

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

沿岸海域管理のための統合数値モデル構築
(S-13-5)

平成26年度～平成30年度

Development of integrated numerical model for coastal zone management

〈研究代表機関〉

公益財団法人国際エメックスセンター

2019年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
1. 志津川湾の統合数値モデル開発	7
要旨	
(1-1) はじめに	
(1-2) 研究開発目的	
(1-3) 研究開発方法	
(1-4) 結果及び考察	
2. 瀬戸内海の統合数値モデル開発	23
要旨	
(2-1) はじめに	
(2-2) 研究開発目的	
(2-3) 研究開発方法	
(2-4) 結果及び考察	
3. 本研究により得られた成果	37
4. 国際共同研究等の状況	37
5. 研究成果の発表状況	38
6. 引用文献	38
III. 英文Abstract	40

1. 成果の概要

課 題 名 沿岸海域管理のための統合数値モデル構築

課題代表者名 柳 哲雄 (公益財団国際エメックスセンター 特別研究員)

研究実施期間 平成26～30年度累計予算額 154,448千円

(うち平成26年度:9,278千円、平成27年度 39,667千円、平成28年度:35,687千円、平成29年度 35,803千円、平成30年度:34,013千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 沿岸域統合管理、領域融合研究、持続可能性、里海、統合数値モデル

研究体制

(1) 志津川湾の統合モデル開発に関する研究 ((株) 復建調査設計)

(2) 瀬戸内海の統合モデル開発に関する研究 ((株) エコー)

研究協力機関

(株) 復建調査設計

(株) エコー

1. はじめに(研究背景等)

適切な沿岸海域管理手法を開発するためには、沿岸海域統合数値モデルを開発することが必要なことは言を待たない。一方、現在まで、環境アセスメント用の多くの沿岸海域生態系モデルが開発されているが、それらは、今回の目標である、「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」に十分な役割を果たすには欠けている部分が多く見られ、どのような数値モデル構築がこの目的に合致するかを明らかにすることは喫緊の課題である。

2. 研究開発目的

「きれいで、豊かで、賑わいのある、持続可能な沿岸海域(=里海)」を創生するための沿岸海域管理手法に必要な沿岸海域統合数値モデルを開発する。

3. 研究開発の方法

本課題は当初の計画に基づき、以下の3段階の研究開発を行った。

1) 沿岸海域統合数値モデルの基本設計を行う(コモナイズ段階)。

2) 実際に、S-13-1、S-13-2、S-13-3の各沿岸海域で、統合数値モデルを開発する(カスタマイズ段階)

3) 2)で開発した統合数値モデルを日本各地の沿岸海域に応用するには、どのような仕様を考えればよいかを明らかにする(仕様書作成段階)。

まず、沿岸海域の環境変動に影響を及ぼす、陸域・大気・底質・外洋域を沿岸海域モデルに統合させる手法を開発した。さらに、この統合を、自然科学情報ばかりではなく、特に陸域での条件変化に大きな影響を及ぼす、社会・人文科学情報も取り込めるよう工夫した(図1)。

そして、この設計手法に基づく、沿岸海域統合数値モデルを、志津川湾・瀬戸内海で開発するとともに、同様な発想による富山湾統合数値モデルの作成をS-13-3の研究チームに依頼した。

統合数値モデル(統合:陸域+海域、自然+社会科学)

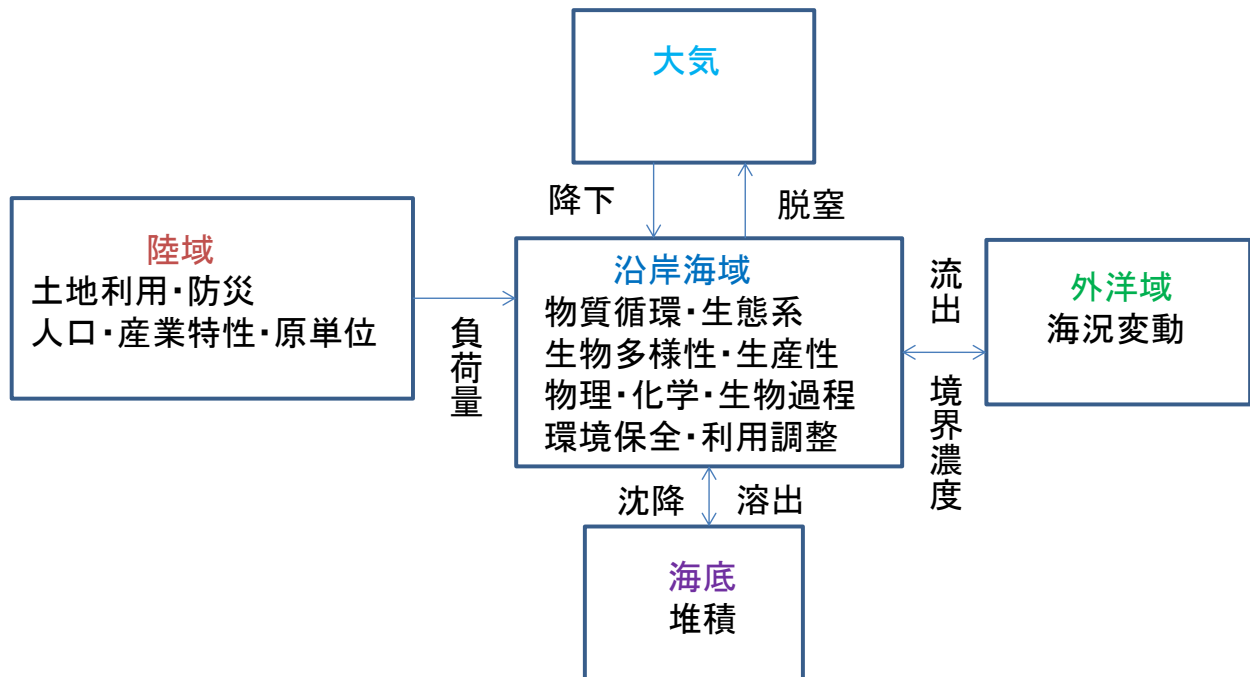


図1 沿岸海域統合数値モデル

4. 結果及び考察

志津川湾で開発した統合数値モデルを用いて計算された、震災前と現在の成層期の底層D0（溶存酸素）濃度分布を図2に示す。このモデルは震災前（2009）と現在（2014）の、南三陸町沿岸域の人口・土地利用変化など社会・文化的変化に伴う、陸域から海域への全窒素負荷量の変化、志津川湾におけるカキ養殖量の変化（社会科学情報に基づく）、外洋の環境変動（自然科学情報に基づく）、などの影響が統合して考慮されている。

これを見ると、震災前は湾奥において、D0濃度4mg/L以下の貧酸素水塊が発生していたのに対して、現在は成層期にも貧酸素水塊が発生していない。感度解析の結果、このような底層水質改善に最も効果的だったのは、「カキ養殖量を震災前の1/3に減少させた」ことだった。これは漁民の“経験知”に基づいた海洋環境への行動（アクション）の正の効果が、初めて科学的に立証された例である。すなわち、今回開発した統合数値モデルを用いて、どのような養殖法が、「豊かで、持続可能な沿岸海域」実現のために有効かを、初めて定量的に示すことができた。

さらに志津川湾統合数値モデルを用いて、TN濃度、底層溶存酸素年間最低濃度、湾内養殖生産高、南三陸町人口、水産関連産業利益、南三陸交流人口動態などの指標の震災前・現在・将来（2050年）の変化を明らかにし（図3）、この結果をもとに、「南三陸沿岸域の持続可能性」を検討する方法論を提示した。

また、瀬戸内海統合数値モデルの入れ子モデルである広島湾モデルを用いて、現在の状況と、沿岸付近の浅瀬で日光が海底まで届く範囲でアマモ場造成を行った（現在の約4倍のアマモ場面積となる）場合の、春季ブルーム時（5月）のchl. a濃度計算結果（図4）は、現在の状況では沿岸付近でchl. a濃度が4.5 μ g/Lを越えて、赤潮が発生し、底層では貧酸素水塊が生成されるが、アマモ場造成後はほとんどの領域でchl. a濃度は4.5 μ g/L以下となり、赤潮も貧酸素水塊も発生しないことが明らかとなった。

このことは広島湾の栄養塩濃度管理方法としては、陸上からの窒素・リン負荷量削減（それを行うと、広島湾中央部・沖合域の栄養塩濃度を低下させてしまう）よりは、岸近くの浅瀬におけるアマモ場造成の方策の方が優れている（増加したアマモが栄養塩を吸収して、春季ブルーム時に赤潮の発生を防止し、夏季に枯れたアマモが流れ藻となり、中央部・沖合域に運ばれ、分解されることで、広島湾全域の栄養塩濃度もあるレベル以上に維持できる）ことを示唆している。

すなわち、今回開発した統合数値モデルを用いて、「きれいで、豊かな沿岸海域」を実現するために、アマモ場再生が有力な環境改善手法であることを、初めて定量的に示した。

海底付近の溶存酸素量の比較

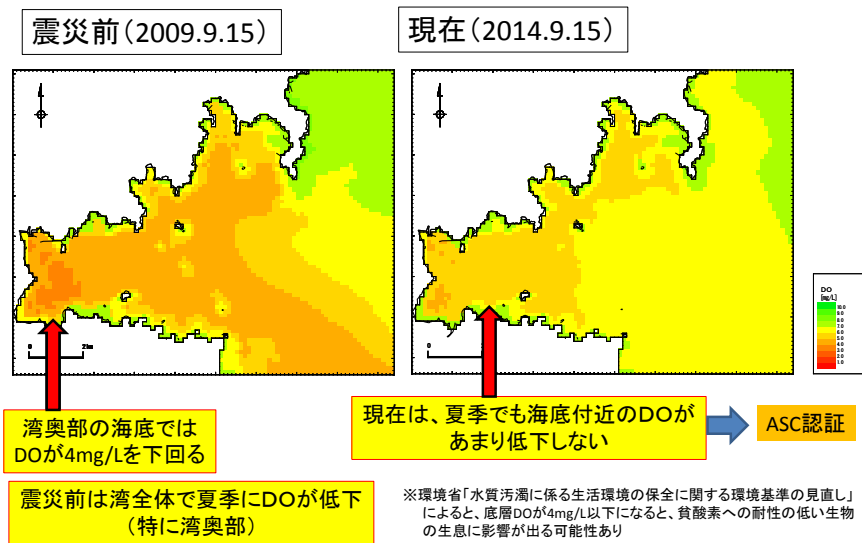


図2 震災前と震災後の志津川湾底層DO濃度分布の変化

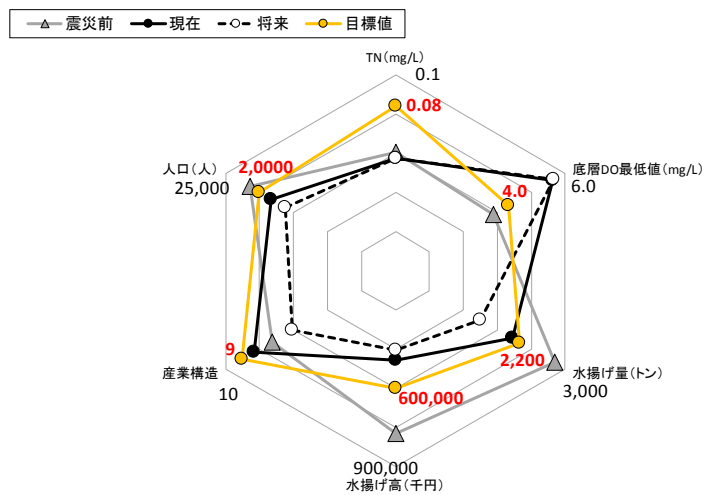


図3 志津川湾における「きれいで、豊かで、賑わいのある、持続可能な沿岸海域」の総合指標

藻場造成前後のクロロフィルa分布(5月平均)

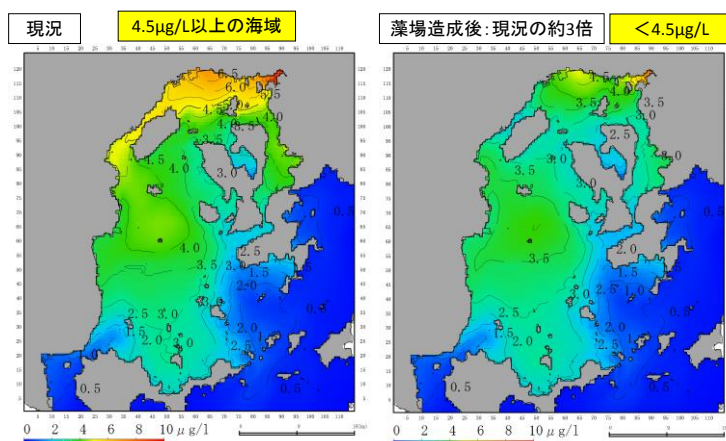


図4 アマモ場造成前(現況)と造成後の5月(春季ブルーム時)の表層chl. a濃度分布

さらに、大阪湾統合数値モデルを用いて、大阪湾の水質と底質が最も悪化する時期は、水質—底質相互作用の結果、7-10年の時間差があることを初めて明らかにした（図5）。

この時間差は、沿岸海域である環境改善施策が行われた場合、水質—底質の平衡状態に達する時定数は7-10年であり、いわゆる、順応的管理(Adaptive Management)は10年程度の時間スケールを考えて行わなければならないことを示唆している。

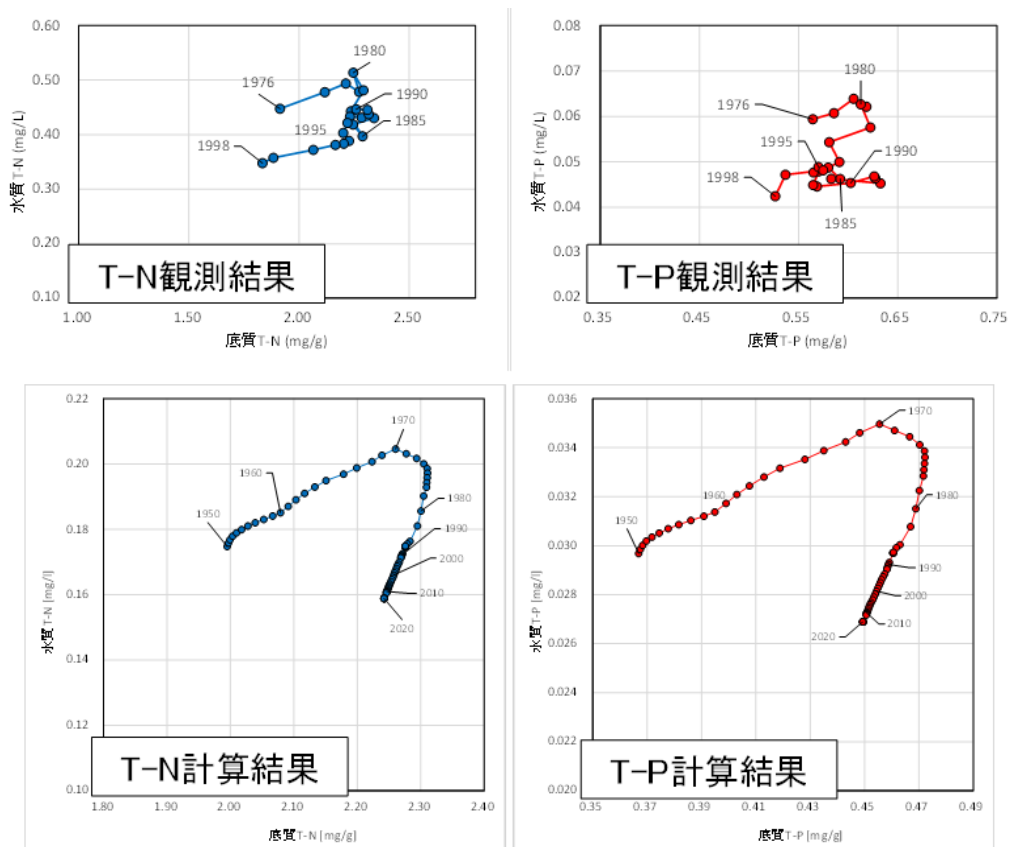


図5 大阪湾統合モデルによるTN・TPの水質(縦軸)・底質(横軸)時間変化の観測結果(上)と計算結果(下)

志津川湾・富山湾・瀬戸内海の統合数値モデルの特性を表1に示す。

表1 志津川湾・富山湾・瀬戸内海の統合数値モデルの特性

海域	流動・拡散	生態系	底質循環	外洋	大気影響	主題
志津川湾	3次元	低次	含む	JCOPE2	含まない	最適養殖
富山湾	3次元	低次	含まない	DREAMS2	含まない	温暖化適応
瀬戸内海	3次元	低次	含む	JCOPE2	含まない	栄養塩管理

5. 本研究により得られた主な成果

志津川湾統合数値モデルの研究成果は、2016年3月30日、志津川湾産の養殖ガキに日本初のASC認証が与えられることに大きく貢献した。すなわち、漁民の経験知と我々科学者の科学知が結びつき、それを統合数値モデルに用いて定量的に示すことで、大きな社会的成果が得られた。

また、広島湾統合数値モデルの計算結果は「きれいで、豊かな沿岸海域」を創生するために、海草場面積の増大が多大な貢献をすることを、統合数値モデルを用いて、初めて定量的に明らかにしたもので、今後の沿岸海域環境行政に大きな貢献をするものである。

(1) 科学的意義

これまで個別に扱われた沿岸海域の環境変動に関する数値モデルに、空間的・学問的統合を目指した新たな統合数値モデルを開発し、志津川湾・広島湾に適用することで、最適養殖管理法・沿岸海域栄養塩濃度管理法に関する新しい定量的評価法を提案することが可能になった。

これらの計算結果は、6. 研究成果の主な発表状況、に示すように、すでに論文として公表されていて、今後、日本・世界の環境問題に悩む多くの沿岸海域に適用され、さらなる科学的進歩が期待される。

また、今回開発した統合数値モデルは、変動が大きく、適当なデータセットのない外洋の境界条件をJCOPE2 (<http://www.jamstec.go.jp/jcope/htdocs/home.html>) という日本が独自に開発し、運営維持している数値モデルシステムを利用しているが、このようなopen—systemの有効性が確認された最初の計算例で、国内・国外を問わず、同様なシステム開発が進むことが期待される。

(2) 環境政策への貢献

上述の科学的意義と関連して、どのような環境施策を行えば、実際の環境改善が可能か、また、同じ統合数値モデルを用いた、その施策の費用/便益効果計算も踏まえて、それらの結果を、現地住民を含めた協議会に提案することにより、現実的な環境施策の提案・実行・効果検証・新たな施策提案を行う、という順応的管理を実行することが可能となった。

今回のS-13プロジェクトでは、志津川湾において、漁民・南三陸町行政担当者・宮城県水産試験場・NPO関係者・我々S-13担当科学者が参加する協議会を立ち上げ、年2—3回程度の会合を開いて、漁民・地元関係者からの要望を聞くとともに、それらを踏まえて開発した統合数値モデルの計算結果を協議会で提示し、そのような計算結果が得られた理由を詳しく解説することで、さらなる議論を進め、志津川湾における持続可能な最適養殖形態を明らかにした。そして、その実行が日本で初めてのASC(Aquaculture Stewardship Council)認証という社会的成果につながった。

<行政が既に活用した成果>

5. (2) で述べたような成果が、南三陸町・宮城県の行政担当者、漁民、NGO、我々研究者の協力により、S-13-5の結果を活用することで、達成された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

今回開発した統合数値モデルは日本のみならず、世界の沿岸海域の環境施策立案のためのツールとして使え、その成果をもとに、最も効果的な環境施策を立案することに役立つことが期待される。

そのために、2019年1月23-25日、シンガポール・Manila Bay Sandsで開催されたUNEPの3rd Ministers & Environment Authorities of Asia Pacificのサイドイベントで、机を一つ用意し、S-13の英文解説パンフを配布するとともに、希望者に研究成果の内容説明を行った。

実際に統合数値モデルを運用することは専門家以外には難しい。そこで、今回のように民間のコンサルタントに委託することになるが、委託にあたっては、現地住民・関係研究者・行政担当者が参加した協議会(S-13-2の志津川湾協議会のような会)をつくって、現地海域における、問題点・何をどこまで明らかにするか・着地点、などの委託項目を明瞭にして、委託しなければならない。

委託の際の仕様書では今回のS-13-5の科学的成果をもとに、統合数値モデルの有用性・協議会の議論をもとにした領域融合研究(trans-disciplinary study)の有用性、を強調する必要がある。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のものを再掲)

テーマ5シンポジウム「沿岸海域管理のための統合数値モデル構築」(平成30年11月27日、A P新橋、参加者約30名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

6. 研究成果の主な発表状況**(1) 主な誌上发表****<査読付き論文>**

- 1) 柳 哲雄・山本裕規・笠毛健生 (2018) 沿岸海域管理のための統合数値モデル開発とその利用. 沿岸海洋研究, 56-1, 49-54.
- 2) 山本裕規・吉木健吾・小松輝久・佐々修司・柳 哲雄 (2018) 志津川湾における陸域—海域統合数値モデルによる持続可能な沿岸域環境実現のための最適養殖量の解析. 土木学会論文集B2(海岸工学)、74-2、1279-78.
- 3) 笠毛健生・白木喜章・片山理恵・池田香澄・柳 哲雄 (2019) 大阪湾における水質・底質の長期変動. 土木学会論文集B3 (海洋開発), 75-2, 67-73
- 4) Haejin, K., K.Takayama, N.Hirose, G.Onitsuka, T.Yoshida and T.Yanagi (2018) Biological modulation in the seasonal variation of dissolved oxygen concentration in the upper Japan Sea. J.Oceanography, <https://doi.org/10.1007/s10872-018-0497-6>

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) 柳 哲雄・山本裕規 (2018) 「カキとワカメの最適複合養殖」. 日本水産学会春季大会水産環境保全委員会企画研究会、東京海洋大学.

7. 研究者略歴**研究代表者****柳 哲雄**

1972年 京都大学理学部卒業

1974年 京都大学大学院理学研究科地球物理学専攻修了

同 愛媛大学工学部海洋工学科助手

以後、講師、助教授を経て

1989年 教授

1997年 九州大学応用力学研究所教授

2013年 九州大学定年退職、同名誉教授

2014年 (公財) 国際エメックスセンター特別研究員、現在に至る

II. 成果の詳細

1. 志津川湾の統合モデル開発

要旨

志津川湾の統合数値モデルを開発し、この統合数値モデルを用いて、志津川湾における持続可能な最適カキ養殖方法を定量的に明らかにした。

(1-1) はじめに

志津川湾は、太平洋に開口した幅約6.5km、奥行き約8km、面積約47km²の、三陸地域の典型的な半開放性内湾である（図6）。



図6 志津川湾

志津川湾は元々、魚介類の養殖（カキ、ホタテガイ、ホヤ、ワカメ、ギンザケ等）が盛んな海域であり、年間平均約12,000トンの水揚げ、その6割近くの約7,000トンのカキが占めていた。一方で、養殖場の自家汚染に起因すると考えられる、貧酸素水塊の発生などの水質環境の悪化が問題となっていた。

2011年の東日本大震災の津波により、養殖施設がほぼ全損したものの、その後、震災前の状況に回復しつつある（図7、図8）^{1), 2)}。

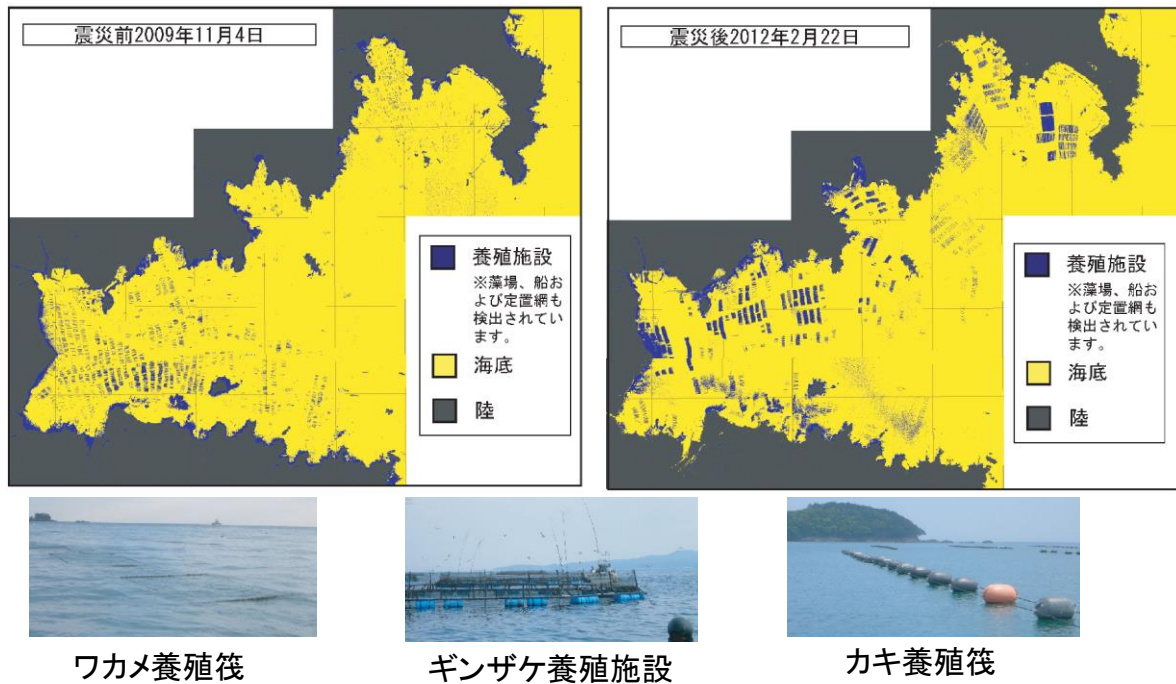


図7 志津川湾の養殖



図8 宮城県のカキ養殖量の経年変動

ただし、養殖の状況をただ震災前の状態に戻すのではなく、カキについては養殖筏の数を1/3に削減、ギンザケについては、生け簀の間隔を広げると同時に生産尾数を減らすなどの改善に取り組んでいるところである。

また、湾内の水深が浅い部分には、アマモ場や岩礁性藻場が分布しており、特有の生態的機能を果たしていた。震災時の津波の影響で、特に砂地に分布するアマモ類の多くが消失したが、最近ではアマモ場が回復しつつある場所も見られる。しかしながら、依然として湾奥部ではアマモ場の回復が見られず、また、津波で流出した瓦礫によりアマモ類の生育環境が失われ、岩礁性藻場に遷移している場所も多く見られる(図9)³⁾。

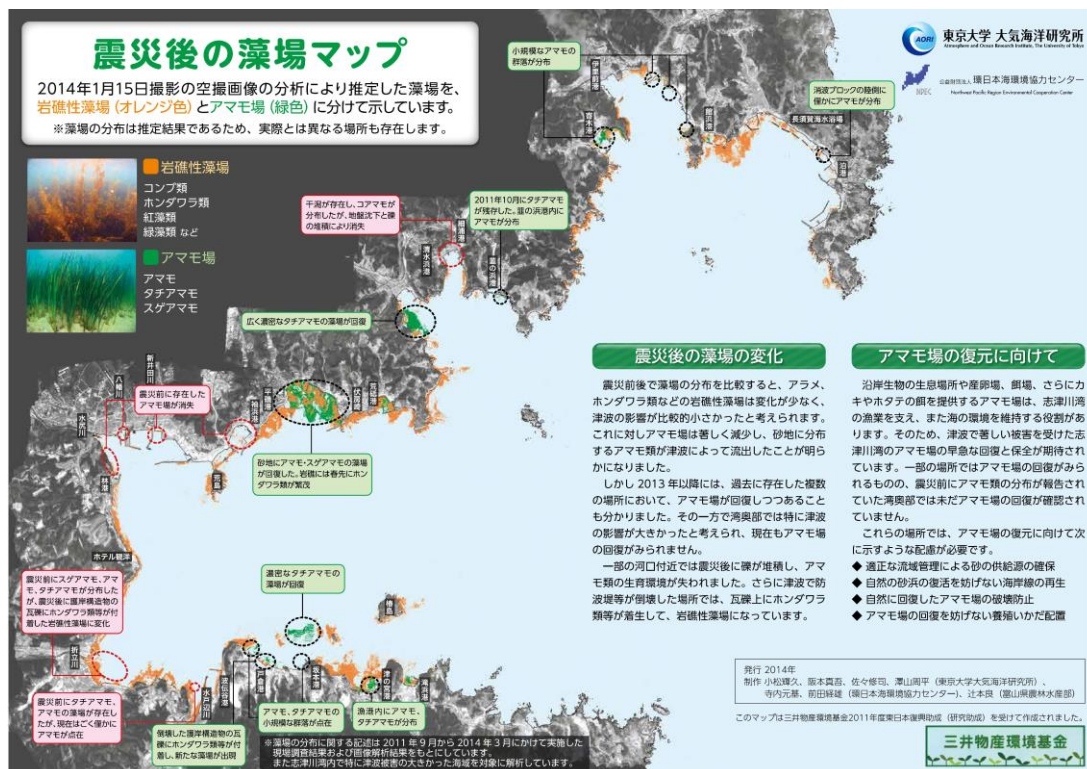
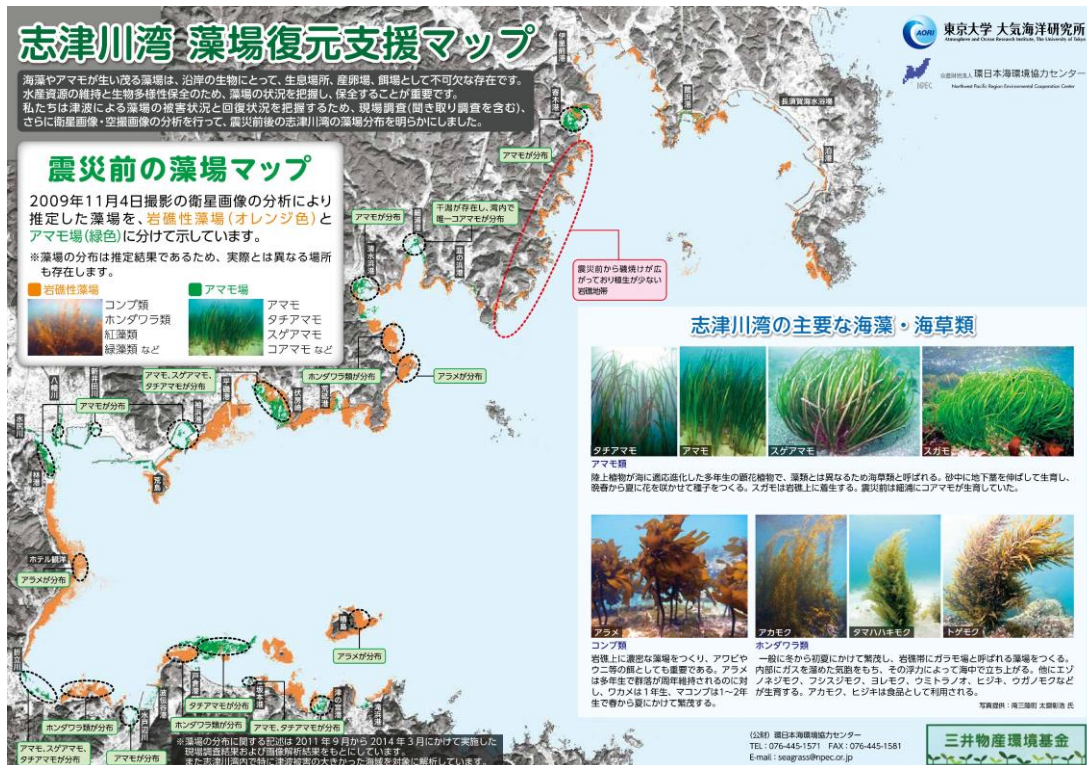


図9 志津川湾の震災前後の藻場マップ

背後流域については、志津川湾のある南三陸町の全面積の約8割が森林によって占められている。湾内への大規模な河川流入は無いが、折立川、水尻川、八幡川などの中小河川が数多く流入している。

なお、志津川湾へ流入する河川は、全て南三陸町内に水源を持っているのが特徴である。

(1-2) 研究開発目的

志津川湾における流動・水質環境を再現した統合数値モデルを開発し、この統合数値モデルを用いて、震災前後の海洋環境変化を再現し、どのような養殖形態・陸上の土地利用が、志津川湾における持続可能な養殖を可能にするかを定量的に明らかにすることである。

(1-3) 研究開発方法

志津川湾統合モデルを開発するために、2014・2015年度は広島湾のカキ養殖モデルを開発して、広島湾の海洋環境を持続可能な状態にするためには、現在のカキ養殖量をいくら減少させればよいかを明らかにした。

そして、2016-2017年度には志津川湾の流動・水質モデルを開発し、広島湾のカキ養殖モデルをもとに、志津川湾のカキ養殖を加えた、低次生態系モデルを開発して、最終年度である2018年度に最適カキ養殖量を明らかにすることを試みた。

まず、図10に示すように、志津川湾を150m×150mのメッシュに区分して計算を行った。志津川湾の海底地形については、海上保安庁刊行の海底地形図(志津川湾)に基づき、計算メッシュ(150m×150m)ごとの平均水深を読み取り、海底地形データを作成した(図11)。

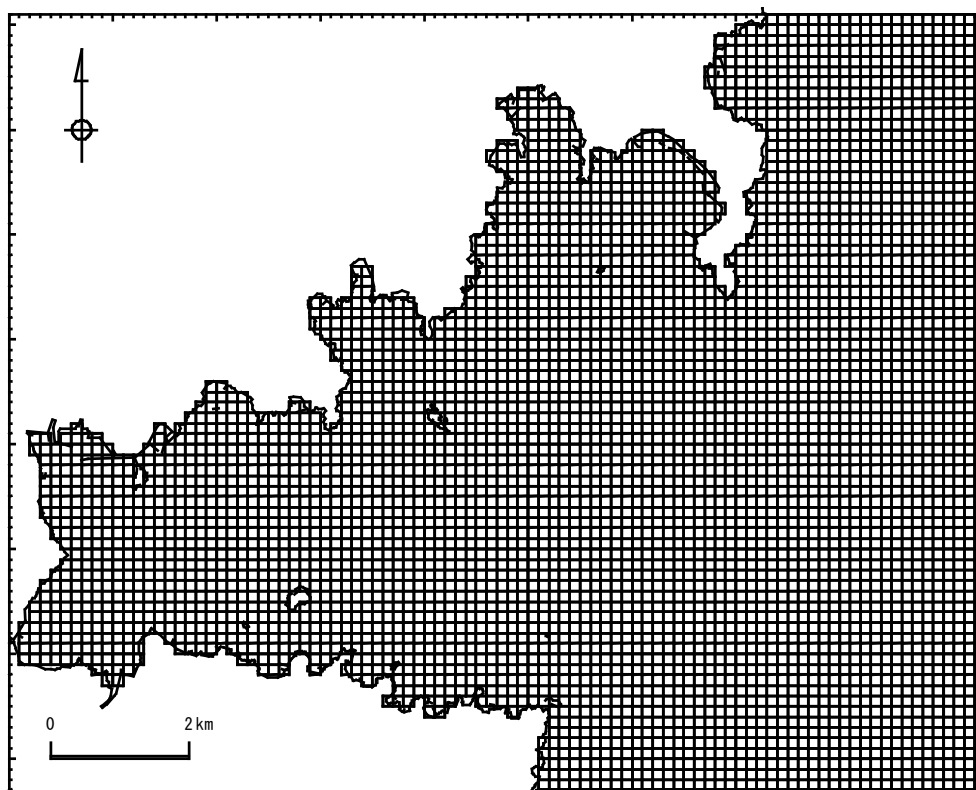


図10 150mメッシュの志津川湾

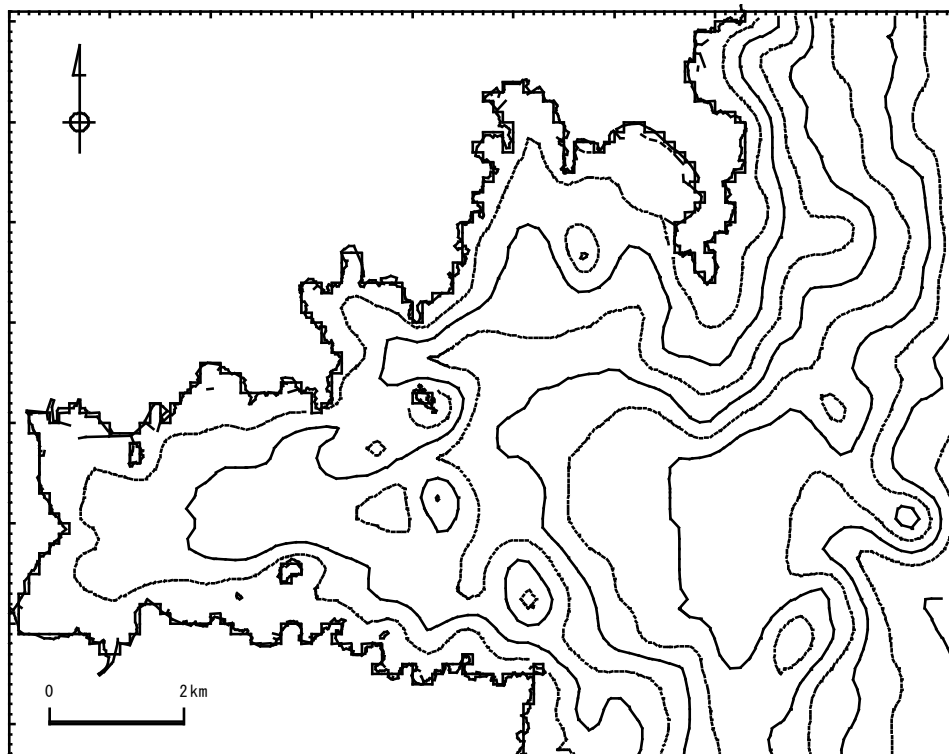


図 1.1 志津川湾の海底地形

また、鉛直方向には海面から海底までを最大11層に分割した。

流動モデルは、鉛直方向にBoussinesq近似を仮定し、各層毎に鉛直方向積分したNavier-Stokes方程式と連続式、熱収支式、塩素量収支式及び密度と水温・塩素量の関係式（状態方程式）としてKnudsenの式を基礎式とする鉛直多層レベルモデル⁴⁾を適用した。

また、モデルに潮汐、気温、日射量、風、河川流量などの時系列データを入力することで、時間的または季節的な流動場の変化が計算できるようにした。

なお、運動量及び物質と熱の鉛直乱流輸送に対する密度成層の影響（浮力の効果）を考慮するため、鉛直渦動粘性係数についてはRichardson数を考慮した乱流モデル⁵⁾を採用した。

さらに、カキなどの筏や延縄が設置されている場所の周辺では、海水の流れが遅くなることが予想されるので⁶⁾、カキ筏が存在するメッシュでは、土井・森下⁷⁾の手法を用いて、カキ筏による流れの抵抗を考慮した。

生態系モデル（浮遊系-底生系カップリング・モデル）の構造は、中田ら⁴⁾が構築した浮遊系モデルをベースとして、Sohma et al.⁸⁾が構築した底生系モデルを組み込んだものとした。

浮遊系モデルについては、溶存酸素（DO）、植物プランクトン（PHY）、動物プランクトン（ZOO）、懸濁態有機物（POC）、溶存態有機物（DOC）、溶存態無機窒素（DIN）、溶存態無機リン（DIP）、養殖物であるカキ（OYS）、ホタテガイ（SCA）、ワカメ（SW）、ホヤ（SQU）、ギンザケ（SAL）、底泥の嫌気的分解と共役して生成される還元物質（ODU; Oxygen Demand Unit）のコンパートメントを設けた（ODUについては後述する）。

底生系モデルについては、DO、POC、DOC、DIN、DIP、ODU、底生微細藻（BMA）、堆積物食ベントス（DF）、懸濁物食ベントス（SF）、化学的反応型吸着態リン（RP）、吸着態リン（EP）及び吸着態窒素（EN）をコンパートメントとした。

これらのコンパートメント間の物質循環経路は図 1.1 に示すとおりである。

本モデルでは、Soetaert et al.⁹⁾ 及びSohma et al.⁸⁾と同様に、底泥還元層において、有機物の分解時に生成される還元物質（ Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 H_2S ）の総和をODUと定義し、底泥内で生成されるODUと、ODUが底泥酸化層及び海水中に溶出して再酸化される際に消費される酸素消費量をモデル化した。

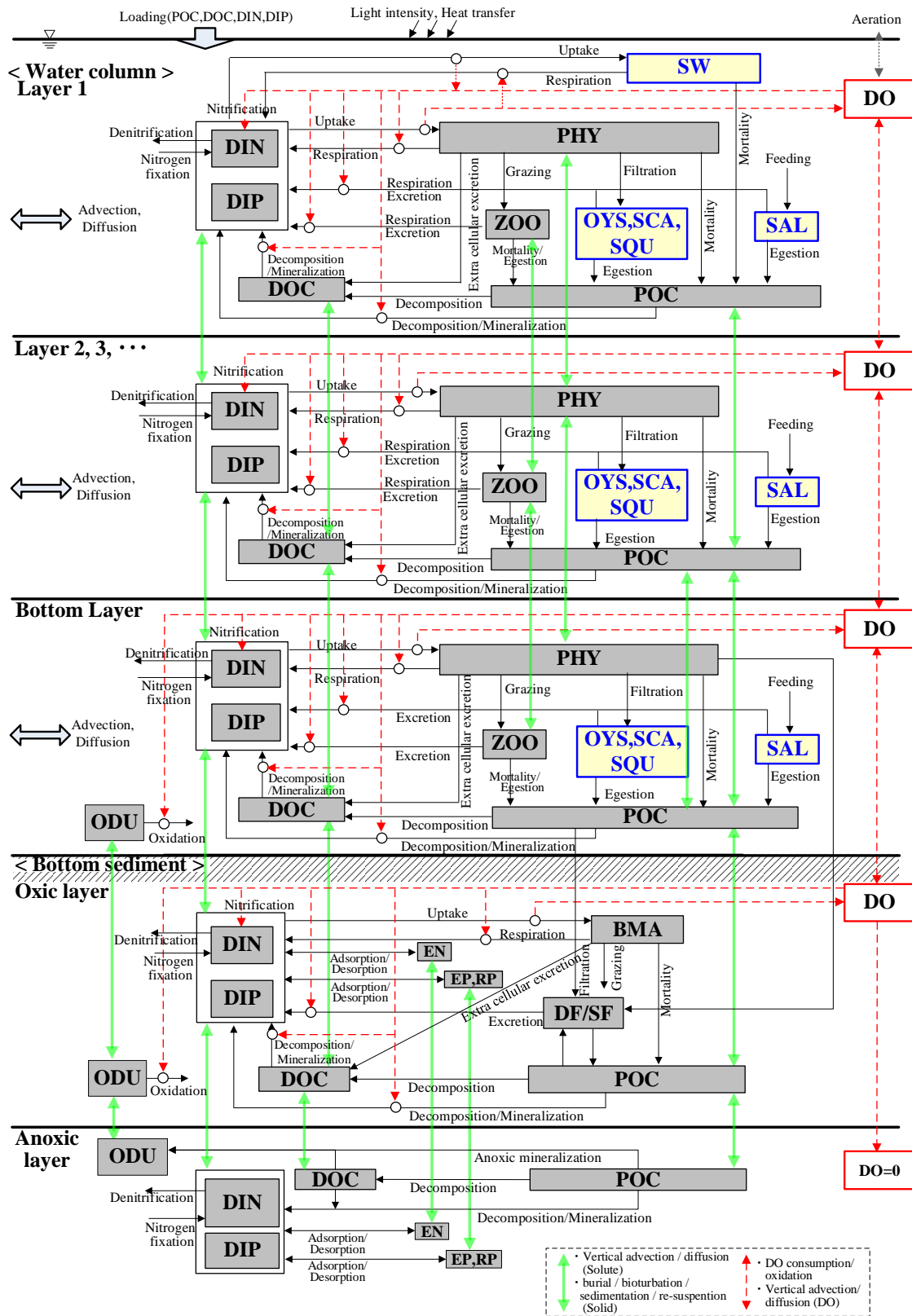


図 1 2 生態系モデルの構造

表2 使用した主なパラメータ

項目		採用値	文献値	実験値以外の文献値 (調整or推定or計算値)注1)	
植物プランクトン	初期値	$\mu\text{g/L}$	0.1-1.0 (志津川湾調査結果)		
	光合成速度	0°Cにおける最大成長速度(1/日)	1.5	1)0.23-0.89 2)0.34-0.85 3)0.20-1.70 4)1.74注2)	
		温度係数	0.0693	1)0.027-0.074 2)0.063-0.083 5)0.028-0.094 7)0.063	
		DIP摂取に関する半飽和定数($\mu\text{g-at/L}$)	0.1	PO4-P: 1)1.0-3.0 2)0.09-1.72	
		DIN摂取に関する半飽和定数($\mu\text{g-at/L}$)	1	NH4-N: 1)2.0-6.6 2)0.05-8.60	
		最適光量(cal/cm2/日)	480	1)150-270 5)45-90 6)300-350	
	呼吸	0°Cにおける呼吸速度(1/日)	0.01	1)0.011-0.140 2)0.03	
		温度係数	0.0693	1)0.029-0.082 2)0.0519	
	枯死	0°Cにおける枯死速度(1/日)	0.001	1)0.0001-0.0005 2)0.01-0.33 7)0.0281	1),7)は調整値
		温度係数	0.0693	1)0.0 2),7)0.0693	1)は調整値、2),7)は推定値
	沈降	沈降速度(m/日)	0.05	1)0.02-17.1 2)0.19-1.94 6)0-1.35	
	組成比	C/Chl.a	35	1)34.5 2)38.5-89.8 7)50.0	
		C/P	21	1)160.0 2)21-55.3 6)24.4	1)は調整値
		C/N	3.2	1)16.0 2)3.0-8.6 6)6.25	1)は調整値
		TOD/C	3.47	1)3.11 6)3.41	CNP比からの計算値
		COD/C	1.78	1)1.44 6)1.51	6)は実験or調整値
	動物プランクトン	初期値	mg/L	50 (広島湾調査結果)	
摂食		0°Cにおける最大摂食速度(1/日)	0.12	1)0.19 2)0.05-1.8 7)0.30	1),7)は調整値
		温度係数	0.0693	1)0.0 2),7)0.0693	1)は調整値、2),7)は推定値
排泄及び排糞		総成長効率	0.3	2)0.07-0.50 7)0.3	
		消化効率	0.7	1),7)0.7 2)0.26-0.99	
死亡		0°Cにおける死亡速度(1/日)	0.03	1)0.0006 2)0.058	調整値
		温度係数	0.0693	1)0.0 2),7)0.0693	1)は調整値、2),7)は推定値
組成比		C/P	34.9 (志津川湾観測値)	1)99.9 2)33.4-154	
		C/N	6.78 (志津川湾観測値)	1)7.1 2)3.4-6.2	
		TOD/C	3.47	1)3.31 6)3.51	CNP比からの計算値
	COD/C	1.78	1)1.07 6)1.55	6)は実験or調整値	

(1-4) 結果及び考察

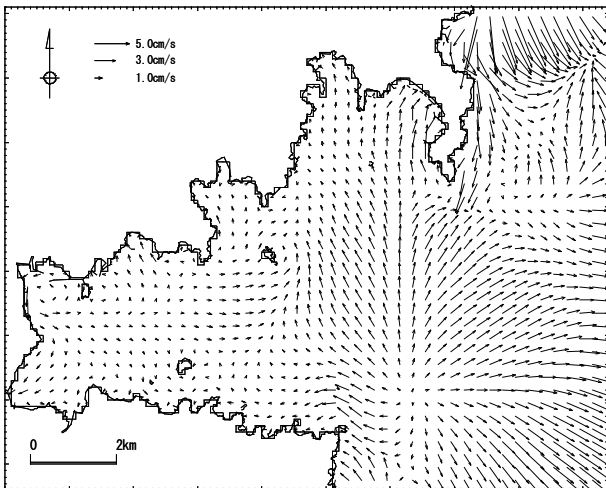
(1-4-1) 潮流の比較

志津川湾の潮流については、S-13テーマ2グループが湾内3地点において、水深3m（上層）、10m（中層）、20m（下層）で観測しているため、その結果と計算値の比較を行った。

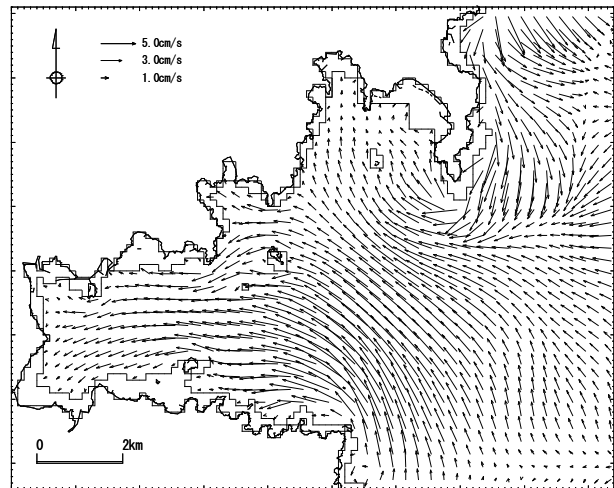
M_2 分潮、 S_2 分潮、 K_1 分潮、 O_1 分潮の実測値と計算値の潮流楕円を比較した。なお、比較した調査期間は、2015年5月16日～30日の2週間とした。実測値は主に海面下5.0mまたは海面下10.0mで観測されているが、全ての地点において、流向・流速ともに計算値は実測値とよく一致しており、現況再現性は良好であった。

志津川湾における平均的な流況を表していると考えられる中潮時（2014年5月16日）における流速ベクトル図は、図12に示すとおりである。これによると、志津川湾では表層付近（～水深3m）、中層付近（水深6m～）、下層付近（水深20m～）で流向が異なる3層構造となっている。上げ潮時～満潮時にかけては、主に中層付近から流れが湾内に侵入し、満潮時～下げ潮時にかけては表層付近と下層付近から湾外に流出する。

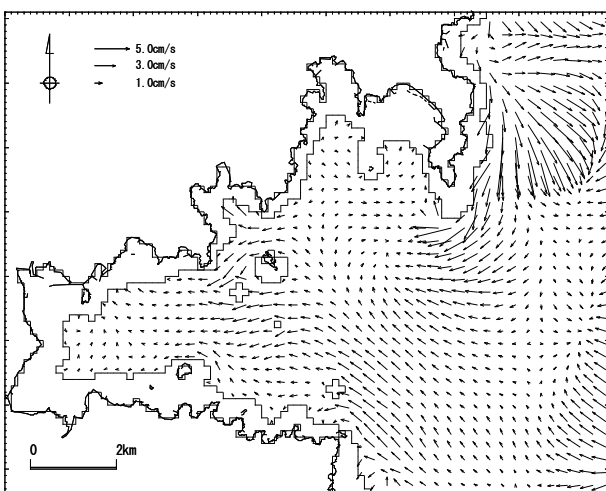
第1層(水深0m～3m)



第3層(水深6m～9m)



第5層(水深12m～15m)



第8層(水深21m～31m)

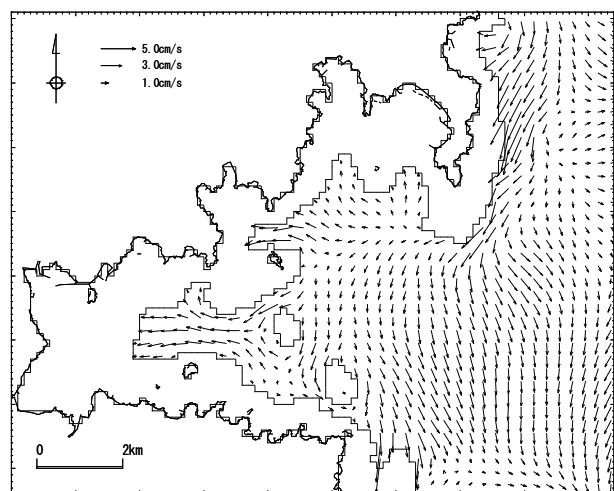


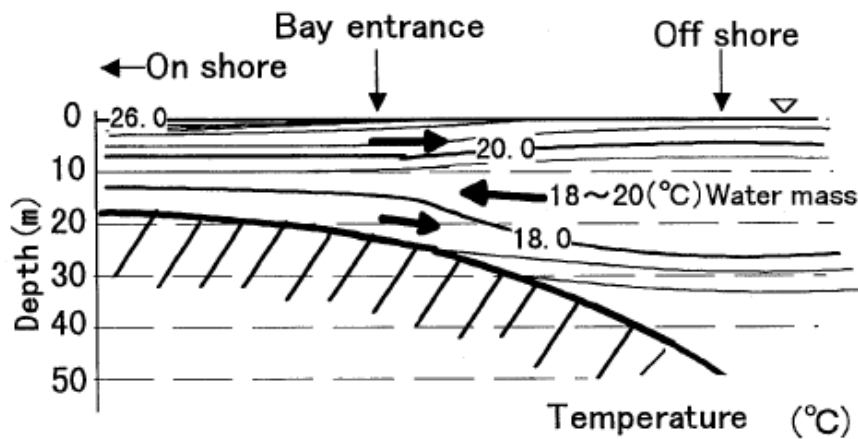
図13 中潮・上げ潮再生時の流況

湾内3地点の観測値と計算値について、残差流の比較を行った。中層付近（水深10m）及び下層付近（水深20m）については、流向・流速ともに、観測値と計算値はほぼ一致する結果となった。表層については、流速が1cm/s程度と微弱であるため流向は表現できていないが、流速については、ほぼ一致する結果となった。

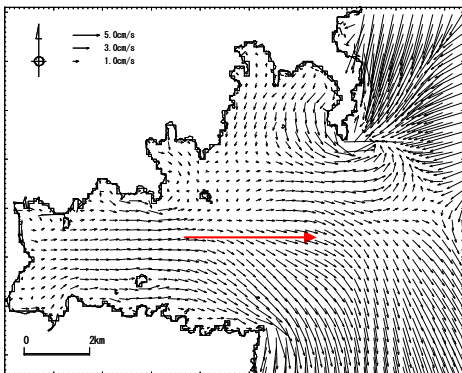
永澤ら¹⁰が過去に実施した志津川湾の流況観測結果によると、湾内の鉛直分布が成層化している夏期において、上層から流出、中層から流入、下層から流出する3層構造が見られると報告されている。

流れが3層構造になる要因としては、湾外の海水は湾内の同温・同密度層である中層に流入し、その流入に対して軽い海水は上層から流出し、重い海水は下層から流出するためと考察されている。

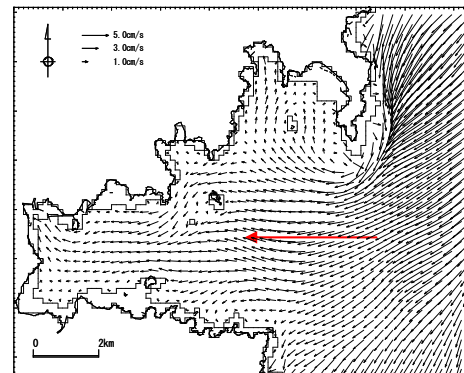
本計算結果においても、成層が形成される時期においては、上層流出・中層流入・下層流出の3層構造が見られており、上記の現象を再現できていると考えられる（図14）。



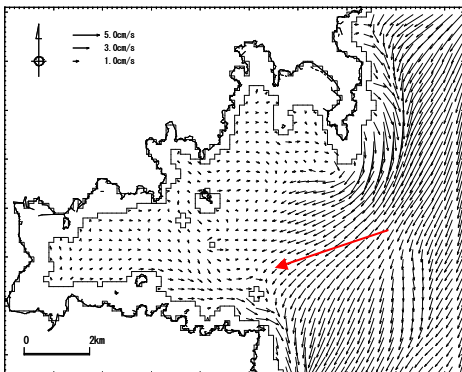
第1層 (0m~3m)



第3層 (6m~9m)



第5層 (12m~15m)



第8層 (21m~31m)

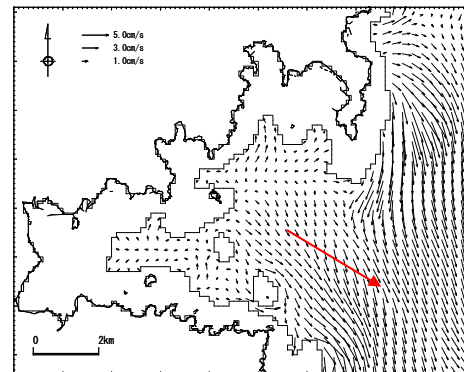


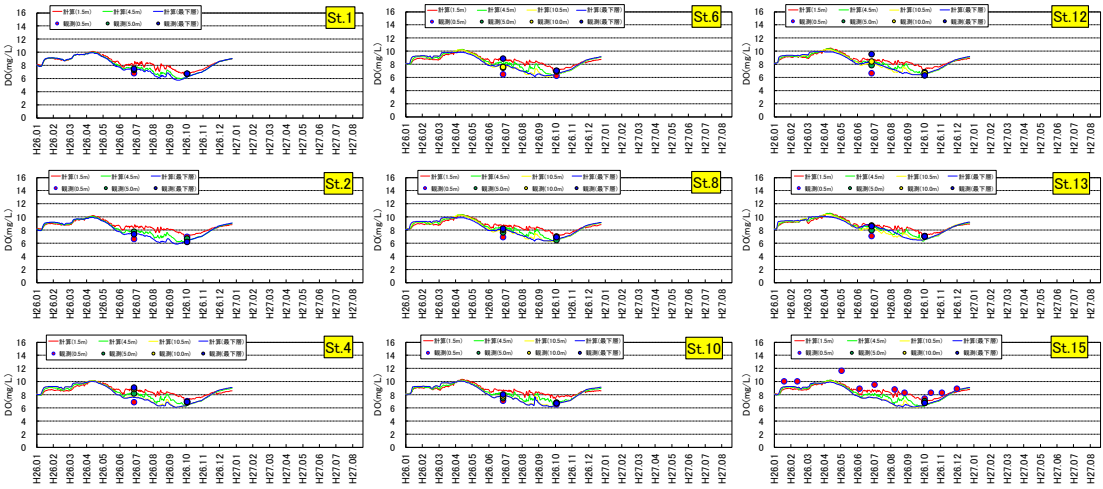
図14 上層・下層流出、中層流入の観測結果（上）と計算結果（下）

(1-4-2) 水温・塩分の比較

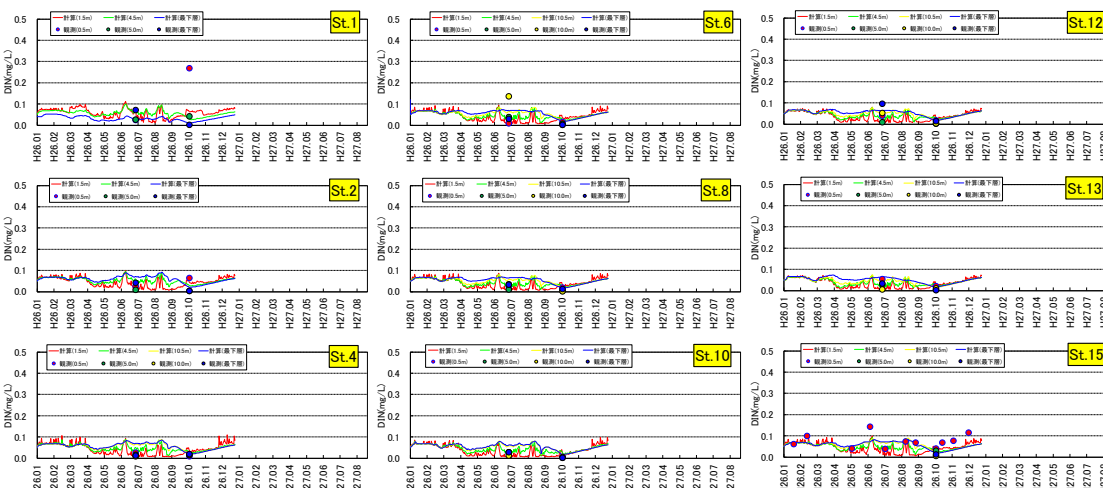
水温・塩分の観測値と計算値を比較した結果、水温・塩分の計算結果は、観測値と良好に一致していることがわかった。

(1-4-3) 実測値と計算値の比較 (水質)

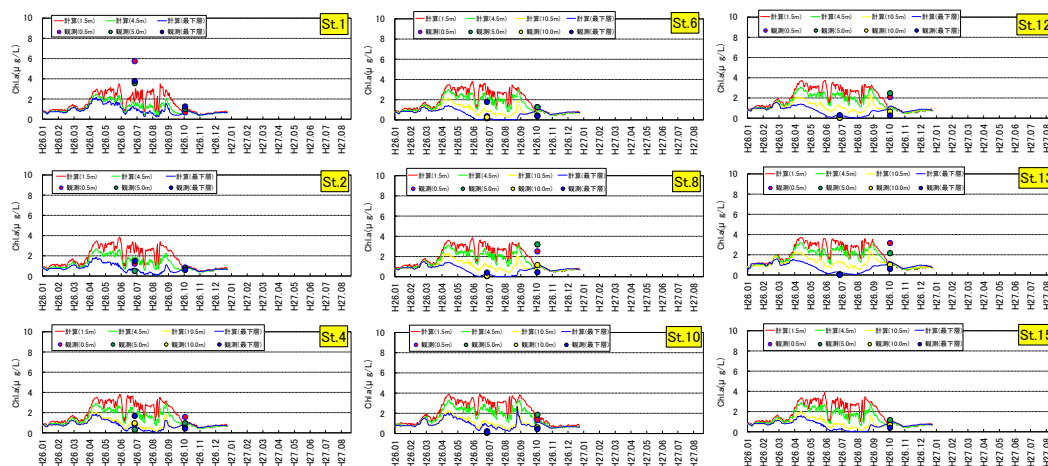
下層D0・T-N・クロロフィルaの観測値 (湾内各点においてS-13テーマ2グループが観測) と計算値を比較した結果は、図15に示すとおりである。



下層D0



下層DIN



下層Chl. a

図15 水質の観測結果 (丸) と計算結果 (線)

(1-4-4) 実測値（水揚げ量）と計算値の比較

1) カキ現存量、水揚げ量、身肉重量

カキ現存量、累計水揚げ量、身肉重量の計算結果は、図15に示すとおりである。

年間の計水揚げ量は、実測値（約310トン/年）とほぼ一致する結果となっている。

カキ養殖は、同じ場所で時期をずらして2系統で養殖していると考えられるので、水揚げ量を2倍したものが最大現存量になると考えられるが、計算では、現存量が水揚げ量を大きく上回っており、過小評価となっている。

これは、身肉重量が、ヒアリングによると最大で約20g程度であるのに対し、計算では過大に評価されているためと考えられる。今後は、ろ水速度などのパラメータを、現地での実験値に近い値を採用するなどにより身肉重量の再現性を高めることで、現存量と水揚げ量の誤差を小さくしていく必要がある。

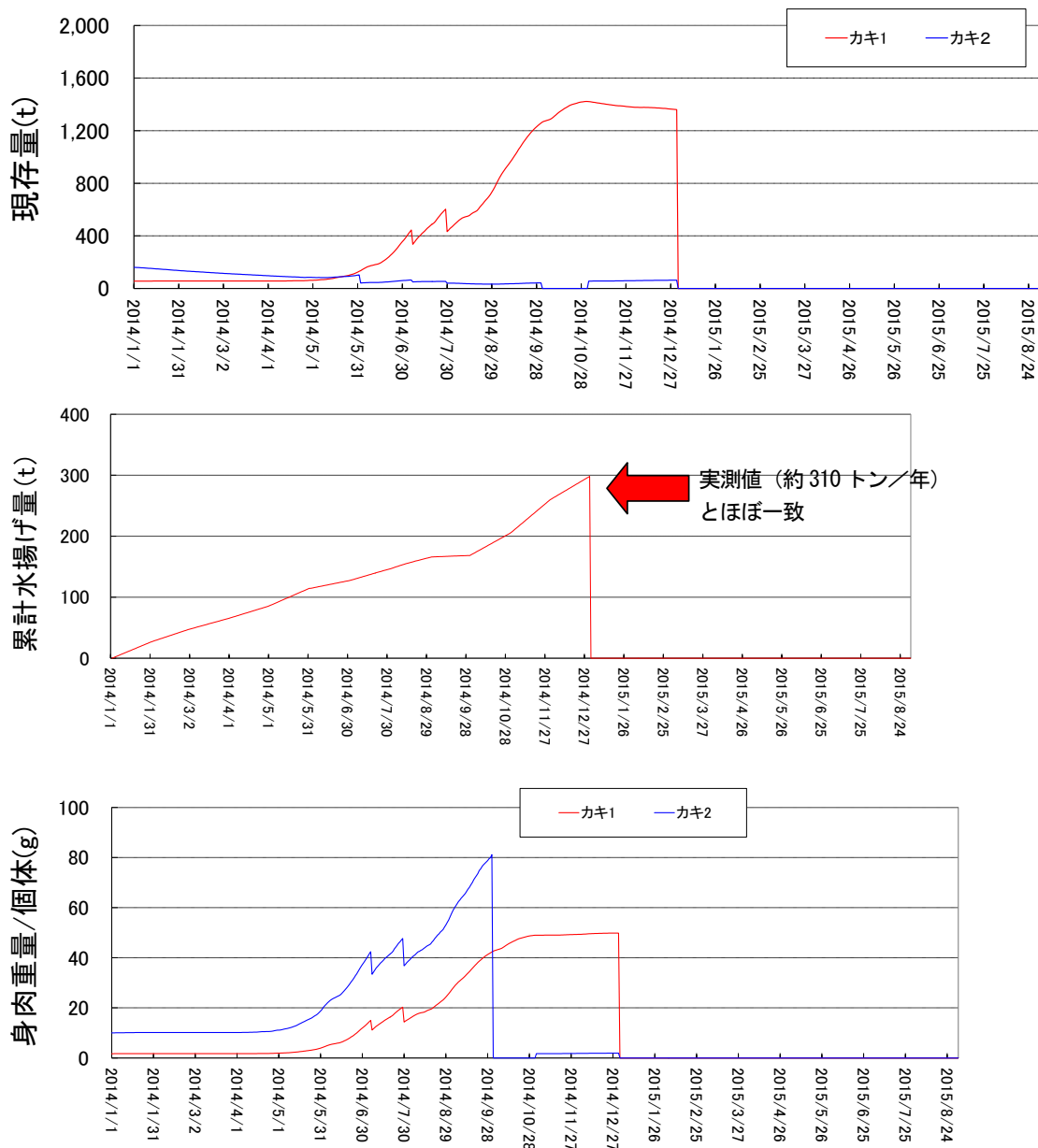


図16 養殖カキの現存量（観測値）と計算値

※志津川湾のカキ養殖は、同じ筏で時期をずらして2系統で養殖していると考えられるので、それぞれの系統の現存量、水揚げ量、身肉重量を計算した。

(1-4-5) 最適カキ養殖法

最適カキ養殖量等の解析ケースは以下の通りである。予測ケース1では、カキ養殖が盛んに行われている①戸倉地区と②志津川地区におけるカキ筏台数を現況の2倍に増やすケース、予測ケース2では、①戸倉地区と②志津川地区におけるカキ筏台数を現況の3倍に増やすケースの計算を実施した。

なお、予測ケース1、予測ケース2については、カキ養殖以外の条件（気象・海象条件、陸域からの流入負荷量、外海からの流入負荷量等）は現況と同一の条件とした。

また、各ケースともに、計算期間は2014年1月1日から2015年8月31日までとした。

現況、予測ケース1、予測ケース2の計算結果（カキ現存量、身肉重量）は、図16に示すとおりである。志津川湾全体では、カキ筏の台数を増やすことで、カキ現存量は現況に比べ最大で約1.41倍（予測ケース2）、約1.64倍（予測ケース2）に増加すると予測された。

一方、1個体当たりの平均身肉重量は、現況に比べ約0.80倍（予測ケース1）、約0.69倍（ケース2）に減少すると予測された。

漁業地区別にみると、カキ筏を増やした場合に、現存量が最も増加するのは戸倉地区であるが、身肉重量の減少が大きいのも戸倉地区であった。

歌津地区では、元々カキ筏の台数が少ないこともあるが、戸倉地区、志津川地区でカキ筏の台数を増やしたとしても、歌津地区におけるカキの現存量、身肉重量への影響はほとんどないと予測された。

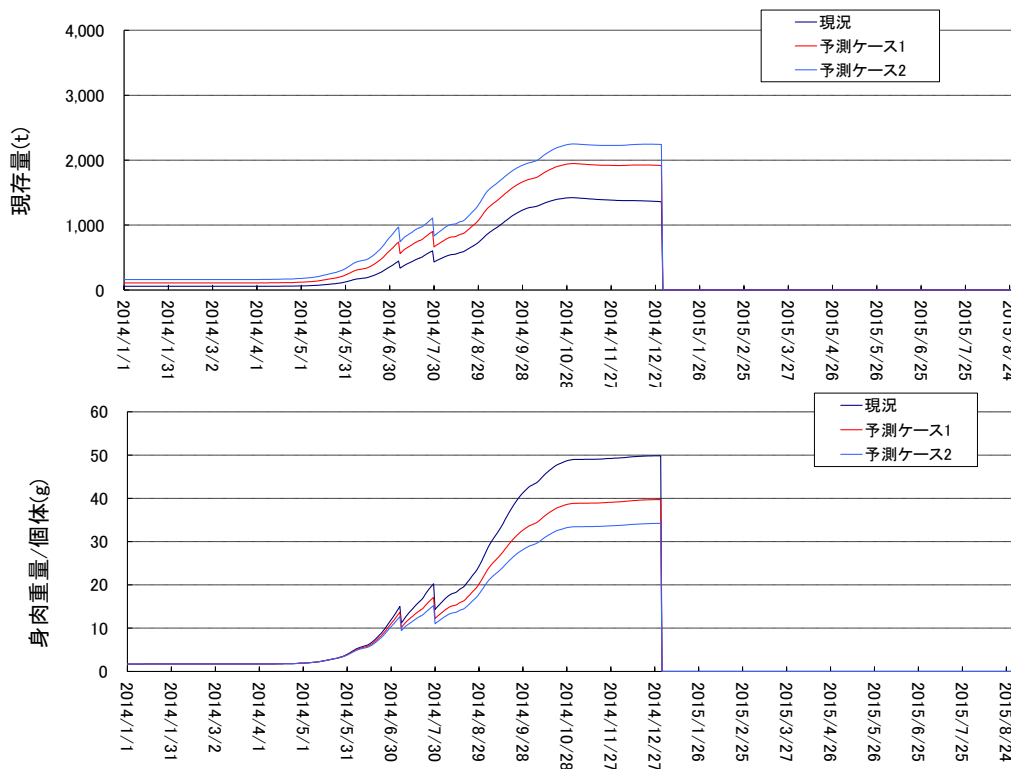


図17 カキ現存量、身肉重量の計算結果（現況、ケース1、2の比較）

(1-4-6) 底層DO濃度の変化

湾奥部のSt.1において、年間を通して下層DO濃度が最低となった2014年9月21日における下層DOコンター図（現況、予測ケース1、予測ケース2の比較）を図18に示した。

これによると、現況に比べ、予測ケース1では濃度が低い範囲はほとんど変わらないものの、予測ケース2では、湾奥北側と湾奥南側河口部付近にかけて、濃度が低い範囲が拡大すると予測された。

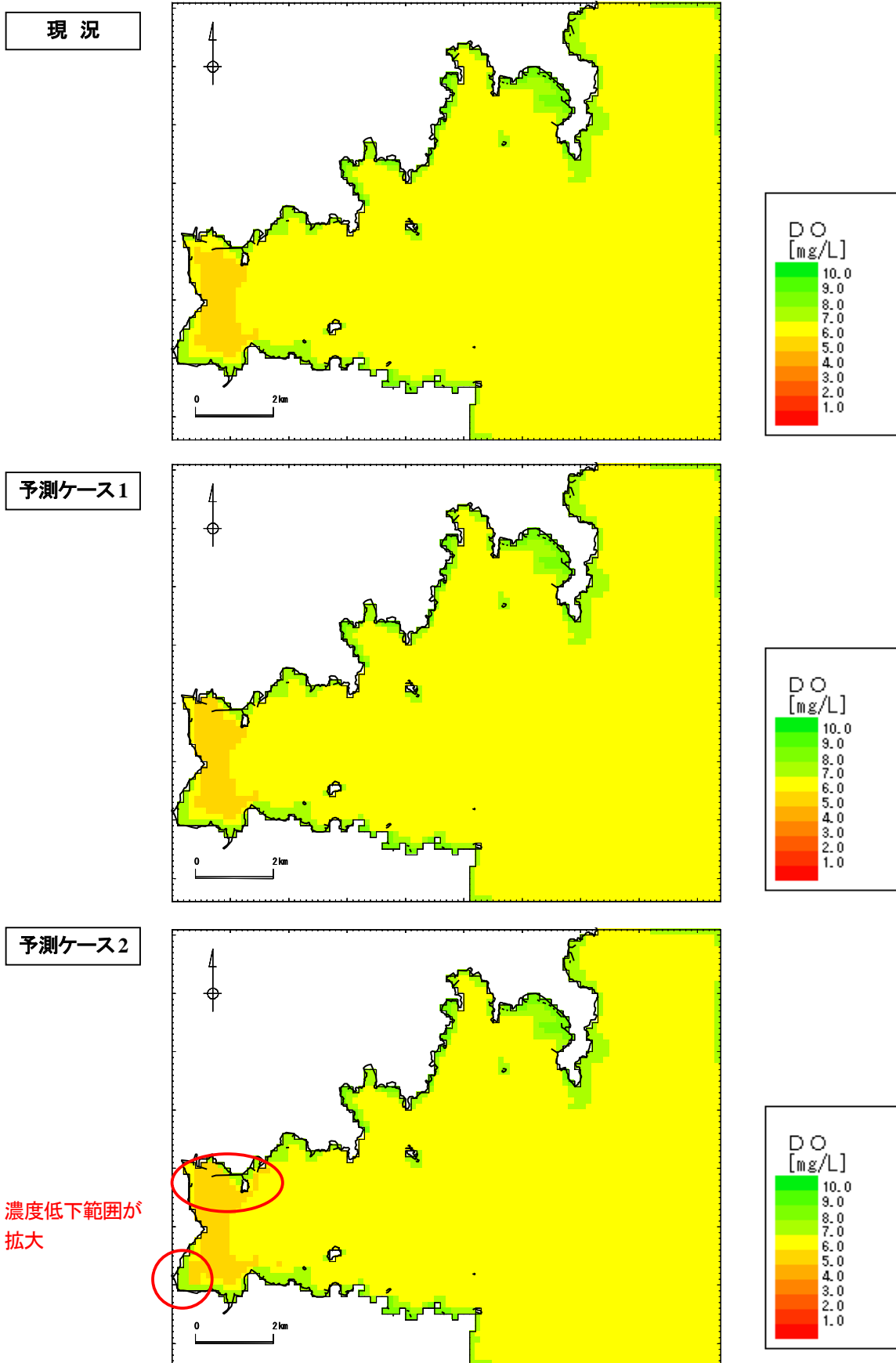


図 1 8 底層DO濃度の変化

2. 瀬戸内海の統合数値モデル開発

要旨

瀬戸内海統合モデルを作成し、1960年代・2014年・2050年代の瀬戸内海全域の低次生態系をめぐる物質循環の変遷を明らかにするとともに、広島湾の入れ子モデルを用いて広島湾の栄養塩濃度管理法としては、沿岸浅瀬海域におけるアマモ場面積増加が最も適当であることを明らかにした

(2-1) はじめに

瀬戸内海は一時の「瀬死の海」と呼ばれた状態を脱し、見た目のきれいさは取り戻したが、漁獲量は最盛時の4割以下に激減し、その回復の気配はない。このような状況下、どのような環境施策が「きれいで、豊かな瀬戸内海」を創生するために有効なのか、を定量的に明らかに出来る統合数値モデルの開発は喫緊の科学的な研究課題である。

本研究は、そのような目的意識を持って、瀬戸内海の統合数値モデルの開発を試みる。

(2-2) 研究開発目的

本研究は、開発した瀬戸内海統合数値モデルを用いて、瀬戸内海全域の過去（水質汚濁進行期以前）、現在と未来（水質管理を踏まえた将来）の水質・生態系の予測シミュレーションを実施し、瀬戸内海の過去・現在・将来の海域環境について評価および考察を行う。評価の指標として、リンや窒素、海域の透明度、さらに高次生態系としてプランクトン食性魚等を用いる。また、広島湾を対象に、沿岸域の水質管理方策に関するシミュレーションを行い、評価および考察を行う。

(2-3) 研究開発方法

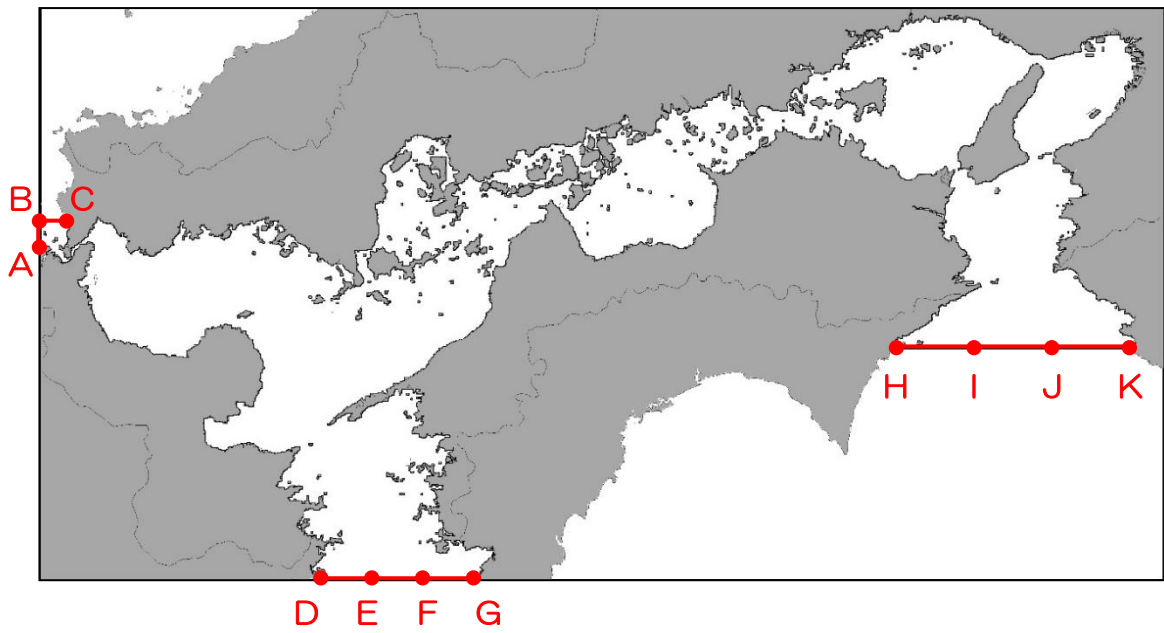
瀬戸内海統合数値モデルを開発するための部品作りとして、2014・2015年度は大阪湾におけるカタクチイワシ資源量モデルと洞海湾における貧酸素水塊モデルを開発した。

そして、瀬戸内海統合数値モデルの流動計算には、大阪湾カタクチイワシに用いたモデルと同様に Princeton Ocean Model¹（POM）をベースとした流動モデルを使用する。本モデルはシグマ座標系を採用しており、水平渦動粘性・渦拡散係数の決定にはスマゴリンスキー型、鉛直渦動粘性・渦拡散係数には Mellor and Yamada level 2.5 を使用する乱流クーロージャーモデルである。

POMの特徴の1つとして、計算効率を上げるため、外部モードと内部モードの2つの計算処理（スキーム）に分割することが挙げられる。2つの計算スキームは、潮汐等による海面水位の計算を2次元単層モデルで解く外部モードと、流速、水温、塩分等の水平・鉛直分布を解く内部モードである。それぞれの計算スキーム毎に最適な計算ステップを設定することで、計算の効率化を図る。

流動シミュレーションで用いる潮汐は、主要な16分潮（ M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 、 P_1 、 K_2 、 M_1 、 J_1 、 00_1 、 Q_1 、 T_2 、 L_2 、 NU_2 、 MU_2 、 $2N_2$ ）を考慮して、開境界である関門海峡（響灘）、豊後水道、紀伊水道から水位変動として与えた。潮汐変動は全球潮汐モデル¹¹の結果から得られた調和定数を用いた。

図19に境界条件の設定地点、表3に各分潮の調和定数をそれぞれ示す。なお、地点間の潮汐変動は線形補間した。



地点	緯度			経度		
	度	分	秒	度	分	秒
A	33	57	01.4960	130	48	20.1994
B	34	01	53.2975	130	48	10.9782
C	34	02	00.4804	130	53	43.9523
D	32	48	22.8811	131	59	54.3448
E	32	48	31.5432	132	12	52.5755
F	32	48	38.8622	132	25	50.8917
G	32	48	44.7192	132	38	31.9808
H	33	37	25.3912	134	23	23.9511
I	33	37	15.2658	134	43	11.0431
J	33	37	01.0971	135	04	07.7554
K	33	36	44.9957	135	23	19.5019

図 19 潮汐境界条件設定地点

表3 各地点における各分潮の調和定数（振幅・遅角）

地点	M2		S2		K1		O1	
	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)
A	38.6	301.0	18.7	305.2	11.1	279.1	11.3	300.9
B	37.9	302.9	18.4	306.7	11.3	279.9	11.4	302.5
C	38.5	302.6	18.6	306.5	11.3	279.3	11.6	302.2
D	50.1	191.7	22.3	200.5	21.1	191.4	16.3	197.8
E	50.9	194.8	22.5	203.4	21.7	191.9	16.7	198.6
F	52.8	193.3	23.4	202.5	22.0	190.3	17.0	197.1
G	52.7	191.4	23.6	200.6	21.7	189.9	16.9	196.5
H	48.5	186.6	21.8	196.3	21.7	188.4	16.7	194.3
I	48.0	187.3	21.6	196.9	21.7	188.9	16.7	194.9
J	47.7	187.8	21.5	197.3	21.8	188.6	16.8	194.5
K	47.5	188.1	21.4	197.6	21.7	188.6	16.7	194.5

地点	N2		P1		K2		M1	
	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)
A	7.4	335.7	3.8	276.6	5.2	297.4	0.5	263.0
B	7.3	337.9	3.8	277.9	5.2	299.2	0.5	262.3
C	7.4	337.3	3.9	277.7	5.2	298.8	0.5	261.0
D	9.3	208.6	6.8	189.3	6.1	196.2	1.0	184.7
E	9.4	212.8	7.0	189.9	6.2	199.2	1.0	185.7
F	9.9	211.5	7.0	188.7	6.5	198.3	1.1	185.3
G	9.9	209.2	7.0	188.2	6.5	196.5	1.1	183.9
H	9.0	202.8	6.9	186.1	6.1	192.0	1.0	175.7
I	8.8	203.5	6.9	186.6	6.0	192.5	1.0	177.2
J	8.8	204.2	7.0	186.5	6.0	193.0	1.0	178.9
K	8.7	204.6	7.0	186.4	6.0	193.3	1.0	178.9

地点	J1		OO1		Q1		T2	
	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)
A	0.6	292.0	0.4	328.0	2.6	246.7	1.4	299.6
B	0.6	293.0	0.3	329.4	2.7	248.8	1.4	301.8
C	0.6	292.8	0.4	330.4	2.7	247.3	1.4	301.5
D	1.0	204.4	0.5	216.6	3.5	164.3	1.3	199.8
E	1.1	205.8	0.5	222.2	3.5	164.2	1.3	201.9
F	1.1	202.4	0.6	220.0	3.5	163.5	1.4	201.6
G	1.1	200.8	0.6	216.9	3.5	163.3	1.4	200.1
H	1.0	197.1	0.6	212.9	3.5	162.6	1.4	190.9
I	1.0	198.9	0.6	215.5	3.5	162.6	1.4	192.5
J	1.1	199.5	0.6	216.2	3.5	162.5	1.4	193.5
K	1.1	199.2	0.6	215.6	3.5	162.3	1.3	194.0

地点	L2		NU2		MU2		2N2	
	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)	振幅(cm)	遅角(deg.)
A	1.3	259.8	1.3	271.5	1.9	287.8	1.1	269.6
B	1.2	262.4	1.3	273.5	1.9	287.5	1.1	271.8
C	1.3	262.7	1.3	273.1	1.9	288.5	1.1	271.3
D	1.5	184.0	1.8	167.6	1.4	170.0	1.1	164.0
E	1.5	188.2	1.8	168.2	1.4	170.6	1.2	169.0
F	1.5	187.8	1.8	169.4	1.4	170.6	1.2	167.9
G	1.6	185.7	1.8	169.2	1.4	170.2	1.2	165.8
H	1.4	180.3	1.7	167.5	1.4	169.0	1.1	163.3
I	1.4	181.0	1.7	167.8	1.4	169.4	1.1	164.1
J	1.4	182.3	1.7	168.4	1.3	168.5	1.1	164.8
K	1.4	182.9	1.6	168.7	1.3	168.8	1.1	165.3

1) 潮流

潮流の再現性検証には、日本海洋データセンターがWEB上で公開している瀬戸内海の各地点における潮流観測値から作成した潮流楕円を用いた。楕円の比較に用いた計算値は、2013年2月13日から2月28日の15昼夜の結果である。計算結果は観測結果を良く再現した。

2) 夏期平均流

瀬戸内海の平均流に関する既往の報告に柳・樋口(1979)^{*}がある。図20に柳・樋口(1979)の文献中に示されている瀬戸内海表層の恒流模式図を示す。この恒流模式図を作成するために集められたデータは、主に5月から8月の夏季に多くなっているため、流動計算の7月の平均流と比較することで、流動計算の再現性を確認した。図21に流動計算で得られた7月1日から15昼夜の期間の表層平均流速分布を示す。図20と21を比較すると、例えば周防灘奥の時計回りの渦や、紀伊水道の反時計回りの渦など、詳細な構造が計算結果では見られない部分もあるが、大局的には流動計算の流向と既往文献の流向は一致している。

※柳哲雄・樋口明生：瀬戸内海の恒流：沿岸海洋研究ノート、20、12-18、1979

なお瀬戸内海に存在する全窒素・全リンの半分以上は太平洋起源であると言われていて(Yanagi and Ishii、2004)^{**}、太平洋起源の全窒素・全リンは、底層を外洋から備讃瀬戸に向かい、表層を備讃瀬戸から外洋に向かう河口循環流により輸送されているので、このような平均流の再現が瀬戸内海統合数値モデルに重要な役割を果たす。

^{**} Yanagi, T. and D. Ishii (2004) Open ocean originated phosphorus and nitrogen in the Seto Inland Sea. J. Oceanogr. Soc. Japan、60、1001-1005.



図 20 瀬戸内海表層の恒流模式図(柳・樋口、1979)

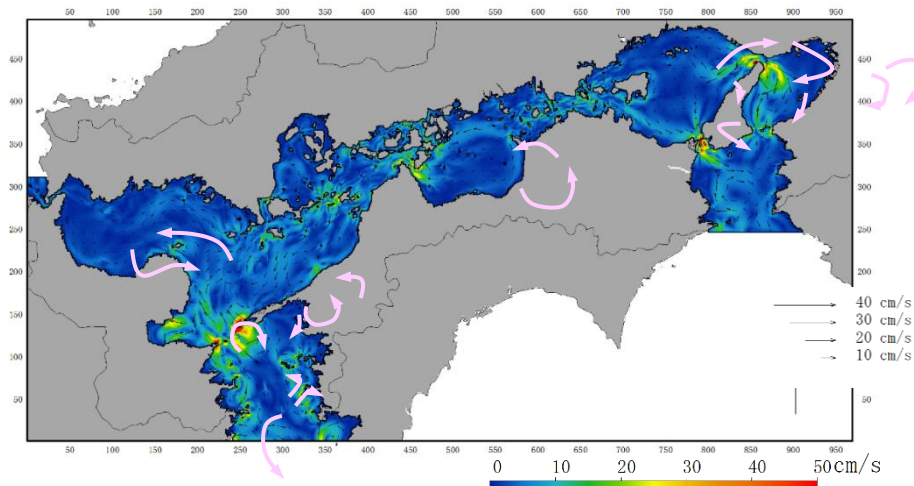


図 2 1 流動計算で得られた 7 月 1 日から 15 昼夜の平均流速分布 (1 層目)

3) 水温

季節毎の広域総合水質調査の結果と比較することで、水温の計算結果の再現性を検証した。各季節の上層と下層それぞれにおける水温の観測値と計算値を比較した。計算値の水温空間分布に関しては、広域総合水質調査データから空間分布用格子データを作成する方法と同様に、計算値から広域総合水質調査が実施された同じ地点・同じ時刻のデータを抽出し、そのデータのみを使用して、加重平均で格子データを作成・描画した。計算結果は観測結果を良く再現した。

4) 塩分

水温と同様の方法で、塩分再現性の検証を行った。各季節の上層と下層それぞれにおける塩分の観測値と計算値は良く一致した。

5) 水質・底質シミュレーション

流動シミュレーションの流動場を基に、水質計算を実施する。計算には、流動シミュレーションの結果を使用した移流・拡散方程式に、負荷量の流入及び内部生産等による物質生成項などを考慮した低次生態系モデル (中田1993ⁱⁱⁱ) を基本とし、そこに詳細底生系モデルと藻場モデル、そして高次生態系による捕食や呼吸等のプロセスを追加した。本業務で構築した水質・底質・生態系結合モデルの模式図を図 2 2 に示す。

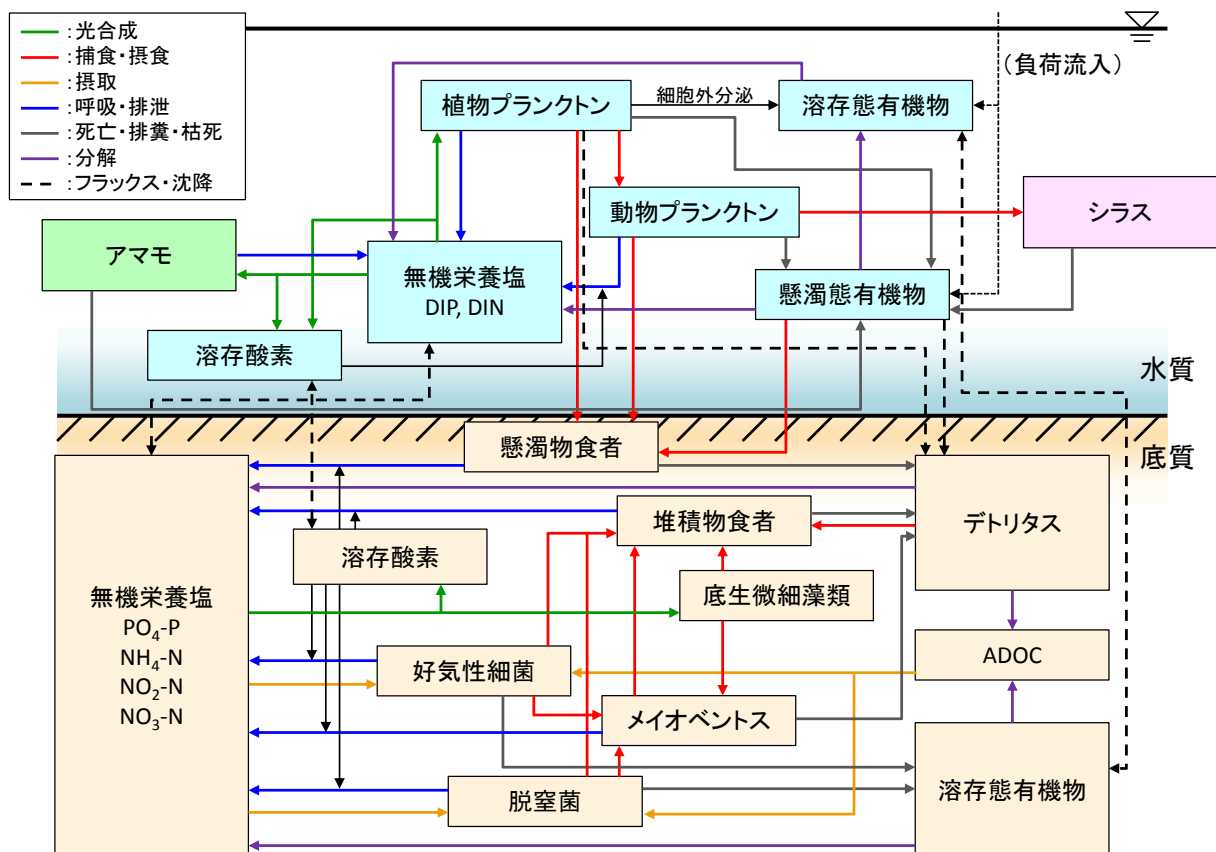


図 2 2 水質・底質シミュレーションの模式図

6) 干潟モデル

瀬戸内海における干潟の分布は、環境省の自然環境保全基礎調査（第5回）および平成27年度瀬戸内海東部海域調査結果、平成28年度瀬戸内海中部海域調査結果において公開されている。干潟は主に、周防灘や広島湾、備後灘や燧灘を中心に分布している様子が確認できる。

干潟の計算に関しては、詳細底生系モデルに干出判定を与えることで実施する。水質計算の①空間解像度が低いことと、②計算を安定させるため最低水深を5mと設定していることから、水位の昇降で実際に干出させることができないため、以下のようにして干出を判定する。

- ① 2、250m 四方の格子内にある 450m 格子 25 個の最低水深を抽出し、それをその 2、250m 格子の代表水深とする
- ② 水位がその水深以下になったらその格子は干出したと見なす
- ③ 干出した場合、水質と底質のやりとりをオフにする
- ④ 底質表層は空気に晒されることによる曝気を考慮する

なお、干潟が存在する格子でも、その格子全体が干潟というわけではなく、実際はその一部であるので、上記方法をすべての干潟設定格子に適用した場合、瀬戸内海の干潟面積が過大評価となってしまふ。そこで、各格子の干潟占有割合を算定し、各格子の干潟占有割合が22.5%を超える格子にのみ上記の干潟処理を適用するものとする。干潟占有割合22.5%以上の格子を瀬戸内海全域で積算した値は、瀬戸内海の干潟面積とほぼ同等となる。

7) 藻場モデル

藻場の空間分布も、干潟分布同様に、環境省の自然環境保全基礎調査（第5回）および平成27年度瀬戸内海東部海域調査結果において公開されている。藻場は大阪湾奥と周防灘を除く瀬戸内海の沿岸に広く分布している様子が確認できる。なお、藻場に関しても干潟と同様に、藻場占有面積を算定し、その値を藻場による効果に乗算することとする。

瀬戸内海の藻場構成種の面積比は、アマモ場とガラモ場で半分近くである。また、年間の炭素ベース生産量を見ると、アマモ場とガラモ場で60%以上を占めている。そこで、瀬戸内海統合モデルでは、藻場モデルとしてアマモ場モデルとガラモ場モデルを構築した。

計算に用いた主なパラメータを表4に示す。

表4 計算に用いた主なパラメータ

項目	単位	設定値	既往報告書・文献
0°Cにおける増殖速度	day ⁻¹	0.893	0.893 ^① 、0.59 ^②
〃 の温度係数	°C ⁻¹	0.0633	0.0633 ^{①②}
最適光量	ly/day	150	200 ^① 、150 ^② 、270 ^②
最強日射量	ly/day	856	856 ^①
消散係数 (Chl-aに依存しない)	m ⁻¹	0.44	0.1 ^① 、0.44~0.64 ^②
細胞内の全炭素量に対する 細胞組織内のリンの比	—	2.0×10 ⁻⁴	1.403×10 ^{-3①} 、2.0×10 ^{-4②}
細胞内の全炭素量に対する 細胞組織内の窒素の比	—	1.33×10 ⁻²	1.171×10 ^{-2①} 、4.5×10 ^{-3②}
Chl-a/C比	—	0.029	0.021 ^① 、0.029 ^②
0°Cにおける呼吸速度	day ⁻¹	0.01	0.01 ^① 、0.03 ^②
〃 の温度係数	°C ⁻¹	0.0524	0.0524 ^{①②}
枯死速度	day ⁻¹	1.0×10 ⁻⁴	0.01 ^① 、0.5×10 ^{-4②} 、1.0×10 ^{-4②}
底性生物による捕食速度	day ⁻¹	0.0	0.0 ^{①②}
沈降速度	m/day	0.173	0.01 ^① 、0.1728 ^② 、0.173 ^③

8) 計算結果と再現性

8-1) リンと窒素の溶出速度

昨年度までの瀬戸内海基盤モデルにおけるリンと窒素の溶出は、山本(1998)^{iv)}の溶出速度の観測値を参考に設定していたが、今年度構築した瀬戸内海統合モデルにおいては、底質モデルによって底質と水質の相互作用として計算している。PO₄とNH₄の7月平均溶出速度を比較した結果、モデル内のPO₄およびNH₄の溶出速度は既往文献値とおおよそ同程度のオーダーであることを確認した。

8-2) クロロフィルa

広域総合水質調査で観測された値と比較することで、クロロフィルaの再現性検証を行った。各季節の上層と下層それぞれにおけるクロロフィルa濃度の観測値と計算値の比較した結果、観測されたクロロフィルaの空間分布は、1年間を通じて大阪湾奥の表層で極大となるような特徴がある。計算結果でも、このような特徴をとらえることができていることがわかった(図23)。

8-3) 溶存酸素(DO)

広域総合水質調査で観測された値と比較することで、DOの再現性検証を行った。観測されたDO濃度は冬を除く各季節において、大阪湾奥や広島湾奥で表層は高く、下層で低くなっており、特に夏季には下層で貧酸素水塊が形成されているが、計算結果も概ねそのような特徴を再現している(図24)。

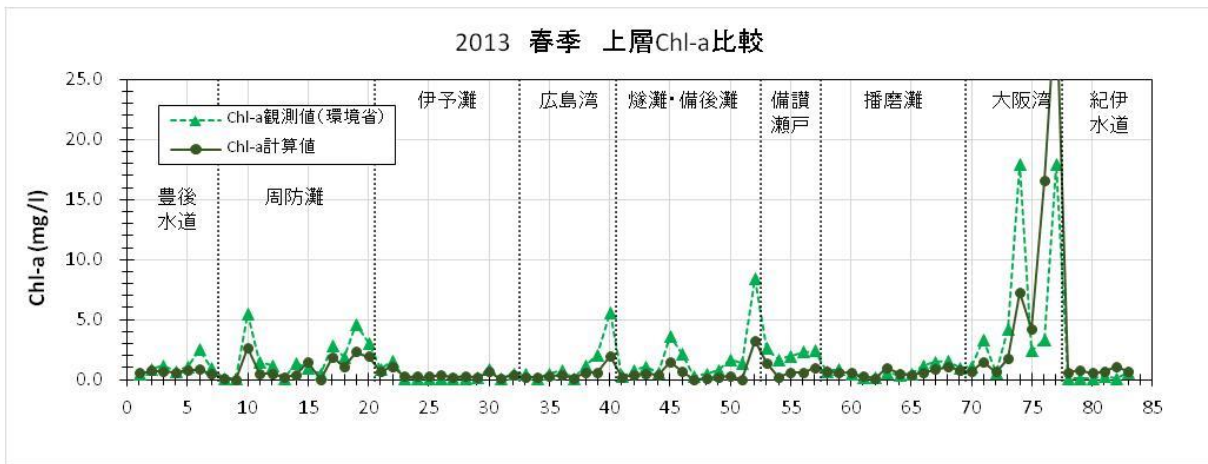
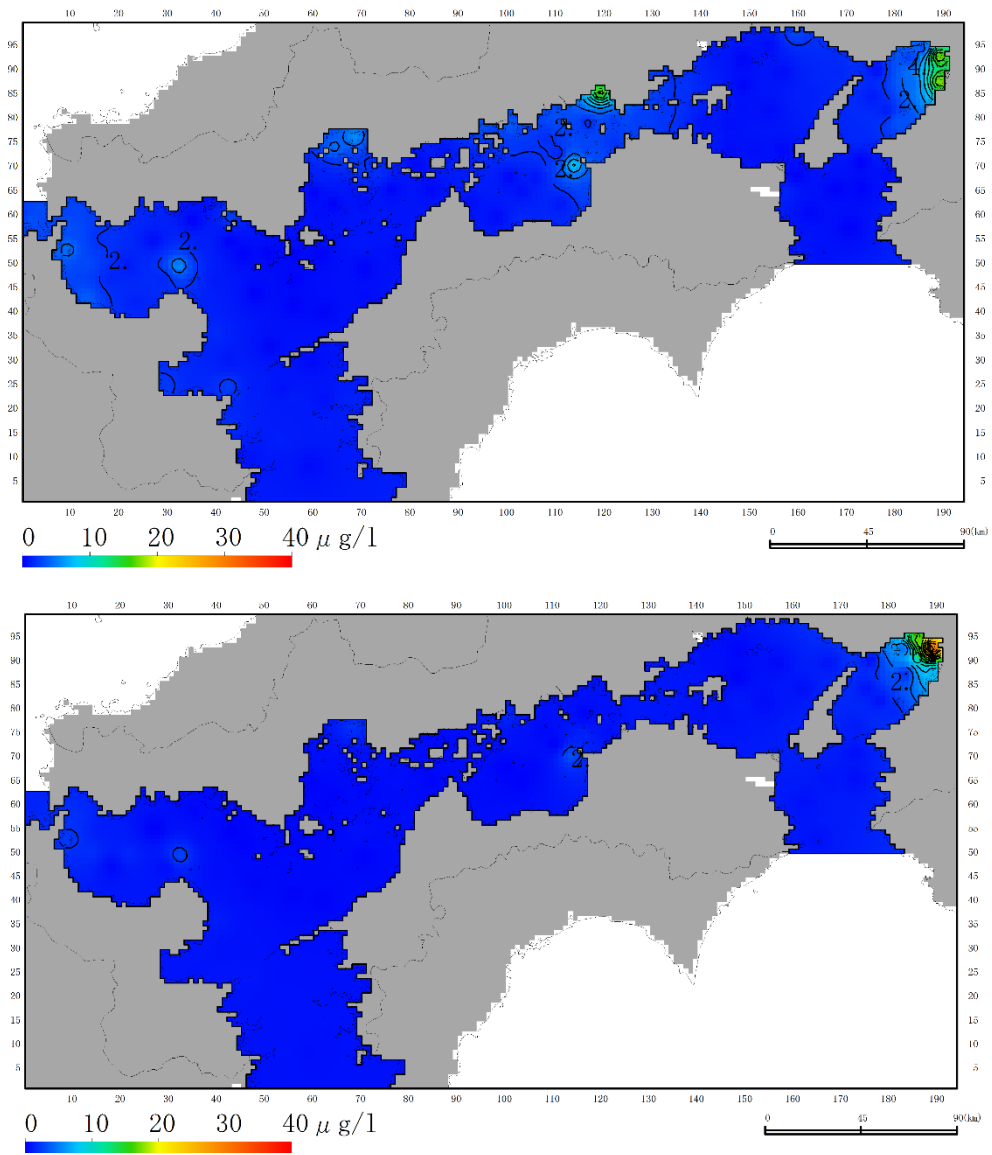


図 23 5月上層のクロロフィル a 再現性検証 (上: 観測値、中: 計算値、下、各測点比較)

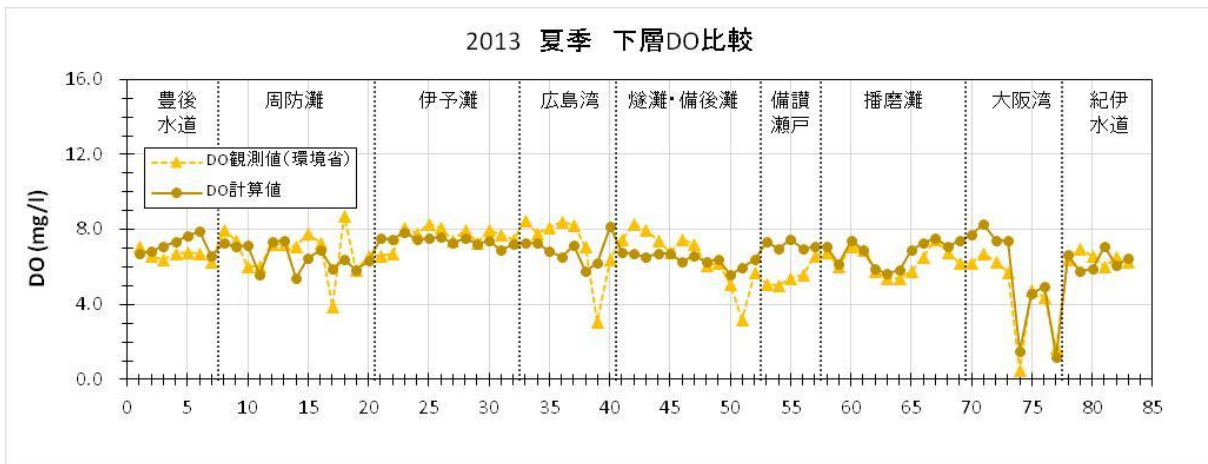
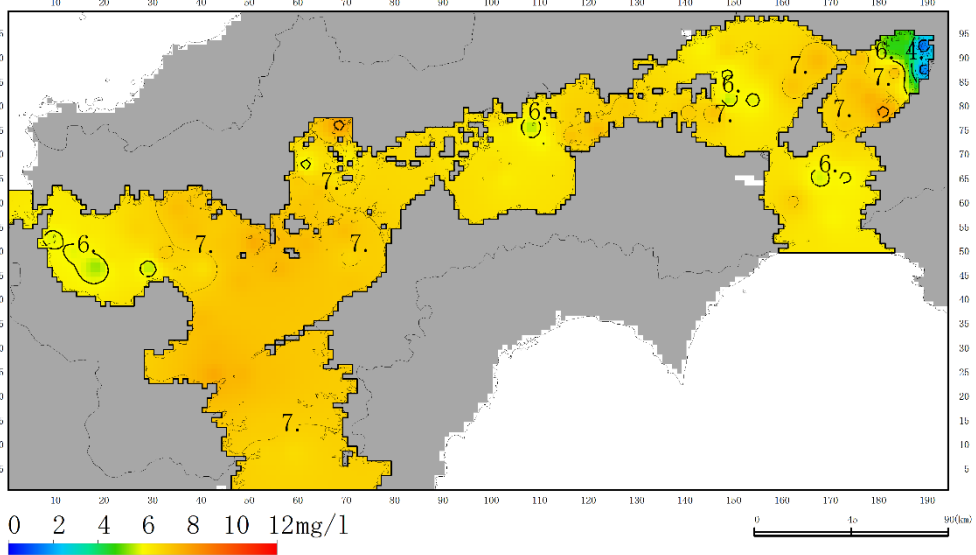
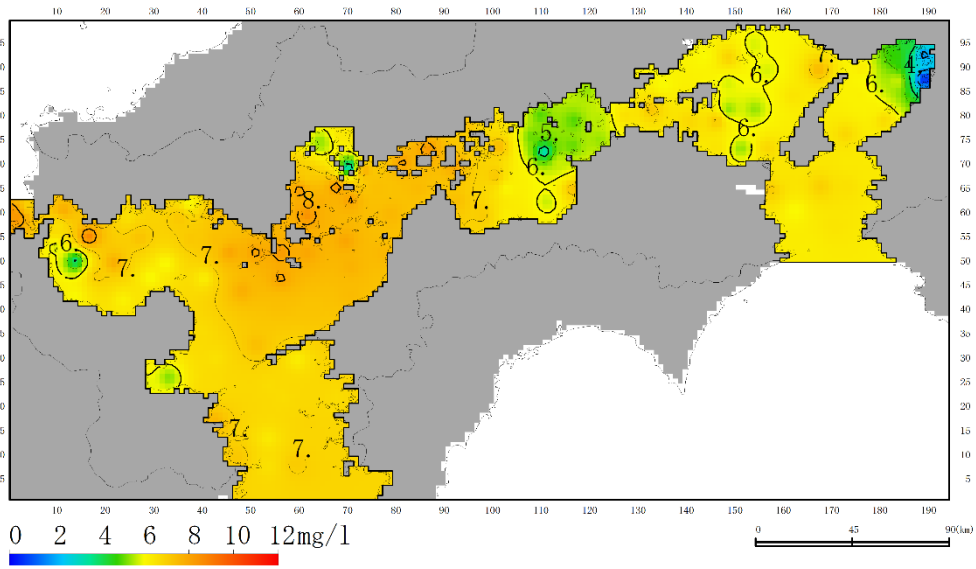


図 2 4 7 月下層の DO 再現性検証 (上 : 観測値、中 : 計算値、下、各測点比較)

8-4) 全窒素 (T-N)

広域総合水質調査で観測された値と比較することで、T-Nの再現性検証を行った。各季節の上層と下層それぞれにおけるT-N濃度の観測値と計算値の比較をした結果、観測されたT-N濃度はどの季節においても、大阪湾奥で極大をとり、瀬戸内海の東側で高く、西側で低い傾向があるが、計算結果も概ねそのような特徴を再現していることがわかった。

8-5) 全リン (T-P)

広域総合水質調査で観測された値と比較することで、T-Pの再現性検証を行った。各季節の上層と下層それぞれにおけるT-P濃度の観測値と計算値の比較をした結果、観測されたT-P濃度はどの季節においても、瀬戸内海の東側で高く、西側で低い傾向があるが、計算結果も概ねそのような特徴を再現していることがわかった。

8-6) 透明度

広域総合水質調査で観測された値と比較することで、透明度の再現性検証を行った。観測では年間を通じて透明度は豊後水道で高く、大阪湾や広島湾、周防灘の奥で低くなる傾向があるが、計算結果においてもそれらの特徴が確認できた。

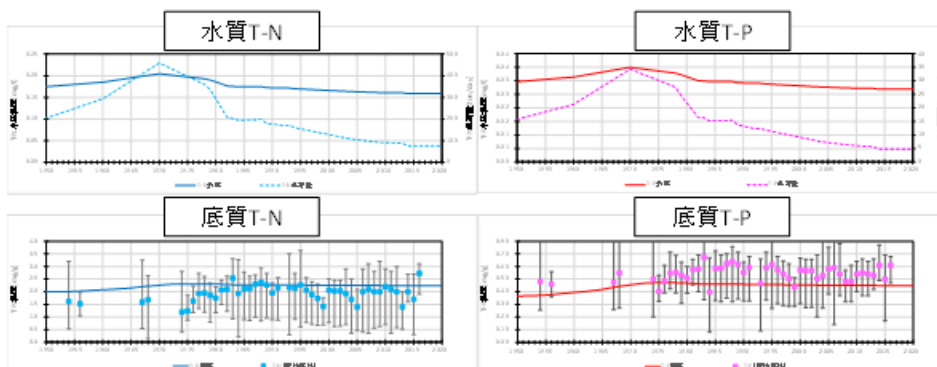
9) 過去と将来の瀬戸内海の水質計算

再現性を確認した瀬戸内海統合モデルを用いて、瀬戸内海の過去と将来の水質および生態系の予測シミュレーションを実施する。予測対象とする時期について、以下のように設定し、現在（2013年を代表とする）の水質環境と比較することで、瀬戸内海の水質環境の変遷について検討する。

- 過去 …水質汚濁のピーク以前で、瀬戸内海が豊かであったとされる 1960 年 (図 2 6)
- 将来 …現在の環境規制が続き、現状の流入負荷量が維持された将来として 2050 年 (図 2 7)

「過去」、「現在」、「将来」の各時期のシミュレーションを実施するにあたり、重要な違いとなるのが①底質性状の違いと②海域への流入負荷量の違いである。

計算結果は、「過去」、「現在」、「将来」で、図 2 5 に示すように、瀬戸内海の栄養物質循環に大きな差異はないことが明らかになった。



T-N・T-Pの水質と底質表層の濃度時系列

図 2 5 大阪湾における、過去・現在・将来の水質 (TN・TP) と底質 (TN・TP) の変化

さらに、地球温暖化による「将来」の瀬戸内海における水温上昇も考慮した計算も行ったが、これも大きな差異はなかった。

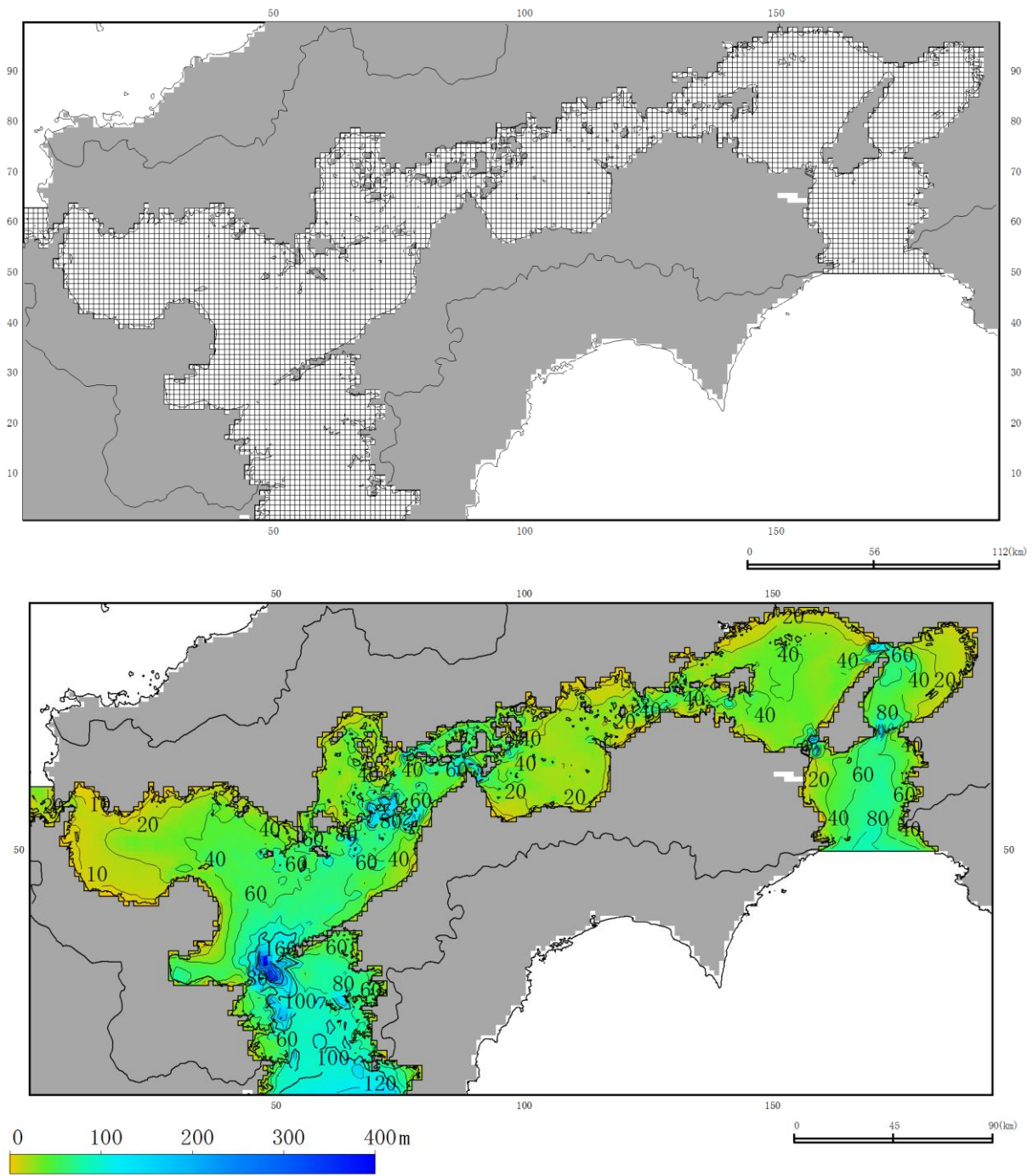


図 26 水質・底質計算格子と水深図（1960年計算用）

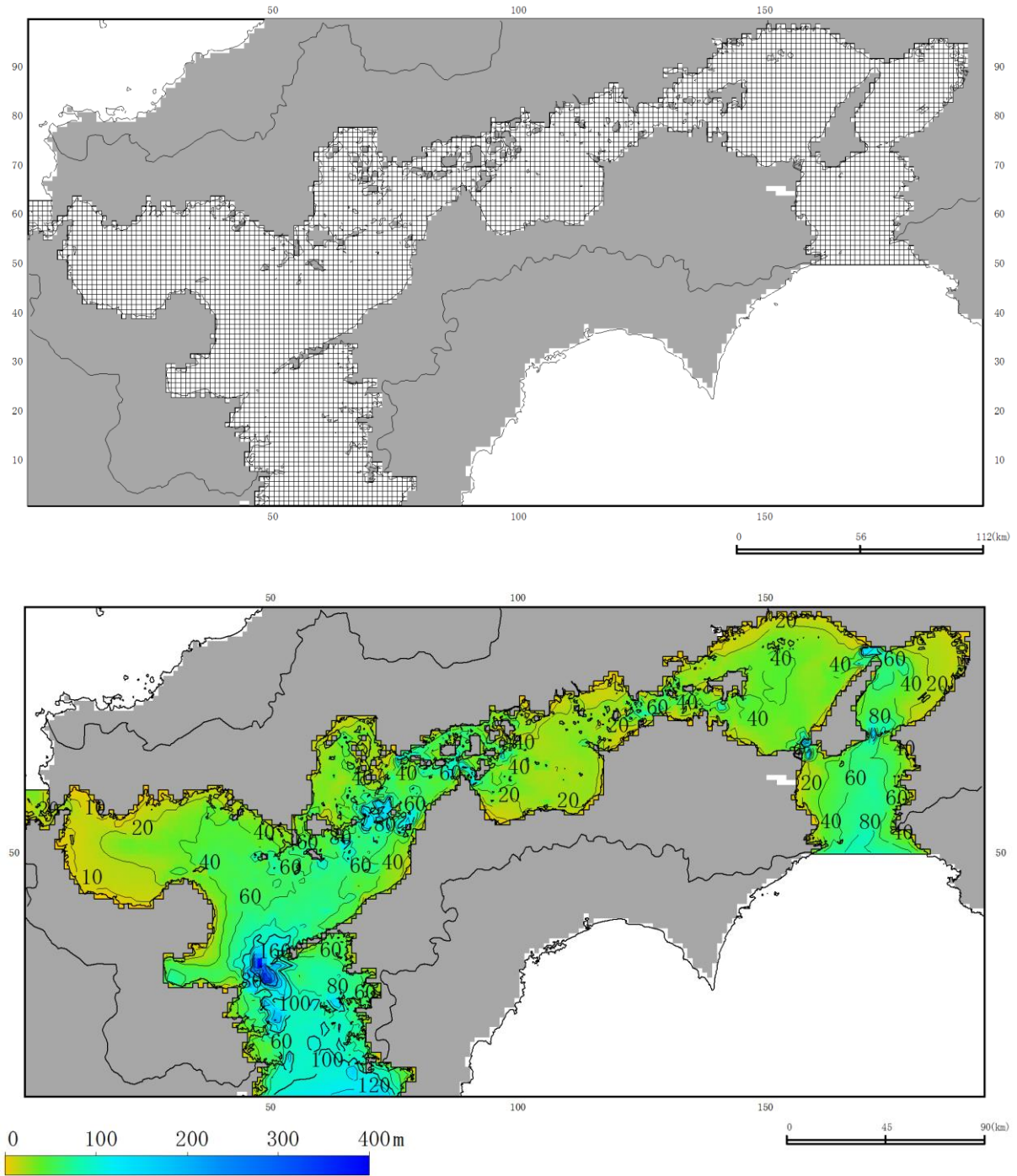


図 27 水質・底質計算格子と水深図（2050 年計算用：2013 年と同じ地形）

10) 広島湾を対象とした水質ネスティング計算

10-1) 広島湾を対象にした水質ネスティング計算の概要

広島湾を対象にした水質ネスティング計算は、流動計算も水質・底質計算も、基本的に使用するモデルやそのパラメータは前述のシミュレーションと同様のものである。ただし、水質モデルに関して、広島湾で重要なカキ養殖の効果を反映させている。

図 28 と図 29 に、広島湾を対象とした水質ネスティング計算用の計算格子図と水深図をそれぞれ示す。水平格子サイズは瀬戸内海全域が2、250m、広島湾が450mとなっている。

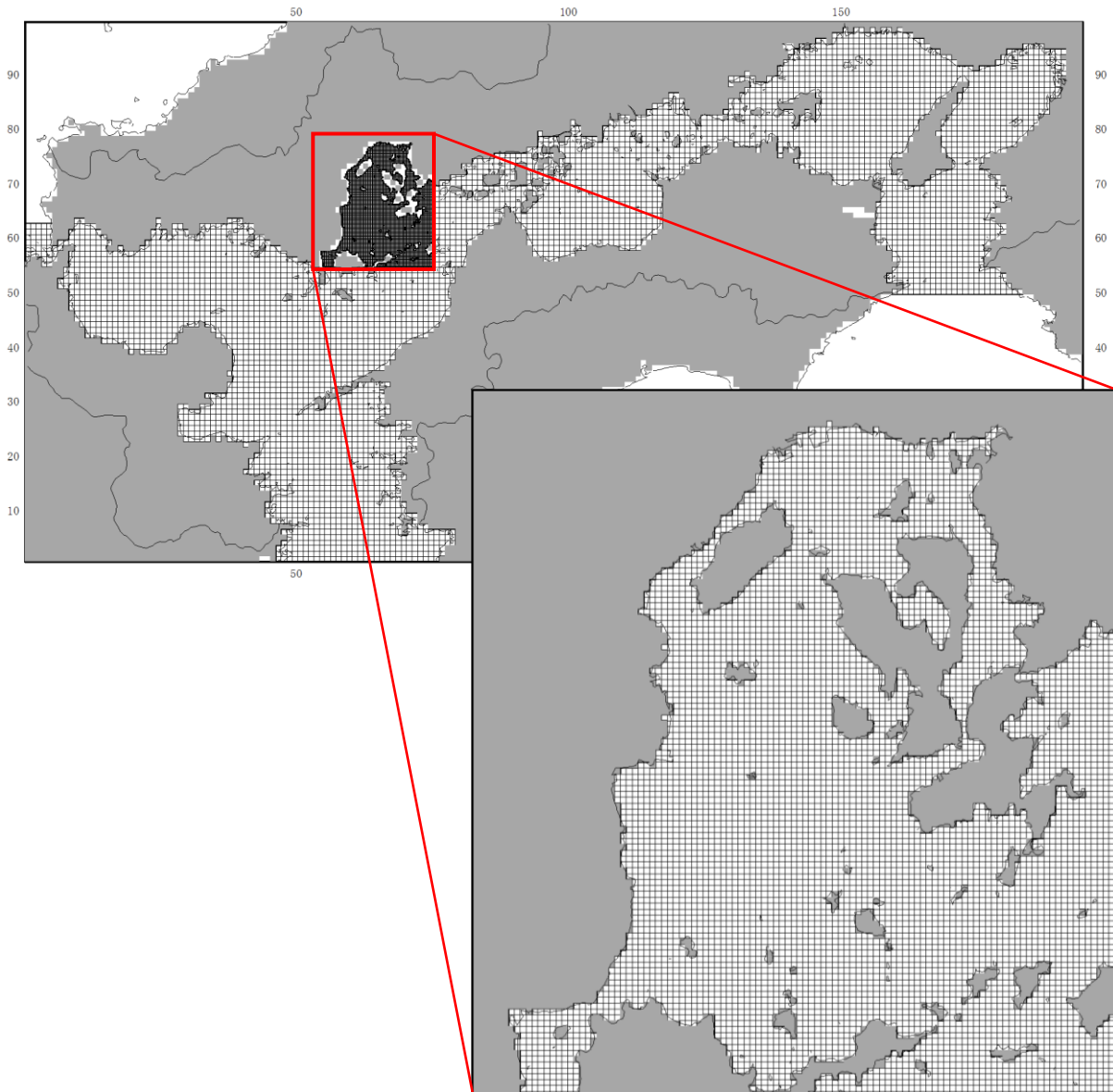


図 28 広島湾の水質ネスティング計算用の格子図

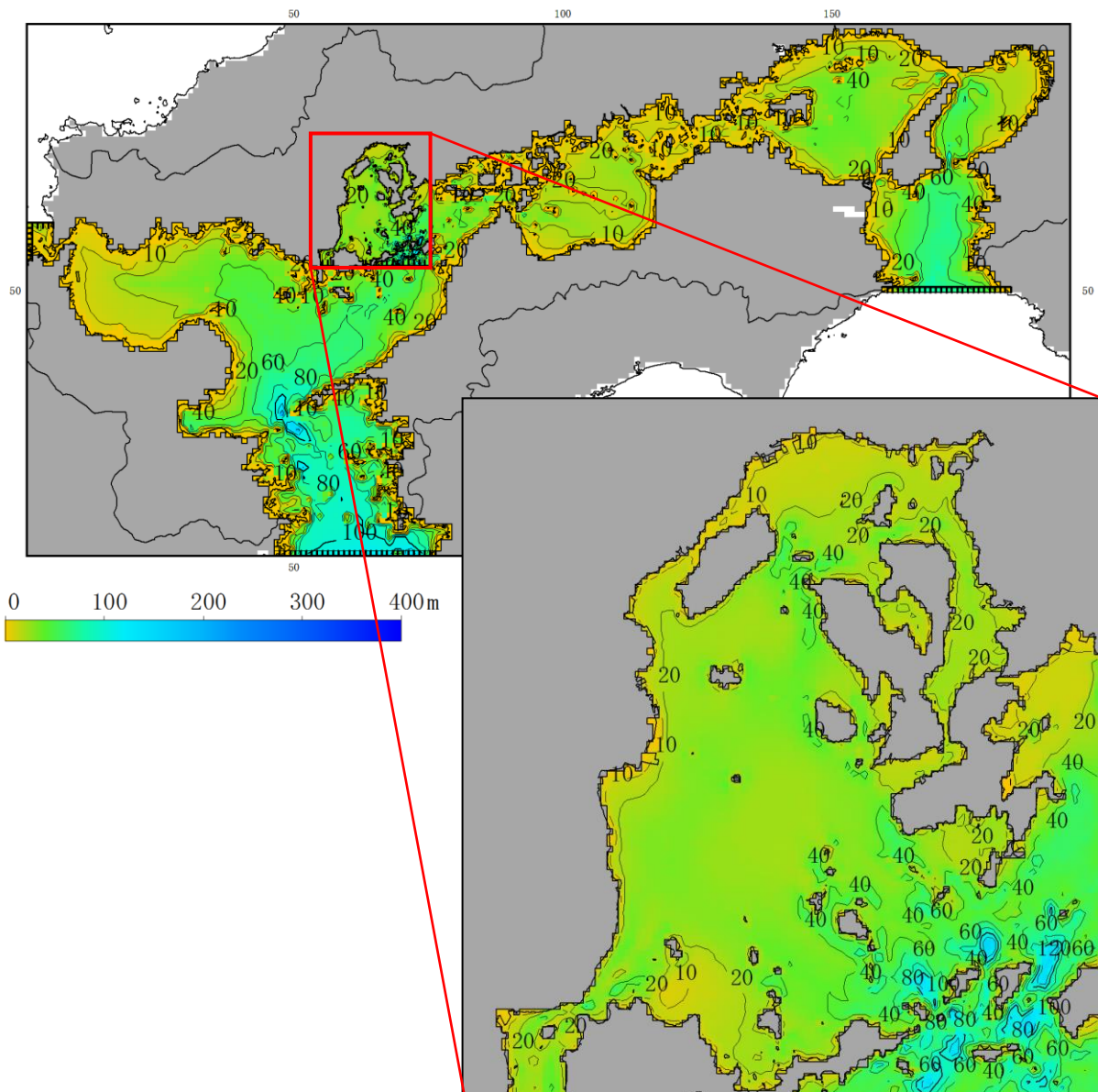


図 29 広島湾の水質ネスティング計算用の水深図

10-2) 広島湾奥のアマモ場造成可能領域の設定

S-13のテーマ1において、広島湾奥のアマモ場造成可能領域が算定された。アマモ場造成可能領域とは、領域の水深と透明度（昨年度業務において瀬戸内海統合モデルで算定した値を使用）から、アマモが生育できる領域を求めたものである。この算定は、あくまでも水深と透明度のみに着目したものであるため、底質材料については検討されていない。

図30に、広島湾奥における各計算格子内のアマモ場の被覆面積割合（1格子面積に対するアマモ場面積の割合）を、現況藻場とアマモ場造成可能領域とでそれぞれ示す。図30上下図を比較すると、主に厳島の北側や、廿日市の沿岸、大野瀬戸の沿岸部でアマモ場の造成可能領域が広がっていることが確認できる。

アマモ場造成可能領域の全域にアマモが造成されると仮定した際の水質を、現況藻場でのケースと比較することで、アマモ場造成による広島湾での水質環境の変化を検討する。

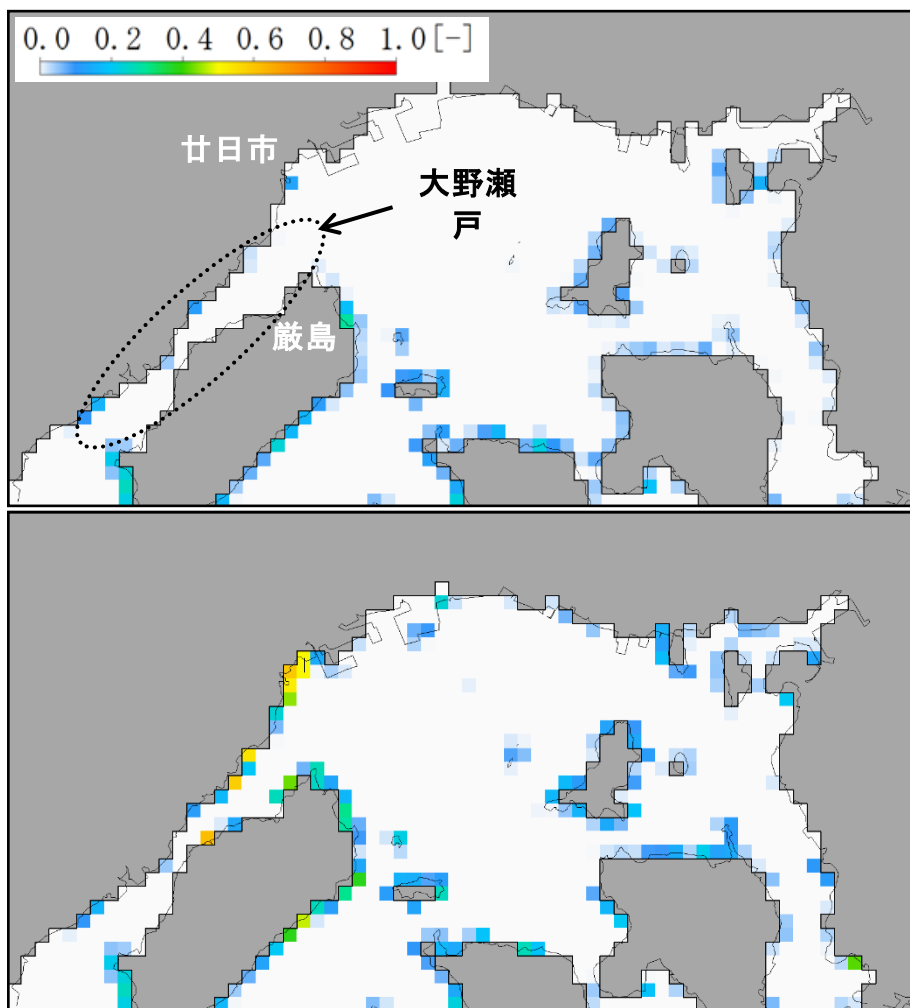


図30 広島湾奥の計算格子に対する藻場被覆面積割合(上：現況、下：アマモ場造成可能領域)

10-3) 藻場造成前後の水質環境

10-3-1) 表層クロロフィル a 分布

図31に、2013年5月の現況およびアマモ場造成後の各月平均表層クロロフィルa濃度分布をそれぞれ示す。各月の表層クロロフィルa濃度分布を現況藻場とアマモ場造成後で比較すると、図31に示される5月は、両者の差が大きく、アマモ場造成後ではクロロフィルa濃度が減少していることが確認できる。一方8-9月は大きな差が出なかった。これは、アマモ場の繁茂期が春先から初夏にかけてであり、高水温となる夏季にはアマモが衰退期に入り、活動が抑制されるためであると考えられる。

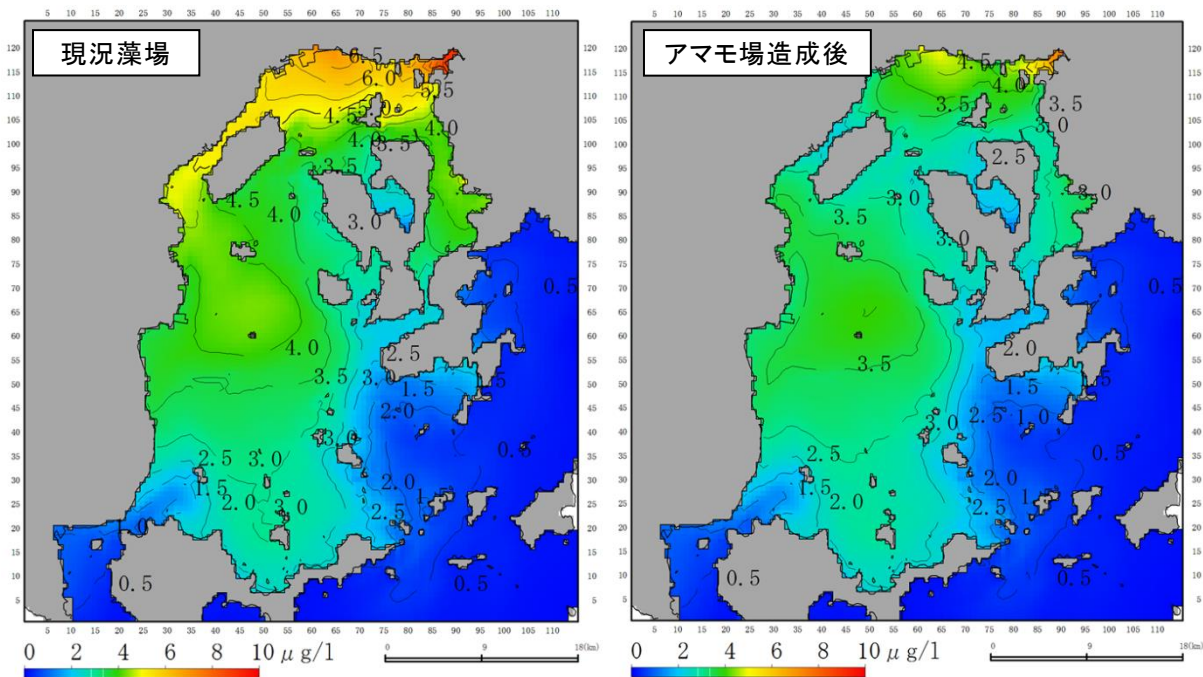


図31 2013年5月平均表層クロロフィルa分布（左：現況、右：アマモ場造成後）

10-3-2) 表層DIN分布

図32に、2013年5月の現況およびアマモ場造成後の月平均表層DIN濃度分布をそれぞれ示す。表層DIN濃度分布を現況藻場とアマモ場造成後で比較すると、クロロフィルa濃度分布と同様の傾向を示している。

表層DIN濃度についての現況藻場とアマモ場造成後の差分図を月毎に見てみると、クロロフィルa濃度と同様に、アマモの繁茂期である5月から6月にかけて最も差分が大きくなっていることが確認できた。ただし、DIN濃度の差分では大野瀬戸に限らず、広島湾奥の沿岸域全体でDIN濃度が減少する結果となった。

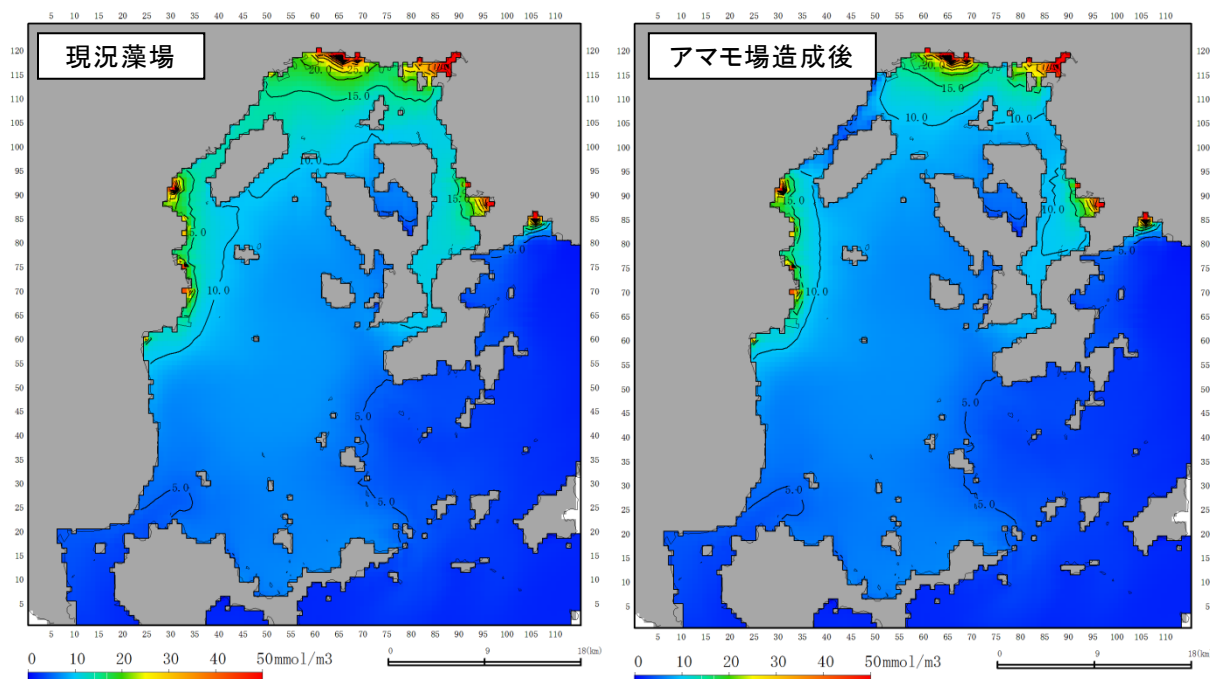


図 3.2 2013 年 5 月平均表層 DIN 分布（左：現況、右：アマモ造成後）

1.1) 結果及び考察

瀬戸内海統合数値モデルを開発し、流動・栄養塩・chl. a濃度分布を再現し、1960年の負荷量・水質分布を推定し、さらに、2050年に予想される負荷量のもとで推定される水質分布を計算した。その結果、1960年代は藻場・干潟面積が大きかったため、ほぼ同じ負荷量の2050年と比較して、栄養物質循環が活発で、生物生産性が高かったことを明らかにした。

さらに、広島湾の入れ子モデルを用いて、現在、沿岸部で赤潮・貧酸素水塊の水質障害に悩む現状を解決するための方策を検討した。その結果、陸域からのTP・TN負荷量削減は赤潮と貧酸素水塊発生は防止できるが、同時に広島湾沖合域の栄養塩濃度を減少させて、貧栄養化をもたらす。これに対して、沿岸域の太陽光到達水深部でアマモ場再生を試みるのが、最も有効であることを明らかにした。アマモ場は赤潮発生時に栄養塩を吸収して赤潮発生を防止すると同時に、夏季、枯れ死して流れ藻となり、沖合域で分解して、栄養塩に回帰するために、沖合域の貧栄養化を防止するからである。

3. 本研究により得られた成果

志津川湾の研究では、開発・検証した志津川湾統合数値モデルを用いて、志津川湾で行われているカキ、ホタテガイ、ワカメ、ホヤ、ギンザケ養殖のうち、最大の水揚げ量であるカキ養殖量を変化させた場合の予測計算を行い、カキ養殖量の変化が、カキの身肉成長や水揚げ量・水揚げ高に及ぼす影響、ならびに他の養殖や周辺環境へ及ぼす影響について解析を行った。得られた主な結果は、以下に示すとおりである。

<カキ現存量、身肉重量>

- ・志津川湾全体では、カキ筏の台数を増やすことで、カキ現存量は現況に比べ最大で約1.64倍（予測ケース2）に増加すると予測された。
- ・一方、1個体当たりの平均身肉重量は、現況に比べ約0.69倍（ケース2）に減少すると予測された。漁業地区別にみると、カキ筏を増やした場合に、現存量が最も増加するのは戸倉地区であるが、身肉

重量の減少が大きいのも戸倉地区であった。

- ・歌津地区では、元々カキ筏の台数が少ないこともあるが、戸倉地区、志津川地区でカキ筏の台数を増やしたとしても、歌津地区におけるカキの現存量、身肉重量への影響はほとんどないと予測された。

<ホタテガイ、ワカメ、ホヤへの影響>

- ・ホタテガイについては、志津川湾全体では、カキ筏の台数を増やすことで、現存量は現況に比べ最大で約0.91倍（予測ケース3）と、わずかながら減少すると予測された。
- ・また、1個体当たりの平均身肉重量は、現況に比べ約0.94倍（ケース2）と、わずかながら減少すると予測された。
- ・ワカメについては、戸倉地区、志津川地区カキ筏の台数を増やしたとしても、全ての漁業地区において、ワカメの現存量はほとんど変化しないと予測された。
- ・ホヤについては、志津川湾全体では、カキ筏の台数を増やすことで、ホヤ現存量は現況に比べ最大で約0.99倍（予測ケース3）と、わずかながら減少すると予測された。
- ・また、1個体当たりの平均身肉重量は、現況に比べ約0.98倍約0.96倍（ケース2）と、わずかながら減少すると予測された。
- ・歌津地区では、元々カキ筏の台数が少ないこともあるが、戸倉地区、志津川地区でカキ筏の台数を増やしたとしても、歌津地区におけるホタテガイ、ワカメ、ホヤへの影響はほとんどないと予測された。

<水質等の変化>

- ・湾奥部（St. 1、St. 2付近）では、カキ筏が増加することで餌となる植物プランクトンの摂餌量が増加するため、予測ケース2では春季～夏季を中心に最大 $2\mu\text{g/L}$ 程度濃度が減少すると予測された。また、下層D0については、夏季（7～8月頃）に、最大 0.2mg/L 程度濃度が減少すると予測された。DIN、DIPについては、春季～夏季に植物プランクトンが減少することで、光合成に利用される量が減少するため、DINで 0.06mg/L 程度（予測ケース2）、DIPで 0.003mg/L 程度（予測ケース2）濃度が増加すると予測された。
- ・湾中央部（St. 6付近）、湾口部（St. 13付近）では、カキ筏がほとんど設置されていないため、他の地点に比べるとクロロフィルa、DIN、DIP濃度の変化はごくわずかであった。また、下層D0については、海水交換性が良好なこともあり、ほとんど濃度の変化が無いと予測された。
- ・下層D0の平面コンター図を見ると、予測ケース2において、湾奥北側と湾奥南側河口部付近にかけて、濃度が低い範囲が拡大すると予測された。

<生態系構造の変化>

- ・戸倉地区と志津川地区の湾奥部では、カキ筏を2倍に増やすことにより、カキにより摂食される植物プランクトンが増加するため、カキに取り込まれるP、Nも現状の約2倍程度増加すると考えられる。
- ・また、カキによる植物プランクトン摂食量が増加することで、ホヤ、ホタテガイとの餌の競合が発生する。比較的養殖量が多いホタテガイについては、植物プランクトンの摂食量が減少（カキと競合）するため、現存量（Nベース）は上層、下層合わせて全体の約4%程度減少すると考えられる。
- ・一方、カキ筏を3倍に増やしても、ワカメによるN、P吸収量やワカメ現存量はほとんど変化しておらず、カキ筏を3倍に増加しても、ワカメへの影響は小さいと考えられる。
- ・カキ筏を3倍にした場合、下層へのN、Pの沈降・拡散量が増加する（主にカキの排糞の影響）ことと、カキによる呼吸量が増加することで、下層のD0がわずかに減少すると考えられる。
- ・戸倉地区と志津川地区の湾口部及び歌津地区では、現況と予測ケース2にほとんど変化が見られない。

<カキ水揚げ高の変化>

- ・現況と予測ケース2（カキ筏3倍）を対象として、志津川地区におけるカキの水揚げ量と水揚げ高の変化について試算を行った結果、予測ケース2では、主に殻付きカキの水揚げ量が増加しているものの、

その分単価が下がるため、全体の水揚げ高は現況とほとんど変化しない結果となった。
以上の結果を元に、I. に示したような、志津川湾統合数値モデルを利用した様々な成果を得た。

瀬戸内海では、全域の水質管理より、湾・灘の栄養塩濃度管理を行うことになっているが、瀬戸内海統合数値モデルの広島湾入れ子モデルを用いて、I. 4. 結果と考察 で示したような、広島湾における最も有効な栄養塩濃度管理法を定量的に明らかにした。

さらに、大阪湾統合数値モデルを用いて、水質が最も悪化する時期と底質が最も悪化する時期には5-10年の時間差があることを初めて明らかにした。これは順応的管理を行う時間スケールが5-10年スケールになることを示す重要な成果である。

4. 国際共同研究等の状況

特に記載すべきものはない。

5. 研究成果の発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 山本裕規、吉木健吾、小松輝久、佐々修司、濱名正泰、村田裕樹、柳哲雄：土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), I_1339-I_1344 (2017) 志津川湾におけるカキ養殖等の環境容量に関する数値モデル解析-震災前と現在の比較
- 2) 柳 哲雄・山本裕規・笠毛健生 (2018) 沿岸海域管理のための統合数値モデル開発とその理由. 沿岸海洋研究, 56-1, 49-54.
- 3) 笠毛健生・白木喜章・片山理恵・池田香澄・柳 哲雄 (2019) 大阪湾における水質・底質の長期変動. 土木学会論文集B3 (海洋開発), 75-2, 67-73.

6. 引用文献

- 1) (公財) 環日本海環境協力センター, 東京大学大気海洋研究所(2014) 志津川湾における養殖漁場-震災前後の比較-日本海海洋環境ウォッチホームページ, <http://ocean.nowpap3.go.jp/>
- 2) 宮城県(2014) 宮城の水産業パンフレット
- 3) 東京大学大気海洋研究所, (公財) 環日本海環境協力センター(2014) 志津川湾藻場復元支援マップ, (公財) 環日本海環境協力センターホームページ, <http://www.npec.or.jp/>
- 4) 中田喜三郎・堀口文男・田口浩一・瀬戸口泰史(1983) 追波湾の3次元潮流シミュレーション, 公害資源研究所集報 12, 17-36.
- 5) Munk, W. H. and Anderson, E. R. (1948) Notes on a theory of thermocline J. M. R., 7(3), 276-295.
- 6) 川西 澄・菊池伸哉・内田卓志・松山幸彦・余越正一郎(1999) 広島湾カキ養殖場における水理特性, 瀬戸内水研年報1, 39-43.
- 7) 土井康明・森下 桂(2001) 養殖カキ筏がある閉鎖性海域の流況計算, 西部造船論文集, 102, 57-62.
- 8) Sohma, A., Sekiguchi, Y., Kuwae, T. and Nakamura, Y. (2008) A benthic-pelagic coupled ecosystem model to estimate the hypoxic estuary including tidal flat-Model description and validation of seasonal / daily dynamics, Ecol. Model. 215, 10-39.
- 9) Soetaet, K., Herman, P. M. J. and Middelburg, J. J. (1996) A model of early diagenetic processes from the shelf to abyssal depth, Geochimica et Cosmochimica Acta 60, 1019-1040.
- 10) 横山長之 (1993) 海洋環境シミュレーション-水の流れと生物-, 白亜書房, 95-99.

- 11) Wang, H., Appan, A. and Gulliver, J.S. (2003) Modeling of phosphorus dynamics in aquatic sediments: I-model development, *Wat. Res.* 37, 3928-3938.
- 12) 鈴木雅巳(2008) 底生微細藻類と鉄鋼スラグを用いた閉鎖性小海域の環境改善に関する研究, 広島大学大学院生物圏科学研究科 学位論文.
- 13) 川口 修, 平田 靖, 若野 真, 山本民次, 陸田秀実(2011) カキ養殖の実施形態別有機物負荷特性の評価, *日本水産学会誌*77(6), 1043-1050.
- 14) 赤繁 悟, 平田 靖, 高山恵介, 空本季里恵(2005) 養殖マガキの酸素消費量および濾過水量の季節変化, *日本水産学会誌*71(5), 762-767.
- 15) 広島県水産試験場 (2004) 広島県水産試験場事業報告.
- 16) 広島県水産試験場 (2001) かき養殖体系再構築技術開発事業-平成10~13年度とりまとめ報告書.
- 17) 中村義治, 奥出壮, 寺沢知彦(2005) CO₂固定量評価に係わる貝類代謝モデルの開発-ホタテガイ-, *海岸工学論文集*52(2), 1066-1070.
- 18) Kishi, M. J. and Uchiyama, M. (1995) A three-dimensional numerical model for a mariculture nitrogen cycle: case study in Shizugawa Bay, Japan, *Fisheries Oceanography* 4(4), 303-316.
- 19) Shin, Y. K., Je Jun, J.C., Kim, E.O. and Hur, Y. B. (2011) Physiological Changes and Energy Budget of the Sea Squirt *Halocynthia roretzi* from Tongyeong, South Coast of Korea, *Kor J Fish Aquat Sci* 44(4), 366-371.
- 20) Jeong, W. G. and Cho, S. M. (2013) Effects of Water Temperature and Body Weight on the Filtration Rate of Sea Squirt *Halocynthia roretzi*, *Kor J Fish Aquat Sci* 46(6), 813-818.
- 21) 野村 宗弘, 千葉 信男, 徐 開欽, 須藤 隆一(1998) 内湾の水質に及ぼす水産養殖からの汚濁負荷の影響, *水環境学会誌*21(11), 719-726.
- 22) 小倉紀雄(1993) 東京湾-100年の環境変遷-, 恒星社厚生閣.
- 23) Kaldy, J. E. (2006) Carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metal budget: How large is the eelgrass (*Zostera marina* L.) sink in a temperate estuary. *Mar. Poll. Bull.* 52, 332-356.
- 24) 永澤 豪・田中 仁・松村勝之・山路弘人(1998) ADCPを用いた志津川湾内流動の観測, *海岸工学論文集*45, 396-400.
- 25) 藤原洋一(2004) 進化型計算法による流出モデル定数の多目的最適化に関する研究, 神戸大学学位論文.
- 26) 宮城県北部地域養殖復興プロジェクト計画書(2014), 宮城県漁業協同組合志津川支所カキ養殖部会.
- 27) 中村義治, 奥出壮, 寺沢知彦(2005) CO₂固定量評価に係わる貝類代謝モデルの開発-ホタテガイ-, *海岸工学論文集*52(2), 1066-1070.
- 28) 出村雅晴(2013) 宮城県の漁業復興における漁協の取組みと復興の現状, *農林中央金庫発行 農林金融*66(3), 73-86.

ⁱ Blumberg, A. F., and Mellor, G. L.: A coastal ocean numerical model, in *Mathematical Modelling of Estuarine Physics*, Proc. Int. Symp., Hamburg, 1978.

ⁱⁱ NAO.99b tidal prediction system (<http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index.html>)

ⁱⁱⁱ 中田喜三郎: 生態系モデル — 定式化と未知のパラメータの推定法— (原著), *J. Adv. Tech. Conf.*, Vol. 8, pp. 99-138., 1993

^{iv} 山本民次, 松田 治, 橋本俊也, 妹背秀和, 北村智顕: 瀬戸内海底泥からの溶存無機態窒素およびリン溶出量の見積り, *海の研究*, Vol. 7, No. 3, 151-158, 1998.

III. 英文Abstract

Development of integrated numerical model for the coastal zone management

Principal Investigator: Tetsuo YANAGI
Institution: International EMECS Center
Wakihama Kaigan Str., Chuo-ku, Kobe-City, Hyogo
651-0073, Japan
Tel: +81-78-252-0234 / Fax: +81-78-252-0404
E-mail: tyanagi@riam.kyushu-u.ac.jp

[Abstract]

Key Words: Integrated Coastal Management, Integrated numerical model, Satoumi, Sustainability, Trans-disciplinary study

The integrated numerical model of coastal area, which is composed by coastal sea, land, air, sea bottom and open ocean areas, is developed for the successful ICM (Integrated Coastal management). Here, “integrated” means the integration of areas and the integration of natural, social and human sciences.

Our aim is the achievement of the “clean, productive, prosperous and sustainable coastal sea (which is called Satoumi)”. We conducted the trans-disciplinary study, that is, the co-operative study among natural, social and human sciences with the help of local stake-holders such as fishermen and local government officers has been carried out.

Such integrated numerical model is successfully applied to Shizukawa Bay and the Seto Inland Sea.

The integrated numerical model was successfully used for the designing of the most suitable aquaculture in Shizukawa Bay along the Sanriku Coast, that is, the bottom Dissolved Oxygen concentration during the stratification period was remarkably recovered by decreasing the cultured oyster biomass by 1/3. When the cultured oyster biomass was big before the Great Northeast Japan Tsunami, the hypoxia was generated every summer, but there is no hypoxia after the great tsunami by reducing the cultured oyster biomass by 1/3. The model results can well reproduce the observed results.

The nested Hiroshima Bay model which is based on the integrated Seto Inland Sea model forecasts that the red tide and hypoxia will not occur in the head region of Hiroshima Bay during the spring bloom season by expanding the sea grass area by three times. This result suggests the most promising nutrients concentration management in the Seto Inland Sea, that is, the sea grass area expansion will give the benefit not only to prevent the red tide and hypoxia but also to increase the spawning, feeding and habitat area for the marine biota.