

再生への取り組み（たたき台）

1. 再生目標

(1) 有明海・八代海等全体の再生の目標

これまでの検討を踏まえ、有明海・八代海等全体に共通する再生の目標を以下に示す。

ア) 希有な生態系、生物多様性及び水質浄化機能の保全、回復

有明海・八代海等は、他の海域では見られない特異な生態系を有しており、これらの海域のみに見られる特産種も多く生息している。また、これらの海域の広大な干潟域、浅海域は多様な生物を育むとともに、水質浄化の機能を果たしている。こうした生態系、生物多様性及び水質浄化機能は、次世代に引き継ぐべき自然環境として、保全・回復すべきであり、再生の目標の1つとする。

イ) 二枚貝等の持続的な生息環境の保全・回復とバランスの取れた水産資源等の回復

有明海・八代海等を水産資源の宝庫として次世代に引き継ぐためには、海域環境の特性を踏まえた上で、特に、底生生態系の復活に資する持続的な生息環境を保全・回復し、二枚貝等の生産性の回復を図り、ノリ養殖生産と二枚貝等が安定的に共に生息することを確保すべきである。これは、魚類（養殖を含む。）の安定的な生息やベントスの種類数・個体数の確保も含むものである。

(2) 個別海域毎の再生目標

有明海・八代海等は様々な環境特性を持ち、場所によって生物の生息状況も異なっており、問題点とその原因・要因も異なる。このため、これまでの検討において、有明海・八代海等をいくつかの海域区分に分け、それぞれの海域毎を基本とした問題点及びその原因・要因の考察を行った。

この考察を踏まえ、具体的な再生への取組の方向性を見出すため、上述の有明海・八代海等全体の再生の目標を共通に持ちつつ、以下のとおり個別海域毎の目標を設定する。

ア) 有明海

【A 1 海域】

サルボウが夏の貧酸素によるへい死を引き起こさないようにし、アサリの資源回復を図る。ノリの安定的な養殖生産とサルボウやアサリの持続可能性の高い共生を確保する。

ベントスの種類数、個体数を確保する。

【A 2 海域】

タイラギの資源回復を図る。ベントスの種類数、個体数も回復させ、有用二枚貝

も含め、持続可能性の高い生息を確保する。

【A3 海域】

タイラギの資源回復を図り、サルボウが夏の貧酸素によるへい死を引き起こさないようにする。ベントスの種類数、個体数も回復させ、有用二枚貝も含め、持続可能性の高い生息を確保する。

【A4 海域】

アサリの資源回復を図り、持続可能性の高い生息を確保する。ノリの安定的な養殖生産とアサリの持続可能性の高い共生を確保する。

ベントスの種類数、個体数を確保する。

【A5 海域】

生物多様性・生物生産性及び持続可能性が高い豊かな水環境を保全する。

【A6 海域】

アサリの資源回復を図り、持続可能性の高い生息を確保する。

【A7 海域】

生物多様性・生物生産性及び持続可能性が高い豊かな水環境を保全する。

ベントスの種類数、個体数を確保する。

イ) 八代海

【Y1 海域】

生物多様性・生物生産性及び持続可能性が高い豊かな水環境を保全する。

【Y2 海域】

アサリの資源回復を図り、持続可能性の高い生息を確保する。

【Y3 海域】

持続可能性が高い魚介類養殖を確保する。

【Y4 海域】

持続可能性が高い魚介類養殖を確保する。

ベントスの種類数、個体数を確保する。

【Y5 海域】

持続可能性が高い魚介類養殖を確保する。

ベントスの種類数、個体数を確保する。

ウ) 橘湾・牛深周辺海域

持続可能性が高い魚介類養殖を確保する。

(3) 再生に当たっての施策の考え方

有明海・八代海等は、国内に例の少ない特異な海域環境と生態系を有しており、これらの海域における環境保全・再生に際しては、この点に特に留意して十分な知見の蓄積を確保する必要がある。

しかしながら、関連する情報（例えば有明海・八代海等における希少種の生態に関する情報等）を全て得ることは難しく、また、そもそも自然現象は常に不確実性を有している。加えて、有明海・八代海等は、大きな潮汐差、速い潮流及び広大な干潟域を有し、陸域と海域の境界が絶えず変動する非定常的な系であることから、事象の正確な把握を困難なものとしている。

このため、環境保全・再生に当たっては、必要な調査・研究を適切に行い、得られた情報をフィードバックさせるとともに、予測外の事態が起こり得ることを予め環境施策のシステムに組み込み、常にモニタリングを行いながら、その結果に基づいて対応を変化させる順応的な方法により、諸施策を進めていく必要がある。

また、有明海・八代海等の海域環境、生態系は、長期間にわたって変化してきている。近年は気候変動による影響にも留意する必要がある。加えて、海域毎に様々な環境特性を持ち、生物の生息状況も異なっており、問題点とその原因・要因も海域毎に異なる部分も多いものと考えられる。

これらの海域の環境、生態系の保全・回復を図り、その再生に繋げていくためには、有明海・八代海等全体及び個別海域、また具体的な対策を講じる際にはより現場に即したミクロなエリアにおける自然環境や生態系のメカニズムを理解した上で、土木工学的な手法に加えて、二枚貝の浄化能力などの生態系の機能の活用や持続的な漁業生産の観点を取り入れつつ、その環境改善手法について長期的な視点も入れて検討していく必要があると考える。

2. ケーススタディ

前節において、これまで検討を進めてきた、「問題点は何か」、「その原因・要因は何か」等の考察を踏まえ、有明海・八代海等の再生目標を設定した。

この再生目標を達成するため、次節において再生方策を記載するが、これまでの検討において、問題点の原因・要因などを解決するための定量的な知見が十分に得られていない部分がある。

このため、この点を補い、解決の道筋を見いだすことを目的とし、ケーススタディとしていくつかの事項を取り上げ、モデル計算等を用いた検討を行う。

なお、本報告におけるケーススタディは上述の目的のために行うものであり、再生方策の設定のためにケーススタディが必須という主旨ではないことに留意する必要がある。

(1) 各ケーススタディの背景

1) 貧酸素水塊の改善方策検討のための試算

ア) 貧酸素水塊の要因解析

海域ごとに行った問題点及びその要因考察の結果、A3海域におけるタイラギでは貧酸素水塊が、A1海域及びA3海域におけるサルボウについては貧酸素化に伴

って生じる底質中の硫化水素の増加等が減少の要因となっていると推定された。

しかしながら、これまでの検討では、貧酸素水塊を小さくし、その影響を少なくするためには、どのような方策が考えられるかについて、定量的な知見は得られなかった。

そこで、貧酸素水塊の改善のための方策について定量的に検討するため、数値シミュレーションモデルを用いて貧酸素水塊形成の要因解析を行う。

イ) 二枚貝による改善効果の試算

上述ア)の要因解析により、二枚貝の生息量を増やすことが貧酸素水塊の規模を小さくし、その影響を少なくすることに寄与する旨の試算結果が得られた。

そこで、二枚貝の生息量を増やす方策の1例として、1970年頃はより広いエリアに分布しており、生物多様性の保全機能も期待される「カキ礁」を採り上げ、その効果について数値シミュレーションモデル等により試算を行う。

2) 二枚貝の浮遊幼生の供給ネットワークの試算

タイラギについて、主漁場であるA2海域及びA3海域における減少に寄与している状況として、浮遊幼生の供給量がA2海域では2008年に瞬間的に高密度の出現があったが低位で推移しており、A3海域では2012年以降、それ以前に比べて相当低位で推移していることがあげられた。

この対策の一つとして、母貝の生息地を確保し、浮遊幼生の供給量を増やすことが重要であると考えられる。

タイラギの幼生は相当期間浮遊するため、どのようなエリアを浮遊するかについて定量的に試算できれば、有明海を全体としてとらえ、母貝生息地（浮遊幼生供給地）について広い地域を具体的候補の選択肢とすることが可能となる。

このため、浮遊幼生の輸送過程の試算を行うことにより、浮遊幼生の湾奥部への到達状況の推測や保護すべき母貝適地の可能性を検討する。

3) 八代海での赤潮被害防止対策の取り組み

八代海においてはブリ類、タイ類などの魚類養殖が行われているが、2009年、2010年に魚類に対する毒性が強いシャットネラ属赤潮の発生により大きな被害が発生するなど、現在、国内で有数の赤潮発生海域となっている。

赤潮被害を確実に軽減する方策として期待されるものに、赤潮発生に関する情報の早期把握（予察）があげられる。確度の高い予察が可能となれば、漁業者による早期の対策が可能となり赤潮被害の軽減が期待される。

このため、現状における赤潮発生に関する最新の予察技術についてとりあげる。

(2) 各ケーススタディの内容

1) 貧酸素水塊の改善方策検討のための試算

ア) 貧酸素水塊の要因解析

試算の目的

本解析では、数値シミュレーションの手法を利用して、貧酸素水塊に影響する可能性のある間接的要因の条件を変え、その影響の強さを把握することで、貧酸素水塊の改善のための方策について定量的に検討することを目的とする。

試算内容

a) モデルの概要

要因解析に使用した数値シミュレーションモデルは、有明海の強い潮流や波浪による底泥の巻き上げが表現でき、かつ底質・底生生物の影響を含めた栄養塩や有機物等の物質収支が検討可能なモデルとした。

モデルは図1に示すとおりいくつかのサブモデルで構成されておりサブモデル間で計算結果の引き継ぎが行われるものである。モデルで採用した鉛直座標系は一般化された座標モデル(20層)であり、水深によらず海面付近の水塊の挙動を精度良く表現することが可能である。水平方向の計算格子サイズは場所によって可変(500~2700m)であり、有明海の湾奥部を500mで表現した。

モデルの計算格子を図2、考慮した物質循環を図3に示す。

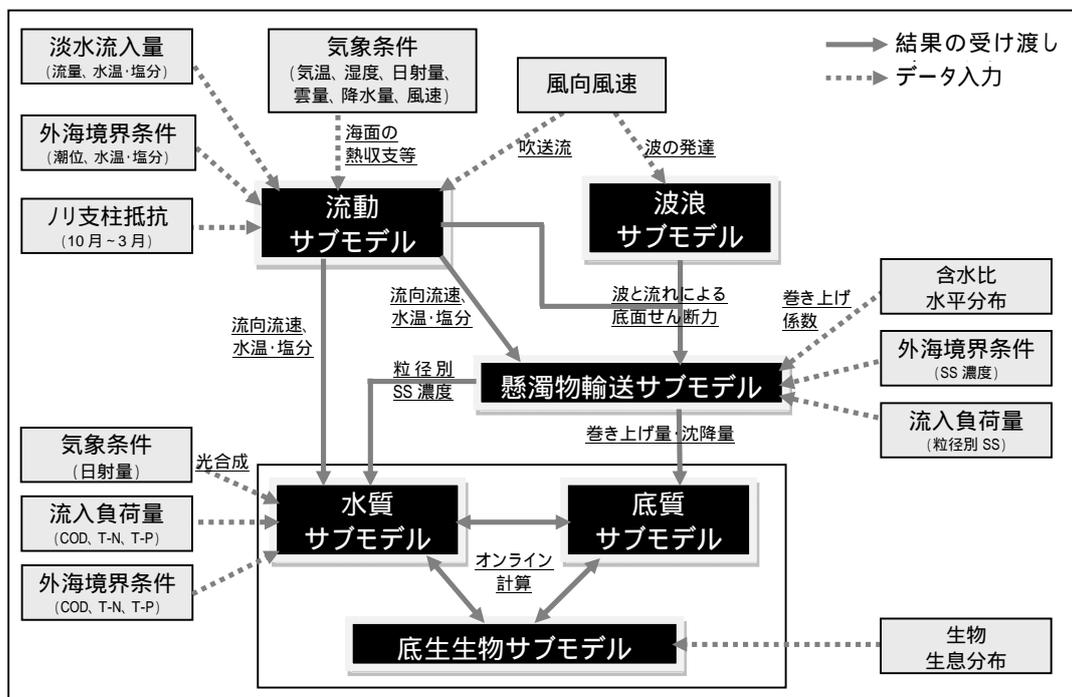


図1 数値シミュレーションモデル構成

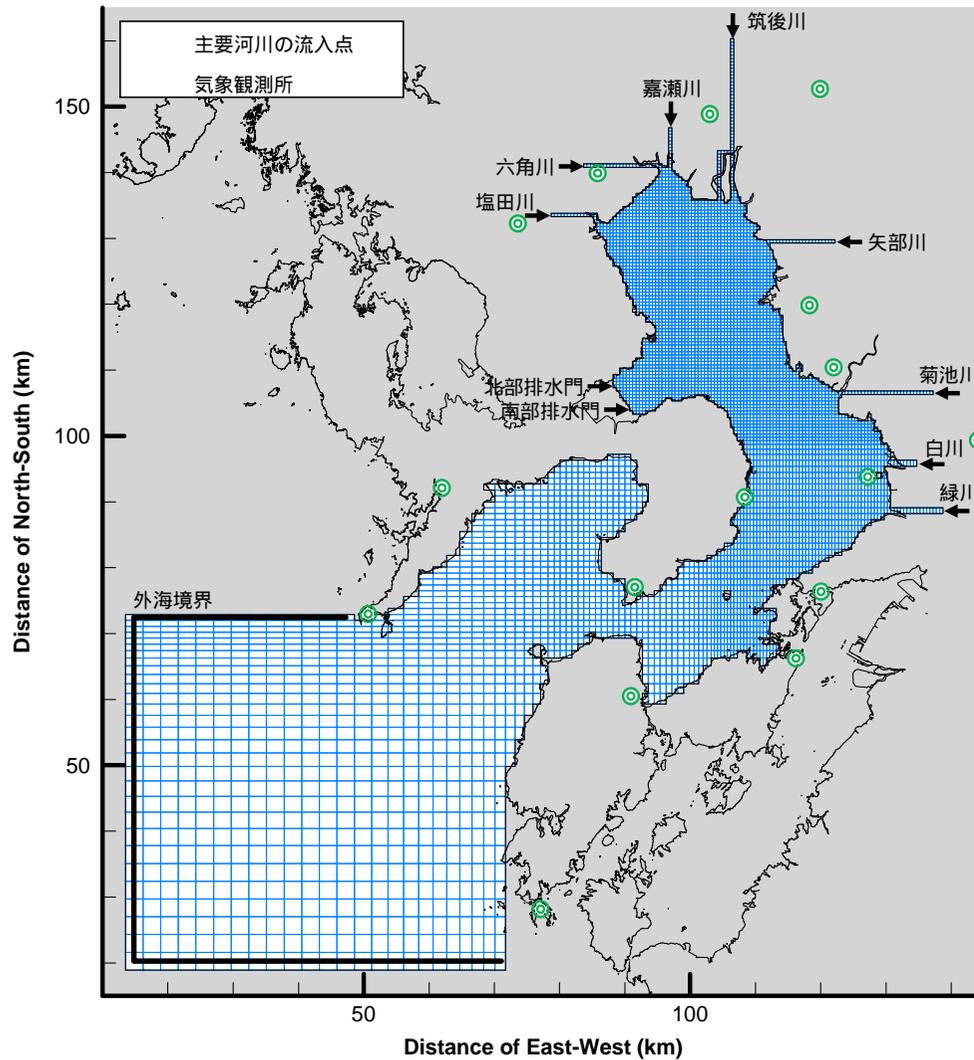


図2 計算格子

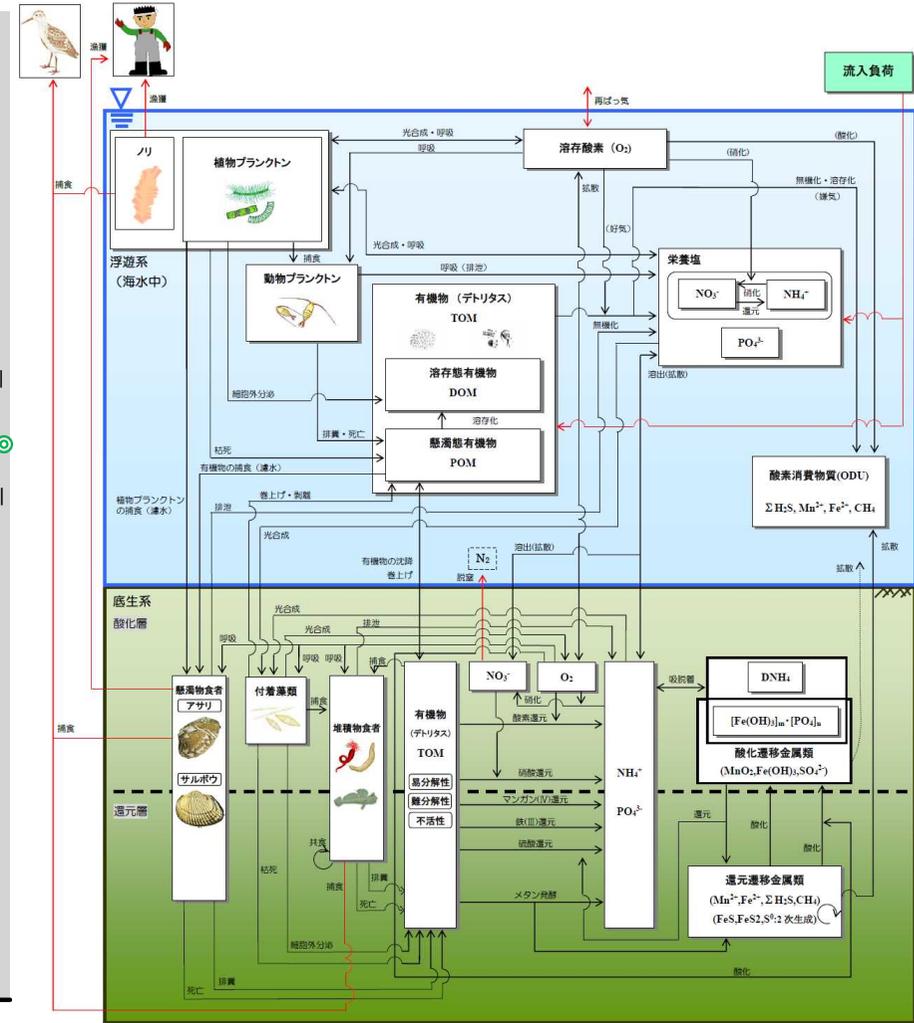
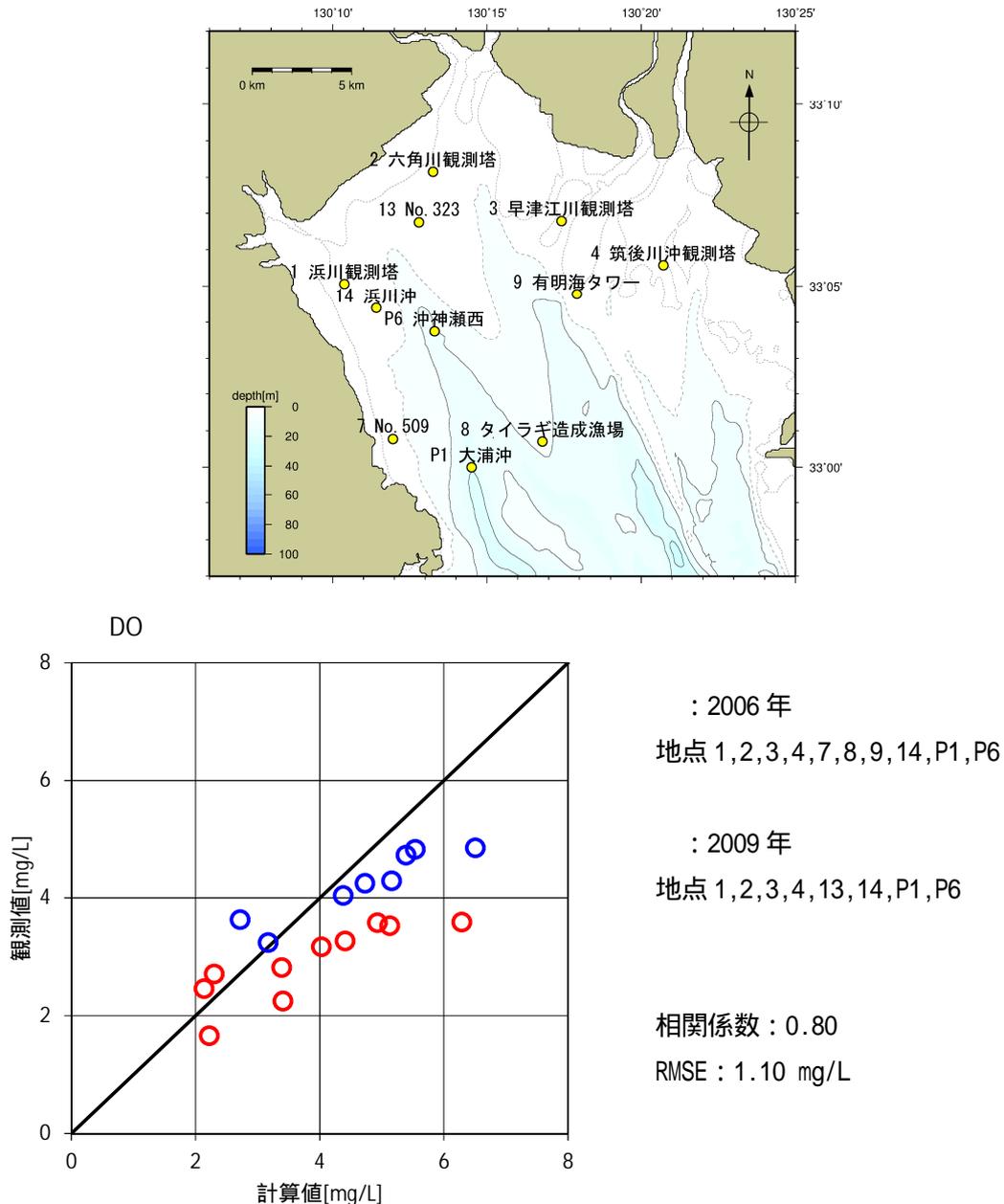


図3 水質・底質・底生生物サブモデルで考慮する物質循環

b) DOの再現性

2006年と2009年に実施された現地観測結果でモデルの再現性を確認した。図4にDOの現地観測地点と各年の8月の1か月平均値の比較を示す。



2006年は10地点、2009年は8地点の8月の1か月平均値の比較

図4 DOの現地観測地点と底層DOの再現性の確認

出典（観測値）：赤潮・貧酸素水塊漁業被害防止対策事業報告書（水産庁）及び有明海貧酸素水塊発生機構実証調査報告書（環境省）

c) 計算ケースの設定

資料6 - 1 ~ 6 - 7の連関図で示されているように、貧酸素水塊の大小に直接的に寄与すると考えられる環境要因は、「赤潮の発生件数の増大・大規模化」、「成層化」及び「底質中の有機物の増加」が挙げられている。これらの直接的要因に対しても様々な要因が可能性として挙げられており、それらが複雑に絡み合うことで現象の理解を困難にしていると考えられる。

今回検討した計算ケースは表1に示すとおり4ケースである。他にも多々挙げられるが、後述するモデルの限界に配慮し今回はその他の要因の検討については今後の課題とした。従って、解析結果の解釈についてはモデルの限界を考慮する必要がある。

表1 要因解析の計算ケース

No.	ケースの内容	解析内容
1	長期的な水温の上昇	水温の違いによる貧酸素水塊の容積
2	藻場の減少	1970年代と現在の藻場面積（水質浄化能力）の違いによる貧酸素水塊の容積
3	栄養塩の流入 有機物の流入	過去から現在の流入負荷量の違いによる貧酸素水塊の容積
4	二枚貝の減少	過去と現在の二枚貝生息（水質浄化能力）の違いによる貧酸素水塊の容積

d) 計算条件の設定

計算期間は、貧酸素水塊が発生しやすい夏季の3ヶ月間（6~8月）を対象とし、最終の1ヶ月間（8月）を解析期間とした。計算年次は、計算入力データの収集可能期間（~2013年）の内、貧酸素水塊の累積日数が観測4地点の平均値が最大であった2006年と、最小であった2009年を対象とした（図5）。

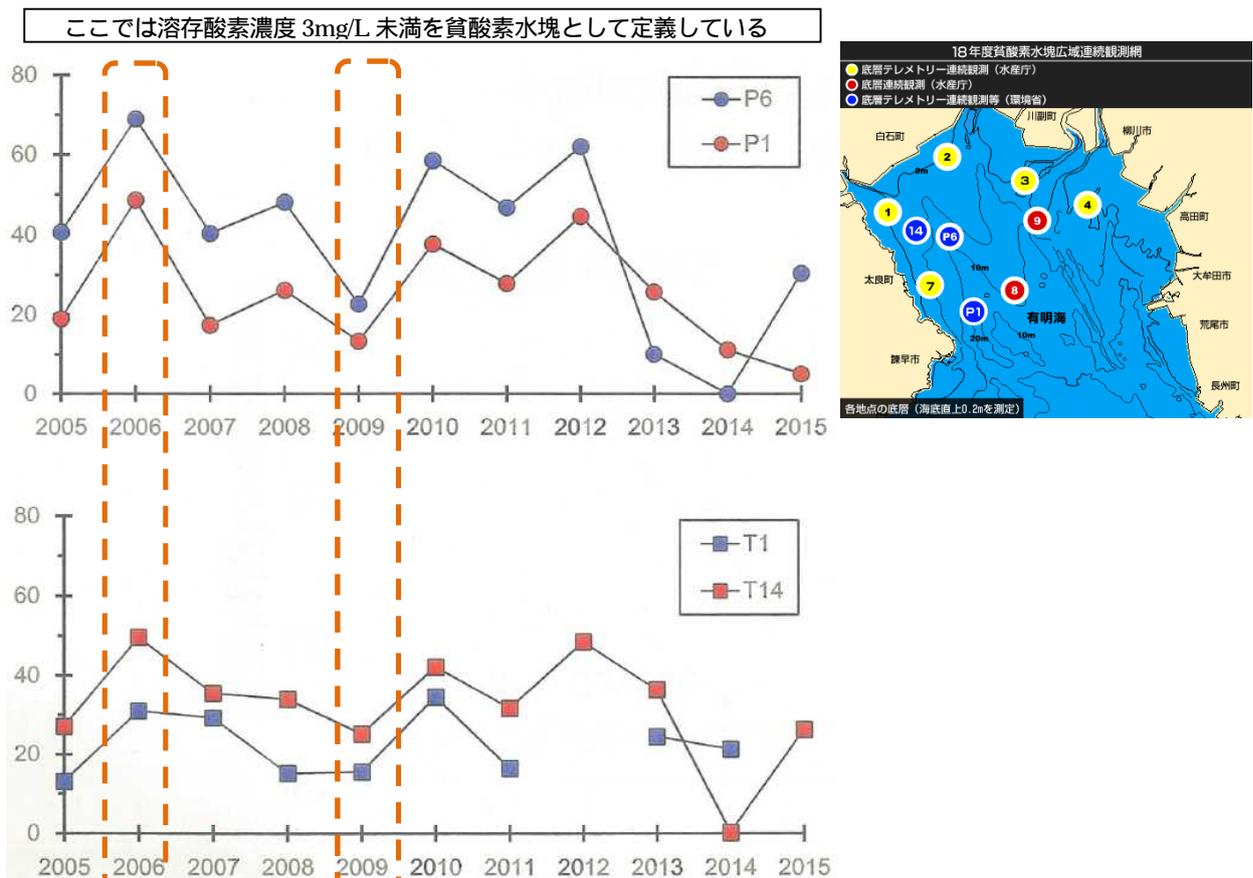


図5 有明海湾奥部における貧酸素水塊の発生状況（累積日数）

各計算ケースの条件設定の考え方として、1970年～2014年までの期間で取りうる値（夏季最大値・夏季最小値）を設定することを基本とした。各計算ケースの設定値は次のとおりである。

（ ）長期的な水温の上昇の計算条件

長期的な水温の上昇の条件設定は、流動サブモデルにおける外海境界水温条件、気温条件及び河川水温条件で行った。外海境界水温条件と気温条件の設定値を表2に示す。

なお、河川水温は月1回程度の頻度で取得されている河川水温データ（国土交通省水文水質データベース）と最寄りの気象台の気温データとの相関式を作成し、1時間間隔の気温データから1時間間隔の水温データを推定した。

表 2(1) 外海境界水温の設定値

計算ケース	2006年	2009年
(1) 水温最大ケース（1994年想定）	ベースケース + 0.7	ベースケース + 1.3
(2) 水温最小ケース（1993年想定）	ベースケース - 1.7	ベースケース - 1.1

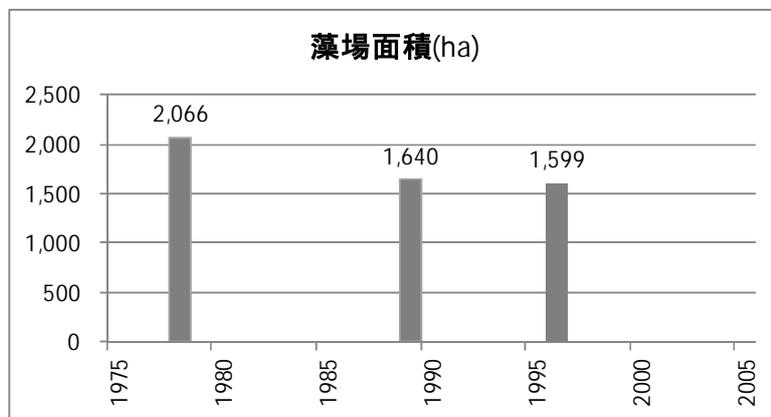
表 2(2) 気温の設定値

計算ケース	2006年	2009年
(1) 水温最大ケース（1994年想定）	ベースケース + 0.9	ベースケース + 1.1
(2) 水温最小ケース（1993年想定）	ベースケース - 2.3	ベースケース - 2.0

（ ）藻場の減少の計算条件

環境省による「自然環境保全基礎調査」の調査結果を基に設定した。自然環境保全基礎調査の第2回調査（1978年）から第4回調査（1996～1997年）にかけて藻場面積は約20%減少している（図6）。

現状の藻場分布の設定は第4回調査の分布を与えることとし、過去（第2回調査）の藻場分布が明らかでないことから、今回の解析では水平分布は現状の藻場分布と同様とし、過去の藻場現存量相当（1.29倍）の炭素・窒素・燐の取り上げ量を条件として与えることで過去の状況を表現した。



出典：自然環境保全基礎調査

図6 現存藻場の面積の推移

（ ）栄養塩の流入・有機物の流入の計算条件

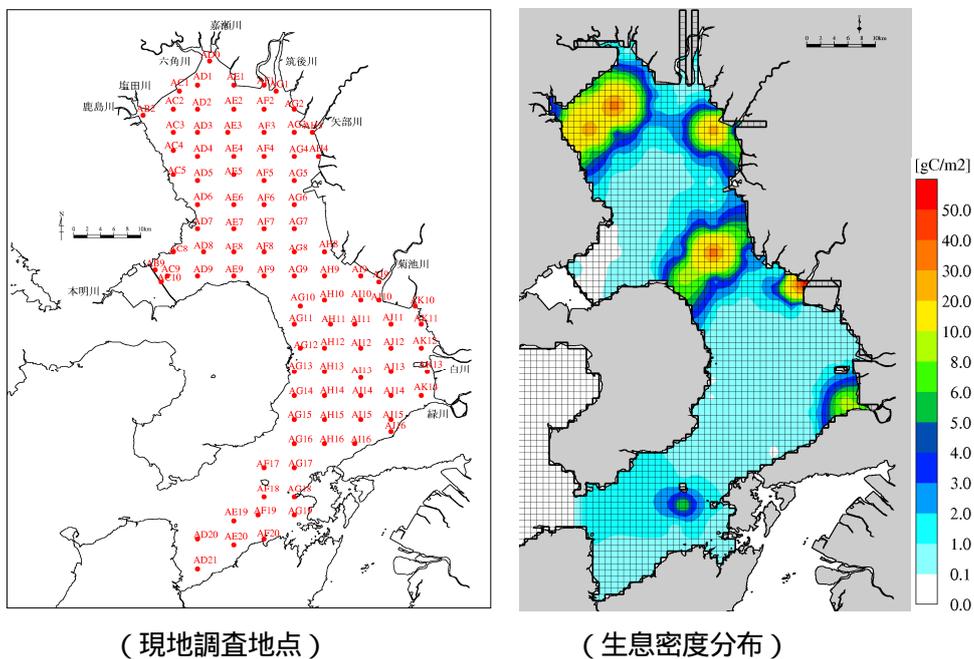
第3章で示した流入負荷量の推移を基に設定した。2006年、2009年のベース計算条件を基本とした流入負荷量の最大・最小の設定倍率を表3に示す。

表3 流入負荷量条件

項目	最大年	最小年	ベース計算条件を基本とした流入負荷量の倍率			
			2006年計算		2009年計算	
			最大ケース	最小ケース	最大ケース	最小ケース
COD	1976年	2000年	1.486	0.712	1.529	0.732
T-N	1975年	2002年	1.830	0.733	1.802	0.722
T-P	1980年	2005年	2.068	0.785	2.004	0.760

() 二枚貝の減少の計算条件

数値シミュレーションモデルの基本ケースでは、2005～2006年に実施された現地調査結果（図7）を基に懸濁物食者の分布及び現存量（ gC/m^2 ）を入力条件として設定しているが、こういった生息分布や現存量の経年的な変化は明らかではない。そこで、本検討では基本ケースの懸濁物食者の分布及び現存量を初期条件として繰り返し計算を行うことで、餌環境・溶存酸素環境・漁獲圧（アサリ・サルボウ・タイラギの最大の取り上げのあった年として1983年を想定）により律速される状況下での懸濁物食者が増えうる最大量を計算格子毎に見積もり、この懸濁物食者の分布を最大ケース（現存量として約2倍）として設定した。



出典：「有明海生物生息環境の俯瞰型再生と実証試験」中間評価資料

(<http://scfdb.tokyo.jst.go.jp/pdf/20051210/2007/200512102007rr.pdf>)

図7 生物生息状況調査地点と懸濁物食者の生息密度分布

試算結果・考察

要因解析の結果は、貧酸素水塊の容積をケース間で比較することにより評価した。貧酸素水塊の容積は、溶存酸素濃度が 3mg/L 未満となった計算格子を貧酸素水塊となった格子として判別して、それらの格子の容積を集計した。

結果の一例として、A 1・A 3 海域・全海域における貧酸素水塊の容積の各ケース間の比較を図 8 に示した。この図は以下の式で定義された貧酸素水塊の変化比率として整理している。値が 1 より小さい場合に貧酸素水塊の容積が縮小、逆に 1 より大きい場合に貧酸素水塊の容積が拡大していることを表している。

$$\text{貧酸素水塊の容積の変化比率} = \frac{\text{要因解析ケースの貧酸素水塊の容積}}{\text{ベースケースの貧酸素水塊の容積}}$$

貧酸素水塊の変化比率について、水温最大・最小ケース、二枚貝最大ケース、流入負荷最大・最小ケースは、海域や年次の違いで若干傾向が異なるが、貧酸素水塊が縮小する場合のケース（水温最小・二枚貝最大・流入負荷最小）で全域の変化比率が 0.3～0.7 程度となっていた（0.3 は容積が 30% になることを表す）。

藻場最大ケースの場合では海域区分を問わずほとんど 1 であり、ベースケースからの変化は小さい傾向がみられた。これは、藻場がもともと貧酸素水塊のほとんど発生しない有明海湾口部に分布しているため、変化の振れ幅が小さい結果となったと考えられる。

以上のことから、A 1・A 3 海域ともに、水温、二枚貝、流入負荷のそれぞれが貧酸素水塊の規模の増減に寄与することが試算結果として示された。

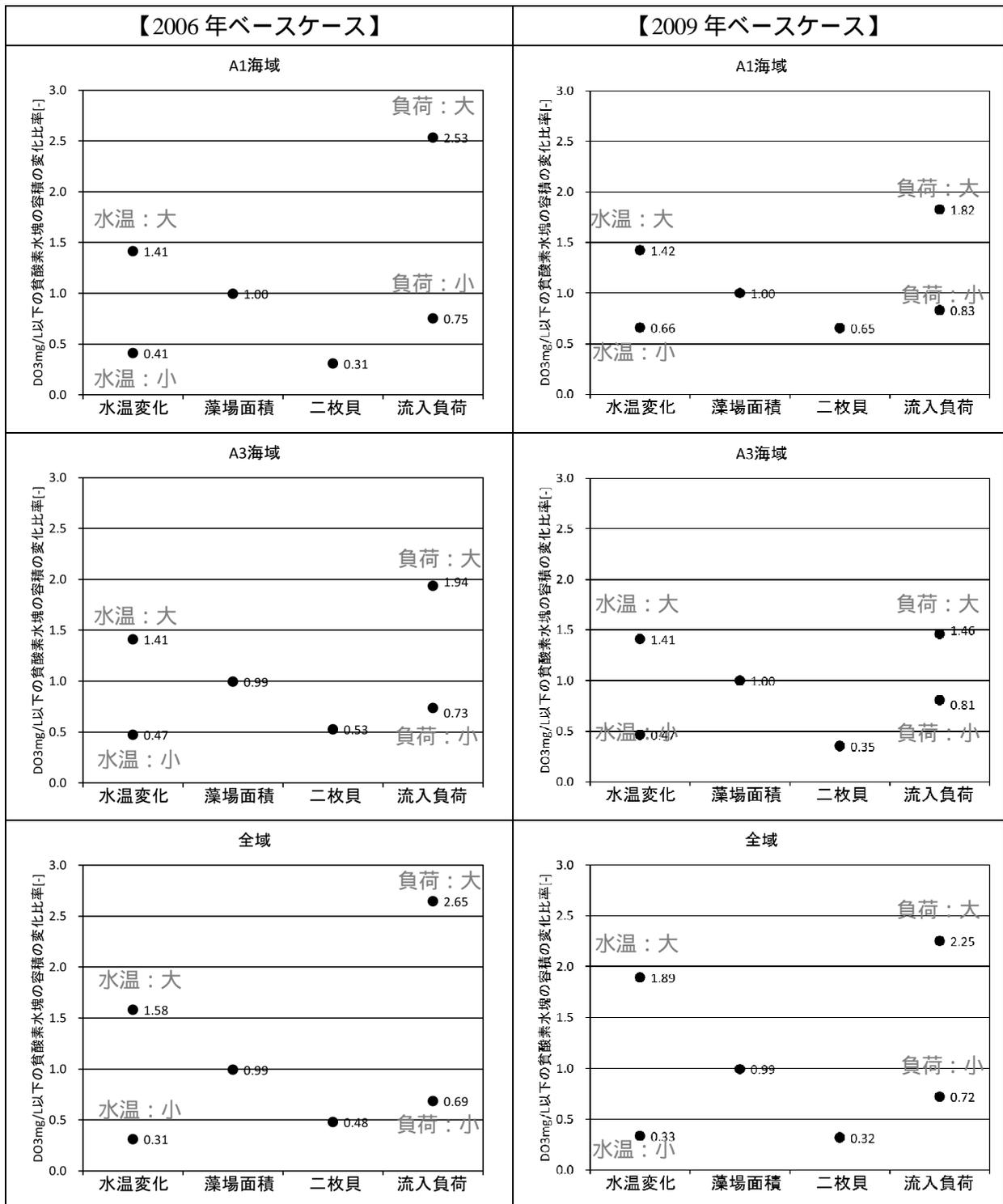
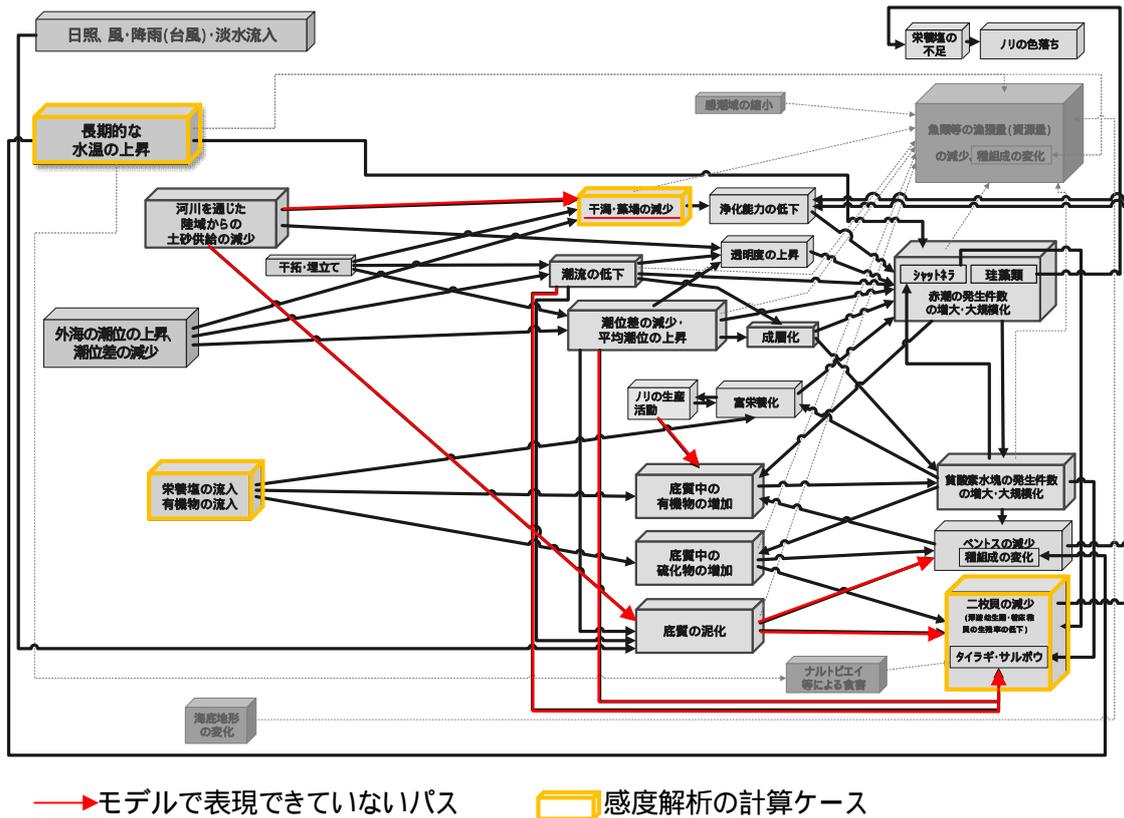


図8 貧酸素水塊の容積の各ケース間の比較

課題

今回、貧酸素水塊の改善のための方策を検討するため、数値シミュレーションモデルを用いて貧酸素水塊形成の要因解析を行った。近年の数値解析技術の発展により、高い精度で貧酸素水塊の発生状況（D0濃度の時空間変動）を表現することができるようになってきている一方で、モデル計算で考慮できていない課題がある。モデル設定に係る課題を図9に示す。



	経年的な地形変化(干潟)は考慮されていない。
	ノリの生産活動と底質中の有機物の増減との長期的な関係は考慮されていない。
	ベントスや二枚貝の分布は初期値として与えられる。底質の変化にともなってベントスや二枚貝の量が増減するモデルとなっていない。
	長期的な底質変化を解くモデルとなっていない(一時的な泥の堆積量・浸食量を計算)。
	潮位差、平均潮位や潮流の変化に伴って平均流が変化するモデルとなっているが、二枚貝の生活史(浮遊幼生)が考慮されていないため、流れの変化に伴う二枚貝の増減は考慮されていない。
	干潟・藻場の減少の内、干潟については地形改変を伴い潮流が変化するとかんがえられるため、と同様の理由で厳密にはモデルで考慮することはできない。

図9 モデルで表現できていない関連図パス

（参考）

全ての要因解析ケースのクロロフィル a 濃度（全層平均）と貧酸素水塊の容積の平均値（全層）の関係を図 10 に示した。海域の区分を色分けで表し、各点が要因解析各ケースに対応している。各要因解析ケースにおいて、クロロフィル a 濃度と貧酸素水塊の容積には正の相関があり、両者が対応していることが確認できる。

1 日当たりの酸素消費フラックス(水柱での有機物の分解 + 生物の呼吸 + 底泥の酸素消費 + ODU による酸素消費)と貧酸素水塊の容積（全層）との関係（図 11）では、正の相関がみられる。2009 年は酸素消費フラックス当たりの貧酸素水塊の容積が 2006 年よりも小さい傾向がある。また、図 12 に示すように 2009 年の成層強度は 2006 年と比べて小さい。

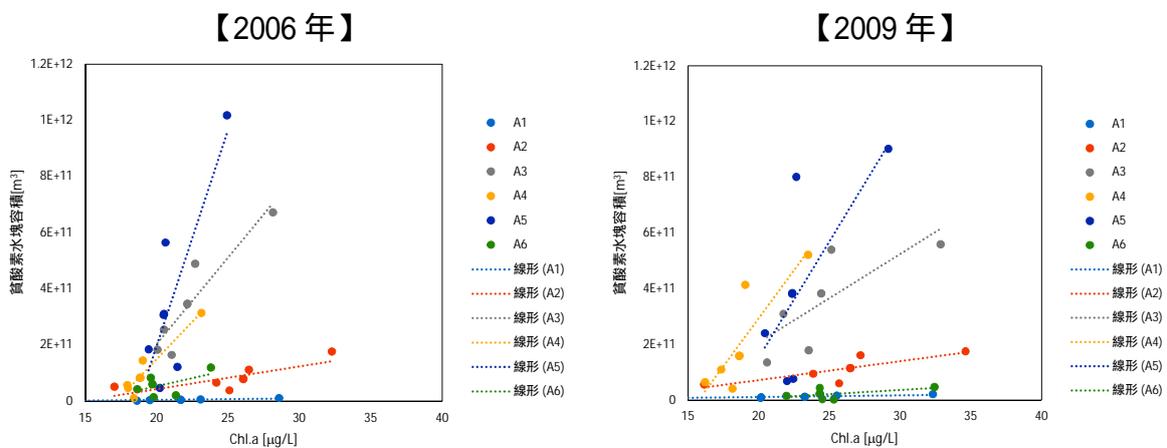


図 10 クロロフィル a 濃度の海域内平均値と貧酸素水塊の容積の関係

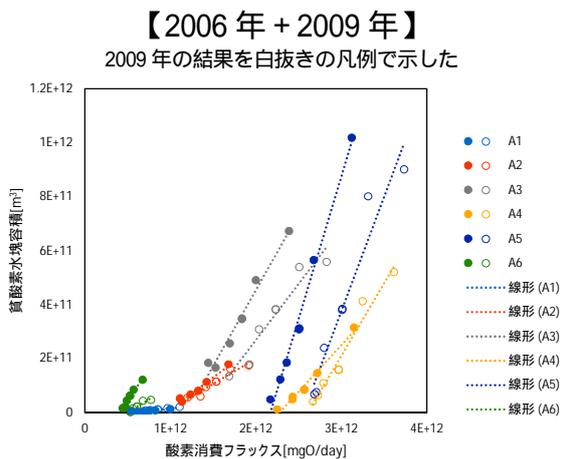


図 11 1 日当たりの酸素消費フラックスと貧酸素水塊の容積の関係

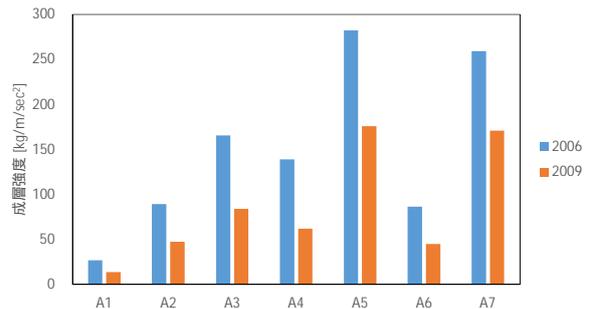


図 12 成層強度（海域内平均値）

イ) 二枚貝による改善効果の試算

試算の目的

有明海奥部の干潟縁辺域にはかつて広大なカキ礁が存在した。その一部は、明治時代から行われていた地まき養殖によるカキ養殖によって形成されたものである。これらのカキ礁は 1977 年には 546ha の面積を有していたが、漁場整備などのために減少し、2006-2007 年には 161ha になっている（水産庁，2011）。通常のカキ礁がマガキ 1 種からなるのに対して、有明海のカキ礁の特徴は、マガキ・シカメガキ・スミノエガキの 3 種のカキによって形成されることである。泥干潟の上にカキ礁が形成されると、そこに多くのベントスが住みこみ、単調な泥干潟に比べて生物多様性が高くなる。また、カキ礁はヤマノカミ・ハゼクチなどの有明海特産種を含む多くの魚類にとって、産卵場・生育場・摂餌場として利用されている。したがって、有明海奥部のカキ礁は生物多様性の保全機能を有している。さらに、カキ礁のカキによって植物プランクトンが補食されることにより、カキ礁は赤潮の抑制効果を有する。赤潮抑制によって底層に供給される有機物が減少すると、貧酸素水塊の抑制につながると考えられる。このように、カキ礁は海域の環境浄化機能も有していると考えられる。そこで、山口ら（2015）は、数値シミュレーションによって、有明海奥部におけるカキ礁の貧酸素抑制効果を評価した。

試算の内容

この研究では、有明海奥部における水温・塩分・底層溶存酸素濃度を精度良く再現できる 3 次元生態系シミュレーションモデルを構築し、このモデルを用いて、有明海奥部におけるカキ礁のカキバイオマスを現状の 2 倍にした場合について、底層の溶存酸素濃度の変化を推定した。計算は 2007 年 4 月 1 日～8 月 31 日の期間について行った。カキ礁再生の効果を調べるために、現況（Case a）と、カキ礁を新たに増やした 3 ケースの合計 4 ケースの計算を実施した。

カキ礁を増やしたケースについては、カキ礁の位置による効果の違いを検討するために、湾奥東部筑後川河口沖（Case b）、湾奥北部（Case c）、湾奥西部（Case d）の 3 つのケースについて検討した（図 13）。かつては現在の約 3.4 倍の面積のカキ礁があったが、現状においてカキ礁を復活させる場合にはノリ養殖場との兼ね合いがあるため、ここではノリ養殖場を避けて新たにカキ礁を増やし、その量は合計で現状のバイオマスの 2 倍が現実的と設定した。計算に

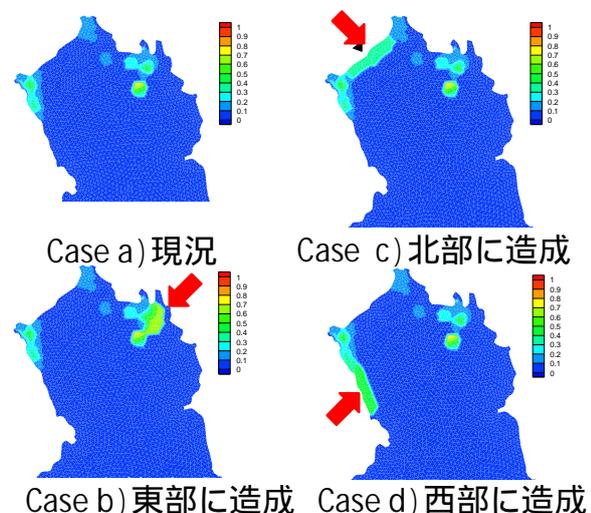


図 13 Case a～d のカキ礁の被覆度分布

使用したモデルの最小メッシュサイズは 500m であるが、個々のカキ礁のサイズはこれよりはるかに小さい。そこで、モデルでカキ礁を表現するにあたっては、メッシュ毎のカキ礁被覆度にカキの密度をかけたものをカキのバイオマスとした。図 13 に各ケースのカキ礁被覆度分布を示す。カキの密度としては、むき身乾重量/殻付湿重量 = 0.016、乾燥重量のうち 50 % が炭素として炭素換算 226.6 gC m^{-2} 、シカメガキ：マガキ：スミノエガキの比率は 4 : 3 : 3 とした。

試算の結果・考察

現況とカキ礁を増やした場合を比べると、カキ礁を増やした場合の方が表層の植物プランクトン密度は低下した。またカキ礁を増やした場合の方が底層溶存酸素濃度は高くなった。カキ礁の再生による底層溶存酸素濃度分布変化の予測の例として、東部海域にカキ礁を再生した場合（Case b）と現況（Case a）の違いを図 14 に示す。現況では有明海湾奥西部を中心にした海域と諫早湾に溶存酸素濃度が 3mg/L 以下の水塊が広がり、 2mg/L 以下の水塊も見られた。一方で、カキバイオマスを 2 倍にした Case b の場合には、溶存酸素濃度の低い水塊は広い範囲で縮小し、諫早湾内の 2mg/L 以下の水塊は見られなくなった。

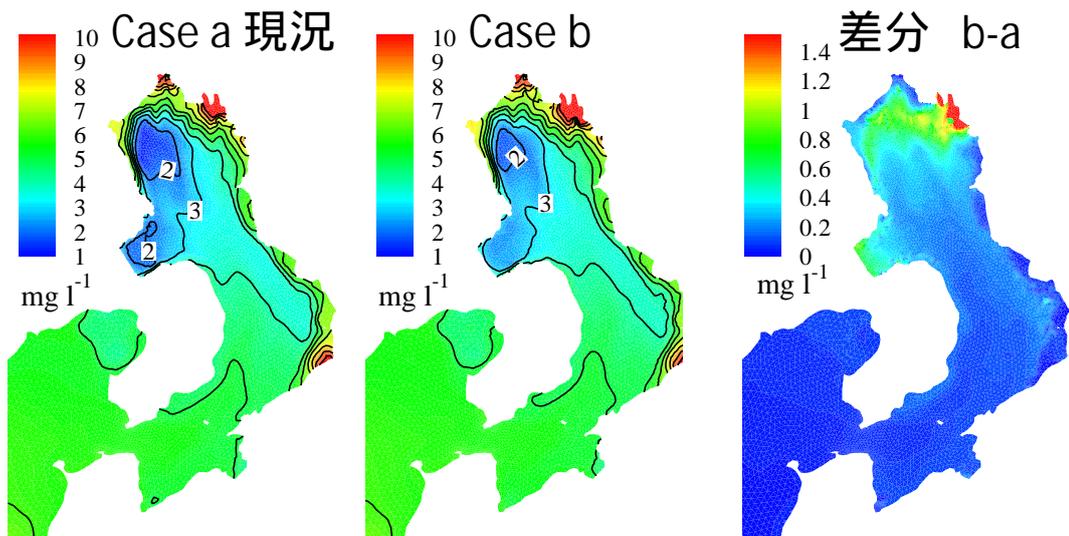


図 14 カキ礁再生による底層溶存酸素濃度分布の違い（Case a と b の比較）

より定量的な評価をするために、A3およびA6海域における貧酸素水塊の容積および底面積の変化を図15に示す。ここでは便宜上、溶存酸素濃度が3mg/L以下を貧酸素とした。A3・A6どちらの海域においても現況（Case a）よりもカキバイオマス2倍の場合（Case b）の方が貧酸素水塊の容積・底面積は小さくなった。Case bの場合、計算期間中の貧酸素水塊の積算容積は、A3海域については11%、A6海域については10%減少した。同様に計算期間中の貧酸素水塊の積算面積は、A3海域については10%、A6海域については5%減少した。

再生するカキ礁の場所による効果の違いを検討した結果では、計算期間中のA3海域の貧酸素水塊（3mg/L以下の水塊）の積算容積は、Case bでは現況よりも11%減少した。

以上の結果は、カキ礁を復活させることは、有明海奥部、諫早湾において貧酸素化を一定程度緩和する効果を有していることを示している。貧酸素水塊が縮小することによってカキ以外の二枚貝類の生息量が回復すれば、さらなる赤潮抑制・貧酸素緩和効果をもたらされる可能性がある。長期的にはこのような正のフィードバック効果を引き起こすことが望まれる。

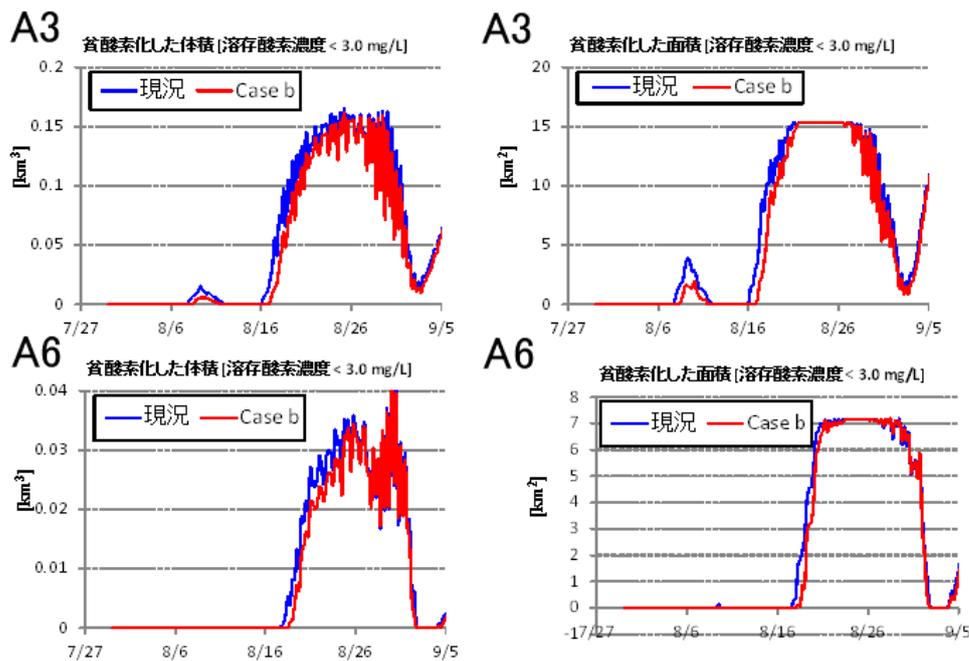


図15 カキ礁再生による貧酸素水塊の容積・底面積の変化（A3およびA6海域に関するCase aとbの比較）

文献

水産庁（2011）：平成22年度有明海等漁業関連情報提供委託事業報告書。

山口創一・速水祐一・木元克則（2015）：カキ礁による有明海貧酸素水塊の抑制効果。沿岸海洋研究，53(1)，25-38。

2) 二枚貝の浮遊幼生の供給ネットワークの試算

試算の目的

有明海のタイラギ漁獲量は2000年以降低位で推移しているが、その中で、2009年は久々の豊漁となった。これは2008年着底個体群が多かったことが原因である。この原因について2つの仮説が考えられる。1)2008年はその前後の年に比べて物理的な輸送によって湾奥に浮遊幼生が供給されやすかった。2)タイラギ幼生の浮遊期は貧酸素水塊が発生しやすい夏季であるが、2008年は浮遊幼生に対する貧酸素の影響が小さかった。そこで、これらの仮説について数値実験によって検討した。

試算の内容

検討にあたっては、有明海奥部における水温・塩分・底層溶存酸素濃度を精度良く再現できる3次元生態系シミュレーションモデルを構築し(山口ら、2015)、そのモデル上でオイラー・ラグランジェ法による粒子追跡実験を行った。さらに、各粒子について、浮遊期間中に経験する水質パラメータを記憶させ、輸送中に経験する環境履歴の影響を評価した。粒子については、タイラギ幼生を模して、浮遊期間を3~4週間とした。

資料6-2に示したように、有明海ではかつては湾奥部の広い範囲にタイラギ漁場が形成されていた。しかし、湾奥西部では、1990年代後半以降は2009年を除いてまとまった量の成育が見られなくなった。一方、湾奥東部では、2011年まで潜水器漁業によるタイラギ採捕が行われてきた。試算では、浮遊幼生の放出源として2つの海域を考えた(図16)。

A・Bは、タイラギの主漁場ではないが、徒取りで採捕されている情報がある有明海南部の東岸・西岸の海域である。2008年は7月と9月に湾奥で浮遊幼生量のピークが見られたが、実験ではこのうち9月のピークをターゲットとして、8月10日から各海域毎時100粒子の密度で幼生を模した浮遊粒子を放出した。こうした計算を2007年から2010年までの4ヶ年について行い、各年の比較を行った。

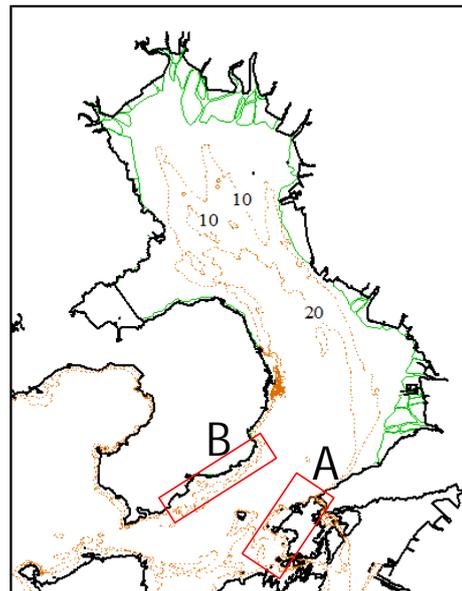


図16 数値実験における浮遊幼生の放出海域

試算の結果・考察

図 17 は、A・B 海域から粒子を放出したケースについて、放出開始から 3 週間後の粒子の分布を示したものである。2007 年から 2010 年までいずれの年も、湾外に流出する粒子がある一方で、湾奥部に対しても粒子の輸送があることがわかる。図 18 は、A・B 海域から粒子を放出したケースについて、着底可能期間である放出から 3 週～4 週間における有明海奥部への到達粒子数を示したものである。湾奥の東西いずれの海域についても、2008 年が最も多かった。また、A・B 海域から放出され、湾奥東部・西部に到達した粒子について、着底可能期間（3 週～4 週間）における貧酸素曝露日数（ここでは便宜上 3mg/L 以下を貧酸素とした）を調べたところ、2008 年が最も少なく、他の年と異なって貧酸素曝露日数は 0 日であった（図 19）。こうした結果は、2008 年の湾奥部への大量の浮遊幼生供給について、有明海南部からの輸送が寄与したこと、さらに輸送された浮遊幼生に対して貧酸素の悪影響が少なかったことが原因となった可能性を示唆している。

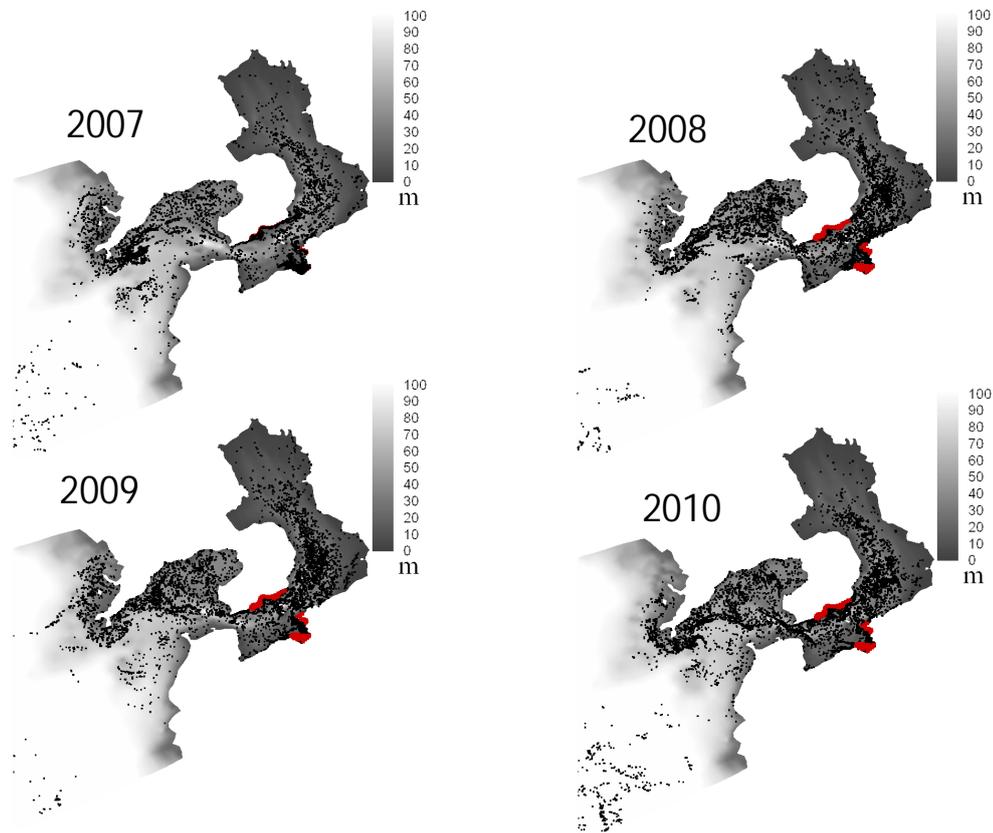


図 17 A・B 海域から放出 3 週間後の粒子の分布

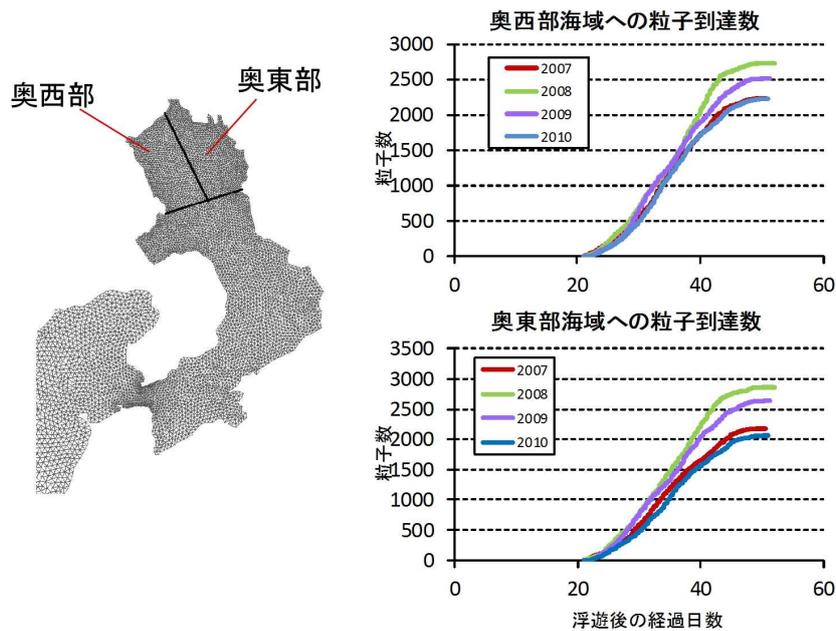


図 18 A・B 海域から放出 3～4 週間後における湾奥海域への到達粒子数

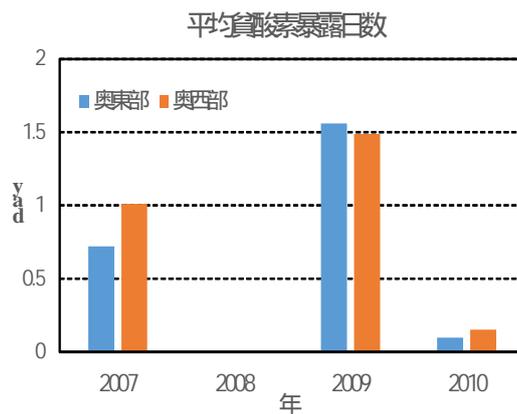


図 19 A・B 海域から放出後に有明海奥部に到達した粒子の貧酸素 (<3mg/L) 暴露平均日数

このような有明海南部から湾奥部への幼生輸送が生じる機構について考察する。夏季の有明海は湾奥部に多くの淡水流入があるため、湾スケールの流動構造としてエスチュアリー循環が卓越する。その結果、有明海南部と湾奥部をつなぐ海底水道における平均流は、上層で流出、下層で流入という流れとなる（図 20）。湾南部底層で発生したタイラギ浮遊幼生がこのような下層の流れに乗ると、湾奥部へと輸送される。2007、2009、2010 に比べて 2008 年は、8 月中旬から 9 月にかけて、下層で強い流入傾向にあった。これは、この年の計算期間における河川流量が他の年よりも多かったこと、北西風が強かったことにより、エスチュアリー循環が強化された結果であると考えられた。A・B 海域から奥部への粒子の輸送が 2008 年に最も多くなったのは、このようにエスチュア

リー循環が強化されたためであると考えられた。2008年が最も多かったものの、シミュレーションの結果ではA・B海域からの粒子はいずれの年についても湾奥にも輸送されたことから、主要漁場である有明海奥部だけでなく、有明海南部海域についても恒常的に有明海奥部への浮遊幼生の供給源として機能している可能性が考えられた。

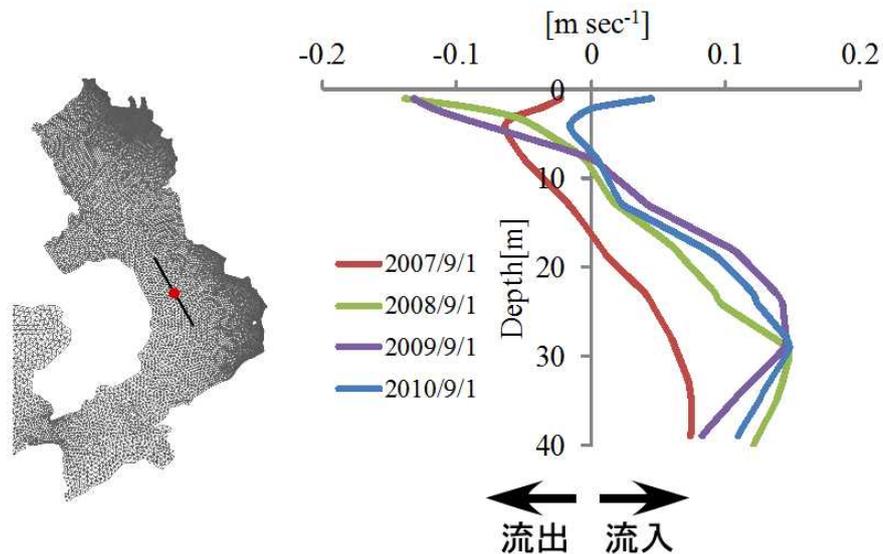


図20 有明海中央部における湾軸方向の平均流の鉛直分布

なお、2005～2007年に西海区水産研究所が行ったタイラギ浮遊幼生調査の結果では、比較的小型の浮遊幼生が南部（測点 M、S、A、F）で、大型の幼生が北部（O、P6、T5、B3）で見られたことから（図21）、南部で発生した浮遊幼生が北部へ輸送された可能性があるという上記の数値実験の結果と矛盾しない結果が得られている。

以上の結果は、タイラギの主漁場である有明海奥部に対しては、有明海奥部だけではなく有明海の広い範囲から浮遊幼生の供給がなされていることを示唆している。したがって、有明海奥部におけるタイラギ資源回復のためには、湾奥部だけでなく、有明海を個別海域・県域を越えて全体で捉え、様々な海域における母貝集団の保全・育成をしていくことが重要であると考えられた。

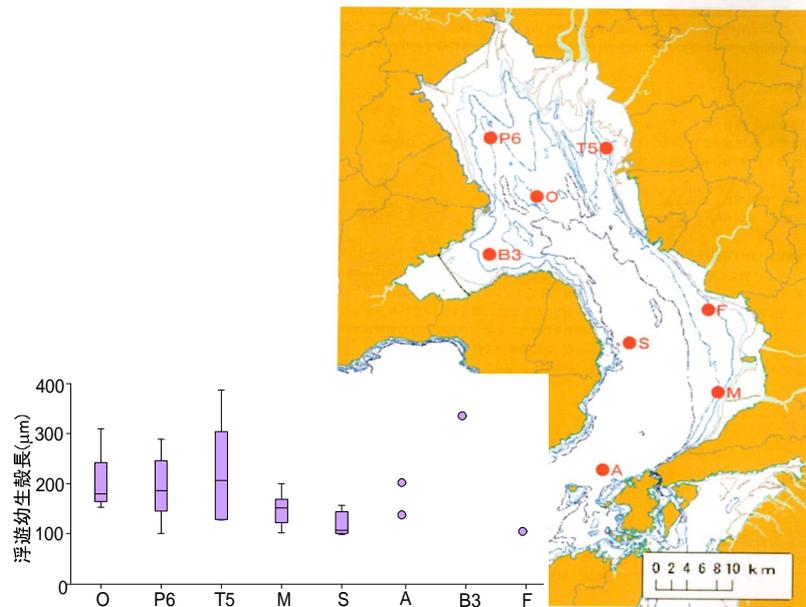


図 21 有明海におけるタイラギ浮遊幼生調査殻長組成（2005～2007年合計）（西海区水産研究所調査）

文献

国立研究開発法人水産総合研究センター・国立大学法人佐賀大学・いであ株式会社（2016）：平成27年度環境省請負業務結果報告書 有明海・八代海等再生評価支援（有明海二枚貝類の減少要因解明等調査）。

山口創一・速水祐一・木元克則（2015）：カキ礁による有明海貧酸素水塊の抑制効果。沿岸海洋研究，53(1)，25-38。

3) 八代海での赤潮被害防止対策の取り組み

八代海での赤潮発生予察に関する研究段階の先進的な事例を2つ記載した。

事例1

折田ら（2013）は、気象や海象に関する32項目の要因と赤潮発生について重回帰分析を実施して平均値との差を検定・整理したところ、6月中旬の日照時間、平均風速、入梅日の3項目に強い相関が認められることを見いだした。これらの3項目を用いて予測を行ったところ、確度高く赤潮発生を予測できることを示した（表4）。また項目と赤潮発生の因果関係について、図22のような関係にあることを推測している。

表4 重回帰分析による八代海における赤潮発生年の予測結果

年	赤潮発生	日照時間 6月中旬水俣	平均風速(北東) 6月八代	入梅日 5月1日起算	予測値	判定 [※]
1988	小発生	26.6	0.7	31.0	-0.6	—
1989	小発生	46.3	0.5	35.0	-0.4	—
1990	発生	67.7	1.3	29.0	0.7	A
1991	非発生	12.8	0.7	18.0	-1.5	B
1992	発生	55.2	0.9	35.0	0.3	A
1993	非発生	16.2	1.1	16.0	-1.0	B
1994	非発生	16.2	0.8	24.0	-1.1	B
1995	非発生	40.5	0.7	24.0	-0.8	B
1996	非発生	9.4	0.7	26.0	-1.2	B
1997	非発生	47.1	0.9	32.0	0.0	B
1998	非発生	35.2	0.5	27.0	-1.0	B
1999	非発生	31.1	0.7	32.0	-0.4	B
2000	非発生	44.4	0.4	25.0	-1.1	B
2001	非発生	55.9	0.8	20.0	-0.6	B
2002	小発生	47.4	1.0	40.0	0.6	—
2003	発生	19.0	1.2	39.0	0.4	A
2004	発生	70.4	1.3	28.0	0.7	A
2005	発生	52.7	1.5	41.0	1.5	A
2006	小発生	44.6	0.9	25.0	-0.3	—
2007	非発生	31.6	0.4	31.0	-1.0	B
2008	小発生	27.6	0.6	27.0	-1.0	—
2009	発生	77.1	1.1	32.0	0.7	A
2010	発生	31.9	1.1	42.0	0.7	A
2011	非発生	5.8	0.9	22.0	-1.2	B
2012	非発生	21.2	1.2	30.0	-0.1	B

※判定 A:発生予想 B:非発生予想 —:判定対象外

（予測式）+ 値の場合は発生予想、- 値の場合は非発生予想

$$\begin{aligned} \text{赤潮発生} &= 0.015 \times \text{日照時間（6月中旬の水俣での日照時間(hr））} \\ &+ 1.378 \times \text{平均風速（北東）（6月の八代での平均風速(m/s））} \\ &+ 0.056 \times \text{入梅日（5月1日から九州南部梅雨入り日までの積算日数）} \\ &- 3.723 \end{aligned}$$

$$\text{補正 } R^2 = 0.734 \quad F = 18.48 \quad (p < 0.001)$$

シャットネラが100 cells/ml以上出現した年を赤潮発生と判定した

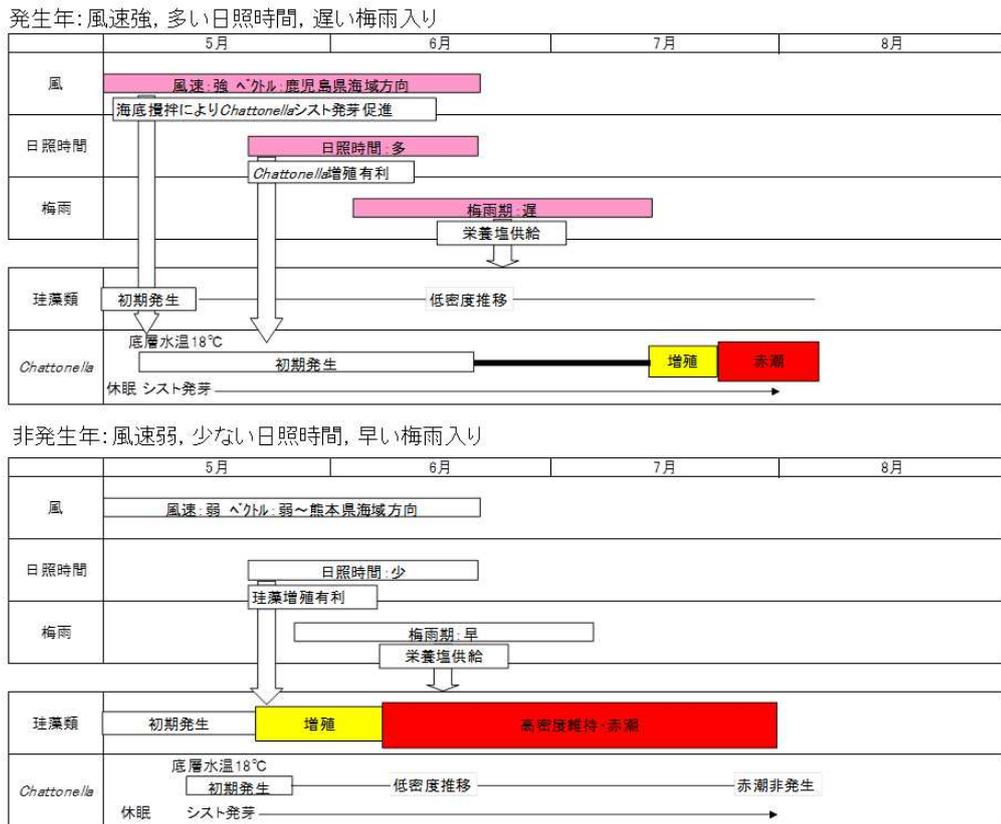


図 22 八代海において赤潮発生に関与する因子の相互作用（折田ら 2013）

折田ら（2013）における3要因と赤潮発生との因果関係を要約すると以下のようになる。

- ・赤潮発生前に湾軸方向である北東風が卓越すると、海底が攪乱されてシャットネラのシストが再懸濁して発芽しやすくなる。
- ・次にシストから発芽直後のシャットネラは、5月から6月にかけて日照時間が長いと光合成が活発になって急激に増殖する。逆に競合者である珪藻類は出現が低調である。
- ・こうした状況が続くと6月中旬にはシャットネラがある程度の密度まで増殖する。
- ・シャットネラは遊泳しながら海面から海底近くの栄養塩まで利用可能であるため、入梅日が遅く海面近くの栄養塩濃度が低く推移しても、珪藻類と異なり栄養欠乏に陥り難い特性を有している。
- ・6月上旬の段階で珪藻類が卓越し、例年通りに6月上旬に梅雨入りで降雨があれば、海域に負荷された栄養塩が珪藻類へと移行し、シャットネラは台頭できない。しかし、6月下旬まで降雨による栄養塩負荷がないと、珪藻類の出現が低調でシャットネラが赤潮発生直前まで増殖しているため、海域に負荷された栄養塩がシャットネラに利用されて赤潮が発生する。

事例2

Onitsuka et al. (2015) は 1998 年から 2012 年までの 25 年間のシャットネラ赤潮発生状況と 1 月から 6 月までの気象データを解析し、八代海におけるシャットネラ赤潮の発生に関わる気象因子を抽出した。その結果、赤潮の発生時期と 2 月から 4 月の平均気温(八代市)と九州南部の入梅日との間に相関があることを示した(図 23)。すなわち、八代市の冬期の平均気温と入梅日という 2 つの気象因子をプロットすることにより、赤潮発生年・非発生年を区分することが可能だという。

この場合の赤潮発生プロセスは以下のように推定されている。

- ・冬期の平均気温が高いと、海域の水温も例年よりも高く推移する。このことにより、シャットネラの初期出現が例年よりも早くなる。
- ・この状態でシャットネラが高い細胞密度に達し、なおかつ例年よりも入梅日が遅れると、より効率的に陸域から負荷された栄養塩がシャットネラに利用され、赤潮が発生する。

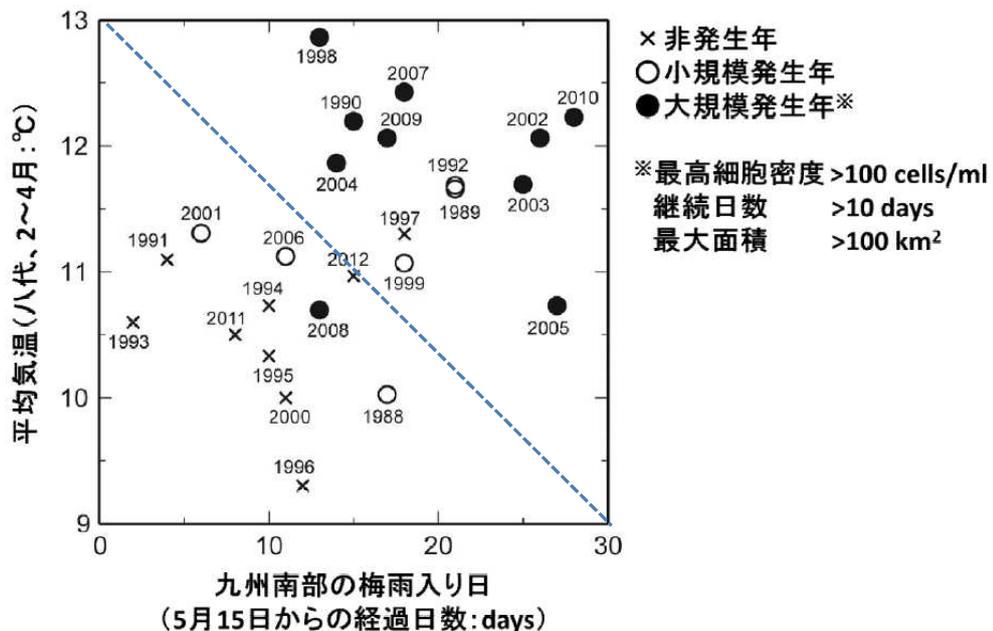


図 23 シャットネラ赤潮の発生と 2 月から 4 月の気温(アメダス八代)および九州南部の梅雨入り日との関係

折田ら(2013)と Onitsuka et al. (2015) のいずれも、6 月の時点でシャットネラがある程度高密度になった状況で降雨があると、陸域から負荷された栄養塩がシャットネラに利用されて赤潮が発生するという点で合致している。特に Onitsuka et al. (2015) の場合は冬期の平均気温が予測因子の一つとしてあげられており、長期予測が可能であろう。

出典:

事例 1: 折田和三・西広海・田原義雄・中村章彦(2013) 統計学的手法を用いた八代海の *Chattonella*

赤潮発生に関与する要因抽出と予察の可能性．鹿児島県水産技術開発センター研究報告，4，24-32

事例2：Onitsuka G, Aoki K, Shimizu M (2015) Meteorological conditions preceding *Chattonella* bloom events in the Yatsushiro Sea, Japan, and possible links with the East Asian monsoon. Fisheries Science 81, 123-130

3．再生方策と評価

これまでの考察結果を踏まえ、本資料の第1節に記載した再生目標を達成するため、本資料の第2節のケーススタディで得られた知見も加えて検討を行い、具体的に講ずることが適当と考えられる再生方策を以下に示す。

(1) 有明海・八代海等全体に共通する再生方策

海域全体又は多くの海域に共通する再生方策を以下に示す。

ア) 二枚貝に係る方策

タイラギやアサリなどの二枚貝の減少について、海域毎に主な原因を把握したうえで、海域毎の状況に応じ、1)浮遊幼生の量を増やす、2)着底稚貝の量を増やす、3)成長する貝を増やす、の各ステージについて適切な対策を講じることが重要である。

各海域に共通の再生方策を以下に示す。

- ・タイラギやアサリについて、近年、浮遊幼生や着底稚貝の量が非常に低位で推移してきた。しかしながら、アサリは、2015年よりの着底量が好調であり、タイラギも局所的に着底している。生息量の回復のため、このような状況の中で確実に資源回復に繋げるための資源管理方法を早急に確立し、実施に移す。
- ・タイラギ等の二枚貝の増養殖技術を確立する。
- ・種苗放流を推進する（有明海固有の生態系保全が確保できることを前提とする）。
- ・成長する貝を増やすため、ナルトビエイ等の食害生物の駆除を、引き続き適切に実施し、食害生物による被害の軽減を図る。この際、希少種が混獲されないよう十分留意する。

イ) 魚類等に係る方策

（魚類の減少（養殖以外）について、次回の作業小委員会で示すことを予定。）

ウ) ベントスに係る方策

ベントスのモニタリングと評価

ベントスはタイラギ、アサリ等の有用二枚貝も含むものであり、その種類数や個体数が海域毎の本来あるべき姿と比較して減少している場合、生物豊かな水環境や持続可能性が損なわれている可能性がある。

各海域のベントスの種類や数について、今後も継続的にモニタリングを行い、異変が生じた際にはその原因を適確に評価し、その結果に応じ必要な場合は再生方策

を講じる。

底質環境の改善

浮泥の増大については、継続的なモニタリングを実施した以降の限られた期間のデータからは、海域全体の傾向としては確認されなかった。

土砂供給の減少は、1950～60年代の砂利採取等により筑後川から海域へ砂の供給量が減少したと思われることから、筑後川における人為的な砂の持ち出しが底質の細粒化の一因となる可能性がある。限られた近年のデータからは、海域での底質の細粒化（泥化）について、一様な一方向の増加傾向は確認されなかった。

生物豊かな水環境を確保するためには、1970年頃以前の底質環境を目指すべきである。また、底質環境は複雑であるため場所により泥化傾向を示す地点があるが、有用二枚貝など水生生物の保全・再生のため改善が必要な場合もある。このため、底質環境の改善の観点から講ずることが重要である各海域に共通の施策を以下に記載する。

- ・流域の土地利用と流出土砂対策を適切に行う。
- ・河川からの土砂流出量の調査を行い、適切な土砂管理を行う（砂利採取の制限等）。
- ・持続性の高い二枚貝の漁場の造成・改善に資する底層の流況、浮泥の巻き上げ等に関する調査を実施する。
- ・泥化して有機物や硫化物が蓄積した底質の改善のため、効果の持続性を考慮しつつ、好気微生物の活性の促進等を目的とした諸施策（浚渫、耕耘、覆砂、海水交流の改善等）を実施し、併せて関連技術を開発する。
- ・ダム堆砂の除去、還元等を検討する。

エ）ノリ養殖に係る方策

ノリの色落ちの被害ができるだけ生じないようにするため、珪藻赤潮発生を適切に予察することに加え、発生機構をより明確化していくことが重要である。

また、持続可能性の高いノリ養殖のため、以下の施策を推進する。

- ・漁業者の協力を得た適切な漁場利用（減柵を含む）により漁場環境を改善し、高品質・高付加価値のノリ生産を推進する。
- ・酸処理剤と施肥の適正使用のため、有明海の負荷となる栄養塩や有機酸量の継続的にチェックするとともに、環境負荷の軽減に配慮したノリ養殖技術を確立する。
- ・水温上昇等に対応したノリ養殖技術を開発する。（高水温耐性品種、広水温耐性品種、耐病性品種、低栄養塩耐性品種の開発等）

オ）沿岸域の環境保全、再生

沿岸域の環境保全、再生は生物豊かで持続可能性の高い水環境の確保のため、重要である。各海域共通の施策を以下に記載する。

- ・海域の潮流速の低下を招くおそれのある開発を実施する場合、これに対して予防的な観点から適切に配慮する。

- ・汚濁負荷の削減（生活排水対策、土地利用に伴う負荷対策等）、流入・浮遊・漂着ゴミの除去、必要に応じた河川の流況調整を行う。
- ・稚仔魚の育成場の確保、浄化能力の維持のため、干潟、藻場及び感潮域について、その分布状況把握など基礎情報の整備を進めつつ、保全・再生する。

（２）有明海の個別海域毎の再生方策

上述（１）の海域共通の再生方策に加え、有明海の個別海域毎の再生方策を以下に示す。（海域共通の再生方策欄に記載した内容については、以下の個別海域毎の欄には記載していない。）

【A 1 海域】

サルボウの安定的な生息

- ・夏の貧酸素水塊を軽減させる。（軽減方策については、A 3 海域のタイラギの項参照。）

アサリ生息量の回復

- ・底質については、調査データがある 2001 年以降においては、一様に泥化している傾向は見られないものの、着底稚貝の量を増やすため、覆砂を行う。（留意事項については、A 4 海域の覆砂の項参照。）

【A 2 海域】

タイラギ生息量の回復

- ・浮遊幼生の量を増やすため、有明海を、海域・県域を越えて全体でとらえ、広域的な母貝集団ネットワークの形成を図る。

< 具体的対策例 >

- ▶ 母貝生息適地の具体的に選定する。
- ▶ 母貝生息適地を保全・再生する。
- ▶ 母貝生息適地へ稚貝を放流する。（タイラギについては、近年、陸上施設における人工種苗生産技術が確立されつつある。）
- ・着底後成長する貝を増やすため、立枯斃死の原因分析のための調査を実施する。

ベントスの種類数・個体数の回復

- ・ベントスの種類数・個体数の減少要因の解析調査を行う。

【A 3 海域】

タイラギ生息量の回復

- ・浮遊幼生の量を増やすため、有明海を、海域・県域を越えて全体でとらえ、広域的な母貝集団ネットワークの形成を図る。

（具体的対策例については、A 2 海域の項参照。）

- ・着底稚貝の量や成長する貝を増やすため、貧酸素水塊を軽減させる。
 - ▶ 2013年～2015年の夏は貧酸素累積時間がそれ以前（2004年～2012年）と比較して短く、貧酸素の度合いが比較的軽微であった。この点について現時点では評価が難しいが、改善の兆しの可能性もあるため、今後もモニタリングを実施し、評価委員会における専門家の評価を行う。
 - ▶ 底層溶存酸素量が、2016年3月に水質環境基準（生活環境項目）に追加されたことから、今後、適切に類型指定を行う。
 - ▶ 上述の近年の貧酸素水塊軽減傾向が継続され、さらに改善されるよう、以下の対策を講じる。
 - 有明海における汚濁負荷量を増加させない。
 - 有用二枚貝の生息量を回復させるための生息環境を保全・再生する。
（例えば、カキ礁を再生する。）
 - ベントスの生息密度を回復させるための生息環境を保全・再生し、多様性を確保する。

サルボウの安定的な生息

- ・夏の貧酸素水塊を軽減させる。（軽減方策については、上述のタイラギの欄における施策と同様。）

ベントスの種類数、個体数の回復

- ・ベントスの種類数、個体数の減少要因の解析調査を行う。

【A4 海域】

アサリ生息量の回復

- ・浮遊幼生の量を増やすため、有明海を全体でとらえ、広域的な母貝集団ネットワークの形成を図る。
 - < 具体的対策例 >
 - ▶ 母貝生息適地を具体的に選定する。
 - ▶ 母貝生息適地を保全・再生する。
 - ▶ なぎさ線を保全・再生する。
- ・底質については、調査データがある1993年以降においては、一様に泥化している傾向はみられなかったものの、着底稚貝の量を増やすため、覆砂を行う。
 - 実施に当たっては、水域によっては効果の継続性が乏しい場合があること、海砂採取の規制海域が拡大し、今後、その入手が困難になることが想定されること、また、海砂採取が採取海域の漁場環境に影響を及ぼすおそれがあることに留意する。
- ・着底稚貝量を増やすため、なぎさ線の保全・再生を行う。
- ・成長する貝を増やすため、成長阻害要因分析のための調査を実施する。

【A 5 海域】

水環境や生物のモニタリングを実施し、継続的に評価する。

【A 6 海域】

アサリ生息量の回復

- ・アサリの生産地が元々は泥質干潟であることを踏まえ、着底稚貝の量を増やすため、覆砂を行う。（留意事項については、A 4 海域の覆砂の項参照。）

【A 7 海域】

水環境や生物のモニタリングを実施し、継続的に評価する。

（3）八代海の海域毎の個別の再生方策

上述（1）の海域共通の再生方策に加え、八代海の海域毎の個別の再生方策を以下に示す。

【Y 1 海域】

水環境や生物のモニタリングを実施し、継続的に評価する。

【Y 2 海域】

アサリ生息量の回復

- ・底質については、調査データがある 2003 年以降においては、一様に泥化している傾向は見られないものの、着底稚貝の量を増やすため、覆砂を行う。（留意事項については、A 4 海域の覆砂の項参照。）

【Y 3 海域】

持続可能性の高い魚介類養殖のため、以下の施策を推進する。

- ・有害赤潮の発生予察の推進
- ・赤潮モニタリング体制の強化、赤潮被害軽減のための情報網の整備、防除技術に関する研究の推進
- ・環境収容力、歩留まり率を考慮した生産の検討、ブランド化の推進（質への転換）
- ・給餌等に伴う負荷発生の抑制対策の推進

【Y 4 海域】

持続可能性の高い魚介類養殖のため、各種施策を推進する。

（個別施策の内容は、上述の Y 3 海域における施策と同様。）

【Y 5 海域】

持続可能性の高い魚介類養殖のため、各種施策を推進する。

（個別施策の内容は、上述の Y 3 海域における施策と同様。）

（４）橘湾・牛深周辺海域の再生方策

橘湾・牛深周辺海域の再生方策を以下に示す。

持続可能性の高い魚介類養殖のため、各種施策を推進する。

（個別施策の内容は、上述の Y3 海域における施策と同様。）

（５）継続的な評価

評価委員会においては、生物や水環境のモニタリング結果の確認を含め、本章で掲げた再生目標の達成状況や方策の実施状況等を定期的に確認し、これも踏まえて有明海・八代海等の再生に係る評価を適切に実施することとする。

また、具体的な再生方策の実施にあたっては、個別の対策事業を所管する者においては、その方策が海域の再生に果たす効果とこれに要する費用を可能な限り定量的に比較・検討した上で、効率的に事業を実施し、事業実施後に適切にレビューすることが肝要である。

4．解明すべき課題

（次回の作業小委員会で示すことを予定。）