観測結果を得ている。ただ、2006年の夏にその結果を得たので、より長期に観測をしようと思って、次の年の8月から9月にかけて調査したら、逆の方向を向いていた。両方の違いは成層構造である。成層が強いときには諫早湾からの流出であったが、成層が弱くと逆に諫早湾の中に運ばれる。通年の観測を行ってメカニズムを解明したい。内部潮汐および内部潮汐による巻き上げのシミュレーションが難しいので、これからの課題である。(速水)

○ 個々の観測ではいろいろな結果がでるかかもしれないが、原理的にはエスチュアリー循環によって懸濁物が諫早湾から有明海奥部へ輸送されると考えてよいと思う。(松川)

○ 大潮から小潮になるときに毎回のように貧酸素が起きる。シャトネラ赤潮が起きるときにはクロロフィルが非常に高いので貧酸素になるのは理解できるが、クロロフィル濃度がそれほど高くなくても貧酸素になることがある。これは、二枚貝などの高次生産に結びついていないことを示していると考えられる。持続的漁業を考える

と、有機物の閾値はどのくらいか、どの程度まで改善すべきか、という視点も必要である。(児玉)

○ 泥が堆積していると言われてきた大浦沖の深い部分で、最近の調査では逆に浸食され少し砂っぽくなってきている。長いスパンで1989年と比べると堆積しているが、この1、2年を見ると逆になってきている。最近台風がこなかったのが泥がしまっているということも考えられる。(速水)

○ 今日のモデルの話では巻き上げやエスチュアリー循環による輸送なども含めて計算されているので、先ほども述べたように、潮受け堤防の締め切りがない状態での計算を行ってもらえばかなりのことが言えるのではないか。そのことをぜひお願いしたい。現場では様々なことが観測で得られるが、シミュレーションは与えられた条件下で因果関係がどうなるかを見ることができるので、シミュレーションの価値は高い。(松川)

以上

当日会場で講演要旨集(48ページ)が配布された。余部があるので、希望者は住所と氏名を明記し200円切手を同封して、〒064-0807 札幌市中央区南7条西23丁目1-15-422 佐々木克之宛にて申し込またい。