有明海環境異変を科学技術はどこまで解明したか

特定非営利活動法人法人有明海再生機構
顧問　荒牧軍治

著者と有明海問題との関わり

著者は、環境省の有明海・八代海総合調査評価委員会に委員として参加し、ほぼすべての委員会に出席することで有明海に関する学習を行ってきた。平成17年までの有明海研究の到達点は、発表された数多くの科学的研究成果の中から委員の討議を経て取捨選択した上で記載された平成18年(2006年)の環境省有明海・八代海総合調査評価委員会委員会報告（以下「環境省報告書」と呼ぶ）が当時の有明海研究の到達点であったというのが私の基本的認識である。本文の目的は、環境省報告書以降に行われた研究成果の中から新たに何を付加すべきかを明らかにすることだが、環境研究の専門家ではない私にできることは、有明海再生機構の部会等で討議し、シンポジウムで報告したものの中から、委員間の討議でほぼ納得できていると私が判断したもの記載することだけである。必ずしも有明海再生機構として有明海全体の研究を精査したものではないということはあらかじめお断りしておく。有明海再生機構の専門部会で討議してきたのは、佐賀大学有明海再生機構総合研究プロジェクトが実施してきた５年間の研究成果、楠田理事長が主査となって行われた科学技術振興調整費（ＪＳＴ）の「有明海生物生息環境の俯瞰的再生と実証試験」、さらに環境省「有明海貧酸素水塊発生シミュレ

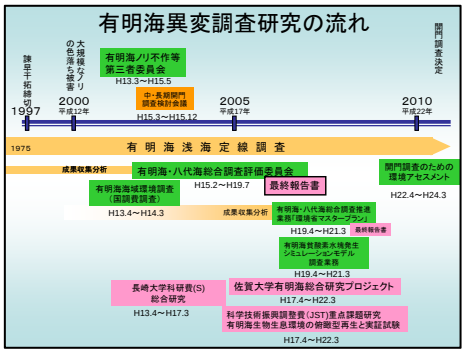

図１　有明海調査研究の流れ

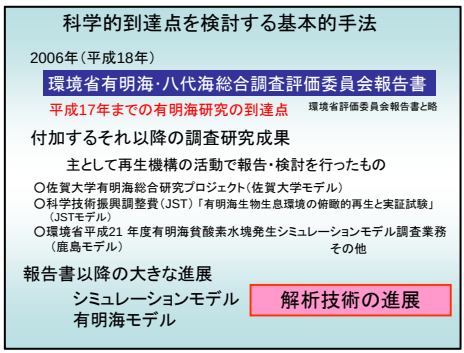

図２　検討する基本的手法

ーションモデル調査業務」の成果が中心であり、その研究成果討議から多くの知見を得ることができたので、その研究成果が環境省報告書に新たに付加した部分の中核になっている。

環境省報告書以降の大きな研究成果の中心は、各機関により設置された観測塔、モニタリングポストから得られた連続観測量と、複数の研究機関から発表されたシミュレーションモデルを用いた解析結果である。有明海再生機構に関連深い上記３つの研究プロジェクトはいずれも、解析モデルの確立、シミュレーションモデルによる解析を研究の中核に据え、入力データの相互利用等において連携を図っている。

有明海環境要因はどのように関係しているか

図３は、は環境省の環境省報告書に掲載されている「有明海の問題点と原因要因の関係」図である。一番上の段が「有明海異変」と言われている現象であり、二段目が「海域環境」を示す部分で、これが異変の原因と考えられているところである。さらに三段目が陸域・河川といった有明海の外部から海の環境に影響及ぼしていると考えられるものを示している。

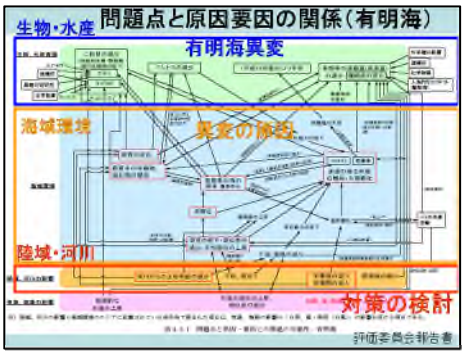

図３　問題点と原因要因の関係（環境省報告書）

「有明海異変」とは何か

最初に、一番上の「有明海異変」を環境省報告書及び有明海再生機構のおける討議ではどう認識したかついて述べる。環境省報告書に示されている平成 17 年度までについては、十分に認識されているものとし、平成 20 年度までの最新のデータ入れた図面から有明海異変と言われる現象がどのように見えるかについて考えていくこととする。

ノリ養殖

図４は、有明海における養殖ノリの生産量の推移を示したもので、佐賀県は、生産枚数、生産額ともに非常に好調に推移している。福岡県、熊本県は、生産枚数は横ばいだが、単価が少し落ちてきているので、生産額としては少し減少傾向にある。それに比較して兵庫県、香川県といった瀬戸内海の生産地では、生産量と単価の両方が減少しているため、生産額としては非常に苦しんでいる状況にある。有明海全体としては、1975 年から 1990 年近くまでが一つの段階、1990 年から 2000 年近くまでが２段階目、それから 2000 年から 2010 年ぐらいまでの３段階目と明確に区分することができ、生産枚数は階段状に増加していると言える。（図５）

次に有明海環境問題が社会問題となったノリの色落ちを考えてみよう。図６，７は、佐賀県有明水産振興センターの川村博士が分析したノリの色落ちのパターン分類及びその原因分析で、ノリの色落ちには幾つかの型があること、ノリの色落ちの原因である珪藻の増殖はほとんど全天日射量で決まることを示している。珪藻の増殖には全天日射量が多い一定期間が必ず必要で、全天日射量が急激に低下すると珪

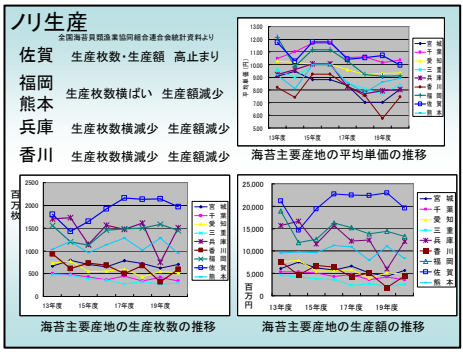

図４　主要県のノリ生産の推移

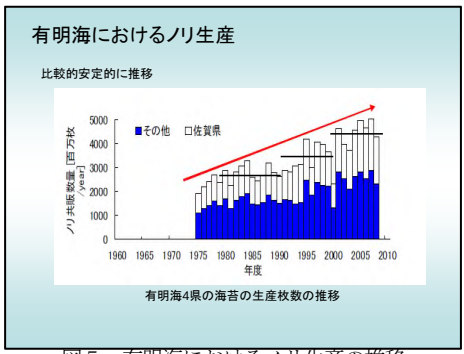

図５　有明海におけるノリ生産の推移

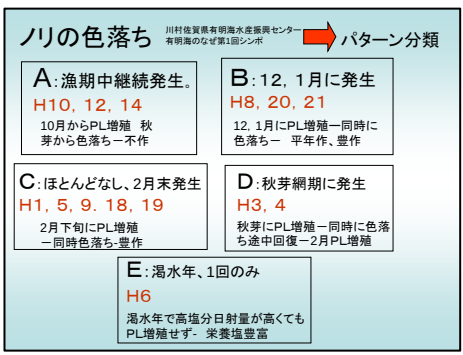

図６　ノリの色落ちのパターン分類

藻増殖は起こらない。

珪藻増殖の環境として、透明度、水温の影響が強いが、最近は冬場の水温が上昇し、透明度上昇と相まって、有明海湾奥部は珪藻増殖に適した環境条件になりつつあるという指摘をされている。

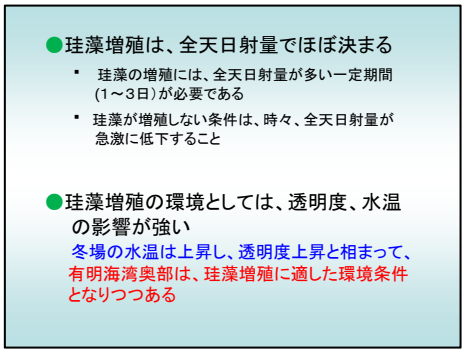

図７　珪藻増殖の原因

再生機構が開催したシンポジウムの中で高い評価をうけた成果の一つが、図８に示す佐賀大学速水准教授の研究である。左側に各年度でノリの色落ちが発生した期間を黒く塗りつぶした図を示している。全体的に２月、３月になると水温が上昇しノリの色落ちが発生しやすくなるが、1988 年ぐらいから 2000 年近くまでの期間は幸運なことにノリの色落ち発生の頻度が少なくなっている。佐賀大学の速水先生はこの事実に注目し、各種要因についての相関分析を行った結果、その時期、二枚貝の漁獲量とプランクトン沈殿量が逆相関の関係にあること、色落ちが発生していない時期には、特にサルボウ貝の漁獲量が多いことを示した。以上の結果からノリの生産の安定化には二枚貝の増殖が有効であることを示唆しているとの考察を示している。

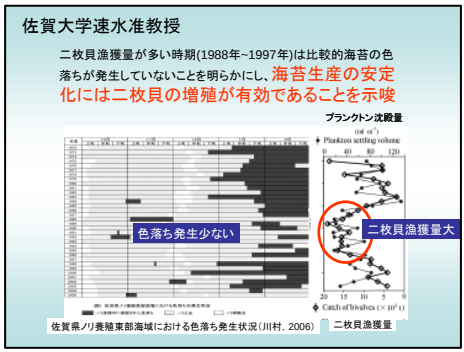

図８　ノリの色落ちと二枚漁獲量との相関

タイラギ

有明海異変以降、最も注目されている水産資源はタイラギである。2009 年に鹿島太良沖でタイラギの漁獲が見られたものの、1997 年の諫早湾締切以降、タイラギの漁獲が減少傾向にあることから、諫早湾締切の影響を示す象徴的な魚種となっている。

環境省報告書は、「中・西部の漁場は消失した。2000 年以降、東部海域で大量斃死が起こっている。ナルトビエイの食害が起こっている。中央～西部海域

では浮遊幼生が着底後に斃死したものと推定できる。2003 年から 2005 年の調査結果として、酸揮発性硫化物、強熱減量が少なくて、底質が砂っぽいところ（中央粒径値 MdΦ＝４）に稚貝が分布している」と分析していた。（図９）

ところが、タイラギの生育に不適と分析されていた泥底質の西部海域で 2008 年 10 月に稚貝の着床が確認され、翌 2009 年には夏の危機を乗り切って成貝の漁獲が可能となった。2009 年は久々の大漁で、全ての成貝を取り切ることができず、次年度に期待して残しておく程であった。環境省報告書がタイラギ生育に不適としていた泥底質でタイラギの漁獲ができたことで、その見直しが必要となった。

環境省報告書は、1989 年から 2000 年にかけてのデータを用いて底質が泥化したことを示し、それがタイラギ不漁の原因の一つであると分析していた。ところが、2000 年から 2009 年に得られた底質データを用いて分析した結果、タイラギが復元した海域では粗粒化が起こっているという事実が出てきた。「泥化から粗粒化に変化した」ことが 2009 年のタイラギ漁獲に繋がったかどうかが議論になった。その際、佐賀県有明水産振興センター（佐賀県有明水試と呼ぶ）の担当者から、「過去には、底質が泥っぽい海域（沖神瀬等）でもタイラギの漁

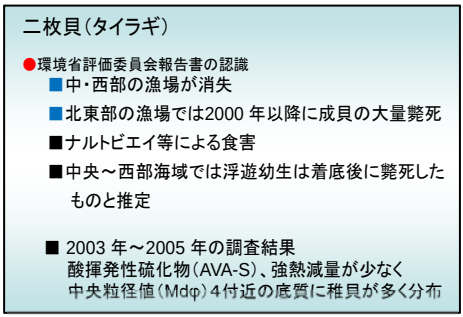

図９　タイラギ減少に関する環境省報告書の認識

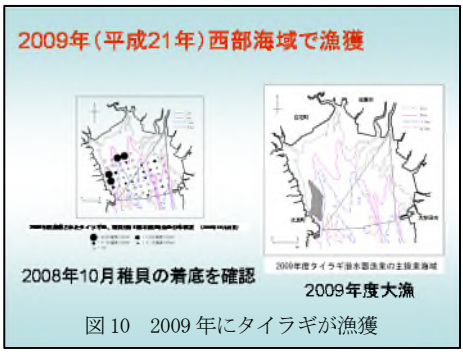

図 10　2009 年にタイラギが漁獲

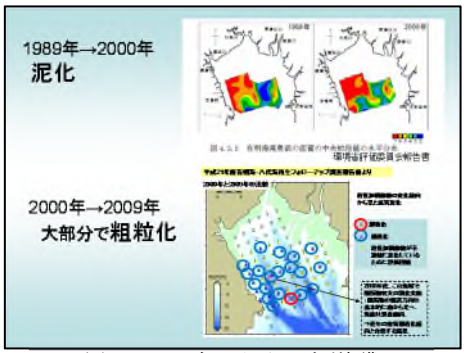

図 11　2009 年にタイラギが漁獲

獲が可能であった。必ずしも底質の砂っぽいところがタイラギ生息に有利だということはあり得ない」（図１２）との指摘があり、「底質の砂っぽいところがタイラギ生育の適地」とした環境省報告書の分析は誤りであることが明らかとなった。

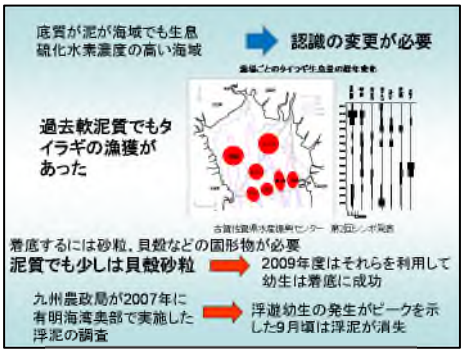

図 12　過去のタイラギ漁場

タイラギの一生を示す生活史の中で２つの大きな危機があることはよく知られている。タイラギは、夏（7 月から 9 月）に産卵し、30 日から 40 日間浮遊幼生として海を漂ったあと海底に着底し、成貝に成長していく。一冬を越し、翌年冬期に収穫可能となる。一つ目の危機は浮遊幼生が海底に着底する時期に発生する。浮遊幼生は足糸（そくし）と呼ばれる器官を砂粒や貝殻などの基質に固定して着底する。全く砂粒等を含まない完全な泥底質には浮遊幼生は着底できないことが有明水試の室内実験で確かめられているが、現実の海底底質にはわずかではあっても砂粒や貝殻が含まれているので、泥底質であっても浮遊幼生の着底は可能であり、過去、泥底質でもタイラギの漁獲があったことも説明可能となる。

佐賀県有明水試は、2008 年に実施した稚貝の発生状況と、九州農政局の 2008 年の浮泥厚の調査結果を比較して、稚貝の発生した箇所では浮泥の厚さはゼロであったこと明らかにし、着底の最も大きな阻害要因は浮泥の厚さであると結論づけた。わずか 5㎜、1㎝ の厚さの浮泥であってもタイラギ幼生の着底には大きな阻害要因となる。タイラギの復活には浮泥の分布状況、変化の要因分析等の科学的な基礎調査が必要となる。

タイラギの２番目の危機は収穫前の５月から 11 月頃までに発生する「斃死」である。その原因と考えられものの一つは、貧酸素に繰り返し曝されることにより、体内のエネルギー源を消耗し斃死するとする説で、佐賀県有明水試は 2009 年に取り残した成貝が 2010 年に全滅した原因は「貧酸素」であったと結論づけている。

さらに、タイラギには北東部海域で成貝が夏場に大量に立ったまま斃死するという現象が見られ、「立ち枯れ斃死」と呼ばれている。北東部海域（大牟田・荒尾沖）の底質は砂地盤で、地形及び海況の関係で貧酸素が起こる頻度は非常

に少ない。東海岸で発生する立ち枯れ斃死が貧酸素ではないとすると別の原因が考えられる。2013 年頃、西海区水産研究所の杁本（よりもと）氏は、立ち枯れ斃死の発生した海域で高濃度の硫化水素が検出されていること、室内で硫化水素の曝露実験を行うと、立ち枯れ斃死と同じような病変を起こすことから硫化水素説を提出し、一定の支持を得た。しかしその後、佐賀県有明水試が同様に現地調査を実施した結果、硫化水素が検出されない海域においても立ち枯れ斃死が観測されたことから、硫化水素説は考えにくいと説を提出し、現時点（2015 年）では、「立ち枯れ斃死の原因は不明である」というのが大方の認識である。

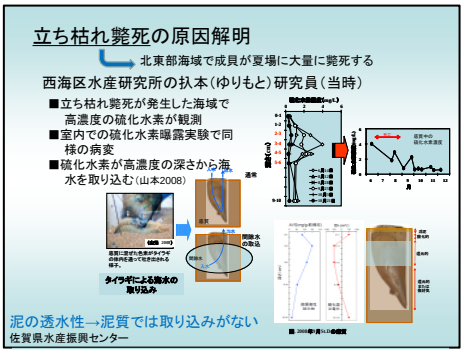

図 13　立ち枯れ斃死の原因解明

魚類

図１４は、1960 年から 2007 までの有明海での漁獲高の推移を示している。赤で示した貝類が漁獲の大部分を示しており、有明海では貝類に比較して魚類の比率が非常に低いことが理解できる。下図は魚類のみを拡大して示しとものであるが、1987 年にピークを示した後、漸減し、ピーク時の三分の一程度に落ち込んでいる。その原因として水質等を含む海況の変化、漁獲圧の増大等が考えられるが、明確に特定するには至っていない。同様の傾向は日本の全ての海域で発生していることから、有明海固有の原因だけではないとの指摘もある。

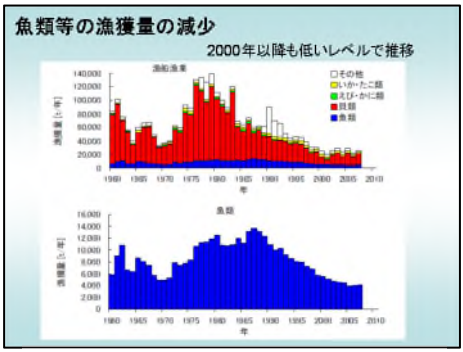

図 14　有明海の魚類等の漁獲高の推移

魚類について評価委員会が指摘した中で最も重要だと私が考えたのは、有明海における魚類の産卵場所及び稚仔魚の生育場所に関する調査結果である。長崎大学の山口教授を中心とする研究グループは、有明海の代表的な魚種であるク

ルマエビ、コウライアカジタビラメ、シログチなどの魚は、湾の中央部付近（図１５ＢＣ地域）で産卵をし、一定の大きさに育った稚仔魚は有明海の干満を利用して浮泥が多く透明度が低い湾奥部及び諫早湾（図１５Ａ地域）に移動してそこで生育し、産卵可能時期になると湾中央部に移動して産卵するという生活史を持つことを明らかにした。生物は、捕食者に見つかりにくく、その種に適合した餌が豊富にある場所を選択することを生き残るための基本戦略とする。多くの稚仔魚は、透明度が低いため捕食者に見つかりにくく、浮泥に付着した植物プランクトンが豊富にある湾奥部及び締切前の諫早湾を生育の場とする戦略を採っていたものと思われる。

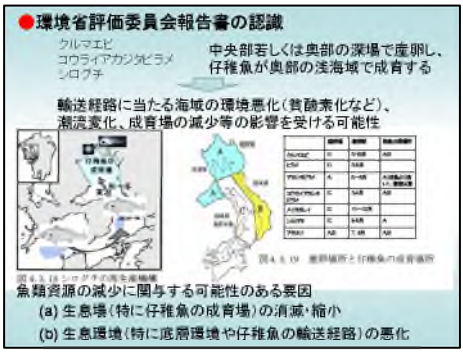

図１５　産卵場と稚仔魚の生育場

研究グループは、上記の研究結果から、稚仔魚の生育場の一つであった諫早湾の干潟域が締切により消失したことは、稚仔魚にとっての重要な生息場が縮小、消滅したことを意味し、魚類の生息環境を悪化させたことを指摘している。

有明海の魚類の生態及び魚類を取り巻く状況については、「干潟の海に生きる魚たち」（2009 年 3 月日本魚類学会自然保護委員会編田北徹・山口敦子責任編集　東海大学出版会）に詳細に述べられているので、参照して戴きたい。（図１６）

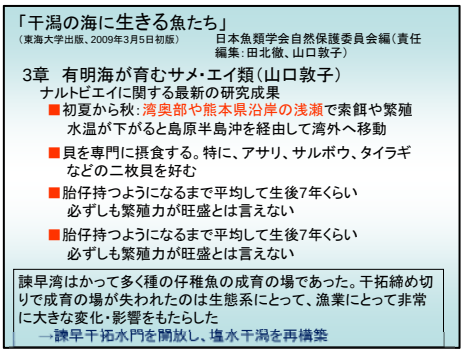

図 16　ナルトビエイと稚仔魚移動に関する知見

赤潮

2000 年に大規模な海苔の色落ちを起こした原因は、大型珪藻リゾソレニアインブリカータが異常発生したことであることは明らかになっている。大型珪藻リゾソレニアインブリカータは、通常は暖かい外海で生息しており、低塩分の夏期には進入が阻まれているが、冬期に高塩分なったときに湾内に進入し、高

い日照条件下で大発生する。2000年冬期には雨が少なく、好天が続いて日照時間が長くなったため、リゾソレニアインブリカータの大発生の条件が揃ってしまった。本城九州大学名誉教授は、佐賀大学で開催したシンポジウムにおいて「2000年のリゾソレニアインブリカータの異常発生は、一種の天災だ」と述べられて、極めて特異な事象であることを示された。2000年以降、リゾソレニアインブリカータの異常発生による色落ち被害は起こっていないことから、2000年の大規模な海苔の色落ちは、特異な条件下で発生した不幸な出来事だと考えられる。（図１７）

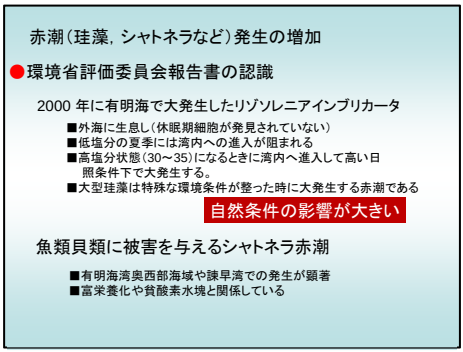

図 17　赤潮に関する環境省報告書の認識

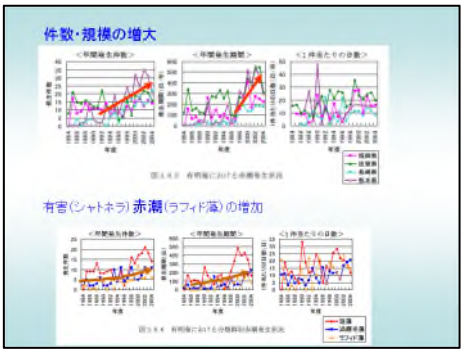

図 18　赤潮の推移に関する環境省報告書の記述

環境省報告書は、1984年から2004年までのデータを用いて、赤潮の件数は福岡県と佐賀県では横ばいであり、長崎県と熊本県では増加傾向にあること、さらに、二枚貝や魚類に大きな被害を与えるため「殺し屋」とおそれられているラフィド藻類の一種であるシャトネラ赤潮画像化傾向にあることを示している。図１９は、2008年まで期間を延ばしたとき有明海における赤潮の発生件数はどのように見えるかを示したものである。最近はどちらかというと、夏季は確かに高止まりしている傾向にあるのに対して、それ以外の季節、特に冬場、春、秋から冬の

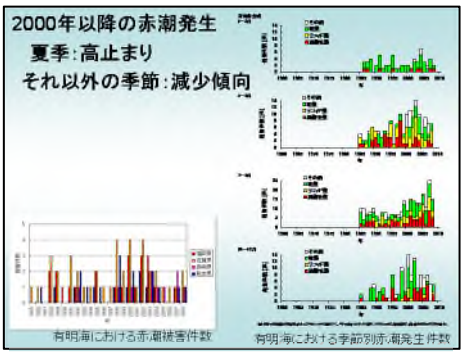

図 19　環境省報告書以後までを含む赤潮の推移

時期に関しては、件数は減少傾向にある。同図の左下に示した有明海における赤潮の被害件数自体も一番ピークの時に比べれば少し減少していると見ることができる。（図１８，１９）

有明海異変の原因の解明、最も重要な環境因子は貧酸素

図２０は、環境省の報告書が示した環境要因の関連図から、有明海異変の原因の解明に関係すると見られる環境要因間の関連を書き直したもので、非常に複雑で入り組んだ図になっている。この図では最も重要な環境因子として貧酸素を真ん中に据えている。貧酸素が発生すると、二枚貝、魚類、ベントス減少させるという直接的な影響だけではなく、硫化水素を発生させることでさらに魚類、二枚貝を減少させる。あるいはシャトネラ赤潮などの有害赤潮の引き金となってさらにそれが魚類、二枚貝に大きな影響を与える。以上のことから、貧酸素を環境指標の中心に置くべきだという研究者が非常に多いことから、貧酸素に関連する事項を中心に検討することとする。

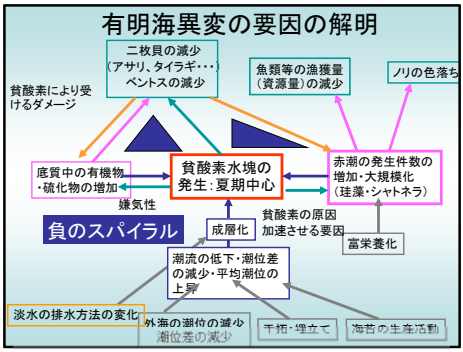

図 20　貧酸素を中心とする環境要因関連図

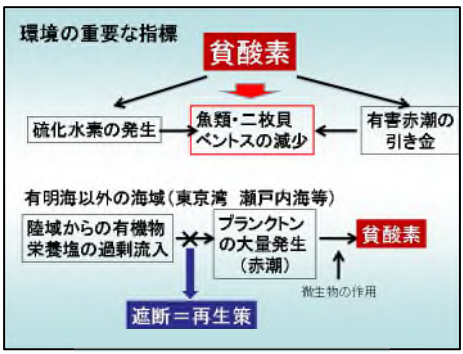

図 21　他の海域との違い

ちなみに有明海以外の海域、特に東京湾とか、瀬戸内海では、陸域からの有機物、栄養塩の過剰流入でプランクトンが大量発生し、貧酸素になるという因果関係が明白であることから、この入り口である「陸域からの有機物、栄養塩の過剰流入」を遮断することが再生策だと理解され、有機物・栄養塩類の総量規制を実施して、環境改善に結びついている。ところ有明海では必ずしもその様に理解できないことが問題を複雑にしている。図２２の右側に有明海に流入する有機物、全窒素、全リンの経年変化を示しているが、1980 年代に比べて 1990 年以降、

2000 年では、変化がないかむしろ減少傾向にある。「有機物や栄養塩の流入量が増加していないのになぜ有明海では赤潮が発生しやすくなり、貧酸素が多発するようになったのか」というのが重要な設問になっている。

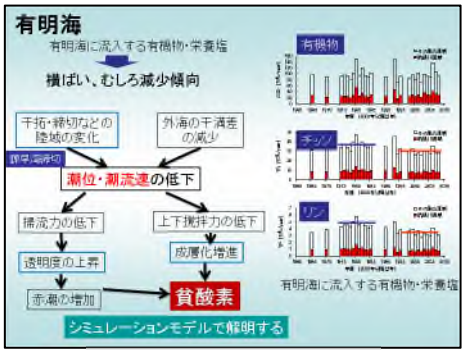

図 22　他の海域との違い

このことを検討するために、図２２に示す新たな有明海モデルが提案され、有明海異変以降新たに設置された研究プロジェクト、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト、科学技術振興調整費（JST）重点課題研究「有明海生物生息環境の俯瞰型再生と実証試験」、環境省有明海貧酸素水塊発生シミュレーションモデル調査業務はいずれも、増大したと思われる貧酸素を評価因子として、数値シミュレーションを用いてその原因解明を行うことを目的として実施された。

すなわち、「干拓、締切りなどの陸域の変化」「外海の干満の差の減少」が原因となって、「潮位、潮流速の低下」が起こり、そのことによって「掃流力が低下」し、「透明度が上昇」して、赤潮が増加しやすくなり、「成層化が促進」して「上下撹拌力が低下」し、貧酸素が発生するというモデルである。このようなメカニズムで有明海は貧酸素しやすい海になっていると考えられるので、これらの事象を個別にモデル化し、有明海全体のモデルを構築して全体的に議論を行おうとの目的でこれらの研究プロジェクトは実施された。

シミュレーションのモデルの構築の手順は、まず、現在得られている科学的知見から現象間の関係をモデル化し、全体を組み合わせて有明海モデルを完成させる。このシミュレーションモデルにデータが得られているある年度の潮位、河川からの淡水流入量、負荷量負荷量、日照時間、風速等を境界条件として計算し、各点における潮位・潮流速、

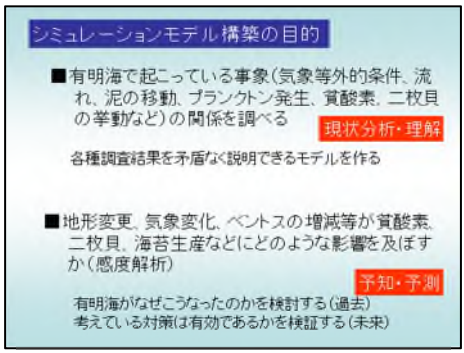

図 23　シミュレーションモデル構築の目的

塩分、プランクトン類及び貧酸素の発生状況等の結果を求め、浅海定線調査、モニタリング等で計測された調査結果を矛盾なく説明できるかどうかを検討する。同様の計算を調査結果が得られている各年度で行い、全体として矛盾が少ないと感じられるまでモデルの改良を行う。これらの作業はキャリブレーションと呼ばれるが、現場における計測データがある年度でしかこの作業は行うことはできない。「現在の環境状況を全体として説明できた」と確信が持てたら、干拓等の地形の変更、ベントスの減少等がどの程度貧酸素の発生に寄与するかの「感度解析」を実施することが可能になり、現在、各研究者が唱えている原因説の寄与の度合い、各種機関が実施している再生策、様々な人々が提案する再生策の有効性を検討することができることとなる。

モデルの精度向上に向けた努力

シミュレーションモデルの構築を開始した当初、多くの研究者から最も基礎となるデータの海底地形データの精度が悪すぎるとの指摘があった。海底地形のデータの精度は、解析の出発点となる潮位・潮流速の解析精度に直接影響するため統合的な計測が必要との認識が広まり、各機関で連携して高精度の調査が行われた。そのデータが公開されたことでシミュレーションモデルの最初のモデルとなる「流動場モデル」の精度が向上し、モデル構築のスタートが切ることができた。

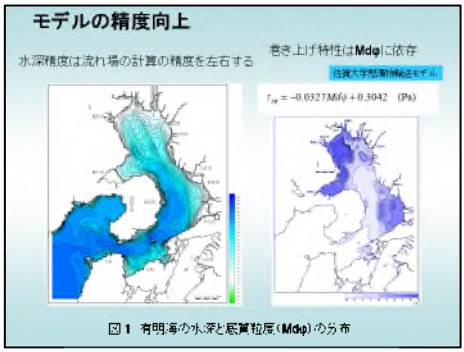

図 24　精度向上に向けた努力

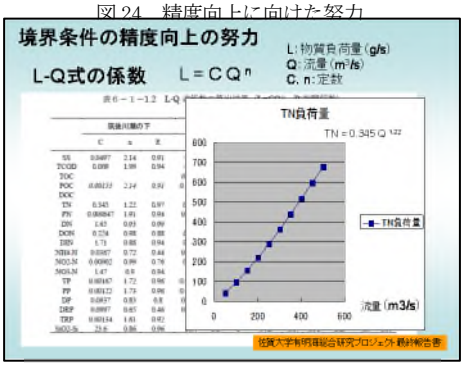

図 25　L-Q 式の精度向上に向けた努力

有明海が他の海域と異なる点は浮泥及び堆泥の量が比較にならないほど多いことにある。浮泥に起因する透明度の分布は、プランクトン発生の重要な因子となるので、底質の分布状況、堆泥の巻き上げ等の物理的性質などの基礎データが必要

となる。さらに、有明海には筑後川を始めとする一級河川、県管理の二級河川があり、大量の有機物・栄養塩等を流入させている。これらの物質量は、プランクトン発生量、有機物の消費に伴う溶存酸素量を計算する「低次生態系モデル」の基礎的因子であり、その精度がモデル全体の精度を決定する。図２５に示す物質負荷量Ｌは、河川から有明海に流入する単位流量当たりの負荷量で、河川流量Ｑのベキ関数として与えられ。シミュレーション解析に当たっては、その係数をそれぞれの河川で精度良く求めることが必要となる。

底質の分布とその巻き上げ特性、有明海に流入する河川のＬ－Ｑ式の係数について佐賀大学有明海総合研究プロジェクトの研究チームが精力的に研究を行い、他の研究プロジェクトにもその成果を公表したので、シミュレーションモデルの精度が向上した。

シミュレーションモデルのキャリブレーション（精度チェック）

作成したシミュレーションもデルがどの程度の精度を有しているかのチェック（キャリブレーション）は、有明海で観測されたデータと比較することでしか実施することはできない。そのため、有明海の現場で水温、塩分、潮位・潮流速、栄養塩濃度、クロロフィル濃度、溶存酸素量といった環境因子に関する観測データが取得されていなければならない。これまで各県の水産センターを中心に有明海全域で浅海定線調査が行われ、上記データが取得されてきているが、月１度、大潮満潮時に測定された離散量であるため、短期間に起こる現象について十分な情報を提供することができなかった。幸いなことに、有明海異変以降、各機関で観測塔などのモニタリングポストの設置が行われ、連続観測量が取得できるようになり、その成果が研究者に公開された。図２７右は連続観測を行ったモニタリングポストの設置位置を、左は各地点の潮位の連続観測データを示している。図には観測された潮位を青線で、シミュレーションモデルによって計算された結果をピンクの線で示しているが、潮位に関し

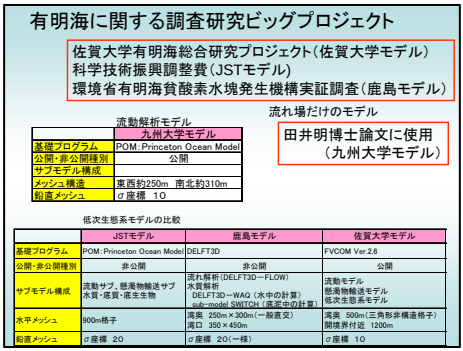

図 26　開発されたシミュレーションモデル

ては時刻歴においても完全に一致していると言える。

図２８は、各観測点における表層と底層の塩分濃度及び底層流速を示したものである。Ｐ１観測点の塩分濃度は、河川から流入した淡水が移動してきたことにより濃度が次第に下がり、干満を繰り返すことで撹拌が起こり次第に元の濃度に戻っている。その下に示した底層の塩分濃度が時間的に変化していないことから、上下で大きな密度躍層が生じていることが理解できる。以上の結果から、赤潮及び貧酸素の発生に最も大きく寄与すると考えられる塩分濃度分布が、ほぼ正確にシミュレートすることが可能となったと理解することができた。ただし、底層の流速は、時系列まで正確に表現しているとは言いがたい。底層の流速は地形の微妙な変化で異なるので、流速を時系列レベルまで合致させるには現在使用しているモデルはメッシュサイズが大きすぎるのだろう。計算機の容量が大きくなり、かつ計算が高速に実施できるコンピューターを使用できるようになれば、精度の良い結果が得られることが期待できる。

図２９左図は、環境省有明海貧酸素水塊発生シミュレーションモデル（鹿島モデル）で求めた溶存酸素

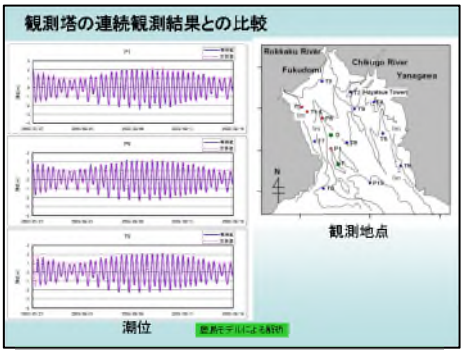

図 27　潮位の比較と連続観測点の位置

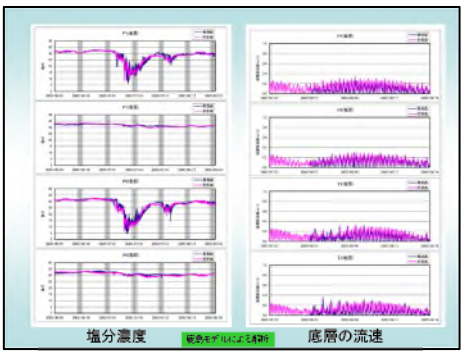

図 28　塩分濃度と底層流速

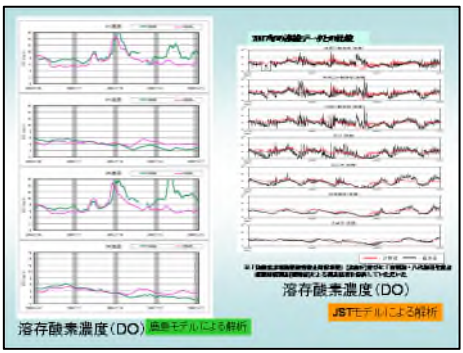

図 29　溶存酸素（DO）の比較

（ＤＯ）の計算結果（ピンク線）と連続観測値（緑線）とを比較したものである。また右図は、科学技術振興調整費（JST）重点課題研究モデル（ＪＳＴモデル）によって得られた溶存酸素（ＤＯ）の計算値（赤線）と長期間の連続観測量（黒線）とを比較したものである。両者とも時系列まで合致しているとは言いがたいが、オーダー的にはほぼ満足のいく結果になっている。

また、図３０右図は、唯一の長期観測データである浅海定線調査の溶存酸素の観測結果（赤の離散点）と数値解析結果（黒線）を比較したものである。7 年間にわたる長期の変動についても、計算結果はほぼ満足のできる精度で表現できていると考えることができる。また同図の下に付記した鉛直分布についても観測結果と計算結果はほぼ一致していると見なすことができる。特に注目すべきは、貧酸素は一番底層で発生すると一般に考えられているが、むしろ中間層に酸素濃度の最も低い点が表れたことである。この観測値を提供された熊本県立大学の堤浩昭教授は、以前から「最も酸素濃度が下がる点は底層ではなく水柱の中間にある」ことを指摘しておられたが、シミュレーション結果でも水柱中間に最も低い酸素濃度が分布したことで、この点に関してはシミュレーションモデルの精度が向上したことを認められている。

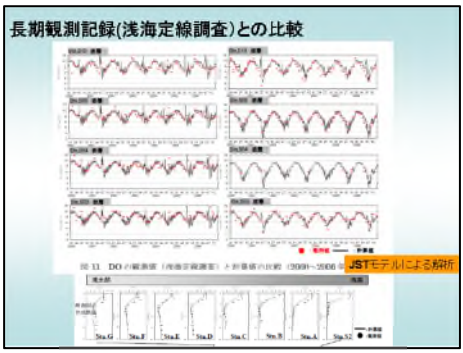

図 30　長期観測記録との比較

図３１は、2000 年から 2006 年の実際の気象条件を入れて計算をした時の貧酸素水塊の発生状況の結果を示したものである。2001 年と 2006 年は夏場に大きな出水があって強い成層構造が形成され、それに強い日照も重なって溶存酸素濃度 2.1mg/L 以下のかなり強い貧酸素が発生した。両年の計算結果も明らか

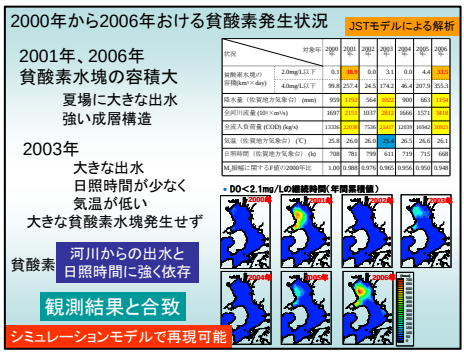

図 31　貧酸素発生状況の再現

に強い貧酸素水塊が発生したことを示しており、大規模な出水と強い日照と云う気象条件が貧酸素発生の要因であることが理解できた。同じことは 2003 年の計算結果からも推察することができる。2003 年は 2000 年、2006 年と同様、夏場に大きな出水があったにもかかわらず、曇り空が続き日照時間が短かったため大規模な貧酸素水塊の発生は抑制された。計算結果も貧酸素の発生が小規模であることを示している。また、2000 年、2002 年、2004 年、2005 年は夏場に大きな出水がなかったことから、大きな貧酸素塊発生していない。以上の結果から貧酸素水塊の発生を計算するモデルである「流動場モデル」と「低次生態系モデル」については、異なる思想で作られた 3 つの研究プロジェクトのモデルの計算結果はほぼ同様の結果を示していることから、低次生態系モデルまでのシミュレーションモデルまではほぼ完成したと言うことができる。

シミュレーションモデルの到達点

有明海のシミュレーションモデルの到達点を再確認しておくことにする。鉛直方向に塩分濃度の急変が起こることまでを表現することのできる流動モデルは、先に示した 3 つの研究プロジェクトに九州大学が開発した流動場モデルを加えて 4 つの計算プログラムにおいて、時々刻々の潮位、潮流速、塩分濃度、水温等の連続観測結果とほぼ合致するところまで精度を上げることができている。プランクトンの発生・消失、貧酸素水塊の発生までを表現することが可能な低次生態系のモデルに関しては、ＪＳＴモデル及び鹿島モデルの双方とも、溶存酸素に関しては時系列までは表現ができていないが、オーダーとか、傾向についてはほぼ一致しているので、原因の解明や再生策の検討には十分に利用可能な所にまで到達していると考えることができる。

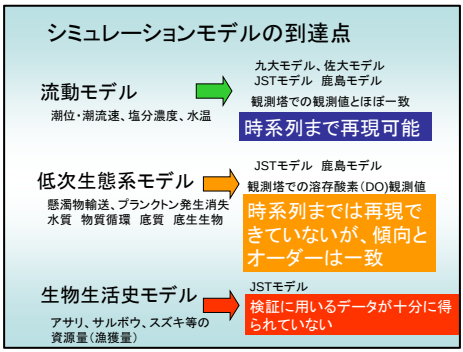

図 32　貧酸素発生状況の再現

環境省の因果関係図にも示されているように、社会は「ノリの色落ちに加えて、二枚貝等の底生生物及び魚類の減少」全体を有明海異変と見ている。魚類を含めた高次の生態系を議論するためには、個々の生物の生活史までをモデル

化した生物生活史モデルが確立されなければならない。しかし、どのような魚種をモデル組み込むか、その魚種の生活史はどの程度解明されているか、そして何より、それらの賦存量データはどのように推測することができるかと云った点について明確な答えが出ていないため、流動場モデル、低次生態系モデルとは非連成の簡単なモデル以外には構築されていない。ＪＳＴモデルではタイラギとアサリとスズキを指標種とした生活史モデルを構築し、環境場においてこれらの生物がどのように増加または減少するかの計算結果を示している。定性的には妥当だと思える結果ではあるが、定量的な議論ができるまでには至っていない。

シミュレーションモデルを用いた環境変化の解析

潮位・潮流速

有明海の環境異変の議論は、有明海に流入する汚濁負荷量が増加していないにもかかわらず環境が悪化しているとの前提で、当初から諫早湾の締切がどの程度影響を及ぼしたかの議論となっていた。有明海モデルとして提起されたもの自体、潮位・潮流速の低下によって上下撹拌力が低下し、成層構造の強まりによって貧酸素が増大することで生物環境に大きなダメージを与えたとするものであったため、締切によって潮位潮流速がどの程度変化したかが大きなテーマになっていた。

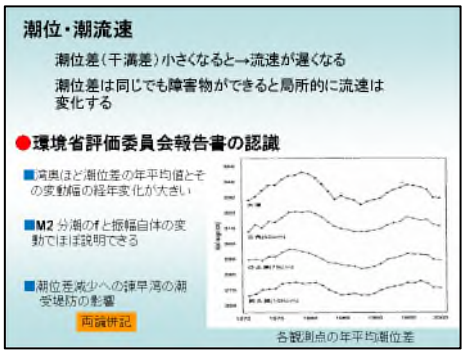

図 33　潮位に関する環境省報告書の認識

環境省報告書は、図３３に示す大浦、三角、口之津、阿久根の潮位観測点の年平均潮位差の 1970 年から 2000 年にいたる経時変化から、潮位差は一定ではなく 18.6 年周期で増減を繰り返していること、湾奥ほど潮位差の年平均値とその変動幅の経年変化が大きいことを示した。さらに、○Ｍ２分潮とｆ値と振幅自体の変動で説明が可能で、諫早湾締切の影響は小さいとする説と、○潮位差の減少に諫早湾締切の影響は否定できないとする説の２つを併記し、諫早湾締め切りに関する結論を下していない。

委員会報告以降、シミュレーションモデルを用いた研究成果が数多く報告されたので、それを中心に議論を進めたい。この議論を進めるためにはＭ２分潮とｆ値の意味を理解しておく必要があるのでその意味から議論する。

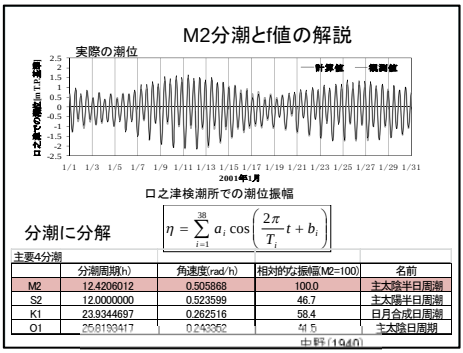

図 34　M2 分潮の解説

図３４は、ある地点における潮位を示したもので、振幅の大きい期間が大潮で、振幅の小さい期間は小潮と呼ばれる。このような周期性を有する現象は、sin、cos といった正弦関数または余弦関数の有限個の数式の和で示すことができる。これはフーリエ（Fourier）級数展開と呼ばれる。下の欄に計算に用いた４つの周期Ｔｉと、その成分の大きさ ai の大きさを示している。潮の干満は主として月と太陽の引力によって生じる。表に示した４つの分潮の中で最大ものはＭ２分潮と呼ばれ、月の引力によって引き起こされ、ほぼ１２時間（半日）の周期を有している。潮の干満は大潮・小潮を繰り返しているので振幅が大きくなったかどうかを議論することが難しい。干満の差に最も大きく寄与するＭ２分潮の振幅の経時変化を議論することが多い。

図３３は、大浦、三角、口之津等のＭ２分潮の経時変化を示したものである。図から明らかなように、Ｍ２分潮は１８．６年周期の明確な周期性を有している。また、同時に長期的に振幅が減少していることも見て取れる。Ｍ２分潮に周期性が起こる理由は、地球が太陽の周りを回るときの公転面と、月が地球の周りを回転するときの公転面とが５°ずれていることにある。諫早湾が締め切られた 1997 年は、18.6 年周期で最大となる年で、それ以後は、諫早湾は勿論、世界中のどの海域でも潮位差が減少することになる。

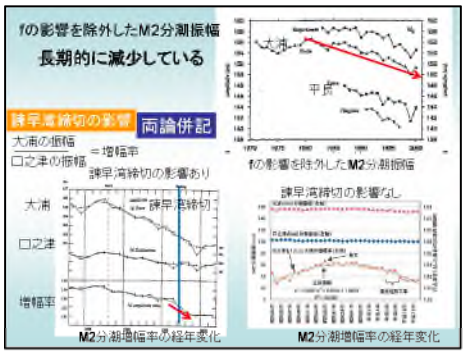

図 35　諫早和締め切りが潮位に与えた影響論争

図３５の上の図は、18.6 年周期の

影響分を除去したM2 分潮の経年変化を示したものである。佐賀県大浦、長崎県平良、その他の潮位観測点において 198 年頃から次第に振幅が減少していることが理解できる。

環境省報告書は、諫早湾締切が有明海の潮位に与えて影響についても考察を加えている。大浦の 18.6 年周期の影響を除去したデータを用い、有明海の入り口である口之津の潮位振幅に対する大浦の潮位の比率（増幅率）が締切前の 1.54 から締切後は 1.52 に減少したことから、諫早湾締切が有明海の潮位振幅を減少させたとの説があることを紹介している。それに対し、同様のデータを用い、1968 年（昭和 43 年）から 2000 年（平成 12 年）の長期的な変動を見ると口之津に対する大浦の増幅率は、局所的に多少のぶれはあるものの、1.51 から次第に上昇し、1985 年（昭和 60 年）ごろ最大値 1.54 を示し、次第に減少していることを示し、諫早湾締切の影響を口之津に対する大浦の増幅率から論ずることは無意味であるとの説を述べている。すなわち環境省報告書は両論を併記して、結論を示していない。

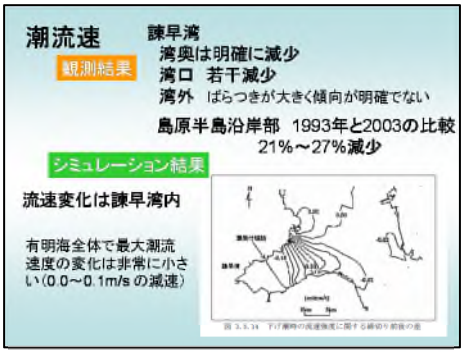

図 36　諫早和締め切りが流速に与えた影響

潮流速について環境省報告書は、潮流速の観測結果から、諫早湾内は明確に流速が減少しているが、諫早湾外（有明海中央部）に至ると、計測結果はばらつきが大きく傾向が明確でないとしている。ただし、島原半島の沖合では 1993 年と 2003 年の観測結果から、非常に大きな潮流速の減少（21%～27%）が起こっているということ報告があることを示している。

潮位・潮流速に関する田井明氏の研究成果

九州大学大学院博士課程（当時）の田井明氏は、博士論文「有明海における潮汐・潮流ならびに水質の変化とその要因に関する研究」で、潮位観測所で得られた長期間の潮位データを詳細に分析することで、諫早湾締切前後における潮位の変動特性を明確にした。併せて、独自に開発した有明海の流動モデルを用いて、長期間にわたる潮流速の変化を明らかにしている。環境省報告書以後

の顕著な研究成果としてその内容を報告する。

図３７左図は、口之津を基準としたときの大浦、三角のM2 振幅の増幅率の長期的変化を、右図は有明海の湾外に位置する長崎を基準としたときのその増幅率を示したものである。口之津を基準としたときの大浦の増幅率は、1970 年から 1985 年にかけて増加し、2000 年にかけて減少（環境相報告書と同様）した後、2007 年にかけて増加に転じていることを示している。一方、湾外の長崎を基準として増幅率を取った場合、18.6 年周期で変動するｆ値と逆位相で変動する性質があることを示している。また、図３８に示した有明海の外にある長崎に対する大浦の増幅率から、M2 分潮の振幅が大きいときには増幅率が減少し、M 2 分潮の振幅が小さい時期には増幅率が増加するという、非線形的な性質があることを示している。その原因として「海底摩擦や最も狭くなる湾口の早崎瀬戸で生じる地形性渦流によるエネルギー損失等の非線形作用が考えられる」としている。

また、図３９では、長崎に対する大浦の増幅率を年代別に区分して表示し、締切以前は非線形性が大きかった（逆勾配の傾きが急）のに対し、締切後は非線形性が弱まり（逆勾配の傾きが緩やか）となってお

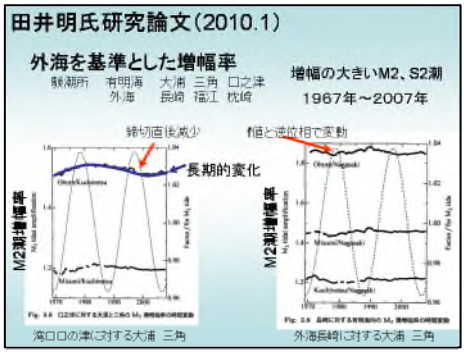

図 37　湾口・湾外を基準とした潮位増幅率

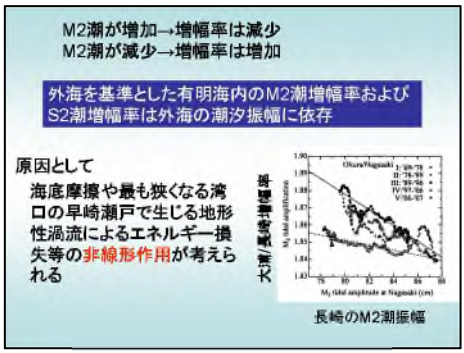

図 38　潮位増幅率の非線形性

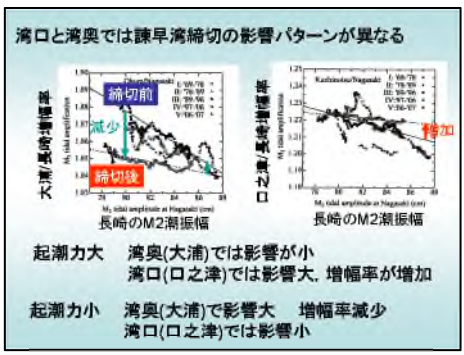

図 39　潮位増幅率の非線形性の変化

り、「締め切りが有明海内の非線形効果を抑制したものと推察される」としている。非線形性が弱まって増幅率が減少する傾向が継続するようだと潮位の減少が継続することになるので注意深く継続的な観測が必要である。

環境省報告書に示された諫早湾締切の影響に関する両論併記に対する新たな知見として、田井氏の次の指摘を述べておく。「諫早湾潮受け堤防締め切りによる湾内の潮汐応答特性の変化を検討する際に、湾口の口之津を基準にすると，大浦での潮汐増幅率の減少を過大に見積もる可能性があることが示された。」

図４０は、厳原（対馬）及びハリファックス（カナダ北大西洋）における 18.6 年周期を含むM2 分潮振幅（破線）と 18.6 年周期特性を除去したM2 分潮振幅長期変動を示したものである。何れの地点においてもM2 分潮振幅は長期的に減少していること示している。

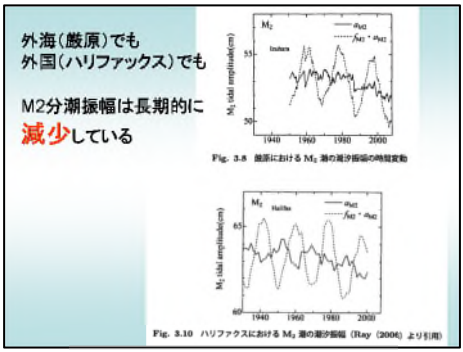

図 40　M2 分潮の長期的変化

以上のことから、田井氏は「2000 年前半は過去１世紀間で最も小さな潮位・潮流速が生じていた期間であったと考えられ、このことと近年の水環境異変との関連性について今後検討する必要がある」としている。傾聴に値する意見であり、今後の研究成果に期待したい。

潮流速に関するシミュレーションモデルによる検討

図４１は、九州大学で独自に開発した流動モデルを用いてM2 分潮のみの潮流速計算を行い、諫早湾締切直前の 1980 年代と 2000 年代のM2 分潮潮流振幅の変化量（左図）と有明湾奥部と有明海東部の海岸が干拓される以前 1900 年代 2000 年のM2 分潮潮流振幅の変化量（右図）を示

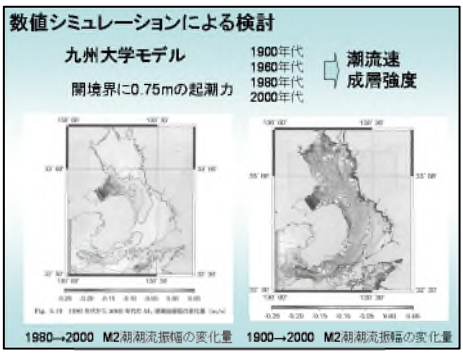

図 41　M2 分潮潮流速の変化

したものである。諫早湾締切の影響は、当然のことながら諫早湾に強く表れ、湾内の潮流速は極端に減少している。このことにより、潮流速の減少により撹拌力が減少し貧酸素が発生しやすくなったとする有明海モデルは、諫早湾においては完全に適合していることが納得できる。また、締切の潮流速の減少は湾口北部太良沖、島原半島の彎曲部まで広がっている。ただし有明海湾奥部の佐賀県沖、福岡県沖では締切による潮流速の減少は起こっていない。また、1900年初頭と 2000 年のM2 分潮の潮流速振幅の変化量は有明海全域で起こっており、特に有明海湾奥部では大きな潮流速の現象が起こっている。有明海湾奥部は、戦前・戦後を通して実施された大規模な干拓によって潮流が大幅に減少し、上下撹拌力が衰え貧酸素が発生しやすい海になったものと推測することができる。図４２は18.6 年周期の最大･最小振幅でどの程度の流速の差が発生するかを示したものである。最大となる 1997 年から最小となる 2010 年頃では湾奥部を含む有明海全域で流速差が生じている。

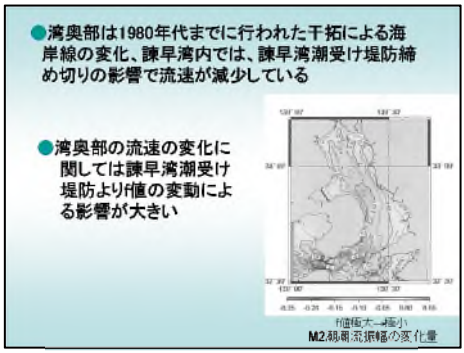

図 42　M2 分潮潮流速の変化（ｆ値）

諫早湾締切前後の環境場の変化（ＪＳＴモデルによる解析）

科学技術振興調整費（JST）重点課題研究プロジェクトは、プロジェクトで開発したモデル（ＪＳＴモデル）を用いて、1930 年代、1950 年代、1977 年、1983 年、1990 年、2000 年～2005 年（毎年）のシミュレーションによる検討を行っている。図４３には、計算に使用した海域面積、ｆ値、淡水流入量、汚濁負荷量等の入力条件を、2001 年を基準の１としたときの比として示している。図４４は、有明海を 12 のエリアに分割し、ある場所に

JSTモデルによる解析

計算条件

計算条件	1930s	1950s	1977	1983	1990	2000	2001	2002	2003	2004	2005
2001年対比											
海域面積	1.043	1.043	1.024	1.024	1.024	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
F値(M2分潮)	1.000	1.000	1.030	0.992	0.972	1.012	1.000	0.988	0.976	0.967	0.961
淡水流入量	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.883	1.000	0.817	1.184	1.070	0.849
COD 負荷量	0.630	0.800	1.040	1.052	1.035	0.785	1.000	0.703	0.947	0.879	0.851
TN 負荷量	0.460	0.590	1.209	1.248	1.215	0.904	1.000	0.894	1.093	1.025	0.952
TP 負荷量	0.490	0.630	1.164	1.284	1.268	0.857	1.000	0.723	0.883	0.824	0.812
IN 負荷量	0.480	0.630	1.206	1.247	1.215	1.011	1.000	1.011	1.189	1.113	0.968
SS 負荷量	2.000	1.500	1.021	1.130	1.198	0.364	1.000	0.340	0.762	0.640	0.659
ノリ生産量(N)	0.011	0.108	0.521	0.664	0.568	0.503	1.000	0.858	0.812	0.987	1.071
酸処理剤使用量(P)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.268	0.787	1.000	0.780	1.093	0.973	0.932
施肥量(N)	0.000	0.000	6.123	2.809	0.096	2.909	1.000	3.893	3.334	2.854	1.764
懸濁物食者(C)	3.016	2.886	4.354	3.762	1.445	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
アサリ	2.010	1.846	1.635	1.151	1.441	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
その他	6.834	6.834	14.678	13.674	1.461	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2001年との差											
平均水面 [cm]	−9.1	−9.1	−8.1	−8.9	−5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図 43　計算に用いた条件

ついての年代ごとの環境要因の変化を示している。上の図は、Ａ２エリア（湾奥西部・佐賀県太良町沖）及びＢエリア（諫早湾）の鉛直拡散係数を年代別に示している。湾奥西部では諫早湾締切前後で全く変化していないのに対し、諫早湾では鉛直拡散係数が急激に低下しており、貧酸素の原因となっていることが理解できる。下の図はＡ２，Ｂ両海域における流入出量の変化を示したもので、太良沖（Ａ２）では大きな変化が見られないのに対して、諫早湾（Ｂ）では湾への流出入量が大幅に減少している。図　　は、湾奥西部（Ａ２エリア）における鉛直拡散係数と流出入の変化を、横軸にｆ値を取った図として示したものである。1997 年はｆ値が最大で、潮位差が大きいので流速が早くなり、鉛直拡散係数が大きくなる。一方、1990 年は反対に潮位・潮流速が小さい年なので、鉛直拡散係数が小さくなっている。1997 年、1980 年、1990 年は諫早干拓前で地形条件は全く同じなので、ｆ値の変化によって鉛直拡散係数は直線的（赤線）に変化している。諫早干拓後の 2000 年の条件をそのまま用い、ｆ値だけを変化させたときの鉛直拡散係数を同じ図上（緑線）に示している。2 本の直線の幅が諫早干拓の影響で、ｆ値の最大、最小時の差の 1／4 に留まっている。諫早湾締切が湾奥西部（Ａ２エリア）の鉛直係数に与えた影響はゼロではないが、ｆ値の変化による影響の 1／4 に留まっていることを理解しておくべきである。

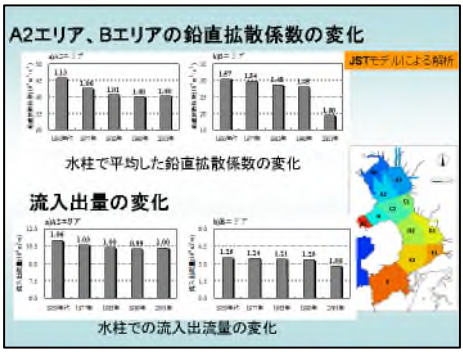

図 44　鉛直拡散係数の変化

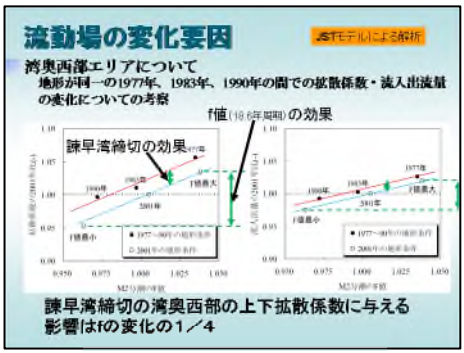

図 45　流動場の変化要因分析

個別要因の影響度

流動モデル及び低次生態系モデルまでのシミュレーションプログラムはほぼ完成できたと確信が持てたことで、貧酸素水塊の容積を評価指標としたときの

図 46　個別要因の影響度分析

個別の要素の寄与度を検討することができるようになった。図４６は諫早湾締切後の 2001 年を現状１．０とし、地形変化、底生生物、外海潮位、平均水面、流入負荷などの個別要因が、溶存酸素 2.1mg/L 以下の極めて厳しい貧酸素レベル（貝類の致死濃度）の累積容積（堆積×時間）をどの程度増加・減少させるかの変化率を示したものである。1 を超すと貧酸素水塊容積が現状より増加し、1 より減少すると貧酸素水塊容積が減少することを意味している。これらの解析は数値解析でしばしば行われる作業で「感度解析」と呼ばれるものである。

貧酸素水塊の増減に最も大きな影響を与えるのは流入負荷量で、現状より汚濁負荷量（全窒素等）30%減らすことができれば激烈な貧酸素はほぼゼロに減少させることができる。しかし、有明海に流入する負荷量の 6 割程度は森林等から河川を通して流入する自然由来のもので、人間が社会生活を営むことをほぼゼロにすることができなければ実現することは難しい。しかし、汚濁物質の流出規制を行った負荷量を 10%減少させることができれば貧酸素水塊を半分程度には減少させることができる。ただし、流入負荷量は有明海の生態系の基礎生産物である植物プランクトンの発生に重要な要因であるので、減少させることで有明海の生態系がどのように変化するかについて十分に検討しておく必要がある。瀬戸内海では総量規制を実施して流入負荷量を減少させた結果、ノリ養殖を始めとする漁業資源が減少し、栄養塩の統合管理を目指す動きがあることも記憶しておくべきである。また、アサリ貝を中心に二枚貝の漁獲がピークとなった 1980 年から 1990 年代（「豊穣の海」有明海と呼ばれた時代）の流入負荷量を想定すると貧酸素水塊の発生量が現状の 2 倍程度となることから、その時代に戻すことを考えてはならない

次に貧酸素水塊の減少に寄与する要因は、二枚貝を中心とする底生生物の賦存量である。二枚貝が爆破的に漁獲された 1985 年代の賦存量になれば激烈な貧酸素は現状の 15%程度にまで減らすことができるが、その様な漁獲量を期待することは現実的ではない。しかし底生生物を現状の 5 割程度増やすことがで

きれば貧酸素水塊の発生量を半分程度に減らすことができる。カキ礁の復元、アサリ貝、サルボウ貝等の養殖促進などの施策を進め、二枚貝を増やすことで貧酸素水塊の発生を減らす方策が考えられる最も現実的と言える。

また地形を諫早湾締切がなかった 1970 年代に戻せば、変酸素水塊は 30%程度減少する。しかし、このことは諫早湾締切堤防を全部撤去し、干拓地を元の干潟に戻すことを意味しているので、再生策としては現実的ではない。さらに、貧酸素を減らすことができるのは諫早湾が主で、有明海湾奥部の影響はそれ程大きくないことも理解しておく必要がある。

18.6 年周期による潮位・潮流速の変化が貧酸素水塊容積に与える変化は、それぞれ 20%の増減、トータル 40%程度の変化を与えることになる。

以上の結果は、有明海の環境因子の中で最も影響が大きいと思われる貧酸素水塊がどのような要因によって変化したのかの原因解明と、今後どのような対策が有効で、どの程度貧酸素水塊を減少させることができるかの最も基礎的な情報を与えているので、この解析結果を中心に議論が深まることが期待される。

泥分移動及び透明度

有明海環境の特徴は、阿蘇山の爆発で厚く滞積した火山灰系の微小粒子が、有明海に流入する河川から大量に供給されることで海岸の地先に広大な泥干潟が広がっていること、海中の泥分が多く透明度が低いことなど、主に泥に関する事項である。泥底質、泥干潟が広大に広がっていることで他の海域にはない独特な生態系と海域環境を形成している。泥の移動及び滞積の変化は、底質環境、底生生物の生息環境に直接的に影響するため、有明海の調査研究にとって重要な要因であることは環境省の評価委員会でも十分に認識されていた。しかし、底質の資料採取が困難なこと、泥干潟を移動する手段が潟スキー以外には考えられないことなどから、十分な調査が行われたとは言いがたく、わずかに浅海定線調査による透明度の調査と、熊本大学、その他の機関による間歇的な底質分布調査行われているだけであった。

図４７は、環境省報告書に掲載された浅海定線調査による 1974 年から 2003 年間の透明度の経時変化と透明度に関する環境省の認識を示している。報告書は「有明海の平均透明度は、ほとんどの海域で上昇。なお熊本市沖や湾奥西部の一部の海域において上昇が顕著との報告がある」としている。湾口部（緑色）から長洲（熊本県）−島原沖（紫色）までの海域では 1985 年頃から明らかに透

明度は上昇しているが、福岡県沖（桃色）、佐賀県沖（黄色）の湾奥部については、この図だけからは透明度が上昇しているとは言えない。環境省報告書以降、佐賀大学有明海総合研究プロジェクトは、浅海定線調査のデータを用いて多くの点で透明度の分析を行い、有明海奥部では、1970 年代から 1990 年にかけて上昇し、1990 年代は透明度が高い状態（澄んだ海）を保っていたが、2000 年以降は再び透明度が減少する状態（濁った海）に戻って来たことを示している。

図 47　透明度に関する環境省報告書の認識

底質について環境省報告書は「湾奥西部を中心に中央粒径値は 1957 年、1997 年、2001 年のデータを比較すると底質の泥化傾向があると認められる」としている。また、1989 年と 2000 年の底質調査結果から「有明海湾奥西側から中央部にかけて泥化が進んだものと思われる」としており、一般的には有明海は泥化傾向にあるとの認識が定着した。

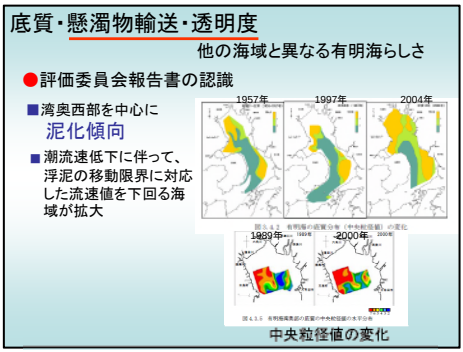

図 48　底質に関する環境省報告書の認識

ところが、2009 年（平成 21 年）に出された「平成 21 年度有明海・八代海再生フォローアップ調査報告書」によると、2000 年と 2009 年底質の比較では有明海湾奥部で実施された 50 の測定点のうち、細粒化（泥化）が認められたのは 1 点のみで、20 点ではむしろ粗粒化（砂化）していた（図４９左参照）。このことから 2000 年以降、有明海奥部の底

図 49　底質の変化と懸濁物の輸送機能

質は泥化から粗粒化の方向に向かっていることが確認できる。

また、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト速水准教授は、有明海湾奥西部から諫早湾・島原半島沖の設けた測線で流速観測及び水中の泥分解析を行い、上層と低層における流れの分布及び諫早湾から湾奥部への泥移動のメカニズムを解明した。

有明海における流れ場と泥移動との関連、長期的な堆積動向、浮泥の挙動など、泥の移動・堆積に関する基本事項の解明と、流れ場と泥移動を組み合わせた泥移動解析シミュレーションモデルの確立は、有明海環境問題に残った最大の科学的課題である。

有明海環境再生策の検討

先に述べた、科学技術振興調整費（JST）重点課題研究「有明海生物生息環境の俯瞰型再生と実証試験」、環境省有明海貧酸素水塊発生シミュレーションモデル調査業務のいずれも、再生策の有効性を検討することを目的としたプロジェクト型調査研究であったことから、設定された調査項目に関する各種再生策の有効性を検討している。

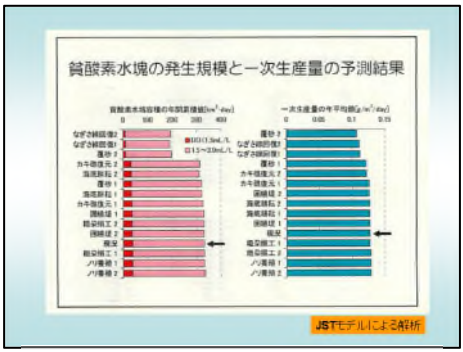

図 50　提案された再生策の有効性検証

貧酸素水塊を評価項目とした場合の各種再生策の有効性は、ＪＳＴプロジェクトが示した図　から読み取ることができる。すなわち、溶存酸素 2.1mg/L 以下の激烈な貧酸素の累積容積を減少させる有効な手段は、負荷量減少と二枚貝を中心とした底生生物の増加で、諫早湾の締切堤を全部取り除き、干潟を復元すると、諫早湾の貧酸素はほぼ消滅することができるが、特に貧酸素発生の頻度が高い有明海湾奥西部にまでは効果は期待できない。

このことを別の表現で示したのが図５０左側の図である。渚線の回復が最も有効な再生策であることが示されているが、有明海湾奥部の海岸堤防を除去し、現在干拓地になっているところにまで海水を流入すれば、貧酸素水塊容積は半分程度に抑制することが可能であることを示している。粗朶搦工、海底耕耘、

覆砂などは、再生策実施可能な面積が限られることから、貧酸素水塊容積を指標にする限り、その有効性は期待できない。さらに、ノリ養殖を現状に半分とした「ノリ養殖１」、ノリ養殖を全廃した場合「ノリ養殖２」では、有明海環境悪化の主原因の一つと指摘されている施肥と酸処理剤を漁獲割合に応じて減じているが、ノリによる吸収・除去がなくなることから貧酸素水塊容積はむしろ増加することになる。

貧酸素を評価指標とした同様の計算は、環境省有明海貧酸素水塊発生シミュレーションモデル調査業務でも実施されている。本プロジェクト業務では、実際に検討されている実施可能な流入負荷量削減、二枚貝の資源量増加を対象としているため、その効果は最大 10%程度の減少に留まっているが、いずれもＪＳＴプロジェクトが示したものと同様の結果を得ている。（図５１）

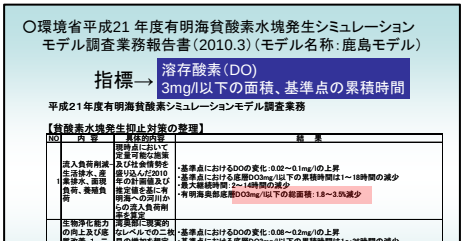

図 51　提案された再生策の有効性検証

（鹿島モデル）

図５２は、同じプロジェクト研究が実現可能性を無視した仮想的な計算条件を与えて計算した結果を示している。流入負荷量を 15%～30%削減した場合、二枚貝を 1970 年代の賦存量に増加させた場合などの条件に比較して、18. 6 年周期で起こる月の昇交点運動による最大と最小の差が 22%～34%二及ぶとの指摘が印象的である。

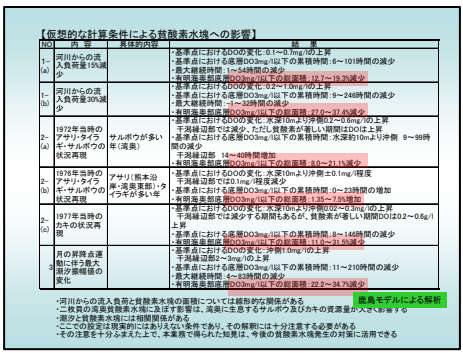

図 52　提案された再生策の有効性検証

（鹿島モデル）

図５３は、低次生態系モデル（JST モデル）で各種再生策を実施した場合の環境変化を条件として、各再生策によるアサリ＋サルボウの 10 年後の漁獲量、濾水量、生産額の予測結果を高次生態系モデルを用いて求めたものであ

る。可能な限りの海域で覆砂及び海底耕耘を行えば、二枚貝の漁獲量、生産額は増加することを示しており、これらの再生策は、二枚貝の増加に直接的な効果を示すことが理解できる。覆砂や海底耕耘が漁業資源としての二枚貝増加の観点からは有効であることは間違いない。なぎさ線の回復は二枚貝の増加にも有効であることは明白で、併せて貧酸素水塊の減少をもたらすことからも根本的な解決策であることが理解できるが、有明海の湾奥部の海岸堤防を全て撤去し、干拓地に海水を入れる再生策は現実的とは言えない。

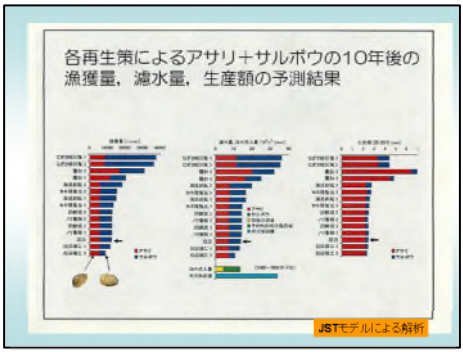

図 53　再生策の二枚貝に対する有効性検証（JST）

今後の課題

今後の課題として私が関心を持っていることを最後に述べておくこととする。環境省報告書においても、それ以後の研究においても、潮位・潮流速、溶存酸素（ＤＯ）、底質分布といった物理化学的な個別の環境要因の挙動及びその関連性の解明とそれに関する研究者間の議論は相当に深化し、一定の共通認識に到達したと言える。また、生物・生態系については、プランクトンレベルの低次生態系までは一定の理解が深まり、シミュレーションモデルによる計算が行えるレベルまで到達することができた。さらに、魚類等の高次生態系レベルにおいても、個別魚種の産卵、稚仔魚の移動と云った生活史については多くの研究成果が蓄積されてきた。今後は、物理化学的な環境要因の解明と生物・生態系の解明を結び合わせるような調査・研究が統一的・総合的に実施されることが望まれる。

有明海に関する調査研究は、有明海異変以降の有明海環境の実態解明を求める社会的な後押しもあって、これまで継続してきた離散的な浅海定線調査に加えて、観測塔、モニタリングを新設して連続観測データが取得できたこと、国、大学等の機関で大規模な研究プロジェクトが結成され若手研究者が参入して新たな研究テーマに挑戦することができたことなどにより、一気に進展した。しかし、有明海問題に関する関心が司法、政治の世界に移行するに従い、科学的

関心が薄れ、研究費の取得が困難となり、因子間の関係性を解明するためには絶対に継続することが必要なモニタリングポストによる連続観測も困難になりつつある。また、研究費の減少は、新たな若手研究者の参入を困難にしたばかりでなく、これまで育ってきた若手研究者を有明海問題から手離すことにもなっている。

しかし､調査研究が必ずしも十分でないと指摘されている懸濁物輸送(浮泥、堆積、底質）の解明とモデル化、非水産生物の実態解明、シミュレーション技術の精度向上、持続性と環境との調和を目指して安定的漁業技術の開発といったテーマに、資金と人材を投入して調査研究が継続できるように模索する必要がある。

これらの課題に主体的に取り組むべき国及び県は、有明海問題の当事者として混乱に巻き込まれて、主体的に動くことができなくなっている。これまで述べてきた問題の解決に向けて一歩踏み出すには、異なる分野の研究者が交流・連携し、討議を深め、有明海再生、むしろ新たな有明海像を求める有明海創生の到達目標とそれに至るロードマップを国・県に提言して調査研究体制を構築する必要がある。それができなければ有明海環境問題に関し、これまで相当額の研究費と人材を投入して蓄積してきた知見が無意味なものとなってしまう

謝辞

本報告は、2011 年（平成 23 年）2 月 19 日にＮＰＯ法人有明海再生機構主催で実施した「有明海のなぜ？第 5 回シンポジウム」で発表した「有明海調査研究で科学技術はどこまで解明したか」と題する基調講演の報告書を、図面は発表時のものを使い、文章を全面的に書き改めたものである。

基調講演は、2005 年（平成 17 年）に 10 年間の活動を目途に発足した有明海再生機構の活動が 5 年を経過したことで企画し出版直前にあった「有明海中間まとめ−有明海環境異変を科学技術はどこまで解明したか−」の内容を、これまで有明海再生機構の活動に参加した研究者、環境省有明海・八代海等総合調査評価委員会の委員長を始めとする主立った有明海研究者の前で発表し、有明海再生機構が取りまとめようとしている内容が妥当なものであるかどうかを評価して戴くために、当時副理事長であった荒牧が発表した。内容を理解するには相当の専門知識を必要とするが、参加者の多くが有明海問題に関する基礎的・

専門的知見を有する方々だった上、発表時間が 40 分と短かったことで、基礎用語の解説、研究結果の内容までは説明できなかった。

今回、報告書を冊子として出版するとのことで加筆修正を求められたが、部分的な修正では、専門家でない方が理解することは困難だと考え全面的に書き換えることにした。ただし、2011 年当時の到達点を明確にするため、使用する図面は、発表時のものをそのまま使うことにし、2011 年以降の新たな知見は加えていない。今（2018 年）の時点に立ってみると、適切でないと思われる点、別の視点で書き加えたい点もあるが、敢えて当時の立地点を尊重することとした。

著者は、工学部土木工学の構造力学・数値力学系の研究者であり、環境科学を専門とする研究者ではない。環境省の有明海・八代海等総合調査評価委員会が発足した当時、佐賀大学の研究担当副学長として、佐賀大学に設置した「有明海総合研究プロジェクト」の責任者を務めていたことで、委員会の臨時委員に参加する機会を得た。著者にとっては全て初めて聞く言葉、初めて聞く内容であったが、大学の研究担当副学長としてどうしても理解したいテーマであったので、委員会（委員長代行）及び小委員会（委員長）の全てに参加するとともに、関係する研究会等にはできる限り参加して内容を理解することに努めた。加えて、有明海再生機構内に設置した干潟分科会、開門部会等の部会活動にも積極的に参加し、専門家に質問を繰り返して理解を深めた。

有明海再生機構が出版した「有明海中間まとめ−有明海環境異変を科学技術はどこまで解明したか−」はそんな素人の著者が有明海環境問題に関して科学技術が今どこまで到達していて、どこが未解明であると考えているかを聞き取って素直に書き記したものであり、私のオリジナルな研究など存在しない。幸いなことに、有明海再生機構の参加していた多くの専門家に意見を求めたところ、「ほぼ妥当である」との意見を多く戴いたので、最後の段階として有明海・八代海等総合調査評価委員会須藤委員長を始めとする外部の研究者の意見を聞くために「中間まとめ」の核心の部分を取りまとめて発表した。次ページ以降にその時戴いた意見を掲載するので、その評価を確認して欲しい。

先に述べたように、この報告書には著者のオリジナルな成果は全く入っていない。その内容は全て有明海研究に関わった研究者の成果である。報告書の中にその出展を明確にしていないものも多く含まれている。全部の出展を明示することができなかったことをお許し戴きたい。これまで多くの研究成果を発表

された研究者の皆様に敬意を表し、謝辞を申し述べたい。