

平成22年度水産基盤整備調査委託事業年次報告書

1. 課題名

広域ネットワーク生態系モデル開発調査

2. 実施機関及び担当者

実施機関；独立行政法人水産総合研究センター

担当者；

水産総合研究センター水産工学研究所

水産基盤グループ長 中山 哲巖

主任研究員 足立久美子

環境水理チーム長 八木 宏

生物環境グループ 川俣 茂

水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所 生産環境部 沿岸資源研究室

沿岸資源研究室長 小畑 泰弘

亘 真吾

(株) アルファ水工コンサルタンツ

東京本部技術部長 佐藤 勝弘

3. 調査のねらい

沿岸漁場を生息場のネットワークとして捉え効果的な漁場造成に資するため、複数県にまたがる広い海域を対象とした流動場や基礎生産等の時空間の情報を総合的かつ定量的に評価できる生態系モデルの開発を行うとともに、各種海洋環境データの活用高度化を図る。

4. 調査方法

沿岸域は沖合域に比較し、生産が高だけでなく、水産生物の生活史において着底、成長の場として特に重要である。その反面、臨海部の開発の容易さから、急速にその環境は悪化している。沿岸域の環境を適切に保全・改善することは水産業の持続的発展の上で不可欠で緊急的な課題である。この課題を着実に達成するためには、沿岸域の物理環境と生態系のダイナミックな関係を取り込んだ沿岸環境評価モデルの構築が不可欠である。その際には生物群集の生活史を考慮した生態系の広域的ネットワークを考慮することが極めて重要である。沿岸環境評価モデルの開発を行うために、開放性沿岸域及び閉鎖性海域の代表的な領域において、水産資源上重要な生物の卵稚仔期を中心に現地観測や資料収集・分析を行い、これらの成果を同モデルに組み込む。

(1) 瀬戸内海、鹿島海域で流動・水質、餌料生物等の補足的現地調査

・鹿島灘；引き続き、調査船たか丸にて海洋観測（流況観測、水温、塩分プロファイル、栄養塩等）、プランクトン採集及びその分析を行い、モデルの再現性検討やモデル開発のための基礎データとする。

・瀬戸内海；引き続き、燧灘、播磨灘等を対象として、カタクチイワシ、マダイ等の有用水産資源に欠かせない餌となるカイアシ類の分布や生態に関する情報収集及び調査船により海洋観測（水温、塩分プロファイル、栄養塩等）、プランクトン採集及びその分析を行い、モデルの再現性検討やモデル開発のための基礎データとする。

(2) 開発した流動・低次生産モデルにおける餌料生物、卵稚仔移流拡散過程の改良、再現性の検証及び各種環境データ等の整備

主要な生物種（鹿島灘ハマグリなど）の卵稚仔段階及び餌生物（動物プランクトン）に関して、両海域において流動・低次生産モデルの改良を継続し、移流分散着底過程の検討、再現性及び動・植物プランクトン分布の詳細検討を行う。

同モデルの全国沿岸への展開を目標として必要な各種データや既に整備されているデータベースサイトへのアクセス等沿岸域の物理・環境データ（波浪、流れ、水質など）の整備を行う。

(3) 使いやすい解析前処理プログラム・解析結果処理プログラム（プリ・ポストプロセッサー）の作成

他の沿岸域に適用する場合際の境界条件、初期条件、FRA-JCOPE データ、気象データ等のデータ作成のためのプログラム、計算結果表示用データ作成プログラム作成

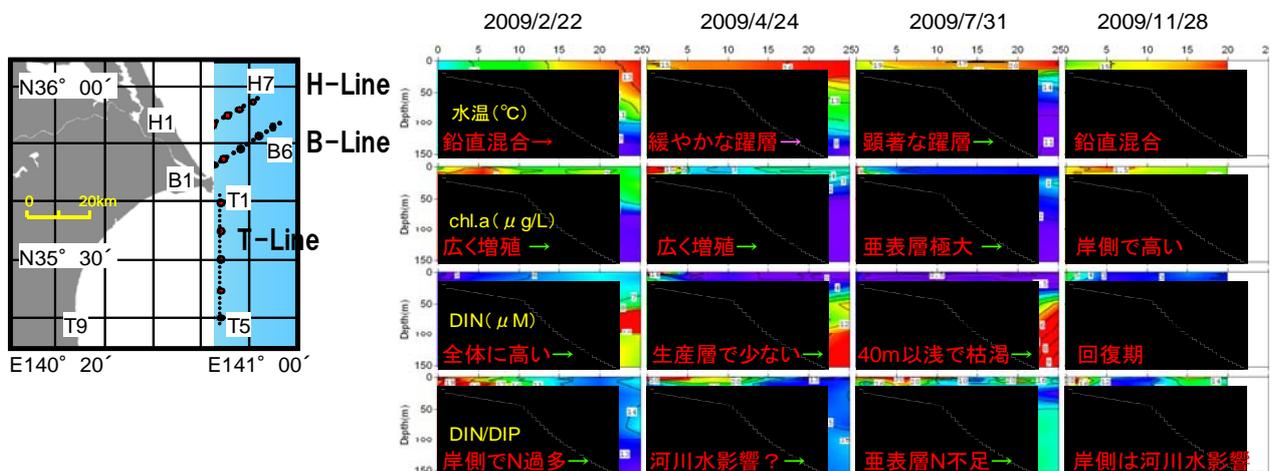
(4) モデルの運用マニュアル作成

モデルの内容（理論、適用範囲、モデル本体プログラムの構造・説明）、計算に必要なデータ作成、計算結果出力ファイルの図化等の説明資料の作成

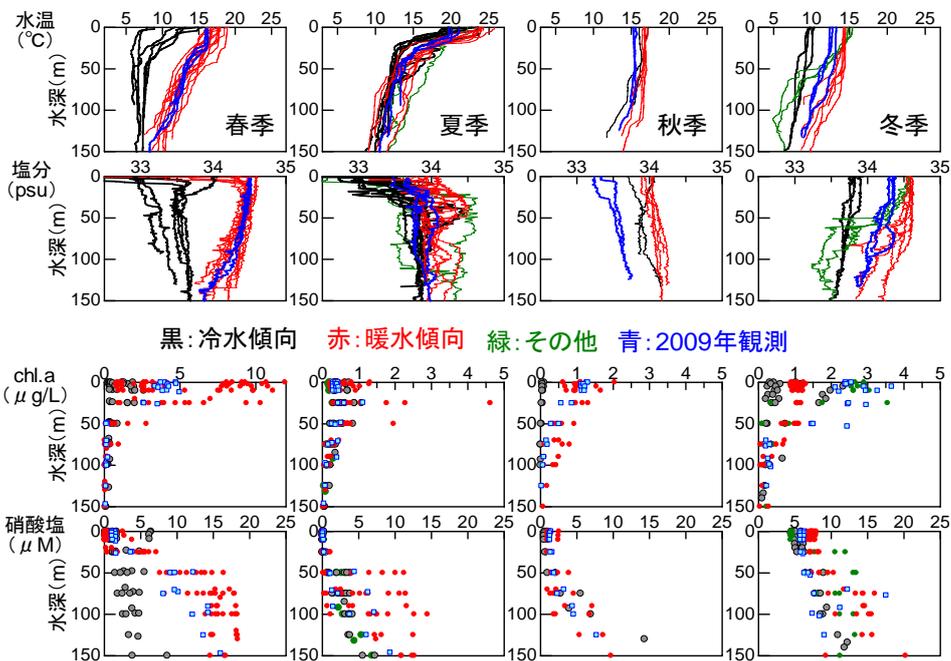
5. 調査結果

(1) 瀬戸内海、鹿島海域で流動・水質、餌料生物等の補足的現地調査

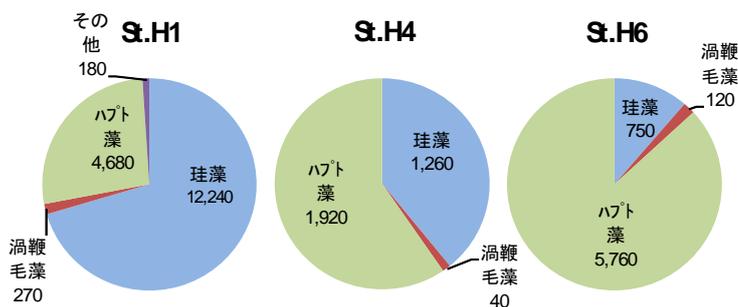
2009年に引き続き、鹿島灘・九十九里海域で、春（4月末）、夏（7月末）、秋（11月末）、冬（2月末）に調査船たか丸による海洋観測を行った（図1）。春・夏の調査では、動植物プランクトンの鉛直プロファイル計測を目的として、レーザー粒度計（LISST）を用いた計測も実施した。この結果とプランクトンネットによるサンプルの分析結果を利用して、解析し、数値モデルの再現性検討に利用するとともにデータベース化した。図2に例として2009年における図1に示すH-Lineの水質分布を示す。同図から本海域の季節的変化が現れている。2～5月にかけて、春季ブルーム（植物プランクトンの増殖）が現れている。この時期は混合期であり、外洋からの栄養塩供給と日射の増加に伴い、植物プランクトンが沿岸域で増加している。7月末は成層が発達し、植物プランクトンは亜表層から底層で濃度が高く、40m以浅の領域では栄養塩が枯渇状態にある。11月末では、鉛直混合が顕著で明確な密度成層は見られず、その結果外洋からの栄養塩供給が増加し、春季よりは多くはないが、沿岸で植物プランクトンが増殖する。しかし、この季節変動は平均的なもので、外洋の条件（黒潮、親潮続流）、河川流量や風などにより変化する。例えば、夏には成層が発達するが南風が連風すると鹿島灘では沿岸湧昇が起こり、



植物プランクトンが増殖することがしばしばある。本海域は冷水が北から勢力を強めて沿岸域を覆ったり、逆に黒潮が勢力を強めて、沿岸域を覆ったりすることがしばしばある。これにより、植物プランクトンや動物プランクトンの組成が大きく変化する。



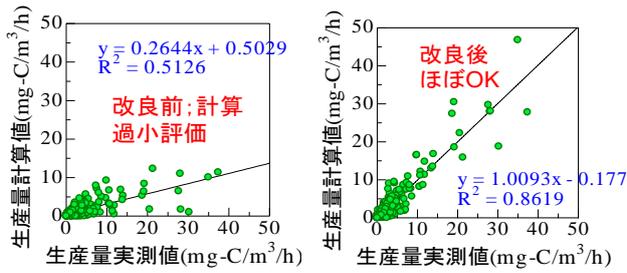
2008年春季には、鹿島灘は異常な冷水に覆われ、通常なら植物プランクトン増殖期であるにもかかわらず、低クロロフィルaで栄養塩が少なかった。その後秋季までは高温傾向にあり、2009年は冬・春季に高温・高塩分傾向、夏・秋季ははっきりしない傾向となった。過去に実施した観測結果も含め検討した結果(図3)、鹿島灘沖



合域では高温・高塩分傾向の時に栄養塩が多くプランクトンも多い、低温・低塩分傾向では栄養塩が少なくプランクトンが少ないという年変動特性がみられた。栄養塩と水温との関係に高い相関がみられることから、鹿島灘の低次生産モデルにおいては、データベースによる水温・栄養塩関係を利用して境界値を設定しているが、上記のような年変動特性が計算精度にどの程度の影響を及ぼすかについて検討する必要がある。低温・低塩分水は北から親潮系沿岸水の特徴と考えられるが、この水塊に含まれる栄養塩は鹿島灘以北で既に利用されたため低栄養塩となると考えられた。

図には示していないが、動物プランクトンは、高水温時には黒潮指標種が、低水温時には親潮指標種が出現するなど、海洋環境を反映した出現特性を示した。また植物プランクトン組成は、岸に近いほど珪藻の占める割合が多くなり、沖合ではハプト藻などが多い、河川水の影響が強いときには緑藻が多い、冬季には大型珪藻が多いなどの特徴を示した(図4)。

(2) 開発した流動・低次生産モデルにおける餌料生物、卵稚仔移流拡散過程の改良、再現性の検証及び各種環境データ等の整備

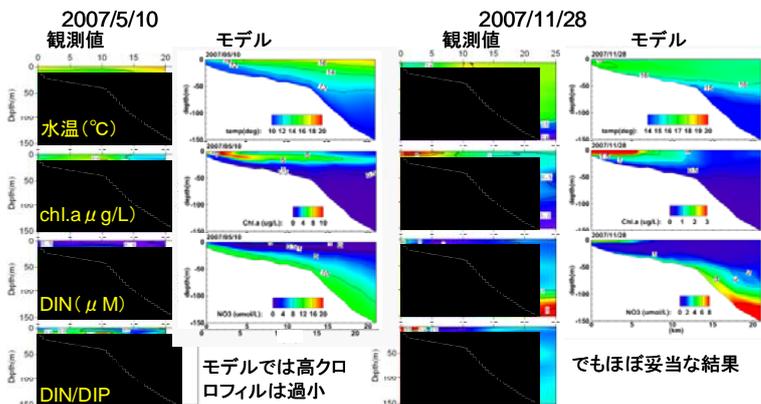
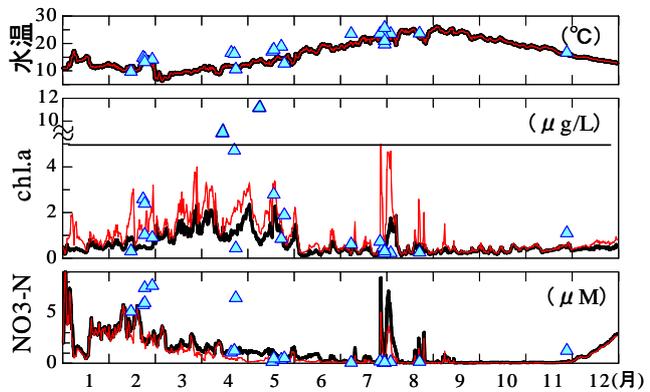
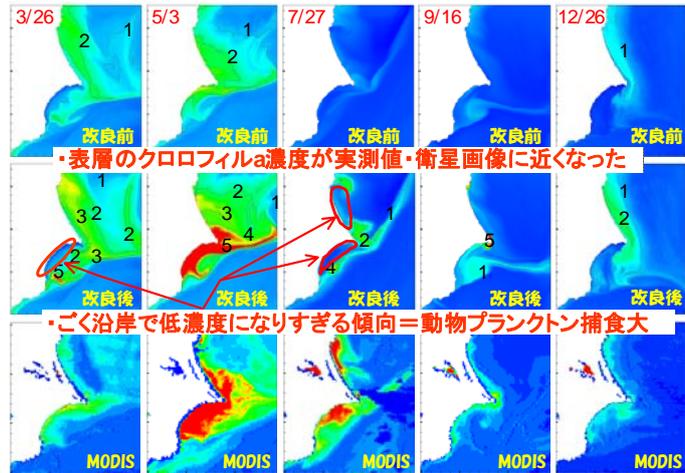


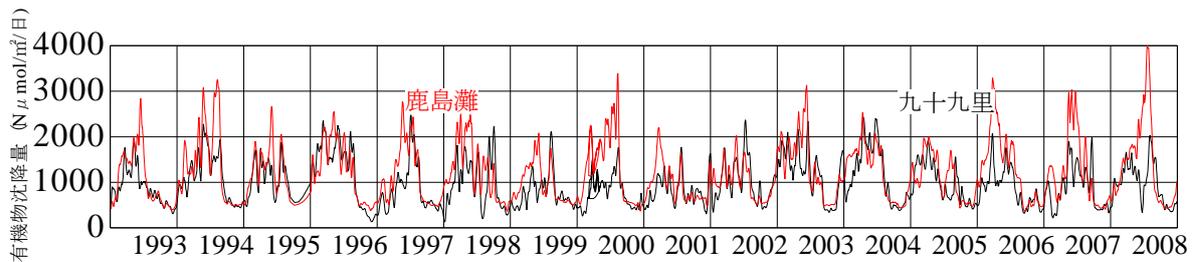
項目	単位	改良前	改良後
最適光強度 Iopt	cal/cm ² /min	0.07	0.15
NO ₃ 半飽和定数 K _{NO₃}	μmol/l	3.0	2.9
NH ₄ 半飽和定数 K _{NH₄}	μmol/l	3.0	1.2
NH ₄ 選択係数 ψ	l/μmol	1.5	1.0
PO ₄ 半飽和定数 K _P	μmol/l	0.15	0.065
最大光合成速度 V _{max}	/day	2.0	0.87
光合成温度係数 k	/°C	0.063	0.13

1) 鹿島灘

これまでの鹿島灘における基礎生産データを用いて、生態系モデルのうち植物プランクトンの各種パラメタの改良及び前述の観測結果等の分析に対応した栄養塩、植物プランクトンに関する境界値を変更した。また、1993～2010年までの長期計算を実施し、準リアルタイム的な計算が可能となった。

植物プランクトンの各種パラメタについては、図5に示すように基礎生産データを用いて変更した結果、これまで過小評価していた植物プランクトンを精度良く求めることが可能となった。モデルの再現性については、衛星によるクロロフィルの面的な分布、観測点水深別時系列変化、観測ライン断面分布等とモデルによる結果を比較した。改良により、茨城県発行の漁海況情報、MODISなどと比較するとほぼ同様な分布となり、再現性の向上が図られた(図6、7、8)。図6から2005年の衛星データ MODIS とモデルの比較を示している。改良前と比較して、クロロフィル濃度、分布とも格段に改善されていることがわかる。また、クロロフィルの分布から判断される流れのパターンも衛星データとの一致度は高い。図7は、観測点での観測値とモデルの時系列の比較であるが(図は表層)、観測結果に見られる高クロロフィル(図中段)の場合に過小になる以外は再現性が良いことがわかる。図8は、観測ラインの断面分布を示している。この図から、分布は観測値とモデルの一致度が良いことがわかる(観





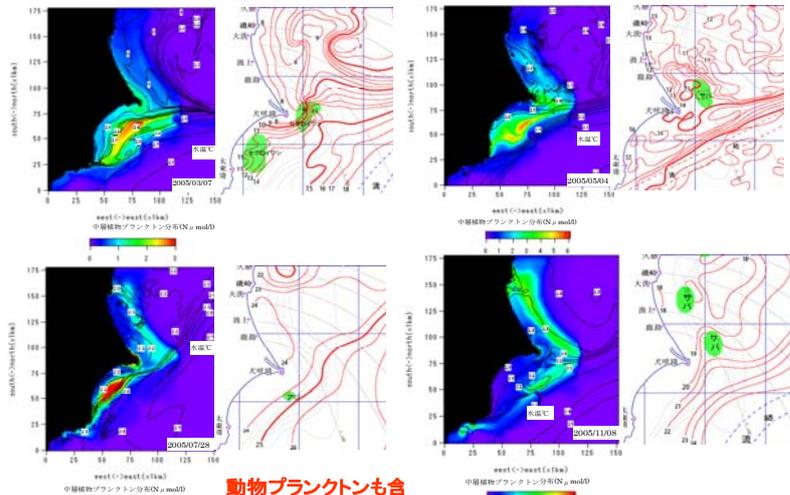
測値とモデルの色分けが異なっている事に注意)。特に図右側の 11/28 の分布から、岸側での河川水による表層での植物プランクトンの増殖が再現されており、分布の一致度が高い。このように面的分布、観測点での水深別、観測ラインでの断面分布の比較を行った結果、本モデルの再現性は良好あることが示された。ただし、高クロフィルの場合や面的分布の比較結果で見られる動物プランクトンによる植物プランクトンの過大な摂食に関しては残された課題と考えられる。

長期計算及び準リアルタイム化について、以下に述べる。外洋の同化モデルによる再解析は 1993 が最も遡及出来る限界である。そこで 1993 より直近まで（具体的には 2010 年 8 月）の期間の長期計算を実施した。FRAJCOPE を用いた場合には計算途中で数回の発散が起こった。その際には、発散した日を除いて、計算を続行した。他に FRAJCOPE2 により、計算を実施しているが、この場合には現在のところ発散は FRAJCOPE よりも少なかった。これは両者では同化手法等に違いがあるためと考えられる。発散の原因については今後詳細に検討するが、台風時の強風、外洋での極端な水塊交換等による考えられる。さらに外洋同化データの相違によって、どのような差異が出るか等についても検討する予定である。図 9 に海域の生産性を示すものとして、平均的な有機懸濁物沈降量の経年変化（2008 年まで表示）を示した。これらから年の前半で生産が高いことがわかる。年ごとの後半でのピークは河川出水によるものである。年によって変動があり、外洋の条件や河川出水の変化を反映しているものと考えられる。これ以外にも計算結果を用いて、海域の生産力等を時空間的に評価することが可能であり、今後、漁獲データ等各種のデータを含めた検討を行うことが可能となった。

漁海況情報の漁場図（アジ、サバ、イワシなど）とモデルによる植物プランクトン分布、水温分布から、漁場が形成される領域が、春季では暖水フロント（植物プランクトン濃度が高い）領域に相当すること、夏季以降では鹿島灘水温が上昇し、沿岸沿いに植物プランクトン濃度の高い領域で漁場となっていることが多いことがわかった（図 10）。

1993～2010 年のモデルの結果と茨城県水産試験場発行漁海況情報を用いて、更に詳細に漁場と低次生産、海域環境の関係を検討して行くことにより、浮き魚類の漁場形成過程が明らかにされ、漁場予測に資するものと考えられる。さらに、資源枯渇が危惧される水産有用種の初期生残過程（前年に

植物プランクトン・水温と漁海況情報



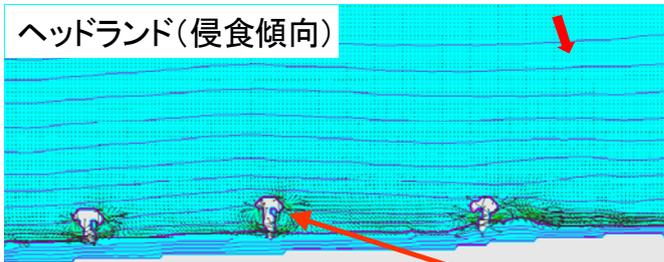
チョウセンハマグリ(の広域拡散検討済み)も同モデルにて検討可能である。本モデルは、これらに対応した漁場整備、環境保全対策検討の基本的なツールとなる。また、外洋データがあれば、ほぼ準リアルタイム化が可能となったことは、モデルの利用範囲を大幅に広げた。

さらに鹿島灘は海岸浸食が激しく、ハマグリ(の生息環境としては不適になっていると考えられたことから、海浜変形を評価するための広域三次元海浜変形モデルを開発・改良した(図11)。本モデルにより長期的・広域的な海浜変形や養浜等の効果など侵食対策等に関する検討に加えて、本モデルを利用して、浅い領域での幼生分散(構造物等の影響)、着底後の稚貝の移動等について、今後検討する予定である。

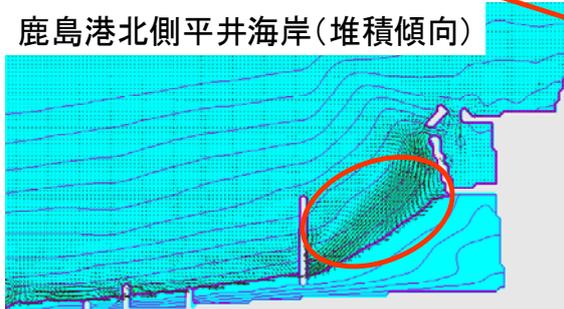
鹿島灘各地点の状況

海浜流(波高0.8m、周期約7秒) 波向き

ヘッドランド(侵食傾向)



鹿島港北側平井海岸(堆積傾向)

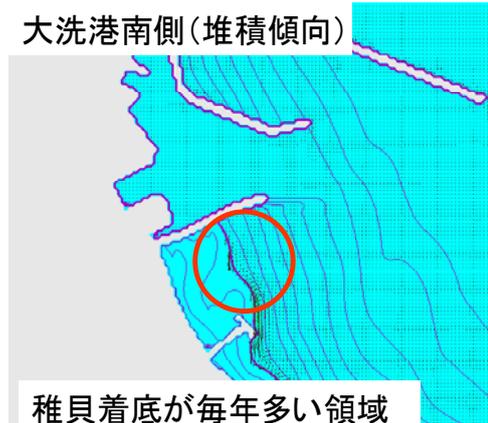


ハマグリ(の再生産が行われていると考えられる

現在計算を地形変化のための長期計算実施中

本モデルをベースにハマグリ(幼生分散、移動等)の検討を行う。

大洗港南側(堆積傾向)



稚貝着底が毎年多い領域

強い離岸流

ハマグリなどの
浮遊幼生の分散、
着底稚貝移動に
影響?

2) 瀬戸内海

今年度は、さらなるモデルの改良及び干潟域等の流れの高精度化（高分解能化、干出・冠水）を行い、モデルの再現性、長期計算及び周防灘におけるアサリ浮遊幼生の分散過程を検討した。

モデルの改良であるが、①鹿島灘と同様に瀬戸内海での基礎生産データを用いて、植物プランクトンのパラメータ改良、②底泥からの栄養塩供給の改善等、③気象、外洋条件など計算に必要なデータ入力のシステム化による準リアルタイム計算化を行った。干潟等の高精度化については、周防灘中津干潟を対象に多重ネスティング及び移動境界により、干潟域では 100m の分解能、干潟の干出・冠水を再現できるモデルを開発した。別課題で行われた中津干潟での VHF レーダーによる表層流観測データを用いて再現性を検討した。

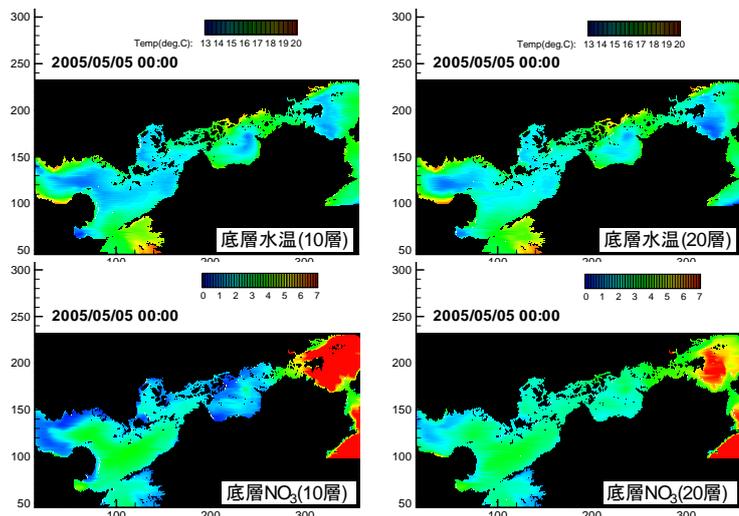
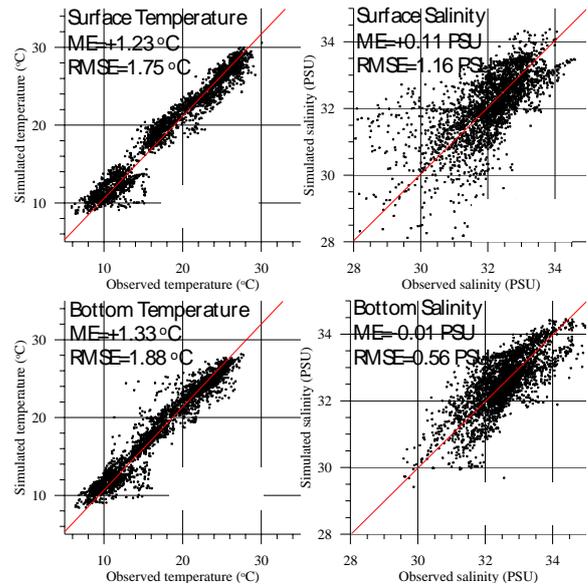
以下結果について述べる。

モデルの再現性に関しては、瀬戸内海総合水質調査全 226 点（年 4 回程）、沿岸各県浅海定線調査 全 211 点（月 1 回程）を用いて、検討した。図 1 2 にその結果の一例を示す。まず水温であるが、計算結果と観測値は、若干計算値が高めであるが、非常に相関が高いことがわかる。塩分に関しては、水温と比べてバラツキの度合いは大きい、ほぼ 1:1 の関係の領域に集中しており、再現性は良好であると考えられる。なお、塩分に関して海域毎に差異を見てみる

と播磨灘、大阪湾で塩分が高めの傾向を示している。種々の検討を行ったが、鳴門海峡の地形を若干改善することにより、かなり改善傾向が見られることから、特に海峡部や島嶼部での地形精度の向上を図ることにより、かなり改善されると考えられた。今後、前述の領域での地形の見直しが必要である。

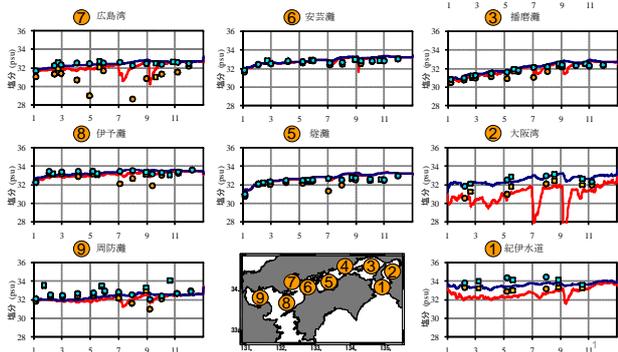
図 1 3 に冷水ドームの形成状況を示す。冷水ドームは、冬期に冷却された冷水（図では水温；青系、富栄養水；赤又は緑の領域）が、夏季に各灘の底層に孤立する現象で、低次生態系への寄与や、稚魚の生息に影響があるとされる。本モデルでは周防灘、伊予灘、播磨灘中央部などに冷水ドームの形成が見られ、この領域で栄養塩が高いことが再現されている。さらに、同図には鉛直層数を 10、20 にした場合を示しているが、結果は若干異なるが概ね傾向は一致した。また、図示はしていないが、2003～2006 年の 4 年間の計算を行い、秋季河川出水が多い年（2004 年）には、次年度年度当初にまで影響が及ぶことや黒潮の離接岸によって、瀬戸内海への底層外洋水侵入量が異なり、瀬戸内海への栄養塩供給量が変化することが示された。

植物プランクトン、栄養塩の計算結果はほぼ昨年と大きな変化はないので、昨年の結果を図 1 4 に示



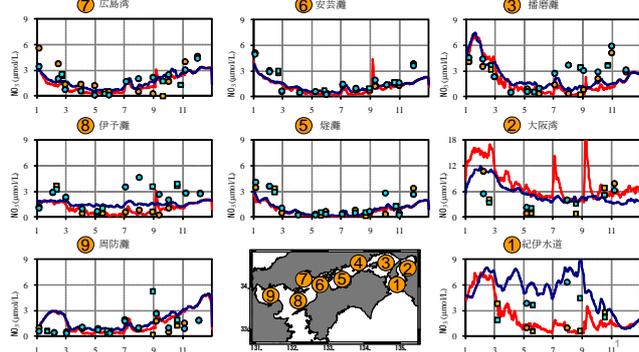
計算結果（塩分）

従来の全体的な高塩分傾向は改善



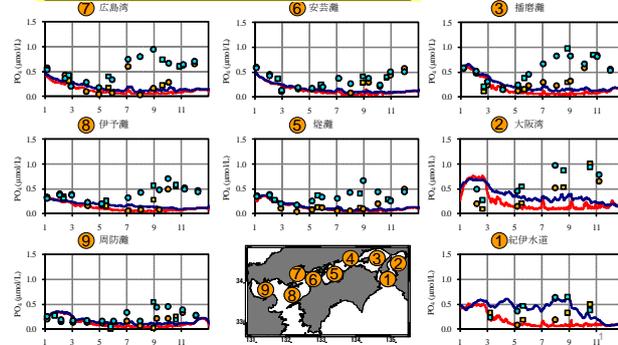
計算結果（硝酸塩）

春季～夏季の枯渇状況等季節変動の再現は改善されつつある



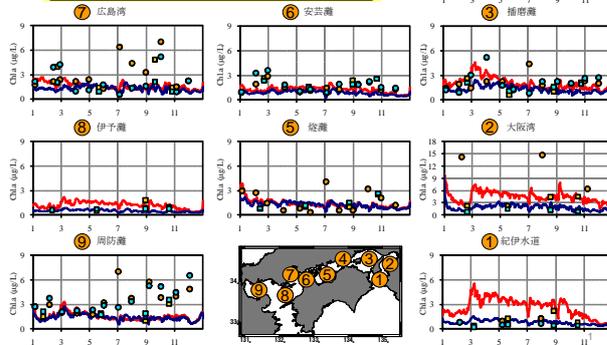
計算結果（磷酸塩）

簡易的な溶出モデルを導入したが夏季以降の濃度上昇はまだ再現できていない



計算結果（Chl.a）

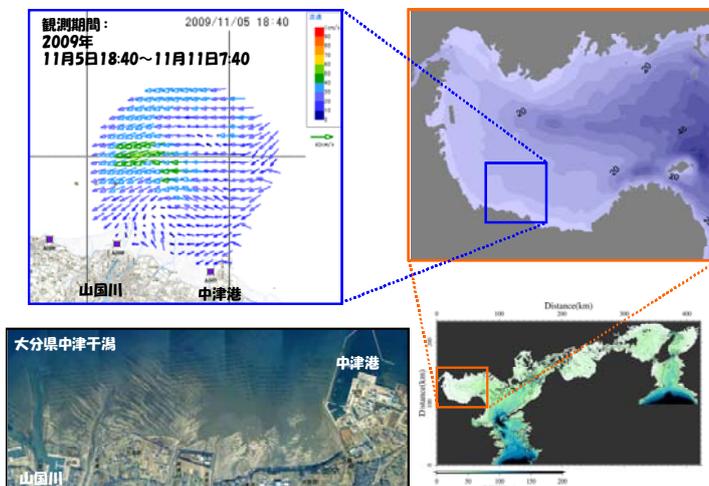
ブルームなど一時的な増加はまだ表現できていない



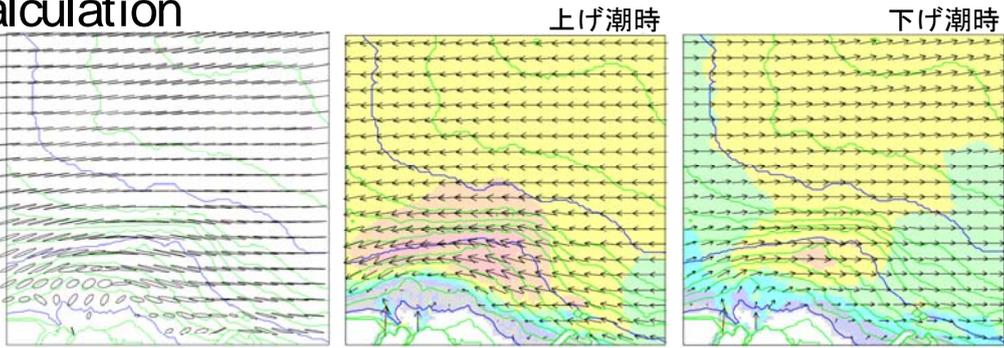
す。①塩分；改善がなされた、②硝酸；春季～夏季にかけての栄養塩枯渇等季節変動は改善されている、③リン酸；夏季以降の濃度上昇は再現できない。④植物プランクトン；ブルームなど一時的な増加はまだ表現できていない。このように幾つかの問題はあるが、全体的には、ある程度海域の生産性の評価が可能で段階にきていると考えられる。今後、更に流動モデルの高精度化（移流項や拡散係数等の改良）、生態系パラメタ等の改良、底泥殻の栄養塩溶出過程の見直しを行うことにより、より精度向上が図られると考えられる。

中津干潟において別課題で 2008 年 VHF レーダーによる表層流の観測が行われた。このデータと開発した多重ネスティング及び移動境界処理化したモデルによる結果の比較検討を行った。

このデータモデルの高精度化、高度化に関しては、対象領域でのより高分解能での検討もできるようにモデルを改良した。具体的には多重ネスティングにより、高分解能の計算が可能にした。また、干潟など干出・冠水の繰り返しを計算できるようにした（移動境界処理）。図 15 に計算対象領域、VHF レーダーの観測例を示す。



Calculation



VHF radar

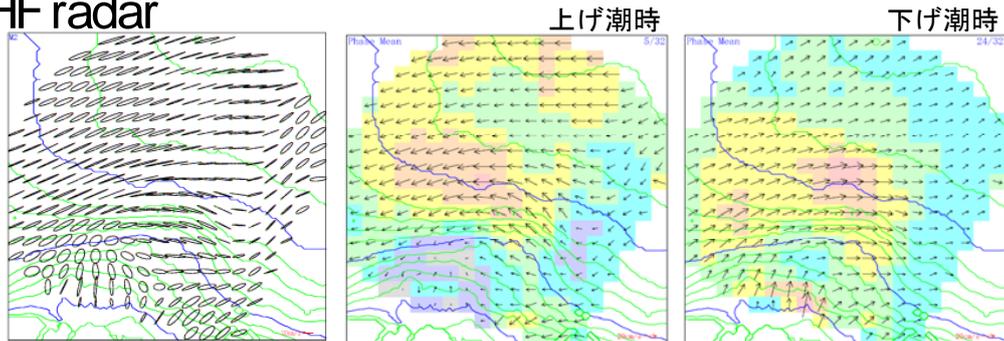
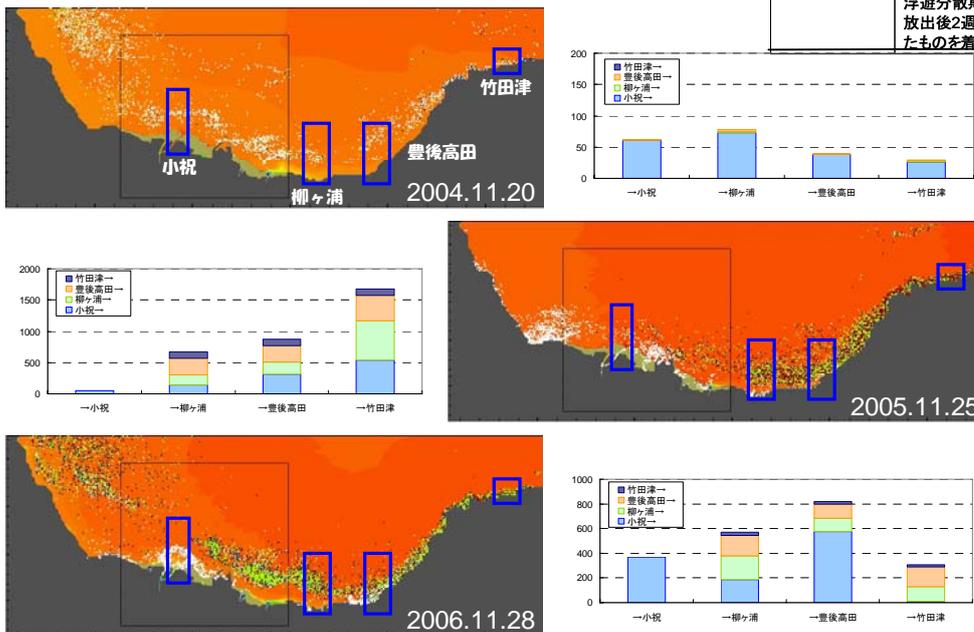


図 1 6 に潮流楕円及び位相平均流速に関する観測とモデルの結果を示す。この図から河口前面で流速が大きく、地形に沿う流れが卓越し、沖側ではほぼ潮汐による東西方向の往復流となっていることがわかる。計算結果と観測結果はほぼ同様の傾向となっており、モデルの再現性が確認された。

本モデルを用いて、周防灘南部沿岸域でのアサリ浮遊幼生分散過程を検討した。分散過程は粒子を用い、大潮期満潮時に産卵し、浮遊幼生となり、産卵後 4 日までは水深 1m、4~10 日間は 3m、10

計算年	2004年、2005年、2006年
放出時期	大潮干潮時の連続する3日間 2004.10.29 0:00~ 2005.11.03 0:00~ 2006.11.06 0:00~ それぞれ1時間ピッチで放出
放出箇所	小祝、柳ヶ浦、豊後高田、竹田津(右図)
放出量	100粒子/箇所/1時間
粒子追跡期間	放出後20日間
鉛直分布	浮遊幼生が分布しやすい水深帯を設定して、そこに収束しやすくさせた分布する水深帯は以下のとおり 放出~4日まで:水深1m 4日~10日まで:水深3m 10日~:水深5m 浮遊分散期間を2週間と想定して、放出後2週間を経過して海底に到達したものを着底と判定した



西から東に移動する傾向が強く、小祝漁場由来の幼生の他漁場への寄与が大きい

～14日（着底）間では、5mの水深に集中するようにモデルを設定した。このモデル化は、瀬戸内海水産研究所の助言によるものである。計算条件を表1に示す。

図17に2004,2005,2006年の秋季のアサリ浮遊幼生分散結果を示す。4カ所の産卵箇所から、放出させた。同図には、各4カ所での着底稚貝の個数及び放出箇所毎の着底稚貝の構成割合を棒グラフで示している。この図から分散状況は年によって異なることがわかるが、小祝起源（中津干潟）の幼生は多くの箇所で着底している（棒グラフでは水色）。このことから、中津干潟でのアサリ資源を増殖し、管理することが、本海域でのアサリ資源増大のためには重要であることを示していると考えられた。他のアサリに関する生物学的な調査（瀬戸内水研の調査）でも、本海域における中津干潟の重要性が指摘されており、本検討結果と一致している。

(3) 使いやすい解析前処理プログラム・解析結果処理プログラム（プリ・ポストプロセッサ）の作成

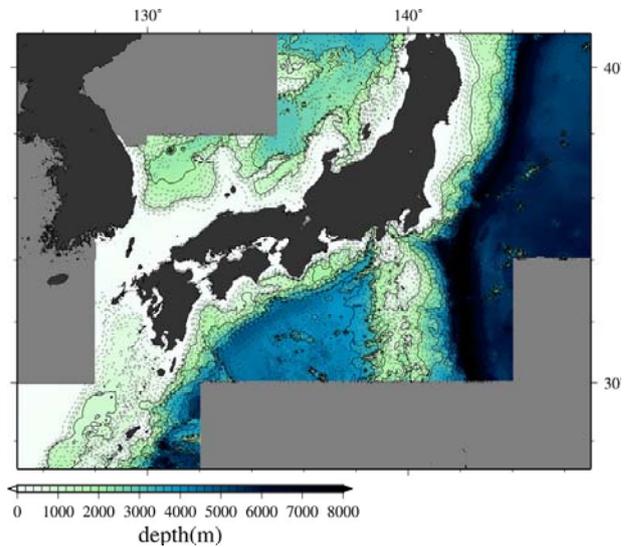
計算に当たって、以下のように必要なデータを容易に作成出来るシステムを構築した。

① 全国沿岸域への適用のために基本的な情報として、地形データをデータベースとして整備し、領域指定することにより、水深データを作成できるようにした（図18）。

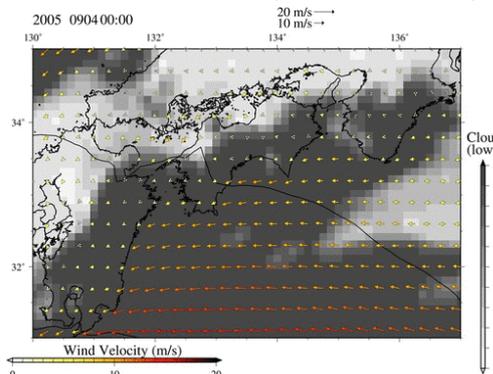
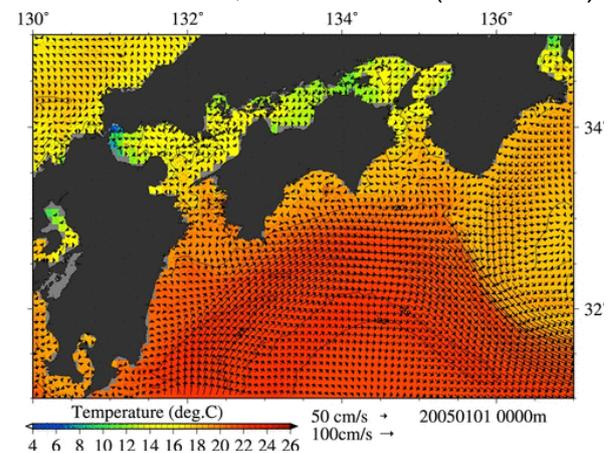
② 外洋同化モデルについては、FRAJCOPE、FRAJCOPE2などの沿岸域のデータを収集し、計算領域境界の流速、水温、塩分データを容易に作成出来るようにした。

③ 潮汐については、潮汐予報システム NAO.99b (Matsumoto et al., 2000)を用いて、計算領域近傍のデータを用いて、16分潮成分を算定出来るようにした。

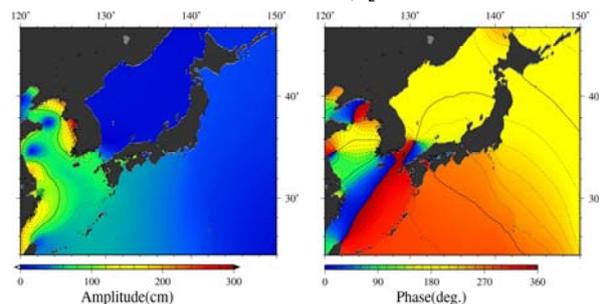
④ 気象データについては、気象庁再解析データについては、GPV-MSM（風、気温、気圧、相対湿度、台風通過時の風、雲量、気圧（気象庁GPVデータ）



冬期の表層水温, 流速ベクトル (FRA-JCOPE)



日本沿岸の潮位振幅と遅角 (M₂成分)



雲量)を用いて、計算領域での気象データを作成出来るようにした。全天日射量については気象観測所のデータをダウンロードすることとした。

計算の図化处理については、現在TECPLOTを用いているが、標準的な図化处理プログラムを作成しており、最終報告書で詳細に報告する。

(4) モデルの運用マニュアル作成

モデルの内容(理論、適用範囲、モデル本体プログラムの構造・説明)、計算に必要なデータ作成、計算結果出力ファイルの図化等の説明資料を作成しており、最終報告書で詳細に報告する。

6. 成果

これまで述べたように精度の良い実用的なモデルが開発され、入力データ等のシステム化がなされた。全国沿岸域への展開の準備が整ってきた。鹿島灘ではチョウセンハマグリ、瀬戸内海東部海域でのマコガレイ、周防灘南部でのアサリなど有用水産生物の広域分散過程の検討が可能となった。加えて生態系モデルにより、幼生着底領域での低次生産評価や海域毎の生産性評価などが可能であり、漁場整備、環境保全等の対策樹立の基礎的ツールとしての利用出来る段階にあるといえる。長期計算により、既存の生物調査結果との比較検討や準リアルタイム化による漁場情報提供などへの利用も考えられる。

既に瀬戸内海東部でのイカナゴの資源予測のための基本ツールへの展開や伊予灘でのマコガレイに関して幼稚仔分散過程の検討などの要望があり、検討している。鹿島灘では、次期研究計画で、チョウセンハマグリ資源増殖のための検討も行われる予定である。

7. 今後の課題

それぞれの課題については、各章で説明したが、主要な課題として以下が上げる。

- (1) モデルの再現性のさらなる向上(地形飲み直し、拡散係数や移流項の高精度化など)
- (2) 現地データ餌生物等計測結果と計算結果との詳細な比較検討
- (3) 瀬戸内海における低次生態系モデルの改良(パラメタ見直し、モデル構造の修正、底泥からの溶出過程の改良等)
- (4) 各種有用水産生物(例えばズワイガニ、伊勢エビ等)の初期生残過程解析のためのモデル化