ＮＰＯ法人有明海再生機構

【第3回】

有明海なぜ？シンポジウム

なぜ、貧酸素水塊が発生するのか

平成２２年7月３１日(土)

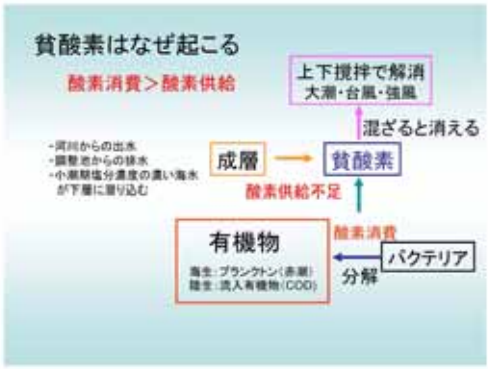
佐賀大学理工学部６号館都市工学科大講義室

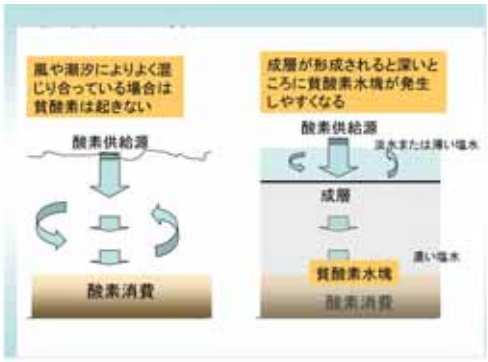
第１部　基調報告
「貧酸素水塊についてどこまで分かったのか」

■貧酸素問題を議論するための基礎知識

有明海再生機構副理事長　荒牧軍治

皆さんこんにちは。今回のシンポジウムは、市民の方にも貧酸素問題を解って頂けるよう分かり易く説明をしたいという事を目的にしました。ですから普段のシンポジウムとはちょっと違ったスタイルを取っています。普段でしたら、最新の研究成果を発表したあと、皆で関連する事項についてディスカッションするというのがスタイルですけれども、貧酸素問題を理解して頂く為に、議論をする際の基礎的な所のレベルを合わせておこうという事で、基礎的な知識と、これまで貧酸素問題について何が解って来たと我々は認識しているかということについても、少し私の方から説明をさせて頂こうと思って時間を頂きました。





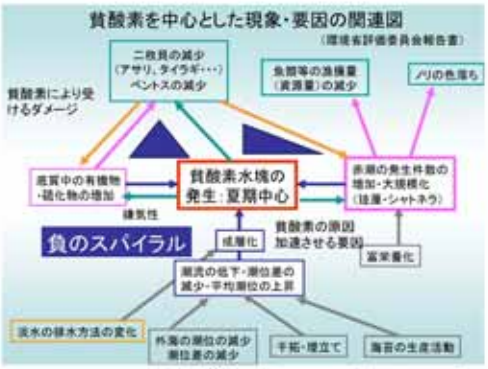
まず貧酸素というのは何故起こるのかという事から始めます。貧酸素を引き起こす原因物質は図に示した赤枠で囲んだように有機物です。その有機物の発生源は海で起こるプランクトン類・赤潮類、それから陸域で生まれて流入してくる有機物です。そういったものが海の中に溜まっている。そこにバクテリアが働いて酸素消費を起こす訳ですけれども、その酸素消費が酸素供給よりも大きい時に貧酸素が起こると言う事は直ぐに理解できると思います。ここで分解をする時に酸素消費を起こす訳ですけれども、酸素供給が不足しているという様な時、例えば河川からの出水であるとか、調整池からの排水であるとか、小潮期に塩分濃度が下に潜り込んで来るとか、そういった事で成層構造を起こす。

ちょっと絵を描いてみましたけれども、左側のように上下が十分に撹拌されている時には、上に酸素供給源、空気の中に酸素が 20%以上含まれていますので、それを使って供給をす

る事が可能なのですが、上の方に淡水が乗る、或いは下の方に濃い塩水が入り込んでくる、そうすると混ざらない。私が大学生の時に見た実験の中で一番感動したのが、水理実験室で見た密度流の実験でした。きれいに密度躍層（成層）が起こっていて本当に混ざらないというのが解りました。躍層が起こると、撹拌が十分に起こらなくて酸素供給が不足する。その事によって貧酸素が発生する。有明海の特徴は何かと言うと、干満の差が非常に大きいことで、上下撹拌の能力が他の海域よりも非常に優れていることです。特に潮が大きい大潮時、それから台風であるとか強風であるとかという事が起こると貧酸素は消えてしまう。小潮期に貧酸素が起こって大潮期に無くなってしまうというような他の海域にはない有明海特有の特徴を持った貧酸素現象が起こっているといえます。

貧酸素を表す表し方には大きく言うと 2 つあります。

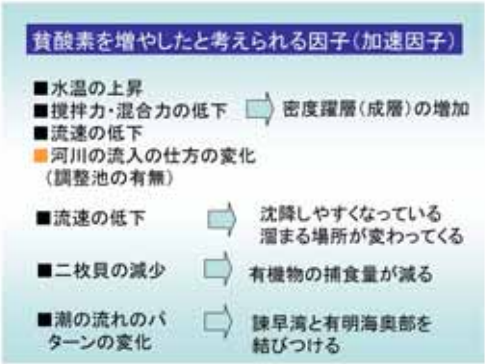
1 つは、飽和酸素度に対する現在の酸素濃度の割合を示す『飽和度』という表記法です。海水中の飽和酸素濃度というのは塩分が含まれていますので蒸留水よりも少し下がってくる。飽和酸素濃度は、温度と海水中の塩分濃度で変わっていて、黄色で塗ってみましたけれども 25℃で 25‰位の塩分濃度であると大体 7 mg/ｌ位が飽和酸素濃度です。勿論非常に風が強かったりすると過飽和になる事もあります。貧酸素というのを飽和度 40%以下と表す方が多い様です。それが一つの表し方です。



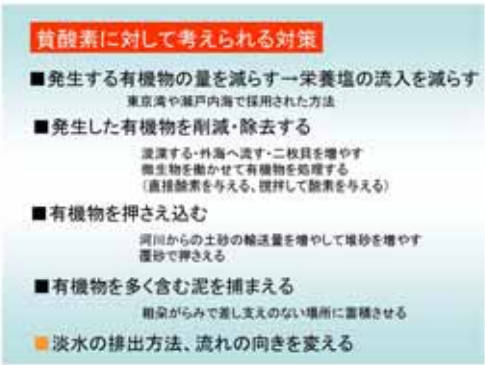
それからもう 1 つが酸素濃度そのものを用いる表記法です。1 リットル当りに何 mg の酸素が含まれているかという事で、2～3mg/ｌ以下を貧酸素と呼ばれる方が多い様です。どの程度以下を貧酸素とするかは其々個人的な差があり必ずしもはっきりと定義されていないことにも注意する必要があります。例えば 25℃、25‰の海水だとすると、2～3mg/ｌの酸素濃度は飽和度が 29 から 43%位の間になり、それを貧酸素と呼ばれている方が多いです。但し ml/l という単位を使われる方も居られますので、その事は注意をしておいてください。ここでは使われる方は多分少ないと思います。　これが、環境省の委員会で作った有明海の環境事象とその関連図です。このど真ん中の所に赤くわざと濃く書きました

けれども、「貧酸素水塊の発生」というのがあって、図中のそれぞれの四角が事象を表しています。これがちょっと見にくいので改めて書き直しました。「貧酸素水塊の発生：夏季中心」というのが真ん中にあって、それによって発生する事象、即ち「貧酸素により受けるダメージ」が一番上にあります。まず二枚貝が減る、それから、魚類等の漁獲量が減ってくる。少しちょっと矢印が変わった所から出ていますけれども、海苔の色落ちを起こす。貧酸素水塊の発生はこういうふうな事を引き起こしている訳です。

下側がこの貧酸素の原因であり、加速させる要因です。即ち成層構造が強化されてきたという様な事であるとか、有機物の供給量が増えてきたであるとか、それから底質の有機物が溜まったまま減らないといったことが貧酸素の原因になっています。ではなぜそういう事になっているのかというのが図の下の所です。成層化が増えてきたのはその下の潮位差の減少であるとかいったものが原因だと考えられているということになります。問題なのはこの三角形がグルグル回りになっていて、貧酸素が起こると二枚貝が減少し底質の有機物が増えて、そしてまた貧酸素を加速させる。この負のスパイラルという三角形が起こる事で、貧酸素というものを見張っておかないと有明海の環境がちゃんと議論できないという事になるのだというふうに理解しています。

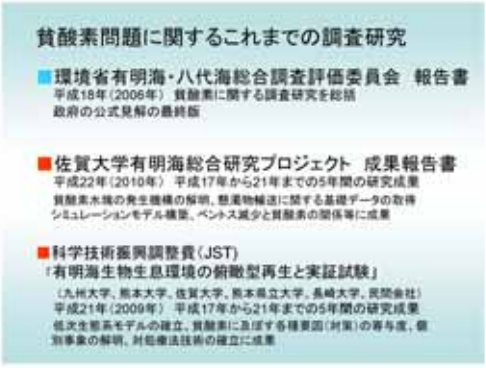


貧酸素を増やしたと考えられる因子、即ち加速させたと考えられているのは水温の上昇であるとか撹拌力・混合力の低下、所謂流速が減ってきて撹拌力が減ったのではないか。河川の流量の仕方が変化した、調整池が無かったのに調整池ができてしまった。そういう事によって密度躍層（成層）が増加したのではないかと考えられています。また、流速が低下した或いは流れが少し変わった、そうすると沈降し易くなったり、溜まる場所が変わってきて違う所で貧酸素が起こるようになってくる。それから二枚貝が減少し有機物の捕食量が減ってしまった、そういう様な事が加速させたのではないかと考えています。それから潮の流れのパターン、これは諫早干拓のようなものがイメージされていると思いますけれども、そういうものによって少しパターンが変わる事によって貧酸素を加速させたのではないかというふうに理解されているようです。



貧酸素に対して考えられる対策というのは、勿論発生する有機物の量を減らすのが第一です。即ち海で作られる有機物が多いというのが貧酸素の基本的な原因ですから、入ってくる栄養塩を減らしてやると有機物の発生量を減らす

事が出来る。即ち、東京湾や瀬戸内海で採用された方法は専らこの方法だというふうに考えます。それから発生した有機物を削減する、除去する。即ち浚渫をするとか、外海に流してしまうとか、二枚貝を増やすとか、微生物を働かせて有機物を処理するとかこういった類のものがこういう処理法だというふうに考えます。それから有機物は底に溜まっていてはどうしようもないので、例えば押さえ込んでしまう。即ち河川からの土砂を増やしてあげる。土砂が増えてくれば、底泥の上に被さった様な形になって有機物が酸素消費する側に回らない。あるいは覆砂で抑える。そういった事で貧酸素が起こる、発生するメカニズムを切ってやろうという対策が考えられます。それから、有機物を多く含む泥を捕まえる。即ち、粗朶がらみの方法みたいなものがイメージされた様ですけれども、そういうもので、ここであれば大丈夫だろうと思う所で有機物を多く含む泥を捕まえてしまう。それから淡水の排出方法や流れの向きを変える事によって、特定の場所の貧酸素の発生を抑える事が出来るのではないだろうかとも考えられています。工法としてはこういうふうな形があって、赤で囲んだ所が持続型の技術であり、それから黒の枠で囲まれたのが緊急型の技術。この両方をイメージしてやらないと貧酸素対策というのが成り立たないのではないかという考え方です。

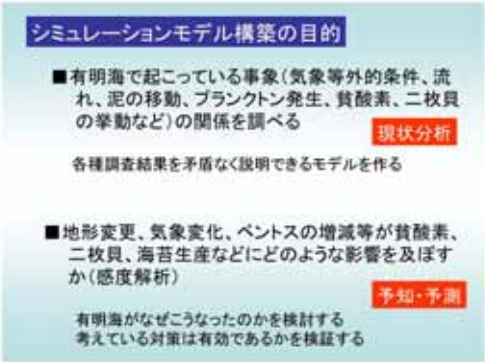


これまで貧酸素問題に関しては先程御紹介に有りましたように環境省の委員会が非常に大きなテーマとしてこの貧酸素問題を取り扱って報告書に記載しました。これがまず平成 16 年当時の到達点だと理解しています。それに対して佐賀大学の有明海総合研究プロジェクトは、5 年間のプロジェクトを終えて今新たな 3 年に入っていますけれども、一応我々の目標もこの貧酸素機構の発生機構を解明する事におきました、その中で非常に重要な役割を果たしていると思われる「懸濁物輸送のモデル」を構築する為に色んな基礎データを取ることに努力を傾注しました。それからもう 1 つ、科学技術振興調整費による有明海研究プロジェクトです。色んな所で「JST プロジェクト」と呼んでいますけれど

も、そこで行われた研究においても低次生態系のモデルを確立し、貧酸素に及ぼす各種要因、対策といったものの寄与度、それから個別事象の解明、対症療法の技術の確立というものを目指して行われました。それから、「有明海八代海総合調査推進計画」というのは、先程言った環境省の評価委員会が出した報告書に『調査研究マスタープランを作りなさい』という指示があった訳ですけれども、その指示に従って 3 年間、平成 19 年から 21 年までどういう研究がなされたかという事を調べ上げてそれを報告書にまとめたものです。

それから環境省の請負業務として実施された有明海貧酸素水塊発生機構の実証調査があります。これは非常に大きなプロジェクトで、それまで中々取られていなかった連続モニタリングデータというのが平成 16 年から取られていて、それの後継という事で非常に大きな成果を上げたと思います。と同時に、後でお話しますけれどもシミュレーションモデルの確立にも力を入れられています。

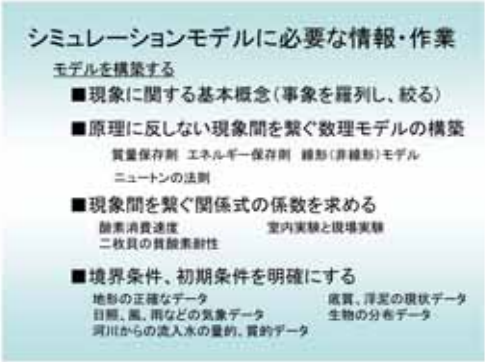
佐賀大学の有明海総合研究プロジェクト、科学技術振興調整費のプロジェクト、それから環境省の業務として請け負われた貧酸素水塊発生機構実証調査。このいずれも基本的にはシミュレーションモデルを構築して、そして現象を理解すると同時に対策を考えようとそういう流れになっていると理解しています。モデルの例としてここには JST でお考えになったモデルを示しましたけれども、必ずしもモデルは 1 つである必要は無くて、色んなモデルが同じような結果を導いてくれるかどうかというというのが最も重要な事だと思います。



シミュレーションモデルの構築の目的は、有明海で起こっている事象、例えば気象のような外的の条件とか、泥の移動、プランクトンの発生、貧酸素、それから二枚貝の挙動といった様な各種の事象がお互いどういう関係にあって、そしてどういうふうに結び合わされているかという事を、定性的には先程言ったように矢印で何となく分かるのだけれども、それを定量的に捕まえたいということにあります。そうすると各種の調査結果、先程出たようなモニタリングと呼ばれるような調査結果を利用して、シミュレーションによる計算結果がそれを矛盾無く説明可能かどうか、現状を説明できるか、即ち現状を分析するという事です。

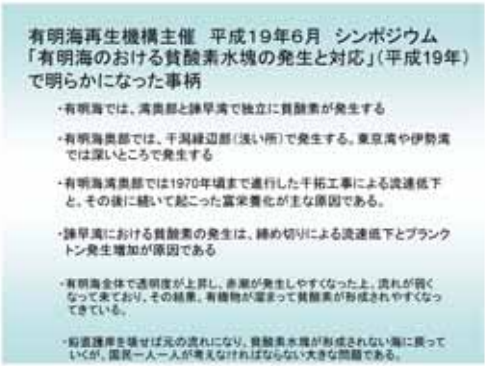
それからもう 1 つ、地形の変更であるとか気象変化であるとか、ベントス、例えば二枚貝とかが増えたり減ったりする事が、貧酸素だとか二枚貝の成育、海苔の生産などにどう

いうふうに影響を及ぼすのかという様な事を考える。即ち有明海が何故こうなったのか、或いは考えている対策は有効であるかどうかということを検討する為に、予知予測というものに使用可能かどうかということを考えていきます。



シミュレーションモデルを作る時には、まず概念が必要です。その次に数理モデルが何らかの形で出来ているという事が必要ですが、これは大体それ程大きな違いはないというふうに思います。問題はここからで、現象間を繋ぐ関係式の係数が求まるかどうか、酸素消費速度であるとか二枚貝の貧酸素耐性であるとかいったようなデータがないとモデルが構築できない。それから境界条件。例えばわたくしが参加したシミュレーションモデルの小委員会で最初に話題になったのは有明海の地形図がちゃんと揃ってないとかいうことでした。こういう境界条件であるとか、現状を示す初期の状態、すなわち初期条件そういったもの、それから日照とか風とか雨等の気象のデータ、それから生物がどういうふうに分布しているかという分布データ、それから河川からの流入水の量的、質的なデータ、こういったものが揃わないと、このモデル解析というものが出来ないからその準備が相当時間が掛かるというふうに考えておかなければいけません。

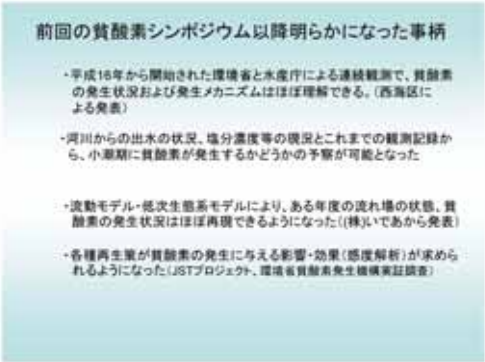
モデルを検証する為には、精度の高い優れたモニタリング結果が必要です。即ち現場でちゃんと測ってきたものがないと、そのモデルによる計算結果が正しいのか、予測に使えるかといった事が理解できないという事になります。ですから、まず現状をきちっと表現出来ているかどうかをチェックする。そして、その事が解り、大体信用してもらえれば、未来予測或いは対策といったものにこのシミュレーションモデルが使われるという事になります。これは佐賀大学が何をやりたかったかという事を説明している話でもあるのですけれども、こういうのを目指して我々はシミュレーションモデルを作ろうとしたのだという事です。



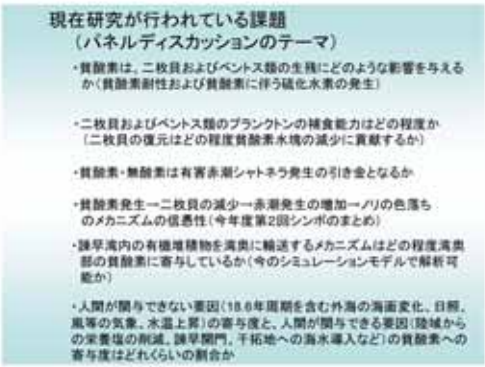
実はこのシンポジウムをやる 3 年前に、平成 19 年 6 月に貧酸素におけるシンポジウムを開催しています。そこで理解した事、到達していた事を共有にしておきたいという事でこのシート

を書きました。

まず、有明海では湾奥部（佐賀の方の奥部の方）と諫早湾とでは別々に、独立に貧酸素が発生するという事は事実だろう。それから有明海湾奥部では干潟縁辺部、浅い所で発生するというのが東京湾や伊勢湾が深い所で起こるのとは事象がちょっと異なっている。それから有明海湾奥部では1970年頃までに進行した干拓工事による流速低下とその後に続いて起こった富栄養化、同時に起こったのかも知れませんがそういうものが主な原因であるというふうに理解されています。それから諫早湾に於ける貧酸素の発生は、明らかに締め切りによる流速低下とプランクトン発生増加が原因であるというふうに認識されております。有明海全体では透明度が上昇して赤潮が発生し易くなった。それに流れが弱くなってきている。その結果有機物が溜まって貧酸素が形成しやすくなっているという認識が示されています。これは今日どう修正されるのか修正されないのかという事も議論になるかも知れません。それから鉛直護岸というのが非常に流れの様を変えてしまっていますので、沿直護岸を元に戻せば良いだろうということに成るのかも知れませんが、そうすると今度は社会的な問題という事になって議論がそれから先に進まなくなりますので、一人一人が考えなければならないというふうに認識されています。



それから、前回の貧酸素シンポジウム以降明らかになった事というのが、今日の発表するテーマだというふうに理解していますので、これは時間がなくなりましたから飛ばしますが、そういう議論が行なわれているという事をご理解下さい。



それから、問題なのは多分これから行なわれるパネルディスカッションのテーマ。即ち今現在進行中の研究、成果。例えば貧酸素に対して生物達はどの様な耐性を持っているのか、持っていないのか。複合して現れた時にそれがどのような問題を起こすのか。硫化水素と貧酸素が一緒になってやられるとタイラギがおかしくなってしまう。しかし砂地盤ではおかしくなるけれども泥地盤の方は案外硫化水素の影響が小さいとか、そういう話がこの前の第 2 回のシンポジウムでありましたけれども、そういうのはどういう事になるのか。それから二枚貝とかベントス類がプランクトンの捕食能力というのがあるけれども、定量化できているのかどうか。即ち、二枚貝の復元がどの程度貧酸素水塊の減少に貢献するかというのも、討論すべきテーマです。それから、貧酸素・無酸素は、漁業被害の観点から対策の一番ターゲットにしている有害赤潮シャトネラ

の発生の引き金となるかどうか。そういう事であるとか、シミュレーションのモデルがどの程度使えるかといった問題が今から先の大きな議論になるというふうに理解しています。

それからまた人間が関与できない領域、例えば 18.6 年毎に潮位潮流が大きく変わってきますけれども、その影響は議論の際分離できたかどうか。日照・風といった神様の領域、水温上昇といった長期的な傾向、その部分と人間が関与した要因を分けてあげないと議論が錯綜してしまうといった事がこれから重要であると理解しています。

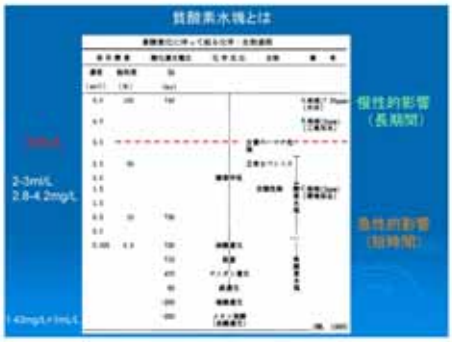
こういう事を基にして、これから先のシンポジウムにご参加頂ければ共通の理解が出来るのではないかと思って、ちょっと余分だとは思いましたけれどもこういうものを作ってみました。以上で終わります。

あと、大きな環境全体に於ける貧酸素の占める位置といったものについては次の松岡先生にご説明を頂きたいと思います。それでは宜しくお願いします。

■　貧酸素が生態系全体に与える影響

長崎大学環東シナ海海洋環境資源研究センター教授　松岡敷充

皆様こんにちは。今紹介頂きました長崎大学の松岡でございます。先程荒牧先生の方から本日のシンポジウムの大枠のお話を頂きました。その中で貧酸素水塊という言葉がよく出てきましたが、それが我々が接している海でどのような事を引き起こしているのかについて具体的な例を紹介をすることが必要だろう思います。今日は少し時間を頂いてその具体例を紹介をさせて頂きます。

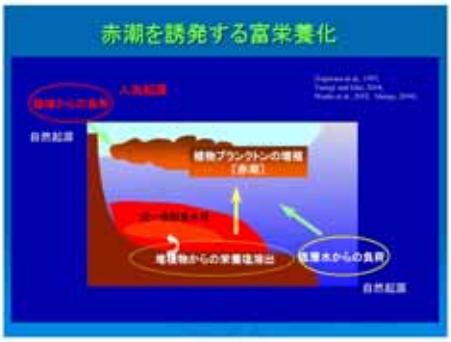


タイトルは『生態系に与える影響』でお話をします。

先程も荒牧先がご紹介されましたが，先ずは貧酸素水塊の定義です。実は貧酸素水の定義にはきちっとした決まり事がありません。ここに取り上げましたのは、九州大学の柳先生が整理された図をお借りしたのですが、基本的にはハマチが危篤な状態になるようなレベル約 3ml／l、こういった濃度を貧酸素のレベルであるする場合が多い。そうしますと酸素飽和度では 60%くらいになります。

そういうような貧酸素状態が生態系にどのように、どのようなな影響を与えるのかを考える場合に、2 つ視点を持っておく必要があると考えます。1 つは急性的な影響、短時間に起こる生物に与える影響。それからもう 1 つは慢性的な影響、それらの両方がります。これらの両方を見据えておく必要があると思います。この表は水産資源保護協会が出しております漁場で貧酸素水塊が発生した時にどんな現象が起こり，その時にどういう事を検討しなければいけないのかという事を示しています。基本的には生物を死に至らしめる、つまり生物が死ぬ，資源の生物等が死ぬという事。それから、所謂悪影響という言葉で表現されていますが、比較的長期間に亘っての影響があることが示されています。

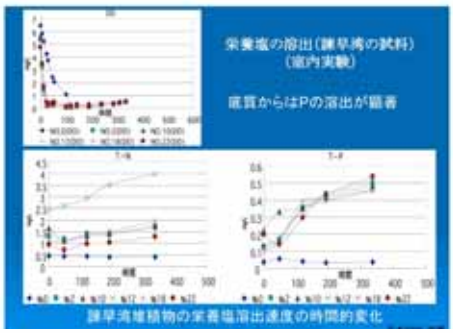
急性的な影響につきましては、これは有明海以外の例ですが，実は有明海でも同じ事が起こっております。皆さんご存知だとは思いますが、この問題は有明海だけに関わることではないという事で他の事例を示してご紹介したいと思います。これは中東のオマーンで 2008 年に大規模な赤潮と共に非常に酸素レベルの低い海水が



沿岸に押し寄せまして、そこでこの二枚貝が大量に斃死した例です。その時の酸素飽和度、酸素レベルは 0。2 から 1。8mｇ／ｌでした。こういうレベルの貧酸素に曝された二枚貝は非常に短期間に死滅したのです。それから次も有明海でも自然に起こった現象です。有明海ではなくて隣の大村湾でも青潮という現象が起こっています。これは底棲性の魚が岸表層に寄って来ている写真です無酸素の状態で遊泳性の魚も死んでいる例です。これらは貧酸素や無酸素水が遊泳性の生物を殺した事例です。このような事は諫早湾で 2 年ほど前に起こっており，有明海でも我々が経験している事であります。このような現象は貧酸素が生物或いは生態系に非常に短期間に強烈なインパクトを与えている例です。

もう一方、長期的な慢性的な影響という事で私は富栄養化，栄養塩の問題を取り上げたいと考えています。この図は基本的に栄養塩が植物プランクトン、所謂基礎生産を通して資源に変わっていくというサイクルを示しています。その一番の根本になる所は、ここに示してあるように窒素とかリンなどの栄養塩であります。貧酸素環境はこういう栄養塩の挙動に大きな影響を与えるだろう思います。それは、栄養塩は先程の話しましたように陸域からの付加や底層水からの付加で海域に供給されます。

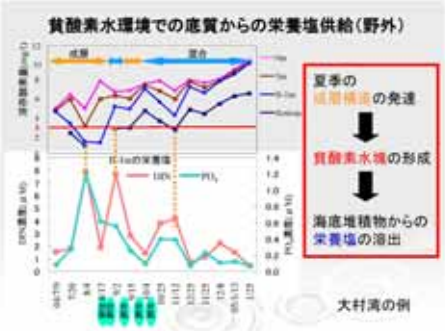
それからもう 1 つ、ここで取り上げたいのは堆積物からの栄養塩の溶出という事であります。これは貧酸素、無酸素という環境の下で、非常に顕著に現れる現象です。海域での栄養塩の循環を考える場合に、他の海域からの移流とか拡散と共にこの底質からの栄養塩の溶出が非常に重要な意味を持ってくるということです。これも以前にお示ししましたが、諫早湾で堆積物を採取し室内で放置しておきますと、酸素レベルが低下すると共に窒素・リンが溶出してくる事が既に分かっております。これは実験室の例ですけれども、もう一方フィールドと言います



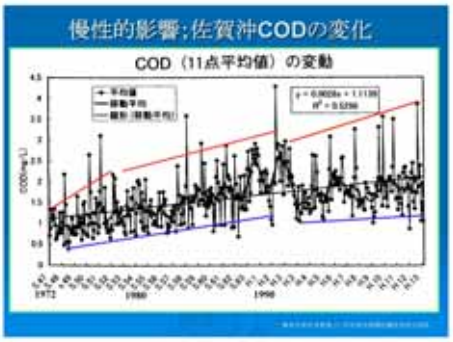
か、現場での事例として我々は大村湾で調査をしております。

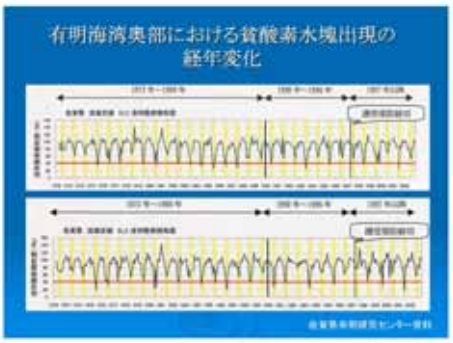
下のコラムが底層の栄養塩濃度の変化を示しています。見て頂きたいのは、7 月・8 月、丁度今頃に底層の溶存酸素が 2mg／l 以下になってきますと、この無機態リン，無機態窒素が急速に底層に溶出してくる事が分かっております。

この様に貧酸素水塊が発生しますと、底質からの栄養塩が供給されるという事になります。

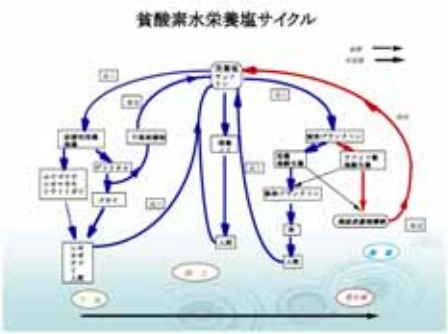


では有明海では栄養塩の挙動そのものを調査した過去からの継続した資料が手元にありませんのでそれを COD に置き換えてみると、どういう事が起こったのかという事を考えてみます。1972 年よりも前のデータが無いので，この範囲の中で考えざるを得ないのですが、1972 年以降やはり有明海の湾奥部では COD が増加している傾向が有ります。それとは全く別の現象として、貧酸素水塊の出現状況の経年変化をみてみます。これは浅海定線調査の時に得られているデータで、浅海定線調査は大潮の時に行なわれて来ております。これまでの貧酸素水塊の調査研究の結果、明らかになってきているのは貧酸素水塊の発達は大潮の時ではなくて小潮の時であるという事です。そうしますと、こういうデータを見る場合に小潮の時のデータがありません。けれども、大潮の時でもこういう非常に低い酸素レベル、ここは 40%使っておりますけれども、その状態がかなり以前の 1970 年代から出現していた事には注意をしておくべき事であると考えます。





従いまして，貧酸素水塊が生態系に与える影響と致しましては、非常に短期的に生物、特に底生生物を死滅させてしまう事と，それからもう 1 つは、非常に細粒な堆積物、泥のような堆積物上で貧酸素が発生しますと栄養塩がその部分から溶出してくる。特にリンが顕著に溶出してくることが分かってきています。この図は有明海での栄養塩

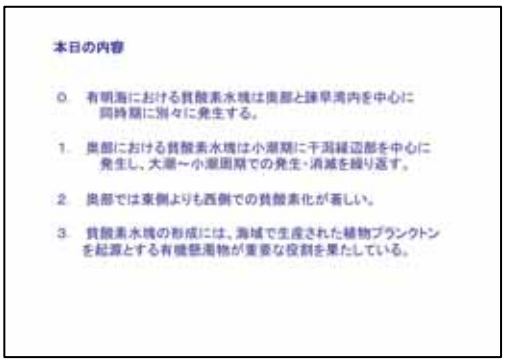


サイクルをごく大雑把に示した図であります。干潟での栄養塩のサイクル、浅海域での栄養塩のサイクル、それから海苔の養殖に関わる栄養塩のサイクル，このような栄養塩のサイクルが貧酸素水塊の発達と共にどのように変化して来たのか、そのような変化の中で現在起こっている様々な資源の枯渇、或いは資源が偏在化しているという問題を考えるべきではないかと思って居ります。

今後の課題と致しまして、先程述べましたが貧酸素水塊出現強化によって有明海の栄養塩サイクルがどのように変化したのか、そのサイクルが生態系を通して，所謂食物連鎖を通して、生物資源にどのように関わってきているのかを考える必要があろうかと思っております。どうも有難うございました。

■　有明海北部海域における近年の貧酸素発生状況とそのメカニズム

（独）水産総合研究センター　西海区水産研究所
海区水産業研究部　有明海・八代海漁場環境研究センター
海場環境研究科長　木元克則



水産総合研究センター西海区水産研究所の木元でございます。

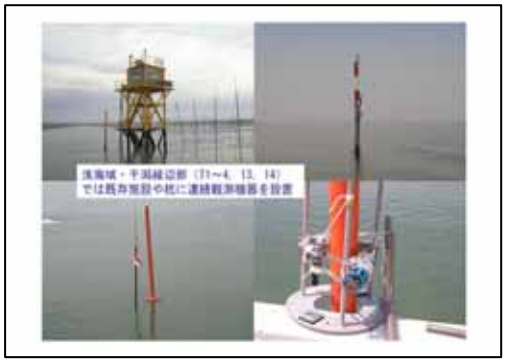
今日、私共水産総合研究センターで行なっております有明海奥部におけます貧酸素の観測に基づく研究成果について、私共一緒にしている木元・児玉・徳永の 3 人の連名でご報告させて頂きます。荒牧先生よりもご紹介がございましたけれども、貧酸素水塊の広域連続観測につきましては、平成 16 年から水産庁・環境省・農林水産省・九州農政局が連携をする形でそれぞれ分担を決めて実施をしております。現在も続いておりまして、この 22 年も色々な形で観測が実施されているという事です。今日は、そこから得られました成果につきまして特に有明海奥部に関しまして、19 年にご報告しました事に加えてその後よりデータを整理する中で見えてきた事というのをご報告したいと思います。

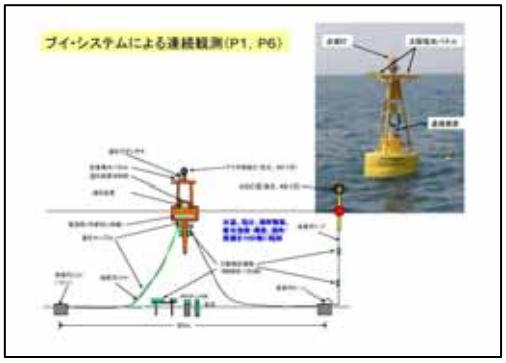
先程荒牧先生からもご紹介がありましたけれども、有明海に於ける貧酸素水塊の発生は湾奥部と諫早湾を中心に同時期に別々に発生するという事について改めて簡単にご説明を申し上げたいと思います。その上でこれも 19 年度にも報告致しましたけれども、貧酸素水塊は小潮時に干潟縁辺部を中心に発生し、また大潮、小潮での発生、消滅を繰り返すとそういう周期的な事を繰り返すという事をご報告致しました。

2 つ目としまして、19 年からより詳細な広域的な調査を進める中で東側よりも西側での貧酸素化が著しいという様な状況も見えて参りました。そこについての情報を少しご説明した上で、貧酸素水塊の形成には海域で生産された植物プランクトンを起源とする有機懸濁物が重要な役割を果たしているという事も分かって参りまして、そういう色々な貧酸素

の発生のポテンシャルに尽いての情報が整理出来つつありますのでその成果に尽いての御紹介を申し上げます。

有明海奥部に於ける貧酸素水塊の水平的な分布につきましては、簡単にご説明申し上げます。有明海に於ける貧酸素につきましては、2001 年に有明沿岸 4 県の浅海定線又他の調査を集中して行なった時期がございますけれども、その結果によって諫早湾から有明海北西部の海域の底層に溶存酸素の低い貧酸素水があるという事が分かりました。近年それが継続して毎年起きている状況があるという事、又大規模赤潮も発生しているという状況でその中で貝類が斃死し、又魚介類にも影響して危惧される状況にあるという事は皆さん周知の所でございます。それを受けまして平成 16 年、2004 年より環境省、水産庁又九州農政局が協議をしまして、「観測点を分担しつつ諫早湾を含む有明海奥部全域について集中した連続観測を行なうべし」と、それを以って何が起きているか、どの様な状況にあり貧酸素が発生しているかというのを見るという事で進めたのであります。水産庁の事業実施部分と環境省が実施する部分につきましては、私共水産総合研究センターが独立行政法人、国の機関として承りまして調査を担当した所でございます。浅海域と干潟縁辺域の観測ではまず既存の施設、もしくはやぐらとか鋼管に対して既存の施設や杭に連続観測機を設

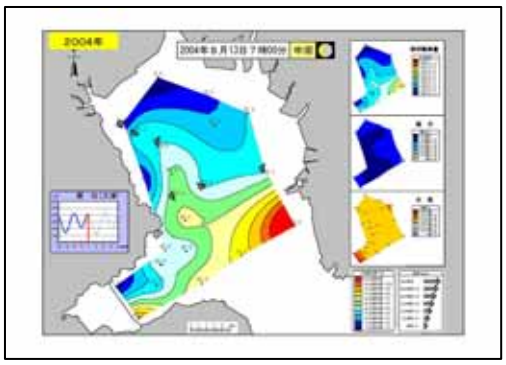




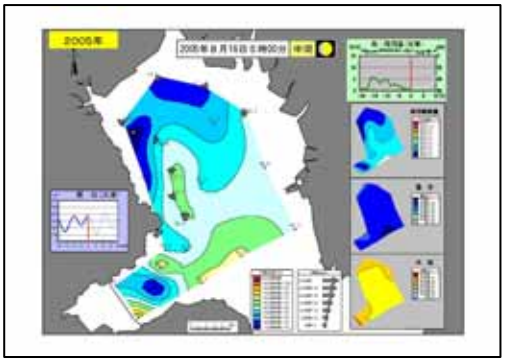
置して観測を進めた所です。沖合域では拠点が無いものですから、観測用の航路ブイを設置致しましてそれに対して下に観測機器又表層中層に観測機器を設置して連続観測を行なって参りました。観測結果につきましては、関係機関で共有する又業者一般の方にも速や

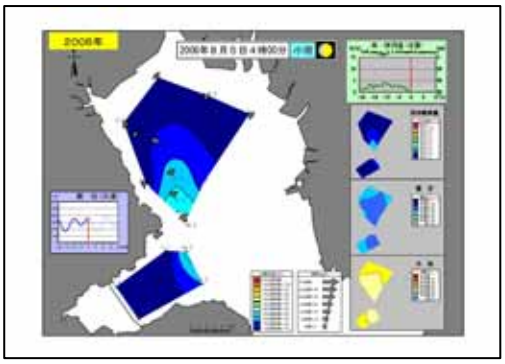
かにお知らせすべきという事で平成 17 年より私共で有明海奥部又農政局で諫早湾を中心とした観測データについてリアルタイムで公表し関連の調査研究に活用出来るようにという事で進めて来たところです。

ここにお示ししております 2004 年の調査に基づいて毎時のデータが得られますので、それを元に平面での状況・海底層の一番最下層の溶存酸素の分布を飽和度で示したものです。青の濃い所が酸素の無い状態で 40%以下を水色で示しております。飽和度 40%以下又溶存酸素 3mg 以下をおおよそ貧酸素とわれわれは用いておりますけれども、有明海の湾奥北部と又諫早湾でそれぞれ別々に発生する、又特に有明海の奥部佐賀県沖での干潟の浅い場所では、著しい貧酸素に成るという事がこれでもご理解頂けるかと思います。2005 年も同様の平面的な

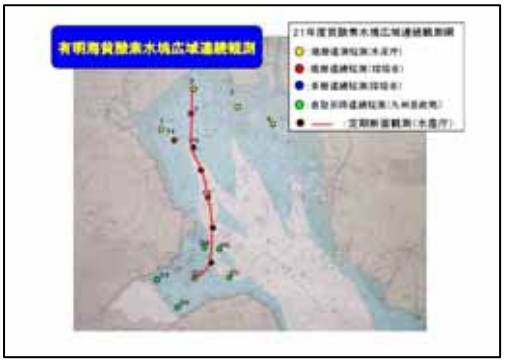


分布パターンを示して、湾奥北西部又諫早湾の中に貧酸素の中心があるという事がご理解

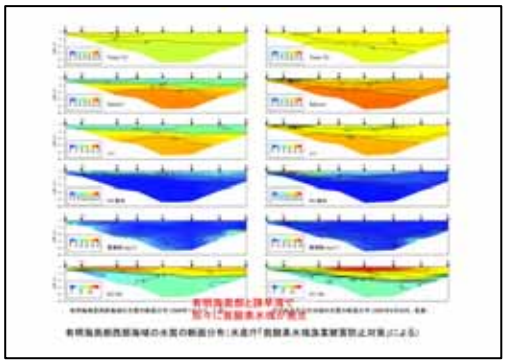




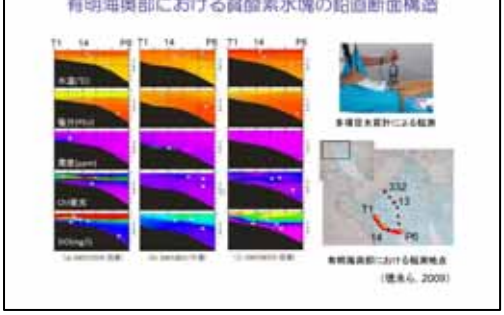
頂けるかと思います。2006 年につきましては、湾奥全体で貧酸素化が進行しまして諫早湾の中ではほぼ全域が溶存酸素 40%以下、有明海の奥部でも竹崎から大牟田を結ぶ線の以北について特に西側を中心に著しい貧酸素になったという事が出ております。

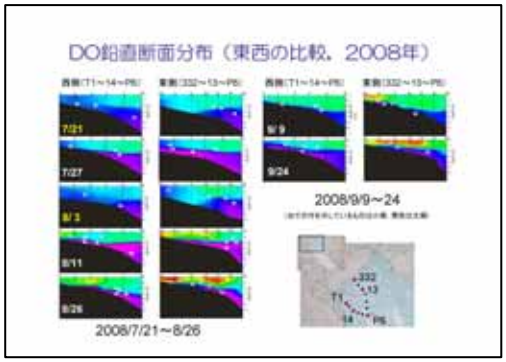


この様に同時ではありますけれども、別々に貧酸素が発生するという状況がありますが断面図でお示しします。この平成 21 年度の観測では水産庁の観測に於きまして定期的に断面の観測を行なっております。その結果を断面図で示しておりますが、水温、塩分、密度、クロロフ



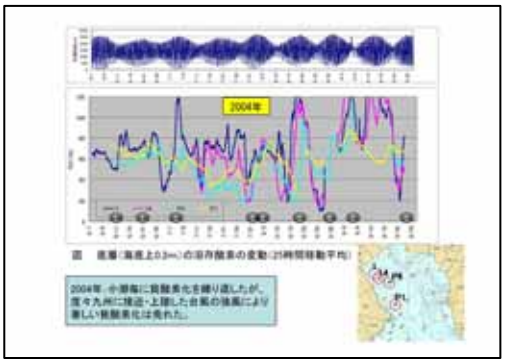
ィル、懸濁物、DO%、飽和度を示しておりますが、湾奥の有明海奥部とこちらは諫早湾の奥部になります。表層に温かい水又塩分の低い水が分布する事によって、密度成層が強まり表層にクロロフィル、赤潮的な状況でこれが高い層があり湾奥底層に懸濁物がやや多い状況ある。その中で貧酸素が湾奥部有明海の奥部と諫早湾で別々に出来ているというのはご理解頂けるかと思います。こちらが 7 月 30 日、こちらが 8 月 30 日。1 ヶ月の違いがありますが同じく小潮の時の様子を示してございます。この様に有明海奥部と諫早湾で貧酸素が出るというのはもう皆様も十分ご理解頂ける状況かと思います。よりもう少し細かくこの方を見てみますと、湾奥の鹿島沖の浜川沖の観測点と沖神瀬の観測点、これの断面をここに示しております。小潮期の終わりの時期それと次の大潮期を示してございますが、小潮期には湾奥のより更に浅い所で貧酸素が発生して、沖神瀬の辺りでも溶存酸素の低い海域があって、それぞれこの海域でも沖合域と浅い所で別々に貧酸素が発生する状況がございました。大潮期になりますと、浅い所では混合によりまして水が混ざる中で溶存酸素が上昇し沖合域の方が貧酸素になる。貧酸素は残っていますけれども、浅い所は貧酸素が無くなるこういうような潮汐による変動を繰り返しているのが基本的な状況です。只、成層が強い貧酸素化が又進みますと、湾奥の沖神瀬から浜川沖に掛けてのかなり広い海域に大きな貧酸素の水塊として発達するというような状況がありまして、8 月の中旬下旬にはしばしばこの様な大規模な貧酸素化がするというのがここ数年の中で見られている事です。あと、西側と東側の海域で貧酸素の程度がどの程度違うのかという事も見ていく中で、どちらかというと西側の海域西側の浜川から沖神瀬にかけての方がより貧酸素化の程度が大きいという事が分かっております。その原因については後ほどご紹介申し上げます。有明海奥部に於ける DO の変動につきましては、連続観測を行なっておりますので大よそ 3 ヶ月に亘る連続観測で毎 10 分毎の連続観測を行なっております。



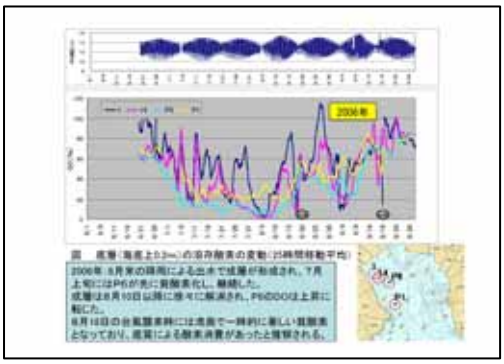


そういう事でかなり精緻な観測が行なわれていまして現象数を捉える事が出来ると思いますけれども、貧酸素化が著しい西側の海域を中心に浅い所から深い所へのデータをここに整理してございます。24 時間の移動平均を取ったものを 4 点の変動を御覧頂きますが、

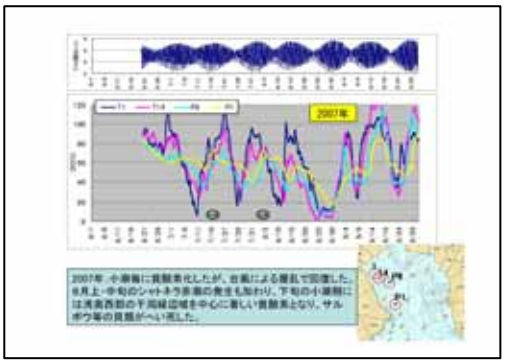
2004年から観測を始めまして今年2010年まで示しておりますけれども、2009 年までの状態をごくかい摘んでご紹介致します。上に大潮小潮と分かりますように潮位の往来に於ける潮位の変動を示しておりまして、大潮-小潮-大潮-小潮とその様な変動の中で潮汐に合う様な形で変動をしております。大潮時に全体的に改善し、小潮時に酷くなるというような状況の大潮小潮の潮汐変動に合わせた貧酸素が小潮期を中心に発生すると



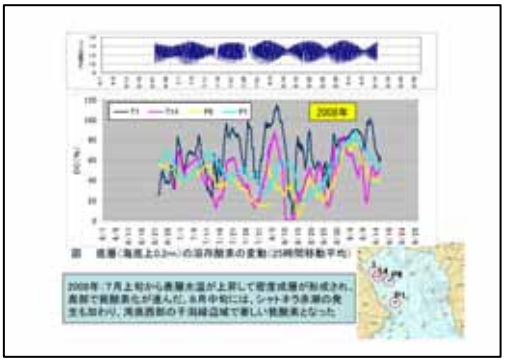
いうのが基本的な所です。2004 年につきましては、台風がしばしば九州に接近又上陸するような事がありまして、そういう台風の大きな影響を受ける中で著しい貧酸素化は免れた年と理解しております。2006 年につきまして

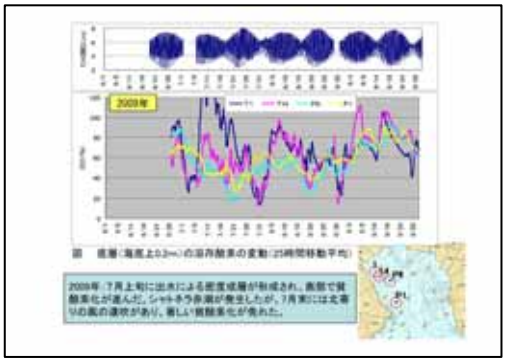


は、この図で示しておりますけれども 6 月に降雨による大規模な出水がありまして成層が形成されまして、その後、奥部の方から P6 が水色で示しておりますけれども沖神瀬の干潟縁辺域というよりも、やや沖合の場所の方が先に貧酸素化しそれが長期に亘って継続したという特徴があります。成層は徐々に改善しましたけれども、8 月 18 日の台風襲来時をきっかけに全体的に成層が破壊されてその後貧酸素が解消しておりますが、それをこの時期まで大よそ 1 ヶ月半に亘って湾奥全体で著しい貧酸素が起き、先程最初に平面図で真っ青の図をお見せしましたけれども、湾奥全域での貧酸素が起きたとそういう状況がございます。2007 年度は、潮汐と台風等の来襲の加減でかなり規則的な変動を繰り返した年ですけれども、干潟縁辺域の方が、湾奥の T1・14 の様な干潟縁辺域の方がより貧酸素化し、8 月下旬にはシャ

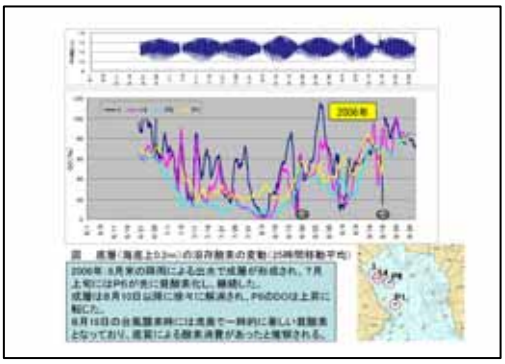


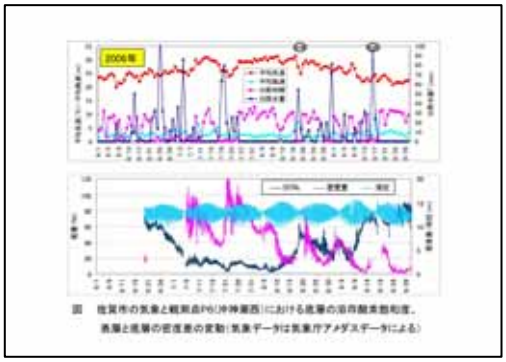
トネラの発生を受けた有機物の供給が多かったと考えておりますけれども、8 月下旬の小潮期には湾奥の干潟域を中心に著しい貧酸素となりまして、無酸素状態にも陥りサルボウ等の貝類が斃死したとそういうような状況があったと理解しております。2008 年は、表層水がかなり高温の晴天が続いた状況がありまして、密度成層が形成され湾奥で貧酸素が進んだという状況がありますし、また 2008 年にはシャトネラ赤潮の発生も加わりましてこの湾奥西部の干潟縁辺域で著しい貧酸素になったという状況がございます。昨年ですけれども、2009 年につきましては 7 月上旬に出水による密度成層が形成されて北部で貧酸素が進んだ事、又シャトネラ赤潮も発生した訳ですけれども 7 月下旬から北寄りの風の連吹があり著しい貧酸素化を免れた、あまり著しい貧酸素が無かったというような年になっております。

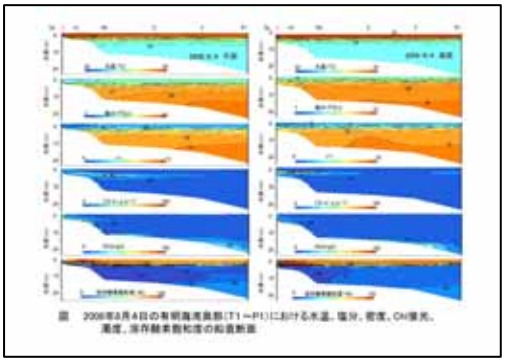




それぞれの年度で観測データがあるわけですけれども、その中の例えば 8 月に於ける貧酸素の観測の頻度、全ての観測のデータの内の例えば 10%以下の水になった頻度、青が濃いほど著しい貧酸素の観測頻度が多かったという状況の整理をしてみますと、2006 年が最も溶存酸素の低下が著しくその 10%以下になった頻度、頻度が多かった、観測時間が長かったという事がご理解頂けるかと思います。2004 年から徐々に悪くなったというふうにも一瞬見えたのですけれども、その後の 2006 年が成層が厳しい事が最も多く、その後は 2009 年、昨年度は風による影響もあったと理解しておりますけれども、貧酸素化はそれ程程度は低かったという事でそれぞれ長期的に増えるという状況は今の所見て取れなくて気象による影響が大きいものと考えております。2006 年には先程申しました様に、この様な沖合での貧酸素が著しい状況が進んだ訳ですけれども、最初にこれをお話すべきだった所ですけれども溶存酸素の低下が長期に亘りましたけれども、その前に 6 月の下旬から 7 月に掛けて大量の降雨が、出水がございまして、それによって密度成層が、表

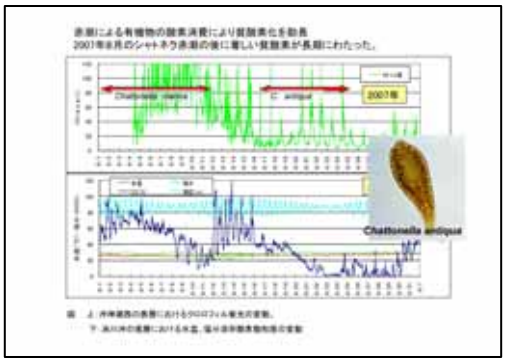


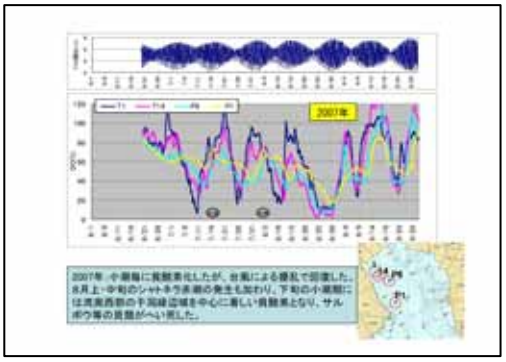


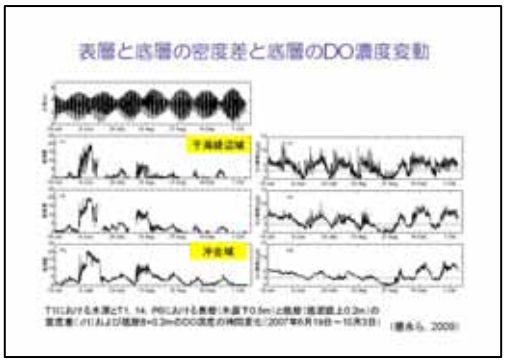


層と底層の密度差を赤で示しておりますけれども、密度成層が強化されたものが長期に亘って持続したという事で、この期間湾奥での貧酸素化が持続したという様な状況がございます。その時の断面図を見ていきますと、表層に低塩分の低密度水が分布する中で底層の、湾奥の底層部に著しい貧酸素が大量発生しそれが中層水にまで貧酸素水が出るとその様な状況がこの年に特徴として出てございます。

貧酸素の発生の助長に関しては有機物、赤潮による有機物の供給によって貧酸素が助長されていると理解しております。2007 年にはシャトネラの赤潮が、初期にシャトネラマリーナの赤潮が、後期にシャトネラインディーガの赤潮が出た事が記録されておりますが、それによる有機物供給量が多かったと理解しております。8 月の下旬の小潮期には、湾奥で無酸素になる様な状況が長期に亘って継続するそういう様な状況が起きてございます。その様に基本的に大潮、小潮の潮周りで、小潮期に貧酸素が発生し大潮で解消するという現象がございますが、その様な状況が実際各観測点でどれ位違うものかという事をもう少しきちっと検証する必要があるだろうという事で、観測データに基づいて実際の密度差の密度成層の発生状況下と溶存酸素の変動についてここで比較したものをご紹介申し上げます。

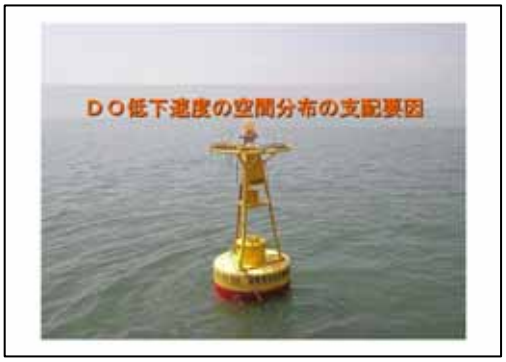


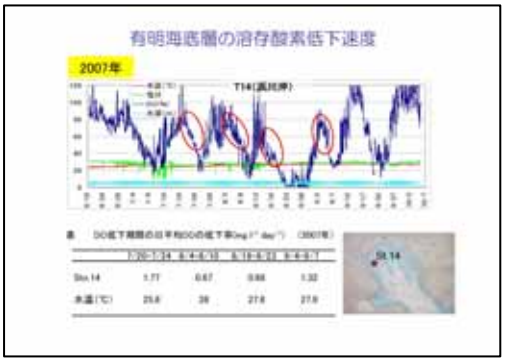




干潟縁辺域の浜川沖の観測点と沖合域の沖神瀬の観測点での、こちらに密度差、右側に溶存酸素の変動を示しておりますが大潮-小潮-大潮-小潮となる潮汐変動の中で、大潮期に浅い干潟縁辺域では小潮期に密度差が発達し大きくなりますが大潮期にはそれが無くなるという事で、小潮期に

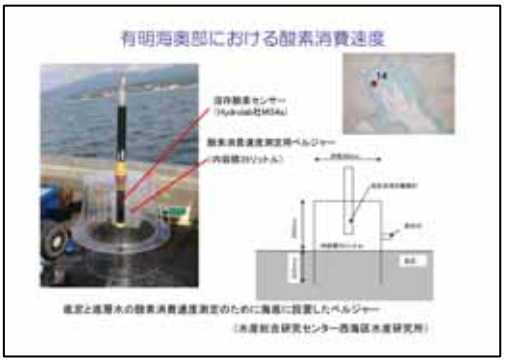
成層が形成され大潮で成層が解消されるとその様な明瞭な変動を示しております。その様な中で底層の貧酸素については、大潮時に解消し小潮時に貧酸素になる、又ある時には無酸素になると大きな変動を繰り返しています。一方沖合域につきましては、潮汐に伴いまして密度差の大小の変動は出るわけですけれども、大潮期におきましても表層と底層の密度差は残りまして成層が維持されている状況がある中で、混合が進まず貧酸素が解消し難いそういうような状況として起きておりまして、干潟域と沖合域との成層の出来具合、又大潮小潮の中での成層の解消によって貧酸素の発生の状況が形成されていると理解しております。





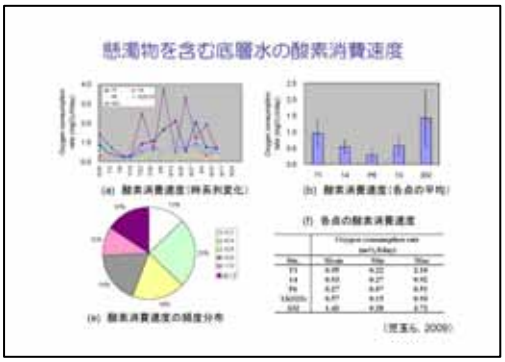
酸素消費、酸素の低下をもたらすものは有機懸濁物への酸素消費若しくは底泥化の酸素消費と考えますけれども、実際にどれだけの酸素消費速度があるかというのを観測データから、単純に高い所から低い所、大潮から小潮に掛けての変化速度を 1 日平均で出してみますと、例えばこれは 2007 年のデータですけれども 1 日当たり 1ｌ当り 0.7 から 1.7mｇ位の変化速度を持っております。例えば飽和酸素濃度が、酸素があった時に 3 日程度で無酸素までなるようなそういう大きな酸素消費速度が得られております。そういう度合いの計算につきまして、湾奥の全域についての観測点これは 2007 年のデータを基に整理してございますけれども、個々の観測点に於ける溶存酸素の低下速度と又こちらに貧酸素状態の継続日数を整理してございます。その結果、湾奥の同じような水深帯の浅い所で見ますと湾奥西側の海域、観測地点 T1、2 の方が酸素消費速度が大きいという結果が出ております。それと 1、14、T6、T1 というこの浅い方向から深い方向への観測点の並びで見てみますと、浅い方がより酸素消費速度が大きいと水深の大きい所よりも浅い所の方が酸素消費速度が大きいという観測結果が得られております。低下速度につきましては、干潟縁辺部、特に西側で大きいという事がこの状況の中整理出来ると思います。貧酸素状態の継続日数に尽いてみて見ますと、西側の観測点 14 とか水深が深い方になる方が継続日数が大きくなっております。成層が継続して安定している中で、一度貧酸素になるとそのまま継続するという様な状況があろうかと思います。只、浅い所の T1 については貧酸素の東側

よりも貧酸素の継続日数が多いという事で、この浜川沖の観測点につきましては、酸素消費速度の大きい事と又それ以上に貧酸素になり易いということは、又別の要因があると考えております。

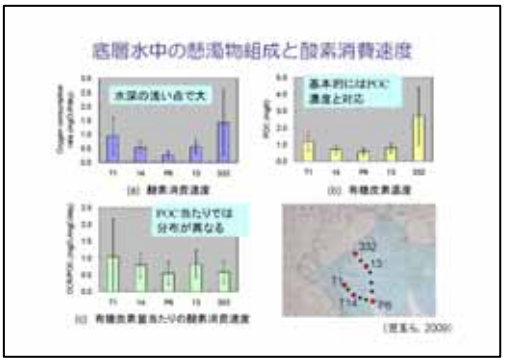


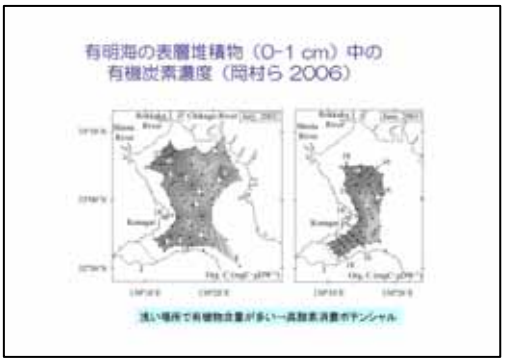
酸素消費速度につきまして、実際にどの程度のもの、例えば底層の懸濁物の水の酸素消費と底泥の酸素消費が 2 つ考えられる訳ですけれども、現場の実験としまして水と底層水・底泥の酸素消費速度を分けるというような観測の仕方を行なって

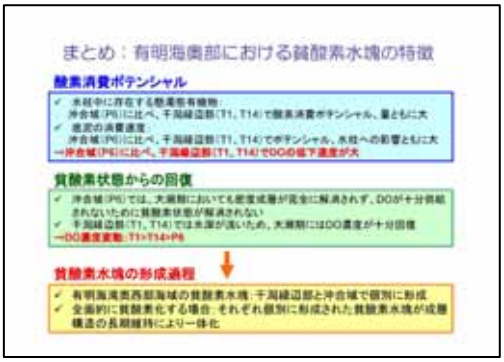
その検討を行ないました。海底にチャンバーを設置しまして、その中の水を封じ込めた状態の中での酸素消費速度と同じ水を培養した酸素消費速度を求めまして、全体のそれぞれの泥の底泥の酸素消費速度と底層水の酸素消費速度を別々に測って、それを基に全体の酸素消費度の果たす底層水の寄与率を求めてみております。その結果、酸素消費速度、海底直上の酸素消費速度に及ぼすものには、底泥が意外と多くなく底層水、水の方が 6 割から 9 割の寄与をすると、底層水中の底層の懸濁物を含む底層水が酸素消化低下速度に寄与しているという事が分かって参りました。その上でそれに基づきまして実際に底層水を海底の水を乱さずに採ったものを室内培養で酸素消費量を測定するという事を行なっております。酸素消費速度を観測点 5 つの所から水を採ったものを



培養して酸素消費度を測ったものですけれども、0.2 mg／l 程度から 3.8 mg 1 日当り酸素消費速度を持つという事に大きなポテンシャルがある事が分かりました。この結果につきましては、先程の現地測定での結果としての速度と同程度のものですけれども、3 日もあれば飽和水が無酸素になってしまうようなそういう様な大きなポテンシャルがあると酸素消費度のポテンシャルがあるというのが分かって参りました。懸濁物による酸素消費が大きく寄与しているものと考えております。それぞれの観測点に於ける酸素消費度を地理的に西側の奥とこちらの東側の湾奥とこれが沖合い



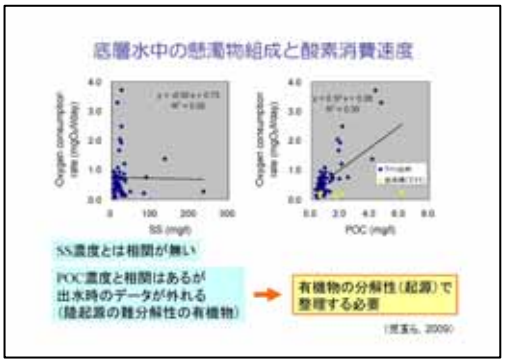




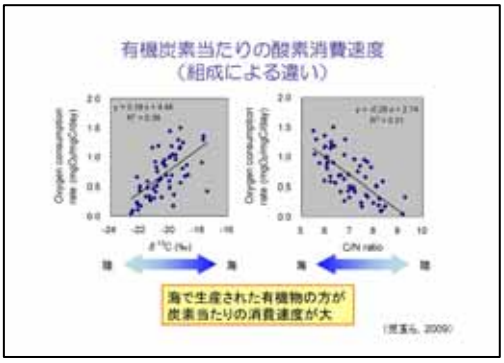
になりますけれども、並べてみますと沖合域よりも浅い所の方が酸素消費速度が大きいという事がこの実験からも得られております。その酸素消費度の大きさにつきましては、有機物の濃度とも対応するという事で有機物が多い所の方が酸素消費度が大きいという事も分かったところで、海域に於ける懸濁物の多い少ないによって酸素消費度が大きいという事が分かりました。底泥につきましては中々十分なデータがある訳ではないですけれども、岡村によるデータでは底質の有機物が湾奥の北西部海又は諫早湾とかの湾奥の北西部海まで多いという事がこれまで報告されておりましたので、こういう海域では高酸素であり高い酸素消費ポテンシャルがあるものと考えている所です。

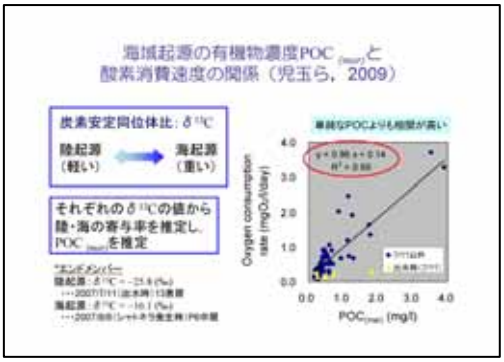
そのようにこの有明海に於ける貧酸素水塊の分布、又は実際の酸素のポテンシャルを見ていく中で分かってきたものとしてまとめたものですけれども、酸素消費ポテンシャル、酸素を消費する能力としては水柱の中に存在する懸濁物がかなり大きなものがあって特に干潟縁辺部で大きいものと理解しております。底泥の酸素消費度につきましては、干潟縁辺部でそれなりに大きいという事が分かってきましたので、これらを合わせる事によって沖合域よりも干潟縁辺部での酸素消費速度が大きいとこういう事が実験的な検証からも見えて参りまして、有明海の特徴である干潟縁辺部での酸素消費、酸素が低下するという理由が見えて参りました。

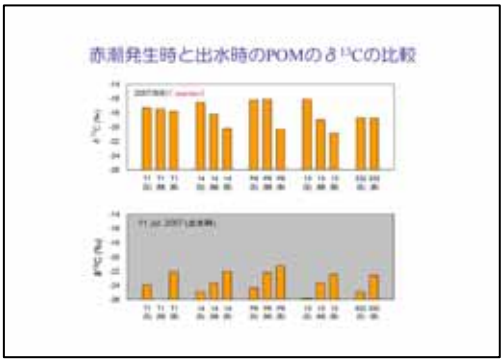
また一方、貧酸素からの回復につきましては、これは成層と混合の関係ですけれども沖合域では大潮期に於いても密度成層が完全に解消されないという状況がこれまでの観測で見えております、普通の気象条件の中ではという事ですけれども。只、一方、干潟縁辺部では水深が浅い為に大潮期には利用濃度が十分回復するとそういうような状況がありまして、この結果から DO の変動幅としては干潟域の縁辺域が大きく沖合域では小さい変動幅をするという様な状況が起きているという事が理解出来ます。この様な結果から、有明海奥部の貧酸素水塊につきましては干潟縁辺部の沖合域で別々に形成されるという事が理解出来ると思います。それぞれ別々に形成されたものが、成層構造が長期化する、例えば出水による、安定出水とか晴天が継続となる成層の長期化によってより発達して大規模な貧



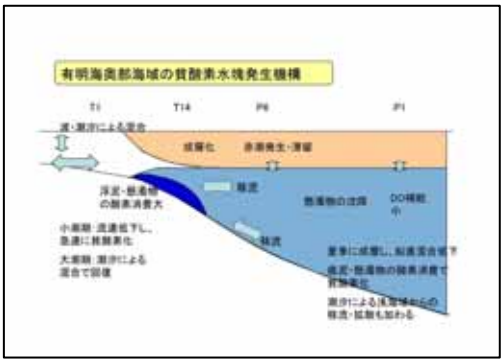
酸素に成るという状況が現場の検証データからも見えて参りました。底層水の懸濁物につきましては、懸濁物は酸素消費するという事までは分かりましたけれども、ではそれが陸域からのものなのか海域からのものなのかについて言葉によって整理しております。POC当り有機炭素量当りの酸素消費速度を全データをプロットしてみますと、出水時のものにつきましては有機物は多くても酸素消費速度は小さいという事が分かりまして、これはどうも外れているという事が分かりました。唯それにもかなりバラつきがある訳ですけれども、懸濁物の特性で陸で作られたもの海で作られたものとして理解できます。カーボン炭素の比を見てみますと、海の由来の有機物と思われるものに尽いては酸素消費が大きいという事、又安定同位体比で見て海で作られたものと理解するものがやはり酸素消費が大きいという事が室内実験からも得られております。その事から、海起源の有機物という形で整理しますとかなり相関が高くなって参りまして、酸素消費速度に大きく寄与するもの貧酸素の酸素比に大きく寄与するものは陸域から出るようなこういう出水時のものとか、又陸起源のものの例えば分解の終わったような植物繊維のようなものではなくて、新たに作られる海の起源のもの例えば即ち植物プランクトン。海で作られる植物プランクトンが酸素消費の1つの大きなものになっていると考えるに至って整理が出来ております。そういう海起源のものとしては、有機物の大きいものとしては例えば赤潮になりましたシャトネラが大きなそういう特徴的な海起源の植物プランクトンであると理解している所です。



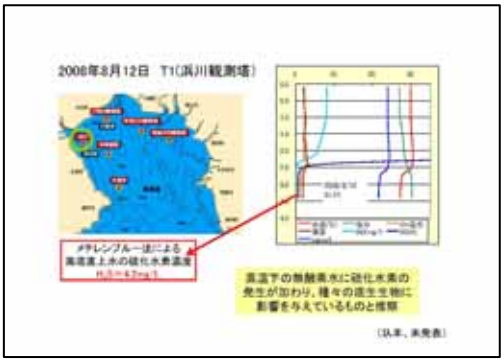




この図は環境省の報告書にも見られたと思うのですけれども、かなり単純化したもので貧酸素

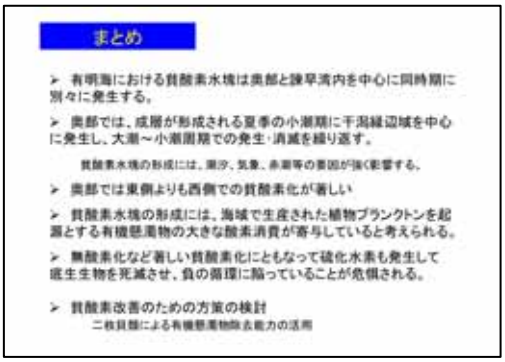


の発生機構について全てを表わす事が出来る訳ではないのですけれども、単純なものとして成層が進んで、成層化が進んだ有明海の奥部の中で、表層で赤潮が発生しそういう有機物が海域全体に降る中で沖合域でも成層の安定した中で酸素消費が進む。また、その奥部には有機懸濁物が湾奥に溜まり易い様な状況が有る中で、湾奥での懸濁物の浮泥懸濁物の酸素消費が大きい海域が出来、それが混合し潮汐との兼ね合いの中で大きな酸素消費速度を以って貧酸素水塊が発生するとその様な状況が起きているものと考えられております。



今日、生態系の影響に与えるという事もあるとお話に話題になっておりましたので、実際にその貧酸素の中で又硫化水素が出ているという状況も観測されておりますので、その事例について簡単にご紹介しておきます。2008 年 8 月に有明海奥部でかなり貧酸素化が進みまして、無酸素水が発生致しました。この年、諫早湾の中では青潮が出た年でございます。無酸素水の中が、無酸素水が 1m 位厚みを持って湾奥に分布しサルボウにもかなり影響を与えた年ですけれども、実際に外気を遮断した形で水を採取して分析しますと硫化水素がそれなりの濃度で検出されまして、高温下の無酸素水に硫化水素の発生が加わって二枚貝を含むベントスに大きな影響を与えるそういうような状況に起きているものと考えました。その様な中で、現在の有明海の状況は残念な所の中ですけれども、潮流の減少、潮位差の減少によっての透明度の上昇が起きて赤潮が増えているのではないかという事は色々な報告でも既に述べられた所ですけれども、その様な中で一方貝類資源が減少している中で懸濁有機物が有明海の奥部の西側に溜まり易い様な状況が現状であると思って居ります。その様な中で、貧酸素、無酸素化が進んで時には硫化水素が発生する中で貝類、ベントスが大量死をし、又貝類資源も減少すると先程も荒牧先生からもございましたけれども負のスパイラルに残念ながら陥っている状況があろうかと考えている所です。

今日のまとめとしまして、お話した事は有明海に於ける貧酸素水塊は 19 年度の時もご報告しましたけれども、奥部と諫早湾を中心に同期的に発生する事はご理解頂けるかと思います。奥部では、成層が形成される夏の小潮期に干潟縁辺域を中心に発生して大潮小潮周



期での発生消滅を繰返すという事もご理解頂けたかと思います。ちょっと十分説明していなかったのですけれども、貧酸素の形成には潮汐だけではなくて気象、赤潮等の要因が強く影響するという事で、その年々の気象と又赤潮の発生によってより助長される又は解消されるという様な状況がありますので、そういう気象による影響も大きいという事はご理解頂ければ有難いです。全体的に見ますと、奥部では東よりも西側の貧酸素が著しいという状況がございます。これは、有機物の供給によるもの又赤潮の発生によるものが大きく効いているものと思われます。貧酸素水の形成には海域で生成された植物プランクトンを起源とする有機物の大きな酸素消費が引き寄せるという事がかなり明確になって参りました。今後の事として、現在の状況として無酸素化等著しい貧酸素化に伴って硫化水素も発生する場合には、底生生物も死滅するというような循環に陥っているとそういう状況が残念ながら起きているという所が正直な事実としてご紹介せざるをえないという所です。

今後の事として、未だ十分我々も対応出来ている訳ではございませんけれども、水産研究所としては貧酸素改善の為の方策としては、やはり重要な資源である、又水産資源であります、海洋水資源である二枚貝による有機物懸濁物の除去について活用していく方策を考えたいと思っておりまして、現在その事についての研究も進めている所でございます。

以上駆け足ではございましたけれども、現在の有明海に於ける貧酸素の発生とその状況のメカニズムについて全体的に御紹介を申し上げました。有難うございました。

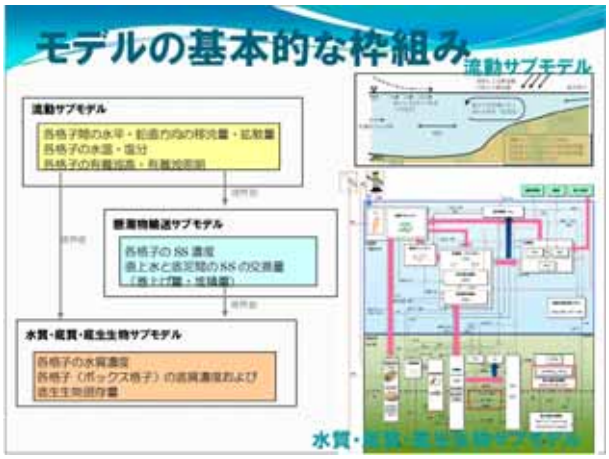
■　ＪST モデルによる貧酸素水塊の形成に関する研究

いであ㈱国土環境研究所　水環境解析グループ　主査研究員　竹内一浩

ご紹介有難うございました。いであ株式会社の国土環境研究所、水環境解析グループの方に所属しております竹内と申します。本日は宜しくお願い致します。

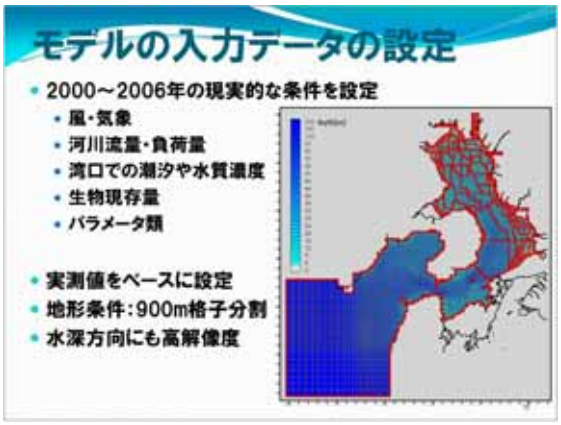
本日は『JST モデルによる貧酸素水塊の形成に関する研究』という事で、モデルによる有明海の貧酸素水塊の再現の事例等をご紹介させて頂きます。今回の発表は、JST モデルという事で先程荒牧先生の方からもご紹介頂きましたが、楠田先生が研究代表者でおられます科振機構の研究プロジェクトの中の一環として、有明海を対象とした生物生息モデルを構築致しておりまして、その一部の低次生態系モデルに関する部分を切り出しまして有明海の貧酸素水塊の形成機構について発表させて頂きます。

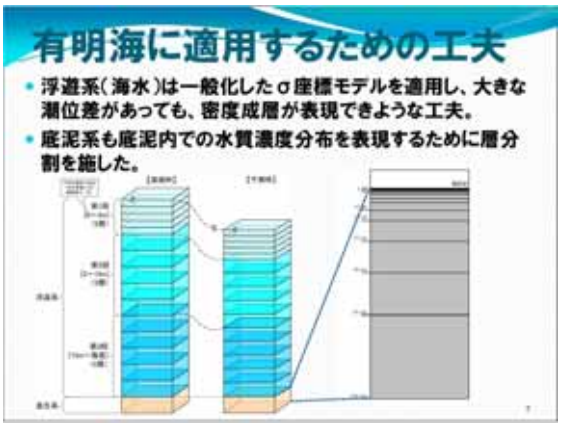
本日の発表の構成でございますけれども、JST モデルの基本的な『枠組み或いは精度の検証をどのようにして行っているのか』という事のご紹介、そして実際にモデルによって得られた『貧酸素水塊の挙動と特徴』について、例えば大潮小潮周期の変動であるとか年々の変動という事、それとシミュレーションという取り扱いではないのですけれども、『過去の状況を想定した場合にどの様に貧酸素水塊の出現状況が変化するのか』という感度解析の結果について、そして最後に『有明海再生へのポイント』としてまとめをさせて頂きたいと思います。



まず、モデルの基本的な枠組みでございますけれども、この低次生態系モデルはまず流れのモデルと懸濁物輸送サブモデルというものと水質－底質－底生生物サブモデルという 3 つのモデルを組み合わせて動かしております。流動サブモデルは、ここにございますように、有明海の流れを規定する潮汐であるとか気象、風による吹送流、あと淡水流入、日照等による密度差によって生じる密度流さらに外海からの影響等も考慮して、有明海の中の水の流れ、あるいは水温、塩分、密度の状況を予測するモデルでございます。その計算結果を有明海の特徴であります SS（懸濁物）の挙動を表現するモデルに組み合わせると同時に、その結果も水質、底質、底生生物サブモデルに与えて表現するというモデル構成になっております。この下が水質－底質サブモデルの概念図でございますが、水質の部分と泥の部分あとその中に例えば有明海の特徴的な底生生物類を考慮して、窒素やリンなどの物質循環を表現・規定したモデルでございま

す。例えば陸域からの栄養塩の流入が植物プランクトンによって吸収されて水中で一次生産が起こる。それらが二枚貝であるとか動物プランクトンに食べられる。そういった「食べる、食べられる」といった食物連鎖の関係、その過程で植物プランクトンが死んで有機物になる、それらが沈降して底泥へ移行する等々、そしてそれらを分解する過程で酸素を消費して溶存酸素濃度が変化するといったモデルとなっております。

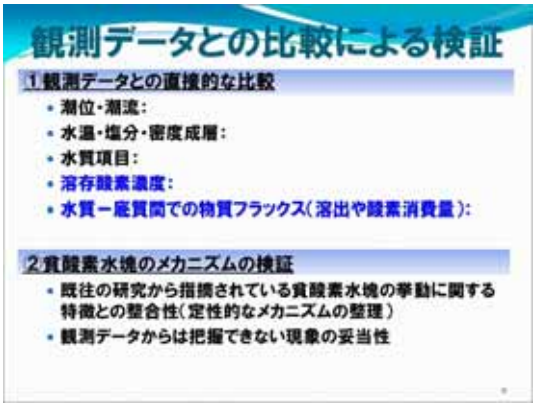


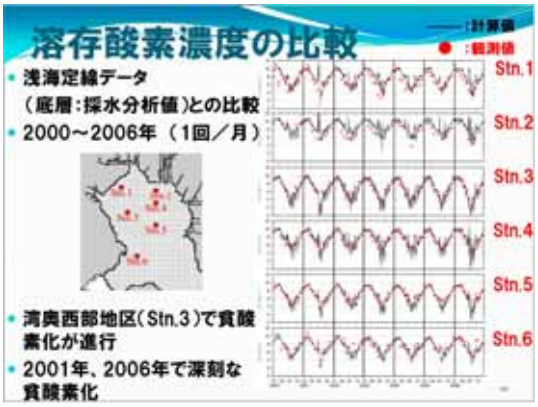


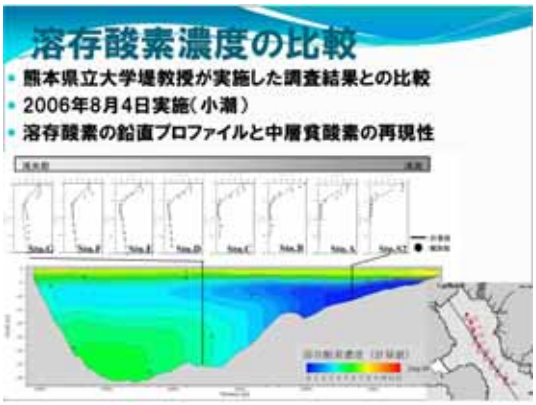
実際にこういったモデルをツールとして整備した上で、有明海を対象として現実的な条件を設定して貧酸素が再現出来るかという事を、まずモデルの検証として行なっております。実際には 2000 年から 2006 年の 7 年間の現実的な条件、例えば風であるとか日射量、気温等々のものも基本的に 1 時間毎のものを全部与えて、さらに、筑後川を始めとする河川流量それから負荷量、湾口部分での境界の条件、そしてその他生物の現存量であるとかパラメーター類を考慮しています。そして、実測値をベースにこれらの条件を基本的に設定しております。有明海は今 900m 格子に分割して、それぞれの中で先程の物質の循環等を解いていくという様なモデルになっておりまして、勿論先程成層の構造等もございましたので深さ方向にも高解像度に表現をするというような工夫を致しております。

有明海に適応する工夫として、これが 1 つのメッシュの深さ方向のものでございまして、当然非常に大きな潮位差がある海域でございますので、それが潮汐によって水位所謂水の高さが変わってもその中でモデルの細かさ（解像度）が維持出来る様な仕組みでモデルを解いております。そしてあと底泥の中での表現性を良くする為に、底質の中でもやはり細かく層分割を表現しながらモデリングしております。さらに、非常に生物生産が盛んな海域という事で、有明海全体の物質循環にこれらの生物種は非常に重要な役割を果たしているという事は言うまでもございませんので、それらが物質循環に

与える影響を有明海の代表種と選定したアサリ、サルボウ、タイラギ、アゲマキ、カキ等の二枚貝類とその他の堆積物食者等も含めてモデルで考慮しています。また、有明海の特徴の非常に強い潮流による底泥の捲き上げに伴う現象というものも表現したモデルになっております。





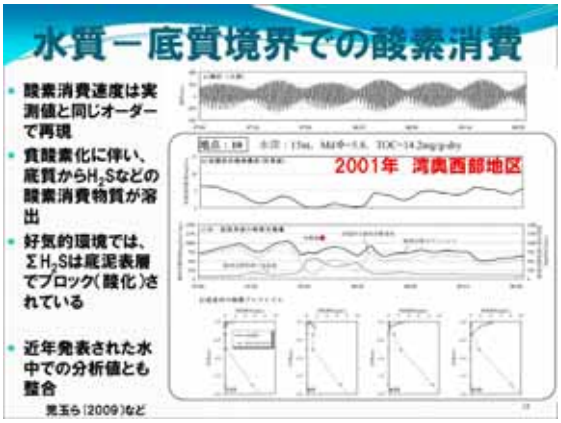


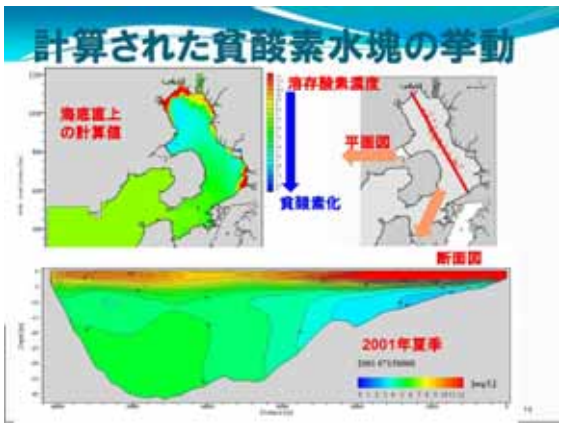
さらに、モデルの手続き上のお話でございますが、1 つは検証する為にはやはり観測値データと、直接的にアウトプットした計算値を比較しなければならない。項目と致しましては、潮位潮流、水温塩分、密度成層の表現性、更に水質の項目であるとか溶存酸素濃度、更に先程木元先生のお話にもありましたようにいわゆる水質ー底質間での物質フラックス、物質のやり取りの中での酸素の消費量であるとか、栄養塩の溶出量そういったものも検証の対象となります。さらにその次のステップと致しまして、こういった実測値そのものというよりかは、基礎的な研究から指摘されている様な貧酸素水塊の挙動に関わる物理過程をちゃんと表現した形でそういった特徴と整合性が取れているかどうか、メカニズムをちゃんとモデルが表現できているかどうかという観点でモデルの方の検証を進めております。これから早速、溶存酸素濃度の検証について一部ご説明させて頂きます。これは浅海定線データで湾奥の複数の地点で月に 1 回行なわれているもので、横軸が 7 年間の時系列で観測ポイントの Stn.1～6 と上下に並んでおります。比較しているのは底層の値で、赤い点が観測値で黒い実線が計算値でございます。やはり季節毎に夏場に計算値、実測値、共に非常に貧酸素化が進んで、特に 2001 年と 2006 年、特に Stn.3、この海域でございますけれども Stn.3 で夏場にほとんど無酸素に達するような状況になっています。計算の方がやや酸素濃度が低いという状況になっておりまして、先程もご紹介有りましたが浅海定線データが大潮期に行なわれているということを考えあわせますと、妥当な値であろうというふうに我々の方では判断しております。

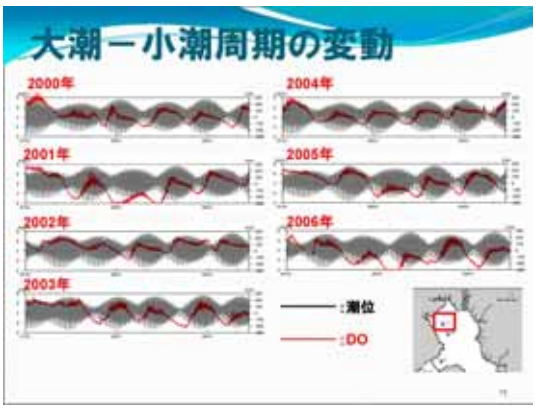
もう 1 つ、熊本県立大学の堤先生の方で実施された調査結果との比較も行なっております。これは 2006 年の 8 月で、やはり貧酸素水塊が生じておりました小潮期のデータでござ

いまして、貴重な事に鉛直プロファイルで溶存酸素濃度が測られている。これも観測値が黒いドットで示しておりましてそれぞれのポイントでの深さ方向の分布傾向という事でございます。これが計算値の方は実線でお示し致しました様に、湾奥部の方では底層でほとんど無酸素の状況になっております。特徴的なのは水深 5m 辺りの所にある密度躍層の位置と対応して、その辺りで溶存酸素の最小値が現れている。それが計算値の方でもやはり表現されておりまして、こういった曲線を描いた様な形でのモデルの計算結果になっている。モデルの計算結果をもう少し細かく見てやろうという事で、個々の断面をモデルの計算結果で全て表現した形で切り出したものがこの断面図になります。これは溶存酸素濃度の分布図を示しておりまして、図中の青い色の方が溶存酸素が低いという状況でございますけれども、やはり水深 5m 程度にある密度躍層に対応し、それより深い水深のしかも浅い海域でまず貧酸素が進行していて、沖側に出るにつれてその溶存酸素が中層の方へ流れ出しているとそういった傾向が良く表現できているものだというふうに思っております。

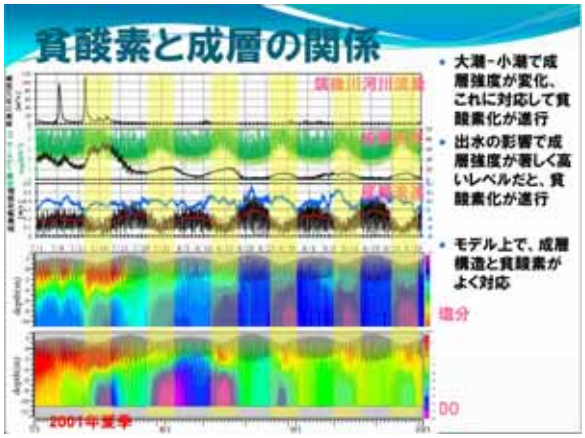
続いて、水質－底質境界での酸素消費という事で、こういった現地での採水実験等が難しい実験でなかなか実測値のほうは限られてしまっているのですけれども、実線が 2001 年の夏場の結果で湾奥西部の地区でのこれが計算された溶存酸素濃度です。その時の実測値が 1 点だけなのですが、底泥での酸素消費速度という事で酸素消費のポテンシャルを示しておりますが計算で得られたものはこの太い実線です。これらはやや計算の方が低い傾向でございますけれども、ほとんど同じオーダーであるという事と、あと好気的な酸素消費というのは点線の方でお示ししているもので、実はほとんど無酸素の状況になっておりますので好気的な酸素消費が起こっていなくて、モデルの中で考えています嫌気的な還元物質による酸素消費という形で、それが酸素消費ポテンシャルがこのグレーの線なのですけれども、そちらに変わってトータルとしてこの酸素消費ポテンシャルがこの程度あるというような形になっています。そしてあとその時の底泥内での溶存酸素濃度と、硫化水素等の還元物質の鉛直プロファイルもこういった形で計算されているというものでございます。





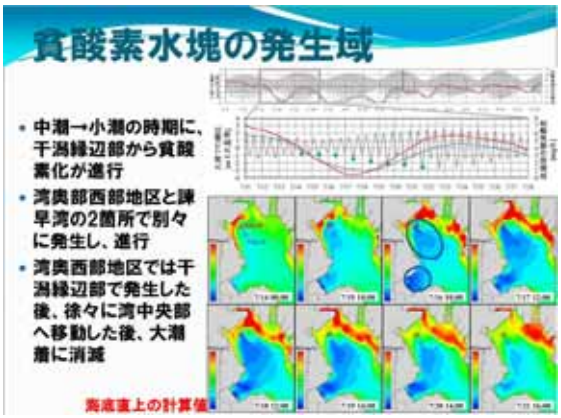


次に、もう少し実際の計算結果から得られた結果を見てみようという事でこれは 2001 年の夏場の貧酸素が起こった時の動画です。こちらが有明海計算領域に於ける海底直上の計算値で、青い所が貧酸素化が進んでいるという状況です。こちらは先程と同じ断面をとった所でございます。大潮から小潮に向かっている段階で、徐々に青い色が目立ち、湾奥部と諫早湾の所で貧酸素が生じていて、潮汐によって少しずつ移流しながら湾奥部で貧酸素が生じている。しかも躍層の下で起こっていてそれが全体に移流しながら動いているという様な状況が表現できているというふうに考えています。また大潮に近づいてくるとそれらが解消しながら、貧酸素水塊が非常に深刻な年であると大潮になっても解消しないという様な状況も出てきております。先程木元先生の方でもご紹介ありましたけれども、やはり特徴的な 1 つの現象として大潮小潮周期で溶存酸素濃度が大きく変わって貧酸素が起こったり解消したりするという事でございます。今回計算した 7 年間の夏場の 7 月～9 月の 3 ヶ月間を示したもので黒い実線が潮汐です。それに対して計算された最下層の溶存酸素濃度が赤いものでございます。これを見ますと 2001 年と 2006 年が貧酸素水塊の発生が非常に顕著で深刻な状況だった年でございますけれども、やはり小潮になるとグッと下がって大潮になると上がって行くという様な状況を繰返しながら、特に夏場 7 月の終わりから 8 月の上旬に掛けて非常に無酸素に近いような状況にある。その他の貧酸素が深刻でない年につきましても、やはり同じように小潮の時に濃度が下がっていくというのが特徴的で、有明海の溶存酸素濃度の特徴を捉えているというふうに考えております。

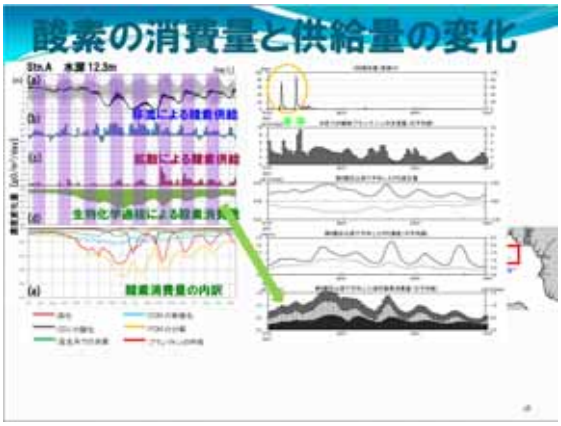


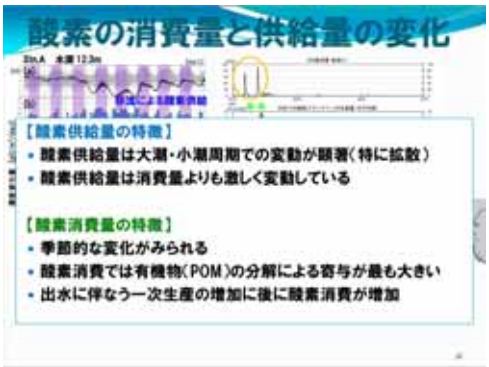
続いて、やはり貧酸素、溶存酸素濃度の変動といわゆる成層、密度成層の関係性というのは非常に重要なメカニズムでございますので、それを整理したものでございます。一番下の図、これが溶存酸素濃度の縦軸が深さ方向で横軸が時間で、これもやはり 2001 年

夏場の 3 ヶ月間です。地点は先程の Stn.A という一番貧酸素が顕著に見られる場所ではあるのですが、これが塩分です。塩分は密度成層を表現しているようなもので、一応温度の効果もありますが塩分としてお示しております。そして一番上が筑後川の河川流量でこれが 7 月上旬に出水があったことを示しています。これが計算から出てくる密度成層をパラメーター化したもので、この黒い実線を見て頂きたいのですが、レベルの高い方が成層が強いという状況で、出水に応じて高くなっている。これは流速です。黄色いハッチがかかっているのは小潮の所です。これを見ますとやはり出水の影響でこの 7 月上旬は非常に高いレベルで成層強度が推移している、それ以外にも 9 月になってもやはり 8 月後半から 9 月になっても小潮期に成層が非常に強くなる。それに応じて塩分も底層で強くなってきて、塩分の環入というような現象が見られてきて、それと同期して下層の方で溶存酸素濃度が低くなっているという傾向が見られます。但し、7 月上旬の非常に強い出水の影響でこの時期は強固な密度成層が形成されているという事で、それに伴って非常に深刻な貧酸素が継続しているという様な計算結果が出てきておりまして、モデル上で成層構造と貧酸素の対応というのは非常に良く対応しているというふうに考えております。

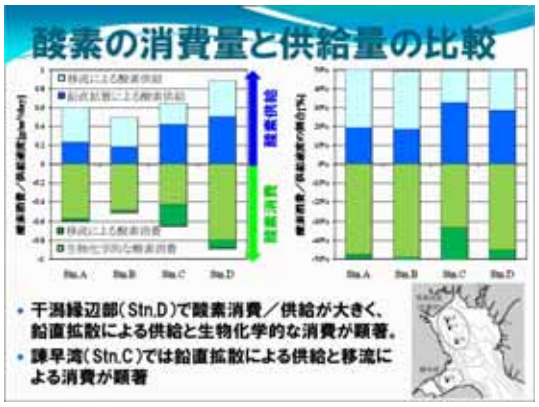


次に、貧酸素水塊がどの海域で発生するのかという事ですが、これも 2001 年のある 1 つの貧酸素のイベントを拡大したもので 1 日毎に、小潮時から大潮時に掛けて 1 日毎にお示しをしております。まず干潟の縁辺部で青い領域が、あと諫早湾でも青い領域が出てきてそれが徐々に拡大していくという事で、湾奥西部と諫早湾で別々にピークを持つような形でそれが徐々に沖側に出て行って、消滅していくという過程でございます。やはり干潟の縁辺部がこれまでもよく言われていますけれども貧酸素水塊の発生域として見られている場所という事も対応しているのかなという事でございます。モデルの良い所は溶存酸素濃度だけではなくて、その中でどういった消費量と供給量のバランスになって、その濃度が決められてきたかという事を解析する事が出来るという所が数値モデルの利点でございます。先程の荒牧先生のお話にも



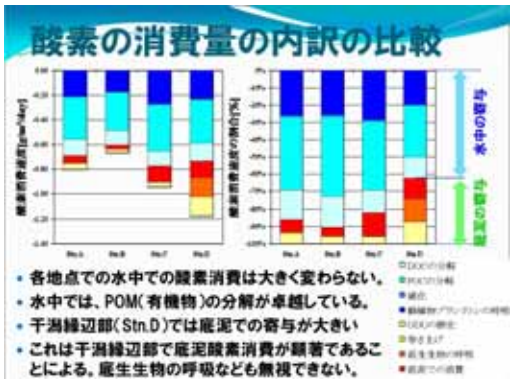


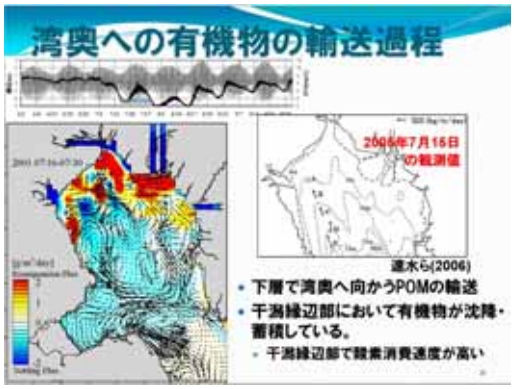
ありましたが、やはり酸素はまず消費量と供給量のバランスで溶存酸素濃度、貧酸素というものが決まるという事で、1 つは酸素の供給量として水平方向の流れによってもたらされる酸素の供給量と、深さ方向、成層を越えてもたらされる酸素の供給量というもの、それと後はやはり有機物の分解等に伴って生成される化学過程というもので消費量というものをバランスします。これがまた同じように今度は大潮の方をお示ししておりますけれども、これを見ますと大潮の時にやはり酸素の供給量が増えていると鉛直拡散による供給量が増えているという事が分かります。酸素の消費量については、長期的な季節変化はあるのですけれどもあまり変わらない。酸素の消費量の方を良く見てみますと、これが供給量を引っ繰り返して見た所なのですが、やはり夏場に非常に大きくて季節変動があると同時に、やはりこれも筑後川の出水等によって栄養塩がもたらされると同時にプランクトンがモデル上でも増殖されていて、それによって POC が有機物が多く生産されてそれが消費量に向かっているという事が分かると思います。やはり酸素供給量は大潮小潮周期で変動が顕著なのですけれども、酸素供給量はより激しく変動しているという特徴がございます。消費量の方は季節的な変化が見られるというのと、有機物の分解による寄与が非常に大きいという事も上げられると思います。そして出水に伴う一次生産の増加の後に酸素消費も増加をしているという対応が見られています。

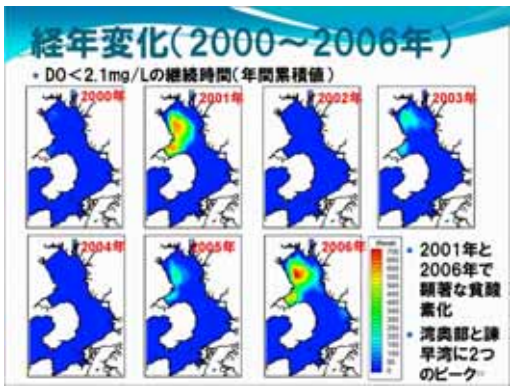


もう少し細かく酸素の消費量の内訳の方を見て見ますと、これが酸素の消費速度を足したものでいわゆる水中での POC、有機物の分解であるとか、DOC の分解というもの、動植物プランクトンの呼吸というものに加えて、底泥の中での消費項目というものがございます。これを見ますとこれは Stn.A、B。Stn.C というのは諫早湾の中なのですけれども、D というのは干潟縁辺部でございますけれども、計算された水中での酸素消費というのは実はあまり空間的には変わらないのですが、干潟縁辺部では非常に底泥での酸素消費というのが効いてくる。それを割合で示しますと、底泥での酸素消費というのが干潟縁辺部の Stn,D では非常に高く 40%位までいく。結局干潟縁辺部で底泥での酸素消費が増えるという事で、トータルの酸素消費が増えているという傾向にあります。ではそれが何故かと言うと、やはり有機物が湾奥の方へ移流されている。これはベクトルで書いているのが懸濁有機物、プランクトンの屍骸等が主なものですけれども、こういったものが流される過程のフラックスというものを示していますがやはり矢印として湾奥に向かって、これは下層の方ですが深い方の水の流れを表現していますがそれがこちらに湾奥に向かっている。そしてこのカラーのものがブルーのものが下に沈降している、そして赤い所が巻き上がっているという所をお示していますが、そういった過程で最終的に湾奥の方に有機物が輸送されて底泥の中で酸素消費が強くなっている。そういう傾向があって、ここがやはり貧酸素

水塊の最初の生成域に成っているのではないかというメカニズムが表現されているのではないかと思って居ります。



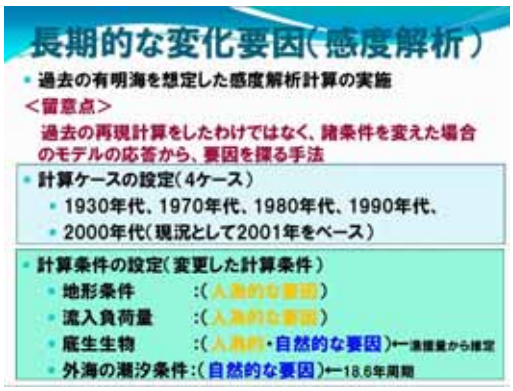


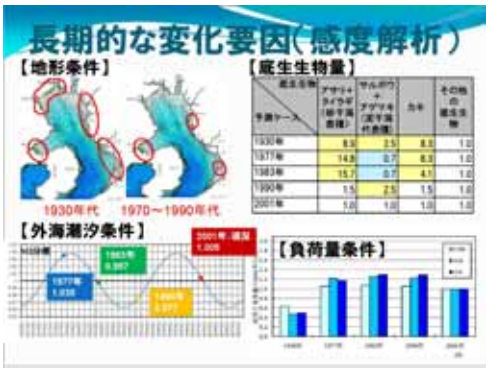


経年的な変化ですけれども、2000 年から 2006 年まで計算しますと 2001 年と 2006 年これが貧酸素の継続時間というものをお示ししておりますけれども、赤い所が長時間に亘って貧酸素に曝されているという所で 2001 年と 2006 年がやはり非常に顕著な貧酸素化が起こっていた年である。2006 年は近年で最も貧酸素が起こっているというふうに言われている年でございましたので、それにも対応出来ているというふうに考えております。この要因としては、年によっていろいろな外力の変化をモデル上で与えています。例えば降水量であるとか当然河川流量、流入負荷量等々あと気温等も全部違うものを与えております。

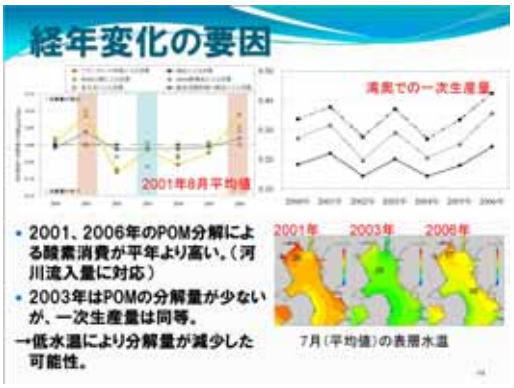
モデルの中では 2001 年と 2006 年が貧酸素が非常に顕著なのですけれども、やはりその年は降水量、河川流量、負荷量というものが非常に多い。ただ、2003 年も、実は同じレベルで非常に河川流量等は多いのですけれども、そこまで貧酸素化が至っていないというような特徴がありましてこれについて多少考察を加えておりますけれども、実はその年は 2003 年というのは若干水温が低い、気温が低いという傾向もありまして植物プランクトン自体は増えているのですけれども、それが有機物の分解の方に回っていないという事が 1 つの可能性としてあるのかなというふうに今考えている所でございます。こういった様に経年的な変化等もモデルの方である程度表現出来るようになりつつ、もう一方でやはり過去の有明海を想定して、過去、近年に亘って徐々に貧酸素が起こるようになってきたという仮説もございますのでそういったものに対しての解答を求める為の 1 つの検討を行なって参りました。1 つは

感度解析という手法で長期的な変化の要因を探ろうという事でございます。ただ、ここでちょっと留意点がございまして、実際に過去の再現の計算をした訳ではなくて過去を想定して色々な条件を変えた計算をモデル上で行ないまして、そのモデルの結果から要因を探るという手法でございます。計算ケースの設定としましては、1930 年代、70 年代、80 年代、90 年代、そしてあと現況のケースという事でケースを設定しております。変える条件としては、地形の条件あるいは流入負荷量あと底生生物の現存量そして外海の潮汐条件という事で設定しております。長期的な変化の要因と致しまして、変えた条件として地形としては例えば 1930 年代であれば佐賀沖の干拓がやはり顕著にありますし、当然諫早干拓事業も未だされていない。70 年代 90 年代になりますと、諫早干拓事業であるとかあと現況と違うのは熊本新港であるとか三池港等の変化が、現況と違うという条件にしておりますし、外海の潮汐は先程荒牧先生からありましたが 18.6 年周期で長い周期で変動しているという事で、大体潮汐の M2 分潮という潮汐の変動が±3%程度変わる。それを振らした 1.03 という数字と 0.97 という数字という事で検討しています。あと負荷量もやはり当時の状況で、1930 年代はかなり低いレベルで設定している。あと底生生物は逆に多いという条件下で計算を行なっています。





この結果でございますけれども、有明海の湾奥西部地区と諫早湾での貧酸素の出現の状況というものを整理したものでございます。一番右端が 2001 年現況でございまして、これを 1 とした場合の数字がここにお示ししておりますが、1930 年代ではやはり貧酸素がほとんど起こらない。徐々に 1977 年から近年に亘って貧酸素が増えてきているという事でございますが、諫早湾はそういった傾向ですけれども湾奥西部エリアにつきましては 1990 年、この時期に現況より多いという結果になっております。実はこの 3 ケースというのは地形条件は全く同じで、外海の潮汐あるいは底生生物量、負荷量は異なるという事なのでこの変化の状況というのは地形の状況ではなくて、この他のこれらの要因によるものだというふうに考えています。これは酸素供給量の指標となります鉛直拡散係数といったものでございますけれども、これも湾奥西部エリアですと 1977 年以降は実はあまり変わらなくて、1930 年のケースとは変わっていますけれどもやはり湾奥の佐賀沖の埋め立て等の影響でガンと貧酸素の状況が変わる、逆に諫早湾エリアはやはり諫早干拓事業に伴う影響でガンと落ちる。一方で湾奥部の一次生産量であるとか、酸素消費量というものを見ますと、こういう形になっておりま



して、特に一次生産量について見ますとこれは底生生物の影響が大きいという図を示しているのですが、トータルの一次生産量はこのような形でこれは負荷量の変動に応じて変動しているのですけれども、実際にはやはり二枚貝類の摂餌という事でこの上の部分は浄化してくれているという事がございます。かつては底生生物量が非常に多いので生産されたものの多くは浄化されてしまって、1930 年の現況に対して僅か 13%位しか有機物が残らないという事で、そういった影響で 1930 年代等は非常に貧酸素が起こり難い状況になったという事でございます。

今は各年代毎の条件を色々と与えながら設定しましたが、実際に個別に例えば地形の条件だけを変えた場合、底生生物だけを変えた場合、外海潮位だけを変えた場合、平均水面だけを変えた場合、流入負荷だけを変えた場合、そういった計算もモデル上では検討は可能です。これは試算した結果でございますけれども、現況の貧酸素のレベルが 1.0 という時に、こちらが上の方に行くとより貧酸素水塊が発生して悪化する状況こちらが解消する状況になります。やはり過去の実験をすると、かなり貧酸素が解消しますがやはり底生生物による変化幅というのは非常に大きい。負荷によってもやはり一次生産量が直接的に増えるという事でかなり効いている。あとはやはり外海の潮位というものがございまして、これは今有明海全体でお示ししておりますけれども湾奥西部エリアにつきましても実はこれが効いていて、地形の変化は湾奥西部エリアではあまり効かない。逆にここがこれだけ幅を持っているのは諫早湾自体の貧酸素が大分変わっているという効果になると思います。

以上まとめまして、近年の現況再現計算による有明海の貧酸素水塊の挙動をモデルによって表現出来ましたという事で、例えば大潮小潮周期の発生状況であるとか湾奥西部と諫早湾でやはり 2 つの別々のピークを持っているという事、それと干潟縁辺部で発生するという事、また、有機物の消費過程というものにも傾向についても定性的に言われている事は大分表現出来る様になってきましたし、経年的には発生、非発生の再現性というのも出来てきたというふうに考えています。過去を想定した感度解析による検討でも長期間に亘って有明海の貧酸素に何が効くかという事が大分場所的にも分かってきたというふうに考えています。

最後に、有明海再生へのポイントという事でやはりこの中で先程先生方も皆さん仰っていましたけれども、酸素消費の過程としては有機物の分解というものが非常に重要で、それが底泥で消費されたり水中で消費されたりという場所によっても若干違う。そういった事がモデルによって定量化されてきていますし、酸素供給に鉛直拡散が本質的であるという事です。こういった状況を表現しますと、最終的に色々な要因がありますけれどもやはり重要な要因としては、こういった底生生物とか外海潮位、地形といったものがございま

して、それらが一次生産を抑える効果に働けば POC が低下しますし、POC の低下にはやはり底生生物の捕食が効く。当然流れ場の方には潮汐の変化という形で効きます。それは、酸素供給フラックスの方に十分に効いて最終的には底層溶存酸素の改善に繋がるという様なシナリオが考えられるというふうに考えております。
以上で発表を終わります。

第２部　総合討論
「貧酸素について理解を深める」

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】

それでは、これからパネルディスカッションを宜しくお願いしたいと思います。時間は 1 時間半という事で非常に限られています、また荒牧先生からこれこれを議論しろと非常に沢山の課題が与えられています。どこまで限られた時間内でやれるか分かりませんが、スピーディーかつ出来るだけ深く切り込んで行きたいと思います。どうぞ宜しくお願い致します。

それでは先程基調報告をして頂いた先生はおっしゃりたい事はもう言われたと思うので、あと堤先生と大嶋先生に簡単にご報告をお願いしたいと思います。宜しくお願いします。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】

熊本県立大の堤でございます。コメンテーターという事でコメントをさせて頂きたいと思うのですけれども、お互いの発表大会になっては面白くないのでこれから総合討論をする上で少し問題提起をしたいと思います。今発表頂きました内容を少し私も組み替えまして、少し私は考えが違うという所をちょっとあえて強調して言いますので少しきつく聞こえるかも知れませんけれどもそこはご了承頂きたいのですが、「ちょっと何か捉え方が違うのではないか」という話を少しまずさせて頂きます。

まず、この赤潮が発生して大量に植物プランクトンが発生して貧酸素が起きるという研究で、一番世界で進んでいるのは実はヨーロッパのバルト海なのです。バルト海でどういう事が起きたかというと、農業で物凄い肥料を使いまして大量の栄養塩を含みました。非常に広い場所ですけれども、有明海にも形的には非常に似ている感じがしますが大量の栄養塩が入って富栄養化が起きました。これはアオコなのですが、植物プランクトンが非常に異常な増殖をして、そこで当然それが有機物がゴミになって、海底に沈んで囲われた海の中にどんどん沈んでいって貧酸素が起きて漁業が駄目になったとそういう非常に典型的な場所でございます。その研究をしているのが、この真ん中のリーダー格の人なのですがスウェーデンのエーテボリ大学のラトガー・ローゼンバーグと言う先生ですけれども、2006 年に熊本に JFP の研究費でシンポジウムを行ないましてその時に来て頂いて色々説明をして頂いたのですけれども、その方が長年ずっと研究されていますけれども 1995 年に書かれた有名な総説があります。貧酸素水塊が起きると、健全だった所が一時的に悪くなる、そういう事が繰返していると最後はドンドンと殆ど生き物がいなくなっていくという量的な変化が起きるというのと、それから生き物の種類が変わってくると言う事、種の量、質的な変化が起きる、種の変化が起きるというそのパターンを示されました。それはどうしてかと言うと、1 つは大きな酸素がなくなると言う事、酸素が無くなると海水中の成分に硫酸塩が含まれてこの酸素を取って硫化水素が出て参ります。これは硫化水素は強烈な呼吸力、

人間でも死にます。マンホール等の下水のトラブル等はよくこれで起きるのですけれども、そういう硫酸還元物が動くのですがこれは酸素が低い状態でしか動かないので、酸素が無くなってくると、酸素が少ないというのと呼吸毒の硫化水素ガス、それらの両方が出てきて生物が死んでしまうというそういう事があります。酸素が少ないだけだったら海産の生き物が生き残ってきます。さほど硫化水素が強くない段階で酸素だけが少し下がっている場合というのは、有機酸発酵という無酸素呼吸を実は発酵までする事があります。ちょっと生物の勉強をされた方は分かられるかとは思いますが、酸素呼吸と言うのは嫌気的解糖、クエン酸回路、電子伝達系とこの 3 つから成るのです。この内の、ここは本当に酸素呼吸で酸素は要りますが、ここは動かないでもこのクエン酸回路を 2 つに分けてコハク酸発酵とプロピオン酸発酵とアルファ的ブタン酸発酵という発酵で生きていく事が出来ます。ですからアサリを獲って来てその辺に置いていても 1 日位生きています。これは呼吸をしていなければいけないのですが、息が出来ないわけです酸素が無い訳ですから、殻が閉じていますから。その間は、実はこういう有機酸発酵を行ないます。唯 1 つだけ大きな条件があります。有機酸が出てきます、酸です。体の中で酸が出てきますから、酸がドンドン増えてくると我々は死んでしまいます。ですから殻を持った生き物達は殻はアルカリです。酸とアルカリで中和反応を起こして何とか生き延びようとします。ですから、こういう低酸素状態が長く続くと結局殻を持っていない生き物、尚且つ体の小さいものというのは酸をドンドン出してきているのです、殻の外に。ですからこういう小さなゴカイは最終的には選択される、体が小さくてゴカイ、こういう立派な大きな養殖だけれども食用鰻だとかこういうものは直ぐに死んでしまいますとそういう事が言われています。健全な所はこういう大きなゴカイ、大きな貝が居るのに、段々小さくなってきて髪の毛みたいに小さくなってきてゴカイだけの世界になっていくとそういう事が全世界で見られるというのが分かって参りました。因みに私は、糸ゴカイというのは私の研究物が専門でございました、これで博士号も取ったものですからずっとこういう研究をやっているわけですけれども。

そうしたら有明海で、これはウチの研究室で毎月ずっと 2001 年から調査をしていますけれども、上のところに示した調査地点の S2 と C です、その酸素濃度、最近ちょっと幸いにも天候の条件だと、そういう指摘がございますけれども、いずれにしても酸素の濃度が非常に下がってきているという現象が起きて参りました。そうした時に密度、質重量グッと低くなります。もう殆ど生物が 1 ㎡ 10g 位しか居ませんので殆ど生物の少ない状態が出てきている。これは貧酸素水塊のそういう繰返している結果ですけれども、しかも未だゴカイはそんなに多くないのですが生息している貝が段々小さくなってきています。平均重量が殆どこういうふうに付いているものが小さな貝になってしまっている。つい最近、この 6 月 5 日に調査した時に 20 ㎝、20 ㎝の最盛期で獲ったのですけれども殆ど居ません。よく見ると星粒位の小さな貝がチョコッと居る位です。こういう場所です。これが有明海の今奥部のど真ん中が今こういう状態です。丁度我々は今どこを見ているかというと、この辺りを見ている状況にあります。これが今の現状なのですけれども、貧酸素水は 2001 年自然

保護協会が取った分布パターンが 1ml 中 2mg のエリアがグーンと広がった。ですから貧酸素水というのは諫早湾を含むないし有明海の西側から東側に分布域が段々拡大するようになったというふうな変化が見られます。そこがどうもタイラギの漁場そのものが飲み込まれていった形になって、最終的にはタイラギの漁獲量がドンと落ちてしまった、最近ちょっと戻っていますがそれは気候の関係です。

これが典型的な話なのですが、1 つだけバルト海と大きな違いがあります。ここがまず今日のポイントだと思うのですけれども、これは無いのです。『陸域から大量の栄養塩の流入』。栄養塩富栄養化は起きていると、先程 1970 年代に比べると起きているという話がありましたが、これは起きていません。ですから環境省の有明海・八代海総合評価委員会の報告書の、これは 2006 年のデータです。1965 年、これは有明海にどれだけの窒素とリンが入ってきたかというその報告書にある図です。1965 年と 2000 年、殆ど変化していません。ですから有明海に入ってくる栄養塩は増えていないのです。増えていないのに何故赤潮がこんなに起きるようになったかという事です。これは 1 つ非常に謎だという所をまずベースに置かないといけないのです。これは増えていないというのはこの前の委員会、農林水産省の第三者委員会というのがありましたが、そこでの報告書にも書いてある所です。増えていないのです。増えていないのに何故赤潮が起きるのかと非常に不思議な事が起きているという事が 1 つ。これがバルト海ですけれど、バルト海の場合は窒素で約 8 倍に増えているのです。こういうふうに栄養塩の所でドンと上がっているのです。同じ観測点でリンも同じ、大体 4 倍位あります。こういう事は有明海では一切起きていないという事です。それからその次に貧酸素水、これは諫早湾と有明海で独立して起きるという話がありましたけれども、確かに起きている場所はある程度離れているのです。ですけれども、これは全く独立した現象かという事です。私はリンクしていると思います。ですから、そこをあまりにも独立して起きる。起きると言うと何かバラバラに起きているようなイメージがあるのですが、私は 1 つの現象のただ現れた所、きつく現れている所が諫早湾の縁辺域であり有明海の縁辺域であるというふうに捉えて良いのではないかと思うのです。その理由を少し説明しますと、2006 年の 8 月 5 日一番今迄歴代で貧酸素が一番きつかった時です。その時に私等が丁度 22 地点で、奥部で分布調査をやっておりました。この時に水深を取ります横軸で、縦軸に底層水の酸素濃度を取ります。そうすると見事に深さに比例するのです。という事は、この前の佐賀でシンポジウムがあった時に速水先生、佐賀大の結果でも言われていましたけれども、要するに塩分躍層の下で貧酸素が起きます、水深でも良いのですけれども。そうすると、岸の方に行けば水のボリュームは小さくなる訳ですから酸素の存在する絶対度が少なくなります。そこで海底で酸素消費をすれば当然浅い所程低く低くなる。という事は干潟縁辺部の水深が干潮時に 1m とか 2mとかかなり低い少ない所、そういう所ではなくて実際にはもうちょっと沖合の水深の 10m とか 15mの所でもどんどん酸素消費が起きているのではないかと、それが有明海の奥部、諫早湾広く実は酸素消費が起きる様になっていて、そしてたまたま水のボリュームが小さい所程演舞塩分成分がきつくなっ

て、そこで酸素濃度の利用の変化というのが強調されて出てくる。そしてさもそこだけで起きている様に、何か発生源がそこかの様に思っているのではないか。

これは、2006 年の時の D ラインといいます。これが諫早湾の一番奥から対岸の荒尾迄の酸素濃度を表しています。こちらが塩分の分布を表しております。2 つ酸素消費がありますね。1 つはいであ㈱が言われた様に、あれは私のデータを使われたのでやっと日の目を見たかと思っているのですけれども、中層での貧酸素、今迄は貧酸素水というのは海底で起きると海底からの酸素消費で起きると思っていたのです。有明海の場合は非常にきつい塩分成層が起きます。その直下位の所で。こういうふうに中層で貧酸素が起きるという事です。そうすると干潟の縁辺部というのは中層での貧酸素、これは上から植物プランクトンが降ってくる訳です、そのゴミが降って来たものがここで分解される。その効果と海底からの、海底で元々溜まっていた有機物が分解して酸素消費する場所が重なった場所が、実は干潟縁辺部になります。ですからそこに倍に強調されて、さもそこで凄く貧酸素消費が起きている様に見えているのではないか。強調したいのは、実は有明海での酸素消費の特徴として非常に筑後川から水が大量に入ってくるので塩分成層が厳しく起きてその直下で実は起きる。2006 年 8 月 5 日、非常に特異な事が起きています。これは珪藻類です。珪藻類が増えた場合、これも珪藻赤潮という赤くないですが赤潮というのです。珪藻赤潮と呼んでいますけれども、これが 2006 年 8 月 5 日どういう事になったかというと実はこの時の写真がこれなのですが、この様になっています。これはちょっと 2001 年の写真なのですが、2001 年も同じ事が起きました。ちょっとミスで私の研究室で写真のデータが飛んでしまいましたのでちょっと 2001 年の方をお見せしますけれども、この植物プランクトンが死んで固まっているのです。無数の粒状有機物を発生させています。これを顕微鏡で見ますとこういうふうになります。泥の粒子と壊れかけの植物プランクトンがあちこちに見えます。ですから、こういうものが降って来て塩分と次の点の塩分が大きくかわりますからここに溜まってしまうのです。ですから中層で非常に強い貧酸素が起きてもう殆どゼロになっていますその時は。こういうふうに中層でドンと落ちてしまうという現象がありますので、有明海に於ける貧酸素の特徴の 1 つとして実は水の中で酸素消費が物凄く起きる、そこをもっと我々は強調して見るべきではないかという事です。ここにこういうふうに溜まるのです。これを綺麗に取りたいなと思って、ここにゴミが一杯溜まっている所のデータを取りたいなと思っているのですが、中々現象が起きないのでちょっとデータが取れないでいますけれども、ここに大量に浮遊物が発生する。そこで酸素消費が実際起きているという事です。これがその一部、ちょっと見えたのが 2008 年ですけれども、やはりここもこういうふうに塩分成層のところに急にポッと落ちます。海底よりも酸素濃度が下がります。それを絵で見ますと、ちょっと見難いですが酸素濃度の、この絵ではここです、水温、塩分、プランクトン量それからここの酸素濃度。この黒の所で 1.83 で一番低い濃度になっています。こういう酸素消費が実は起きていて、これが水深大体 5m 位の所。ですから塩分成層の直ぐ直下の所ですので、そこと干潟縁辺が重なってしまうわけです。ですから、干潟縁辺部で物

凄く酸素消費が起きているように実は見えてしまうのではないかというのが 1 つの仮説です。

最後なのですけれども、結局何故こんな事になっているのかという事なのですけれども、1 つは『海底からの酸素消費』。これは非常に常識的な見方です。もう 1 つは中層で酸素消費が起きる。中層で酸素消費が起きる為には、まず珪藻赤潮が起きなければいけない。非常に規模の大きな珪藻赤潮が起きるという事です。それが梅雨期にも起きますし秋雨期にも起きますけれども、酸素消費は水温が高くないと起きませんので梅雨期は無理であろう。梅雨期でもやはり 1990 年代後半から赤潮が起きるようになってきているという事です、有明海では。その赤潮はではどういう所で起きているのかというと、塩分成層が発達しているところに起きているのです、現実に。だからこの塩分成層が発達すれば、大きな赤潮が起きて結果的には貧酸素が色々な形で起きて来るという事です。では何でこの塩分成層が発達するか、発達を以前よりしているのかしていないのかこれが未だ分からない所です。というのは、我々が今やっている観測の精度では、私等は 2001 年からやっていますけれどもその以前のデータはこういう我々の精度では調査されていないという事です。だから直接的に比較する事は出来ない。浅海定線調査は 1970 年代からありますけれども、これは大潮の時のデータで小潮の時のデータではないので中々比較が出来ないという事です。だから塩分成層が以前よりも発達しているのかしていないのかここが 1 つ大きなポイントになるという事です。ここは我々は関与していく必要があるのではないだろうか。それから諫早湾の締め切りというのが 1997 年に起きていますので、この締め切った事で有明海の塩分成層を強める事が起きていないのかという事です。論理的には起きていると可能性としては説明出来ると思うのです。あそこに干潟を無くしている訳ですから、それから淡水をそのままボンと出して来る訳ですから。ですから、諫早湾の潮受け堤防が一度塩分成層を強化していたらこういう事が全て起きてくるというふうな事が 1 つ考えられる。それからもう 1 つ根本的に考えないといけないのは、有明海に対しては栄養塩負荷量は増えていないという事です、長期的に。ですからそれから考えるともっと別の理由を考えないとこの現象は解けない。今迄世界でこんな例は無いのです。ですから、その世界で無い例として 1 つやはり考えられるのは、潮受け堤防というのが非常に私は関係しているのではないかなというふうに今思っているのですが、ここから先は中々未だ時間が掛かります。開門調査とかをしてくれるとこの辺りがハッキリ出来るのではないかというふうに今思っている所であります。以上です。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】

どうも有難うございました。それでは大嶋先生すみませんが短時間でお願い致します。

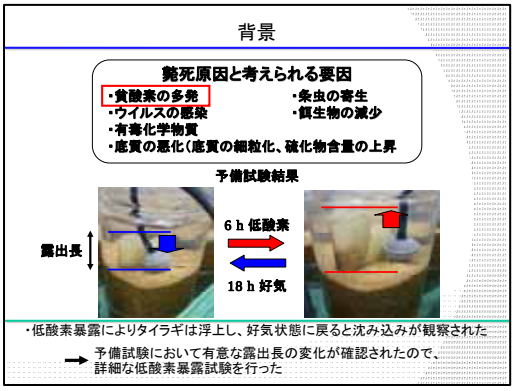
【 九州大学農学研究院　生物科学部門准教授　大嶋 雄治 】

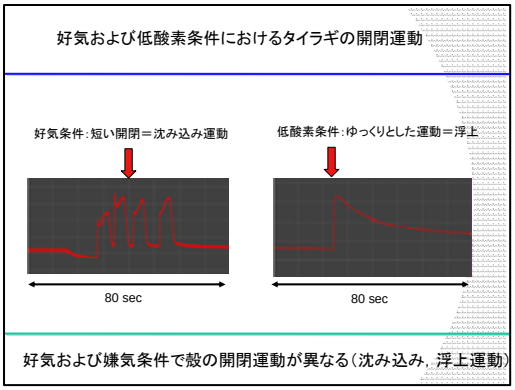
九大の大嶋と言います。今迄皆さんからお話がありましたのとは違いまして、全然逆の

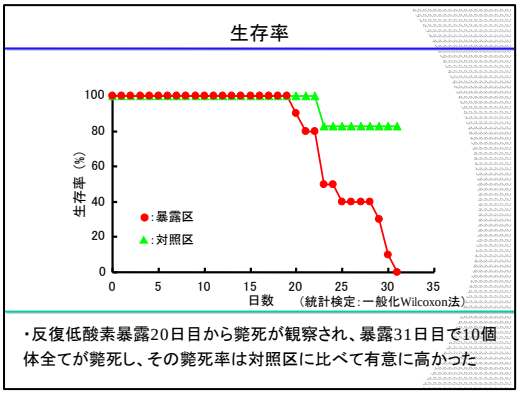
方から私のお話をさせて頂きます。

タイラギが何故死ぬのかという所をお話をちょっとだけ実験で証明しましたのでお話をします。いかに有明海の生物を我々が全然分かっていないかという事なのです。タイラギが貧酸素で死ぬだろうと言われていましても、では何故どうして死ぬのかというのが実は殆ど何の証明も無かったという事です。簡単に 5 分くらい証明の話をします。

これはよくご存知だと思いますけれども、タイラギの資源が減っていまして立枯れというのはこういうふうに立ち上がって死ぬという現象が現れていましたのでこれが一体どうしてなのかという事を我々はやっています。実験的にこういうふうな水槽の中にタイラギを入れて貧酸素を暴露すると、要はタイラギもやはり苦しくなって上に上がってくるのです。そして好気状態に出る。こっちが貧酸素にしてしまうと窒素を引っ込んで酸素を抜くのです。そうするとタイラギがこういうふうに上に上がってきて、そして好気状態に戻すとまた沈むという事を繰り返すという事が分かってきました。時間が無いのであまり詳しくお話しませんが、貝の開き方を調べるセンサーを詰めまして調べると、沈み込む時、低酸素にする時ですがこれは大きく口をパカッと開けてゆっくり閉めるのです。そうすると、ゆっくり貝が浮上をしていきます。逆に好気状態になると割と激しい運動をします。つまりこれは多分下に水を吹き込んで潜る運動なのですね。タイラギは、実は貧酸素、低酸素という言葉をここで使っていますが、そういうふうにするとこういうふうな反応をしながら生きているという事なのです。これを何回も繰返すとやはり段々弱ってきて、限界となって死んでしまう。現場がどれだけ貧酸素になるかは分かりませんが、我々は 1 日に 6 時間の曝露をして繰返すとこういうふうに段々立ち上がってきて、これは同じタイラギですがとうとう終いには倒れるものも実験的には出ているという事で、それと段々これはちょっとかなり長いのですけれども沈み込めなくなる。最初は貧酸素に成ると上に上がってその後好気状態になって下がる、潜ってしまうという事をするのですが、2 日目、3 日目段々繰返してくるとタイラギも疲れてくるのだろうと思うのですけれども、きつくなって上に







上がったままになるのです。そして最後には、これは生残率なのですが、そういうふうに貧酸素で 1 日 6 時間暴露していると、段々段々疲れてきて 2 日くらいで死んでしまうという事で、所謂立枯れで死んでしまうという事が証明出来たかなという事なのです。これはタイラギだけの話ですけれども、他の貝もこういうふうに貧酸素で死ぬという事です。私は貧酸素だけしかやっていませんが、貧酸素だけではなくて硫化水素の話もある。それと日本ではあまり問題になっていませんが、アメリカにこの間行ったら凄くアンモニアの影響を気にしています。ですが日本ではアンモニアの毒性を殆ど気にしていないのです。これは何故か私にも分かりませんが、アンモニアの毒性、確かにアンモニアは出ていますのでちょっと調べないといけないと思っていますが、そういう事で暴露な議論の方とは逆で、こういうふうな小さな生物がいかにして死ぬかという事自体の治験、知識というもの自体も我々非常に欠けているという事で、私のコメントを終わらせて頂きます。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】

それでは、基調報告それからお二人の先生方にお話を頂いたのですが、多分沢山のご質問があるかと思います。ただ、質問に答えていると時間が無くなるのでここからはちょっとポンポン切り込んでいって、その中で質問的な所も受け付けたいというふうに考えています。

では、ちょっと現状の分析として、色々な事が分かってきたというのは全体的に非常に分かるのですが、まず最初に、大乗段に振りかぶって『では有明海は何故こうなったのか』という所から先程堤先生から非常に刺激的な提案というか、堤案を提示して頂きました。堤先生のお話だと、栄養塩が増えるとどんどんスパイラル的に悪くなってそして環境が悪化する。ところがバルト海と有明海は違うのだ、栄養塩は必ずしも増えていない、では何故赤潮が起こるのかという事で、そうなるとやはり諫早干拓とかそういったものがやはり影響しているのではないかというようなお話でした。その延長で、「今諫早湾とそれから有明海の奥の西部の方で一見独立して貧酸素が起きているようだけれども、あれが一緒じゃないか同時に起きているのではないか本当は」というようなお話でした。では何故有明海はこうなったのかという所から、非常に私が当てられたら困るなという気もするのですが、それぞれの先生方の意見をお聞きしたいと思います。では、松岡先生から。

【 長崎大学環東シナ海海洋環境資源研究センター教授　松岡敷充 】

先程、堤先生のお話の中でこの 2～30 年間の間、河川からの栄養塩の増加はないと言うお話でした。しかし現実問題として有明海では、最近になってシャトネラ赤潮だとか、或いは周期に渦鞭毛藻、赤潮サングイネアとかそういったものの赤潮が増えている。結局赤潮が増えるという事は食物連鎖の、私が申し上げた様にやはり栄養塩というのが、食物プランクトンが使うから赤潮が起こる。ではその栄養塩がどこから来たのか、河川から来ていないとすればその栄養塩はどこから来たのかという事が不思議というか現在よく理解さ

れていない現象だというふうに堤先生はおっしゃったと私は理解しております。そうではないでしょうか？

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】

ちょっとそこをご理解頂く為には、1960 年代にも現在も河川から殆ど同じ量の栄養塩が来ているのです。それで昔は赤潮が起きていなかったのに今は起きる。赤潮が起きる為には絶対に、常識的に富栄養化状態の水が要るのです。これが無ければ絶対に赤潮は起きない。という事は、どうしたら良いかというと非常にパラドックスになるような話なのですが、要するに陸上から殆ど栄養塩が入ってきます。その栄養塩を海水で薄めなければ良いのです。有明海の海水で薄めたら薄まりますから植物赤潮は起きない。だけど、川からの水は普通の海域の 20 倍位あるのです､栄養塩が筑後川から入ってくるのは大体 DIN で 100 マイクロの単位を超えていますから普通の 20 倍くらいある。それを出来るだけ薄めないでじっと表層に置いていたら、そこに陽が当って赤潮が起きるという事しか後は説明しようが無いではないか、という事は、塩分成層が昔より発達していて混ざらなければ川から有明海に入った水が、そのまま河川水が出来るだけ混ざらないような状態が起きればこれは可能だというふうに思っています。そういう事です。

【 長崎大学環東シナ海海洋環境資源研究センター教授　松岡敷充 】

ちょっと私は違う考え方があって、例えば最近になって起こっているシャトネラの赤潮とか或いは赤潮サングイネアとかは、やはり降雨の後に起こる訳です。梅雨時の河川からの、雨が降ってから河川からの降水量等が増えて、そしてこういう日照りが続いたりしますとやはりそこに植物プランクトンが大量化して赤潮が起こるというのは、これは時系列で解析していけば理解できる事です。そうすると、降雨時にその栄養塩はやはりどこから来たかというと淡水から来ているというふうに考えないといけない。

ですから、やはりトータルとして増えていないという事とそれから増えていないというデータなのですけれども、しかしやはり河川から栄養塩というものは、私は供給されてきているのだというふうに理解しないと、ちょっと今の話というのは論理的に説明出来ないのではないかなというふうに思います。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】

今のお話は、お二人とも決して矛盾している訳ではないのです。堤先生が言われているのは、栄養塩は変わらないけれども川から供給された後の状態が全然違う。今は成層が強くなっていて川から供給された河川水が表層に浮いていて、そこに太陽光が当ってプランクトンが発生しやすい状況が以前と違っているのではないか。それが色々な治験の解明等によって成層が強化されて、その成層の強化というのが、栄養塩の量は変わらないのだけれども赤潮の発生に寄与しているのではないかという事です。木元さんどうでしょうか？

【（独）水産総合研究センター　西海区水産研究所　海場環境研究科長　木元克則 】
　適当なお答えできるような治験を私自身持ってはいないのですが、この数年の中でこの現象が急に変わっているわけではないので、貧酸素の発生に関してはその年々の気象に必ず影響を受けていると思います。過去との関係では貧酸素の発生については中々やはり比較検証出来るデータが無いのでその辺は残念ながら分からないという事だと思います。あと何れの状況に関しましても私全然勉強出来ておりませんので、後はお答えできない事ですが、やはり社会資本整備で海岸の形、干潟の状況というのは間違いなく変わっているのはあると思います。ですから、諫早干拓という事ではついつい注目はされますけれども、やはり有明海全体として津々浦々、形を変えて来てしまっているという事はやはり無視出来ないのではないだろうか。自然海岸は全くありませんので、有明海は。そういう所は着目して全体として考えていく必要があるのではないかなと思います。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
　木元さんのご発表の中に、貧酸素水塊の発生が諫早湾と有明海奥部の西部の方で一応独立して発生する。それは実は私も堤案にある程度賛成で、諫早湾の締め切りによって諫早湾の影響が北部に行きやすくなっている、潮の流れが行き易くなっているというのが実はありましたね。それもあるものだから、確かに現象的には独立して発生しているように見えるけれどもその前の条件整備の所で諫早湾の影響が奥部に相当影響しているのではないか。その条件整備の所で諫早湾にコントリビューションしていて、たまたまあるしきい値を超えて貧酸素水塊が発生した時にインディペンデントに発生しているだけなのではないかとこれは私も考えているのですけれどもその辺はいかがですか。

【（独）水産総合研究センター　西海区水産研究所　海場環境研究科長　木元克則 】
　それに対しては、かなり詳細な流動の観測データが必要だと思います。例えば、諫早湾の奥の水が貧酸素水が諫早湾の湾口の中層に出て行きますけれども、中層の水が湾奥に入って行く訳ではありませんし、それぞれ貧酸素の発生の仕方というのは別々ですけれども同じ原因、同じような仕組みで起きている。ですから、同時的に起きる。諫早湾でも鹿島でも同時的に起きるのは同じような貧酸素が起きるような色々な物理的な状況または生物的な状況同じだから同時に起きるという事では間違いないと思います。諫早湾の水そのものとか流動が湾奥に影響しているというのは、ちょっと私自身の観測データ、私自身の勉強では未だ解けていませんので、正にそこはモデルによる色々な検証を頂くのが適切かなと思います。ですから、その為に例えばもう少し細かい観測も必要なのかどうか。沖合での観測については、最大で 22 点の膨大な観測をしましたけれども現状ではそこまでの点数はやはり維持できない。効率というか今まで農水省を含めましても 15、16 点位に減らしています。それで解けるのか解けないのか、又そういうモデルの検証の中からもご提示頂い

て色々な今仮説がございますけれども、それを解決する為にどういう様な事をすべきなのかというものも必要だと思います。今の段階ではそこまでの精度までの話しまでは至っていないのではないか。観測データからでは見えないと思います。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
有り難うございました。大嶋先生、有明海は何故こうなったのかという事に対して何か。

【 九州大学農学研究院　生物科学部門准教授　大嶋 雄治 】
私は、生物が専門で、具体的なデータを持っている訳ではないのですけれども、やはり貝類が凄く減ったというのは、いであさんの資料にも出ていましたし、アゲマキが殆ど出ないようになっていますしアサリの漁獲量もタイラギも出てないのです。この生物のろ過量は単純計算しただけでアサリだけでいくらとか。これはやはり無視出来ない影響だと思うのです。いであさんのシミュレーションにも出ていましたが、かなり規模が大きいしという事で、色々な流れの問題もありますが、私はやはり生態系、系ですので幾つかの影響が重なってきている。その中でも大きいのが流れの問題とそういうスパイラルで減ってしまったという所が一番だろう。そういう所が偶然重なったのかどうか分かりませんが、悪いのに悪いのが重なって一気に生態系が壊れてしまったのではないかと私は思って居ります。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
では荒牧先生。

【 有明海再生機構副理事長　荒牧軍治 】
逆に堤先生に聞きたいのだけれども、諫早湾の所は諫早湾を締め切らなかったら赤潮も少なかったし貧酸素も起こっていなかったというのは正しいですか。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】
ですから、今私が言ったのも特に塩分成層等は検証する術を現在持っていませんので、だからこれは結果的に今までの結果から類推するとそうだという事なのですけれども、そういわれる事に関してはそうだと思います。

【 有明海再生機構副理事長　荒牧軍治 】
我々の環境省の小委員会で実は一番揉めたネタの 1 つです。即ちある論文の中に、諫早湾で発生した貧酸素が有明海全域に広がったという論文が出たのです。その事を我々の省委員会は NO と言ったのです。それはどういう事かと言うと、諫早湾で起こっていなかった貧酸素が締め切り以降起こるようになったという事は良い。しかし、湾奥部は湾奥部で

その前から 1970 年代位から湾奥干拓を行なって以降、既に貧酸素は起こっていた。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】
　極僅かなのです。

【 有明海再生機構副理事長　荒牧軍治 】
　だけれど、今 2 つ貧酸素が出ているといって 1 つは大規模出水の場合と、それから小潮期の塩水の潜り込みみたいな所で貧酸素が起こって起こる。その事については、先生がいわれた様に大潮のものしか浅海定線が採られていないのでその部分についてはちゃんとしたデータが無いのは事実だけれども、それは十分に貧酸素が起こっていたはずだ、計算して見ると大体その様な事が起こる。だからテーマは諫干を締め切った為に湾奥部はより貧酸素しやすくなったかという設問はあり得るけれども、諫早湾を締め切ったから湾奥部も貧酸素しやすくなったという事ではない。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】
　私も貧酸素水が諫早湾から広がるとは思っていません。そこからそれが広がっていくなんて思っていません。唯、諫早湾と有明の奥部で貧酸素が非常に確か 2 つ別の場所で起きています。これは部分的にはちょっと繋がっているかも知れませんけれども、見かけ上は確かにそういう所で 2 つそれぞれ起きているというふうに思います。ところが水の構造を見ていくと、その時水の構造を見ていくと結果的には塩分成層を起こしているという事では全部繋がっているのです。

【 有明海再生機構副理事長　荒牧軍治 】
　そういう事を言いたい訳ではなくて、結局諫早湾とそれから湾奥部が別々に起こるという事について、NO だと言う必要は無いと私は思います。だから湾奥部は元々、松岡先生達が長崎大学が成果として出された様に、締め切った干拓をした影響が大きくて非常に流れの速度がパターンが変わって遅れてそれと同時に富栄養化と言うのは実は必ずしも 1970 年以降ではなくてその前から比べると相当富栄養化している可能性もある。即ち 1930 年代とか 40 年代から見ると、例えば沢山言われる事の 1 つに物凄く大規模なし尿廃棄をやったとか色々な事を言われる訳です。だから 1930 年代、40 年代、50 年代、70 年代というのはもう 1 つランクが違うかもしれない。だからそこは言わない、データが無いから。だから、今言われたのは、その事はそこ等以降は増えていないのは正しいのだけれども 2 つ別々に起こっていたのではないか、起こるのではないかと言う事について NO という必要は無いのではないかという事です。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】

2 つ別々に起こると言いますと、何か全く 2 つの原因で起こるような印象を与えてしまうのですけれども。

【 有明海再生機構副理事長　荒牧軍治 】
現象は 1 つの事象だからそれは起こらない。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】
現象は 1 つで強調され、現実に酸素がグッと無くなる所が 2 つあるというそういう事ではないかという事です。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
いであさん、色々今迄色々やられてきて有明海は何故こうなったのかという事に関連して、今迄ちょっと触れたのかと思うのですけれども、大上段に振りかぶってこれが原因だと言うのは説明は無かった様な気がするのですがその点はいかがだったでしょうか。これも答えにくいかもしれませんが。

【 いであ㈱国土環境研究所　水環境解析グループ　主査研究員　竹内一浩 】
私は、先程色々な要因でモデルの中での話であくまでも感度解析と言う形で検討は我々の方でさせて頂いているのですけれども、先程やはり大嶋先生がおっしゃった様に地形やその他の要因で流れが変わるという効果と、やはり生態系の中で重要な役割を担う二枚貝の影響というものが大きいという事は殆どそうではないかというふうには思います。ただ、それがどちらがどの程度地域的にどちらがどの程度、この場所ではこれが効くという所まではもう少しモデルの精度と色々な検討を進めていかないとちょっと判断がつかないのかなという感触ではあると思います。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
有り難うございました。それでは、ちょっとこのテーマについて会場から御意見等ございましたらこのテーマに限らせていただきます。『何故有明海に貧酸素が増えたのか』と言う事。

【 会場　】
堤先生が言われた、栄養塩が殆ど変わっていないと言うのを聞いてやはりかと思いまして、1960 年、70 年代と言うのは有明海に潮干狩りに行ったら物凄い貝が沢山獲れていた。それに比べたら今は何百分の一じゃないかなというふうに感じるのです。やはり栄養塩は貝が昔は浄化していたのだなと、だから貝がやはり生息できる環境というのをやはり一番考えたら良いという事で、先生方が言われましたのでそうだなという感じを抱いておりま

す。有明海で生活して来た者の一人として実感としてそう思います。

【 会場　】

佐賀市に住んでおります樋渡と言いますが、私は先程荒牧先生が言われた様にもっと以前はどうだったのかと、栄養塩の量が、それが例えば農業で化学肥料が使われだしたのは 1940 年代からです。それ以前と比べたら農地に使われる窒素、リン、カリウムこれは 10 倍位増えています。既に 1960 年代、昭和 40 年代までがピークで今は逆に農薬使用は下がっているのです。そういった事からして 1977 年以降の有明海の漁場は増えていないのは当然だと思っています。もう 1 つが我々のし尿がかつて農地に振り撒かれていましたけれども今は終末処理場に行っています。それが河川を通じて流入しているのか、終末処理場から直接流入しているのか、この辺で捉え方の量が違っているのではないかなと思って居ります。

【 会場　】

大川から参りました古賀と申しますが、近年私は早津江橋下をホームグランドとして魚釣りをやっておりますけれども、ここ 30 年子供の頃には釣れていなかった魚、グチが 30 年位から早津江川近郊で釣れます。ここ 10 年位前から赤い座布団のようなものが物凄く釣れる訳です。何日か前は、私はナマズに 8 本の髭があったからビックリしたのですが、何だろうかと思って図鑑を調べてみたら思い当たるのは外海にいるゴンルイあれだと思いました。それと 60 センチ位のチヌ等も来ますしアナゴ辺りも今川で釣れていますから、その辺の魚の生態系が何故その様に変わっているのかというのを、その辺を先生達に調べて欲しいと思いますので宜しくお願いします。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】

今のご要望という事で、それで今幾つかご質問等があったのですが、もっと以前の栄養塩の流入量が少なかったのではないかというお話に対して、先程、堤先生がバルト海の例を挙げられたのですが、結局栄養塩が変化してそれが海域に結果としてリアクションが出てくるのにどれだけの待機スケール、時間スケールが必要なのか。例えば 1940 年代以前とそれ以降でグッと増えていたらそれが大体どれ位の時間遅れて有明海等に出てきそうなのか。バルト海の例にちょっと照らし合わせていったらどんなでしょうか。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】

感覚的なものですけれども、赤潮と言うのはその瞬間に起きるのです。ですから赤潮が発生する為には、数日あればドンと増えていく訳ですから、ですからそういう富栄養化した水が出来ればもう直ぐにでも出てくると思うのです。只、貧酸素というと海水の有機物は、まず海底から酸素消費を上げようと思うと一杯有機物を溜めないといけないですから、

それは数年とか、5 年とか、10 年とかのレベルで変わると思うのですけれども、赤潮では敏感に反応すると思うのです。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
　赤潮が敏感に反応するという事は、堤先生が良く言われている、1990 年代に赤潮がブクブク上がっていますよね、赤潮の発生量というか。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】
　私が解析したものが、水産庁の九州漁業調整事務所に九州海域の赤潮と言うデータベースがありますのでそれを見る限りは 10 月から 12 月の秋に発生する赤潮に関しては 1998 年から急に規模が大きくなっています。それから梅雨の時期、6 月から 8 月に起きる赤潮に関しては 1990 年以降くらいから大きな赤潮になっていて、いずれにしても 1980 年代までは殆ど大きな赤潮は起きていません。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
　今のご回答が 1940 年代とかその頃に比べて段々やはり栄養塩の流入量が増えてきたのではないかというのに対して、それが即赤潮の発生とか貧酸素水塊の発生にはダイレクトには結びつかないのではないかとそういうお話だったと思います。松岡先生何か。

【 長崎大学環東シナ海海洋環境資源研究センター教授　松岡敷充 】
　先程、栄養塩が増加した時にどういう速度と言うかレスポンスで赤潮が起こるのかと言う例を中国の長江河口域の例を考えると良いと思います。あそこでは、長江流域で非常に農業生産が上がって窒素が増えた。殆ど同時と言って良い位に長江河口域で赤潮が、珪藻の赤潮ですけれども増えています。それから、ちょっと関連して発言させて頂きたいのですけれども、赤潮というのは植物プランクトンが増えてそして海水の色が着色するという現象であって、それとは別に植物プランクトンが増えて赤潮にならなくても植物プランクトンが増えているというそういう栄養の使われ方はあると思います。だから、赤潮だけに注目するのではなくてその栄養塩がどういうタイプの植物プランクトンに使われているのかという事を考えておく事も必要だと思います。そこでもう 1 つ申し上げたいのは、例えば最近になって鞭毛層の赤潮、或いはシャトネラも増えているというのは栄養塩そのもののコンポジションが変わっているというそういう観点からの調査というか研究も必要だろう。私がちょっと思っておりますのは、少し紹介しましたけれどもやはり貧酸素水塊が出来て貧酸素水塊によって底質から栄養塩が溶出してくるという事が事実としてある訳で、その場合にやはりリンが選択的に溶出してくるというような事実がある。これは、やはり貧酸素水塊が最近になって非常に強化されているという事によってその有明海の中の栄養塩のコンポジションが変わっているというような見方も十分に考えておく必要があるのか

なというふうに思います。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】

どうも有難うございました。限られた時間ですので、このテーマだけに限るわけにはいかないのですが、どうもまだまだエンドレスにやろうと思えば続くのですけれども、今までの結論から言うと、やはり何らかの原因で負のスパイラルに陥ってそして赤潮の発生から懸濁物が沈降して途中での酸素消費、それから底泥での酸素消費、それが貧酸素水塊の発生に繋がる、それが生態系に影響を与えて環境の悪化を招いている。では何らかの原因というのは何かというのは、やはり今までのいであさんのお話等も聞いていると地形の改変。諫干だけではなくてそれまでの有明海奥部の干拓等も含めて地形の改変が大きかったのかなと、諫干もやはり大きな影響を与えていて今貧酸素水塊が独立して 2 箇所で出ていると一見見えるのですが、それがどうも結構関連があるのではないかなというような意見も出たという事でこのテーマはこの位でちょっと閉じたいと思います。

次なのですが、こういう仮説を前提に色々議論する時にやはりシミュレーションというのは非常に大きな役割を果たしているという事なのです。では現在のシミュレーションモデルというのは現況をきちんと再現出来ているのかどうなのか、その辺について少し議論をしたいと思います。この辺については、パネリストの先生方は必ずしもそれ程お得意ではないですよね。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】

私も数学は好きな方ではないのでそういう自分でやろうとは思いませんけれども、色々お話を聞いていて思ったのはあまり信用していませんでした。それは我々が 100%有明海の生態系を理解していないので違う前提条件が入ってくると全く話しが変わってくると、そういう違う事が我々が理解していない事が実は起きていたのではないかという事を最初から疑っていましたので、それを前提にしていないシミュレーションは信用できないなと。今日、いであさんのシミュレーションはかなり私のイメージに近づいたなというふうに思うのです。1 つは、水中での酸素消費というのを非常に取り上げて頂いてそこの重要さというのを訴えられた。今までは貧酸素というのは海底から酸素消費するという、それも当然あるのですけれども、もう 1 つ実はプラスアルファで有明海は非常に成層は塩分成層がきついので一番奥に筑後川が大きな河川がありますので、その特徴というのが実は大きく影響しているのではないかと、そういう面でシミュレーションが自然を理解して精度を上げてきたのではないかなとそういう気がしているのですけれども。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】

底泥だけではなくて、途中の水中の酸素消費が非常に大きいのではないかという事は木元さんも言われていましたよね。何かコメントありますかその辺に関連しても良いですし

一般的でも良いですが。
　私も、随分シミュレーションが良くなって来たなという気がするのですが、シミュレーションに対して厳しい注文をすると言うとシミュレーションがどんどんどんどん良くなっていくという事で厳しい注文をすると言うのは非常に良いことだと思うのです。幾つか言わせて頂きたいのですけれども、例えばキャリブレーションで堤先生のデータと比較していましたね。あれはどこまでがフィッテイングで係数をいじくって、一体どこまでが合った合わないという話が良く分からなかったのですけれども、それが 1 点。それから 2 点目は、有明海の正に本体の所で奥部ですけれども本体の所で検証をやっている。所が今は諫干とかああいう非常に局部の変化が効いてくるのではないかという時に、あの局部についてはではどの程度までその有効性が保障されているのかという点は殆ど分かっていないという事。シミュレーションについてはその 2 点いかがでしょう。

【 いであ㈱国土環境研究所　水環境解析グループ　主査研究員　竹内一浩 】
　堤先生のデータをお貸し頂いて検証を進める事が出来たのでこの場を借りてお礼を申し上げたいのと、データの検証なのですけれども、実は当初堤先生のデータを頂く前に現況の再現の方のデータ計算というのはパラメーターというのはある程度確定させていました。その上で堤先生のデータを頂いて、同じ時期の計算結果を取り出してみたら「ああなるほど、貧酸素がある程度起きているな」というような実は作業上の手続きがございますけれども、そういった手続きがありましたので、本当にモデルの方でよく表現できたかなというような感触を作業した方から見ると思っています。当初は、浅海定線だったりとかそういった大きく公表されたデータで検証していったという事もありましてより細かな物理現象とかメカニズムを解明するという事で色々ご意見を頂きながらやっていく過程で表現が出来たかなと思っています。更に、諫早湾のお話なのですけれども、残念ながら私共の方でまだ諫早湾の方のデータの方での細かな検証というのは十分出来ていないというのは課題として持っていまして、それは今後更に進めさせて頂ければなというふうに思って居ります。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
　会場にもシミュレーションをやられている研究者の方、又シミュレーションに非常にお詳しい方もいらっしゃると思うので会場からご自由にご意見がありましたらお願いします。

【 会場　】
財団法人福岡県社会化健康事業部の中田と申します。私もシミュレーションを少しかじっておりまして、ダム湖のシミュレーションの時にやはり水温躍層の下にどうしても BO が高い層がある。この層をやはり表現する為には幾つかの前提を設けなければならないという事で、プランクトンが表層で発生致しましてもそのプランクトンが死滅或いは自然沈降

して、そして水温躍層の所で密度躍層を解いてそこに溜まる。そこでその有機物が分解していって BO が下がる。この機構をどうしても入れないと中々合わないという事がありまして、イメージとして何か海のマリンスノーでしょうか、海の中に上から何か降ってくるようなああいうイメージをどうしても入れないといけないという事で苦労した経験があるのですけれども、その辺ちょっとどんなふうに具体的に計算されていっているのかもし宜しかったらちょっとお聞かせ願いたいです。

【 いであ㈱ 国土環境研究所　水環境解析グループ　永尾 】
　生態系モデルを担当しております永尾と申します。生態系モデルのチューニングに当って先程の沈降、成層下に溜まるという現象なのですけれども、現在一次生産する過程をモデルとしましてそれがレプリカとなって徐々に沈降していくという過程をモデル化にしているのですけれども、成層海面下に集積されるという効果は未だ十分入れきれていないという所でそこには課題が残っているというふうに考えているのですけれども、今のモデルを見てもある程度は先程の水中での酸素消費と珪藻での酸素消費というのはかなりの精度で再現が出来ている。そこには物理過程を勿論流れ場の表現と言うのは確実に重要になってきまして流れ場があってこないとその輸送形態の表現と言うのが出来ないかなとチューニングの問題で感じた所でございました。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
　他にいかがでしょうか。

【 有明海再生機構副理事長　荒牧軍治 】
　実は今日のシンポジウムをやろうという時に、シミュレーションの結果を持っておられるのが JST、いであさんのモデルと、実はもう 1 つ環境省の先程ちょっと紹介しましたけれども受託研究、先程木元さん達がおやりになったのがセットになっていて即ち木元さん達がやって今日発表されたのがモニタリングという所で結果を出していて、それを実はもう 1 つ鹿島モデルという所で解析をされている。これはマスタープランを作る時に、私が座長になってそれに皆さん集まって貰ってどの程度今進行していますかという事を勉強会を開きました。その時に今一緒にやった仲間達ですけれども今回実はその成果をここで発表して頂こうと思っていたのです。ところがちょっと私達の事務的な手続きの間違いで、環境省は隠すつもりは無かったのにそれと木元さん達のデータとがちょっとごっちゃになっていて本当は解析が行なわれていてそれが公開されています。それを実は何日前か手に入れる事が出来て私達今見ているという状況なのです。その結果をちょっと紹介させて貰うと、少なくとも先程言った密度場の流れという事に関しては連続観測結果と殆ど変わらない、合致していると言って良いと思います。ですから、流れ場の解析はほぼシミュレーションで出来ているという事になると思います。ですからやはり諌早湾締め切りをやった

時に、どれ位の流速の影響範囲が広がるかという事はもう計算が可能になっているというふうに、それはいであさんの方も出来ていると思いますけれども佐賀大学のモデルもそこまでは出来ていると思います。

それから貧酸素、DO の濃度がどの程度上がるかという事もモニタリングポストでずっと測られていますけれども、その 7 点～10 点位の間のそのモニタリングポストの時刻的な変化が綺麗に合うという事にはいきませんけれども、大体ボーダーが変動していくパターンがよく捉まえられるようになって来ている。ちょっと堤先生が言われた濃度分布の事についてはデータが表現されていませんでしたので分かりませんけれども、少なくとも底層の所のデータが解析が可能になってきたというところまでは時刻暦的に追い駆けられるようになって来ているので、今回はちょっと残念ながら表現できませんでしたけれども何かの機会にこの次、第 4 回、5 回という形で進めていきますので、その時にそういうデータそれからいであさんとの比較色々なものが出来てくる時期にもうそろそろ来たかなというふうに思っています。ですからシミュレーションモデルがやっと所謂原因解明であるとかそれから再生策の検討に使えるような状況になっているのではないかと私は思います。今日は全部データを示さないというのはいかにも不謹慎だけれども、そういう事がありますのでそういう 3 つ今シミュレーションモデルがレベルとして走っていますけれども、佐賀大学のものもその残りのものも流れ場に関しては非常によく合致するようになって来て、そこに対して今度は溶存酸素の問題、水質の問題に尽いてもほぼ段々使えるようになって来ているのではないかと思います。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】

今の荒牧先生のお話に私実は賛成出来かねるのですけれども、こういう問題をあまり喋るのは良くないのですが、実は諫早湾の入り口の所で今非常に微妙な流れになって来ている訳です。大潮と小潮でかなり違う。本来であれば大潮小潮で潮流の速さは違ってもパターンは違わないはずなのですが、その辺がかなり変わってきていて、長崎大学の多田先生達の観測結果でもそういうような顕著な結果が明らかに出ている。その辺まで再現出来れば私は少なくとも潮流に関しては良いと思うのですけれども、多分それが出来ていないと思う。ですから、今荒牧先生が「もう流れに対しては大丈夫なのだ」というのは未だ行き過ぎではないかなという気がします。

【 有明海再生機構副理事長　荒牧軍治 】

僕が言いたいのは、モニタリングポストがあってそのモニタリングポストのデータを説明していると言っているだけです。例えば先生が言われるような非常に微少微地形の問題を議論する時には、そこの流れのポストをそこにセッティングしたものでないとそのデータとして検証しないと合わない訳です。だから今言っているのは木元さん達が出されたあのモニタリングポストの所のデータに尽いて、流れに尽いてはもう妥当だったよと言いた

い訳です。問題は先生が言われる様に、諫早湾の所周辺の微地形についての変化が有明海全体に非常に大きな影響を及ぼしているというものを考えるのであれば、農政局が測っているあのモニタリングポストのデータとチェックをしてそれに合うようなモデルでないとそれは確かに違わないと思いますけれど、それはそれに合ったモデルを形成し、今ある計算方法でやれば出来るのではないかとは思います。ちゃんとある程度チェックをしないといけないと思っています。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】

又特に、有明海で特に大事ですよね。そこが合っていない、他のモニタリングポストでやっているからもう大体良いのだよという印象は私感じましたのです。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】

1 つ質問は、シミュレーションする方に伺いたいのですが、干潟って開放形じゃないですか。ですから干潟の、諫早でも 2500ha の干潟を無くしてしまった訳ですけれども、その干潟があるのと無いので一体潮流にどんな影響を与えるのかという所をシミュレーションに十分寄与されているのかどうか、現状のモデルが。そこをちょっとお伺いしたいというのと、それからちょっと今潮流の話なのですけれども潮流とどうしても塩分成層というのがキーになってくるのですけれど、塩分成層で我々月に 1 回今は頑張って週に 1 回調査に行っていますけれども、せいぜいある時間帯面でしか調査出来ないのです。そういう連続データというのはどうしても要るのですけれども、それを取られているのは正確には木元さんだけなのです。そこに素晴らしいデータがあるのですが、ただ残念な事に海底だけなのです、底層だけなのです。成層というのを考えた時には、中と表層、上中下あれば言う事はないですがそういう三次元的な連続データというのを、是非この西部海域でやって頂けるとこの精度とか物凄く上がってくると思うのです。そこをお願い出来ないだろうかとちょっとその辺お伺いしたいのですけれども。

【（独）水産総合研究センター　西海区水産研究所　海場環境研究科長　木元克則 】

鉛直のデータにつきましては、沖神瀬の 1 点に尽いては 4 層の観測データを 6 年間ありますのでこれは鹿島の方でモデルで検証という形で使っています。あと ADCP の流速データに関しては 2 点の鉛直データがありますので、それを検証していますけれども鹿島さんからもご指摘頂いたのですけれども ADCP のデータが少なすぎるという事がご指摘頂いた点で、ですからそういうような予算に限りがある中でやれる所が限度がありまして、今年に関しましては残念ながら鉛直は 2 層で、鉛直 2 層を 6 点くらい取っておりますけれどもやはり中々先立つものがどうしても必要という事で出来ない。唯、堤先生がなさっておられるように、鉛直観測を今日も水産庁のデータをお見せしましたけれども、水産庁なり環境省なり観測に於きましてはとにかく事ある毎に鉛直データを取っておりますので、年間

通じてですから数百所そういう形を取っておりますのでそういう形で検証データに用いるとその辺が現実的かなと思って居ります。その際平面的な所も出来るだけ取る様にという形で配慮はしている所です。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
　他に会場からこのシミュレーションに尽いてご意見ありますでしょうか。

【 会場　】
　私柳川街作りをしています、実は今先程データとそういうふうなものの、何故貧酸素水域が発生するかというふうな課題で聞かせて頂きましたけれども、この有明海に尽いては長崎県から福岡県、佐賀県、熊本県、全ての地域に於いて生活廃水の水が流れて来ていると思います。その中で以前は私達昭和 30 何年位の時は内陸部の掘わり、これにつきましてはまず堀の中をさらえてそしてその汚泥を田んぼに上げてその水の結果が有明海に流れて以前は来ていたと思います。しかし、今現在はその汚泥も上げずにそのまま有明海に流れて来ているというふうな現状と思っております。それに加えて昔は石鹸を使って洗濯をしていたが、今現在は洗剤、これによってこれがそのまま有明海に流れている。それによって二枚貝類等のまずシジミとかこういうふうなものが少なくなってきた。又、田んぼにいた昔のタニシ今の現在の大きなタニシではなくて、それからドジョウ類こういうふうなものがまず消えてきた。それから、後からここの今話の中で海域的には西の方がまず水域が発生する、赤潮が発生するというふうな澱みの場所の様な感じがする訳です。筑後川に於いても、その水系の下にはあまりその赤潮が発生しない、海苔も良いものが取れる。しかし西の方は悪くなって色が付いたものの海苔が取れる。以前は諫早湾に於いては、これは時化る前にウミダケ等をよく獲りに行ってあった。そうするとウミタケを獲ると、ウミダケの腸が下から上がってくると船の中にボラが飛び込んで来ていた訳です、その餌を取りに来て。そういうふうな諫早湾の昔の生態系があったのです。そしてあそこは昔は二枚貝が育つようなウミダケの育つような場所だった。今でも、やはりそういうふうな場所の所をいかにして再生するかというような事を、水門の問題、開放の問題があっていると思っております。
　それから、今現在 1 つの転機と致しまして水門の出来る前に、まず筑後川大堰あれが出来た時にまず生態系が変わっている訳です。そしてそれによって、あそこが締め切られた事によってもう既に筑後大堰の所までタイが来るわけです、カレイとかあそこでタイが釣れる訳です、スズメダイ等、そういう様な生態系が変わって来ている。それとこの水を、今現在筑後川大堰からそのまま筑後川大堰に流れて来ているばかりではないのです。これが福岡の方へ導水路を通ってある程度の水量が福岡の上水道の方へ使われている訳です。それによってこの水量も全然変わって来ているというふうな関係がありますが、この事について皆さん方どういうふうな研究をされたのかちょっと教えて頂きたいと思っています。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
　ちょっとシミュレーションと関係ない話なのですが、大嶋先生。昔は石鹸を使っていたけれども今は洗剤だとか、堀割りの汚泥を上げていたけれども今はそのままだとかその辺が貝とか魚類に及ぼす影響についてはどうでしょうか。

【 九州大学農学研究院　生物科学部門准教授　大嶋 雄治 】
　私は化学物質が専門なのですけれども、確かに過去に色々な化学物質の使用量が高かったのは間違いないです。それと農薬そういう使用量がかなりあったと思いますが、それがどの様に影響を及ぼしたかというのは分からないのです。正直私にはてんで分かりません。でも、田んぼから除草剤色々なものが出てくるのは確かです。それで浄水の方は結構それで処理をしております。そういう状況はありますが、それが本当にどの位インパクトを与えたかというのは所謂非常に低い濃度で何百種類という数の汚水が今流れて来ますのでそれの影響をお調べするのは不可能だという所です。すみませんお答えにならないで。化学物質はそういうことです。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
　その他にも筑後大堰で生態系が変わったというのもあるのですが、その辺は非常に複雑なのでちょっと今日は置かせて頂きたいと思います。それで、もう後 10 分しかありませんので未だ幾つか議論をしなければ成らないテーマはあったのですが、最後にでは今の有明海の貧酸素水塊を防止するにはどういった事が考えられるかという事に尽いて皆さんにお答え頂きたいと思います。これに尽いてはパネラーの方も順番というのはちょっときついでしょうからご意見のある方に手を上げて頂いて。いかがでしょうか。

【 熊本県立大学 環境共生学部教授　堤 裕昭 】
　要するに塩分成層が発達しているのではないかという事です。そこが何によってそういう事が起きているのかという所が重要なポイントで我々もそれは研究をすべき事だというふうに思います。これがその塩分成層が発達する事によって赤潮がいっぱい起きて、栄養塩が大して入ってもいないのに赤潮が起きている。私の研究材料としてずっとやっているイメージ、勘としては諫早湾が締め切った事がかなりこれに効いているだろう。そうなると、あそこを開門調査を 1 回やってみるしかないかなと、唯やってみて数百億円お金が掛かるかもしれませんけれども、やってみて変わらなかったらすみませんというしかないのですけれども私はこれしかないかなというふうに思います。それでやってみて、どれ位あそこが有明海に影響を与えていたのかというのを今の技術で 1 回全部洗い直す。それでも解決しないのだったら、もう次の事を頭を切り替えて次の事を考えるという事を 1 回やってみる必要があるのではないかなというふうに私は思うのです。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
ちょっとその事に関連して、テーマの 1 つにシミュレーションは今後の再生法則、検討のツールと成り得るかというのがあるのですけれども、例えば開門について開門した場合に今の JST モデルでこうなるよこうなるよという事はどの程度言えそうなのでしょうか。

【 いであ㈱国土環境研究所　水環境解析グループ　主査研究員　竹内一浩 】
現状で、計算方式というのが 900m という制限を持ってそういった解像度の計算をしているという事で、排水門のスケールが何れか細かいという事なので多分そこをどう表現するかという事で、非常に誤差が起きてくるという事があるので今のままの JST モデルで非常に胸を張ってという言い方に成るのかも知れないのですけれども、精度を持ったもので表現出来るかというのはややクエスチョンマークだと思っております。
唯、モデルの枠組みとしては流れの方に関しては、精度の問題は先程小松先生にもご指摘あった様により検証を深めていくという事がありますが、それと同時に高精度化、高解像度化を進める事によって段々満足いくものに近づいていくのかなという感触は思って居ります。ただ現状の同じ JST のモデルの中で、ではモデルが出来たからこのモデルで条件を変えてやってみようというのはちょっと色々と制約があるのかなという感覚は持っております。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
どうも有難うございました。ではパネリストの先生方で再生策について何かお考えでしたらどうぞ。

【（独）水産総合研究センター　西海区水産研究所　海場環境研究科長　木元克則 】
私は、最初のお話の中にも負のスパイラルという事で少しご説明させて頂いたのですけれども、私共水産研究所で取り得るべき事という事で、やはり水産業を少しでも育成しながら制度設計の所を利用して再生出来ないかなという所に今取り組んでおりまして水産庁の GO 予算で当初活動しておりましたが本年度より環境省の請負業務としての事業がございまして、有明海に於ける色々な二枚貝、カキとかサルボウとかそういう二枚貝類がどれだけ環境に対する浄化力を持っているのかという事をきちんと評価した上で、昨年度の環境省の貧酸素発生シミュレーションモデル先程鹿島モデルという事で御紹介しましたけれども、その中でもサルボウの資源量が増加すればどの位の貧酸素を低減できる可能性があるかという事の計算も実はしております。漁業とかにも効きそうだという事がございましたので、そういう方向が見えましたのでサルボウも含めて、サルボウに尽いては佐賀県が色々な調査研究をなさっておりますけれども、私共は貧酸素にやや強いであろうつまり貧酸素水塊が押し寄せる海域ではなくてそのやや奥側に乾湿する場所にカキ礁を、JST モデ

ルでもカキについて検討をなさっておりますけれどもそこより精度良く進めたいという事で牡蛎礁の浄化力を評価した上でそれがどれだけ環境に対するインパクト、効果を出せるかという所を今取り組んでいます。物理的なものというのはやはりその諌早湾だけではなくて色々な環境改善、先程も申し上げたように海岸を全部いじくっております。だからそういう所も含めて考える事は 1 つの方法だと思います。生物的にやはり生態系として自然の力を壊してしまった訳ですから、それを色々な意味で結果として生物が全域的に貝がいない又干潟の中の条件も変わっていますのでそういう所を自然の治癒力を少しでも回復させるよう手伝った上で改善出来るものはどれだろうかという所を私共は今取り組んでいる所です。事業としては 3 年計画で特に牡蛎礁に着目した上で、牡蛎礁の生体系を利用した上でそこの浄化力を評価する。それが政策的にどの程度可能性があるかという所を佐賀大学とも協力頂いてモデルも含めて検討しています。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
　どうも有難うございました。松岡先生。

【 長崎大学環東シナ海海洋環境資源研究センター教授　松岡敷充 】
　基本的に、やはり流れが弱くなったという事が赤潮を起こし易くしているという事、或いは貧酸素を起こし易くしているという様な事であるとこういうふうに私は考えます。従ってそういう行なった条件、我々がやった条件を撤去するというのが一番検証というものを考える場合で重要な事だろうと思います。唯、そういうふうにサイエンティフィックには考える訳ですけれどもそれをそのまま実行して良いのかという事の前にやはり可能な限りのほかの手段というのでそういう事が出来るのかどうか。つまり、私はやはりシミュレーションというものに本当に期待するという所が大きいという所があります。そのシミュレーションがどの程度の精度があるのかという事に尽いては、まだまだ議論がある所だと思いますし、私も例えば今のシミュレーションのモデルの中ででは明日赤潮が起きるのかという事をちゃんと再現できるのかというような所、或いはどういう所に貧酸素が出来るのかという様な事についてのレベルというのはまだまだ難しい所があるのかと思いますけれども、だけど数年前よりもその条件というのは改善されているのではないかというふうに私は認識しています。ですから、出来る限りの所はそこで詰めて、そういうものをベースにして最終的にやはり開門調査をしてやるべきかどうかという判断が下されるのかなというふうに思います。

【 九州大学農学研究院　生物科学部門准教授　大嶋 雄治 】
　私は、2 つやらないといけないと思うのです。1 つはこつこつと 1 つは急いでという事があると思うのです。こつこつというのは、有明の生物を我々全く知らなかったというのが今回の事で、とある人が言っていましたけれども新種だらけだと言っていたのです。記載

するのには一生掛かると言われていたのです。其の位我々は知らなかったのです。ですから、有明の生物について皆がアマチュアの研究者でも良いので入ってやはり皆で有明の価値を考える事が 1 つ大事だろうと思うのです。それとシミュレーションが出てきたので、ではこれを社会的にどう生かすかという事になると、これは政治の問題、環境価値の問題。どういうふうな環境価値を取り組むかという事でリスクが勿論出てきますし、そこまで踏み込んだ上で急いでこれはある所ではとやらざるを得ないのです。それはある意味では政治とか皆さんの考えとか、そういうふうに成らざるを得ない。それはリスクが勿論ありますけれども、ですから有明海は決して私は良くなっているとは思いません。去年今年の被害は酷いです。八代の方に行きましたけれども、とてもまともだとは思いません。益々悪くなるのではないかと思います。そういう意味ではリスクはありますがある程度の所で答えは幾つか見えているので、流れているのではないかなと思うのですけれどもそこの辺りで誰かが決断をして頂く。政治的な問題かも知れませんがそういう事ではないかと私は思っております。以上です。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
　どうも有り難うございました。じゃ荒牧先生。

【 有明海再生機構副理事長　荒牧軍治 】
　今の状況を見ていると、多分諫早の開門調査をやるべきかどうかというのは環境影響評価の提出後になりそうな雰囲気に段々なってきました。あの報告書を読んでみると、所謂シミュレーションモデルを動かしてどういうふうな場になるかという事を出すからそれによって判断しましょうという事になっています。ですから我々は、それがどういうモデルでどういうふうに計算されてくるかと言う事は、我々の側はやはりもう 1 つの点をちゃんと持っておかないとその議論にどうせ 1 回は巻き込まれなければならないから、その事が正しいのか或いは信用出来るのか。そうすると、佐賀大学はそういう考え方でもってもう 1 つのシミュレーションモデル即ちどこかからやって来るだろうそのシミュレーションモデルに対して我々はちゃんとこういう同じような事を計算するとこういうふうになって、それはほぼ信用して良い、ここは我々とはちょっと答えが違うという様な事もやっていかなければならないだろうというふうに僕は理解しています。ですから諫早干拓の開門調査を議論する時にも、シミュレーションモデルというものが使われる以上は其の事の認識を共有しておかなければならない。どれ位まで使えるかとかどこが使えないかという事をきっちりやった上で無いと、農政局ないしは農水省が出してくる答えについて我々はコメントが出来なくなってしまうというふうに思っていますので、相当の程度のレベルを上げておかなければならないと思っています。
　それで、有明海再生機構は実は佐賀大学に対して依頼をしておりまして諫早開門というものがどういうふうに流れ場を変えるとか貧酸素の状態を変えるかという事をチェックし

てくださいという委託をしています。それからもう 1 つは、長期的に諫早湾を締め切った事がどういうような影響を与えるかという事に尽いても計算をして下さいというふうに依頼しています。これは相当程度レベルの高いものをやっていかないといけないという事は今小松先生の言われた通りだと私も思います。唯、その時に必要な事は、それを検証するための木元さん達がやられているようなモニタリングデータというものが継続されている事がどうしても必要です。そしてそのデータが公開されてそして我々が使えるような状態になっている事という事を我々は望みたい訳です。ですから、継続と公開というのがモニタリングデータで行なわれるという事、そしてそれぞれの場所で行われているシミュレーションのモデルが皆さん集まってより精度を上げていくような努力をどこかでやっていく事、という事をやっていかないと冷静な議論が出来ないのではないかというふうに思います。それともう 1 つ、個人的には二枚貝をもうとにかく復元する以外には我々はあまり手段を持っていないのではないか。そして、昔のように、僕はキクチ先生から聞いたのだけれども「8 万トンとか 10 万トンとかというアサリ貝が取れるような状況はもう作れないよ」とせいぜい 1 万トン位だとするとそれ位の二枚貝が生息する環境の中でこの有明海の環境をどういうふうに持続的にするかと言う事が求められているのだというふうに私は理解しています。ですから、沢山の貝類。アサリだけではなくてサルボウやタイラギやカキや色々なものを使ってその努力をし続けていく以外に私はあまり知恵がありません。それくらいしか思いつかないという所です。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】

最後に楠田先生。再生策については色々今迄やられて来られたと思うのですが何かコメント等ございませんでしょうか。

【 有明海再生機構理事長　楠田哲也 】

楠田でございます。再生策という事でそういう切り札があればもう既に提案を申し上げているというのが実態なのです。只、再生機構としましても或いは 5 年間有明海の再生のプロジェクトをやって来た者にとりまして住民の方ですとか漁業従事者の方の注文に答える事が出来たかというとじくじたるものがありますけれども、少しはこの数年でかなり進歩してきたという所はお認め頂けたら有難いなというふうに思います。

もう 1 つ、直接まだお答えまではいっていないのですけれども 1 つ皆さん方でお考えを頂きたいのは、これはお願いなのですけれども、有明海の再生の為に本当に携わっている研究者の方が一体何人おるかという所も 1 度はお考えを頂けたら有り難いと思います。たとえば有明海の生態系として捉えている研究者というのは、何人おられるか。1 人とか 2 人というそういう単位で作業をやっている。現実に例えば今モデルで、いであさんにお世話になっていますけれども、有明海の周辺の大学で本当にモデルでやっておられる方これも 1 人とか 2 人とかそういう単位での作業をやっているという舞台裏もご理解を頂けたらと思

います。それでもう 1 つは、研究費が幾ら位出ているかという所も今それなりに出ているのは佐賀大学 1 つだけでして、それが幾ら位でしょうか。現在の研究費で使える部分というのは。

【 有明海再生機構副理事長　荒牧軍治 】
3000 万くらいです。

【 有明海再生機構理事長　楠田哲也 】
そんなものですよね。それでその有明海の問題が解決出来るかという所もちょっとお考えを頂けたらというふうに思うのです。再生策という事なのですが、先程大嶋先生がおっしゃったこつこつのものとパッとやるものと二通り、持続型の再生策とそれから緊急型のものと言い換える事も出来るかと思いますけれども、持続型の方が結局良く長持ちするものですからあれなのですが、1 つは覆砂というものは割合短期的なのですけれどもかなり劇的な効果を生む可能性があるという事。それを受けて悪循環、悪い方の循環に陥っているというその循環を切る為に、その覆砂なりを集中的に実施をしてそこの動く方向を変えた上でその次のステップに入るという所の可能性はあるのではないかというふうに今考えています。そういう意味で、短期的なものと長期的なもの。長期的なものというのは、現実には人口の垂直護岸の所の前になぎさ線を入れるとかそういう干潟を造成し直すとかいう所を、特に中部の有明海などはそういうのは非常に効くのですけれども、そういう持続性の高い手法がある。ですから短期とか長期のその手法を組み合わせて、応急処置型の分と持続型の分を組み合わせる方法で、悪い循環の方のものを良い循環の方に持ち上げるという所は、1 つは考える要素があるのではないかというふうに今考えています。そこの所を、「どう組み合わせたら良いのか」「どの程度の作業をやればどういうふうに良い結果になっていくか」という所はシミュレーションで追い駆けて行けたらなという事で鋭意進行中という所です。以上でございます。

【 座長：九州大学大学院　工学研究院教授　小松 利光 】
どうも有難うございました。進行の出来具合というか若干議論が迷走した様な気がしないでもないのですが 10 分超過しておりますのでこの辺で終わりたいと思います。最後に、今日の議論としては『何故有明海がこうなったのか』。色々なご指摘があったのですが、やはり流れが変わったというのが一番大きな原因で共通だと思います。それからシミュレーションに対する期待としてはかなりのドラマの起伏があるのではないか。将来の非常にパワフルなツールとして今後大いに期待したいと思います。
それから、では今の有明海でどう再生するかという事に対してはとにかく塩分成層がこれが元凶だからこれを何とかしたい。それから流れが弱くなった事が根本原因なのでこれを何とか除きたいとか、二枚貝の効果赤潮の効果をとにかくきちんと抑えたいとか色々な

ご意見があります。只、いずれのご意見も、やはりシミュレーションに期待したいという所に繋がっていたように思います。今後シミュレーションの役割が非常に大きくなると思いますのでいであさん以外にも佐賀大学等シミュレーションに携わっている研究者の方には是非ご進展の方をお願いしたいと思います。
最後に、楠田先生の方から有明海の再生に携わっている研究者が非常に少ない、又研究費も少ない。これをやはり何とかしないといけないという事、それから 1 つの考え方として負のスパイラルに陥っているのを、集中的に覆砂みたいな形で集中的に投資する事で正のスパイラルに持っていけないだろうかとそういう考え方も重要なのではないだろうかというようなご指摘もありました。それを検証する意味でもやはりシミュレーションに期待したいという事になってくるのかなというふうに思います。今日のシンポジウムを通じて『貧酸素水塊の発生のメカニズム』についてはある程度明らかになってきたのかなというふうに思います。またそれをどうやって解消するか再生するかという事に尽いてはまだまだ解決策が出て来る訳ではありませんが、議論、理解は深まったのかなというふうに考えております。今日は 5 人のパネラーの方に貴重なご意見を頂きました。本当に有難うございました。

講演者略歴

荒牧　軍治　（あらまき　ぐんじ）
佐賀大学　名誉教授
佐賀大学評議員、副学長、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト長を歴任。
有明海再生機構副理事長、NPO 法人有明海ぐるりんネットの代表理事として、有明海再生のために尽力されている。

木元　克則　（きもと　かつのり）
（独）水産総合研究センター西海区水産研究所海区水産業研究部
　　有明海・八代海漁場環境研究センター　漁場環境研究科長
1977 年水産庁入庁、水産工学研究所、西海区水研で漁場造成技術開発、赤潮・漁場環境について研究。特に 2001 年以来、有明海の貧酸素水塊の発生機構について調査研究。

竹内　一浩　（たけうち　かずひろ）
いであ（株）国土環境研究所　水環境解析グループ　主査研究員
有明海の三次元流動シミュレーションによる潮流変化の要因分析、アサリ浮遊幼生の成長を考慮した粒子拡散モデルによる浮遊粒子の移動と着底の推定等。

小松　利光　（こまつ　としみつ）
九州大学大学院　工学研究院 環境都市部門 沿岸域環境学　教授
環境水理学が専門。穴あきダムの効率化の研究、有明海再生のための研究、画期的擁壁空積工法の開発、波浪エネルギーを利用した物質輸送の研究等。

松岡　敷充　（まつおか　かずみ）
長崎大学　環東シナ海海洋環境資源研究センター 教授
海洋微古生物学、沿岸環境学が専門。地質学会の特性である「時間を通して現象を理解する」方法を環境問題に応用するとこを目指す。

堤　裕昭　（つつみ　ひろあき）
熊本県立大学　環境共生学部 教授
生態・環境、環境影響評価・環境政策が専門。有明海の水質環境や多毛類の生態を研究。

大嶋　雄治　（おおしま　ゆうじ）
九州大学　農学研究院　資源生物科学部門　准教授
水産化学、環境学、 水生生態毒性学が専門。魚介類に及ぼす環境ホルモンの影響、魚類における薬物動態、有桟スズの汚染と生体影響の研究等。