二枚貝の減少、魚類等の漁獲量 (資源量) の減少、海苔の色落ちなどの有明海異変と呼ばれる現象は、底質中の硫化物の増加、貧酸素水塊の発生、赤潮の大規模化等の要因によって引き起こされているが、その要因変動は、潮流速の低下、陸域からの負荷量増大による富栄養化に依るものであるというように、複雑な相関関係を有している。特に、二枚貝の減少が赤潮の発生件数の増加・大規模化を加速し、有機物の増大により貧酸素水塊発生の大規模化・長期化をもたらし、そのことでさらに二枚貝が減少するといった負の連鎖を引き起こしている。

このように多くの要因が複雑に関連した事項を定量的に理解し、環境変動の原因解明と再生策の検討を行うためのシミュレーション解析技術の確立が強く求められている。有明海再生機構と関連の深い研究プロジェクト、佐賀大学有明海総合研究プロジェクト、文部科学省科学技術振興調整費重点課題解決型研究「有明海生物生息環境の俯瞰的再生と実証試験」、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」のいずれもがシミュレーションモデルの確立とシミュレーションモデルを用いた異変の原因解明と再生策の提示を研究目的に設定していたことは、シミュレーションモデルによる解析の重要性を示すものである。

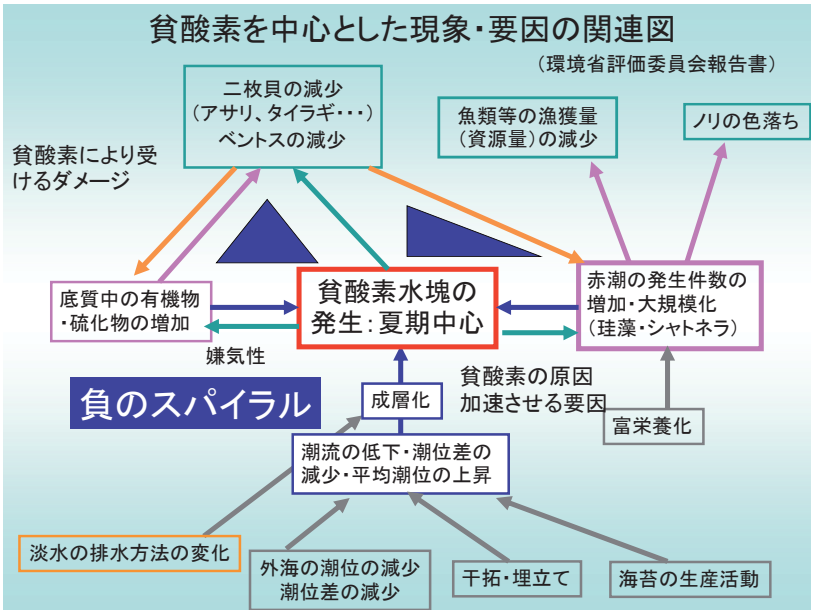


図 -32　貧酸素を中心とした現象・要因の相関図

2. 1　シミュレーションモデルとは

シミュレーションモデルは、有明海で発生している事象とその要因間の関連性を定量的に理解し、原因の解明と再生策の検討に利用するとことを目的に構築される。シミュレーションモデルの構築は以下の手順に従って行われる。

1) 事象・要因間の関連図を基に、エネルギー保存則、質量保存則等の各種原理、要因間の関係式等を用いて数理モデルを作成する。

2) 現象間をつなぐ係数を現場実験、実験室実験等で確定する。

3) 地形データ、底質・浮泥のデータ、気象データ、生物分布データなどの境界条件、初期条件を確定する。

モデルの構築が完成したら、有明海現地で観測された事象を矛盾なく説明できるかの検証を行わなければならない。有明海では 1972 年以降大潮満潮時に計測が行われてきた浅海定線調査データと、各種機関が観測塔、係留ブイ等を設置して取得した連続観測データが検証に利用することが可能である。解析結果が各年度の河川流出量、日照・風等の気象条件の変動に対応して潮位・潮流速、塩分濃度、溶存酸素量等の変量、観測データを精度よく再現できていることを検証しなければならない。現状を十分に再現できていることを総合的に検証したシミュレーションモデルだけが過去から現在に至る事象変化の原因解明、有明海再生にどのような施策が有効であるかを検討する手段に用いることが可能となる。

2．2　シミュレーションモデルの構築状況

有明海再生機構がシンポジウム、研究部会、講演会等でその成果の発表を聞く機会があった有明海シミュレーションモデルを表 -2 に示す。九州大学の田井が解析に用いたモデルは POM(Princeton Ocean Model) を基礎とした流動だけの解析モデルであるが、楠田を研究代表者とする科学技術振興調整費 (JST) 重点課題型研究「有明海生物生息環境の俯瞰的再生と実証試験」で使用されたモデル (JST モデル)、環境省受託調査「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」で使用されたモデル (鹿島モデル) 及び佐賀大学有明海総合研究プロジェクトで使用されたモデル (佐賀大学モデル) の 3 モデルはいずれも流動モデルに懸濁物輸送、水質、底質サブモデルなどを付加し、プランクトン、貧酸素水塊の発生と消長を解析することができる「低次生態系モデル」を構築している。佐賀大学モデルによる成果は一部にとどまっておりその精度を議論する事はできないが、前 2 者のモデルについては各機関が実施している連続モニタリング結果、長年にわたって調査が行われてきた浅海定線調査結果、各大学が実施した継続的調査等の実測値との精度検証を行って、十分な精度を有していることを確認しているので、有明海の環境因子の中で最も重要だと考えられている貧酸素水塊の発生と消長に関する解析はほぼ実用の段階に達しているものと考えられる。

ただし、この 2 つのプログラムは、プロジェクト研究チーム及び環境省から受託した企業が開発・改善してきたものであり、求められた成果は公開されるものの、プログラムコード、境界・初期条件の設定、使用した物性定数、フラックス係数等は公開されないため、他者が詳細に検証することはできない、九州大学、佐賀大学が使用したモデルは原則としては公開型であるので、一定期間を過ぎた後はコード、定数等が公開されるので、他者による検証ができる。有明海研究の継続の点から公開型で実用可能なシミュレーションモデルの完成が待ち望まれている。

低次生態系モデルの比較

	JSTモデル	鹿島モデル	佐賀大学モデル
基礎プログラム	POM：Princeton Ocean Model	DELFT3D	FVCOM Ver.2.6
公開・非公開種別	非公開	非公開	公開
サブモデル構成	流動サブ、懸濁物輸送サブ 水質・底質・底生生物	流れ解析（DELFT3D－FLOW） 水質解析 DELFT3D－WAQ（水中の計算） sub-model SWITCH（底泥中の計	流動モデル 懸濁物輸送モデル 低次生態系モデル
水平メッシュ	900m格子	湾奥　250m×300m（一般直交） 湾口　350×450m	湾奥　500m（三角形非構造格子） 開境界付近　1200m
鉛直メッシュ	σ座標　20	σ座標　20（一様）	σ座標　10

流動解析モデル

	九州大学モデル
基礎プログラム	POM：Princeton Ocean Model
公開・非公開種別	公開
サブモデル構成	
メッシュ構造	東西約250m　南北約310m
鉛直メッシュ	σ座標　10

表 -2　有明海シミュレーションモデル一覧

JST モデル

低次生態系モデルは、浮遊系の流動サブモデル、懸濁物輸送サブモデル、水質サブモデル、底生系の底質サブモデル、底生生物サブモデルにより構成されている。流動、懸濁物輸送の 2 個のサブモデルはそれぞれに独立した非結合モデルで、水質、底質、底生生物の 3 個のサブモデルは各々の計算項目の相互作用を非定常に解析する結合モデルとなっている。

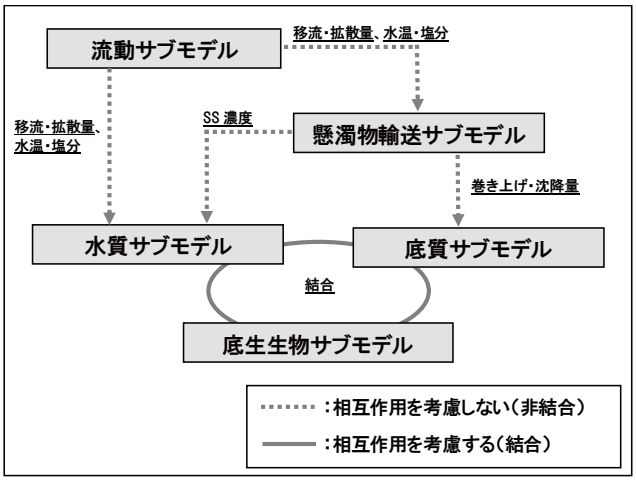


図 -33　サブモデル関連図 (JST モデル)

水平方向の計算格子は 900 ～ 2700m の可変長格子で、有明海はすべて 900m の正方格子で分割されている。計算タイムステップは､流動サブモデルの外部モードは 2 秒､内部モードは 20 ～ 30 秒､懸濁物輸送サブモデルは 20 秒、水質サブモデルは 30 秒、底質サブモデルおよび底生生物サブモデルは 3 秒となっている。

JST モデルでは、指標種として選択したアサリ、サルボウ、スズキが、低次生態系モデルで解析された環境下でどのように生成、消失するかを解析するために、指標種生活史モデルを構築している。

また、それ以外に干潟の熱収支、泥質干潟生態を解析する干潟モデルと水流出解析、負荷量解析を行う流域モデルを独立に作成している。

	モデル	サブモデル	計算領域，水平格子，層分割	計算タイムステップ	主な変数
JSTモデル	指標種の生活史モデル	アサリ サルボウ スズキ	主漁場35～45 格子浮遊幼生期は有明海全域（流動サブモデルと同じ）	1 日（一部，1 時間）．浮遊幼生の輸送・着底は流動サブモデルによる	漁獲量，CPUE
	低次生態系モデル	流動 （浮遊系）	有明海～外海を900～2,700m の可変格子，有明海は900m 格子．3 段（水深0～3m，3～15m，15m～海底）×5 層＝(最大)15 層	平面二次元モード：2 秒，鉛直三次元モード：20～30 秒	潮位，流向・流速，水温， 塩分
		懸濁物輸送 （浮遊系）	同上（ただし，有明海のみ）	20秒	SS（粘土，シルト，砂の3 区分）
		水質 （浮遊系	同上（ただし，有明海のみ）	30秒	有機物，栄養塩，DO，ODU，植物プランクトン（Chl.a），ノリ,動物プランクトン
		底質 （底生系）	有明海の浮遊系格子を水深，Mdφの特性を考慮して連結させた71 ボックス（過去の地形は72 ボックス）．泥深10cm を層厚0.02～3.50cm（表層近くを細かく分割）の10 層	3 秒	有機物，栄養塩，DO，遷移金属元素類（Mn 等）
		底生生物 （底生系	同上	3秒	付着藻類，懸濁物食者， 堆積物食者
	干潟モデル	熱収支	熊本港野鳥池6 ボックス水中1 層，底泥（1m 深）10 層	30 秒	水温，泥温
		泥質干潟生態系	熊本港野鳥池3 ボックス水中1層，底泥は好気層・嫌気層の2 層	30 秒	有機物，栄養塩，植物プランクトン（Chl.a）
	流域モデル	水流出解析	有明海流域を500m 格子	1時間	淡水流入量
		負荷量	一級河川ごとのL-Q 式等	1時間	流入負荷量

表 -3　JST モデルの概要

鹿島モデル

鹿島モデルは、デルフト水理研究所が開発した DELFT3D をベースに、鹿島と同研究所が共同研究により幾つかの機能 (モジュール) を付加した「水域環境シミュレーションシステム」(DELFT3D・鹿島モデル) のことである。DELFT3D は大きく、図 -33 に示す流れ解析システム (DELFT3D-FLOW)、水質解析システム (DELFT3D-WAQ) などのサブシステムから構成されている。計算は、まず流れ解析システム (DELFT3D-FLOW) を用いて流動場の計算を行い、続いて流動場の計算結果を用いて、水質解析システム (DELFT3D-WAQ) により水質の計算を行う。なお水質シミュレーションは、DELFT3D-WAQ サブモデルの一つである底泥系モデル SIWTCH を加えており、DELFT3D-WAQ により水中の水質計算を行うと共に、SWITCH により底泥での生物・化学反応をダイナミックに計算可能にしている。

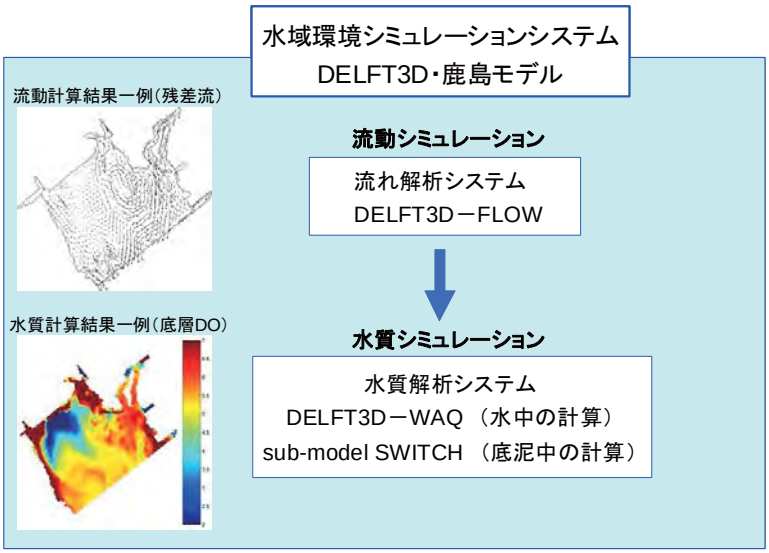


図 -34　サブモデル関連図 (鹿島モデル)

	モデル	サブモデル	計算領域，水平格子，層分割	計算タイムステップ	主な変数
DELFT3D・鹿島モデル	流れ解析システム DELFT3D－FLOW	流動（浮遊系）	湾奥部の水平メッシュは約250×300m、湾口部は最小で約350×450m 鉛直メッシュは、σ座標を用い、すべての領域で20 層（一様分割）		水位，流速３成分，水温，塩分，鉛直渦動粘性係数，鉛直渦動拡散係数，乱流エネルギー(k)及び乱流エネルギーの逸散率
	水質解析システム	水中の計算 DELFT3D－WAQ	湾奥部の水平メッシュは約250×300m、湾口部は最小で約350×450m 鉛直メッシュは、σ座標を用い、すべての領域で20 層（一様分割）		植物プランクトン、懸濁態有機物（炭素・窒素・リン）、溶存態有機物（炭素・窒素・リン）、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、リン酸態リン、溶存酸素
		底泥中の計算 sub-model SWITCH	酸化層（3層）、還元層（1層）		懸濁態有機態炭素,懸濁態有機態窒素,懸濁態有機態リン、懸濁態有機態炭素、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、全無機態リン、無機態懸濁物質

表 -4　生物生息モデルの概要 (鹿島モデル)

流れ解析システムの特徴をまとめると以下の様になる。

●水平方向に直交曲線座標系を使用し、水際線の特性を考慮して高精度にしかも効率的な計算が可能である。

●鉛直方向にはσ座標系を使用し、水深によらず鉛直方向の分解能を維持でき、浅水域をも高精度に解析可能である。

●σ座標の欠点である、急峻地形での擬似拡散を防ぐため、“ クリープ補正 ” と呼ばれるスキームを開発し、計算精度を向上している。

● 高精度な汀線移動計算により干潟域の干出・冠水を再現できる。

●鉛直乱流拡散の評価を高精度に行うため、2 方程式乱流モデルである k - ε モデルを適用。 k - ε モデルは密度成層のシミュレーションにも優れている。

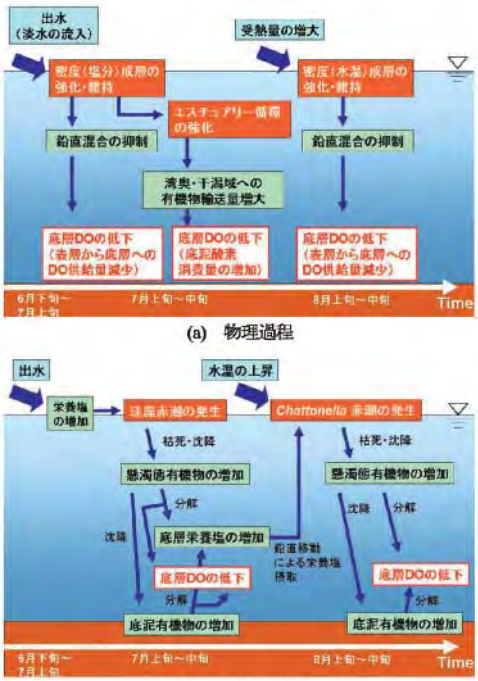


図 -35　貧酸素水塊形成過程 (鹿島モデル)

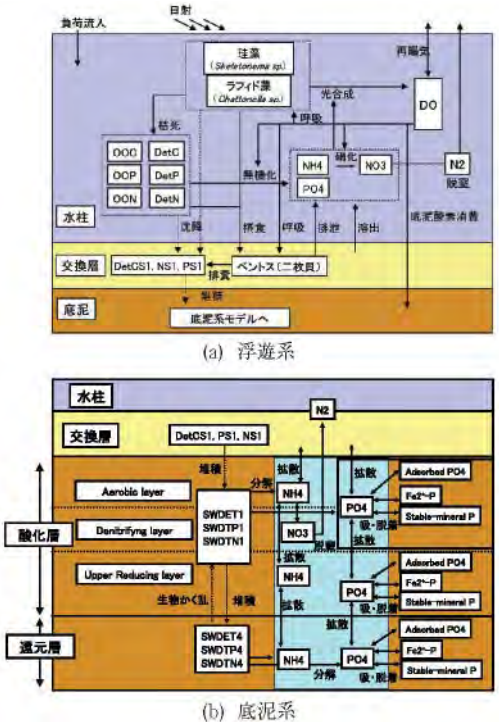


図 -36　生態系モデルの構築 (鹿島モデル)

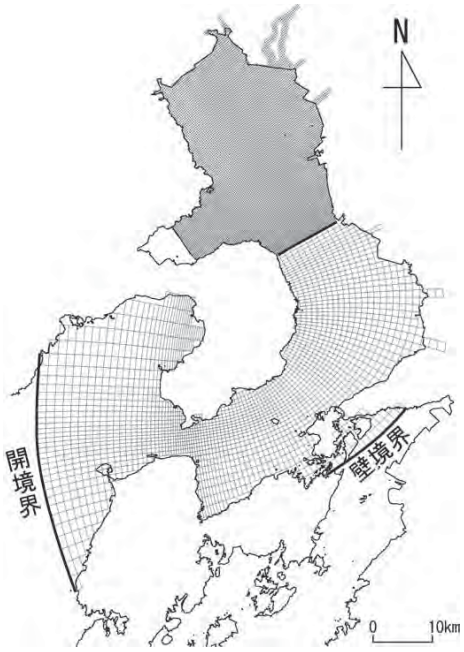


図 -37　有明海計算用メッシュ (鹿島モデル)

水質解析システムの特徴をまとめると以下の様になる。

●浮遊系では植物プランクトンを中心とした低次生態系をモデル化している。

●貧酸素水塊を表現するために重要な鉛直拡散係数は k- ε 乱流モデルを使用して計算された流動計算の結果を用いている。

●有機物の沈降・堆積に伴う底泥の酸素消費量変化およびリン酸溶出量の変化をダイナミックに計算可能である。

佐賀大学モデル

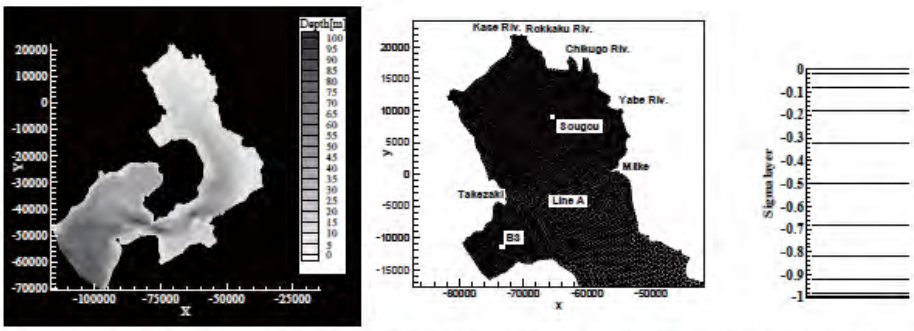
佐賀大学有明海総合研究プロジェクトでは、FVCOM(Ver. 2.673) を用いて有明海モデルの構築を行っている。FVCOM は水平方向に三角形の非構造格子、鉛直方向にσ座礁を適用した有限体積法海洋モデルである。

計算領域および有明海奥部・諫早湾付近の水平格子 , および鉛直格子を図 -38 に示す。地形は、JBIRD 及び JODC500m メッシュを合成したものを使用している。開境界は橘湾・天草灘のみとし、八代海との接続は考慮していない。計算格子間隔は湾奥で 500m、開境界付近で 1200m を用いている。σ層の数は 10 である。開境界では 6 分潮 (M_2, S_2, N_2, K_1, O_1, P_1) を与えることとし、有明海奥部の係留観測点 Tx で 2006 年夏に得られた調和定数が再現されるよう調節した値を使用し、淡水フラックスについては、一級・二級河川及び諫早湾干拓潮受け堤防からの流入を考慮している。海面熱フラックスは計算領域内で一様とし、佐賀の地上気象観測データ及び九州農政局諫早湾観塔 B3 における海面下 0.5m 水温を使用して求めている。風は計算領域内で一様とし、国土交通省観測塔 (タワー総合) における観測値を使用している。

また、FVCOM をベースにした懸濁物輸送モデルも開発されている。元々 FVCOM に含まれている懸濁物モジュールは、ROMS98 上に構築された NCSTM (National Community Sediment Transport Model 99) を移植したもので、複数の粒子区分のサポート、底泥への多層モデルの適用など、優れた特徴を持っているが、凝集性のある泥、粘土には対応していないことをはじめとして有明海に適用するには問題があるため、これを一部改変して使用している。

	モデル	サブモデル	計算領域，水平格子，層分割	計算タイムステップ	主な変数
佐賀大学モデル	流れ解析システム FVCOM Ver.2.6	流動（浮遊系）	FVCOM Ver. 2.6 三角形の非構造格子，鉛直方向にσ座礁を適用した有限体積法海洋モデル 計算格子間隔は湾奥で500m，開境界付近で1200mσ層の数は10である.		
	懸濁物輸送モデル	水中の計算	FVCOMの懸濁物輸送モデルはUSGSのSharwood, Butman,Signell, Warnerらを中心とするグループによりROMS上で開発されたモデル７を移植 複数の種類の懸濁物を同時に扱え，底泥を多層とすることができる non-cohesive sedimentが卓越する海域を対象として開発されたモデル FVCOM開発者(Prof. Chen及びProf. Cowles,UMASSD)の協力を得てCohesive sedimentを取り扱えるよう改良		

表 -5　佐賀大学モデルの概要



計算領域地形，湾奥・諫早湾の格子，および鉛直格子分割．図中Sougouは国土交通省観測塔(タワー総合)，B3は九州農政局観測塔(B3)を表す．

図 -38　有明海計算用メッシュ（佐賀大学モデル）

2．3　シミュレーションモデルの精度検証

JST モデルの精度検証

○再現性の検証

長期間の積分期間において検証を行うことによりモデルの信頼性を確保するため、2000 ～ 2006 年の 7 年間の非定常計算を行った。境界条件となる潮汐、陸域からの淡水･負荷流入、気象条件などの外力条件は観測値をもとに時々刻々と設定した。計算中のすべての計算パラメータは同一である。パラメータについては、既存データが整備されている 2001 年を再現できるように設定したうえで、貧酸素水塊が拡大・長期化した 2006 年の DO 等の再現性を高めるために見直しを行った。このパラメータを用いて、7 年間の連続計算を行ったところ、貧酸素化しなかった 2002 年を含めて他の年の再現性も良好なことを確認した。

再現結果は以下のとおりである。なお、観測値と計算値の比較地点は図 -40 に示している。

1 潮位：有明海の 3 カ所の検潮所における毎月の M_2 分潮の振幅 (30 日ごとの調和解析) を整理した。三角では計算値がやや高い傾向があるが、口之津、大浦ともに観測値と計算値の潮位振幅はよく再現されている。また、季節変動と長期的な振幅の減少傾向もよく表現されている。有明海は共振潮汐により M_2 分潮が効果的に増幅されるが、湾口－湾奥間 (大浦／口之津で定義) での増幅率が湾内潮汐の物理特性として重要な要素となる。7 年間での増幅率の平均値は、計算値が 1.517、観測値が 1.515 となっており、ほぼ一致している。

2 流動：主要 4 分潮の潮流楕円ともに観測値と計算値は良く一致しており、モデルの再現性は良好である。有明海奥部の平均流の水平構造の一般的な特徴としては反時計回りの循環流があり、諫早湾口から島原半島に沿った海域では強い南下流が確認され、対岸の長洲沖では逆に北上流が認められており、計算値もこれを表現している。また、下層において海底谷による水深の深い海域に沿って湾奥へ向かう流れが再現されており、有明海特有のエスチュアリー循環が表現されている。

3 水温・塩分：水温の季節変化は明瞭に再現されており、夏季において湾中央部で水温成層が発達する特徴も表現されている。塩分についは湾奥浅海域の底層を除いて再現性は良好であり、出水期に表層の低塩分化が生じ、塩分成層が形成される特徴が表現されている。成層期における鉛直プロファイルをみると、比較的浅い地点 (水深 5m 程度) においても再現性が良好であった。

4 懸濁物 (SS)：2001 年 10 月～ 11 月の SS は各観測地点において観測値の濃度レベルを再現しているが、底層の細かな濃度変動は再現できていない。これは、巻き上げフラックスや沈降フラックスの再現性に一部、課題があることを示唆するものであり、今後の課題と考えられる。

5 栄養塩：湾奥部の海面下 0.5m についてみると、TN が過大になっていることや、冬季の栄養塩濃度、特に (NO_3+NO_2)-N に課題があるが、7 年間にわたる濃度レベルや季節変動を概ね捉えているものと考えられる。

6 溶存酸素 (DO)：湾奥から湾央における表層および底上 1m の DO の季節変動は 7 年間を通じて良好で、特に貧酸素の発生状況を精度良く再現していると考えられる (図 -41)。さらに、2006 年 8 月 4 日 8 時～ 13 時 (小潮期の干潮時～上げ潮) にかけて観測された鉛直プロファイルをみると、湾奥部から湾央部に向かうにつれて、底層より中層付近に溶存酸素の極小値がみられる (図 -42)。この現象については、湾奥で形成された貧酸素水塊が湾口からの比較的高酸素・高塩分水の貫入により持ち上げられるために生じていると考察されており (速水 2007)、本モデルの計算結果からも、底層からの高塩分水の貫入と同時に密度躍層の下部 (5 ～ 7m) において貧酸素水塊が湾奥から湾央部へ移流されている様子が捉えられている。ただし、このメカニズムの他にも成層付近に有機物が集積されることにより、酸素消費量が中央に極値を持つなどのメカニズムも十分に想定される。そのため今回得られた計算結果は、中層貧酸素化の発生メカニズムの一端を再現したものと考えられる。

7 水－底泥境界面での溶存物質の交換量：本研究等により湾奥部を中心とする複数地点から採取された底泥の室内実験値と計算値を比較すると、酸素消費速度は実験値のオーダーならびに季節変化量を概ね再現できている。しかし、NH_4-N,PO_4-P の溶出速度は十分に再現できていない地点があり。とくに夏季が過少になっている。これらの問題が水中の栄養塩が再現できていない要因の一つと考えられる。

8 有機物分解量に占める嫌気分解量の検証が不十分であることは課題であるが、モデルに嫌気分解過程を考慮したことにより (計算結果として、夏季湾奥部では底泥起源の酸素消費として全体の約 2 割が嫌気分解下で生成させ

る還元物質の酸化によるものであった)、好気分解のみを考慮した従来のモデルと比較し、現地で発生している貧酸素水塊の形成・消滅のメカニズムを表現した上での予測評価が可能となった。

図 -39　ノリ養殖筏の設置位置

図 -40　現況再現の検証データに用いた調査地点

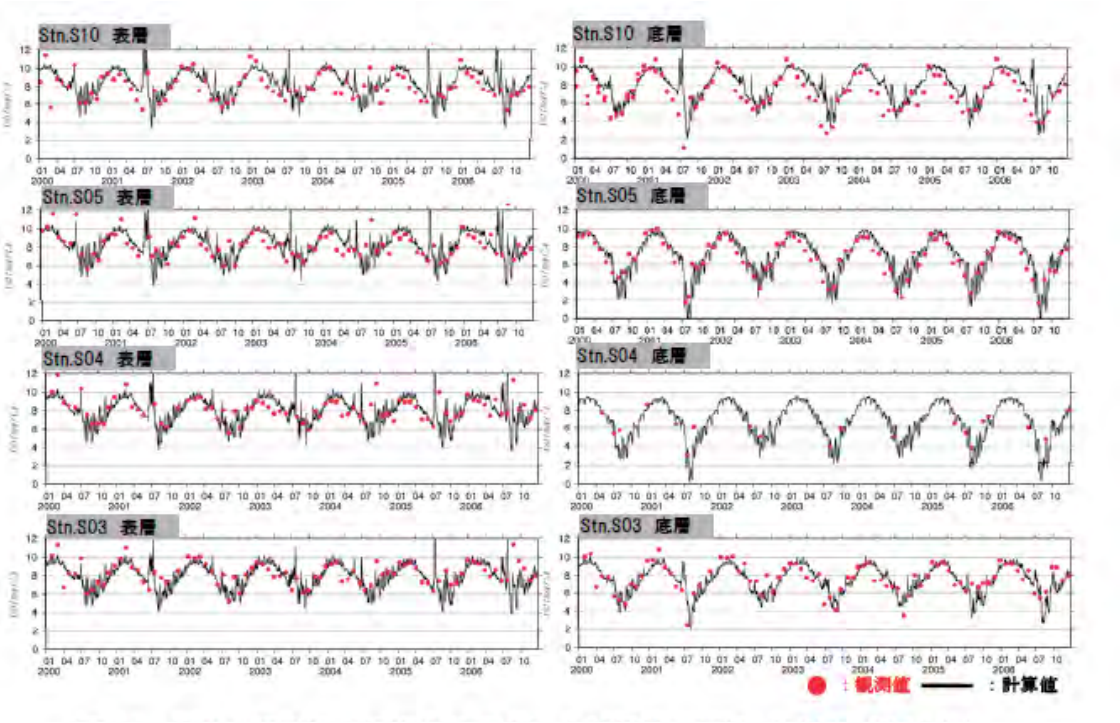


図 -41　DO の観測値 (浅海定線調査) と計算値の比較 (2000 年～ 2006 年)

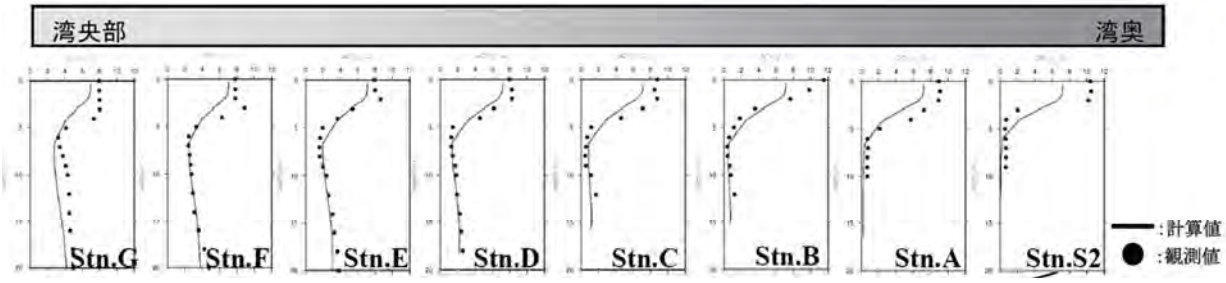
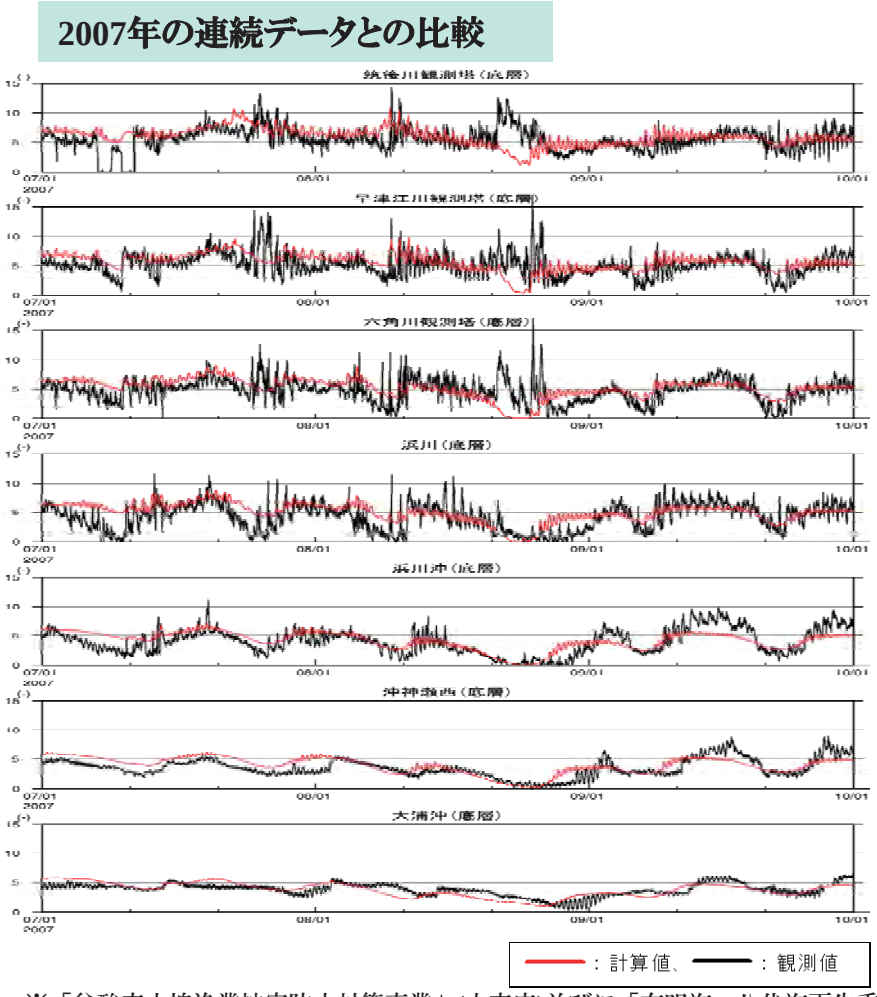


図 -42　DO の観測値 (堤) と計算値の比較 (2006 年 8 月 4 日)

上記の精度検証に用いた観測データは浅海定線調査等の不連続データであるが、水産庁及び環境省が設置した観測塔より得られた連続データについても観測値と計算値の比較を行っている。

「貧酸素水塊漁業被害防止対策事業」(水産庁) 並びに「有明海・八代海再生重点課題対策調査 (環境省) による調査結果で得られた各観測塔の底層における DO 濃度の計算値と観測値は、ほぼ一致していると考えて良い。



※「貧酸素水塊漁業被害防止対策事業」(水産庁)並びに「有明海・八代海再生重点課題対策調査(環境省)による調査結果を提供していただいた

図 -43　DO の連続データとの比較（JST モデル)

○貧酸素水塊の発生状況

2000 年から 2006 年の対象年における貧酸素水塊の発生状況を下記の表及び図で示す。2001 年と 2006 年に 2.0mg/ℓ以下の貧酸素水塊の容積が非常に大きな値を示している。この年は、降水量、全河川流量が非常に多く、夏場に大きな出水があり非常に強い成層構造になったことで大きな貧酸素を発生した。これらの事実は観測塔によるモニタリング結果とも一致している。2003 年は 2001 年、2006 年と同程度の大きな出水があったにも係わらず大きな日酸素水塊の発生は見られていない。この年は日照時間が少なく、気温が低い状況が続いたので 4.0mg/ℓ以下の貧酸素水塊の発生は見られたものの、2.0mg/ℓ以下の貧酸素はそれほど見られなかった。

状況 ＼ 対象年		2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年
貧酸素水塊の容積(km^3×day)	2.0mg/L以下	0.1	**38.9**	0.0	3.1	0.0	4.4	**33.5**
	4.0mg/L以下	99.8	257.4	24.5	174.2	46.4	207.9	355.3
降水量（佐賀地方気象台） (mm)		959	1192	564	1022	900	663	1154
全河川流量 (10^3×m^3/s)		1697	2151	1037	2812	1666	1571	3418
全流入負荷量 (COD) (kg/s)		13336	22038	7536	21417	12039	16942	30923
気温（佐賀地方気象台） (℃)		25.8	26.0	26.0	25.4	26.5	26.6	26.1
日照時間（佐賀地方気象台） (h)		708	781	799	611	719	715	668
M_2振幅に関するF値の2000年比		1.00	0.988	0.976	0.965	0.956	0.950	0.948

表 -6　2000 年から 2006 年おける貧酸素発生状況

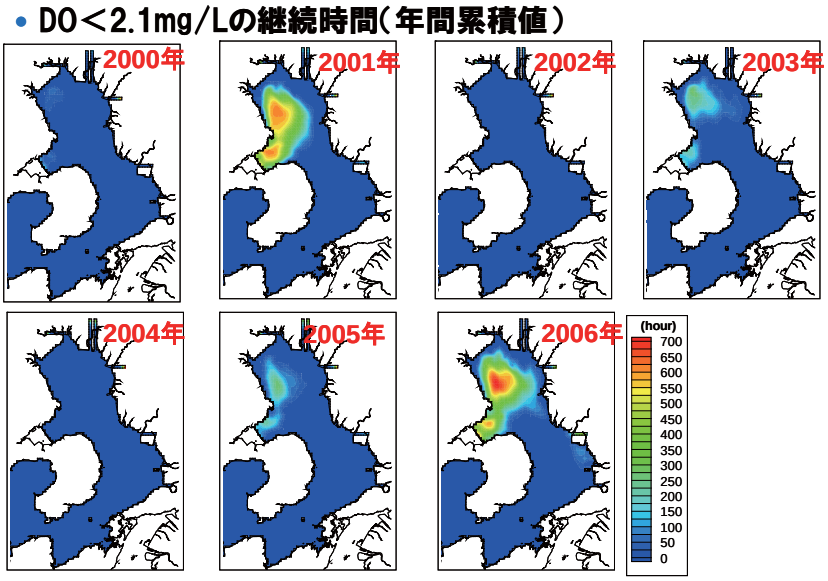


図 -44　溶存酸素 2.0mg/ℓ以下の継続時間 (年間累積値)

鹿島モデル

図 -45 は筑後川からの出水後の P6 観測点 (鹿島沖) における塩分濃度の時間変化を示したものである。観測値 (上) と計算値 (下) はほぼ一致していると見て良い。図 -46 は、同様に P6 観測点 (鹿島沖)T14 観測点 (鹿島沿岸域)、T1 観測点 (鹿島干潟縁) における底層の溶存酸素濃度 DO の観測値と計算値を比較したものである。両者はほぼ一致している。

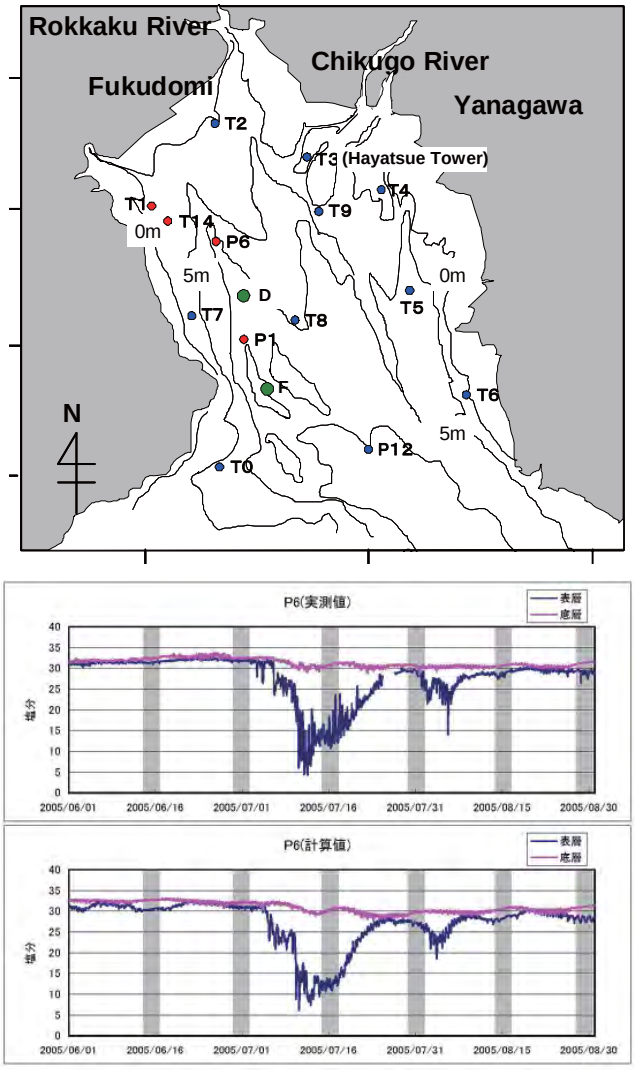


図 -45　塩分濃度の観測値との比較 (鹿島モデル)

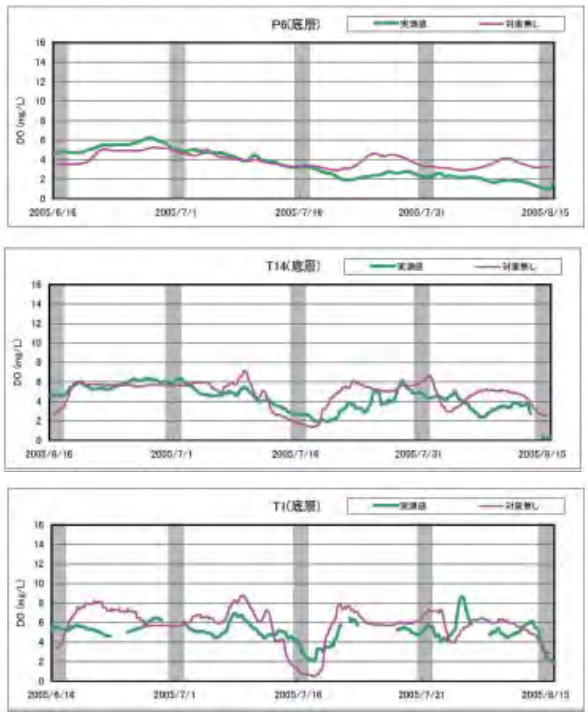
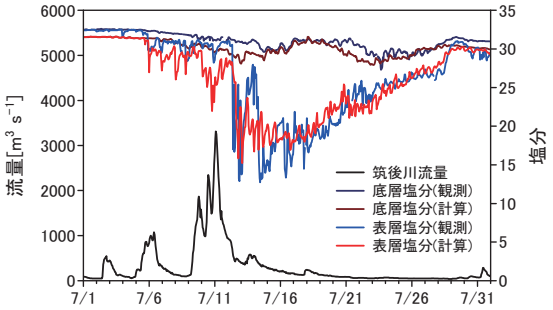


図 -46　DO の観測値との比較 (鹿島モデル)

佐賀大学モデル

図 -47 は、筑後川に大きな出水があった際の諫早湾観測塔 (B3) における塩分濃度の時間変化を示したものである。両者は非常に良く一致しており、密度流計算が非常に高い精度で行われていることを示している。佐賀大学モデルは潮位潮流計算を取り扱う流動モデルについては実用段階にあると考えて良い。



諫早湾監視櫓(B3)における出水時の塩分変動（実測とモデル）および筑後川の流量変化

図 -47　塩分濃度の観測値との比較 (鹿島モデル)

シミュレーションモデルの到達点

- JST モデル、鹿島モデル、佐大モデル、九大モデルのいずれも、流動モデルによる潮位・潮流解析、塩分濃度、水温分布などの計算値は、観測タワーにおける連続観測データとほぼ一致しており、実用可能な段階にあると考えられる。
- JST モデルにより得られた溶存酸素濃度は、浅海定線調査による長期間のデータ (不連続) 及び観測タワーにより得られた連続観測データのどちらともほぼ一致しており、JST モデル低次生態系モデルは利用可能な段階にあると言える。ただし、2000 年から 2006 年までの貧酸素水塊の発生状況は河川からの出水、気温等に大きく依存することに注意しておかなければならない。
- 鹿島モデルより得られた溶存酸素濃度は、観測タワーにより得られた連続観測データとほぼ一致しており、年単位での貧酸素水塊の発生状況を表現でききる段階にある。
- JST モデル、鹿島モデル、佐大モデルは懸濁物移動のサブモデルを構築使用しているが、精度検証に利用可能な観測データが十分に用意されていないため、どの程度の精度を有するかまでは検証されていない。
- JST モデルは高次生態系モデルまで構築され、定性的には妥当な結果を得ているが、検証のためのデータが十分でないため、精度検証ができていない。資源量に関する長期的な観測体制の確立が望まれる。

2．4　赤潮 (珪藻、シャトネラなど) 発生の増加

● 環境省有明海・八代海総合調査評価委員会最終報告書の認識

(1) 赤潮 (種類別) の特徴について

ア) 小型珪藻 (年中発生)

基礎生産者として重要であり、食物連鎖の根幹をなすので、これらの赤潮はある程度やむを得ないであろう。これらの種は、河川から栄養塩が供給されて塩分が減少し、強い照度を与える晴天が続くと底泥中の休眠期細胞が発芽、繁茂して赤潮となる。透明度の上昇は発芽機会の増加につながり、赤潮の増加の原因になると考えられる。

イ) 大型珪藻 (秋季～冬季発生)

大型珪藻の Rhizosolenia 属は有明海において 1958 年、1965 年、1980 年、1996 年、2000 年に赤潮を形成してノリに被害を与えた。2000 年に有明海で大発生した Rhizosolenia　imbricata は毎年観察され、2000 年前にも赤潮レベルに達した。Rhizosolenia imbricata は外海に生息し (休眠期細胞が発見されていない)、低塩分の夏季には湾内への進入が阻まれるが、高塩分状態 (30 ～ 35) になるときに湾内へ進入して高い日照条件下で大発生する。大型珪藻は特殊な環境条件が整った時に大発生する赤潮である。

ウ) ラフィド藻 (夏発生)

Chattonella 赤潮は、魚類と貝類に被害を与える。Chattonella 赤潮は有明海湾奥西部海域や諫早湾での発生が顕著であり、富栄養化や貧酸素水塊と関係している。1989 年に諫早湾で最初の Chattonella 赤潮が確認されたが、工事による人為的な底泥の攪拌が関係した可能性がある。貧酸素水塊の形成により底泥から鉄が溶解し、貧酸素水塊の崩壊で窒素やリンと一緒に鉄が供給されると、Chattonella 属の増殖が促進される (貧酸素水塊の解消のための底泥の攪拌についてはこの点への配慮が必要である)。Chattonella 赤潮による漁業被害を減少させるためには貧酸素水塊の形成を抑えることが重要である。

(2) 赤潮の発生状況等

有明海における赤潮の年間発生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である。年間発生期間は各県とも増加傾向である。 1 件当たりの日数は福岡県、佐賀県では増加傾向である。(図 -48) また、分類群別にみると年間発生件数、年間発生期間、1 件当たりの日数について珪藻、渦鞭毛藻及びラフィド藻のいずれも増加傾向である。(図 -46)

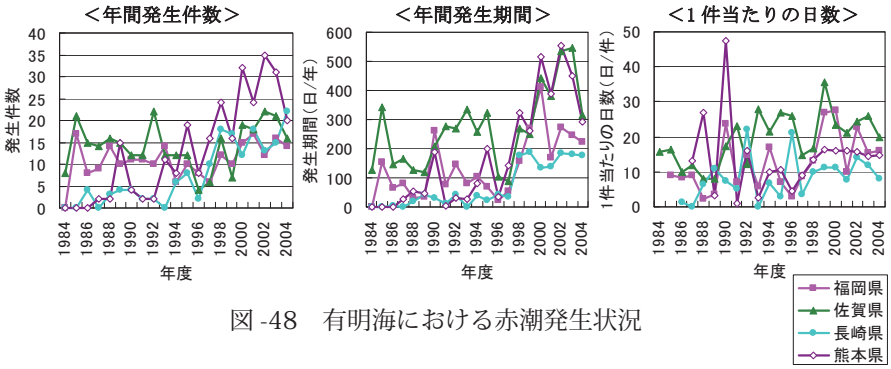


図 -48　有明海における赤潮発生状況

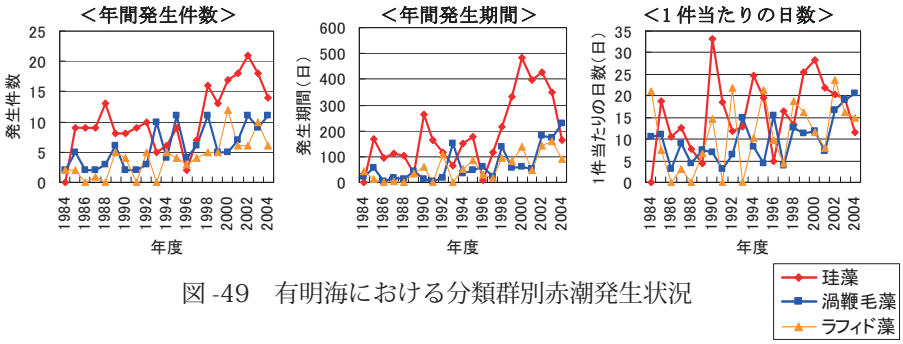
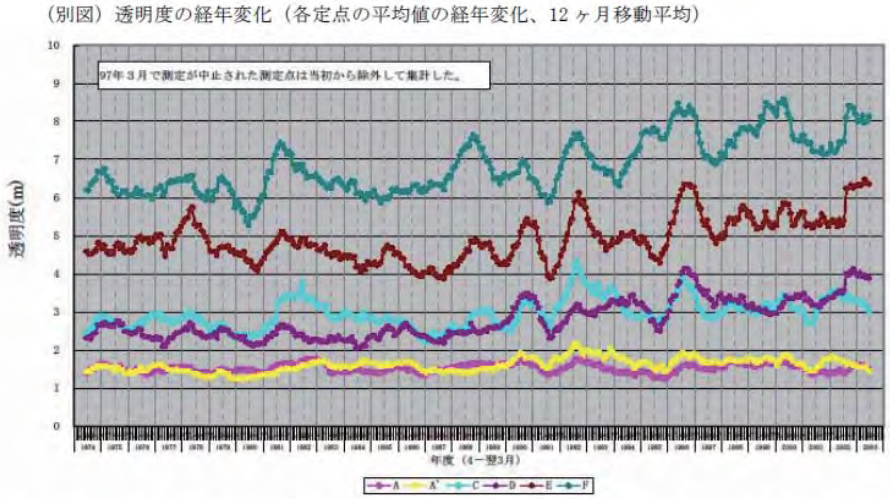


図 -49　有明海における分類群別赤潮発生状況

図 -50 に示すように透明度は湾口部から湾奥部にかけた南部海域で上昇傾向にある。また、湾奥西部の一部の海域において上昇しているとの報告がある。



注）Ａ：福岡県沖、Ａ′：佐賀県沖、Ｃ：諫早湾沖～対岸に至る範囲、Ｄ：長洲町～三角に至る熊本県沖、Ｅ：有明町から布津町に至る島原沖、Ｆ：湾口部

図 -50　透明度の経年変化

また、有明海では透明度の上昇率の大きい海域 (佐賀県沖や熊本市沖) において、赤潮の発生日数が増加していることから (図 -51、図 -52)、透明度の上昇は赤潮の発生の増加の要因の一つであると考えられる。

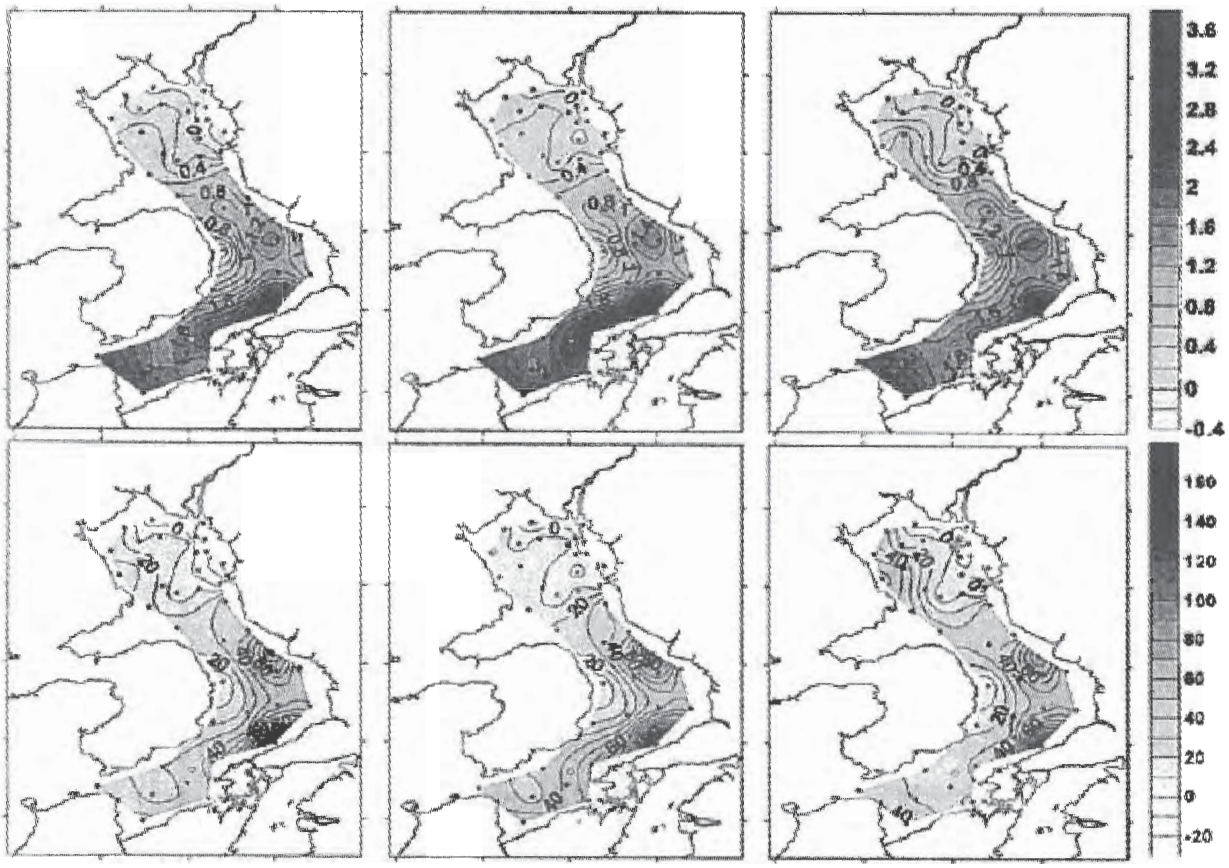


図 -51　有明海における透明度の上昇幅（上段）と上昇率 (下段）の水平分布
左：年間平均値 (1976 年～ 2004 年)、中央：4 ～ 9 月、右：10 月～ 3 月

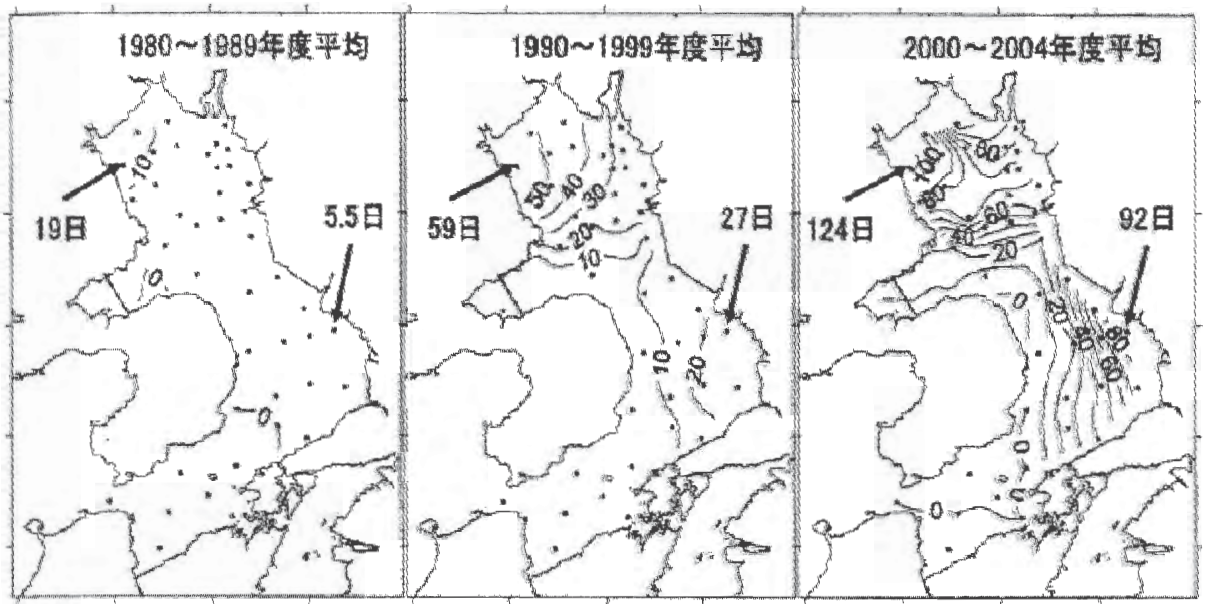


図 -52　有明海における年代別の 10 月～ 3 月の平均赤潮発生日数 (日 / 半年)

●環境省有明海・八代海総合調査評価委員会報告書以降の成果

赤潮発生件数

環境省報告書以後も含めた有明海における赤潮発生件数及び赤潮被害件数の変化を数に示す。1995 年頃から発生件数が急激に増加していた福岡県では発生件数が増加傾向にあったが 2001 年をピークに減少傾向にある。熊本県は 2007 年に通常の倍程度の発生件数があったものの、1980 年代の発生件数とほぼ同様の水準で推移している。佐賀県海域では 2007 年、2008 年と連続して 14 件を超す赤潮が発生し 1980 年代のレベルにまでは戻っていない。長崎県は諫早湾締切が行われた 1997 年以降赤潮発生件数が 2 倍から 4 倍程度に増加し、諫早湾締切の影響が強く疑われる。

有明海における赤潮被害件数は 2000 年をピークに次第に減少しつつある。

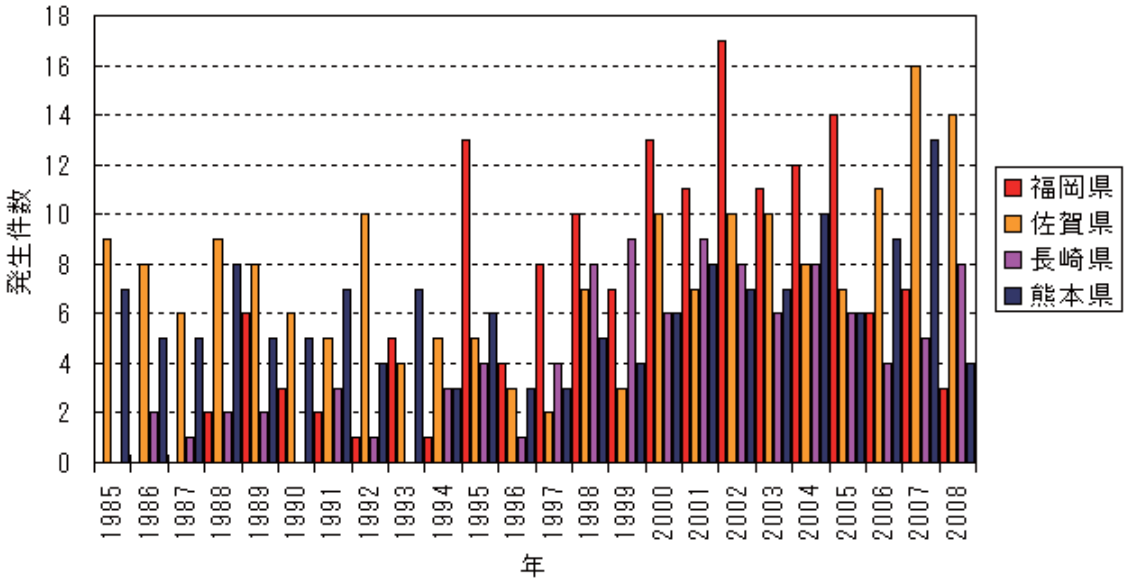


図 -53　有明海における赤潮発生件数

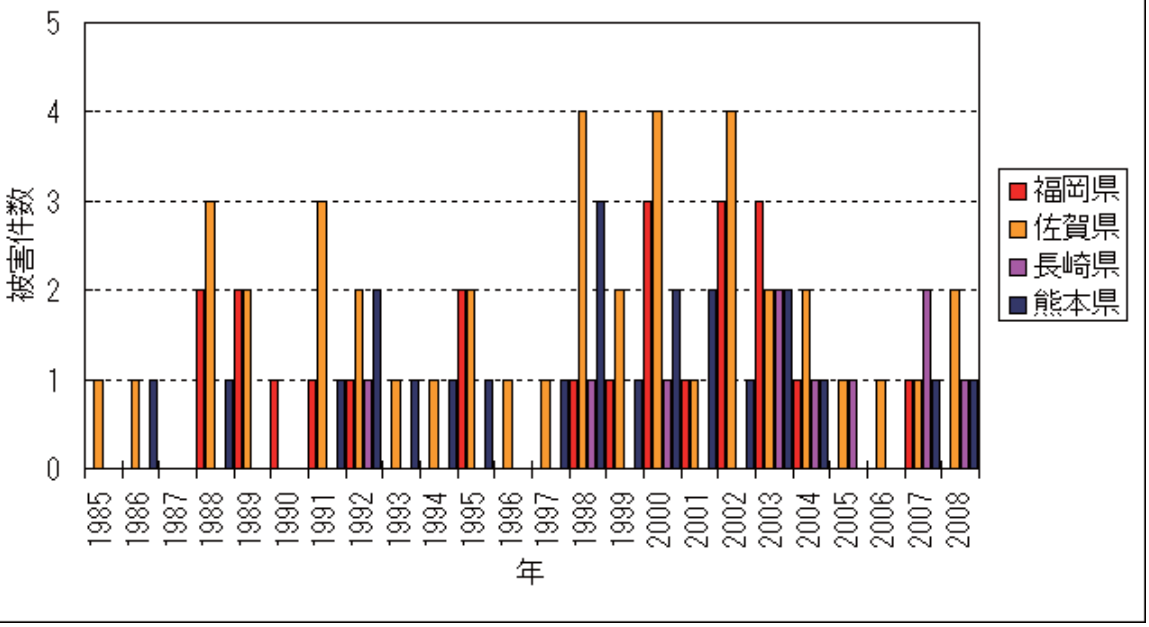


図 -54　有明海における赤潮被害件数

2．5　潮位潮流 (成層化) の変化

● 環境省有明海・八代海総合調査評価委員会最終報告書の認識

【潮位の変動】

ア) 潮位の状況

潮汐は主に月と太陽の引力から生じる異なる周期を持つ分潮で構成され、M_2 分潮 (主太陰半日周潮)、S_2 分潮 (主太陽半日周潮)、O_1 分潮 (主太陰日周期)、K_1 分潮 (日月合成日周期) を主要 4 分潮と呼ぶ。月の引力による分潮は月の昇交点の黄経の周期変化 (約 18.6 年周期) の影響を受けて振幅や位相が毎年変動する。(中略) なお、有明海の潮位変動の解析に際しては以下の点に留意する必要がある。

①環境問題との関係をみるには、分潮振幅の変化だけではなく、実際の振幅変化 (分潮振幅に 18.6 年周期の変化 (係数 f) をかけたもの) を考える必要があること。

②実際の潮位には気象・海象等の要因が加わり、潮汐変動以外に特異な変動が含まれること。

③潮汐振幅の減少要因については、1) 海水面積の減少、2) 平均水位の上昇、3) 外洋潮汐振幅の減少の 3 つの要因に整理されて議論されていること。

イ) 潮位差の比較

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く、大浦の潮位差は 1979 年頃 (潮位差約 345㎝) 頃と 1995 年頃 (同 337㎝) に極大、1988 年頃 (同 325㎝) に極小をもつ変動がみられる。(図 -55 参照)

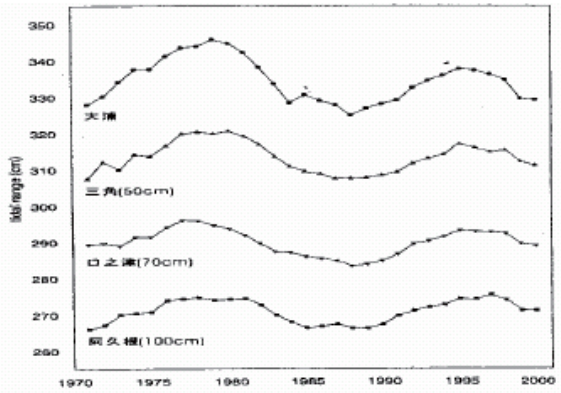


図 -55　有明海内外の観測点における年平均潮位差の経年変化

大浦における年平均潮位差の変動は、M_2 分潮の f と振幅自体の変動でほぼ説明でき、1979 年の極大と 1988 年の極小の差 (20㎝ 強) は、M_2 分潮の振幅と係数 f の変化 (3.7%) から期待される変化とほぼ一致する。また、1979 年の極大と 1995 年の極大の差 (9㎝、M_2 分潮の振幅の 2.9％に相当) は、大浦における M_2 分潮の振幅の減少率でほぼ説明できる。

潮位差減少への諫早湾の潮受堤防の影響については、1970 年～ 2001 年の大浦の年平均潮位差、大潮差の経年変化から明らかな変化は読みとれなかったという報告があるが、数値シミュレーションでは潮受堤防により潮位差は減少し、その影響は湾奥ほど大きく、最奥の住ノ江では約 2.5％の減少となった。

ウ)M_2 分潮振幅の比較

データ解析から、大浦の M_2 分潮振幅は 1980 年～ 99 年の間に約 4% 減少しているが、この減少は口之津のほか外海でもみられる。(図 -56)

諫早干拓事業開始から潮受堤防締切りまでの間に大浦から口之津に至る M_2 分潮振幅の増幅率が約 1.54 から約 1.52 に減少しており、この減少は干拓事業に伴う地形変化が原因との報告 (図 -54) がある一方、口之津を 1 とした場合の大浦の M_2 分潮の振幅の増幅率に明らかな変化は読みとれなかったとの報告もある。(図 -57)

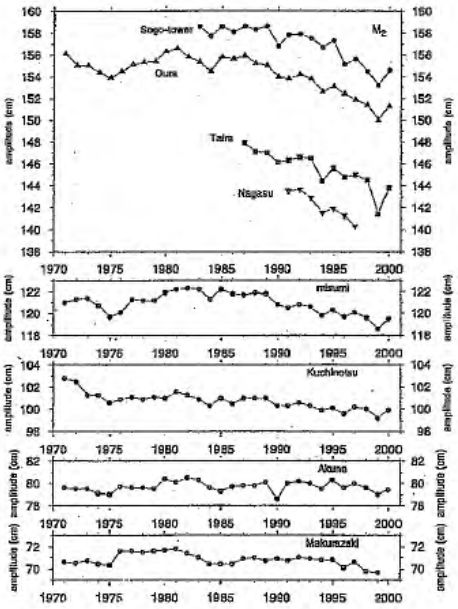
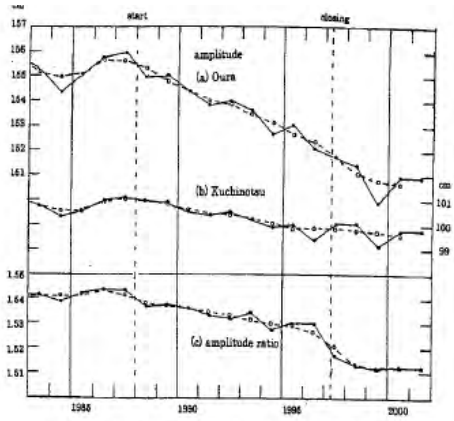


図 -56　M_2 分潮の調和定数（振幅）の経年変化



注）1. (a) は大浦、(b) は口之津の M2 分潮振幅を示し、(c) は振幅比、すなわち増幅率を示す。
2. 実線は観測値、破線は 3 年間の移動平均値（短周期ノイズを消すために実施）である。
3. 縦の破線は、諫早湾干拓事業の開始と潮受け堤防による締め切り。

図 -57　大浦と口之津の M_2 分潮振幅の経年変化

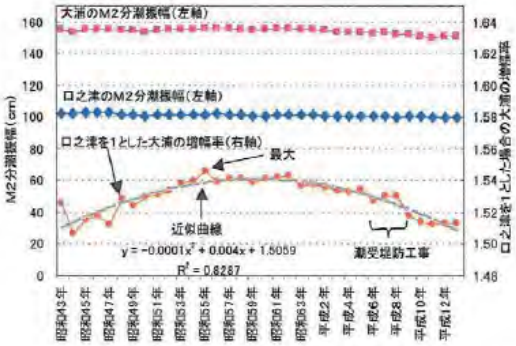


図 -58　口之津検潮所と大浦検潮所の M_2 分潮増幅率の経年変化

M_2 分潮振幅減少の要因としては、有明海内の海水面積の減少 (内部効果)、平均水位の上昇 (外部効果)、外洋潮汐振幅の減少 (外部効果) などが挙げられているが、その影響度合いに関する見解は異なる。(表 -7)

見解 / 要因	見解 1	見解 2	見解 3	見解 4
有明海内の海水面積の減少	50%	40～50%	潮受堤防の締切 10～20%	諫早堤防：24% 熊本新港：2%
平均水位の上昇	10%	極めて小さい	―	0%
外洋潮汐振幅の減少	40%	50～60%	―	76%

表 -7　M_2 分潮振幅減少に関する各要因の寄与率に関する見解

ウ) 潮流流速の変化要因とその影響

①潮流流速の変化要因

有明海の潮流に全体的な影響を及ぼす要因としては、1) 干拓・埋立等による海面の減少、2) 東シナ海全体の平均水位の上昇に伴う有明海湾内の平均水位の上昇、3) 外海の潮汐振幅の減少があげられる。

近年の有明海では、干拓、埋立等による有明海の海表面積の減少、有明海湾内の潮汐振幅 (潮位差) の減少等から、流体力学の基本原理である連続条件 (体積保存則) を満足するため、平均的にみれば潮流流速は減少する。例えば、諫早湾は締切により海面積が約 33% 減少するので、諫早湾の湾口断面において入退潮量が 1 潮汐で 33% 程度減少することになる。(平均流速として約 6.3㎝ /s の減少)

有明－長洲ラインより奥部の面積減少率を約 4.9% とすると、入退潮量の変化による潮流流速の減少は、潮汐振幅の増加を考慮して断面平均で 5.0% 程度 (平均流速として約 2.4 ㎝ /s の減少) の減少と概算される。

②潮受堤防による潮流流速への影響

諫早湾内における環境モニタリング結果から、湾奥部と湾央部では堤防締切り後に流速が低下し、湾口部でも湾奥部や湾央部ほど顕著ではないものの、流速が低下する傾向がみられたが、諫早湾外では観測年によるデータのばらつきが大きく、変化の傾向も異なった。(図 -59) また、シミュレーションによると、下げ潮時の流速は潮受堤防設置により諫早湾口北側の一部海域で増加、湾内から島原半島に沿った広い領域では減少するとの結果が得られている。

島原半島沿岸部の観測結果 (1993 年と 2003 年) から、潮流流速は大きく減少 (約 21 ～ 27％) し、この減少率は締切で減少した面積 (約 3,667ha) が北部有明海 (有明 - 長洲ライン以北、約 75,435ha) に占める割合 (約 5％) と比して大きく、諫早湾への水塊の流出入が島原半島沿岸で集中的に生じることが示唆されるとの報告がある。

他方、シミュレーションによると、潮受堤防による最大潮流速度の変化は、堤防前面で 0.3 ～ 0.4m/s の減少、諫早湾外北側の地点で僅かに増速 (0.0 ～ 0.1m/s) する部分がある以外は、有明海全体で最大潮流速度の変化は非常に小さい (0.0 ～ 0.1m/s の減速) とされている。(図 -60)

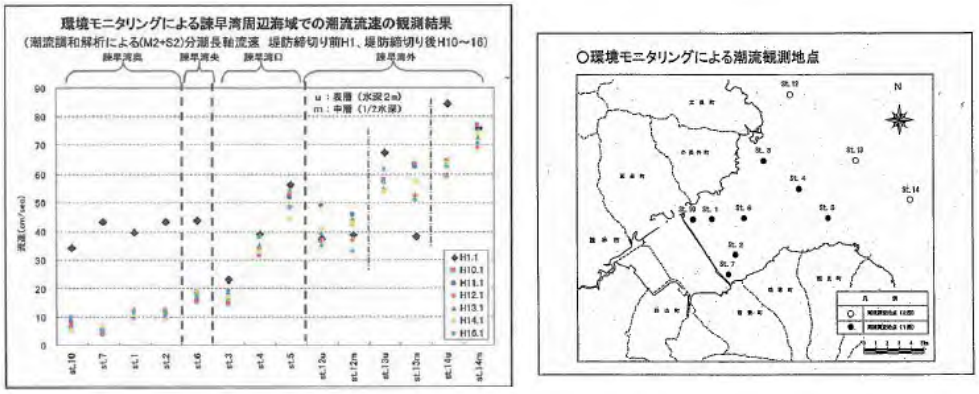


図 -59　環境モニタリングによる諫早湾周辺海域での潮流流速の観測結果

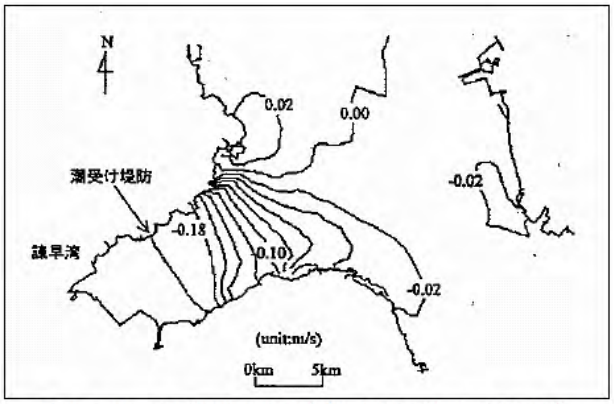


図 -60　下げ潮時の流速強度に関する締切り前後の差

③ノリ養殖施設

ノリ養殖施設の影響については、シミュレーションの結果、湾中央から湾奥にかけての海水の流動が小さくなる傾向にあること、最大潮流速度はノリ網設置地域で 0.3 ～ 0.5m/s の減少、湾奥中央部で 0 ～ 0.1m/s の増加が報告されている。

また、有明海湾奥部における潮流と浮泥輸送に関する数値実験結果から、ノリ養殖域やその沖側前面部分ではノリ養殖施設の流体抵抗によって、潮流流速や浮泥濃度が低減、抵抗が小さい船通し部分で上昇し、ノリ養殖施設が潮流や浮泥輸送の空間構造に影響している可能性が示されている。なお、ノリ網の柵数については 1970 年以降は減少傾向にある。

ア) 潮流速の減少について

有明海では、干拓・埋立て、海岸線の人工化 (護岸化)、港湾等の人工構造物の構築、ノリ網の敷設 (柵数は 1950 年代後半から急増、1970 年頃をピークに減少) がなされてきた。さらに外海の潮位上昇に伴って潮位上昇が見られている。有明海において長期間にわたって生じてきた海面積の減少や潮位上昇等の事象は、物理的条件として、有明海の潮流を減少させる方向へ働くものと考える。

また、長期的、短期的な地形変化に伴う潮流速の変化にかかるシミュレーションから、

(a) 有明海湾奥部の干拓 (1970 年以前) に伴う地形変化により、湾奥部を中心に潮流速は 10 ～ 30％減少する、

(b) 諫早湾干拓に伴う地形変化により、諫早湾内で潮流速は 20 ～ 60％減少し、有明海中央部で潮流速は 5％減少する、

との結果が得られている。(図 -61)

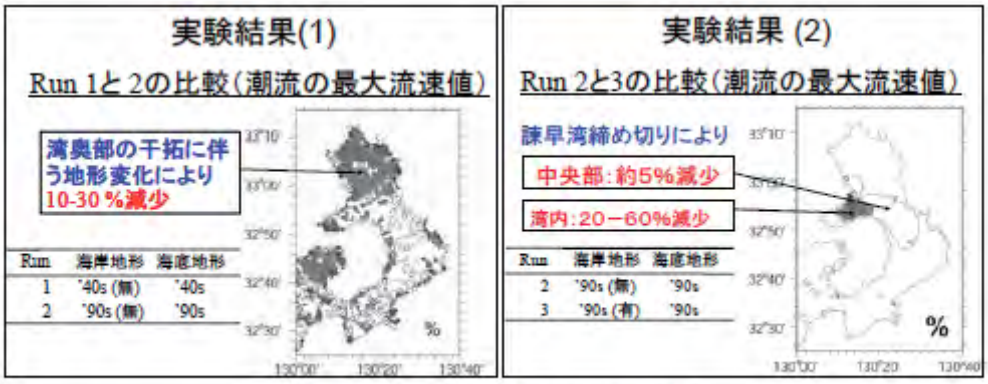


図 -61　潮流速のシミュレーション結果

●環境省有明海・八代海総合調査評価委員会報告書以降の成果

田井明氏の研究成果

(博士論文「有明海における朝夕・潮流ならびに水質の変化とその要因に関する研究」)

半日周期 M_2 潮と S_2 潮潮位振幅及び増幅率の長期変動

●約 40 年間の潮汐データを分析して得られる調和定数より外界を基準とした有明海の M_2 潮振幅は外海の M_2 潮振幅もしくは月の昇交点運動による 18.6 年周期の M_2 潮振幅の変動と同位相で、S_2 潮振幅は逆位相で変動している。潮受け堤防の締め切りの影響の解析は外海の M_2 潮振幅の変動を考慮する必要がある。

●潮受け堤防の締め切りが外海を基準とした有明海内の M_2 潮の振幅増幅率および S_2 潮の振幅増幅率に与えた影響は、起潮力の大きさにより変化することが示された。すなわち、起潮力が大きい時は、湾奥 (大浦) で、影響が小さいが湾口 (口之津) では影響は大きく、締め切りにより増幅率が培加していることが分かった。逆に、起潮力が小さい時は、湾奥 (大浦) で影響が大きく、締め切りにより増幅率は減少したが、湾口 (口之津) では影響は小さいことが分かつた。さらに、湾央 (三角) では両者の中間的な特性を有している。

●外海潮位に対する増幅率の変動の比較より。諫早湾潮受け淀防の締め切りは、有明海内の非線形効果を抑えた可能性があることが推察された。

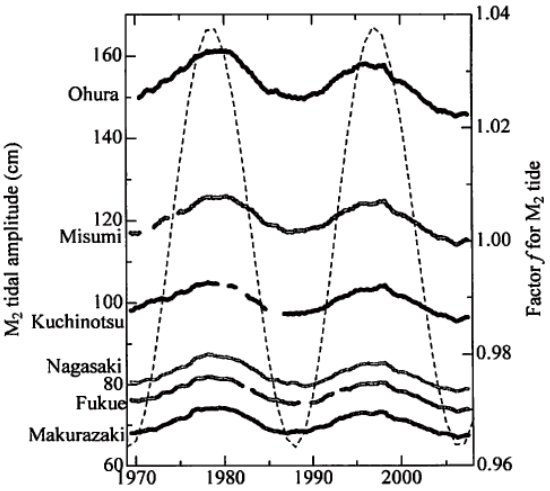


図 -62　M_2 潮振幅の時間変化
（破線は月の昇交点運動による係数 f_{M2}）

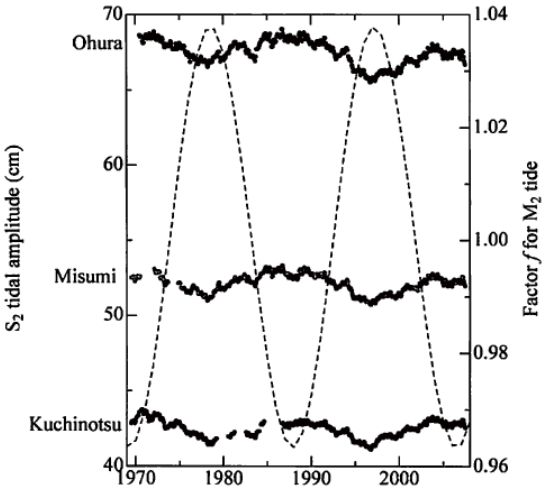


図 -63　S_2 潮振幅の時間変化
（破線は月の昇交点運動による係数 f_{M2}）

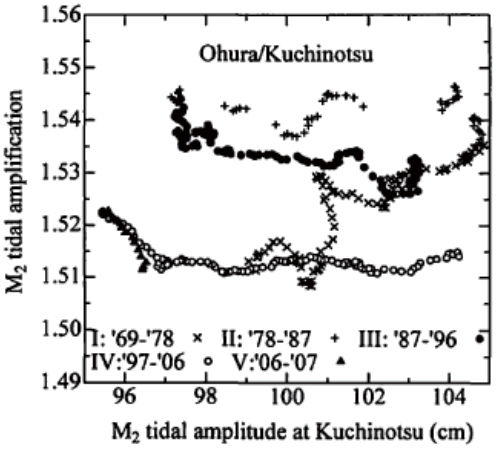


図 -64　口之津の M_2 潮振幅と口之津に対する大浦の M_2 潮増幅率の関係

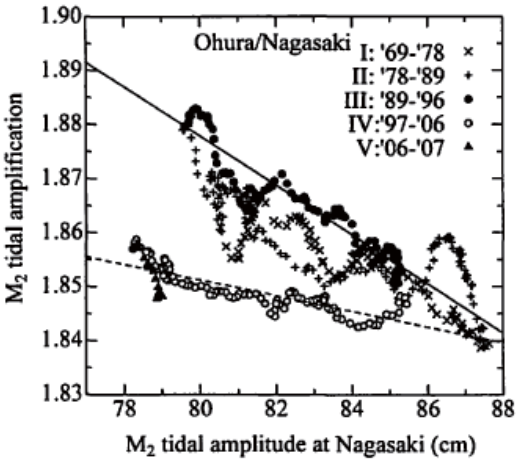


図 -65　長崎の M_2 潮振幅と長崎に対する大浦の
M_2 潮増幅率の関係

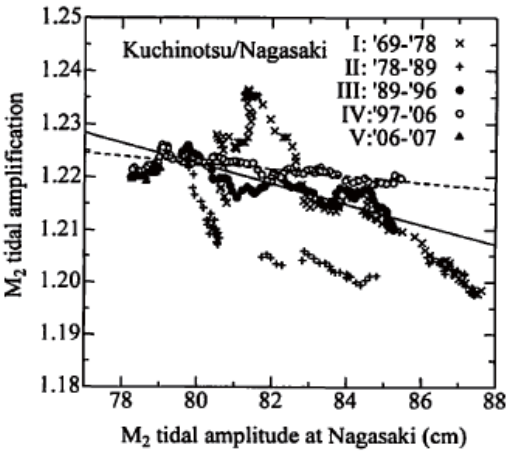


図 -66　長崎の M_2 潮振幅と長崎に対する口之津の
M_2 潮増幅率の関係

半日周期潮汐の長期変化とその要因

有明海・八代海内で最も古くから観測が行われている三角験潮所 (1931 年観測開始) の潮汐データを利用し、その解析を実施することで有明海・八代海内の潮汐振幅の長期変化を調べた。 全ての験潮所で 1997 年ごろに生じる f_{M2}・α_{M2} の変動の極大値は、過去の極大値の中で、最も小さくなっていることが分かる。それに伴い α_{M2} も近年が最も小さい値となっている。また、三角の α_{S2} の変化は、f_{M2}・α_{M2} の変化と逆位相となっている。この特性は、1969 年以降に関しては図 -62 で既に示されている。一方、厳原の α_{S2} は三角のような f_{M2}・α_{M2} に対応した変化は見られず、期間全体では減少似向である。

- ●データ解析と数似シミュレーションの結果から、過去 80 年間に生じた有明海内の M_2 潮振幅の減少原因の大部分は干拓などの海岸線の変化ではなく、外海の M_2 潮振幅の減少であることが示された。
- ●有明海の水環境異変が顕在化した 2000 年代前半には、この外海の影響に加えて過去の干拓や諫早湾干拓事業の影響、18.6 年周期の変動が相まって、過去一世紀間で、最も小さい潮汐振幅が生じていた期間であったことが分かった。

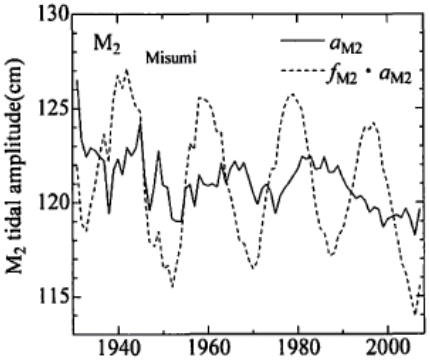


図 -66　三角における M_2 潮振幅の時間変動

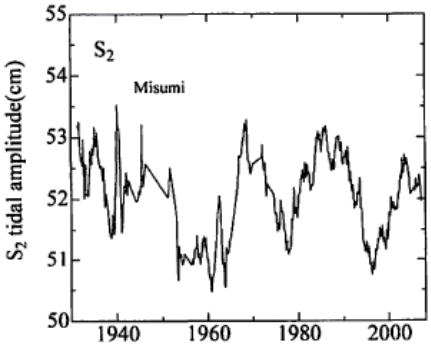


図 -67　三角における S_2 潮振幅の時間変動

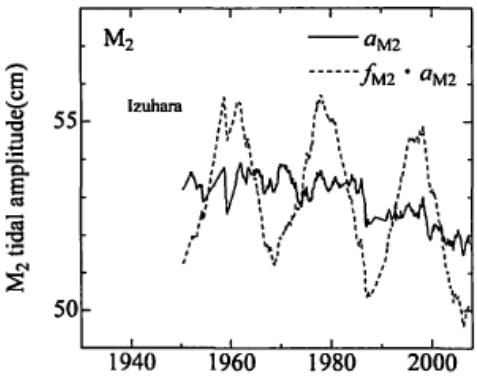


図 -68　厳原における M_2 潮振幅の時間変動

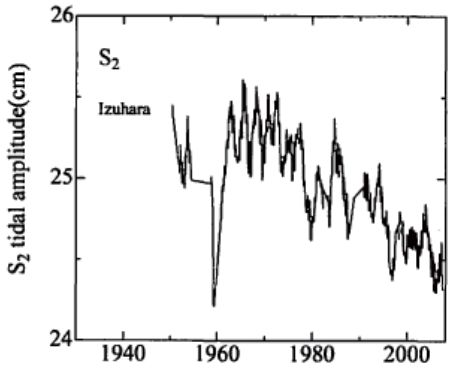


図 -69　厳原における S_2 潮振幅の時間変動

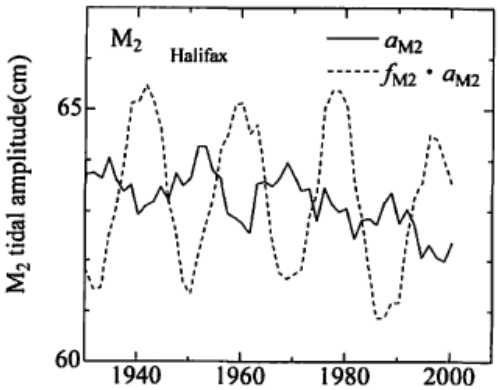


図 -70　ハリファックスにおける M_2 潮振幅の時間変動

数値シミュレーションによる潮流速と成層強度の検討

南側の開境界に同一の起潮力　振幅 0.75m を与えた。1900 年代、1960 年代、1980 年代、2000 年代を対象に潮流速と成層強度に関する計算を行った。

計算結果 - 潮流速

- 1997 年の諫早湾締切で諫早湾及び島原湾沖で大きな流速の低下が見られるが、有明海湾奥部での流速変化は見られない (図 -72)。湾奥部は 1980 年代までに行われた干拓による海岸線の変化の影響で流速が減少している。(図 -71)
- 湾奥部の流速の変化に関しては、湾奥部の地形変化の影響が最も大きく、2 番目に f 値の極大値と極小値の変化による影響が大きく、諫早湾潮受け堤防の影響はほとんど見られない。(図 -72、図 -73 及び図 -74)

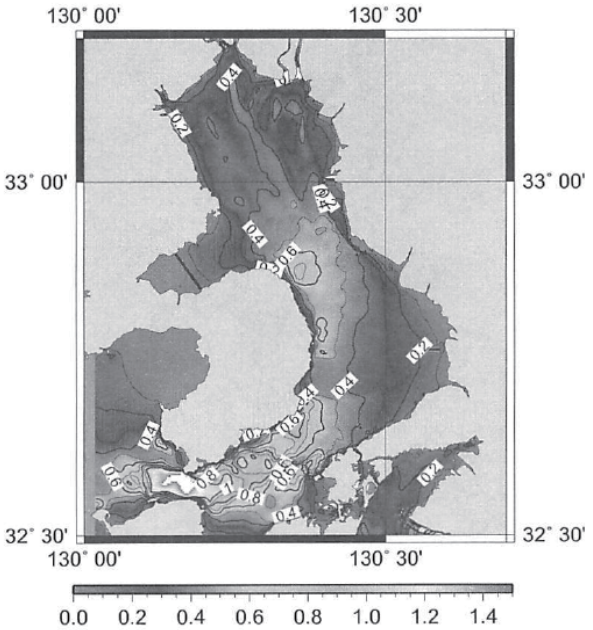


図 -71　2000 年代の M_2 潮潮流振幅の分布 (m/s)

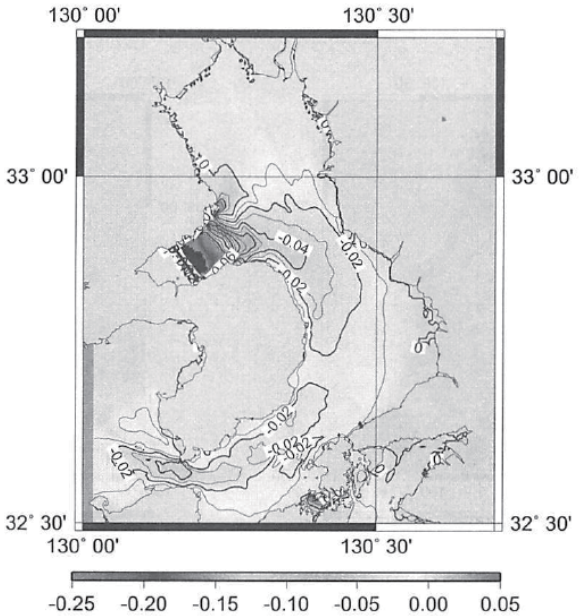


図 -72　1980 年から 2000 年代の M_2 潮潮流振幅幅の変化量 (m/s)

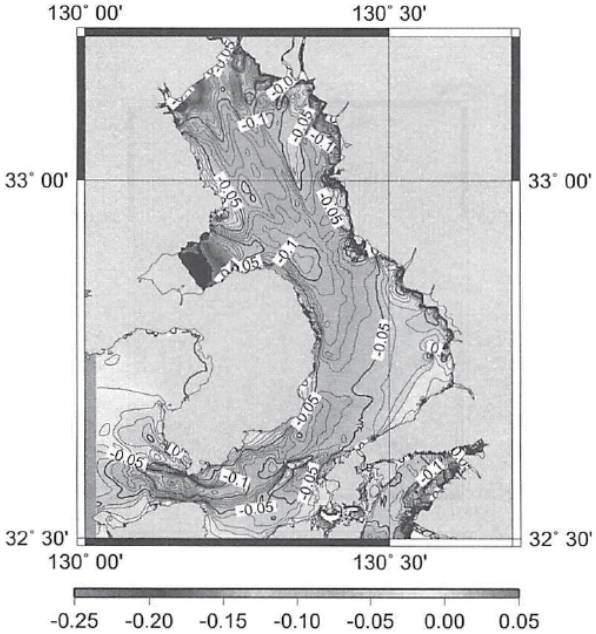


図 -73　1900 年から 2000 年代の M_2 潮潮流振幅幅の変化量 (m/s)

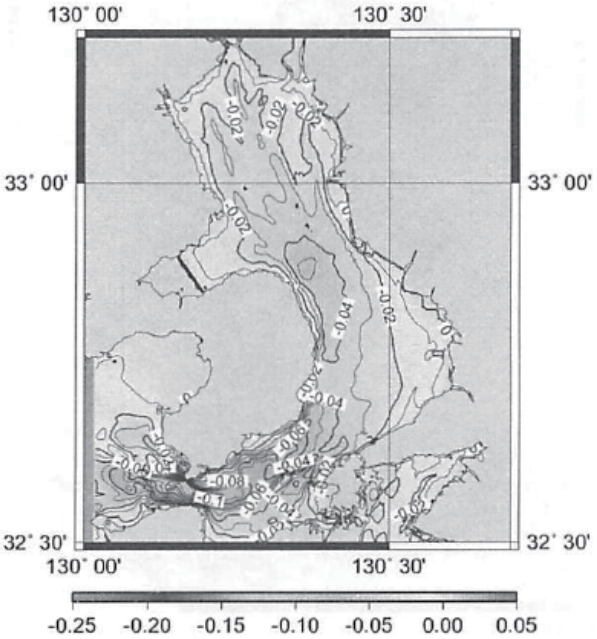


図 -74　f 値の極大値から極小値の M_2 潮潮流振幅の変化量 (m/s)

成層強度

●成層強度に対し対する諫早湾潮受け堤防の影響は、湾奥部では 1980 年代までに行われた過去の干拓および値の影響よりも小さい。

●諫早湾内では大きく成層強度が増加している。

長期的変化のまとめ

○湾奥の潮汐振幅の減少には外海での長期的な振幅の減少が最も大きく影響している。

○有明海の水環境異変が顕在化した 2000 年代前半には、この外海の影響に加えて過去の干拓や諫早湾干拓事業の影響、18.6 年周期の変動が相まって、過去一世紀間で、最も小さい潮汐振幅が生じていた期間であったことが分かった。有明海のような内湾では断面平均的な潮流流速は、潮汐振幅と湾奥への入退潮量で決定されるため、2000 年代前半は過去一世紀間で最も小さい潮流流速が生じていた期間であったと考えられる。