

## （参考）ケーススタディ

本章において、有明海・八代海等の再生目標、再生方策を記載した。

いくつかの再生方策について、その妥当性や効果を検証するため、モデル計算等を用いた検討を行うとともに、先進事例をあわせて整理した。

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、本章に記載した個々の再生方策の設定のためにそれぞれケーススタディが必須というものではないが、1) 貧酸素水塊の改善方策検討のための試算、2) 二枚貝（タイラギ、アサリ）の浮遊幼生の供給ネットワークの試算、及び、3) 八代海での赤潮被害防止対策の取組については、再生方策の検討にあたり有益かつ示唆に富む結果が得られていると考えられることから、以下に紹介する。

本項では、（1）に各ケーススタディの背景と結果概要、（2）に各ケーススタディの内容を記載した。

### （1）各ケーススタディの背景と結果概要

#### 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

海域ごとに問題点及びその原因・要因について考察した結果、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、その知見が十分ではない。

そこで、貧酸素水塊の改善のための再生方策の方向性を検証するため、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。

##### （試算結果）

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・最小ケースで計算を行った。水温の違いは酸素消費速度の大きさに関係する。二枚貝の増加は、植物プランクトンを補食することによって海域内部での有機物生産量を減少させる。有機物生産量が減少すると、それが分解されることで生じる酸素消費量が減少する。流入負荷については有機物と窒素・リンの流入が含まれる。有機物流入量の変化は、それが分解されることで生じる酸素消費量の変化に関係する。窒素・リン流入量の変化は、それを栄養源として増殖する植物プランクトンの生産量を変化させ、海域内部での有機物生産量を変化させる。

計算の結果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程度となる試算結果となった（0.3は容積が30%になることを表す）。

以上のことから、A1・A3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。

ただし、この計算では二枚貝の最大ケースを考えるに当たって、貧酸素・硫化水素発生による二枚貝の死亡は考慮していないことに注意が必要である。

### イ) 二枚貝による貧酸素水塊の改善効果の試算

上述ア)の要因解析により、二枚貝の生息量を増やすことも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一例として、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」を取り上げ、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った。

#### (試算結果)

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底層溶存酸素量は高くなった。

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・貧酸素緩和効果が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。

## 2) 二枚貝の浮遊幼生の供給ネットワークの試算

### ア) タイラギ

4章において、特に2012年以降、湾奥全域でタイラギ資源の減少傾向が顕在化しており、浮遊幼生発生量の低下による再生産機構の低下状況が示された。

主漁場であるA2海域及びA3海域における資源の減少に関係したデータとして、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その後低位で推移していること、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挙げられた。

タイラギ再生のため、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した。

#### （試算結果）

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可能性があることが示唆された。有明海奥部におけるタイラギ資源回復のためには、湾奥部だけではなく、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。なお、今回のシミュレーションでは、浮遊幼生の鉛直分布、放出時期の推定・母貝密度の考慮などの課題がある。

#### イ) アサリ

4章において、特に2009年以降、全域でアサリ資源の減少傾向が顕在化しており、浮遊幼生発生量の低下による再生産機構の低下状況が示された。

主漁場であるA1海域、A4海域及びA6海域における資源の減少に関係したデータとして、浮遊幼生の供給量がA4海域では2004年及び2005年に瞬間的に高密度の出現があったがその後低位で推移していること、A1海域及びA6海域でも同様に低位で推移していることが類推されることが挙げられた。

アサリ再生のため、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。

アサリ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把握できれば、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。

2015年度から、福岡県、佐賀県、長崎県及び熊本県の4県と農林水産省が協調し、（国研）水産研究・教育機構西海区水産研究所有明海・八代海漁業環境研究センターの助言等の協力の下、有明海の再生に資する二枚貝類等の資源回復に向け、二枚貝類の浮遊幼生・着定稚貝調査を実施し、この結果を基にモデル解析によるアサリ浮遊幼生の産卵場・着底場の推定が行われている。

#### （試算結果）

福岡県地先から有明海東岸域にわたりアサリの産卵場がみられ、現在の主要なアサリ漁場と概ね一致した。また、福岡県地先、熊本県荒尾沖、白川・緑川沖や諫早湾内において着底場がみられた。有明海では広域的にアサリ浮遊幼生が供給される関係にあることが推定された。

#### 3) 八代海での赤潮被害防止対策の取組

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*Chattonella*属赤潮の発生により大きな被害が発生する

など、現在、国内でも本種の赤潮発生が多い海域となっている。

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）が挙げられる。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取り上げた。

#### （先進事例）

折田ら（2013）は、6月中旬の日照時間、6月の八代での北東風の平均風速、入梅日の3項目に強い相関が認められ、これらを用いた重回帰式により、6月末時点で精度高く赤潮発生を予測できることを示した。これによると、5月から6月上旬頃、北東風が卓越し日照時間が長いと、海底が攪乱されて *Chattonella* のシストが発芽しやすくなり、光合成が活発となり急激に増殖。この状態で、6月下旬まで降雨がないと珪藻類の出現が低調となり、その後の降雨による栄養塩が *Chattonella* に利用され赤潮が発生するもの。

また、Onitsuka et al.（2015）は、赤潮の発生時期と八代市の2月から4月の平均気温と九州南部の入梅日から赤潮発生年・非発生年を区分することが可能であることを示した。これによると、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し、*Chattonella* の初期出現が例年よりも早くなる。この状態で *Chattonella* 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 *Chattonella* に利用され、赤潮が発生するもの。

上記いずれも、6月の時点で *Chattonella* 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 *Chattonella* に利用されて赤潮が発生するという予察を示した。Onitsuka et al.（2015）の例では、冬期の平均気温が予測因子の一つとして挙げられており、長期予測が可能と考えられる。

## (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

##### ① 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を検討することを目的とする。

##### ② 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 5.3 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 $\sigma$ 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 5.4、考慮した物質循環を図 5.5 に示す。

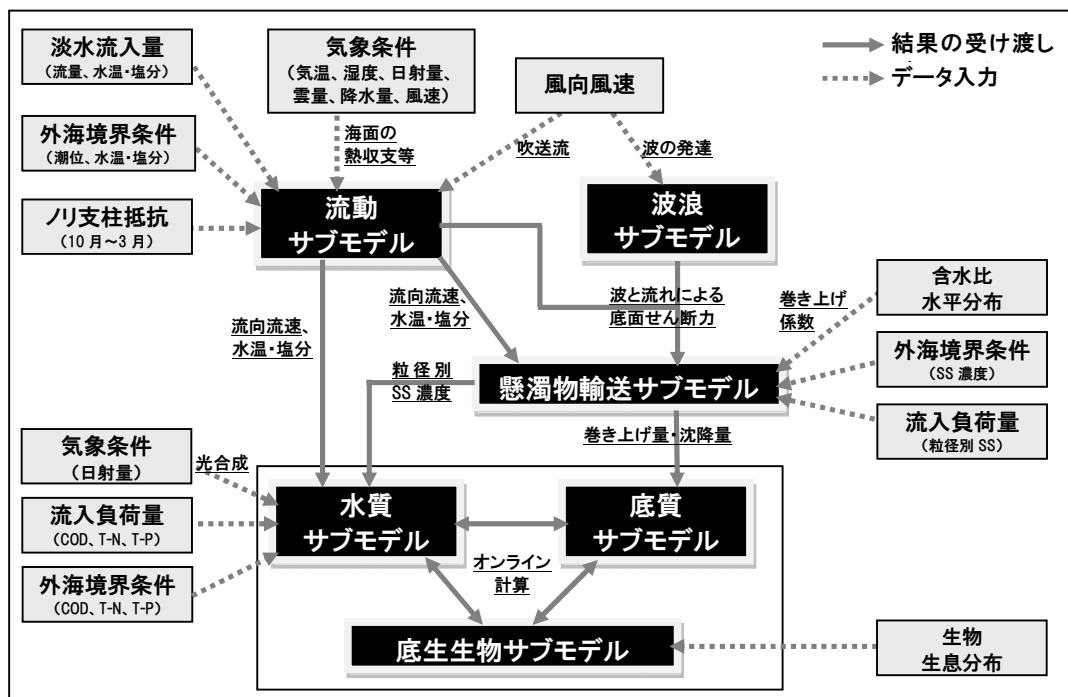


図 5.3 数値シミュレーションモデル構成

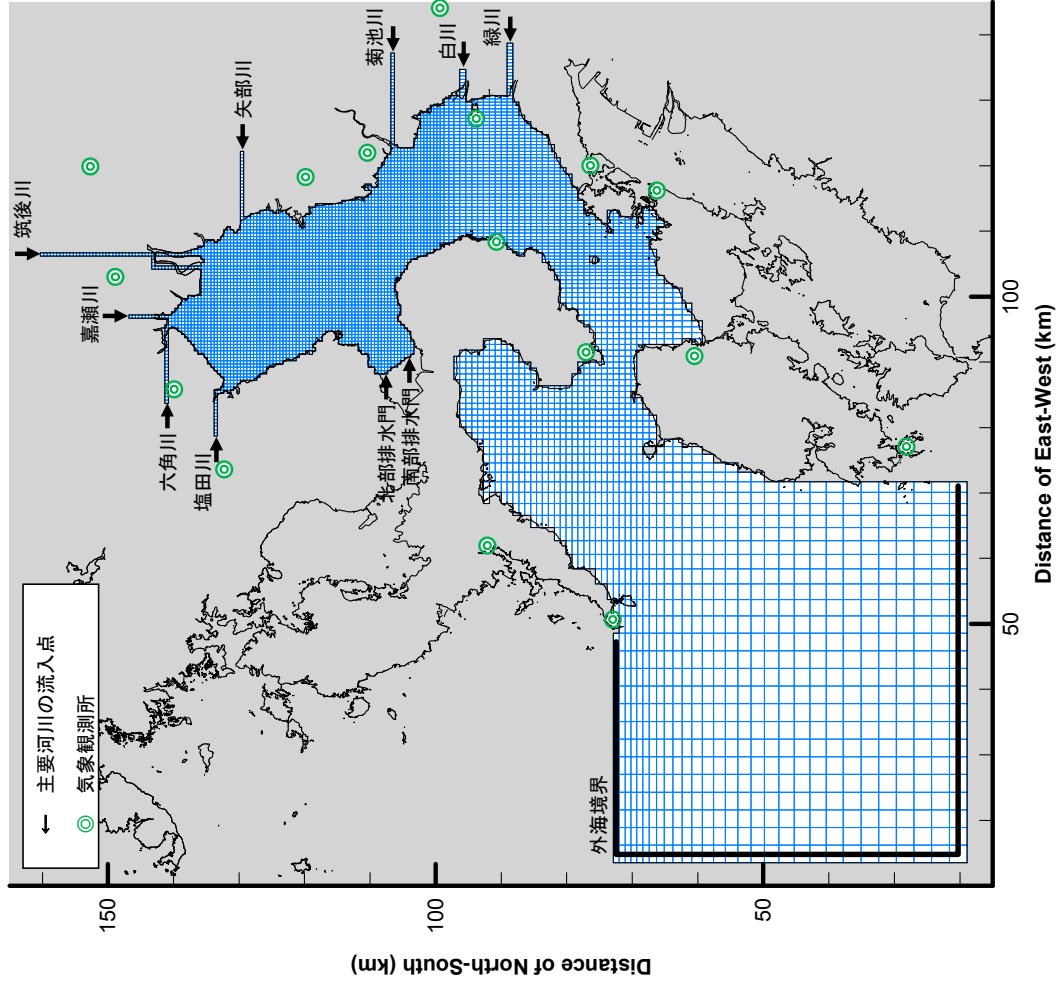


図 5.4 計算格子

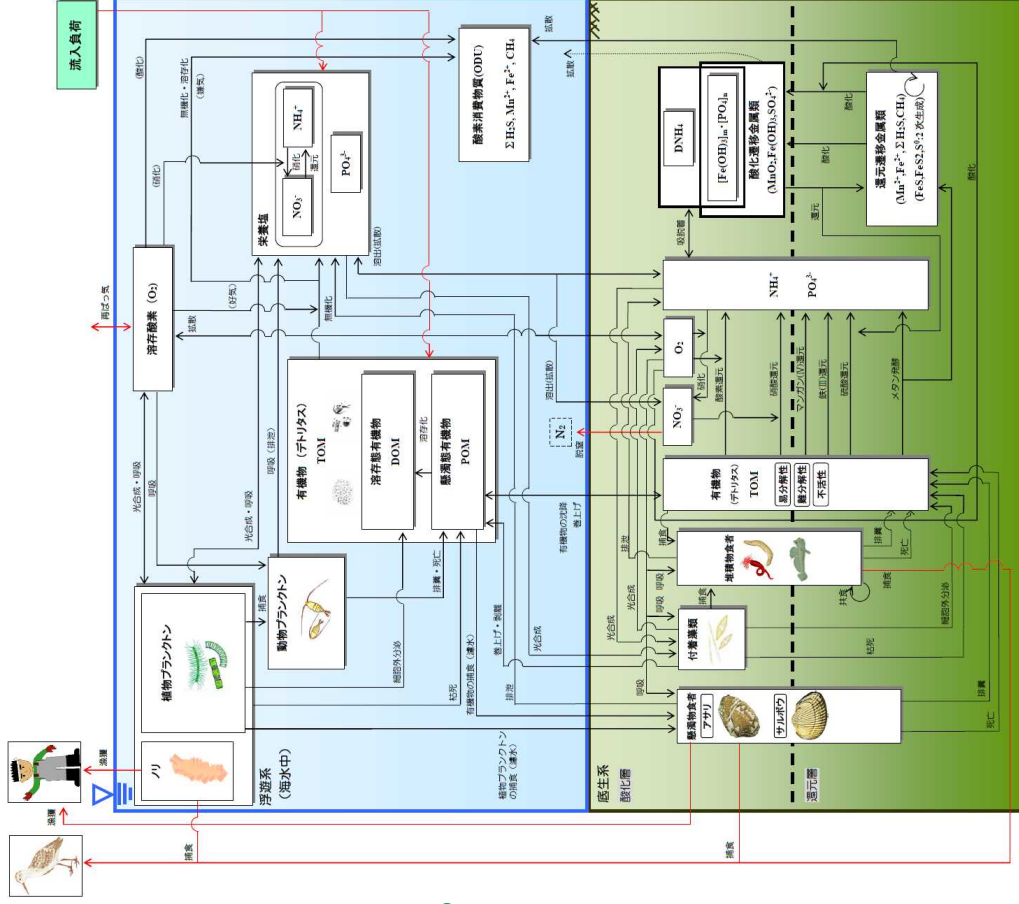
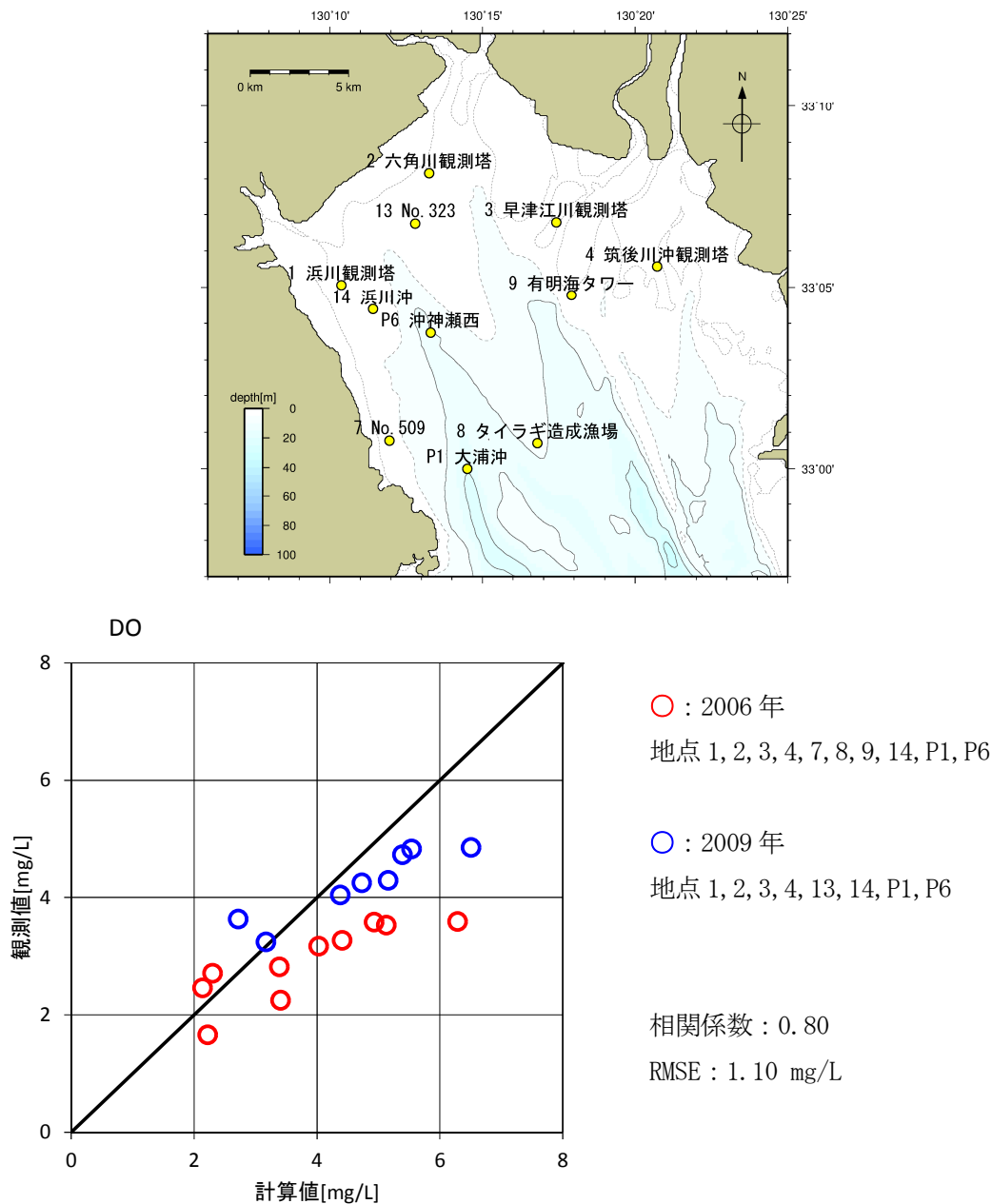


図 5.5 水質・底質・底生生物サブモデルで考慮する物質循環

b) 溶存酸素量の再現性

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 5.6 に溶存酸素量の現地観測地点と各年の8月の1ヶ月平均値の比較を示す。



注) 2006年は10地点、2009年は8地点の8月の1ヶ月平均値の比較

図 5.6 溶存酸素量の現地観測地点と底層溶存酸素量の再現性の確認

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

4章の問題点と原因・要因との関連の連関図（図 4.3.1、図 4.3.2）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 5.1 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 5.1 要因解析の計算ケース

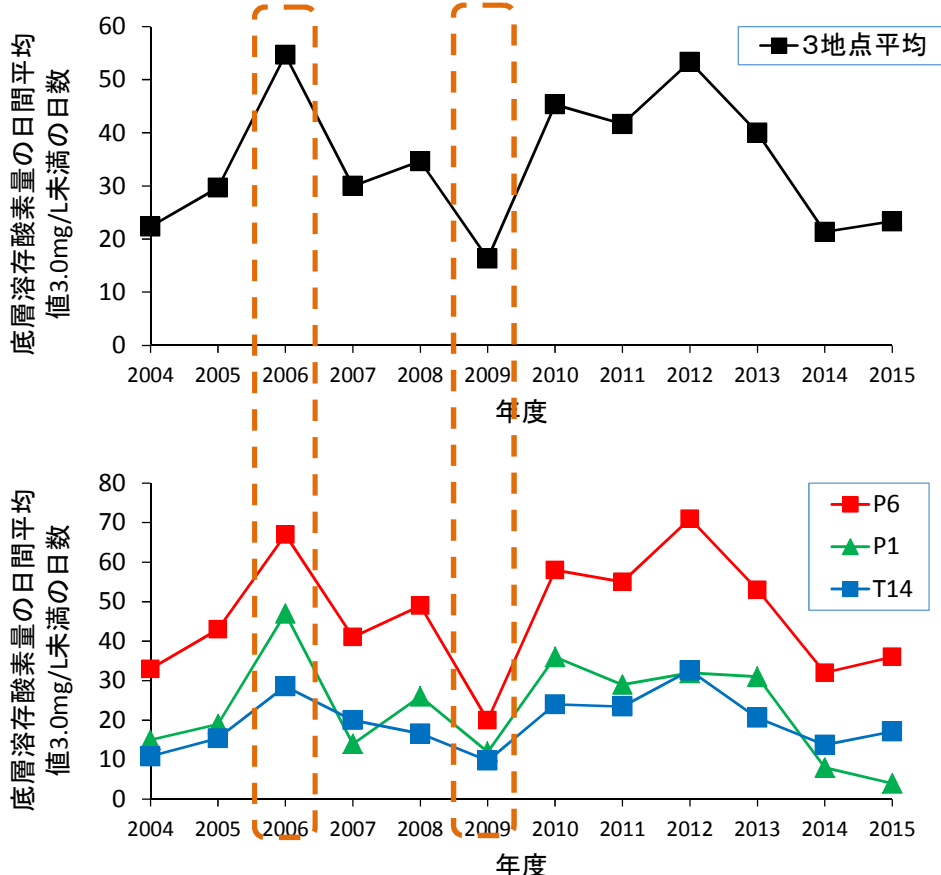
No.	ケースの内容	解析内容
1	長期的な水温の上昇	水温の違いによる貧酸素水塊の容積
2	藻場の減少	1970年代と現在の藻場面積（水質浄化能力）の違いによる貧酸素水塊の容積
3	栄養塩の流入 有機物の流入	過去から現在の流入負荷量の違いによる貧酸素水塊の容積
4	二枚貝の減少	過去と現在の二枚貝生息（水質浄化能力）の違いによる貧酸素水塊の容積

## 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期の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3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 5.7）。



※ここでは溶存酸素量 3.0mg/L 未満を貧酸素水塊として定義している



注) 1. 測定地点は、3章6. 貧酸素水塊の図 3.6.1 に示すとおりである。  
2. 各年度、各地点の底層溶存酸素量の日間平均値が 3.0mg/L 未満となった日数を記載している。なお、観測期間は6~9月を中心に行われており、詳細な観測日数は各年度、各地点により異なる。

図 5.7 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(夏期最大値・夏期最小値)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。

#### (i) 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 5.2 に示す。

なお、ベースケースの外海境界水温は図 5.4 に示した外海境界位置において月 1 回程度の浅海定線調査結果を用いて水温の鉛直分布の時間変動を与えている。また、ベースケースの河川水温は月 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 5.2(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 5.2(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℃

## (ii) 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5.8)。

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・磷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。

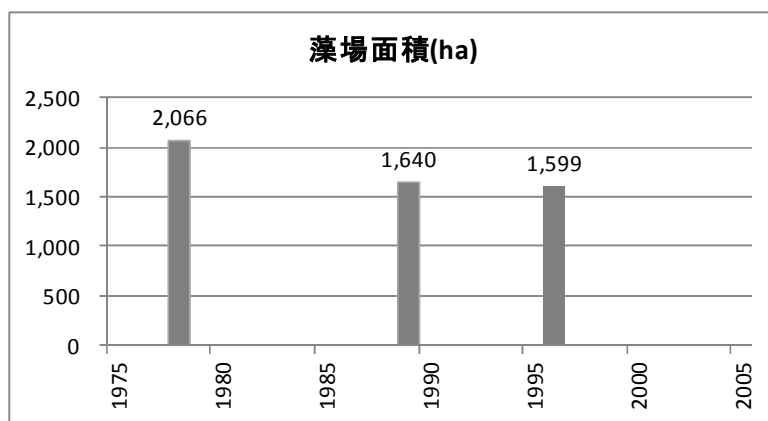


図 5.8 現存藻場の面積の推移

出典：環境省自然環境保全基礎調査

## (iii) 栄養塩の流入・有機物の流入の計算条件

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5.3に示す。

表 5.3 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

## (iv) 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5.9)を基に懸濁物食者の分布及び現存量( $\text{gC}/\text{m}^2$ )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。

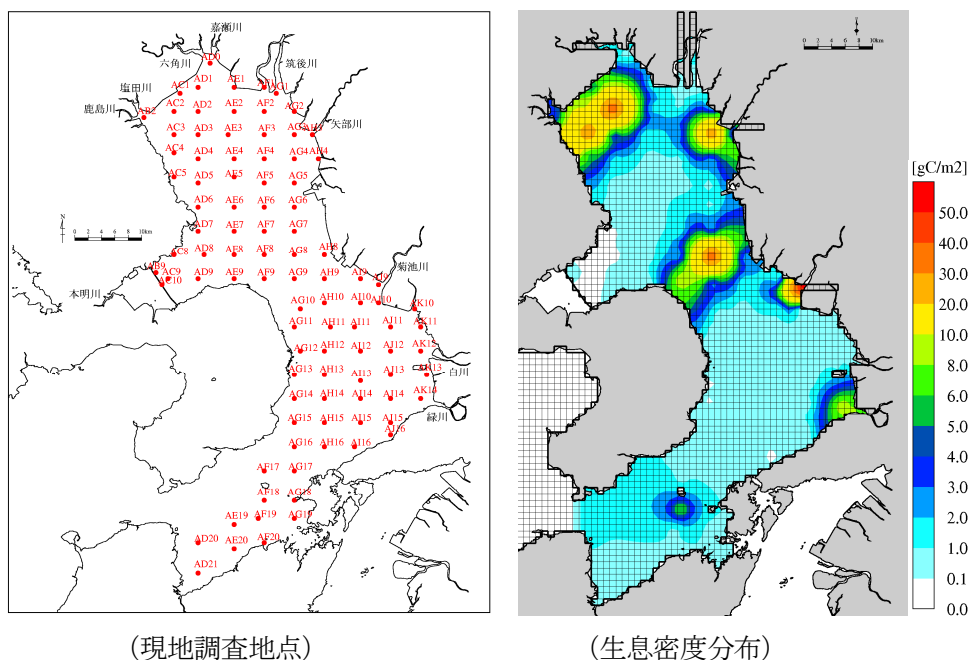


図 5.9 生物生息状況調査地点と懸濁物食者の生息密度分布

出典：研究代表者 楠田哲也「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://sefdb.tokyo.jst.go.jp/pdf/20051210/2007/200512102007r.pdf>)

### ③ 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、溶存酸素量が 3.0mg/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、A1・A3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 5.10 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計算を行った。水温の違いは酸素消費速度の大きさに関係する。二枚貝の増加は、植物プランクトンを捕食することによって海域内部での有機物生産量を減少させる。有機物生産量が減少すると、それが分解されることで生じる酸素消費量が減少する。流入負荷については有機物と窒素・リンの流入が含まれる。有機物流入量の変化は、それが分解されることで生じる酸素消費量の変化に関係する。窒素・リン流入量の変化は、それを栄養源として増殖する植物プランクトンの生産量を変化させ、海域内部での有機物生産量を変化させる。

計算の結果は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、A1・A3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。ただし、この計算では二枚貝の最大ケースを考えるに当たって、貧酸素・硫化水素発生による二枚貝の死亡は考慮していないことには注意が必要である。

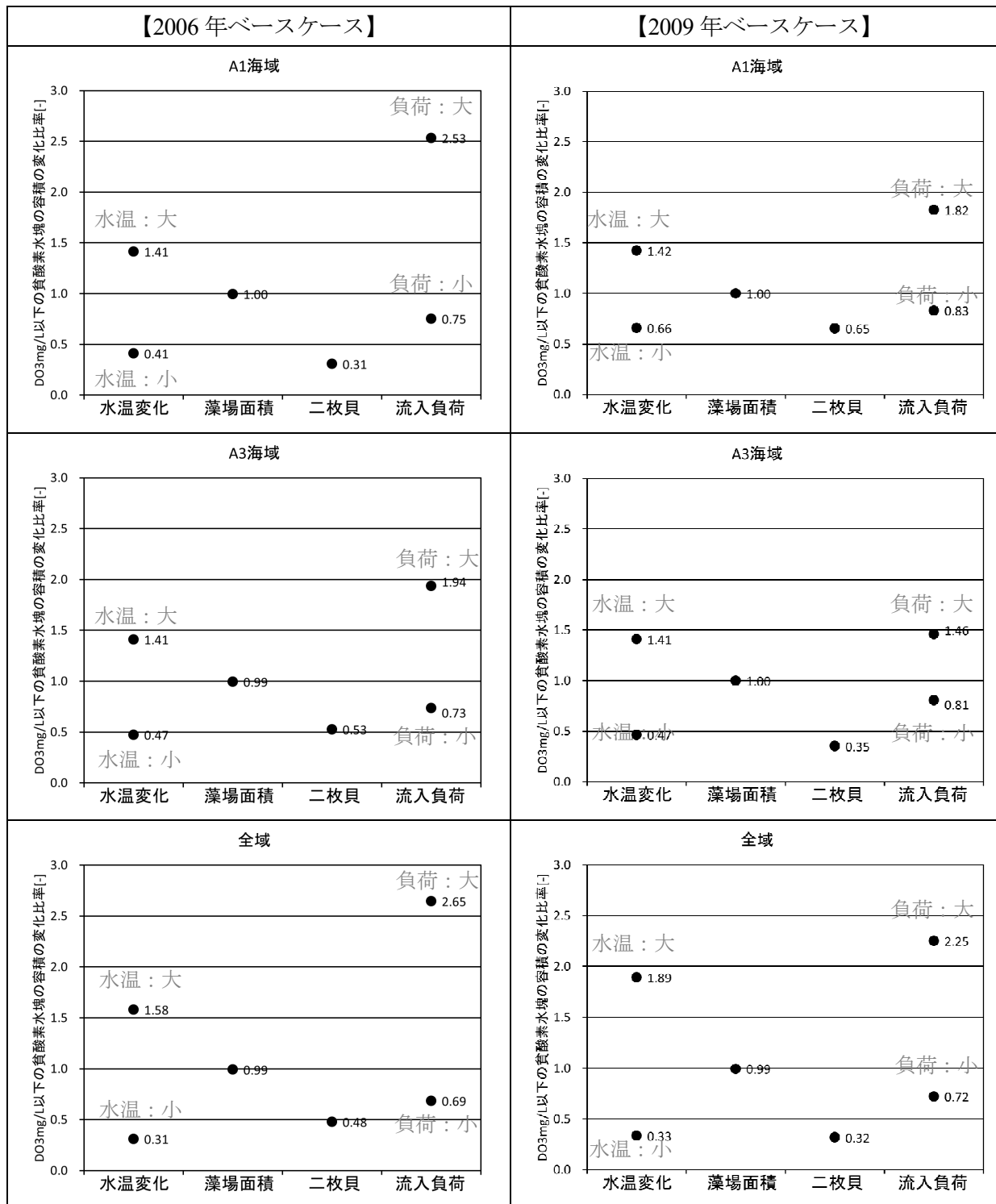
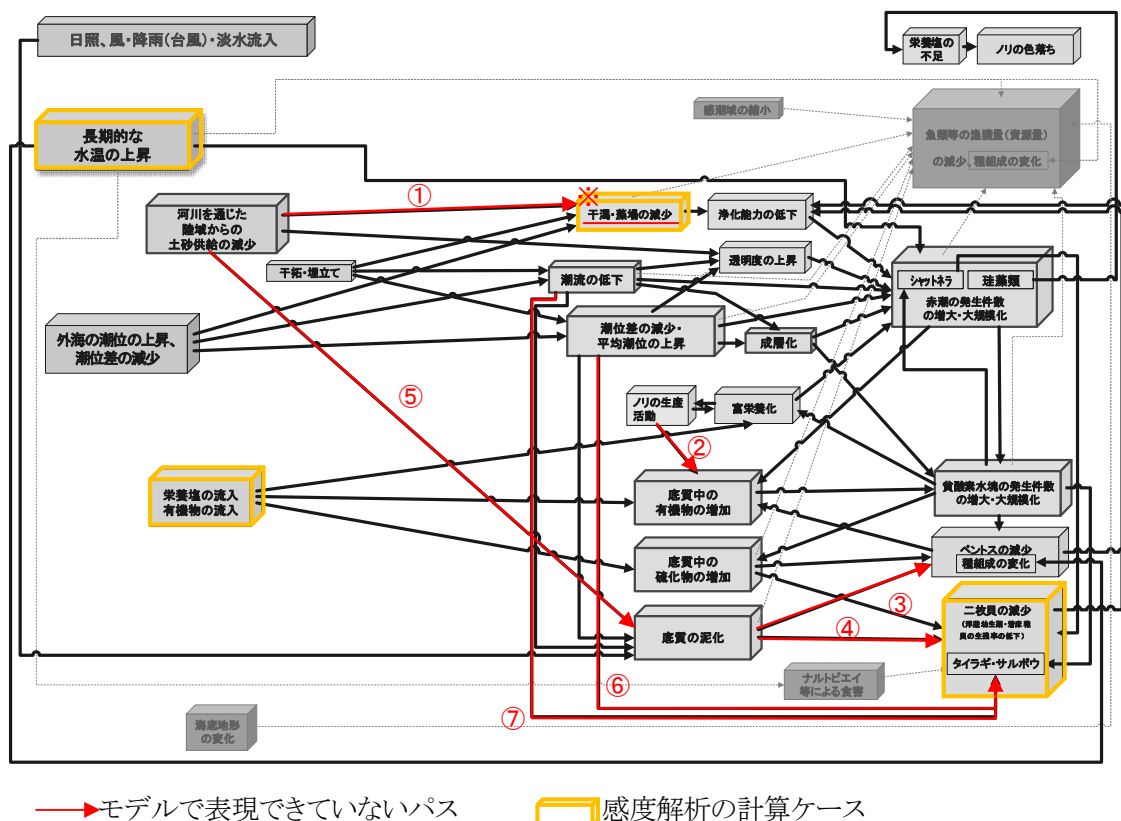


図 5.10 貧酸素水塊の容積の各ケース間の比較

④ 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（溶存酸素量の時空間変動）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 5.11 に示す。



①	経年的な地形変化(干潟)は考慮されていない。
②	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。
③④	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。
⑤	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)。
⑥⑦	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、⑥⑦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 5.11 モデルで表現できていない関連図パス

⑤ 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 5.12 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 5.13) 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 5.14 に示すように 2009 年の成層強度は 2006 年と比べて小さい。

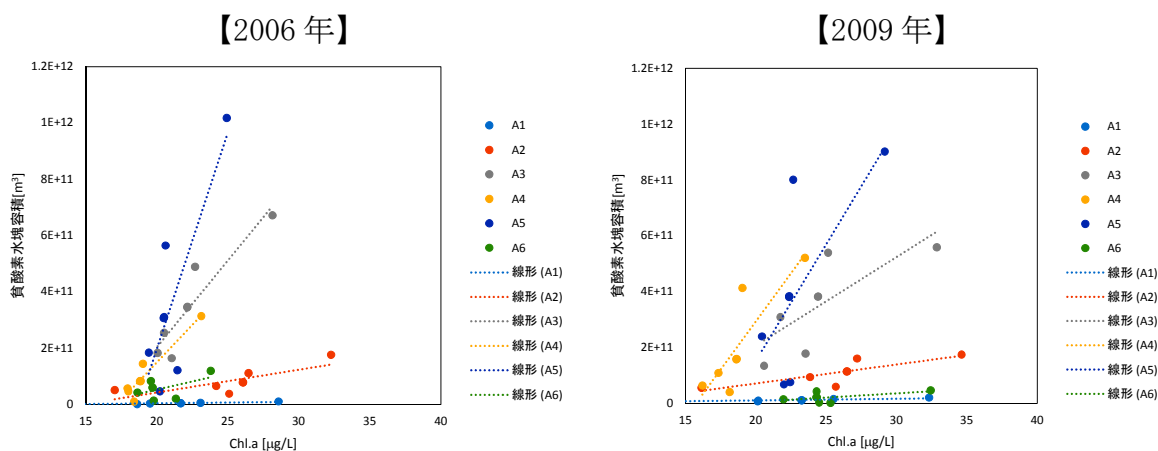


図 5.12 クロロフィル a 濃度の海域内平均値と貧酸素水塊の容積の関係

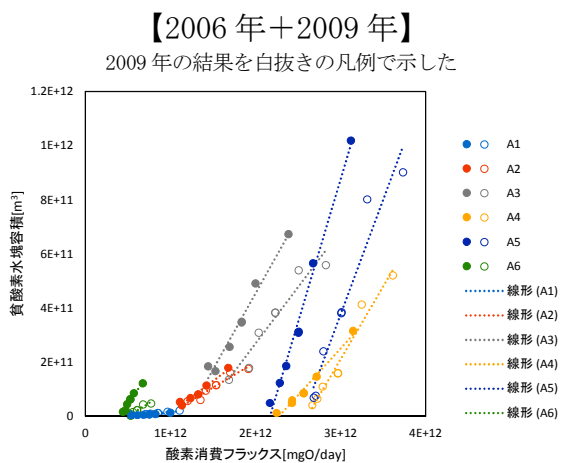


図 5.13 1日当たりの酸素消費フラックスと貧酸素水塊の容積の関係

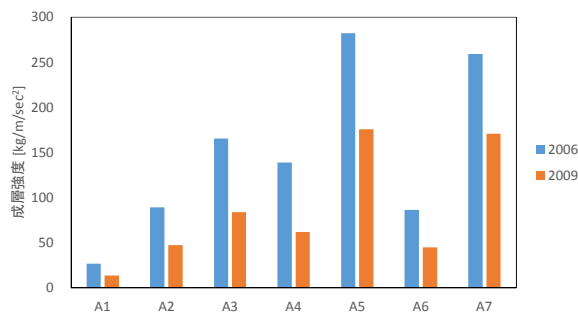


図 5.14 成層強度 (海域内平均値)

## イ) 二枚貝による貧酸素水塊の改善効果の試算

### ① 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<sup>1)</sup> (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・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・成育場・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<sup>2)</sup>。

### ② 試算の内容

この研究では、有明海奥部における水温・塩分・底層溶存酸素量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、底層の溶存酸素量の変化を推定した。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5.15)。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

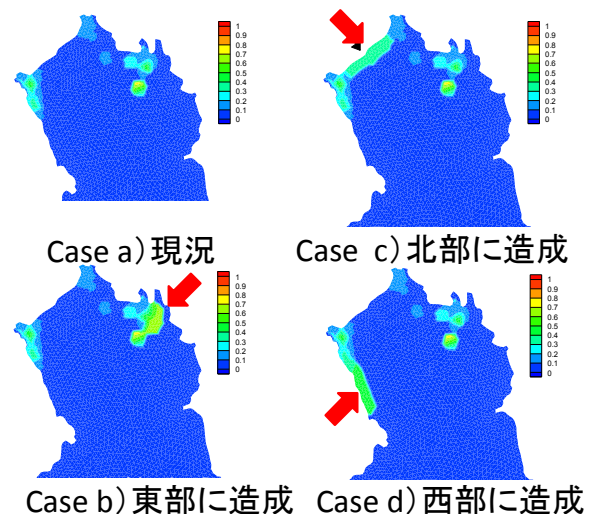


図 5.15 Case a～d のカキ礁の被覆度分布



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当たっては、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 5.15 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  $226.6 \text{ gC m}^{-2}$ 、シカメガキ：マガキ：スミノエガキの比率は4：3：3とした。

### ③ 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量は高くなった。カキ礁の再生による底層溶存酸素量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) の違いを示す (図 5.16 a)。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量が  $3.0 \text{ mg/L}$  以下の水塊が広がり、 $2.0 \text{ mg/L}$  以下の水塊もみられた。一方で、カキバイオマスを2倍にした Case b の場合には、溶存酸素量の低い水塊は広い範囲で縮小し、諫早湾内の  $2.0 \text{ mg/L}$  以下の水塊はみられなくなった。同様に Case c (図 5.16 b)、Case d (図 5.16 c) の場合にも溶存酸素量の低い水塊は広い範囲で縮小した。

より定量的な評価をするために、A3及びA6海域における貧酸素水塊の容積及び底面積の変化を図 5.17 に示す。ここでは便宜上、溶存酸素量が  $3.0 \text{ mg/L}$  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 ( $3.0 \text{ mg/L}$  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。

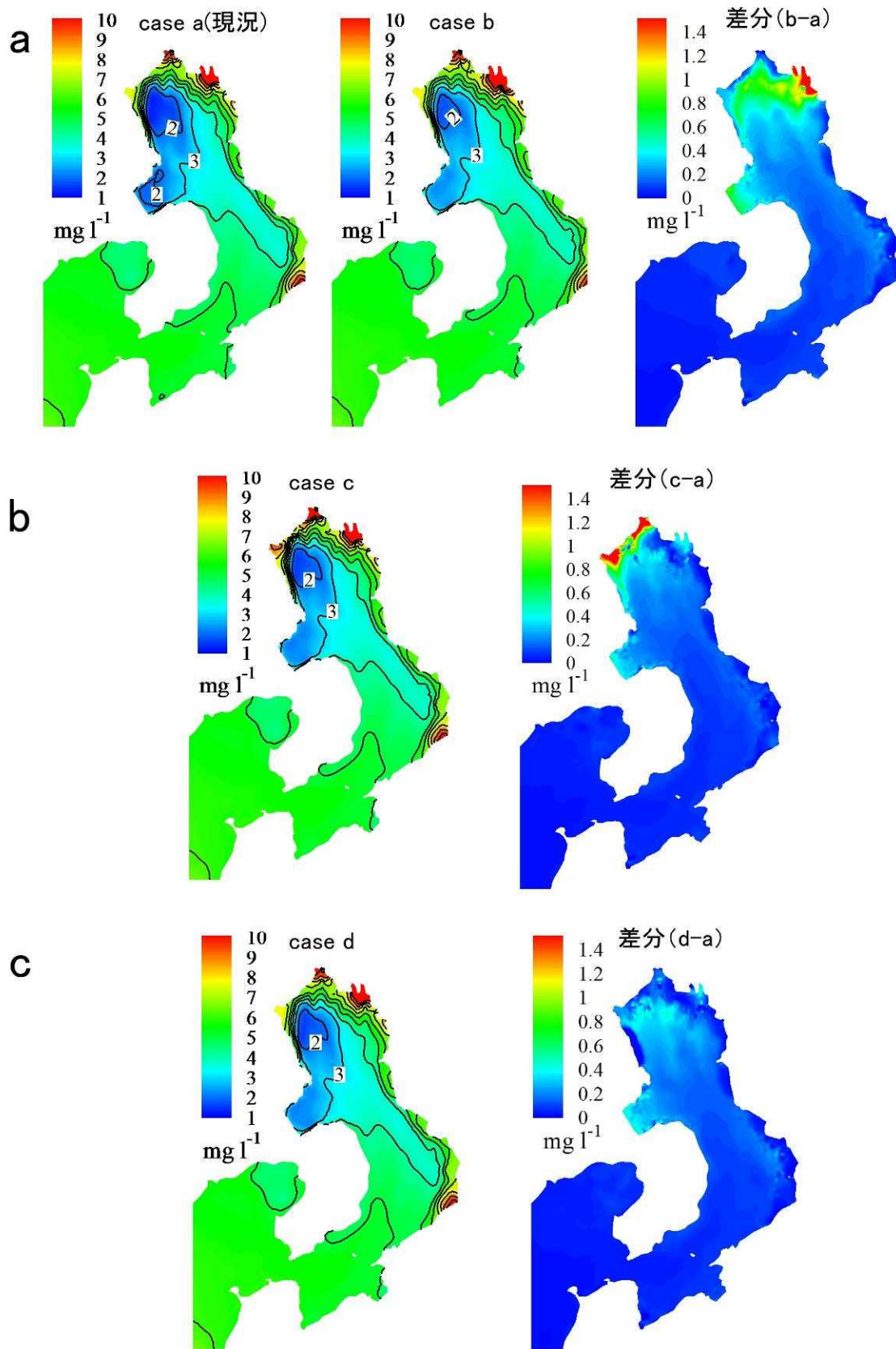


図 5.16 カキ礁再生による底層溶存酸素量分布の違い

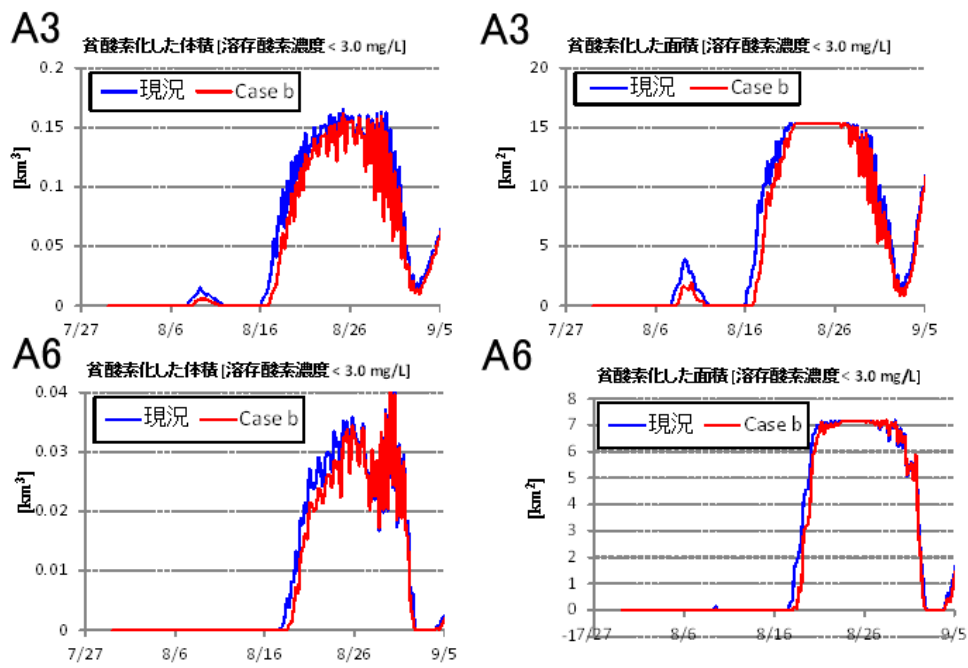


図 5.17 カキ礁再生による貧酸素水塊の容積・底面積の変化 (A 3 及び A 6 海域に関する Case a と b の比較)

## 2) 二枚貝の浮遊幼生の供給ネットワークの試算

### ア) タイラギ

#### ① 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期であるが、2008年は浮遊幼生に対する貧酸素の影響が小さかった<sup>3)</sup>。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。

#### ② 試算の内容

検討に当たっては、有明海奥部における水温・塩分・底層溶存酸素量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<sup>4)</sup>(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。なお、タイラギの浮遊幼生は鉛直移動をするという報告があるものの現時点では詳細な生態が不明であるため、本計算では鉛直移動はないものとして試算した。

4章4(2)A2海域に示したように、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みられなくなった。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3つの海域を考えた(図5.18)。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。C海域は2000年以降のタイラギ主漁場である湾奥東部海域である。2008年は7月と9月に湾奥で浮遊幼生量のピークがみられたが、試算ではこのうち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。

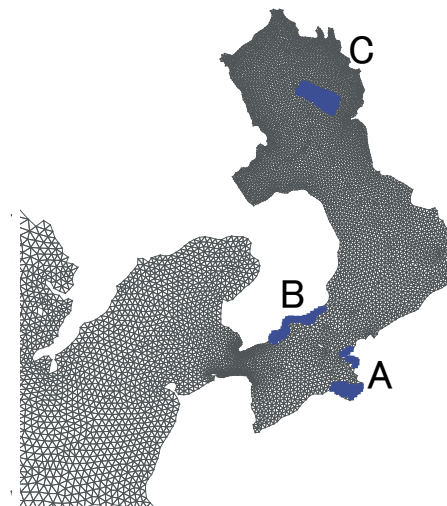


図 5.18 数値実験における浮遊幼生の放出海域

## ③ 試算の結果・考察

図 5.19 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 5.20 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。A・B海域から粒子を放出した場合と、C海域から放出した場合を比較すると、前者については湾奥西部・東部の両方の海域に安定して粒子が供給された。C海域については、湾奥東部にはA・B海域よりも多くの粒子が輸送されたが、湾奥西部への供給は前者より少なく、特に 2008 年は少なかった (図 5.21)。A・B・C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 3.0mg/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、A・B海域から放出した場合は他の年と異なって貧酸素曝露日数は 0 日であった (図 5.22)。これは、流動だけではなく、水質としても 2008 年が湾奥への浮遊幼生輸送・生残に適していたことを示す。こうした結果から、有明海南部海域も幼生供給を担っている可能性が考えられ、広域的な母貝団地造成も重要であることが示唆された。

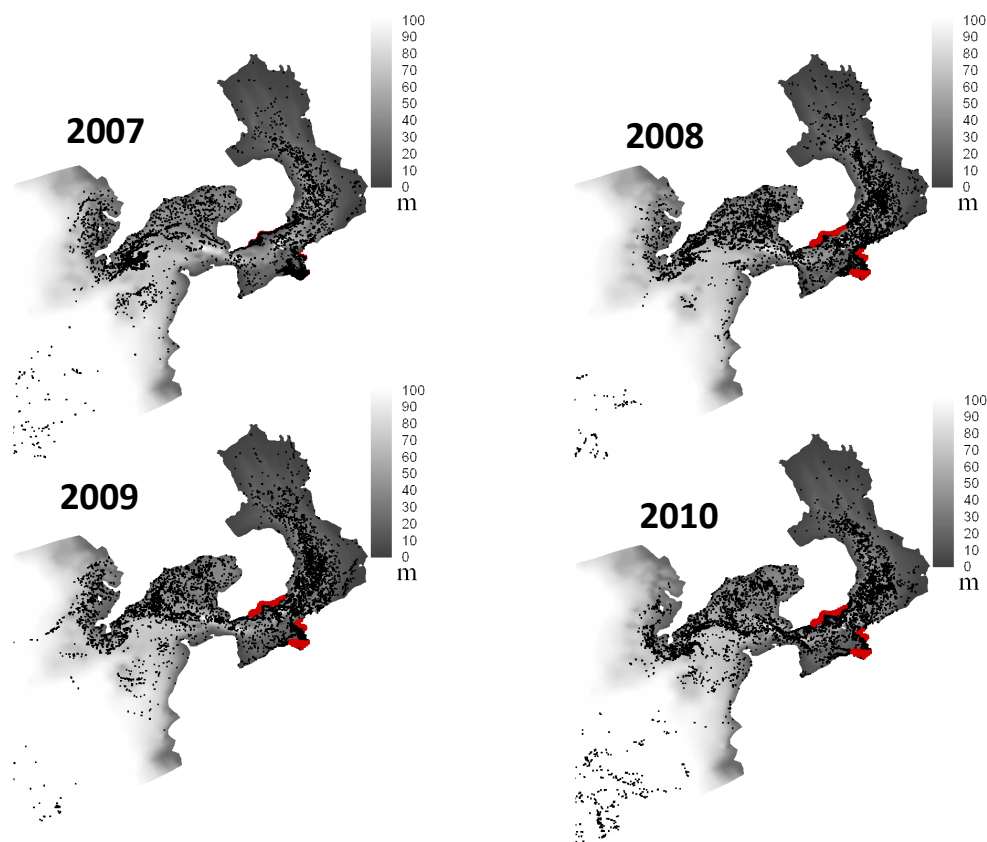


図 5.19 A・B海域から放出 3 週間後の粒子の分布

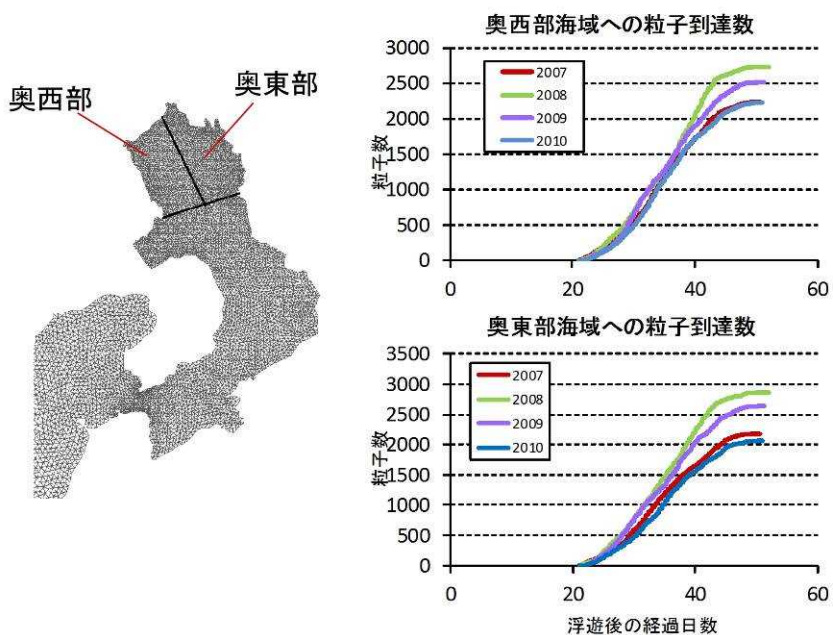


図 5.20 A・B海域から放出3~4週間後における湾奥海域への到達粒子数

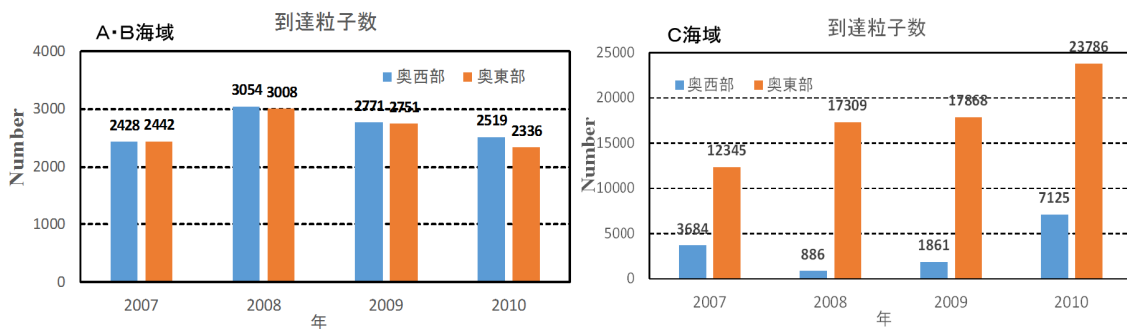


図 5.21 A・B及びC海域から放出3~4週間後における湾奥海域への到達粒子数



図 5.22 A・B及びC海域から放出後に有明海奥部に到達した粒子の貧酸素 (<math> < 3.0\text{mg/L}</math>) 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 5.23)。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年に比べて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。湾奥東部海域については、湾奥東部自体から供給される浮遊幼生が最も重要だと考えられ、母貝集団としても本海域における資源の保全・回復の重要性を示している。

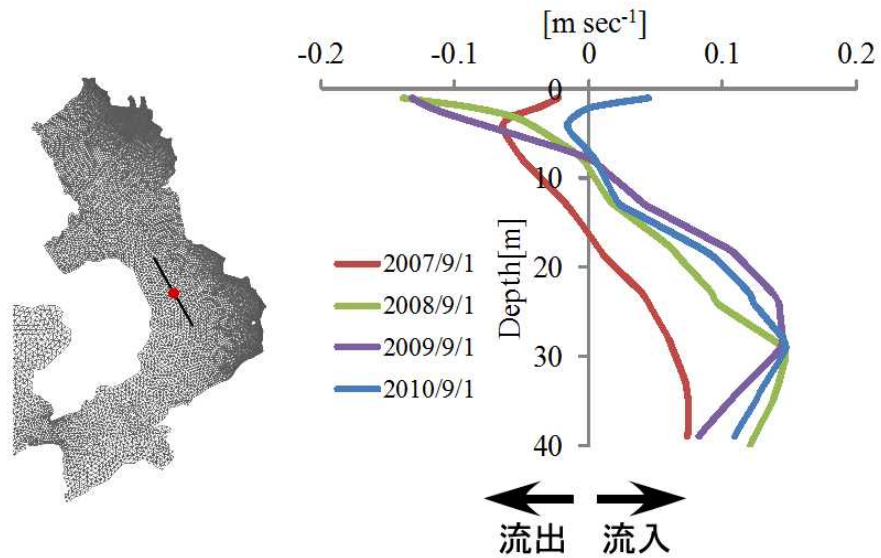


図 5.23 有明海中央部における湾軸方向の平均流の鉛直分布

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（0、P6、T5、B3）でみられたことから（図 5.24）、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可能性があ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、湾奥部だけではなく、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。なお、今回のシミュレーションでは、浮遊幼生の鉛直分布、放出時期の推定・母貝密度の考慮などの課題がある。

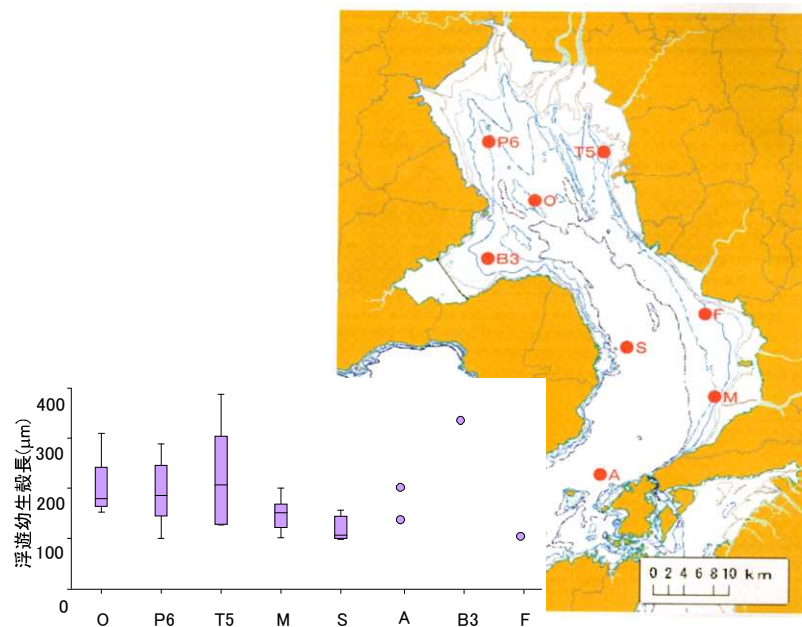


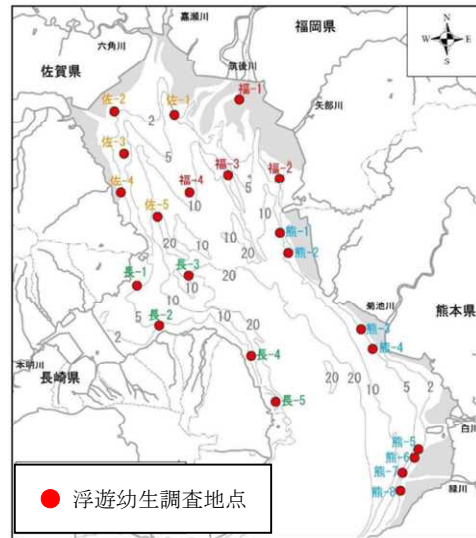
図 5.24 有明海におけるタイラギ浮遊幼生調査殻長組成 (2005～2007 年合計)  
(西海区水産研究所調査)

イ) アサリ（4県協調の取組におけるアサリの浮遊幼生供給ネットワークの推定）

① 試算の目的（4県協調の取組の概要）

2015年度から2017年度の3年間にかけて、福岡県、佐賀県、長崎県及び熊本県の4県と農林水産省が協調し、(国研)水産研究・教育機構西海区水産研究所有明海・八代海漁場環境研究センターの助言等の協力の下、有明海の再生に資する二枚貝類等の資源回復に向け、生息状況の把握を行うとともに漁場環境改善の取組を行っている<sup>5)</sup>。

その一環として、今後、より効率的な漁場環境改善に向けた事業の実施につなげ、二枚貝類等の資源回復の加速化を図っていくため、4県が協調したアサリ等の浮遊幼生・着底稚貝調査を実施しており(図 5.25)、アサリについては、この結果を基に、モデル解析による浮遊幼生の産卵場・着底場の推定を行っている。



調査項目	調査時期	調査頻度	地点数
浮遊幼生	4~6月 9~11月	1回/1週間~ 10日	22地点
着底稚貝	6, 12月	1回/月	20地点

図 5.25 4県協調の取組における浮遊幼生・着底稚貝調査内容（アサリの例）

② 試算の内容（浮遊幼生ネットワーク推定の流れ）

流況、水温・塩分の再現計算を行う流動モデルと、産卵場、着底場の推定を行う浮遊幼生挙動モデルによる推定を行った。検討フローを図 5.26 に示す。

流動モデルには、九州農政局「諫早湾干拓事業の潮受堤防の排水門の開門調査に係わる環境影響評価」の水象・水質等への影響を予測・評価する際に使用した数値シミュレーションモデルを用いた。

浮遊幼生挙動モデルには、流動モデルにより計算された流況、水温・塩分を基にオイラーラグランジュ法による仮想粒子追跡を行うモデルを用いた。

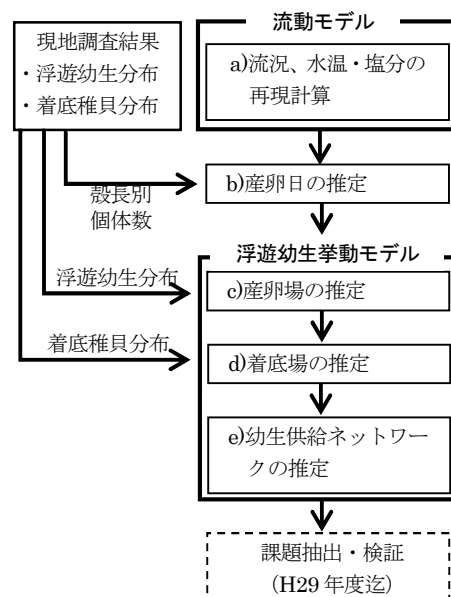


図 5.26 検討フロー

## ③ 試算の結果

## a) アサリ D 型幼生分布状況と産卵場の推定

図 5.27 に 2015 年秋期現地調査から得られたアサリ D 型幼生分布状況と 2015 年秋期におけるアサリ産卵場推定結果を示す。推定結果では、福岡県地先から有明海東岸域にわたり産卵場がみられ、現在の主要なアサリ漁場と概ね一致した。2015 年秋期と 2016 年春期、秋期の推定産卵場は同様な結果となった。

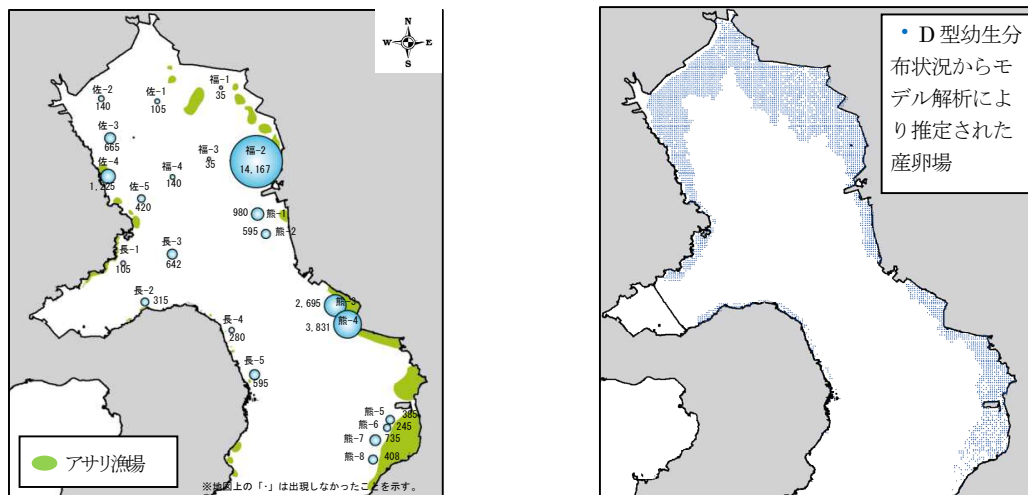


図 5.27 D 型幼生分布状況 (2015 年秋期調査の累計) と産卵場推定結果 (2015 年秋期)

## b) アサリ着底稚貝分布状況と着底場の推定

図 5.28 に 2015 年秋期現地調査から得られたアサリ着底稚貝分布状況と 2015 年秋期におけるアサリ着底場推定結果を示す。推定結果では、福岡県地先、熊本県荒尾沖、白川・緑川沖や諫早湾内において着底場がみられたが、これらの地点については、現地調査においても着底稚貝が確認された。2015 年秋期と 2016 年春期、秋期の推定着底場は同様な結果となった。

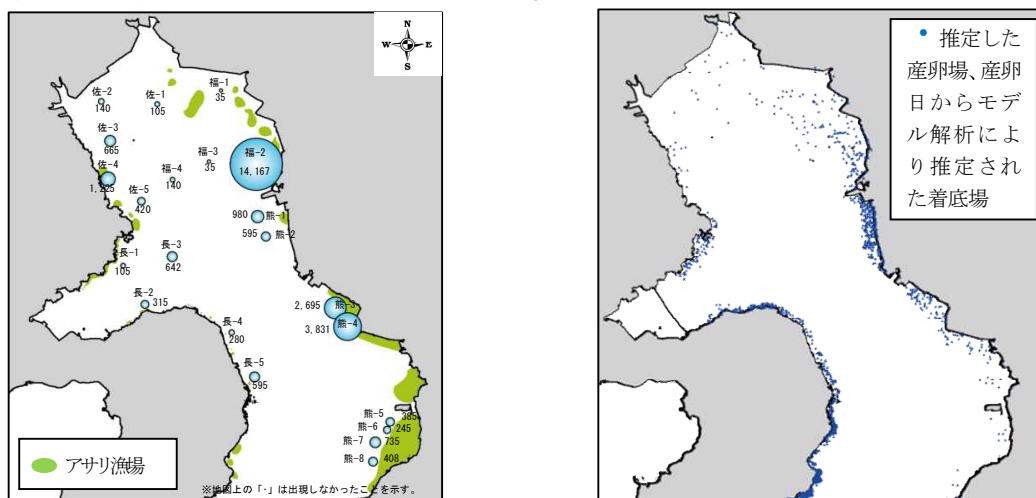


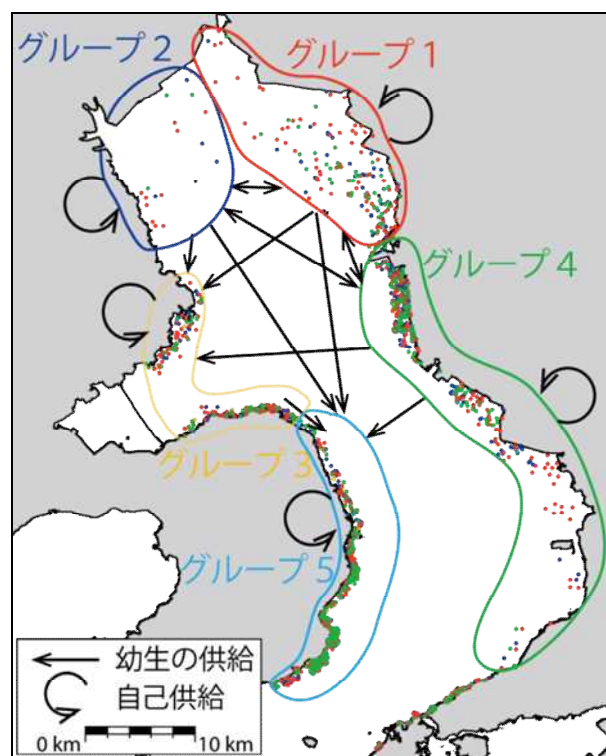
図 5.28 着底稚貝分布状況 (2015 年秋期調査の累計) と着底場推定結果 (2015 年秋期)

## c) アサリ浮遊幼生供給ネットワークの推定

有明海を5つのグループに分け、前項で推定した産卵場と着底場の関係から、グループ間の浮遊幼生供給の有無について、図 5.29 に整理した。

福岡、佐賀、熊本県地先（グループ 1, 2, 4）は、幼生を相互供給すると共に、諫早湾地先（グループ 3）や島原半島地先（グループ 5）へ幼生を供給していた。また、諫早湾地先は、島原半島地先へ幼生を供給していた。島原半島地先から他グループへの幼生供給はみられなかった。

このように、有明海では広域的にアサリ浮遊幼生が供給される関係にあることが推定された。これらは、2016 年度までの2ヶ年の調査結果を基に推定したものであり、今後、更に再現性の向上等の検討が行われる予定である。



グループ	他のグループへの供給	他のグループからの供給	自グループ内での供給
1. 福岡県地先	すべてのグループ	グループ 2, 4	あり
2. 佐賀県地先	すべてのグループ	グループ 1, 4	あり
3. 諫早湾地先	グループ 5	グループ 1, 2, 4	あり
4. 熊本県地先	すべてのグループ	グループ 1, 2	あり
5. 島原半島地先	なし	すべてのグループ	あり

図 5.29 有明海におけるアサリ幼生供給ネットワーク

### 3) 八代海での赤潮被害防止対策の取組

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。

#### ア) 事例1

折田ら(2013)は、気象や海象要因等について、赤潮発生年と非発生年の平均値の差を検定したところ、32の項目で有意差が認められ、このうち6月末時点で6月中旬の日照時間、北東風の平均風速、入梅日の3項目に強い相関が認められ、これらを用いた重回帰式により、精度高く赤潮発生を予測できることを示した<sup>6)</sup>(表5.4)。また環境項目と赤潮発生の因果関係について、図5.30のような関係にあることを推測している。

表 5.4 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 <sup>※</sup>
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

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

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

※*Chattonella*が100 cells/mL以上出現した年を赤潮発生と判定した。

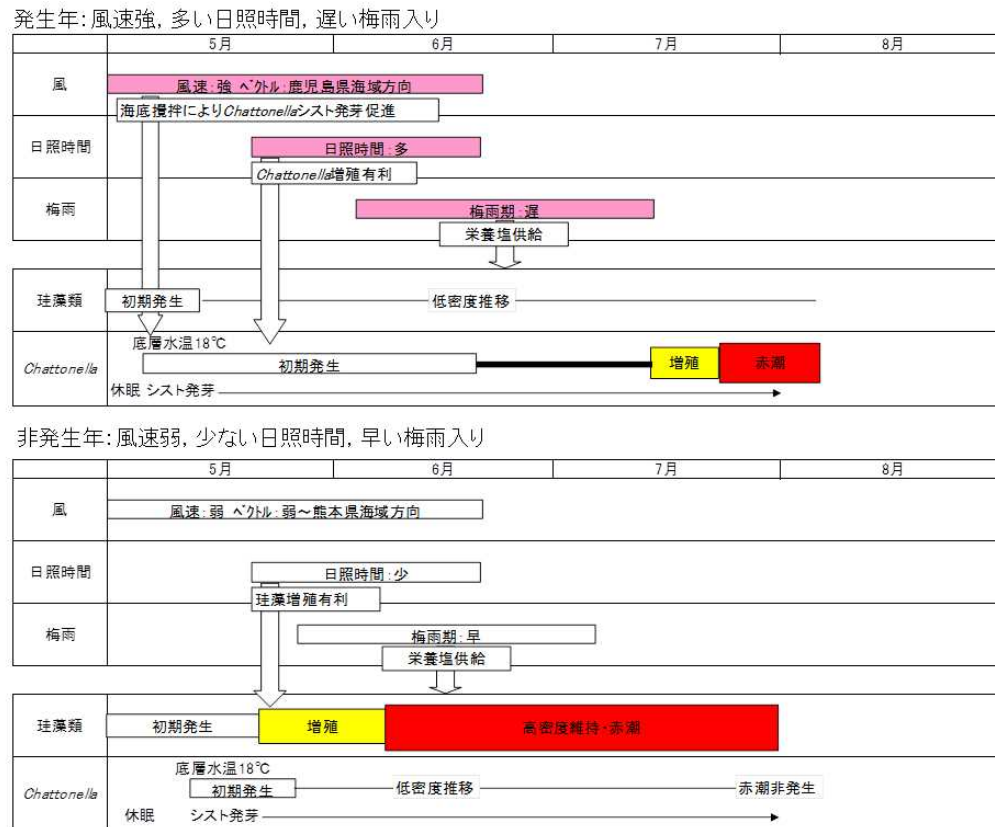


図 5.30 八代海において赤潮発生に関与する因子の相互作用

折田ら (2013) 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 *Chattonella* 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 *Chattonella* 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 *Chattonella* がある程度の密度まで増殖する。
- ・*Chattonella* 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、*Chattonella* 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 *Chattonella* 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 *Chattonella* に利用されて赤潮が発生する。

## イ) 事例 2

Onitsuka et al. (2015) は 1998 年から 2012 年までの 25 年間の *Chattonella* 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 *Chattonella* 赤潮の発生に関わる気象因子を抽出した<sup>7)</sup>。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 5.31）。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、*Chattonella* の初期出現が例年よりも早くなる。
- ・この状態で *Chattonella* 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 *Chattonella* に利用され、赤潮が発生する。

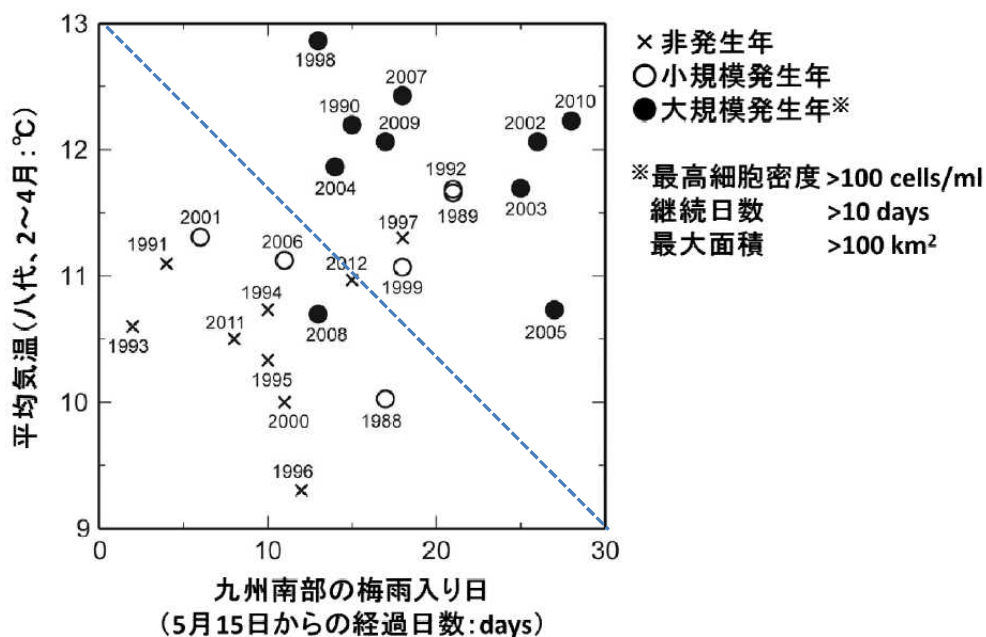


図 5.31 *Chattonella* 赤潮の発生と 2 月から 4 月の気温（アメダス八代）及び九州南部の梅雨入り日との関係

折田ら (2013) と Onitsuka et al. (2015) のいずれも、6 月の時点で *Chattonella* 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 *Chattonella* 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挙げられており、長期予測が可能であろう。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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, 第 53 巻, 第 1 号, pp. 25-38.
- 3) 環境省 (2016) 「平成 27 年度有明海・八代海等再生評価支援事業 (有明海二枚貝類の減少要因解明等調査)」
- 4) 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, 第 53 巻, 第 1 号, pp. 25-38.
- 5) 福岡県, 佐賀県, 長崎県, 熊本県, 農林水産省九州農政局 (2015、2016) : 有明海漁場環境改善連絡協議会資料
- 6) 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, 第 4 巻, pp. 24-32.
- 7) 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, Vol. 81, pp.123-130.