

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

陸棚・島嶼を含む国際的閉鎖海域・日本海の海域管理法の開発  
(S-13-3)

平成26年度～平成30年度

Development of methods for ocean management in the Japan Sea, an international enclosed sea that includes continental shelves and islands

<研究代表機関>

公益財団法人環日本海環境協力センター

<研究分担機関>

愛媛大学

九州大学

愛媛大学

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	
. 成果の詳細	
- 1 国際的閉鎖性海域の管理法提案 （公益財団法人環日本海環境協力センター） 要旨	25
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
- 2 - 1 日本海環境変動予測モデルの構築 （愛媛大学） 要旨	46
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
- 2 - 2 日本海環境変動予測モデルの構築 （九州大学） 要旨	70
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	

4 . 結果及び考察	
5 . 本研究により得られた成果	
6 . 国際共同研究等の状況	
7 . 研究成果の発表状況	
8 . 引用文献	
- 3 日本海高次生態系モデルの構築 (愛媛大学) 要旨	..... 96
1 . はじめに	
2 . 研究開発目的	
3 . 研究開発方法	
4 . 結果及び考察	
5 . 本研究により得られた成果	
6 . 国際共同研究等の状況	
7 . 研究成果の発表状況	
8 . 引用文献	
. 英文Abstract	..... 126

## I. 成果の概要

課題名 S-13-3 陸棚・島嶼を含む国際的閉鎖海域・日本海の海域管理法の開発

課題代表者名 吉田 尚郁 (公益財団法人環日本海環境協力センター 主任研究員)

研究実施期間 平成26～30年度

累計予算額 125,844千円  
(うち平成26年度 27,706千円、平成27年度 26,323千円、平成28年度 25,489千円、  
平成29年度 23,757千円、平成30年度 22,569千円)

本研究のキーワード 日本海、東シナ海、地球温暖化、低次・高次生態系、将来変動予測、国際共同管理、陸海統合管理

### 研究体制

- (1) 国際的閉鎖性海域の管理法提案 (公益財団法人環日本海環境協力センター)
- (2)- 1 日本海環境変動予測モデルの構築 (愛媛大学)
- (2)- 2 日本海環境変動予測モデルの構築 (九州大学)
- (3) 日本海高次生態系モデルの構築 (愛媛大学)

## 1. はじめに (研究背景等)

国際的な閉鎖性海域である日本海は大きな変化にさらされている。一つは近隣諸国の急速な経済発展に伴う東シナ海の環境変化である。東シナ海は日本海の上流域に位置し、対馬海峡を通じて熱、海水、様々な物質が日本海へと輸送される。東シナ海の環境が日本海の環境に多大な影響を及ぼすことは広く理解されているが、実際にその影響を定量的に評価した研究は十分に行われていない。もう一つの変化は地球温暖化の影響である。日本海は地球温暖化に伴う海水温上昇が世界的にも早い海域であり、世界の平均海水温上昇の2～3倍であることが気象庁によって報告されている。今後、地球温暖化に伴い日本海の環境がどのように変化するのか、さらに日本海の低次・高次生態系にどのような影響を及ぼすのかといったことは十分に解明されていない。このような大きな変化にさらされている日本海の沿岸域管理法は、地球規模、地域規模の環境変化の影響に対する適応策、緩和策を示すものと考えられる。

また、日本海は国際的閉鎖性海域であるため、国内の管理だけでなく、関係諸国との連携が必要不可欠である。本海域には日本、中国、韓国、ロシアが海洋環境保全を目的として合意した北西太平洋地域海行動計画(NOWPAP)をはじめ、様々な国際プロジェクト、国際協力の枠組みが存在するが、日本海の重要性や特異性に関する認識が薄いように感じられる。日本海が我々にとってかけがえのない存在であること、その海域が大きな変化に直面し、喫緊の対応が求められていることを科学的に示すことにより、関係各国の日本海に対する認識が改善され、連携がより強固なものになることが期待される。

S-13では、志津川湾を例とする一つの市町村、県で管理が完結する小スケールの沿岸域、瀬戸内海に代表される複数の県による共同管理が必要な中スケールの沿岸海域、そして国を越えた連携が必要とされる日本海の沿岸域管理が検討される。本テーマが担当する日本海では、日本海に面するそれぞれの沿岸域における管理、日本海に面する自治体間の連携、そして他国との連携といったマルチスケールの沿岸域管理を検討する必要がある。マルチスケール管理は、国内の他の地域や、同じような境遇にある韓国やロシアの沿岸域、更には他の国際海域へも応用が可能と考えられる。

## 2. 研究開発目的

本研究テーマの目的は、日本海が直面する大きな変化に対し、我が国の沿岸海域の環境を保全するために

如何に適応していくかといった方針・手法を示す日本海沿岸域管理法を提案することである。適応策を検討するためには、影響の対象や範囲を定量化し、その重大性や緊急性、確実性を把握する必要がある。そこで、現象の理解やその定量化に適した数値モデルを活用する。

本目的達成のため、4つのサブテーマがそれぞれの役割を担い、相互に連携して研究を進める。

サブテーマ(1)は、本テーマの総括班として、日本海沿岸海域管理手法を開発する。日本海沿岸海域管理手法の提案に向けた作業方針を他のサブテーマに示すとともに、各サブテーマの生態系モデルに関する各種データ及び変動シナリオなどを提供する。サブテーマから得られた成果に基づき、日本海への影響を評価し、適応策としての日本海沿岸海域管理手法を提案する。また、富山湾を対象海域として、日本海沿岸域における具体的な沿岸海域管理手法を検討する。

サブテーマ(2)-1は、東シナ海からの栄養塩供給に着目し、東シナ海と日本海の栄養塩循環及び日本海低次生態系への影響を解明することを目的とした日本海環境変動予測モデルを開発する。三峡ダムや南水北調など中国で行われる大規模公共事業に伴う東シナ海の環境変化や日本海への影響についても評価する。

サブテーマ(2)-2は、地球温暖化に伴う日本海の将来変動予測を行うための日本海環境変動予測モデルを開発する。地球温暖化が日本海の環境や低次生態系に及ぼす影響とそのメカニズムの解明を進める。得られた温暖化影響予測結果は他のサブテーマと共有し、日本海の高次生態系への影響解明に役立てる。

サブテーマ(3)は、日本海の生態系を代表する生物であるスルメイカ及びズワイガニを対象とする日本海高次生態系モデルを開発する。本モデルにより、両種の初期生活史における地球温暖化の影響を把握し、持続的利用のための効果的・効率的な保全策を検討する。富山湾沿岸海域管理手法開発のための富山湾低次生態系モデルを開発する。

生態系モデルの各種パラメータは、各サブテーマの目的や対象とする事象に合わせてカスタマイズされるが、基礎となる物理モデルは九州大学応用力学研究所が開発した3次元海洋循環モデル(DREAMS: Data assimilation Research of the East Asian Marine System Medium resolution model)を採用し、サブテーマ間の情報・データの共有や比較が可能となっている。

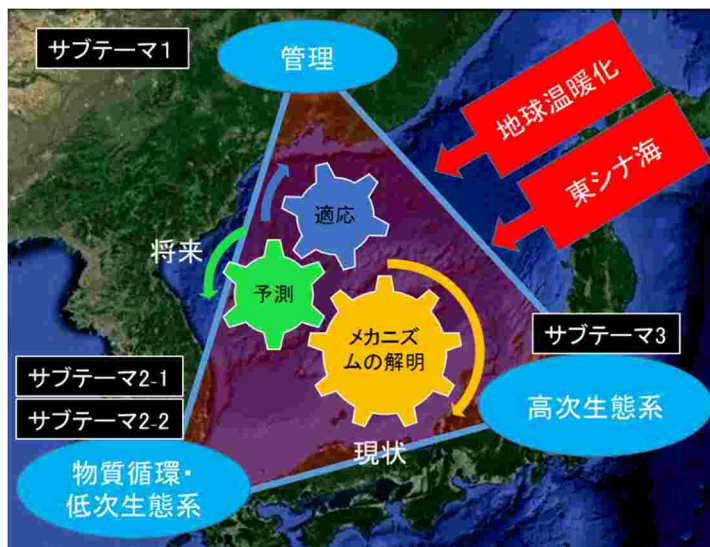


図1 サブテーマ間の連携構造

### 3. 研究開発の方法

#### (1) 国際的閉鎖性海域の管理法提案

##### 1) 日本海沿岸域管理法の提案

サブテーマ(2)-1による、東シナ海からの栄養塩供給とその輸送メカニズム、低次生態系への影響の解明、サブテーマ(2)-2による、地球温暖化に伴う日本海の将来環境変動予測、サブテーマ(3)による、スルメイカ・ズワイガニへの地球温暖化の影響予測、及びサブテーマ(1)で解析を行った日本海沿岸域海水起源を踏まえ、日本海の海洋環境及び生態系への温暖化・東シナ海の環境変化の影響評価を行った。

影響評価に基づき、我が国が取るべき適応策として、日本海沿岸域管理法を検討、提案した。

本プロジェクトから得られた成果は、NOWPAPをはじめとする本海域を対象に活動する国際的な枠組みでの活用や他の海域への適用が期待される。そのため、プロジェクトの内容や得られた成果を関連する会議の場で共有を図るなど、将来の国際協力への展開・発展についても検討した。

## 2) 富山湾陸海統合管理の提案

富山湾は日本海の中央部に位置し、能登半島によって湾西部を囲まれる半閉鎖的な海域である。能登半島が存在することで、対馬暖流による直接的な影響が比較的弱いほか、主要5河川をはじめとする大小300にも及ぶ河川を通じた陸域からの影響も強く、外洋からの影響と陸域からの影響を踏まえた陸海統合管理を検討するのに適した海域である。更に、富山湾には豊富な地下水に起因する海底湧水が湧出していることも知られている。近年、海底湧水が沿岸環境や生態系に大きな影響を及ぼしていることが世界各地で報告されており、陸域における表層水と地下水の循環の管理による沿岸環境の保全を検討する上でも、興味深い海域である。そこでサブテーマ(3)と協力し、日本海沿岸海域を代表する湾として、富山湾を対象に沿岸海域管理手法を検討した。

まず初めに、富山湾の陸海統合管理の検討にあたり、海洋環境の保全への陸域で管理の有効性を把握するため、富山湾内の外海(対馬暖流系)と陸域からの影響バランスの定量化を試みた。続いて、富山湾沿岸海域管理の開発にあたっては、(a)富山県は豊かな水資源を有する地域であり、沿岸域に恩恵をもたらしていると考えられているが、実際に陸域からの寄与がどれほどなのか定量的に評価する、(b)この豊かな水資源を産み出す水循環が自然・社会環境の変遷に伴い変化しており、その影響を定量化する、(c)自然・社会環境の変化により失われた循環機能を補うための対応策を検討する、といった手順を進めることとした。本手順に基づき、サブテーマ(3)において富山湾低次生態系モデルを開発し、各種条件のもとシミュレーション実験を行った。

富山湾陸海統合管理手法の検討にあたっては、富山県で実施されている施策などを参考としたほか、富山県の行政担当者とも情報の共有を行いながら進めた。

## (2) 1日本海環境変動予測モデルの構築

### 1) 東シナ海からの影響の定量化及びメカニズムの解明

対馬海峡を通じて東シナ海から日本海に流入する栄養塩が、日本海の低次生態系に及ぼす影響を定量的に評価するため、日本海低次生態系モデルを新たに開発した。栄養塩の挙動に対する低次生態系の応答に焦点を当てるため、栄養塩(窒素)に関するパラメータとして、硝酸、アンモニア、溶存態有機窒素と実際の海洋中の存在形態に合わせたパラメータを設けたほか、植物プランクトンおよび動物プランクトンに関するパラメータを小型と大型種に分類するなど細分化し(図2)、低次生態系の栄養塩への応答メカニズムを高い精度で定量化できるよう試みた。

モデル結果の検証、データ同化による高精度化を図るため、東シナ海からの栄養塩供給に関する現場データを収集するための観測航海を毎年実施した。

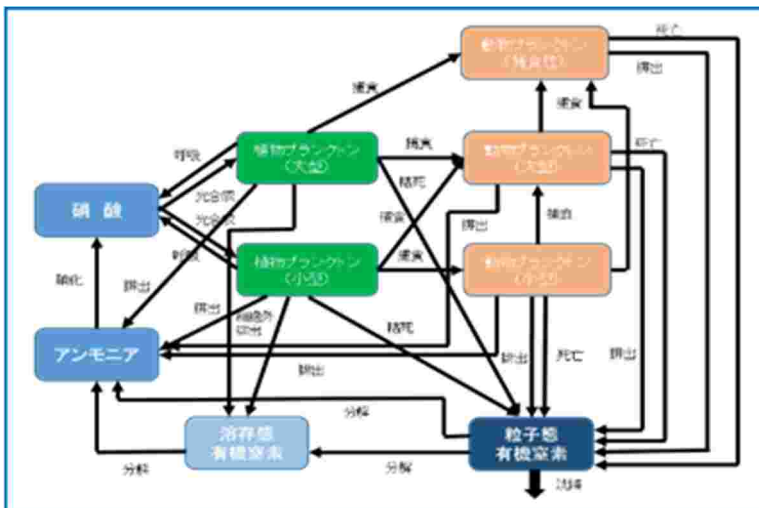


図2 日本海低次生態系モデルの概要

## 2) 東シナ海の栄養塩循環及び日本海への影響の解明

研究の進捗に伴い、日本海と東シナ海の関係性が当初想定していたものよりも強いことが明らかとなり、東シナ海における栄養塩の動態を理解することが、日本海の栄養塩環境や低次生態系への影響を理解する上で必要ことが判明した。そこで、東シナ海を対象海域とする低次生態系モデルを追加的に開発した。基本的なモデルの構造は日本海低次生態系モデルと同じであるが、東シナ海の基礎生産はリンが制限要因となっており、リンの挙動や窒素/リン比も重要なパラメータとなることから、栄養塩パラメータとしてリンを新たに加えた。東シナ海低次生態系モデルを用い、東シナ海における栄養塩の挙動解明と定量化を行った。更に、中国国内で進行する三峡ダム建設や南水北調による大規模な公共事業に伴う水循環変化が東シナ海の海洋環境に及ぼす影響についても研究を行った。

### (2) 日本海環境変動予測モデルの構築

#### 1) 地球温暖化による日本海の将来変動予測

日本海は世界的にも地球温暖化に伴う海水温上昇が速い海域である。将来、日本海が地球温暖化に伴ってどのような変動を起こす可能性があるのか把握することは、日本海沿岸域管理を考える上で最も重要な点のひとつである。そこで、地球温暖化に伴う日本海の海洋環境の長期予測を高精度で行うための日本海低次生態系モデルを新たに開発した。過去(1900年)から未来(2100年)にわたる長期の予測を行うことから、コンピュータによる処理能力を考慮し、低次生態系に関するパラメータはできる限り簡素化した(図3)。本モデルの特徴として、観測データが充実している溶存酸素をパラメータに加えることにより、データ同化によるパラメータの最適化を行い、高精度で予測できることが挙げられる。将来予測にあたっては、IPCC第5次評価報告書で採用された気候変動シナリオ(代表的濃度経路(Representative Concentration Pathways)シナリオ)のうちRCP8.5及びRCP2.6を用いて、気温のみを段階的に変化させて100年後までの日本海環境の将来変動予測を試みた。風などの気象条件に関しては、JRA55(気象庁55年長期再解析データ)の50年間のデータを繰り返し与えた。

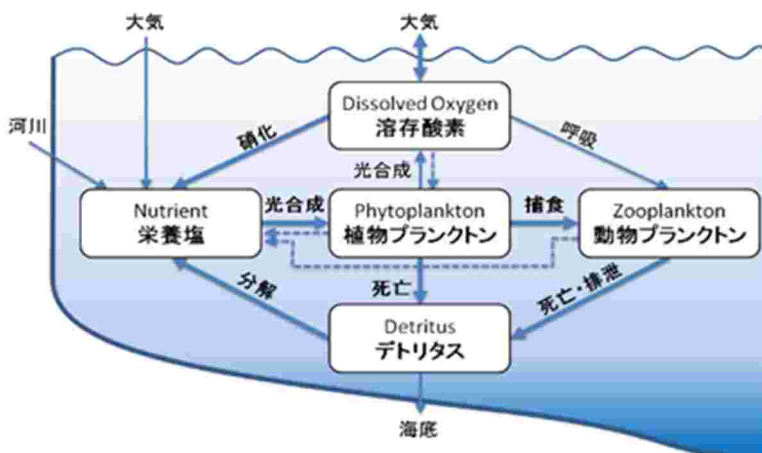


図3 日本海将来変動予測モデルの概要

#### 2) 中国からの栄養塩排出に関する日本海の将来変動予測

我が国にとって、上流域に位置する東シナ海の周辺国の中で、特に中国の急速な経済発展が日本海に及ぼす影響は大きな懸念事項である。中国の河川から排出されている膨大な栄養塩が日本海環境に及ぼす影響を把握するため、2つの栄養塩の排出シナリオに基づく将来予測を行った。一つ目のシナリオは栄養塩排出量が年+20%で増加し続けるとしたものの、もう一方は年間排出量(100mmol/m<sup>3</sup>)が維持されるとしたものである。

### (3) 日本海高次生態系モデルの構築

#### 1) スルメイカ及びズワイガニの地球温暖化の影響予測及び新たな保全策の検討

スルメイカ及びズワイガニは日本海を代表する水産資源である。スルメイカは表層回遊生物で、寿命は1年であり、海洋環境の変化に極めて敏感に反応する生物である。ズワイガニは200~500mの限られた水深帯に分布し、対馬暖流を利用した再生産機構を持つ。日本海の海洋特性に適合した両種を対象生物として、初期生活史

において地球温暖化により受ける影響を把握し、適切な保全策を検討する。研究には、両種の生態に合わせて開発した卵・幼生輸送・生残生態系モデルを用いる。本モデルでは物理循環モデルに低次生態系パラメータを加えることで、幼生期の餌環境による影響も再現している。なお、本モデルでは卵から孵化、幼生期までを研究対象期間とし、自泳能力が備わった期間は対象としていない。地球温暖化の影響に関しては、サブテーマ(2)-2から供されるRCP2.6とRCP8.5シナリオに基づく日本海の将来予測結果を用い、両種の輸送・生残・分布に及ぼす影響を検証し、持続的利用のための適応策・保全策を検討した。

## 2) 富山湾低次生態系モデルの開発

富山湾をモデル海域として、日本海沿岸域管理を検討するための富山湾低次生態系モデルを新たに開発した(図4)。(2)-2で開発された日本海低次生態系モデルから富山湾の周辺海域を切り出し、東西1/60°メッシュ、南北1/75°メッシュに高解像度化を図るとともに、リンに関するパラメータを追加した。河川流量には、国土交通省水文水質データベースの富山県内の主要5河川である小矢部川、庄川、神通川、常願寺川、黒部川の日別流量データを用い、各河川からの栄養塩負荷は、日別流量に各河川の平均栄養塩濃度に乗じて与えた。富山湾の特徴である海底湧水については、その流量は河川の25%程度で、栄養塩負荷量が河川と同程度との八田ら(2005)の研究成果に基づき、上記5河川の河口部において、各河川の栄養塩負荷と同量の負荷を与えることとした。

本モデルを用い、まず富山湾における外洋からの影響と陸域からの影響の定量化を行った。陸域からの影響を受ける海域を塩分が32psuを下回る海域と定義し、その面積や季節変化を明らかにした。次に、富山湾を特定の水深でボックス化し、ボックス内外の栄養塩のフラックスを定量化した。また、陸域からの影響度を求めるため、河川水及び海底湧水による栄養塩負荷のオンオフ実験を行い、河川や海底湧水による栄養塩供給の沿岸域の生産性への寄与率を求めた。

地球温暖化による影響実験では、冬季の降雪が降雨に変化し、冬季・夏季の河川流量に変化が生じていることを踏まえ、冬季(12月～2月)の河川流量を20%増やし、春から夏(3月から8月)に冬季の増加分を平均的に減少させて、沿岸環境への影響を評価した。

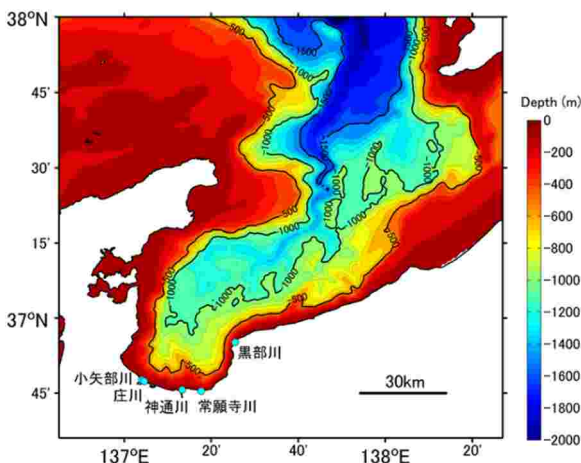


図4 富山湾を対象海域として新たに開発した富山湾低次生態系モデル(DREAMS\_T)

## 4. 結果及び考察

### (1) 国際的閉鎖性海域の管理法提案

#### 1) 日本海沿岸域管理法の提案

サブテーマから得られた研究成果に基づき、地球温暖化と東シナ海の環境変化が日本海に及ぼす影響評価を行った。評価にあたっては、日本海の環境や生態系、水産業などへの影響の度合い(重大性)や影響への対応の緊急性、それらの信頼度を示すこととした。表1、表2に影響評価の結果を示す。

日本海は地球温暖化や東シナ海の環境変化に対し敏感に応答する、極めて脆弱な海域であることが明らかとなった。その影響は環境のほか、生態系や社会・経済にも及ぶことも予想される。これまで我々は日本海を身近な海と認識しつつ、その重要性に関する認識に欠けていたのではないかと思われる。今後は日本海に対する認



識を改め、国を挙げてその保全に取り組む必要があると思われる。

表1 日本海への東シナ海の影響変化の影響評価

分野	項目	重大性		緊急性	信頼度
		観点	判断理由		
環境	日本海 (沿岸)		環境 生態系 社会 経済	栄養塩供給・化学物質 基礎生産・生物輸送 漁業を通じた地域社会への影響 漁業	
	日本海 (全域)		環境 生態系 社会 経済	栄養塩供給・化学物質 基礎生産 漁業を通じた地域社会への影響 漁業	

東シナ海と日本海特に日本海沿岸域の関係性は、当初我々が想定していたものよりも、より緊密な関係にあることが明らかとなった(表1)。例えば、日本海沿岸域の存在する海水や栄養塩の多くは東シナ海に由来するものである。日本海西部(山口～福井)の沿岸域に存在する海水・栄養塩の90%が東シナ海由来であり、東部沿岸域(石川～青森)でも海水で80%、栄養塩の60%が東シナ海由来であることが明らかとなった。これは、日本海沿岸域が東シナ海に依存している、もしくは支配されているともいえる。東シナ海からの影響は年々大きく変化する。栄養塩の流入量では、多い年と少ない年で3倍も変化する。栄養塩の流入量の変化は、日本海の広範囲の基礎生産に年間を通じて影響を及ぼすことが示された。日本海を環境を保全していくためには、東シナ海からの影響を常時把握する体制を早急に整える必要がある。

また、日本海には周期的に低塩分水が流入していることが知られている。この低塩分水は長江河川水に起因することが知られているが、その挙動を調べたところ、台湾海峡を通じて中国沿岸を北上する台湾暖流が長江河川水や沿岸の低塩分水を取り込み、東シナ海の陸棚に沿って対馬海峡から日本海へと輸送していることが明らかとなった。中国の河川水や沿岸域には高濃度の化学汚染物質(POPs等)が存在しており、これらの化学物質の日本海への輸送経路のひとつが対馬暖流であるといった報告もある。過去には、大型クラゲが大量に日本海へと流れ込み、各地の定置網に甚大な被害をもたらしたこともある。中国沿岸域からの影響を監視するという観点で、台湾暖流(低塩分水)の挙動に応じた監視体制を構築することで、より効率的な監視につながると考えられる。日本海の入りに位置する対馬海峡に定常的な観測線を設けることで、効率的な監視が可能である。

表2 日本海への地球温暖化の影響評価

分野	項目	重大性		緊急性	信頼度
		観点	判断理由		
環境	日本海 (沿岸)		環境	対馬暖流の変動 (海水温・物質輸送)	
	日本海 (全域)		環境	海水温上昇 流動・栄養塩環境の変化	
生態系	日本海 (沿岸)		環境	基礎生産・生物分布	
	日本海 (全域)		環境	基礎生産・生物分布	
水産業	回遊性生物 (スルメイカ)		社会 経済	近年のスルメイカ資源の低迷	
	定着性生物 (ズワイガニ)		社会 経済	将来の漁場の変化	
水環境・ 水資源	水供給 (地下水)		社会 経済	地下水(海底湧水)の沿岸生態系 や生産性への寄与	

日本海に対する地球温暖化の影響は極めて大きく、多くの項目で重大性が高いという評価結果となった(表2)。過去100年で、日本海の表面海水温は1度以上上昇している。今後、たとえ世界各国で温暖化対策が実行され気温の上昇が抑えられたとしても、日本海の海水温の上昇は継続する。対策が不十分で気温の上昇が加速する場合には、日本海の海水温は2~3度も上昇するといった予測結果が得られた。200年で3度以上もの海水温上昇に、本海域に生息する生物が適応できず、日本海の生態系を一変させてしまう恐れもある。これほどの急速な海水温上昇をもたらす要因は、気温の上昇に加え、温暖化に伴う対馬暖流の流動強化であることも明らかとなった。対馬暖流の流動強化、流路の変化に伴い、日本海中部(北緯39度付近)に形成されている極前線が北緯41度付近まで北上する。これにより、日本海的好漁場となっている大和碓付近では、局所的に8度以上も海水温が上昇するといった予測結果も得られており、日本海の広範囲にわたって影響を及ぼす。

海水温や流動場の急激な変化は、日本海に生息する生物の生態や分布にも変化をもたらす。本研究で対象としたスルメイカやズワイガニは、これまでの日本海の海域特性に適合する形で進化し、対馬暖流を利用した繁殖生態を形成してきた。日本海の海洋循環や水温場が変化することで、回遊経路や分布域が変化すると予測結果が得られており、日本海の水産業や資源管理において今後新たな対応が求められることになる可能性がある。

日本海的环境は東シナ海からの影響や地球温暖化の影響にさらされ、短期的・長期的に大きく変動する極めて特異的、かつ脆弱な海域である。これらの変化を引き起こす、要因の一つが対馬暖流であり、日本海の海洋環境保全に向け、対馬暖流に焦点を当てた管理手法の検討が効果的だと思われる。

このような特異的な状況にある日本海の沿岸域では、従来の地先海域を対象とした沿岸域管理だけでは十分な効果が期待できない。地球規模の環境変動や隣接する海域からの越境問題に適應した沿岸海域管理を実施する必要がある。そこで、スケールの異なる広域・中規模・局所管理の視点を組み合わせた日本海三階層管理の導入を新たに提案した(図5)。



日本海三階層管理における広域管理では、東シナ海と日本海を対象として、地球温暖化や東シナ海の問題に関して、関係諸国が連携して対処する国際共同管理体制の構築を目指す。具体的には、地球温暖化に伴う海水温上昇や、東シナ海-日本海間の栄養塩循環、東シナ海から日本海へのPOPsをはじめとする様々な化学汚染物質輸送を監視するための、国際共同監視網の設置が求められる。さらに、日本海の生物資源、生物多様性の保全の観点から、東シナ海は極めて重要な海域である。日本海の海洋生物、多様性の持続的利用に向けた東シナ海の国際共同管理にも着手することが望ましい。

中規模管理では、地球温暖化や東シナ海からの影響を日本の沿岸域にもたらす対馬暖流が鍵となる。対馬暖流とその内側域を対象とした国内の管理体制の構築を提案する。対馬暖流は、黒潮や親潮に比べ、観測や研

究がすくないように思われる。それは、太平洋側に比べ、日本海側に位置する海洋に関する研究機関や研究・観測船が比較的少ないことが一因なのかもしれない。対馬暖流が日本海の沿岸域環境を左右するといった状況を踏まえ、水産・海洋研究機関、大学、国・地方自治体の連携のもと、より充実した観測、研究が行われ、日本海沿岸域の管理につながることが期待される。また、日本海の水産資源の多くは対馬暖流をその繁殖生態に活用している。日本海の生物多様性の保全、水産資源の持続的利用の観点から、対馬暖流の挙動を把握することが重要である。対馬暖流は地球温暖化の影響に伴い、その流動が大きく変化することも予測されており、従来の保全策ではその変化に対応できなくなることも考えられる。海洋環境に合わせて適切な海域を保全する動的海洋保護区などの新たな対策を施していくことにより、将来の環境変化にも適応できるのではないかと考えている。

局所管理では、個別の海域での沿岸海域管理を実施する。伊万里湾や博多湾をはじめ小浜湾や七尾湾、富山湾など、日本海に位置する閉鎖的、半閉鎖的な内湾では、それぞれの海域特性に応じた沿岸域管理が必要である。そこで、次項において日本海における沿岸海域管理のひとつの例として富山湾を対象に陸海統合管理の在り方について検討した。

## 2) 富山湾陸海統合管理の提案

富山湾低次生態系モデルを用い、富山湾が外海と陸域からどの程度影響を受ける海域であるのか、その影響を定量化し、陸域における管理の有効性について検証した。陸域からの影響を受ける範囲を塩分が32psuを下回る海域と定義し、その面積の季節変化を求めた。河川流量が少ない冬場は、陸域影響範囲は富山湾の沿岸に限られ全体の10%程度にとどまるが、河川流量が増加する春から秋にかけては、湾中央部まで拡大し20～60%にも及ぶ。このことから、陸域の水循環、物質循環に管理の手を加えることによって、富山湾の環境保全に効果が得られると考えた。

富山湾沿岸海域管理手法開発方針として定めた手順に従い、まず、河川及び海底湧水の沿岸環境への寄与度の把握を試みた。富山湾の栄養塩収支において、河川及び海底湧水が大きく寄与していることが明らかとなった。冬季は鉛直混合に伴う深層からの栄養塩供給が最も大きな供給源となっており、河川及び海底湧水による供給量は、2～4割にとどまる。一方で、夏になると成層の強化に伴い鉛直混合による供給が減少し、河川及び海底湧水による栄養塩供給が沿岸域の生産性を支えていることが明らかとなった(図6)。富山湾では夏以降の陸域からの供給を如何に維持していくのかという点が、生産性の高い沿岸環境の創造につながることから、富山湾陸海統合管理の検討にあたっては、春から秋にかけての陸域からの供給に着目することとした。

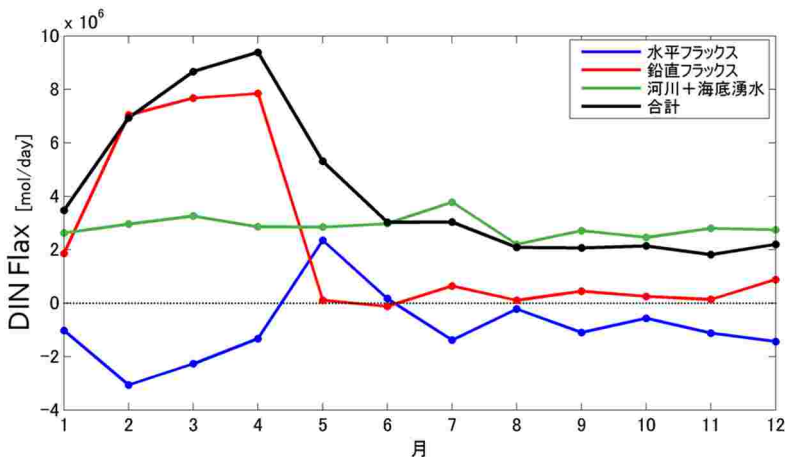


図6 富山湾を栄養塩(DIN)フラックスの季節変化

ここでは富山湾の表層50mを対象とした。水平フラックスは、富山湾内外のフラックス、鉛直フラックスは、50m以深とのフラックス、河川・海底湧水フラックスは河川・海底湧水による供給量を示す。

次の手順として、水循環の変化が海洋環境に及ぼす影響について検証した。富山県では近年、地球温暖化に伴い降雪量が過去に比べ減少してきている。一方で、冬季の降水量に大きな変化は見られず、降雪が降雨に変わってきたことを示す。実際に、夏と冬の河川流量の変化を調べると、冬季の流量は増加し、夏季は減少傾向にある。このことは、従来、山間部で雪として蓄えられ、春から夏に溶け出して供給されてきた水循環システムが失われ、陸域にとどまることなくそのまま河川を通じて排出されるシステムに変わってしまったことを示す。これを受けて、冬季(12月から2月)の河川流量を毎月2割増加させ、冬季の増加分を春から夏の各月から平均的に減少させる、地球温暖化影響実験を試みた。その結果、冬季の海域栄養塩濃度は増加し、春から夏の栄養塩濃度

の減少が確認され、植物プランクトンの増殖にも影響を及ぼすことが示された(図7)。夏以降の富山湾は、河川及び海底湧水による栄養塩供給に依存しており、この期間の栄養塩供給量の減少は湾内の生産性の低下につながる。そのため、減少した分をいかに補い維持していくかが重要な対策となる。

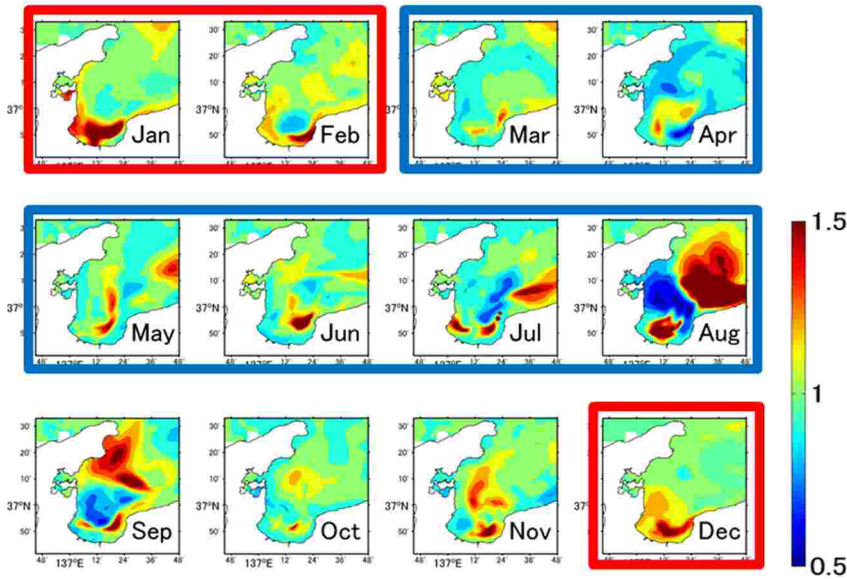


図7 地球温暖化影響実験による富山湾におけるDIN濃度の変化率  
赤枠が河川流量増加期間、青枠が減少期間を示す。

陸域からの栄養塩供給を増やすには、河川流量を増やす、下水処理による栄養塩の除去量を減らすなどの人為的な対策で対処することが可能である。しかし、防災安全や、水質の保全の観点から、自然の循環の中で対応できるのであれば、それが望ましい。そこで、我々が注目したのは地下水である。富山県は豊富な地下水資源を有し、それが海底湧水として海域にまで恩恵を与えている。海底湧水の流量は河川の1/4程度であるにもかかわらず、栄養塩供給量としては同程度あり、河川に比べわずかな量の管理で大きな効果を期待できるためである。

富山県では、地下水資源の重要性を認識し、全国に先立ち地下水指針を作成するなど地下水の保全に取り組んできている。さらに近年の、冬季の融雪水として大量の地下水が利用されるようになり、一時的な地下水位低下の問題が生じている。これに対処するため平成30年に地下水指針が改定され、地下水利用に関する新たな方針が示されている。改定された指針の中では、地下水の涵養の普及拡大策として水田を利用した地下水涵養の促進、地下水を育む森林の保全・整備の充実に向けた施策が組み込まれている。実際に、冬季の水田を利用した地下水涵養実験も行われており、水田1m<sup>2</sup>あたり0.01~0.2m<sup>3</sup>/日の涵養効果が得られることが報告されている。温暖化影響実験で減少するとした河川流量は計156m<sup>3</sup>/sであり、この河川流量と同程度の栄養塩量を海底湧水で補うのであれば1/4量の40m<sup>3</sup>/sで済む。この量を水田で涵養すれば、約2,000haほどの水田で涵養することができる。富山県では、この30年で30,000haも水田が減少しており、使われていない休耕田を涵養地として活用すれば十分対応可能ではないかと考える。ただし、あくまでこの計算は試算であり、涵養された地下水がそのまま海底湧水に反映されるかどうかなど不確実な条件のもと行っている点が多ことから、地下水循環についてさらに研究が進展し、より正確な涵養面積が求められることが期待される。富山県では、「氷と緑の森づくり税」を活用した森林整備も実施されており、休耕田の利用と森林整備を合わせることで、さらに効率的に地下水の保全効果が得られると考えられる。

環境省では森里川海を豊かに保ち、その恵みを引き出すこと、森里川海の恵みを支える社会を作ることを目指した「つなげよう 支えよう森里川海」プロジェクトを推進している。富山県の特徴である地下水循環を加えた新たな森里川海地下水管理を、富山湾陸海統合管理として提案したい。

## (2) 日本海環境変動予測モデルの構築

### 1) 東シナ海からの影響の定量化及びメカニズムの解明

対馬海峡を通じて日本海に流入する栄養塩量は年によって大きく変化することが観測から明らかとなった(図8)。なぜこれほど変化するのか、流入量の変化によって日本海の低次生態系特に基礎生産にどのような影響

が現れるのか、を明らかにすることで日本海沿岸域管理における栄養塩管理の必要性を示すこととした。

まず、日本海沿岸域で基礎生産に使われる栄養塩が東シナ海からの供給にどれくらい依存しているのか、日本海と東シナ海の栄養塩関係の定量化に取り組んだ。対馬海峡から流入する栄養塩、国内の河川から供給される栄養塩、日本海の深層から供給される栄養塩にマーカーを付して、それぞれを起源とする栄養塩が日本の沿岸域にどれくらい存在するのか、日本海低次生態系モデルを用いて解明を試みた。

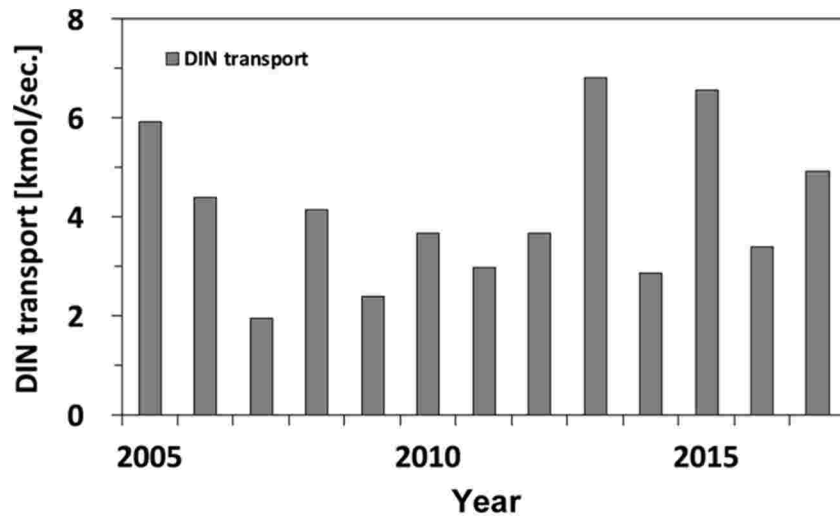


図8 7～9月の対馬海峡東水道を通過し日本海へ流入するDINフラックスの経年変化

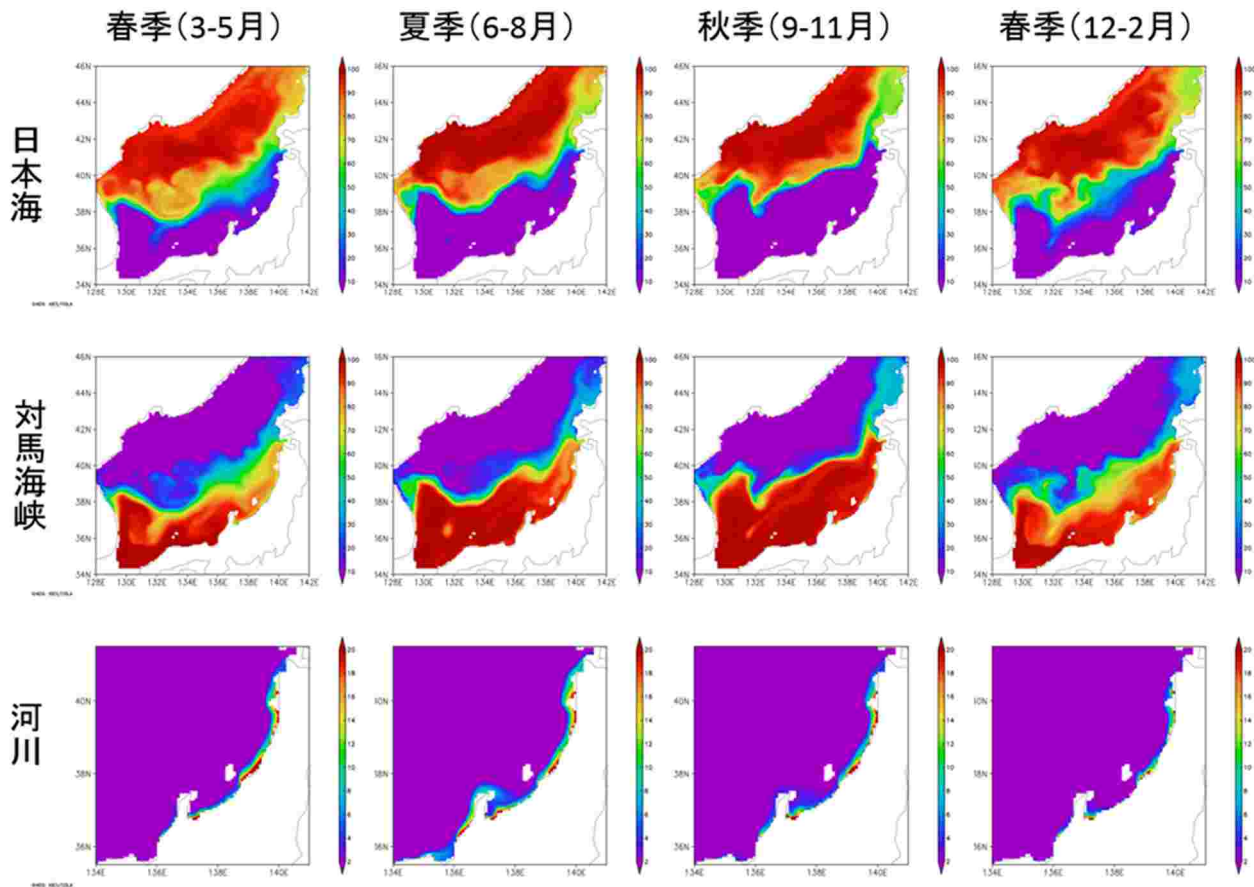


図9 日本海の水深0～50mの積算クロロフィル量に対する、日本海、対馬海峡、国内の河川起源の栄養塩の寄与率とその季節変化。単位は%。

その結果、日本海の南北で寄与率は大きく異なっており、北部海域は日本海深層起源の栄養塩、南部海域は対馬海峡起源の栄養塩が大きく寄与している。南部海域の対馬海峡起源の寄与率は80%以上と、基礎生産に

使われる栄養塩のほとんどが東シナ海からの供給に依存していることが明らかとなった(図9)。一方、国内河川起源の栄養塩の寄与は、大河川のある日本海東部海域でも沿岸数十kmの範囲に限定されており、日本海側の沿岸域の多くの海域は東シナ海との関係が非常に強いことが示された。

次に、対馬海峡を通過する栄養塩量は年によって大きく変化するが、供給量の変化が日本海の低次生態系にどのような影響を及ぼすのか解明を試みた。対馬海峡からの平均流入量に対して1.5倍、0.5倍の供給量を与えた場合の日本海の低次生態系の応答を解析した。DINフラックスの増加に伴い、日本海南西部海域のDIN濃度は増加する。特に対馬暖流第3分枝の韓国東岸に沿った海域で高い値をとる。クロロフィルaも同じ傾向で変化し、DIN濃度の増加が基礎生産の増加に結び付いている。DINの増加は秋以降も継続し、対馬暖流第3分枝に沿って日本海中部海域で広範囲にわたって上昇が確認され、翌年の春には津軽海峡付近まで到達する。一方で、DIN濃度の増加と、クロロフィルaの増加に不一致な点が多い。これは、日本沿岸では供給された栄養塩が直ちに植物プランクトンによって消費されてしまうためと考えられる。DINフラックスを減少させた場合は、逆に日本海の広範囲にわたって、DIN濃度の低下、クロロフィルa濃度の低下が確認された。以上のことから、対馬海峡から流入する栄養塩量が変わることによって、日本海の広範囲にわたって、かつ比較的長期間、栄養塩環境や基礎生産環境に影響を及ぼすことが明らかとなった。

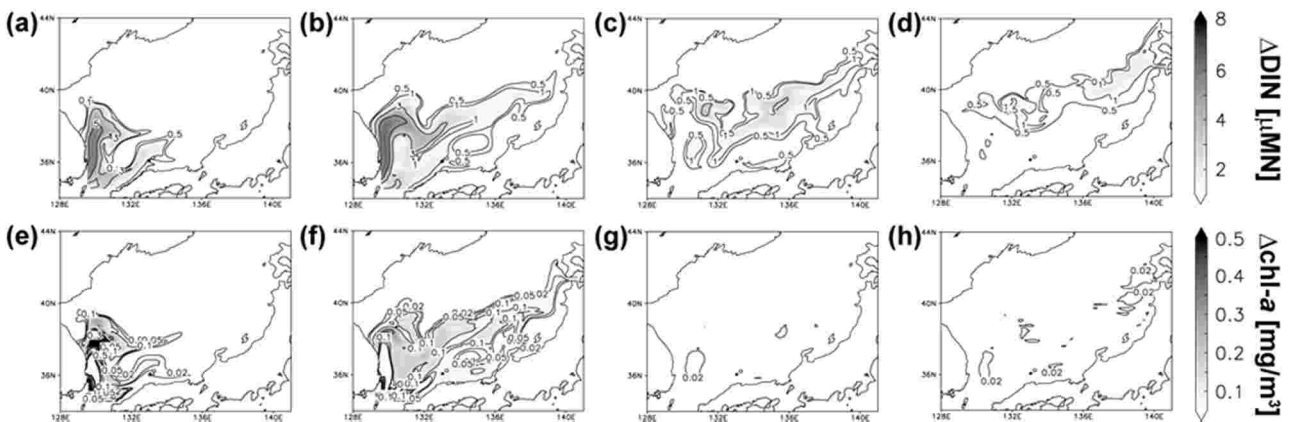


図10 対馬海峡からのDINフラックスを平均の1.5倍増加させた場合の、(a)7月、(b)10月、(c)1月、(d)4月の100mで平均したDIN濃度の増加量と、水深20mで平均した(e)7月、(f)10月、(g)1月、(h)4月のクロロフィルa濃度。

## 2) 東シナ海の栄養塩循環及び日本海への影響の解明

1)により、東シナ海と日本海の関係性が強いことが示された。これを受け、東シナ海からの栄養塩供給量を変化させる要因はなんであるのか、東シナ海のどこを起源とする栄養塩が日本海への栄養塩の供給源となっているのかといった新たな疑問が生じた。この疑問を解決するために東シナ海低次生態系モデルを新たに開発した。東シナ海の栄養塩の起源と考えられる、(i)東シナ海・黄海底層、(ii)台湾海峡、(iii)黒潮・太平洋、(iv)長江、(v)黄河、(vi)大気降水物の6つの起源を設定し、それぞれを起源とする栄養塩の挙動と、対馬海峡への輸送量の解明を試みた。大気降水物の影響を解析したところ、他の5つの起源に比べて寄与率が小さいため、大気降水物を除く5つの影響に焦点を当てて解析を進めた。5つの起源からの栄養塩の寄与率の水平分布を図11に示す。

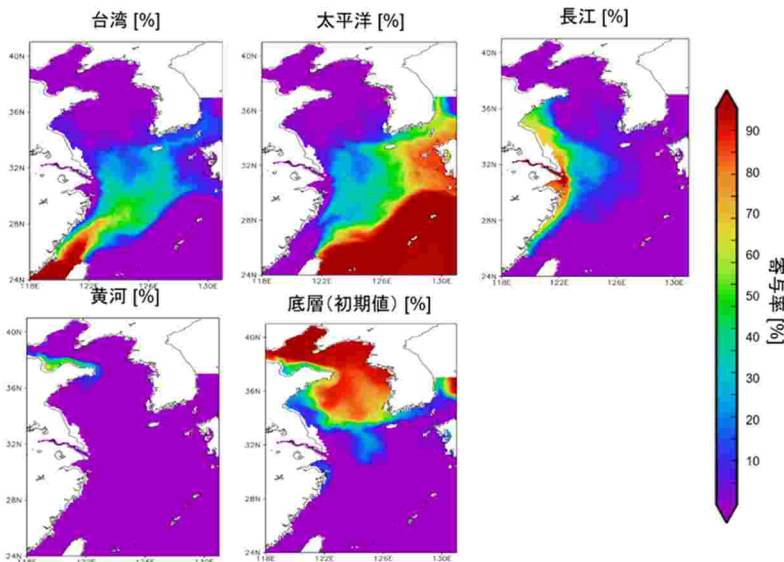


図11 2006年夏季の水深100mまでの鉛直平均DIN濃度に対する大気降水を除いた5つの起源からの栄養塩の寄与率の水平分布

台湾暖流起源の栄養塩は東シナ海大陸棚上に広く分布し、済州島を経て対馬海峡西水道から日本海へと流入する。一方、東シナ海東部、九州西方海域では黒潮・太平洋亜表層を起源とする栄養塩が大きな割合を占め、対馬海峡から日本海へと流入している。影響が懸念されていた長江からの栄養塩供給は、中国沿岸では高濃度で存在しているものの、そのほとんどが中国沿岸域での基礎生産で消費され、多くが海底に沈降してしまうことが明らかとなった。そのため、対馬海峡から流入する栄養塩の起源としては、黒潮・太平洋亜表層起源の栄養塩が最も大きな割合を占める(図12)。東水道と西水道の差は、東水道は年間を通して8割以上が黒潮起源の栄養塩供給となっているのに対し、西水道では台湾暖流および東シナ海陸棚底層起源の栄養塩が季節的に増加することである。長江を起源とする栄養塩は中国沿岸域でほとんどが消費され、東シナ海の海底に沈んでいる。そのため、東シナ海陸棚底層からの栄養塩として間接的に影響を及ぼしている可能性が考えられるため、モデルの結果を長期積分することでその影響の解明を試みた。その結果、東シナ海陸棚底層の栄養塩の起源として、台湾暖流起源が25～30%、黒潮起源が30～35%、長江起源が20～30%、黄河起源が5～25%寄与していることが判明した。長江や黄河から排出される栄養塩が間接的に日本海の栄養塩環境に影響を及ぼす可能性が示唆される。

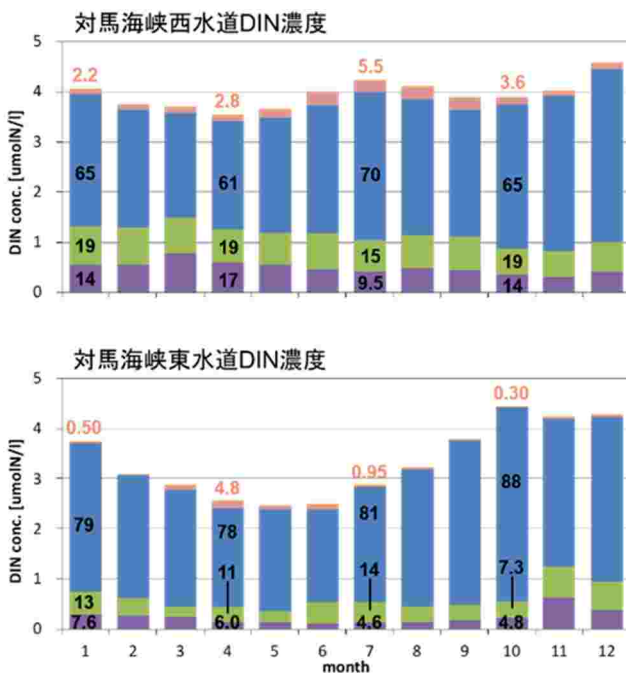


図12 対馬海峡西水道(上段)・東水道(下段)における長江起源、黒潮起源、台湾海峡起源、陸棚底層起源のDIN濃度

本モデルを用いて、南水北調に伴う長江・黄河の河川流量を変化させた感度実験も行った(図13)。

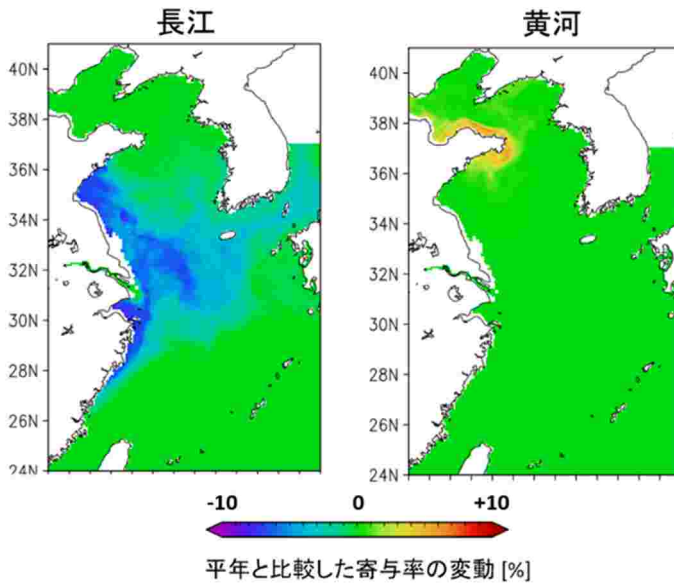


図13 南水北調による淡水排出量の変化を与えた場合の長江起源及び黄河起源のDIN濃度の寄与率の変化量

南水北調により、長江河口周辺の中国沿岸域における栄養塩供給量に減少が見られ、黄河の影響を受ける青島半島周辺で増加する様子が捉えられた。増減量は数%とわずかであり、日本海への影響もほとんど見られないが、東シナ海底層を含む東シナ海内部での栄養塩循環を変化させる可能性は大いにあり、引き続きその影響を把握するための観測や研究が継続されることが期待される。

## (2) 日本海環境変動予測モデルの構築

### 1) 地球温暖化による日本海の将来変動予測

将来予測を高い精度で行うために、グリーン関数法により、データ同化、生態系モデルの再現性の向上を図った。その結果、溶存酸素の観測値と計算値の比較で、20%の再現精度の向上を達成できた。

本モデルを用い、IPCCの気候変動シナリオ、RCP8.5とRCP2.6による、100年後の日本海の環境変動予測を行った。

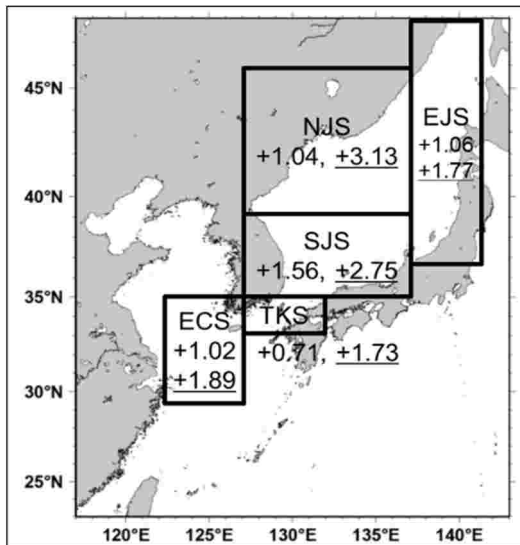


図14 日本海及び東シナ海の100年後の表層水温の変動予測  
下線無しの数値はRCP2.6による予測結果、下線有りの数値はRCP8.5による予測結果を示す。

たとえ世界で地球温暖化対策が実施され、気温の上昇が2以下(RCP2.6)に抑えられたとしても、日本海の海水温上昇は継続し、日本海の南部海域で平均1.56、北部で1.04上昇する。温暖化がさらに進行した場合には、南部で2.75、北部で3.13も上昇するとの予測結果が得られた。このような急激な海水温上昇を引き起こす要因は、気温の上昇と対馬暖流の強化によるものである。日本海の海水温上昇が他の海域に比べ早い理由として、対馬暖流の影響が考えられる。地球温暖化に伴い、対馬暖流の流量が現在に比べ1.5~2倍に増加することが予測され(図15)、これに伴い対馬暖流の流路に変動が現れる。従来、韓国東岸を北上し、北緯38-



39度付近で東向きを変えていた対馬暖流第3分枝が、北緯41度付近まで北上し東進するようになり、日本海の極前線の形成位置も北上する。対馬暖流の流路が変化する北緯38-41度付近では、特に変化が大きく、また表層よりも100m 深での変化が顕著にみられ、局所的に8 mもの海水温上昇が起きることも予測された。

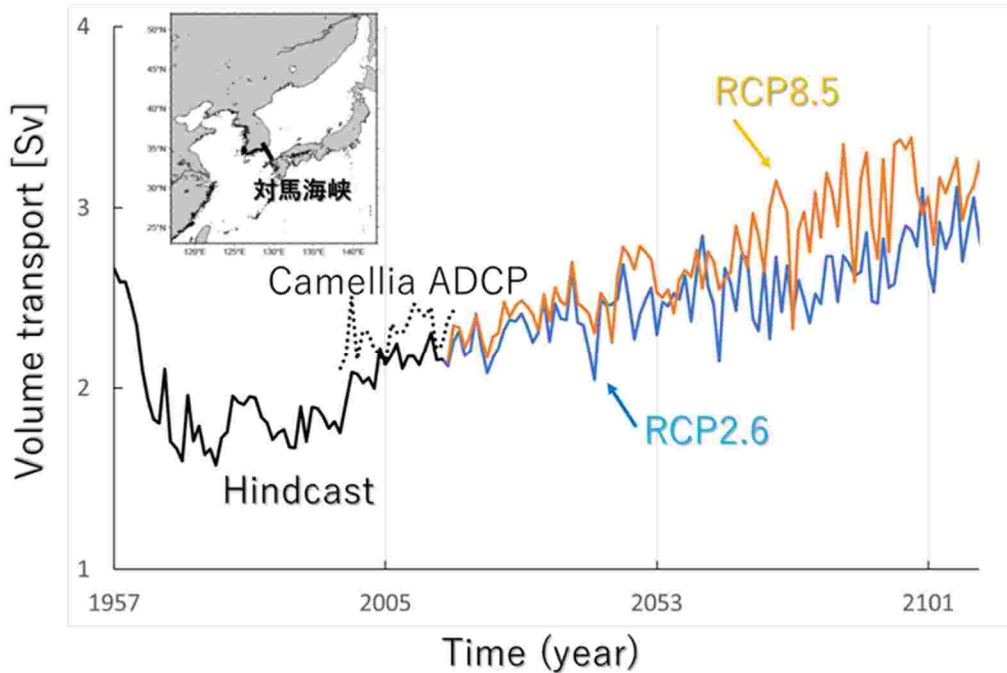


図15 対馬海峡を通過する流量の時間変化。

単位はスベルドラップ (Sv) で  $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  に相当する。点線は対馬海峡を横断するフェリーに搭載されたADCP流速観測から推定した対馬海峡の通過流量。

対馬暖流の流動変化は、日本海の栄養塩環境、低次生態系にも大きな変化をもたらす。韓国東岸域には湧昇域が形成されており、下層から豊富な栄養塩が表層に供給されている。この湧昇域が対馬暖流の北上に伴い北へと移動し、日本海北部に多量の栄養塩を供給する。さらに、海水温が上昇することでプランクトンなどの死骸などデトリタスの分解が促進され、栄養塩の再生産も加速する。これにより、日本海北部海域で高栄養塩化する可能性が示された(図16)。高栄養塩化、水温の上昇により、ロシア沿岸の基礎生産量も増加することが予測される。

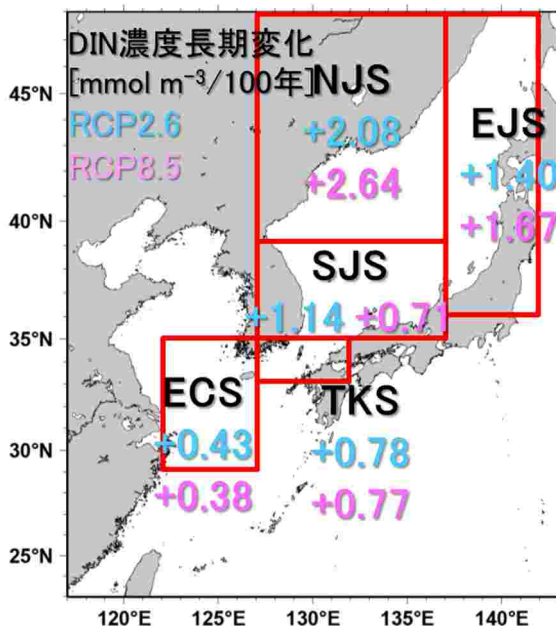


図16 日本海及び東シナ海の100年後の表層DINの変動予測

青字の数値はRCP2.6による予測結果、赤字の数値はRCP8.5による予測結果を示す。

一方、地球温暖化は日本海的环境に思わぬ変化をもたらす可能性がある。これまでの研究では、温暖化に伴い成層が強化され、表層から深層への沈み込みが弱まると考えられている。日本海はウラジオストック沖で冬季に冷却され高密度となった表層水が深層に沈み込むことで、他の海域に比べて非常に高い溶存酸素濃度の深層水すなわち日本海固有水を形成していた。この日本海固有水の溶存酸素濃度が年々減少し、温暖化が継続した場合、近い将来、日本海固有水は低酸素化するのではと危惧されていた。しかし、我々の研究では、対馬暖流の北上に伴い、日本海北部に高塩分水が輸送され、海水温の上昇に伴う密度の低下を補う動きをすることが明らかとなった (Takayama and Hirose 2019, Kim et al. 2019)。これにより、日本海の鉛直混合が維持され、酸素濃度の低下が抑制されるといった新たな知見も得られた (図17)。

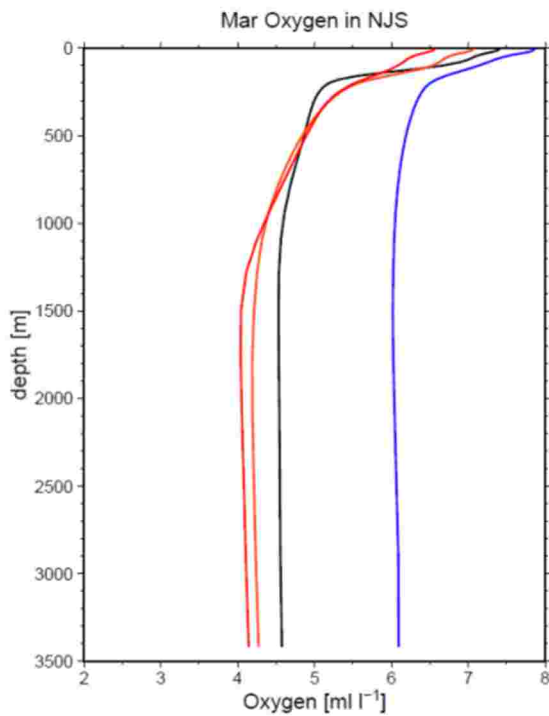


図17 日本海における溶存酸素の鉛直分布  
青線は1950年、黒線は現在、赤線がRCP8.5による2100年の溶存酸素の鉛直分布を示す。

## 2) 中国からの栄養塩排出に関する日本海の将来変動予測

中国からの栄養塩排出の増加の影響は、日本海的环境にとって脅威と考えられる。そこで、現在の高レベルで維持されている栄養塩排出の、日本海の栄養塩環境への影響を評価した。結果としては、(2)-1で示したのと同様、中国河川からの栄養塩の日本海への影響は数%、多い場合でも10%程度であり、たとえ中国からの排出量がさらに増えたとしても、大きく変化することはないと考えられる (図18)。

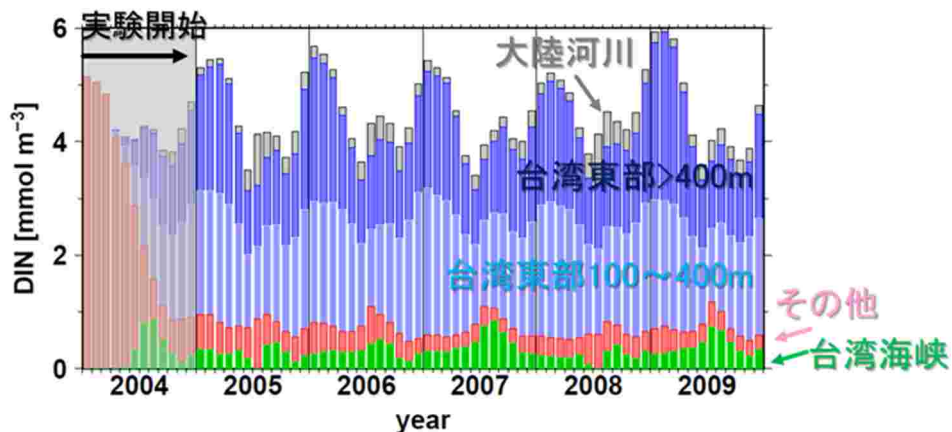


図18 対馬海峡を通過するDIN濃度の起源の内訳

### (3)日本海高次生態系モデルの構築

#### 1)スルメイカ及びズワイガニの地球温暖化の影響予測及び新たな保全策の検討

まず、スルメイカに関する研究結果について報告する。表3にスルメイカ卵・幼生輸送生残モデルにより得られた、産卵数、日本海への輸送数、低温による死亡数、高温による死亡数、生残率および2010年比の過去、現在、未来（気候変動シナリオによる変化）を示す。

表3 スルメイカ卵・幼生輸送生残モデルによる産卵数、日本海への輸送数、低温による死亡数、高温による死亡数および生残率の変化

	Spawning	Moving into JPS	Low Temp. Mortality rate	High Temp. Mortality rate	Survival Rate
1950s	3.31E+05	1.43E+05	47%	15%	36%
2010s	3.21E+05	1.33E+05	49%	17%	33%
RCP2.6 2050s	3.12E+05	1.36E+05	37%	18%	42%
RCP2.6 2100s	3.12E+05	1.40E+05	34%	20%	43%
RCP8.5 2050s	3.12E+05	1.36E+05	32%	17%	48%
RCP8.5 2100s	3.04E+05	1.39E+05	19%	22%	56%

産卵数は、温暖化に伴いわずかに減少する。これは、スルメイカの産卵場は水深100～500m、水温19.5～23の条件を満たす海域に形成されるが、海水温の上昇に伴い本条件を満たす海域が減少することによるものである。また、高水温化に伴い、産卵適海域が北上することで、日本海に輸送される卵・幼生の数は増加する。日本海の海水温が高温化することにより、低温により死亡する幼生の数は大きく減少し、高水温が原因で死亡する幼生の数はわずかに増加する。トータルとして、地球温暖化は、スルメイカの卵・幼生の生残環境にプラスに働くことが分かる。他方、卵・幼生の分布は大きく変化する。

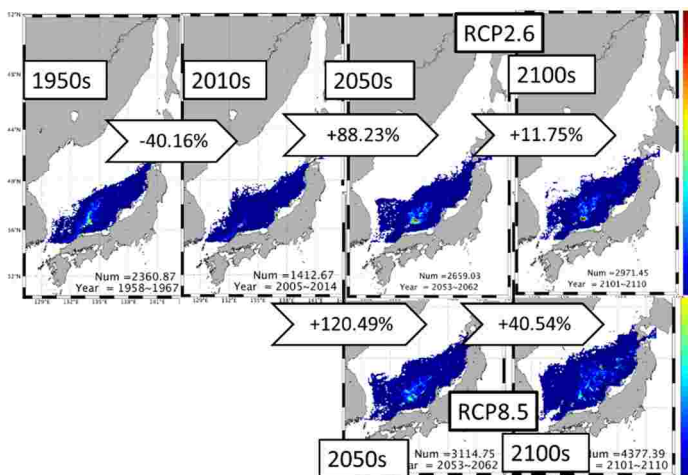


図19 スルメイカ卵・幼生の分布可能範囲の気候変動シナリオによる変化

これまで、日本の沖を流れる対馬暖流第2分枝よりも南側が、卵幼生が生き残ることのできる海域であったが、地球温暖化に伴い海水温が上昇し、低温による死亡する海域が縮小し、極前線まで分布が拡大する（図19）。このことは将来のスルメイカの回遊経路や漁場の形成場所に変化をもたらすのではないかとと思われる。大和碓周辺海域にはスルメイカの好漁場が形成されてきたが、近年、他国の漁船による漁獲などが問題視されている。温暖化に伴い、大和碓周辺の漁場形成に変化が生じるようであれば、新たな漁業問題に発展する可能性

もあり、資源の持続的利用といった観点から今後さらに注意をしていく必要がある。

スルメイカについて、更に注意が必要なのは産卵場における親イカの保全である。日本海を回遊する秋発生系群の産卵場は日本海西部から東シナ海にかけて広く形成されてきたが、温暖化に伴い秋発生系群の維持に最も寄与する海域が東シナ海の九州西部海域に集中することが明らかとなった(図20)。

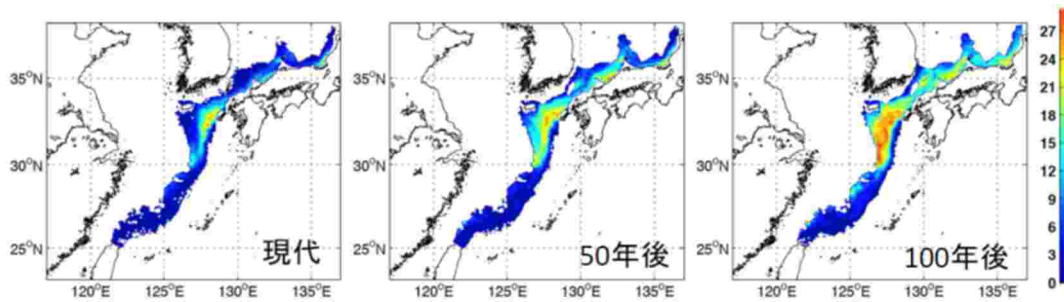


図20 秋発生系群の主要産卵場の変化

本海域は日本、韓国、中国にまたがる海域である。日本においては産卵のために回遊してきた親イカは水産価値が低いことから漁獲対象となっていないが、近年、スルメイカの水産資源利用が急増している中、他国も同様な対応をとるかどうかは定かではない。産卵のために集まった親イカを一網打尽に取りつくしてしまえば、資源の崩壊を招きかねない。そのため、スルメイカの保全を目的とした東シナ海国際共同管理に着手する必要があると考える。しかしながら、水産資源の国際共同管理は難しい問題であり、関係諸国が歩調を合わせていきなり始めることは困難であろう。生物多様性条約(CBD)は、海洋生物多様性の保全を目的として、生態学的・生物学的に重要な海域(Ecological and Biological Significant Sea Area: EBSA)の設定を推進している。EBSA抽出の条件として、種の生活史において重要性の高い海域が挙げられており、産卵場はまさにこの条件に合致するものである。我が国においてはEBSAに該当するものとして、生物多様性の観点から重要度の高い海域の抽出が行われており、東シナ海は重要度の高い海域としてすでに挙げられている。中国・韓国とのこのような情報を共有し、全ての国において重要度の高い海域と認識されることが、将来の共同管理につながるものと考えられる。

ズワイガニの場合、スルメイカとは若干状況が異なる。ズワイガニは水深が200~500mの特定の海域にのみ生息し、大規模な移動もなく分布はほぼ固定されている。更に、日本海の資源量が減少したことを受けて、すでに漁獲可能量制度(TAC)による管理が実施されているとともに、各地で漁業者が主体的に禁漁区や禁漁期間を設けて資源保護が行われている。我々の研究で得られた成果は、現在行われているこれらの保全策では対応できなくなるような状況に変化する可能性があることを示した。

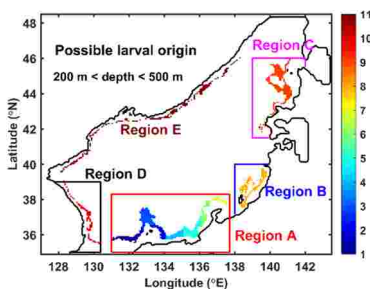


図21 ズワイガニが生息可能な200~500mの水深帯の分布(左)と各地への稚ガニの着底可能数の地球温暖化による変化(下)

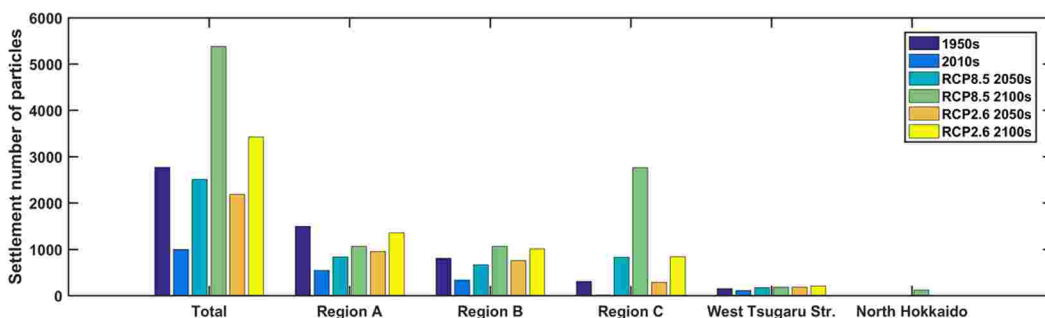


図21に示されるように、ズワイガニもスルメイカと同様に地球温暖化によりその分布が変化する可能性が示された。現在のズワイガニの主な漁場は日本海西部の山陰から北陸沖に形成されている。温暖化に伴い、幼生期の生残り環境が変化し、幼生がより北まで運ばれ、従来、資源が少なく漁場としてほとんど活用されていない日本海北部海域に着底する稚ガニの数が増えるとの予測結果が得られた。このことは、主な漁場が日本海西部から東部もしくは北部へと変化する可能性があることを示唆している。その場合、新たな海域を保全対象にする必要が生じるかもしれない。

また、ズワイガニは海底で孵化したが幼生が表層まで浮上し、海流によって輸送される過程で成長し、3カ月ほどかけ再び海底に着底し、資源加入を果たす。浮遊幼生期は遊泳能力も弱く、基本的には海流の状況によって輸送場所や着底場所が変わってしまうような不安定な生活史を有する。そのため、その年の流動環境によって、資源加入に寄与する海域も変化する。そこで、従来の保護効果をさらに高める策として、動的海洋保護区の導入を提案したい(図22)。動的海洋保護区とは、毎年流動環境に合わせて、資源加入に寄与する海域を特定し、既往の保護区に加えて保護することで、保全効果の向上を図るものである。動的海洋保護区の導入によって20%程度保護効果が高まるといった結果も得られている。

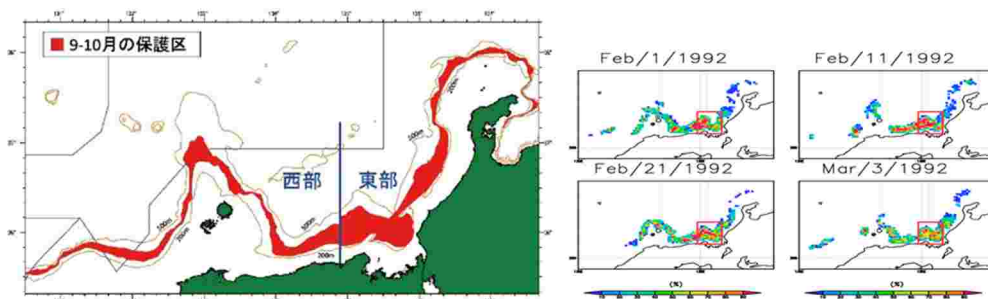


図22 従来のズワイガニの海洋保護区(左)と動的海洋保護区(右)

従来の保護区は、対象とする海域と時期が固定されているが、最も資源加入に帰する産卵場所や時期はそれとは異なる場合があるため、その海域を動的海洋保護区として追加的に保全する。

## 2) 富山湾低次生態系モデルの開発

富山湾低次生態系モデルを新たに開発し、サブテーマ(1)で定められた、富山湾沿岸海域管理に向けた基本方針に基づき、シミュレーションを行い、モデルの解析結果をサブテーマ(1)に提供した。

まず、河川や海底湧水により供給される栄養塩が、富山湾の生産性にどれくらい寄与しているのかを定量的に示すため、河川・海底湧水の流入のオンオフ実験を行い、両者の効果を求めた。

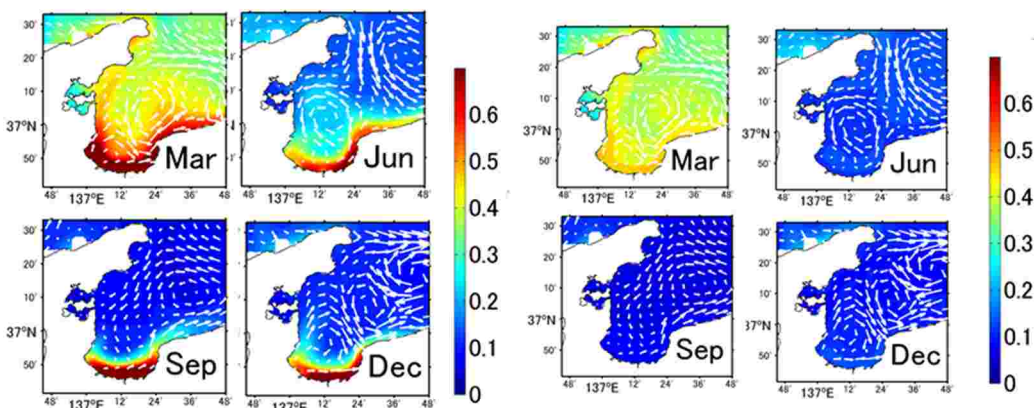


図23 河川流入あり(左)と流入無し(右)の条件における富山湾表層におけるクロロフィル濃度

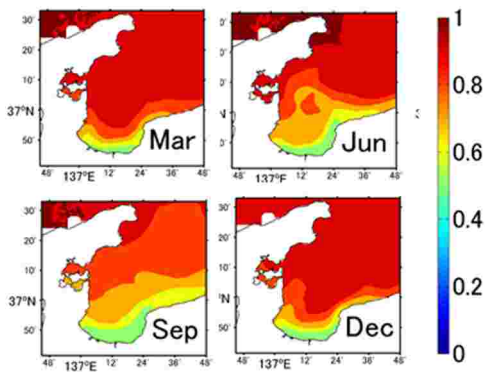


図24 海底湧水流入を除いた場合の富山湾の栄養塩 (DIN) 濃度の減少率

図 23 に示したように、富山湾への河川 (主要 5 河川) の流入負荷が無くなることにより、6 月から 12 月にかけての沿岸域における生産性は著しく減少する。冬季は海面冷却に伴う鉛直混合により深層から栄養塩が供給されることで、表層でも植物プランクトンの増殖は可能であるが、海水温の上昇に伴い成層が発達した期間は、深層からの栄養塩供給も途絶え、表層の栄養塩が枯渇し、植物プランクトンが増殖できない環境となる。このことから、富山湾沿岸域の生産性に、河川による栄養塩供給の貢献が非常に大きいことが明らかである。一方で、冬季の沿岸域に比較的高いクロロフィル濃度が検出されているのは、海底斜面に沿った湧昇により、高栄養塩の下層水が表層に供給されていることによるものである。

一方で、海底湧水による栄養塩の供給の効果も非常に大きいことが明らかとなった (図 24)。河川のオンオフ実験と比べ、海底湧水による影響は湾全体にまで及びていることが示唆された。本実験では、海底湧水により、河川負荷と同程度の栄養塩負荷のみを与えており、淡水の流入は無視しているが、富山湾沿岸で半分程度に栄養塩濃度が減少し、沖側においても 20 ~ 30% も減少する様子が捉えられている。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

#### 【地球温暖化の影響】

地球温暖化に伴い、日本海の環境が将来どのように変化するか、海水温、物理環境、栄養塩環境、低次生態系について将来変動を初めて予測した。その結果、日本海の海水温は今後も上昇し、RCP8.5のシナリオでは、2100年に日本海南部で平均2.75、北部で平均3.13 上昇する。局所的には8 以上も上昇する海域も見られ、日本海が温暖化に対して非常に脆弱な海域であることが明らかとなった。日本海が他の海域に比べ特に海水温上昇が速い要因の一つとして、対馬暖流が係っていることも明らかとなった。

また、これまでの研究では、温暖化に伴い日本海の深層における溶存酸素の低下、貧酸素化が進行すると報告されているが、対馬暖流による高塩分水の流入の増加が、鉛直混合を維持し、深層の酸素濃度の低下を抑制するといった新たな知見も得られた。

#### 【日本海と東シナ海の関係】

日本海沿岸と東シナ海の関係性を初めて定量的に示した。日本海沿岸の海水や栄養塩 (日本海沿岸西部海域で90%、日本海東部沿岸で60 ~ 80%) が東シナ海に由来することを明らかにした。

東シナ海からの栄養塩の主な供給源は、黒潮・太平洋垂表層に由来するものであり、中国河川からの栄養塩は東シナ海底層を介して、日本海に供給されていることを明らかにした。

#### 【日本海の海洋生物の保全】

スルメイカ・ズワイガニの卵幼生の輸送経路、生残環境が、地球温暖化の影響を受け大きく変化し、将来その分布海域が北上することを明らかにした。

スルメイカの産卵場は地球温暖化による海水温の上昇に伴い、九州西方沖に集中することを予測した。

### 【富山湾物質循環】

富山湾の外洋から影響を受ける領域と陸域から影響を受ける領域の変化を定量的に示すとともに、春から秋にかけての栄養塩供給が河川及び海底湧水に依存していることを示した。地球温暖化の影響で、陸から海の水循環に変化が生じており、その影響が将来的に沿岸域の生産にも影響を及ぼす可能性を示した。

## (2)環境政策への貢献

### < 行政が既に活用した成果 >

富山県地下水指針(平成30年3月改定)において、気候変動に伴う地下水環境への影響に関する調査・研究の推進が盛り込まれた。

### < 行政が活用することが見込まれる成果 >

#### 【日本海三階層管理・日本海共同監視網の構築】

日本海は世界でも地球温暖化の影響を最も強く受けている海域であるが、気候変動シナリオによっては影響がさらに加速することが明らかとなった。日本海は海洋資源の供給元、国際海運航路の利用など、我が国にとって極めて重要な海域であり、本海域の保全是わが国の国益に直結する問題である。しかしながら本海域の保全には関係国との連携が必要であり、本研究結果を基に、関係国との連携、更には国際共同監視網の構築が進められることが期待される。

#### 【東シナ海共同管理・静的・動的海洋保護区】

日本海の生物は、地球温暖化の影響を受け、分布や産卵場所、輸送・回遊経路など生活史に大きな変化が起きる可能性がある。我が国の従来の水産資源保護を前提とした対応では対処できない場合も起こりうる。生物多様性条約愛知目標や、SDGでは海洋生物の保全、持続的利用が掲げられている。本プロジェクトで提案した東シナ海共同管理や動的海洋保護区は、我が国の目標達成に向けた取組みのみならず、世界的にも取り組みが遅れている共同管理の先進的な事例となりうるものである。

#### 【地下水を加えた森里川海】

地下水や海底湧水が沿岸環境に係っている海域は富山湾だけでなく、東北鳥海山麓沿岸、駿河湾、瀬戸内海など日本各地に存在する。多くの海域で沿岸の生産性への寄与が報告されており、表層の水循環だけではなく、地下水を含めた陸-海の水循環を保全することで、より豊かな沿岸環境の創造につながると考えられる。環境省が推進する「つなげよう 支えよう森里川海」プロジェクトに地下水・海底湧水が今後加えられ、多くの地域で総合的な水循環管理が実施されることが期待される。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### < 査読付き論文 >

- 1) B. Zhang, J. Zhang and T. Yoshida (2017): Temporal variations of groundwater tables and implications for submarine groundwater discharge: a 3-decade case study in central Japan, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3417-3425
- 2) 吉田尚郁・張 勁・森本昭彦・柴野良太・広瀬直毅・高山勝巳・郭 新宇・王 玉成・眞野 能・吉江直樹 (2018): 日本海三階層管理の提案、沿岸海洋研究、56、31-38
- 3) Kodama, T., Morimoto, A., Takikawa, T., Ito, M., Igeta, Y., Abe, S., Fukudome, K., Honda, N., Katoh, O. (2017): Presence of high nitrate to phosphate ratio subsurface water in the Tsushima Strait during summer. *J. Oceanography*, 73 (6), 759-769.
- 4) H. Kim, 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. Oceanogr.*, <https://doi.org/10.1007/s10872-018-0497-6>
- 5) X. Mao, X. Guo, Y. Wang and K. Takayama (2019): Influences of global warming on the larval survival and transport of snow crab (*Chionoecetes opilio*) in the Sea of Japan. *Sustainability*, 11, 2198, doi: 10.3390/su11082198

### (2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) T. Yoshida: Regional Workshop "Setting Ecological Quality Objectives for the NOWPAP Region", Busan, Republic of Korea, 2014,  
New Project for Integrated Management of Japanese Coastal Area,
- 2) 高山勝巳・広瀬直毅・鬼塚 剛: 2014年度九州沖縄地区合同シンポジウム「東シナ海およびその周辺海域のリモートセンシングによる気象・海洋観測」、沖縄、2014  
東アジア縁辺海物理・生態系結合モデルの開発
- 3) 伊藤雅・森本昭彦・石坂丞二・高山勝巳: 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「東シナ海の循環と混合に関する研究」、福岡、2015  
対馬海峡を通過する栄養塩量の変化に伴う日本海の植物プランクトン量の変化
- 4) 吉田尚郁・刘 茜・張 勁・森本昭彦・石坂丞二・伊藤雅・広瀬直毅・高山勝巳・郭 新宇・吉江直樹: 日本海洋学会2015年春季大会、東京海洋大学、2015  
国際的閉鎖性海域・日本海の海域管理法の開発
- 5) 高山勝巳・広瀬直毅・鬼塚 剛: 日本海洋学会春季大会シンポジウム「豊かな魚類生産を支える黒潮 - その生物生産の仕組みと変動機構 - 」、東京海洋大学、2015  
東アジア縁辺海の河川栄養塩供給変化に対する低次生態系の応答
- 6) Q. Liu, J. Zhang and T. Yoshida: 18th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, Okinawa, 2015  
Seasonal and inter-annual changes of land-based (river and submarine groundwater discharge) dissolved inorganic C, N into the inner Toyama Bay, central Japan,
- 7) M. Ito, A. Morimoto, J. Ishizaka, and K. Takayama: 18th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, Okinawa, 2015  
Variation in phytoplankton biomass in the Japan/East Sea due to nutrient transport through the Tsushima/Korea Strait,
- 8) K. Takayama, N. Hirose and G. Onitsuka: 18th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, Okinawa, 2015  
Opposite response of phytoplankton to the variation of river nutrient discharge in the East Asian marginal seas
- 9) X. Guo, Y. Wang, T. Kubota, N. Yoshie: The 18th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, Okinawa, 2015  
Understanding interannual variations of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) resources in the Japan



## Sea and South of Japan

- 10) N. Yoshie, X. Guo, Y. Wang, and T. Kubota: Japan Geoscience Union Meeting 2015, Chiba, 2015  
Numerical analysis of controlling factors of the interannual variations of Japanese common squid around Japan,
- 11) 伊藤雅・森本昭彦・石坂丞二・高山勝巳:研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」、北海道、2015  
対馬海峡を通過する栄養塩量の変化に伴う日本海の植物プランクトン量の変化、
- 12) 吉田尚郁・張 勁・刘 茜・広瀬直毅・高山勝巳:日本海洋学会2015年度秋季大会、松山、2015  
日本海表層の水塊形成メカニズム
- 13) 伊藤雅・森本昭彦・高山勝巳・石坂丞二:日本海洋学会2015年度秋季大会、松山、2015  
対馬海峡を通過する栄養塩量の変化に伴う津軽海峡西方沖の植物プランクトン量の変化
- 14) 高山勝巳・広瀬直毅・鬼塚剛:2015年度日本海洋学会秋季大会、松山、2015  
モデル高解像度化にともなう低次生態系の応答変化
- 15) X. Guo, Y. Wang, T. Kubota, and N. Yoshie: PICES 2015 Annual Meeting, Qingdao, 2015  
Modeling interannual variations of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) resources around Japan
- 16) 伊藤雅・森本昭彦・高山勝巳・石坂丞二:「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」、福岡、2015  
対馬海峡を通過する栄養塩量が日本海の低次生態系に与える影響
- 17) 高山勝巳・広瀬直毅・鬼塚剛:2015年度九州沖縄地区合同シンポジウム「海洋表層の物理過程と海洋生態系・水産資源」、長崎、2015  
モデル解像度の違いで生じる日本海の生態系応答の変化
- 18) 久保田泰士・郭新宇・王玉成・吉江直樹:日本海洋学会2016年度春季大会、東京、2016  
日本海西部海域におけるズワイガニ幼生の輸送シミュレーション
- 19) H. Kim, N. Hirose and K. Takayama: the Korean Society of Oceanography 2016 meeting, Pusan, 2016  
Simulation of DO using a physics-ecosystem coupled model of the East/Japan Sea
- 20) T. Yoshida, Q. Liu, J. Zhang, K. Takayama and N. Hirose: EM ECS '11 SeaCoasts XXVI Joint Conference, St Petersburg, Russia, 2016  
Management for sustainable use of international semi enclosed sea, Sea of Japan,
- 21) J. Zhang: EM ECS '11 SeaCoasts XXVI Joint Conference, St Petersburg, Russia, 2016  
Food web characterization using carbon and nitrogen isotope analysis in the Toyama Bay and the Sea of Japan
- 22) A. Morimoto, M. Ito, R. Shibata and J. Ishizaka: EM ECS '11 SeaCoasts XXVI Joint Conference, St Petersburg, Russia, 2016  
Impact on lower trophic ecosystem in the Japan Sea associated with nutrient transport change through Tsushima Strait,
- 23) X. Guo, Y. Wang, T. Kubota and N. Yoshie: EM ECS '11 SeaCoasts XXVI Joint Conference, St Petersburg, Russia, 2016  
On the interannual variations of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) resources in the Japan Sea
- 24) 高山勝巳・金海珍・広瀬直毅・鬼塚剛:日本海洋学会2016年度秋季大会、鹿児島、2016  
物理-生態系結合モデルによる日本海の溶存酸素濃度の再現性
- 25) 柴野良太・森本昭彦・高山勝巳・伊藤雅:2016年水産海洋学会研究発表大会、東京、2016  
河川供給に伴う日本海における栄養塩動態に対する影響評価
- 26) 久保田泰士・郭新宇・王玉成・吉江直樹 第2回沿岸生態系の評価・予測に関するワークショップ、愛媛、2016  
日本海西部海域におけるズワイガニ幼生の経年変動とその要因
- 27) 柴野良太・森本昭彦・高山勝巳・伊藤雅 第2回沿岸生態系の評価・予測に関するワークショップ、愛媛、

2016

日本海低次生態系への東シナ海からの栄養塩輸送の影響

28) 高山勝巳・広瀬直毅・吉田尚郁:日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会, 福岡, 2016

100年後の日本海水温・生態系予測、

29) 吉田尚郁:東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「陸と海と人と-里海」、千葉、2017

日本海における三階層管理

30) T. Yoshida: The 4<sup>th</sup> International Workshop on Sustainable Use of International Semi-Enclosed Sea, Japan Sea

Management for Sustainable Use of International Semi-Enclosed Sea, Japan Sea

31) 吉田尚郁・張 勁・森本昭彦・柴野良太・広瀬直毅・高山勝巳・郭新宇・吉江直樹・王玉成・久保田泰士・眞野能:2017年日本海洋学会秋季大会 沿岸海洋研究会シンポジウム、仙台、2017

日本海海域管理法

32) 吉田尚郁・広瀬直毅・高山勝巳:2017年日本海洋学会秋季大会、仙台、2017

日本海における黒潮系水及び台湾暖流系水の挙動

33) 森本昭彦・柴野良太・高山勝巳:九州大学応用力学研究所共同利用研究集会、福岡、2017

低次生態系モデルによる対馬海峡栄養塩起源の推定

34) 柴野良太・森本昭彦・高山勝巳・伊藤雅:2017年日本海洋学会秋季大会、仙台、2017

対馬暖流による栄養塩輸送が日本海へ及ぼす影響

35) 高山勝巳:2017年日本海洋学会秋季大会、仙台、2017

日本海の水温と栄養塩濃度の長期予測

36) 高山勝巳:2017年度水産海洋学会研究発表大会、広島、2017

対馬海峡の栄養塩はどこから来ているのか？

37) Y. Wang, X. Guo and N. Yoshie: 10<sup>th</sup> WESTPAC International Science Conference, Qingdao, China, 2017Study on the interannual variations of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) resources in the Japan Sea

38) R. Shibano, A. Morimoto, K. Takayama and M. Ito: 2018 Ocean Science Meeting, San Diego, USA, 2018

"Impact of nutrient transport through Tsushima Straits on the ecosystem in Japan Sea"

39) 柴野良太・森本昭彦・高山勝巳・滝川哲太郎・伊藤雅:水産海洋学会研究発表大会、千葉、2018

対馬海峡を経由し日本海へ供給される栄養塩の年々変動及び生態系への影響

40) 森本昭彦・柴野良太・高山勝巳・伊藤雅・滝川哲太郎:北海道大学低温科学研究所研究集会:宗谷

暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム、札幌、2018

対馬海峡を通過し日本海へ供給される栄養塩の起源

41) T. Yoshida, J. Zhang, A. Morimoto, R. Shibano, N. Hirose, K. Takayama, X. Guo, Y. Wang and T. Mano:

EM ECS12 Conference, Pattaya, Thailand, 2018

"Land-ocean integrated management of Toyama Bay in the international semi-enclosed sea, Japan Sea"

42) A. Morimoto, R. Shibano, K. Takayama and T. Takikawa: EM ECS12 Conference, Pattaya, Thailand, 2018

"Interannual variability in nutrient transport from the East China Sea to the Japan Sea"

43) 森本昭彦・柴野良太・高山勝巳:金沢大学・環日本海域環境研究センター共同利用シンポジウム:

海流が繋ぐ日本周辺縁辺海の海洋循環・物質循環の変動機構、金沢、2019

東シナ海から日本海へ流入する栄養塩の起源

44) Takayama, Katsumi and Naoki Hirose, Water in the deep layer of the Japan Sea will not anoxic in the next century, 20th Pacific-Asian Marginal Seas meeting (PAMS 2019), 2019.03

45) Kim, Haejin, Katsumi Takayama, and Naoki Hirose, Biological contributions to the long-term decreasing trend of DO concentration in the deep layer of the Japan Sea, 20th Pacific-Asian Marginal Seas meeting (PAMS 2019), 2019.03

## 7.研究者略歴

### 研究代表者

吉田 尚郁

福井県立大学生物資源学部卒業、東京大学大学院農学生命科学研究科、博士(農学)  
現在、公益財団法人環日本海環境協力センター 主任研究員

### 研究分担者

#### 1) 森本 昭彦

愛媛大学大学院工学研究科博士前期課程修了、名古屋大学地球水循環研究センター 准教授、現在、愛媛大学沿岸環境科学研究センター 教授

#### 2) 広瀬 直毅

九州大学大学院総合理工学研究科修了、カリフォルニア工科大学 博士研究員、九州大学応用力学研究所 助教授、現在、九州大学応用力学研究所 教授

#### 3) 郭 新宇

愛媛大学大学院理工学研究科修了、愛媛大学沿岸環境科学研究センター 准教授、現在、愛媛大学沿岸環境科学研究センター 教授

## II.成果の詳細

### - 1 国際的閉鎖性海域の管理法提案

公益財団法人環日本海環境協力センター  
地域活動センター

吉田尚郁  
張 勁  
刘 茜 (平成26~28年度)  
張 兵 (平成28年度)

平成26～30年度累計予算額 36,104千円

(うち平成26年度 :8,554千円、平成27年度 :8,063千円、平成28年度 :8,007千円、平成29年度 :5,885千円、平成30年 :5,595千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

#### 【要旨】

日本海は複数の国々によって囲まれる国際的な閉鎖性海域である。本海域の管理には我が国のみならず、関係する国々との連携が必要不可欠である。一方で、日本海は近年、大きな環境変化にさらされている。一つは地球温暖化であり、日本海は世界的にも地球温暖化に伴う海水温上昇速度が特に速い海域のひとつである。もう一つは、日本海上流に位置する東シナ海の近隣諸国の急速な経済発展に伴う環境変化である。これらの変化に対し、関係諸国との連携も視野に入れた日本海沿岸海域管理法を検討する必要がある。本研究では、サブテーマ(2)-1、-2、(3)で開発された日本海低次生態系モデル、日本海高次生態系卵幼生輸送生残モデルにより得られた日本海の環境や生態系に関する新たな知見に基づき、日本海の環境に及ぼす影響を評価し、日本海沿岸海域の保全において取るべき適応策について検討した。

日本海が直面する地球温暖化や東シナ海からの影響に適応していくためには、日本海三階層管理を導入する必要があることを提案した。日本海三階層管理とは、東シナ海・日本海を対象とする広域管理と、対馬暖流内側域を対象とした中規模管理、個別の沿岸域での局所管理、3つの異なる空間スケールの管理を組み合わせたものである。地球規模の環境変動や海域間の越境問題には、関係諸国と連携した国際共同監視網を構築し対処する。日本海内部においては道府県を越えた対馬暖流監視網を構築することで、対馬暖流の変動、地球温暖化等の沿岸域への影響を早期に把握する体制を整える。地球温暖化や東シナ海からの影響を受ける中、個々の沿岸域の特性を踏まえた陸海統合管理で適応していく必要がある。

具体的には、地球温暖化に伴う海水温上昇、東シナ海-日本海間の栄養塩輸送、東シナ海からの化学汚染物質輸送など着目すべき事象に合わせた監視網を設けることが重要である。日本海の水産資源の持続的利用や生物多様性の保全の観点から、新たな保全策である静的・動的海洋保護区の設置や東シナ海共同管理を実施することで、より高い保全効果が期待される。局所管理では、それぞれの地域の特性や実情に合わせた陸海統合管理を展開していくことが重要で、日本海の中央部に位置する開放性内湾である富山湾では、地下水を含めた新たな森里川海の物質循環管理が効果的である。

#### 【キーワード】

国際的閉鎖性海域、地球温暖化、東シナ海、国際連携、北西太平洋地域海行動計画、富山湾

#### 1.はじめに

日本海は地球温暖化に伴い、過去100年間で1℃以上も海水温が上昇している。これは世界の平均海水温上昇速度の2～3倍の速度であり、日本海の環境や生息する生物への影響が懸念される。一方、日本海の上流域には東シナ海が位置し、対馬海峡を通じて絶えず海水や物質が輸送されてくる。東シナ海の環境は、中国をは

はじめとする近隣諸国の経済発展や人口増加など社会情勢の急激な変化により大きく変貌し、日本海に及ぼす影響が危惧されている。このような中、環境省環境研究総合推進費戦略研究プロジェクトS-13が、我が国の沿岸域管理の在り方を示すために開始され、日本海が研究対象海域のひとつに組み込まれた。日本海が直面する様々な変化の影響について、そのメカニズムや重大性・確実性を科学的知見に基づき評価し、関係諸国とより強固な協力関係を築き上げること、地球規模や地域規模の変化に適応するための我が国の沿岸海域の保全策を示すことが強く求められている。

## 2. 研究開発目的

日本海が直面する、地球温暖化と東シナ海的环境変動に着目し、これらの変動が将来の日本海的环境や生態系に及ぼす影響を明らかにし、影響の未然防止や低減、変化への適応策を示すことが本研究プロジェクトの目的である。そこで、日本海への影響メカニズムを解明するための生態系モデルをサブテーマ(2)-1、(2)-2、(3)で開発する。サブテーマ(2)-1は、東シナ海-日本海間の栄養塩輸送メカニズムの解明、サブテーマ(2)-2は、地球温暖化及び中国からの栄養塩排出に関する将来変動予測、サブテーマ(3)は、日本海高次生態系への環境変動の影響解明と役割を明確化した。得られた成果に基づき、予測・監視・管理の観点からサブテーマ(1)で効率的・効果的な日本海沿岸海域管理を検討し提案する。

## 3. 研究開発方法

### (1) 現場データセット及び将来変動予測に向けた変動シナリオの作成

生態系モデルのデータ同化及び実験結果の検証のため、東シナ海及び日本海の既存の観測データを整備するとともに、調査航海を実施し、新たなデータの蓄積を進めた。整備したデータは生態系モデルの開発を進める他のサブテーマと共有した。

本プロジェクトでは、2100年の日本海的环境や生態系の変動予測を試みる。そこで、将来予測を行う際に使用する、変動シナリオを作成し、サブテーマ(2)-1、(2)-2と共有した。

### (2) 日本海沿岸域の水塊特性の把握

東シナ海から日本海への栄養塩の供給メカニズムについては、サブテーマ(2)-1で研究が進められているが、それ以外の環境項目に関する日本海と東シナ海の関係性を把握することを目的に、日本海沿岸域の水の起源について解明を試みた。方法は、日本海沿岸域に存在する海水の起源と考えられる5つの起源水、黒潮系水(北緯24度、東経121-125度から流入する黒潮に由来する海水)、台湾暖流系水(北緯24度の台湾海峡から流入する台湾暖流に由来する海水)、東シナ海陸域起源水(東シナ海陸域から流入する陸域起源の淡水)、日本海陸域起源水(日本海の陸域から流入する陸域起源の淡水)および日本海深層水(水深100m以深の深層水)を設定し、それぞれの起源水がどれくらいの割合で日本海沿岸域に分布するのか、サブテーマ(2)-2のシミュレーション結果をもとに解析した。

### (3) 地球温暖化、東シナ海的环境変動の日本海への影響評価

サブテーマ(2)-1、(2)-2、(3)から得られた結果に基づき、日本海への地球温暖化及び東シナ海的环境変動の影響評価を試みた。2015年に環境省中央環境審議会は「日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について(意見具申)」を作成している。本意見具申では、地球温暖化の影響が世界各地、日本各地で報告される中、我が国においてその影響への対処(適応)を示す「適応計画」を取りまとめたものである。地球温暖化が日本にどのような影響を及ぼすのか、その影響の程度、可能性(重大性)、影響の発現時期や適応の着手・重要な意思決定が必要な時期(緊急性)、情報の確からしさ(確信度)を科学的観点からまとめている。本報告を参考に、本プロジェクトで明らかとなった新たな知見をもとに、地球温暖化が日本海的环境や生態系に及ぼす影響、東シナ海的环境変動が日本海的环境にもたらす影響について、影響の程度や可能性、緊急性の評価を試みた。

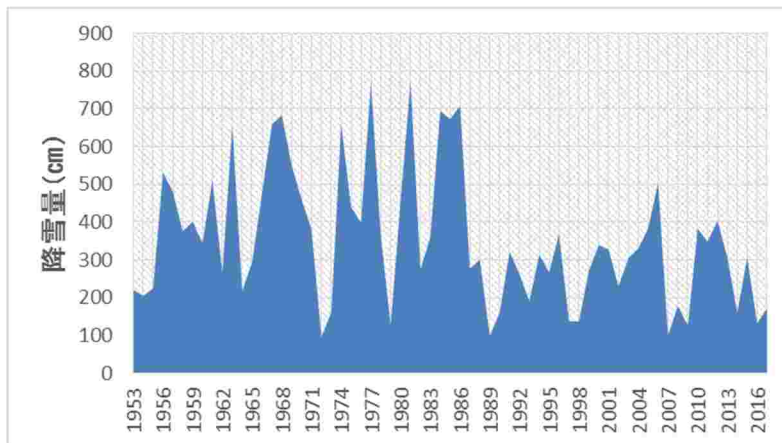
### (4) 日本海沿岸域管理手法の検討

本テーマに与えられた役割は、日本海沿岸域管理手法を提案することである。そのために、地球温暖化や東シナ海的环境変動が日本海的环境や生態系に及ぼす影響とそのメカニズムの解明に取組み、効果的・効率的な管理手法を検討した。

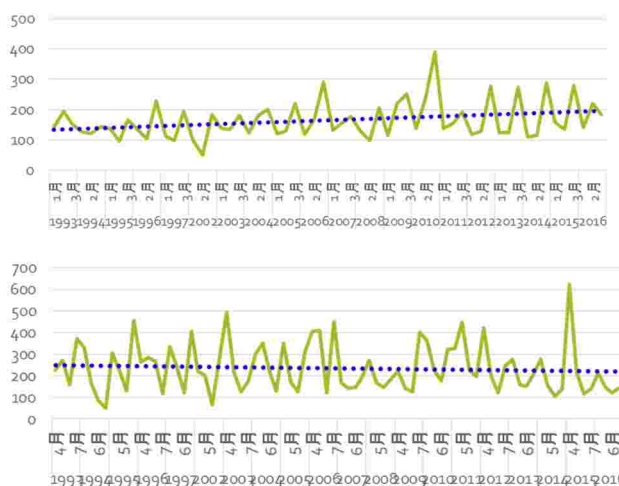
#### (5) 富山湾陸海統合管理手法の検討

日本海沿岸域管理手法を提案するにあたり、沿岸域における具体的な管理の在り方を検討するため、富山湾を対象海域に定め、陸海統合管理を検討した。富山湾を対象海域に選定した理由は、ひとつは陸域からの影響と、外海や対馬暖流の影響のバランスの観点からである。これまでの研究により、日本海の沿岸域は対馬暖流を通じて東シナ海からの影響を強く受けていることが判明した。富山湾は日本海の中央部に位置する開放的な内湾であり、対馬暖流の影響を適度に受けているほか、湾には大小300もの河川が流入しており、陸域からの影響も強く、陸海統合管理を検討するのに適した海域と考えられる。もう一つは、富山県は非常に水資源に恵まれた地域であり、豊富な地下水が海底湧水として沿岸部に湧き出すなど、陸域の水資源と海洋環境の関係も強い。そのため、陸域での水循環管理が海洋環境の保全に有効な地域であると考えられる。

しかしながら、近年は地球温暖化の影響を受けて、豊かな水循環に変化が表れている。県内の豊かな水資源は山間部に降り積もった雪が自然のダムとしての機能を果たし、年間を通じた豊富な淡水を供給してきた。しかし近年は冬季の降雪量が減少し(図(1)-1)、降雨に変わり、山岳地帯に蓄えられた雪による貯水機能が失われつつある。これに伴い、冬季の河川流量が増加し、春から夏の河川流量が減少する傾向が見られている(図(1)-2)。



図(1)-1 富山県内の降雪量の経年変化



図(1)-2 神通川における河川流量の経年変化

上図：冬季、下図：夏季

更に、社会環境にも変化が見られる。他の地域と同様、都市部に人口が集中する一方、田畑などの耕作地は減少し、土地利用が大きく変化した。特に、地下水の涵養の効果が期待される水田面積はこの30年で半減する一方、都市部では、冬場に積もった雪を解かず融雪水として地下水が大量に使われ、一時的に地下水位が低下するような事態も生じている。土地利用や地下水の利用など、社会環境の変化が陸域の水循環に影響を及

ぼしている。このような陸-海の水循環の変遷が海洋環境にどのような影響を及ぼすのか明らかにし、それに対する適応策、すなわち富山湾陸海統合管理手法を提示していくことが重要である。

富山湾陸海統合管理手法の検討にあたっては、サブテーマ(3)と連携して進めた。サブテーマ(3)で富山湾の物質循環や陸域と海域の関係解明のために用いる富山湾低次生態系モデルの開発を担当し、サブテーマ(1)において、陸域の水循環の変化や、行政で取組まれている様々な施策を踏まえた陸海統合管理手法の検討を担当した。富山湾低次生態系モデルの詳細については、サブテーマ(3)に示す。なお、陸海統合管理手法の検討にあたって、次の手順で進めることとした。

豊かな陸域の水資源やそれに伴う海域への物質供給が、実際に富山湾沿岸域の環境や生産性にどれくらい寄与しているのかを把握する。

自然・社会環境の変化による水循環の変化が沿岸海洋環境や生産性に及ぼす影響を把握する  
変化した、もしくは今後変化する水循環の影響を低減するための適応策を検討する

#### (6) 研究の効果的・効率的推進

本研究テーマを効率的に進め、行政ニーズに合致したより有益な成果を得ること、サブテーマ間の連携を密にすることを目的に、アドバイザーボード会合を年2回開催した。開催にあたっては、外部有識者をアドバイザーとして委嘱した。委嘱したアドバイザーは以下の2名である。

蒲生 俊敬(東京大学 名誉教授)

桜井 泰憲(北海道大学 名誉教授)

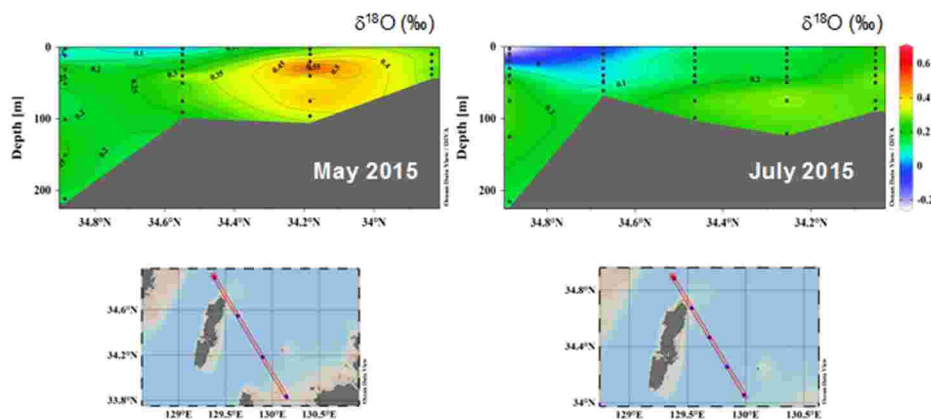
また、本研究により得られた成果に基づき、日本海の海洋環境保全に向けた国際連携の発展に資することを目的に、関連する国際機関の会議やワークショップなどで、情報共有を図るとともに、今後の活用に向けた調整を図った。

## 4. 結果及び考察

### (1) 現場データセット及び将来変動予測に向けた変動シナリオの作成

東シナ海から日本海にかけての既往の観測データ(水温、塩分、栄養塩)を整理するとともに、新たに東シナ海及び日本海において、溶存酸素、クロロフィルa、栄養塩、酸素同位体・希土類の観測を実施した。採取した試料は分析し、データセット化し、他のサブテーマと共有し、モデルのデータ同化やシミュレーション結果の検証等に用いた。

サブテーマ(2)-2において、黒潮・太平洋亜表層起源の栄養塩が、日本海に流入する栄養塩の起源のひとつであることが明らかになり、黒潮系水が対馬海峡中・下層から流入している状況が再現された。本サブテーマが対馬海峡で採水した海水の酸素同位体比を分析したところ、サブテーマ(2)-2のモデルの結果を実証するような結果が得られている。



図(1)-3 酸素同位体 ( $^{18}\text{O}$ ) の対馬海峡における鉛直分布

酸素同位体 ( $^{18}\text{O}$ ) は黒潮系水の指標となるもので、高濃度の  $^{18}\text{O}$  は黒潮に由来する海水が存在しているこ

とを示す(図(1)-3)。対馬海峡の東水道の中下層に高濃度の $^{18}\text{O}$ が観測されており、モデルによるシミュレーション結果を観測結果からも示すことができた。

日本海の将来変動予測を行う際の変動シナリオに関しては、IPCC第5次報告書(IPCC 2013)による気候変動シナリオ、中国国内の政策等を参考に、以下の5つのシナリオを準備した。気候変動シナリオと中国栄養塩排出シナリオについては、サブテーマ(2)-2、南水北調に伴う淡水供給変動シナリオについてはサブテーマ(2)-1の生態系モデルにより、その影響の検証を行った。

#### 【気候変動シナリオ】

目的 :気候変動シナリオに基づく気温の上昇が、日本海の物理・化学・生物環境に及ぼす影響を予測すること  
シナリオ1 :今後100年の気温の上昇が1℃に抑えられる気候安定化シナリオ

IPCC第5次報告書で利用された代表的濃度経路(RCP)のRCP2.6を活用

シナリオ2 :今後100年で気温が4℃上昇する気温最大上昇シナリオ

IPCC第5次報告書で利用されたRCP8.5を活用

#### 【中国栄養塩排出】

目的 :東シナ海の栄養塩環境に大きな影響を及ぼすと考えられる、中国の河川からの栄養塩排出の影響について明らかにすること

シナリオ1 :中国河川の栄養塩排出量が今後100年間で+2%の割合で増加し続けるシナリオ

シナリオ2 :中国国内の栄養塩管理が着実に実行され、現状のDNの排出量、 $100\text{mmol/m}^3$ が維持されるシナリオ

#### 【南水北調に伴う淡水供給変動シナリオ】

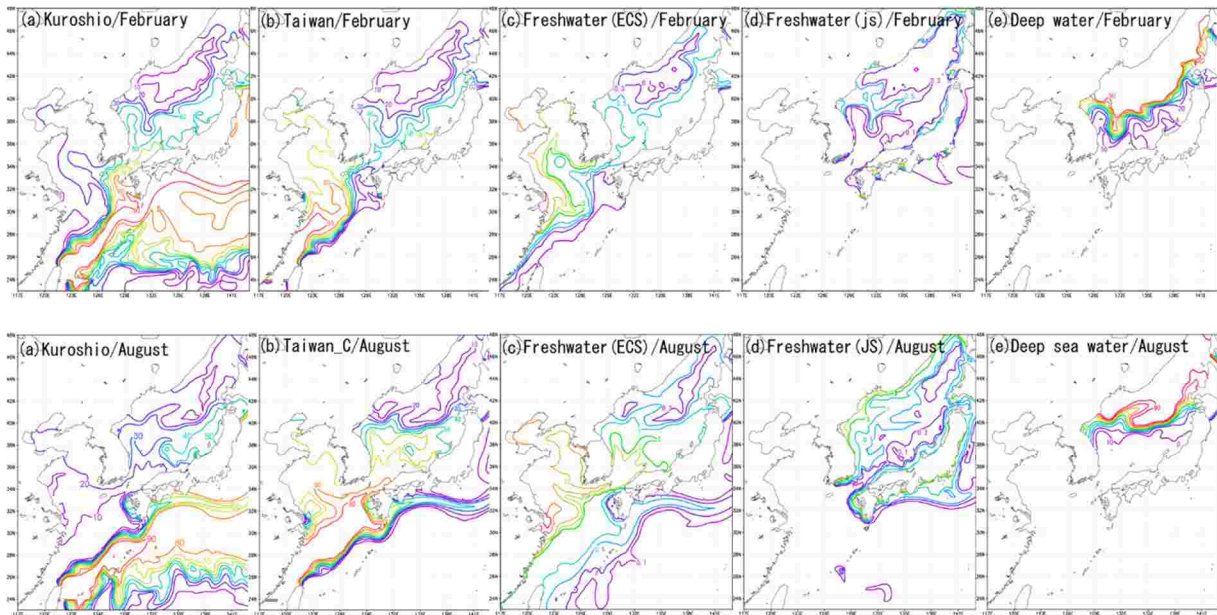
目的 :中国北部の水需要の増加に対応するために建設された大規模運河による長江から北部への淡水供給の運用開始に伴う、東シナ海への影響を明らかにすること

シナリオ :現在、大運河によって北部へと運ばれている $81 \times 10^9\text{m}^3/\text{year}$ の水を、長江から黄河の河川流量に振り替える

### (2)日本海沿岸域の水塊特性の把握

日本海と東シナ海の関係性を把握するために、日本海の沿岸域に存在する海水がどこに起源を有する海水なのか、5つの起源水(黒潮系水、台湾暖流系水、東シナ海陸域起源水、日本海陸域起源水、日本海深層水)を設定し、日本沿岸域での存在率や挙動について解析した。図(1)-4に、各起源水の冬季と夏季の分布を示す。

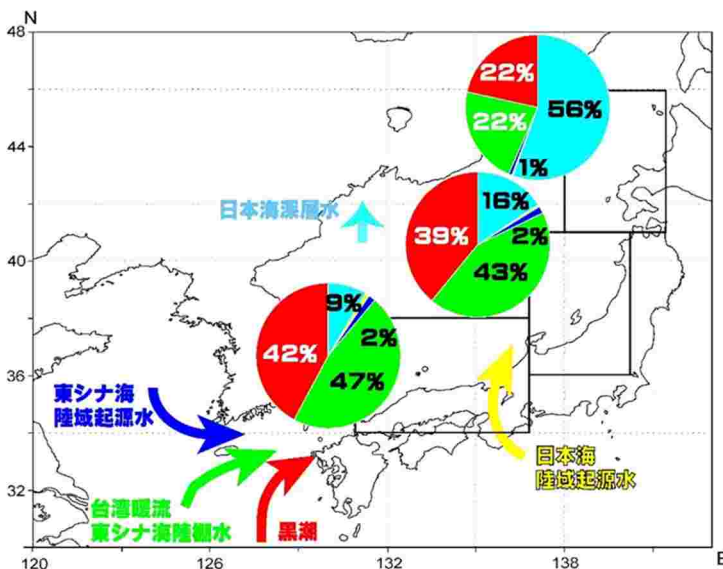




図(1)-4 5つの起源水の冬季(上段)と夏季(下段)の表層における分布

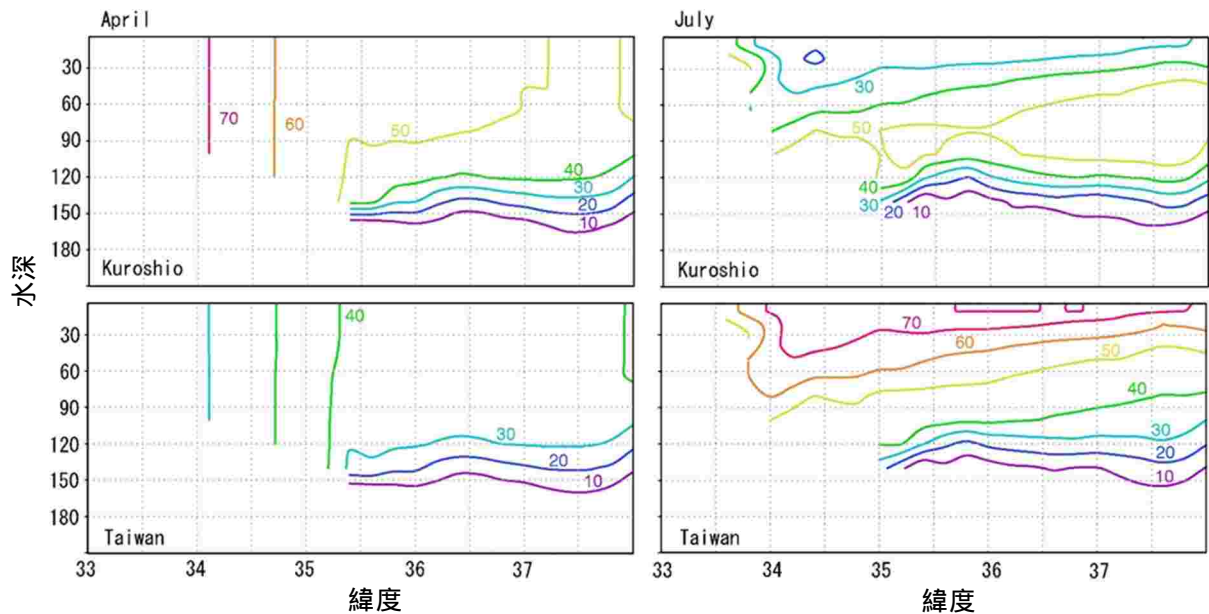
黒潮系水及び台湾暖流系水が日本海南部に広く分布し、極前線以北の日本海北部海域は、日本海深層水由来の海水が大きな割合を占める。陸域に由来する淡水の存在割合は、河川流量の大きな長江河口域を除き全体的に低い割合となっている。

日本海沿岸域を日本海西部海域、日本海東部海域、北海道沖に分け、それぞれの海域における各起源水の存在率を図(1)-5に示す。日本海西部海域では9割もの海水が対馬海峡を通じて東シナ海から流入した海水であり、日本海東部海域でも8割に達する。北海道沖でも約4割が対馬海峡から流入した海水となっており、日本沿岸域と東シナ海との関係が非常に強いことが定量的に示された。東シナ海に由来する海水として、黒潮系水と台湾暖流系水がほぼ同じ割合を占めるが、その挙動には大きな違いが見られる。台湾暖流系水は5月から日本海に流入が始まり、夏から秋にかけて継続する。冬季(12月)になると黒潮系水の流入が強まり、対馬海峡東水道から日本海へと入り込み冬から春にかけて日本沿岸を流下する。



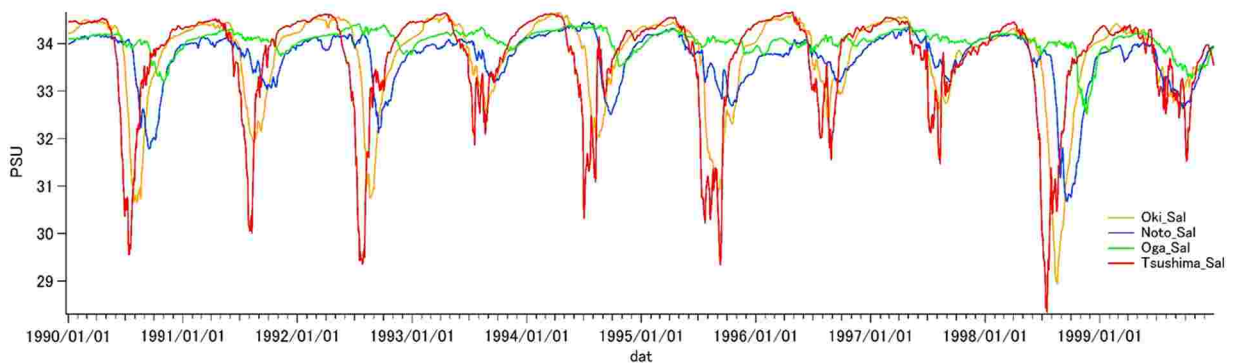
図(1)-5 日本海沿岸域における5つの起源水の存在割合

両者の対馬海峡における水平・鉛直的な分布はさらに興味深い特徴を示す(図(1)-6)。黒潮系水が流入する間、対馬海峡東水道を黒潮系水、台湾暖流系水は対馬海峡西水道と水平的に、流入場所を棲み分けている。一方、台湾暖流系水の流入が強まる間は、台湾暖流系水が表層、黒潮系水が中・下層と、流入する水深が異なる。これは、夏季の台湾暖流系水は低塩分化していることが原因である。



図(1)-6 東経130度線における黒潮系水(上)及び台湾暖流系水(下)の鉛直分布  
左図が4月、右図が7月の分布を示す。

我々が特に注目したのは、この台湾暖流系水の挙動である。台湾暖流系水は台湾海峡を通過後、東シナ海の陸棚上、中国の沿岸域を北上し、対馬海峡へと流れ込む。長江の河川流量が増加する春から夏には、大量の河川水を取り込み、塩分が大きく低下した状態で日本海に流入する。この低塩分水は日本海沿岸に沿って北上し、東北沖でも確認することができる(図(1)-7)。また、塩分の低下の度合いは、長江の河川流量に対応しており、長江の流量が増加した1998年には、日本海でも29psuを下回る低塩分水が確認された。中国沿岸域や河川水には、高濃度の残留性有機汚染物質(POPs)が存在していることが知られている。対馬暖流が東シナ海から日本海へのPOPの輸送経路のひとつであることが過去の推進費(5-1306 早川 和一 金沢大学)で報告されており、中国沿岸を北上する台湾暖流系水の挙動に合わせて観測を行うことで、POPの日本海への輸送や動態を効率的に測定できると考えられる。



図(1)-7 日本海沿岸域(対馬、隠岐、能登、男鹿)における塩分の季節変化

### (3)地球温暖化、東シナ海的环境変動の日本海への影響評価

サブテーマ(2)-1、(2)-2、(3)における研究により、日本海が地球温暖化や東シナ海的环境変動の影響に対して、非常に脆弱な海域であり、将来、日本海的环境や生態系に大きな変化をもたらす可能性が示された。これらの成果を基に、日本海への影響の評価を試みた。表(1)-1に地球温暖化による影響評価、表(1)-2に東シナ海的环境変動による影響評価を示す。すでに気象庁によって報告されているように、日本海の海水温は過去100年間で1以上も上昇しているが、このまま温暖化が継続した場合、日本海の海水温も上昇が続くことが予測された。特に、対馬暖流の流路の変化が大きな極前線付近では、局所的に8以上も上昇するなど、日本海的环境に及ぼす影響は深刻である。地球温暖化は日本海の栄養塩の分布や基礎生産にも変化をもたらすこと

が予測された。特に、日本海北部海域で高栄養塩化、基礎生産の増加が予測され、日本海の生物の分布にも何らかの影響を及ぼすと考えられる。本プロジェクトで対象とした日本海を代表する生物である、スルメイカとズワイガニも温暖化の影響を強く受ける。両種とも、日本海的环境に適合した再生産戦略を有しているため、水温分布の変化や対馬暖流の流路変動が、両種の分布や生き残りに大きな変化をもたらす可能性がある。両種とも日本海の沿岸地域にとって重要な水産資源であり、我が国の水産業に大きな影響を及ぼすことが懸念される。

表(1)-1 地球温暖化の日本海への影響評価

分野	項目	現在の状況	将来予測される影響	重大性		緊急性	信頼度	
				観点	判断理由			
環境	日本海(沿岸)	全国207地点の表層海水温データ(1970年代から2010年代)を解析した結果、13地点で優位な上昇傾向(平均:0.039°C/年)にある。	日本海全体の海水温上昇の影響を受け、引き続き水温が上昇することが予測される。温暖化に伴う対馬暖流の流路変動が、沿岸の物理・化学・生物環境を変化させる恐れがある。	◎	環境	日本海沿岸は閉鎖的な内湾が少なく、海洋や対馬暖流の影響を受けやすい。そのため、日本海的环境や対馬暖流の流動が変化すると、その影響を直接的に受けるため。	◎	○
	日本海(全域)	気象庁の報告で、日本海の家表面平均水温は過去100年間で、南部海域で1.29°C、中部海域で1.71°C上昇している。	IPCCの気候変動シナリオRCP8.5に基づいて予測した結果、100年後には日本海南部で2.75°C、日本海北部で3.13°C上昇する。地球温暖化が最も抑制されるシナリオRCP2.6でも、日本海南部で1.56°C、北部で1.04°C上昇することが予測された。温暖化による影響は海水温上昇だけでなく、対馬暖流の流動変動、日本海の栄養塩分布の変化を引き起こし、日本海の低次生態系に大きな影響を及ぼす可能性がある。	◎	環境	すでに上昇している日本海の海水温が、温暖化シナリオによっては加速する可能性があるため。海水温、流況、基礎生産の変化は日本海の生物の分布や回遊を大きく変化させる可能性があるため。	◎	○
生態系	日本海(沿岸)	温暖化に伴う日本海の基礎生産などの低次生態系への影響に関する研究はまだ少ない。日本海の沿岸各所において、海水温の上昇に伴い、低温性の種から高温性の種への遷移が確認されている。	海水温上昇に伴う生物の分布域の変化が懸念される。対馬暖流の流路変動に伴い、生物の回遊や輸送経路にも変化が生じる恐れがある。	◎	環境	環境の変化に伴う基礎生産、生物の分布や移動が大きく変化する可能性があるため。	◎	△
	日本海(全域)	温暖化に伴う基礎生産などの低次生態系への影響に関する研究はまだ少ない。海水温上昇に伴う、南方系種がロシア沿岸などで確認されている。	海水温上昇に伴う生物の分布域の変化が予想される。対馬暖流の流路変動に伴い、生物の回遊や輸送経路にも変化が生じる恐れがある。栄養塩環境の変化が日本海の基礎生産を大きく変化させる恐れがある。	◎	環境	環境の変化に伴う基礎生産、生物の分布や移動が大きく変化する可能性があるため。	○	○
水産業	回遊性生物(スルメイカ)	高水温が要因とされる分布・回遊域の変化が報告されている。	海水温の上昇に伴い、産卵時期及び産卵海域の変化が予測され、資源量にも何らかの影響を及ぼす可能性がある。対馬暖流の流路変動が、幼生の輸送経路や親魚の回遊経路を変化させる恐れがあり、将来漁場が大きく変わる可能性もある。	◎	社会 経済	近年、日本近海のスルメイカ資源の低迷が指摘されており、資源回復に向けた取組みが急務であるため。	◎	○
	定着性生物(ズワイガニ)	非回遊性、生息水深の深い生物の温暖化による影響に関する知見は少ない。生息水深の深い生物は温暖化の影響を受けにくいと思われるが、浮遊幼生期の海洋環境が資源量に影響するといった報告がある。	ズワイガニの生息水深である200~500mでは水温の上昇は予想されておらず、親ガニへの影響は小さいと思われる。一方で、海水温の上昇及び対馬暖流の流況変化が、卵幼生の輸送や生残を変化させ、稚ガニの着底海域が北上するといった予測が得られている。	◎	社会 経済	現在の主要な漁場となっている能登半島以西の海域で着底量が減少し、日本海東部・北部海域で増加することが予測されており、現在の漁業環境が変化する恐れがあるため。	○	○
水環境・水資源	水供給(地下水)	気候変動に伴う降雪量・降雪時期の変化が予測されており、地下水量の変化に何らかの影響を及ぼす可能性がある。	冬季降雪量の減少、融雪時期の早期化に伴い、地下水供給メカニズムに何らかの変化を及ぼす可能性がある。一方で、北陸地方では、冬季降雪時の融雪に地下水が利用されており、都市部の集中で降雪時の過剰利用で一部の地域で地下水の減少も報告されている。	○	社会 経済	最近の研究で、地下水(海底湧水)が沿岸生態系や生産性に寄与していることが報告されており、地下水利用の観点だけでなく、沿岸環境保全の観点からも重要となってきたため。	△	

表(1)-2 東シナ海的环境変動の日本海への影響評価

分野	項目	現在の状況	将来予測される影響	重大性		緊急性	信頼度	
				観点	判断理由			
環境	日本海(沿岸)	中国大陸の河川(長江)に由来する低塩分水が対馬海峡を通じて日本海に流れ込んでいる。この低塩分水が対馬暖流により日本海沿岸に運ばれてきていることが沿岸定置網での塩分観測から示されている。	日本海沿岸の環境は、東シナ海の影響に強く支配されており、東シナ海の影響がそのまま日本海沿岸の環境を変化させる恐れがある。さらに、温暖化を通じて、対馬暖流の流動が強化されることも予測されており、それに伴う東シナ海からの影響をより大きくすることが懸念される。水温上昇、対馬暖流の流路変動に伴い、生物の分布や回遊経路にも変化が生じる恐れがある。中国河川由来の低塩分水は、対馬暖流により、日本海沿岸を北上し、東北沿岸まで達する。この低塩分水は、中国沿岸水を取り込んだものであり、中国沿岸域に存在する残留性有機汚染物質を含み様々な物資の輸送経路となっており、日本沿岸への影響を引き続き監視していく必要がある。	◎	環境 生態系 社会 経済	東シナ海からの影響の定量化を試みたところ、日本海沿岸は特に強い影響を受けていることが示された。日本海沿岸の水塊の起源は東北沿岸でも80%が東シナ海由来の海水であること、基礎生産に利用される栄養塩は、対馬暖流から流入する栄養塩に依存しているため。	◎	○
	日本海(全域)	東シナ海からの影響を定量的に示した研究は少ない。	対馬海峡から流入する栄養塩が変化することで、日本海の広範囲にわたって植物プランクトンの増殖量や時期に変化が生じることが予測された。地球温暖化の影響により、対馬暖流の流路が北上することが予測されており、東シナ海からの影響海域が今後変化する恐れがある。	◎	環境 生態系 社会 経済	温暖化に伴う対馬暖流の変動が、東シナ海からの影響を広範囲へと拡大する恐れがあるため。	◎	○

本プロジェクトでは、東シナ海から日本海への物質輸送に着目し、東シナ海と日本海の関係の定量化を試みた。その結果、当初想定していたよりも、両者の関係がより強固なもので、日本海沿岸域の環境は、東シナ海に支配されていると言えるようなものであった。すなわち、東シナ海の影響が変化すれば、日本海沿岸域の環境もそれに合わせて変化する可能性がある。東シナ海の影響が維持されるようであればいいが、悪化するようなことが起きれば、日本海への影響も計り知れない。対馬海峡を通じた栄養塩の供給量が変化すると日本海の広範囲にわたって基礎生産に変化が生じることが明らかとなっており、東シナ海から日本海への栄養塩輸送については、注視していく必要がある。今回のプロジェクトでは、短期的には中国河川からの栄養塩供給が日本海に及

ばす影響は小さいことが示されたが、東シナ海における底層を介した栄養塩循環については解明しきれていない。今後、どのような形で過去の急激な変化の影響が表れてくるのか、更に観測や研究が進展することが期待される。

#### (4)日本海沿岸域管理手法の検討

日本海は地球温暖化、東シナ海の環境変化の影響を非常に強く受ける海域である。また、両者が複合的に影響を及ぼすこともあり、そのメカニズムは非常に複雑である。多くの影響は、人為的な制御が困難なものであり、如何に適応していくのか、効果や効率性を踏まえた様々なオプションを提示するものが日本海沿岸海域管理手法である。

本研究プロジェクトの成果として、日本海三階層管理の導入を提案する。日本海三階層管理とは異なる3つのスケールでの管理を組み合わせ、最終的に日本海沿岸域の環境保全を目指すものである。その提案のベースとなっているのは、日本海の沿岸域は様々な変化にさらされており、従来の地先の沿岸域を対象とした管理だけでは、十分な効果が期待できず、地球規模の環境変動、東シナ海を含めたより広域の環境変動に適応した沿岸域管理が必要であるといった点である。日本海三階層管理における各階層の管理の概要を表(1)-3に示す。

表(1)-3 日本海三階層管理の概要

階層	目的	具体的な管理の例
第1階層 (広域管理)	日本海及び東シナ海を対象とする国際海域の管理 ・地球温暖化の影響や東シナ海から日本海への影響を早期に捉えるための体制を構築すること ・日本海に生息する生物の多くが東シナ海に産卵場を形成している点を踏まえ、生物多様性の保全、持続的利用の観点からの対策の実施	広域国際共同監視網  東シナ海共同管理
第2階層 (中規模管理)	対馬暖流及びその内側域を対象とする道府県をまたがる管理 ・対馬暖流を介して地球温暖化や東シナ海の環境変化の影響が日本の沿岸域にもたらされることを踏まえた環境監視網の構築 ・日本海に生息する多くの生物が対馬暖流を利用した生活史を有することを踏まえ、将来の対馬暖流の変動等に適応した対策の実施	対馬暖流観測網  動的海洋保護区
第3階層 (局所管理)	個別の沿岸域を対象とした管理 ・広域、中規模の環境変動に適応した沿岸域管理の実施	陸海統合管理

ここで注意すべき点として、各階層は独立したものではなく、リンクしていることである。地球温暖化や東シナ海の環境変化など広域的な変動は中規模(日本海)の環境を大きく変化させ、日本海の環境変動は対馬暖流を通じて各沿岸域に波及する。三つの階層をつなげているのは、対馬海峡と対馬暖流であり、日本海三階層管理においては、対馬海峡と対馬暖流が管理の鍵となる。また、日本海三階層管理においては、個別海域での管理が広域の管理につながるという展開型の管理ではなく、広域での変動に適応するための順応的管理を個別海域で行うという点も注意が必要である。

各階層において予測される影響とそのメカニズムに基づき、実施すべき適応策として以下を提案する。

#### 【第1階層 :広域管理】

第1階層は日本海と東シナ海を対象とする広域管理である。各国の領海・排他的経済水域が入り組むこれらの海域における管理では国際連携が必要不可欠であり、関係国と連携した国際共同管理を提言する。

地球温暖化の影響は東シナ海、日本海の全域で見られる。生態系モデルによる将来予測では、日本海や東シナ海の海水温が上昇するだけでなく、流れなどの物理環境や栄養塩分布までの変化することが予測されている。地球温暖化に伴う日本海の環境変化は日本海に生息する生物の分布や回遊経路に影響を及ぼす可能性も示唆され、地球温暖化に伴う様々な変化や影響を早期に捉える体制を構築することが主の適応策となる。

東シナ海からの影響は主に対馬暖流を通じて日本海に波及する。東シナ海からの影響において特に注意すべ

き項目は、栄養塩量と低塩分水である。対馬海峡を通じて流入する栄養塩量が変化すると日本海の基礎生産にも影響を及ぼすが、流入する栄養塩量を変化させる要因は黒潮の挙動や東シナ海・黄海の底層環境であることが示された。そのため、東シナ海から日本海にかけての栄養塩の動態を監視する体制を構築する必要がある。監視の際には単に窒素やリンの濃度を測定するだけでなく、窒素とリンの比 (NP比) にも注意する必要がある。中国沿岸の基礎生産はリンが律速となっており、河川による窒素の排出量が増加した場合、消費されずに残った窒素が大量に日本海へと輸送される可能性があるためである。

台湾西部を流れる台湾暖流が北上する過程で中国沿岸の低塩分水を取り込み、対馬海峡を通じて大量の低塩分水を日本海へと運び込んでいる。この低塩分水は、中国の河川や沿岸域に大量に存在する残留性有機汚染物質 (POPs) や多環芳香族炭化水素 (PAH) を日本海に運ぶ汚染ルートの一つと考えられており (早川ら 2016) 汚染物質の輸送監視の観点から低塩分水の挙動に注目する必要がある。

以上のことから、関係国と連携して表 (1)-4 に示される監視網を構築することが望まれる。監視網の構築にあたっては、日本海の入りに位置する対馬に監視基点を置くと効率的である。監視項目に合わせて、監視網を広げていくことで、日本海への影響を早期に把握する体制を構築することが可能である (図 (1)-8)。

表 (1)-4 広域国際共同監視網の具体例

監視網	監視項目	監視方法
地球温暖化影響監視	海水温 (表層・下層)、流向・流速、溶存酸素、栄養塩 (窒素・リン)	船舶、人工衛星、アルゴフロート
栄養塩監視	栄養塩 (窒素・リン)、植物プランクトン種構成、クロロフィルa	船舶、人工衛星
低塩分水・POPs監視	塩分、残留性有機汚染物質	船舶

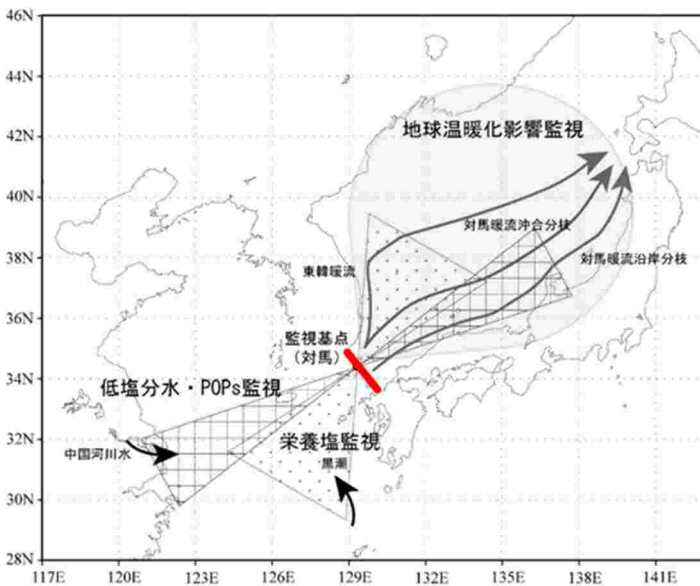
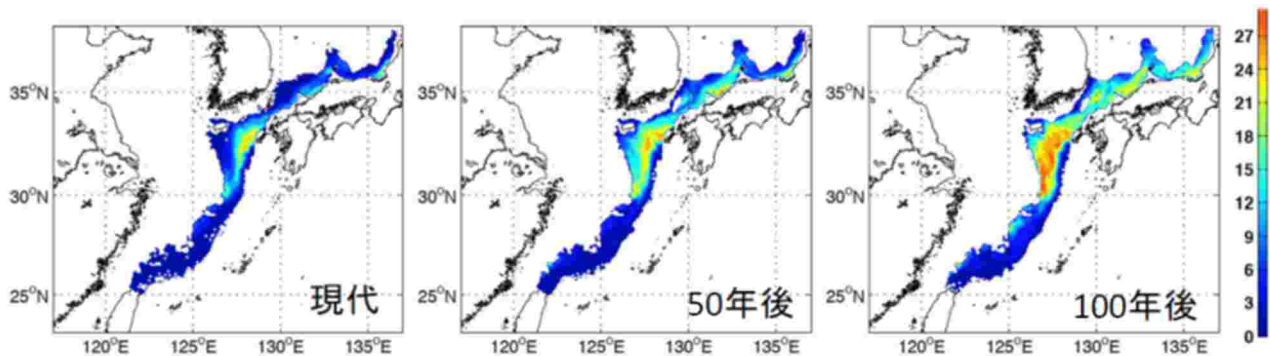


図 (1)-8 広域国際共同監視網のイメージ

また、これらの国際共同監視網の構築にあたっては、既存の国際連携の枠組みを活用することを提案する。本海域には、日本、中国、韓国、ロシアが参加する国際的な海洋観測システムを構築し、地球規模の海洋環境の把握や海洋変動の監視に役立てることを目的に設立された、北東アジア地域全球海洋観測システム (NEAR-GOOS) が各国の海洋観測データの共有・提供を行っており、本データベースを活用することで、関連データを効率的に収集することが可能である。NEAR-GOOSのほかにも、北太平洋海洋科学機構 (ICES) の日本、韓国、ロシアによる連携プログラムであるCREAMS (Circulation Research of the East Asian Marginal Seas) や国際海洋学委員会西太平洋地域事務所 (IOC/WESTPAC) といった枠組みが設置されており、これらを活用することで比較的容易に監視網を設置することが可能と考える。また、海表面水温であれば、環境省と公益財団法人環日本海環境協力センターがすでに「環日本海海洋環境ウォッチ」を通じて人工衛星による日本海の海水温データを常時公開しており、我が国からも積極的にデータ情報を発信していくことも重要な役割である。

また、本海域には国連環境計画が推進する海洋環境保全のための国際的枠組みである地域海計画のひとつ、北西太平洋地域海行動計画 (NOWPAP) が日本、中国、韓国、ロシアにより合意されている。NOWPAPの掲げる目的は、北西太平洋地域における恩恵を長期にわたって享受し、持続可能性が守られるよう海洋及び沿岸の環境保全・管理・開発を進めることであり、本プロジェクトが提案する日本海三階層管理を実践するのにまさに適した存在である。今後、NOWPAPにおいて本プロジェクトの成果が活用され、日本海の保全に資することが期待される。

広域管理では、国際共同監視網の構築に加え、東シナ海の共同管理を提案したい。東シナ海には、スルメイカやブリをはじめ、日本海に生息する多くの主産重要種の産卵場が形成されている。この産卵場が、将来地球温暖化の影響を強く受けることが、本プロジェクトのスルメイカの研究から明らかとなった。日本海を回遊するスルメイカ(秋生まれ系群)の産卵場が東シナ海、特に九州西部海域に集中し、資源の再生産の観点から東シナ海の産卵場の重要性が高まることが示された(図(1)-9)。この海域は、日本・韓国・中国の排他的経済水域にまたがる海域であり、本種を保護して(ためにはこれらの国々と連携していくことが必要である。特に近年、スルメイカの漁獲量が著しく落ち込んでいることが度々報道されている。本種は日本海の低次生態系と高次生態系をつなげる要となる生物であり、本種の保全は日本海の生物多様性の保全にもつながるものとする。そこで日本・中国・韓国によるスルメイカの保全を目的とした東シナ海共同管理を提案する。生物多様性条約(CBD)では、海洋生物多様性の保全のため生態学的・生物学的重要海域(EBSA)の選定を推し進めている。第9回締約国会議において示されたEBSAの抽出基準には、「個体群の存続・生息/生育のために必要な海域として「種の生活史における重要性」が含まれる。産卵場の保全はまさにこれに該当するものである。環境省では生物多様性の観点から重要度の高い海域として、東シナ海がすでに抽出されており、中国及び韓国と連携して共同のEBSAとして設定することができれば、世界的にも先進的な事例となりうる。



図(1)-9 日本海のスルメイカ資源に寄与する産卵場の分布の変化

### 【第2階層 :中規模管理】

第2階層は対馬暖流に注目し、道府県を越えた中規模管理である。日本の沿岸域は対馬暖流を通じて、東シナ海から様々な影響を常に受けており、日本海沿岸域の環境は対馬暖流に支配されているともいえる。そのため、日本海沿岸域管理においては、対馬暖流の挙動を把握し、対馬暖流と沿岸域の関係を踏まえた管理を行うことが必要である。さらに、対馬暖流は地球温暖化の影響を受けて、流路が大きく変化することも予測され、沿岸域管理のためには継続した対馬暖流の監視体制を構築することが求められる。

しかしながら、黒潮や親潮など日本周辺を流れる他の海流系に比べ、対馬暖流の研究は少ないように思われる。日本海やその沿岸域が外因の影響を受けやすい脆弱な海域であることが判明した今、その変化の鍵となる対馬暖流の研究を官学連携して促進する必要がある。日本海側の沿岸自治体の水産研究機関や大学、その他研究機関による沿岸観測が常時行われているが、水産や学術などそれぞれの分野で独自に行われる観測となっている。幸い、第3期海洋基本計画に基づき、海洋情報の一元化が精力的に進められており、関係省庁、地方自治体を越えた、情報の収集・整備が進められている。今後、地球温暖化や日本海といった視点で情報の共有が進み、日本海沿岸域管理に活用されていくことが期待される。

日本海に生息する生物の多くは、対馬暖流等の日本海の海洋システムに適合した生活戦略を持つ。例えば、ズワイガニは200～500mの水深帯に生息し、対馬暖流による輸送システムを活用した生活史を有する。そのため、卵や幼生の輸送や稚ガニ資源の加入は対馬暖流の流況に大きく左右されてしまう。現在ズワイガニの保全を目的に設置されている海洋保護区は、主として特定の海域に漁礁を設置し、底引き網などの漁業が行えなくすることで親ガニを保護する固定型の保護区である。従来の保護区に加え、流動環境に合わせて、資源加入に寄与する海域を追加的に保護してやることで、本種に対する保全効果がさらに高まることが期待される。そこで、ズワイガニの卵幼生輸送生残モデルにより各年の資源加入に最も寄与する海域を抽出し、その海域を保護区とした場合の効果を検証したところ、保護効果が2割上昇することが示された。そこで、我々は海洋環境に合わせて新たに設置する保護区を動的海洋保護区と呼ぶこととし、動的海洋保護区を追加的に設けることで従来の保護政策をさらに高める管理策として提案した。

さらに、対馬暖流の流動が地球温暖化に伴い、将来大きく変化する可能性が示された。実際に、ズワイガニの卵幼生の輸送生残への温暖化の影響について研究を行ったところ、将来、ズワイガニの分布が現在の山陰沖から、日本海東部海域に拡大、移動していくことが明らかとなった。このため、従来の固定型の保護区では、今後のその効果が期待されないことも予想され、動的海洋保護区なども活用しつつ、将来の環境変動に合わせた保全策を実施していくことが必要と思われる。

### 【第3階層：局所管理】

第3階層の局所管理は、それぞれの海域における沿岸域管理が対象となる。日本海には、博多湾や舞鶴湾など閉鎖性海域として定義される海域が20ほど存在する。これらの閉鎖性海域に加え、開放性の内湾である若狭湾や富山湾なども沿岸域管理の対象となる。特に閉鎖性が強い海域であれば、沿岸部と河川流域を対象とした従来の沿岸管理で十分な効果が得られると思われる。一方で外海からの影響をある程度受ける海域であれば、最初の手順として、外海と陸域からの影響度のバランスを把握する必要がある。河川負荷など陸域からの影響が小さく、外海からの影響が大きい海域であれば、対馬暖流や日本海の変動に対する適応策としての沿岸海域管理を実施する必要がある。日本海西部で日本海に直接面する閉鎖性海域はこれに該当する割合が高いと考えられる。日本海西部に位置していても、対馬暖流からの直接的な影響が小さい場合や、日本海の東部に位置して外海と陸域からの影響がバランスしているような海域であれば、陸域から海域を含めた陸海統合管理が効果的だと思われる。外海と陸域からの影響のバランスに関しては、数値シミュレーションによって把握することが望ましいが、難しい場合は海水交換率などでも代用可能と思われる。

具体例として、次項で富山湾を対象として、沿岸海域管理の検討を行う。

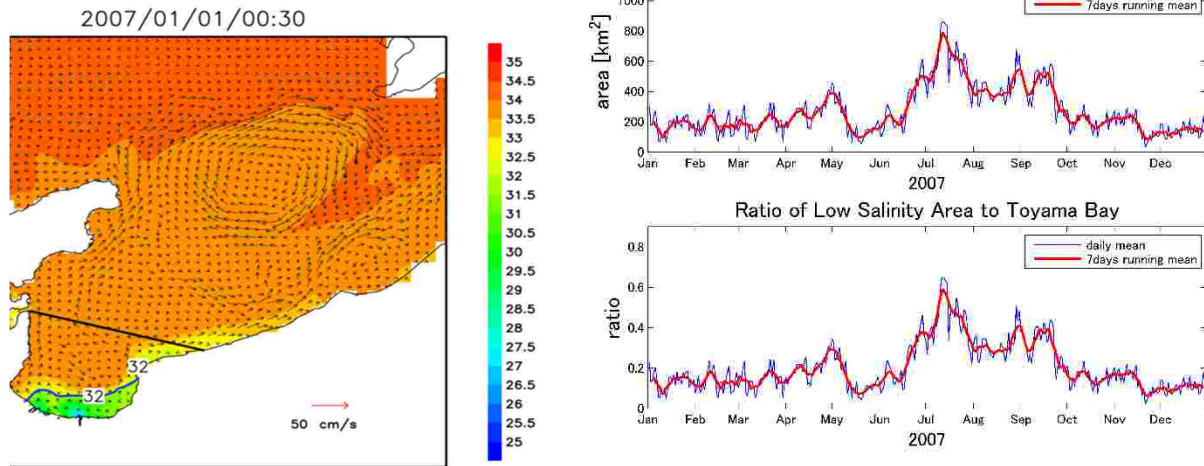
#### (5)富山湾陸海統合管理手法の検討

富山湾は日本海の中央部に位置し、開放的な内湾であるため対馬暖流を通じた外海からの影響を受ける。一方で、湾内には大小300もの河川が流入しており、陸域からの影響も強く、外海からと陸域からの影響を踏まえた陸海統合管理を検討するのに適した海域である。

富山県は水資源が豊富である一方、近年は温暖化に伴う降雪量の変化、土地利用や地下水の利用の変化など、自然・社会環境の変化が陸域における水循環を変えており、陸から海域をつなげた水循環管理を検討する上でも適した海域である。

そこで、サブテーマ3によって開発された富山湾低次生態系モデルにより、富山湾における陸海統合管理について検討を行った。

まず、前述したように富山湾の環境が、外海と陸域からどの程度影響を受けている海域か把握することとした。塩分が32psuを下回る海域を、河川水の影響を受けた陸域影響範囲と仮定し、その面積や分布の季節変化を求めた。

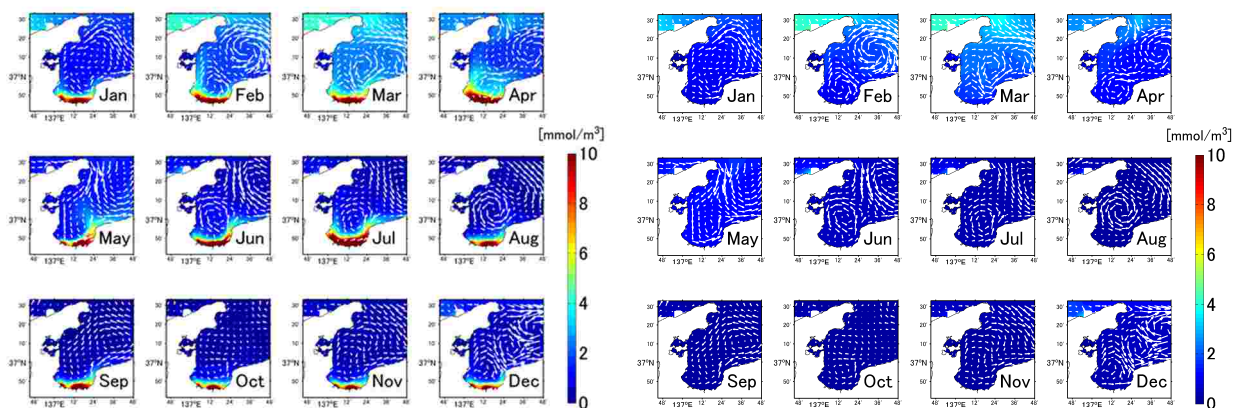


図(1)-10 富山湾の陸域影響範囲(塩分 < 32psu)の変化

左図は生態系モデルによって再現された陸域影響範囲。黒線は富山湾と仮定した領域を示す。右上図は陸域影響範囲の面積の変化、右下図は影響範囲の富山湾に対する割合を示す。

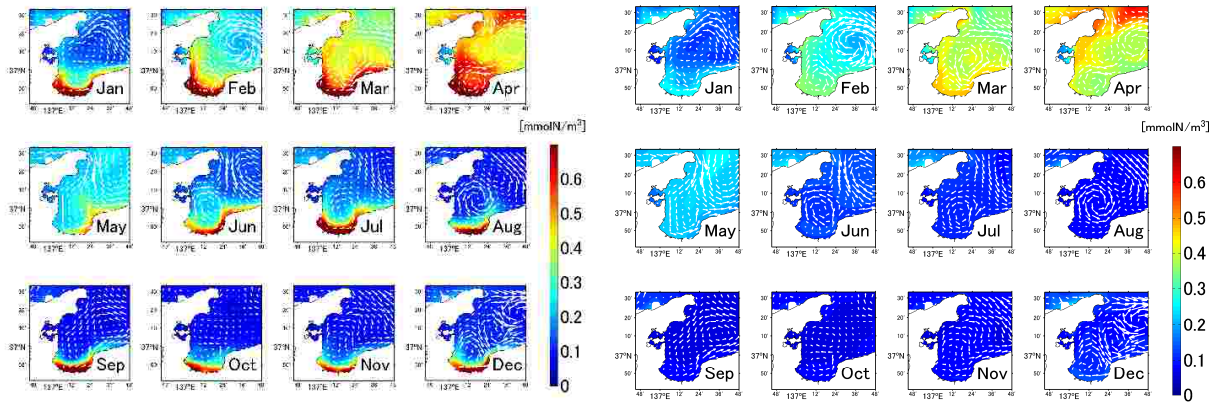
河川流量の少ない冬季は、陸域影響範囲も岸から数kmの沿岸部に限られ、湾全体の10%程度にとどまるが、雪解け水の影響が現れる春から影響範囲が拡大し、河川流量が増える夏に最も広くなり湾の60%に達する。以上のことから、富山湾は外海からと陸域からの双方の影響を適度に受ける海域であり、陸海統合管理を検討するのに適した海域である。そこで、富山湾陸海統合管理手法検討の手順に従い、富山湾における陸域からの影響の定量化、自然・社会環境の影響を把握し、今後実施すべき陸海統合管理について検討を行った。

富山県は水資源が豊富な地域であり、豊かな水資源は大小300もの河川を通じて富山湾に流れ込み、湾内の生産性にも大きく寄与していると考えられているが、実際にどれだけの寄与があるのか定量的に示した研究はない。そこで、富山湾陸海統合管理の検討の最初の手順として、陸域から海域への栄養塩供給が、湾内の環境や生産性にどれほど寄与しているか定量化を試みた。定量化の方法としては、河川からの栄養塩負荷を与えた場合と無とした場合と比較することとした。河川による負荷の有無による表層溶存態無機質素(DN)の分布を図(1)-11に、表層クロロフィル濃度の分布を図(1)-12に示す。



図(1)-11 河川による栄養塩負荷をon(左)/off(右)した際の湾内の表層DNの変化

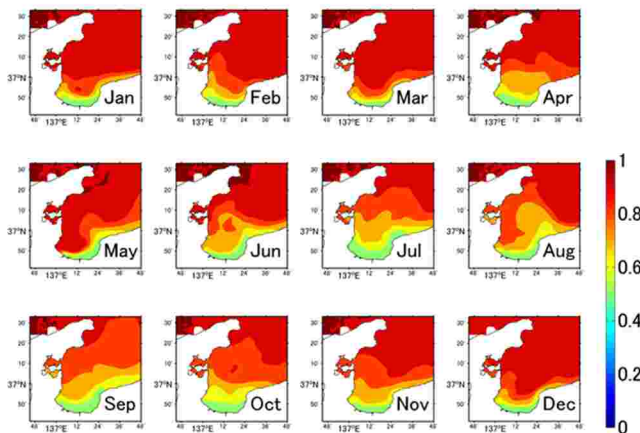




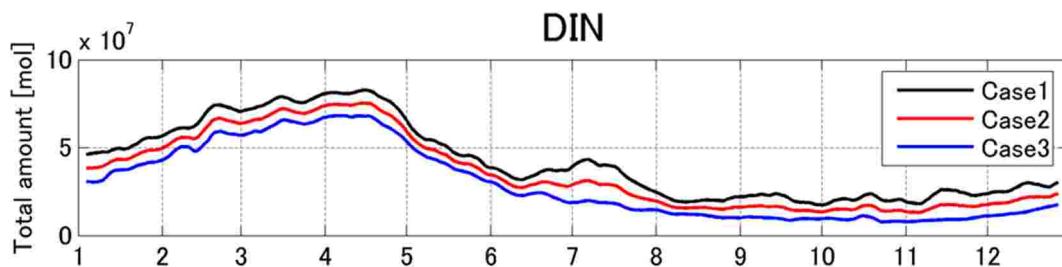
図(1)-12 河川による栄養塩負荷をon(左)/off(右)した際の表層chl-a濃度の変化

図(1)-11に見られるように、河川による栄養塩の供給が途絶えた場合、表層だけを見ると沿岸部のDINは年間を通じてほぼ枯渇した状況となる。富山湾の表層100mで増減量を計算した場合、河川を通じた供給が途絶えることにより、7.4%の栄養塩が失われることとなった。岸から5kmの沿岸部に限定すれば、20%も減少することとなる。下層からの栄養塩供給の効果が弱まる水深30mで考えた場合は、50%も減少する結果となり、富山湾沿岸部の表層の基礎生産にとって河川による栄養塩供給は非常に大きなものであることが明らかとなった。植物プランクトン量(クロロフィルa量)で見た場合においても(図(1)-12)、湾内の基礎生産は著しく減少し、特に夏以降の減少量大きい。

次に、富山湾では海底湧水を通じた栄養塩供給も確認されており、海底湧水による栄養塩供給量は河川の供給量と同程度との報告もある。そこで、海底湧水による栄養塩供給の効果についても解析した。河川と同様、海底湧水による供給の有無に関して実験を行った。



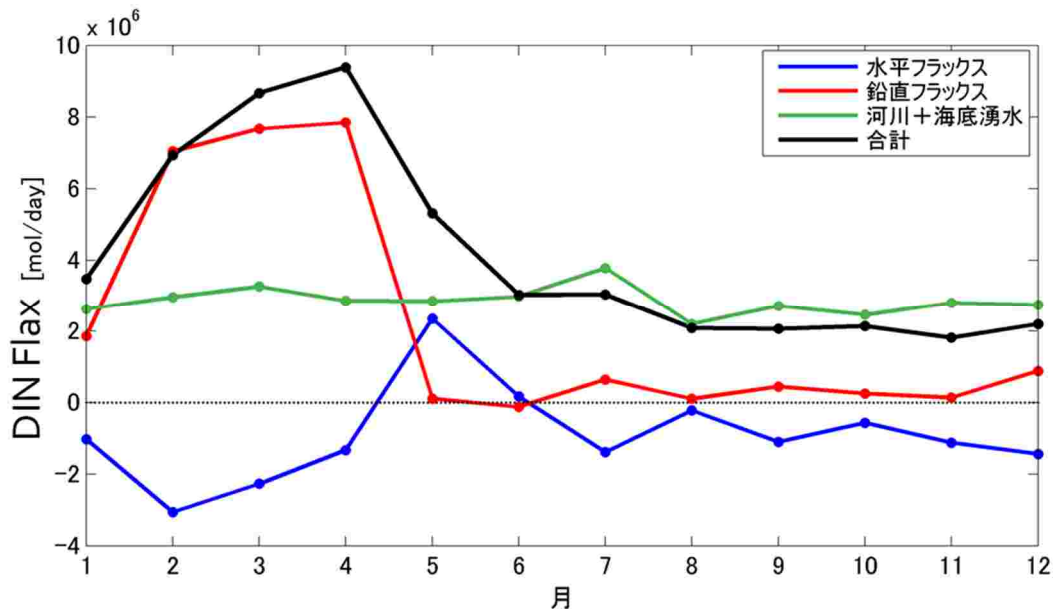
図(1)-13 海底湧水に伴う栄養塩供給を遮断した場合の表層DIN濃度の変化率



図(1)-14 河川・海底湧水による栄養塩負荷の有無による富山湾沿岸表層100mにおける栄養塩量  
Case 1は河川・海底湧水による負荷有り、Case 2は河川のみ負荷有り、Case 3は陸域からの負荷をなくした場合を示す。

海底湧水による栄養塩供給がなくなることにより、富山湾の広範囲にわたって栄養塩濃度が低下する状況が確認された(図(1)-13)。特に減少の影響が大きい沿岸部水深100mの栄養塩量は15%程失われる結果となった(図(1)-14)。以上のことから、富山湾では陸域からの河川及び海底湧水による栄養塩供給が、湾内の基礎生産に大きく寄与しており、特に陸域からの影響が顕著な岸から5kmほどの沿岸部ではその効果が特に大きいことが示された。これらの研究結果は、富山湾の生産性が河川及び海底湧水による栄養塩供給に非常に強く依存していること示している。従って、陸域の水・地下水循環が変化することは、富山湾の環境にも大きな影響を及ぼすと考えられる。

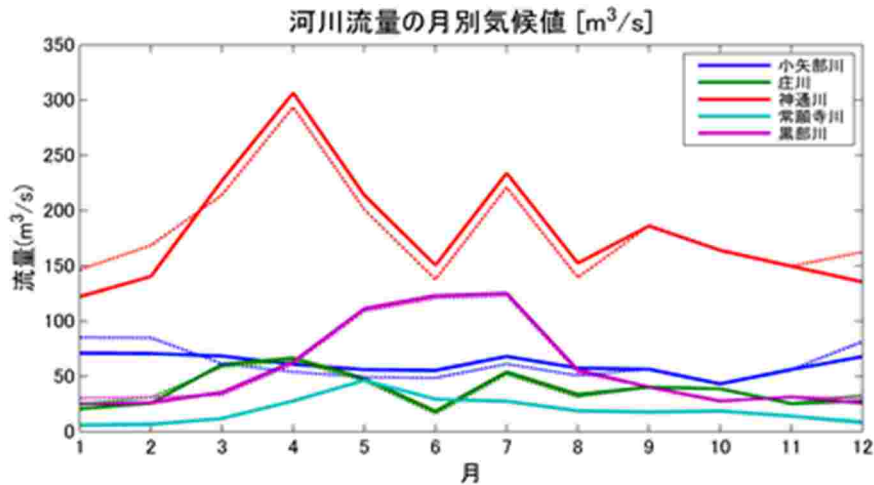
富山湾の陸域、外海、下層からの栄養塩収支を定量化するため、富山湾を表層50mで切り出したボックスモデルとし、陸域からの栄養塩供給に加え、外洋や下層からの寄与率を算出した(図(1)-15)。その結果、冬季は海面冷却に伴う鉛直混合による下層からの栄養塩供給と、河川・海底湧水による栄養塩供給により、湾内表層に豊富な栄養塩が蓄えられ、これが春季ブルームを支えている。一方、春以降は、成層化することによって、下層からの栄養塩供給が途絶え、河川及び海底湧水による栄養塩供給が唯一の供給源となる。河川及び海底湧水による栄養塩供給が途絶えた場合、沿岸域の環境が大きく変化することが先の感度実験から示されており、富山湾陸海統合管理においては、いかに春以降の栄養塩循環を維持していくのか、その対応策を示すことが鍵となる。



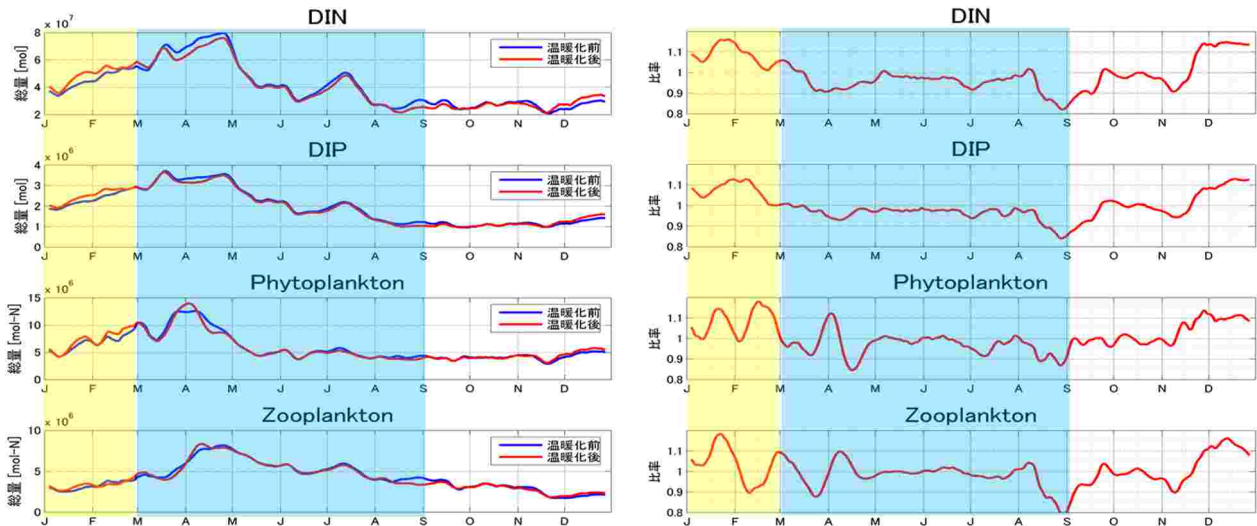
図(1)-15 富山湾を表層50mの栄養塩フラックスの季節変化

水平フラックスは富山湾内外の栄養塩フラックス、鉛直フラックスは50m深の境界におけるフラックス、河川及び海底湧水フラックスは河川及び海底湧水による供給量を示す。

ところが、近年、陸域に水循環に変化が見られている。冬季の降水量の増加に伴い、河川流量が増加し、一方、夏以降は降雪量の減少に伴う融雪水の減少が河川流量の減少を引き起こしている。先述したように、冬季は豊富な栄養塩が湾内には存在しており、さらに栄養塩が供給されたとしても生産性の向上は期待できない。陸域からの供給に依存する夏以降の減少による影響が深刻である。富山湾の栄養塩環境や生産性への影響を把握するため、冬季の河川流量が増加し、春以降の河川流量を減少させた温暖化影響実験を行った。12月から1月の間、河川流量を20%増加させ、増加させた流量分を3月から8月にかけて平均的に減少させた(図(1)-16)。



図(1)-16 温暖化影響実験における河川流量  
点線が温暖化による河川流量変化を示す。



図(1)-17 温暖化影響実験による富山湾表層(10m)におけるDIN、DIP、植物プランクトン、動物プランクトン量の季節変化(左)とその変化率(右)

赤線が温暖化による河川流量に変化を与えた実験結果を示す。黄色の期間が河川流量を増加させた期間、青色が河川流量を減少させた期間を示す。

冬季の河川流量の増加、夏季の河川流量の減少により、湾内の栄養塩や植物プランクトン量は変化が見られる(図(1)-17)。増加量、減少量とも最大で2割程度とそれほど大きな差は生じなかった。夏季の河川流量の減少量は月平均5%程度であり、栄養塩量、植物プランクトン量に大きな変化をもたらすほどの変化ではなかったと考えられる。実際には過去20年ほどで20%程度河川流量が減少していることから、長期的なシミュレーション、解析を行った場合、その影響がさらにみられるのではないかと推定される。今後、地球温暖化に伴って、降雨量・河川流量にさらに変化が生じるようなことになれば、湾内の栄養塩環境や生産性に影響を及ぼすものと考えられる。地球温暖化の影響をコントロールすることは困難な為、栄養塩の供給量の減少を他の何らかの手段によって補う対策を施すことが必要である。そこで、我々が注目したのは地下水である。海底湧水の流量は河川の1/4程度であるにもかかわらず、栄養塩供給量としては同程度あり、わずかな量の管理で大きな効果を期待できるためである。

富山県では、地下水資源の重要性を認識し、全国に先立ち地下水指針を作成するなど地下水の保全に取り組んできている。さらに近年の、冬季の融雪水としての地下水の利用の増加に伴う一時的地下水位低下の問題に対応するため、平成30年に地下水指針の改定し、地下水利用に関する新たな方針が示されている。改定された

指針の中では、地下水の涵養御普及拡大策として水田を利用した地下水涵養の促進、地下水を育む森林の保全・整備の充実に向けた施策が組み込まれている。実際に、冬季の水田を利用した地下水涵養実験も行われており、水田1m<sup>2</sup>あたり0.01～0.2m<sup>3</sup>/日の涵養効果が得られることが報告されている。温暖化影響実験で減少する河川流量は計156m<sup>3</sup>/sとなっており、同程度の栄養塩量を海底湧水で補うのであれば1/4量の40m<sup>3</sup>/sで済む。この量を水田での涵養で補うとすれば、約2,000haほどの水田で涵養する必要がある。この30年で30,000haの水田が減少しており、使われていない休耕田を涵養地として活用すれば十分対応可能ではないかと考える。ただしあくまでこの計算は試算であり、涵養された地下水がそのまま海底湧水に反映されるかどうかなど曖昧なまま行っている点が多くあることから、地下水循環についてさらに研究が進展し、より正確な涵養面積が求められることが期待される。富山県では、「水と緑の森づくり税」を活用した森林整備も実施されており、休耕田の利用と森林整備を合わせることで、さらに効率的に地下水の保全効果が得られると考えられる。

環境省では森里川海を豊かに保ち、その恵みを引き出すこと、森里川海の恵みを支える社会を作ることを目指した「つなげよう 支えよう森里川海」プロジェクトを推進している。富山県の特性である地下水循環を加えた新たな森里川海地下水管理を、富山湾陸海統合管理として提案した。

#### (6)研究の効果的・効率的推進

本研究テーマでは、S-13全体のアドバイザリーボード会合に加え、テーマ3独自のアドバイザリーボード会合を年二回、以下のとおり開催し、アドバイザーからの助言を得るとともに、サブテーマ間の連携に努めた。

平成26年度第1回アドバイザリーボード会合

日時：平成26年8月29日 13:00～16:00、場所：フクラシア浜松町 会議室D

平成26年度第2回アドバイザリーボード会合

日時：平成27年1月27日 9:00～12:00、場所：タワー111 会議室2

平成27年度第1回アドバイザリーボード会合

日時：平成27年5月18日 10:00～12:00、場所：兵庫県民会館 1101会議室

平成27年度第2回アドバイザリーボード会合

日時：平成27年11月4日 13:00～15:00、場所：AP品川10階Eルーム

平成28年度第1回アドバイザリーボード会合

日時：平成28年5月27日 9:30～11:30、場所：神戸サンセンタープラザ 5号室

平成28年度第2回アドバイザリーボード会合

日時：平成28年12月2日 9:00～11:30、場所：フクラシア浜松町 D会議室

平成29年度第1回アドバイザリーボード会合

日時：平成29年5月18日 9:00～11:30、場所：三宮研修センター S会議室

平成29年度第2回アドバイザリーボード会合

日時：平成29年11月20日 13:30～16:30、場所：フクラシア浜松町 D会議室

平成30年度第1回アドバイザリーボード会合

日時：平成30年6月7日 9:30～12:00、場所：三宮研修センター SA会議室

平成30年度第2回アドバイザリーボード会合

日時：平成30年11月28日 13:30～16:30、場所：コンベンションホールAP浜松町 G会議室

## 5.本研究により得られた成果

### (1)科学的意義

#### 【日本海と東シナ海の関係】

日本海沿岸と東シナ海の関係性を初めて定量的に示した。日本海沿岸の海水（日本海沿岸西部海域で90%、日本海東部沿岸で80%）が東シナ海に由来することを明らかにした。

東シナ海から日本海に運ばれる低塩分水の挙動について、台湾暖流水水との関係性を示した。中国沿岸に高濃度で存在する残留性化学汚染物質POPsの日本海への輸送メカニズムの解明につながることを期待

される。

## (2)環境政策への貢献

### < 行政が既に活用した成果 >

富山県地下水指針(平成30年3月改定)において、気候変動に伴う地下水環境への影響に関する調査・研究の推進が盛り込まれた。

### < 行政が活用することが見込まれる成果 >

#### 【日本海三階層管理・日本海共同監視網の構築】

日本海は世界でも地球温暖化の影響を最も強く受けている海域であるが、気候変動シナリオによっては影響がさらに加速することが明らかとなった。日本海は海洋資源の供給元、国際海運航路の利用など、我が国にとって極めて重要な海域であり、本海域の保全是わが国の国益に直結する問題である。しかしながら本海域の保全には関係国との連携が必要であり、本研究成果を基に、関係国との連携、更には国際共同監視網の構築が進められることが期待される。

#### 【東シナ海共同管理・静的・動的海洋保護区】

日本海の生物は、地球温暖化の影響を受け、分布や産卵場所、輸送・回遊経路など生活史に大きな変化が起きる可能性がある。我が国の従来の水産資源保護を前提とした対応では対処できない場合も起こりうる。生物多様性条約愛知目標や、SDGでは海洋生物の保全、持続的利用が掲げられている。本プロジェクトで提案した東シナ海共同管理や静的・動的海洋保護区は、我が国としての目標達成に向けた取組みのみならず、世界的にもまだ取り組みが遅れている共同管理の先進的な事例となりうるものである。

#### 【地下水を加えた森里川海】

地下水や海底湧水が沿岸環境に係っている海域は富山湾だけでなく、東北鳥海山麓沿岸、駿河湾、瀬戸内海など日本各地に存在する。多くの海域で沿岸の生産性への寄与が報告されており、表層の水循環だけではなく、地下水を含めた陸-海の水循環を保全することで、より豊かな沿岸環境の創造につながると考えられる。環境省が推進する「つなげよう 支えよう森里川海」プロジェクトに地下水・海底湧水が今後加えられ、多くの地域で総合的な水循環管理が実施されることが期待される。

## 6.国際共同研究等の状況

日本海・黄海を対象として海洋環境保全に取り組むため、国連環境計画(UNEP)のRegional Seas Programmeのひとつとして、北西太平洋地域海行動計画(NOWPAP)が、日本、中国、韓国、ロシアにより合意されている。NOWPAPの中期戦略2018-2023では、沿岸・河川流域統合管理、海洋・沿岸環境評価、陸域・海域起源の汚染物質の削減、海洋生物多様性の保全が主要テーマとして掲げられており、本研究を通じて得られた成果はNOWPAPの活動にも大きく貢献するものと考えられる。そこで、本研究成果のNOWPAPへの展開を見据え、以下の機会を通しNOWPAPとの情報共有、発信を試みた。

Regional Workshop “Setting Ecological Quality Objectives for the NOWPAP Region”(2014)

Organizer: NOWPAP Pollution Monitoring Regional Activity Centre

The 15<sup>th</sup> NOWPAP CEARAC Focal Point Meeting (2017)

Organizer: NOWPAP Special Monitoring & Coastal Environmental Assessment Regional Activity Centre (CEARAC)

The Second CEARAC Expert Meeting on Eutrophication Assessment in the NOWPAP Region (2019)

Organizer: NOWPAP CEARAC

研究分野として、地球温暖化の影響など非常に興味深いテーマであることが参加者らによって認識された。しかしながら、NOWPAPにおいて気候変動に関する活動が実施されていないこともあり、具体的な活動として立ち上げていくためには、もう少し検討が必要との意見が挙げられた。一方で、NOWPAPのCoordinatorであるDr. Lev Neretinからは、NOWPAPの中期戦略で主要テーマの一つとして挙げられている沿岸・流域統合管

理を進めるにあたり、日本海三階層管理を活用していくことの有用性なども言及され、今後の活用に期待される。さらに、本プロジェクトを通じて明らかとなった日本海の栄養塩環境の将来変化にも興味を持たれ、NOWPAP/CEARACが実施する富栄養化状況評価において、数値モデルを活用が提案されるなど、今後のNOWPAPの活動への貢献が期待される。

さらに、北太平洋海洋科学機構(PICES)とも情報共有を行った。PICESは日本・中国・韓国・ロシアに加え、アメリカ・カナダが参加する北太平洋を対象とした海洋科学機関である。PICESに設置されているAdvisory Panel for a CREAMS/PICES Program in East Asian Marginal Seas (AP-CREAMS)は、日本海を含む東アジア縁辺海域を対象海域として気候変動等長期変動の海洋循環や生物への影響を研究するグループである。本グループの会合が2017年に富山で開催された際、S-13-3に関する情報を共有した。日本海への気候変動の影響への関心が高く、フェリーによる定期観測を活用したモニタリングが提案されるなど、日本海国際共同監視網を構築する際には、当グループの協力を得ることで効果的に進められると思われる。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) B. Zhang, J. Zhang and T. Yoshida (2017): Temporal variations of groundwater tables and implications for submarine groundwater discharge: a 3-decade case study in central Japan, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3417-3425
- 2) 吉田尚郁・張 勁・森本昭彦・柴野良太・広瀬直毅・高山勝巳・郭 新宇・王 玉成・眞野 能・吉江直樹 (2018): 日本海三階層管理の提案、*沿岸海洋研究*、56、31-38

#### <その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 吉田尚郁 (2017): 環日本海地域の環境保全、*日本海学研究叢書*、富山県観光・地域振興局 地方創生推進室、45pp
- 2) 片境紗希・張 勁・吉田尚郁 (2019): 富山湾の海域環境管理法、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、*国際エメックスセンター*、172-182
- 3) 吉田尚郁 (2019): 日本海環境の三階層管理、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、*国際エメックスセンター*、183-202
- 4) 郭新宇・眞野能・高山勝巳・吉田尚郁 (2019): 富山湾統合モデル。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。*国際エメックスセンター*。308-318

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) T. Yoshida: Regional Workshop "Setting Ecological Quality Objectives for the NOWPAP Region", Busan, Republic of Korea, 2014, New Project for Integrated Management of Japanese Coastal Area,
- 2) 吉田尚郁・刈 茜・張 勁・森本昭彦・石坂丞二・伊藤雅・広瀬直毅・高山勝巳・郭 新宇・吉江直樹: 日本海洋学会2015年春季大会、東京海洋大学、2015 国際的閉鎖性海域・日本海の海域管理法の開発
- 3) Q. L. Liu, J. Zhang and T. Yoshida: 18th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, Okinawa, 2015 Seasonal and inter-annual changes of land-based (river and submarine groundwater discharge) dissolved inorganic, C, N into the inner Toyama Bay, central Japan,

- 4) 吉田尚郁・張 勁・刘 茜・広瀬直毅・高山勝巳:日本海洋学会2015年度秋季大会、松山、2015  
日本海表層の水塊形成メカニズム
- 5) T. Yoshida, Q. Liu, J. Zhang, K. Takayama and N. Hirose: EM ECS '11 SeaCoasts XXV I Joint Conference, St Petersburg, Russia, 2016  
Management for sustainable use of international semi enclosed sea, Sea of Japan,
- 6) J. Zhang: EM ECS '11 SeaCoasts XXV I Joint Conference, St Petersburg, Russia, 2016  
Food web characterization using carbon and nitrogen isotope analysis in the Toyama Bay and the Sea of Japan
- 7) 吉田尚郁:東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「陸と海と人と- 里海」、千葉、2017  
日本海における三階層管理
- 8) T. Yoshida: The 4<sup>th</sup> International Workshop on Sustainable Use of International Semi Enclosed Sea, Japan Sea (Sato Um i, Jakarta, Indonesia ), 2017  
Management for Sustainable Use of International Semi Enclosed Sea, Japan Sea
- 9) 吉田尚郁・張 勁・森本昭彦・柴野良太・広瀬直毅・高山勝巳・郭新宇・吉江直樹・王玉成・久保田泰士・眞野能:2017年日本海洋学会秋季大会 沿岸海洋研究会シンポジウム、仙台、2017  
日本海海域管理法
- 10) 吉田尚郁・広瀬直毅・高山勝巳:2017年日本海洋学会秋季大会、仙台、2017  
日本海における黒潮系水及び台湾暖流系水の挙動
- 11) T. Yoshida, J. Zhang, A. Morimoto, R. Shibano, N. Hirose, K. Takayama, X. Guo, Y. Wang and T. Mano: EM ECS 12 Conference, Pattaya, Thailand, 2018  
"Land-ocean integrated management of Toyama Bay in the international semi enclosed sea, Japan Sea "

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### (4) 国民との科学・技術対話」の実施

- 1) シンポジウム「日本海の沿岸海域管理」(主催:環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト、国際EM ECSセンター、(公財)環日本海環境協力センター、平成27年1月26日、ポルファートとやま珊瑚の間、観客約70名)
- 2) S-13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 公開シンポジウム(主催:環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト、国際EM ECSセンター、(公財)環日本海環境協力センター、平成28年5月9日、富山県民会館、観客約60名)
- 3) S-13テーマ3公開シンポジウム「地球温暖化や東シナ海が日本海の環境や生物に及ぼす影響」(環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト、(公財)環日本海環境協力センター、平成30年1月21日、富山県民会館、観客約40名)
- 4) S-13テーマ3成果報告シンポジウム「地球温暖化や東シナ海が日本海の環境や生物に及ぼす影響」(環境省環境研究総合推進費S-13プロジェクト、(公財)環日本海環境協力センター、平成31年2月2日、ポルファートとやま珊瑚の間、観客約70名)

### (5) マスコミ等への公表・報道等

本研究についてのマスコミ等への公表履歴等について、記載すること。該当部分のコピー等を添付しても構わない。ただし、コピーの添付については、著作権等の問題が生じない場合に限る。

- 1) 富山新聞(平成26年7月10日、地方紙)
- 2) 北日本新聞(平成26年7月10日、地方紙)
- 3) 富山新聞(平成27年1月27日、地方紙、2頁)
- 4) 北日本新聞(平成27年1月27日、地方紙、3頁)

5) 放送大学 シリーズ 海と日本 里海 後編

#### (6)その他

特に記載すべき事項はない。

### 8.引用文献

- 1) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 2) 早川和一、長尾誠也、荒巻能史、高澤嘉一、亀田貴之、佐藤啓市、猪股弥生、大泉毅 (2016): 日本海及び周辺域の大気・海洋における有機汚染物質の潜在的脅威に関する研究 研究成果報告書 (平成25年度～平成27年度) 環境省環境研究総合推進費 課題番号 5-1306
- 3) 八田真理子、張 勁、佐竹洋、石坂丞二、中口謙 (2005): 富山湾の水塊構造と河川水、沿岸海底湧水による淡水フラックス、地球化学、39、3、157-164



## - 2 - 1 日本海環境変動予測モデルの構築

愛媛大学

森本昭彦

伊藤雅 (平成26、27年度のみ)

柴野良太 (平成28、29、30年度のみ)

名古屋大学

石坂丞二 (平成26、27年度のみ)

平成26～30年度累計予算額 30,031千円

(うち平成26年度 6,370千円、平成27年度 6,119千円、平成28年度 5,880千円、平成29年度 5,880千円、平成30年 5,782千円)

### 【要旨】

中国の大河川である長江からの淡水の7割以上が、対馬暖流により移流され対馬海峡を通り日本海へ流入している。また、中国沿岸でふ化するとされている大型クラゲが日本海へ大量に流されてくることから、水だけでなく様々な物質が中国沿岸から日本海へ輸送されていることがわかる。現在、中国沿岸および東シナ海・黄海の海洋環境は、中国の急激な経済発展、長江中流に建設された三峡ダム、中国北部の水不足の解消を目的とした南水北調事業、などにより劇的に変化している。このような対馬暖流の上流域での環境変化が、日本海の海洋環境をも大きく変えるのではないかと懸念されている。特に、海水中に溶存している栄養塩の供給量の変化は、低次生態系に大きな変化をもたらす可能性がある。

本研究では、まず、日本海の唯一の入口である対馬海峡において船舶観測を行うことで、東シナ海から日本海へ対馬暖流によりどの程度の溶存態の栄養塩が輸送されているのかを明らかにした。長期間の観測結果から、日本海へ輸送される栄養塩量は年により平均値の0.5～1.5倍と大きく変化することが明らかとなった。このような対馬海峡を通過し日本海へ流入する栄養塩の変化が日本海の低次生態系、特に基礎生産に与える影響を明らかにするため、物理・低次生態系モデルを開発した。このモデルにより、極前線より南の対馬暖流域の基礎生産の80%以上は、対馬海峡を通過し水平的に輸送された栄養塩により支えられていることが分かった。また、対馬海峡からの栄養塩量の変化の影響は、韓国東岸から極前線に沿った海域の栄養塩と基礎生産を増加させることが示された。一方、日本沿岸の栄養塩濃度はほとんど増加しないことも明らかとなった。

日本海へ流入する栄養塩量が年により大きく変化する要因と、長江の水質変化が日本海の海洋環境の変化に与える影響を調べるため、東シナ海を対象とした物理・低次生態系モデルを構築した。このモデルを使い対馬海峡の栄養塩の起源を調べた。その結果、対馬海峡の栄養塩の主要な起源は、黒潮・太平洋起源の栄養塩であり、長江起源の栄養塩の割合は10%以下と推定された。このことから、中国の経済発展や南水北調などにより長江の河川水中の栄養塩濃度が変化しても、日本海の低次生態系に与える影響は大きくないことが明らかとなった。しかしながら、長江の河川水中の栄養塩濃度が今後劇的に増加した場合は、日本海へ流入する栄養塩が急増する可能性があることから、長江、済州島、対馬海峡での栄養塩濃度のモニタリングが望まれる。

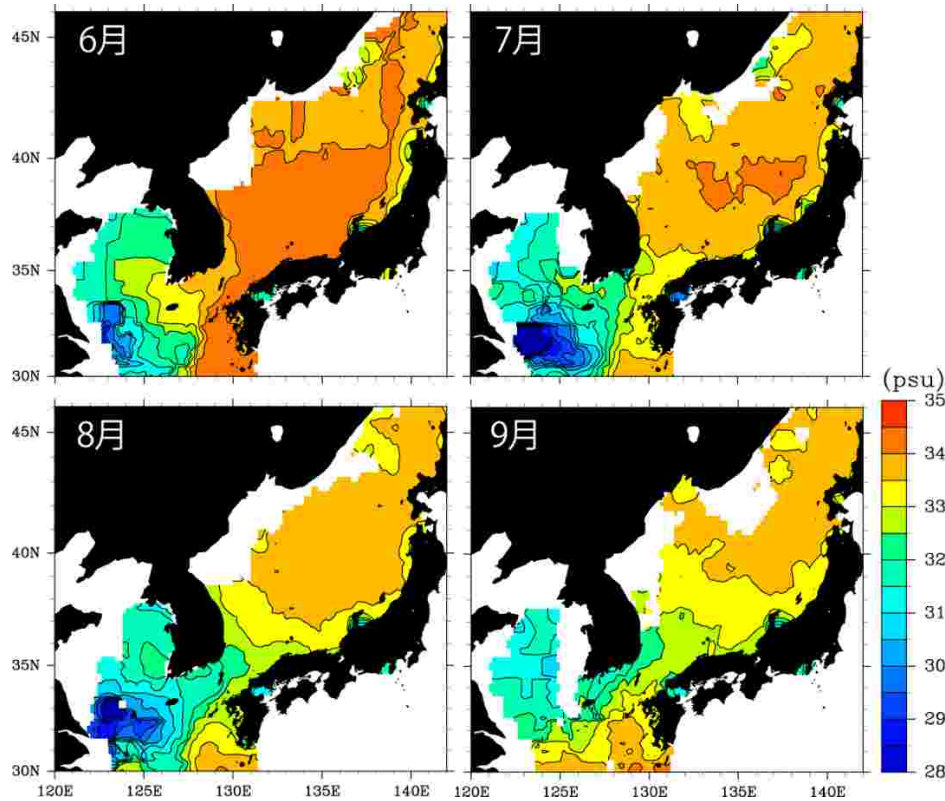
### 【キーワード】

長江起源の栄養塩、物理・低次生態系モデル、基礎生産、栄養塩の水平輸送

### 1. はじめに

日本海の海洋環境は、地球温暖化や対馬暖流が東シナ海から運び込む物質やエネルギーの変化に敏感に応答する。東シナ海の陸棚上を流れ対馬海峡より日本海へ流入する対馬暖流は、中国の河川水の7割以上を日本海へと輸送しており、その浮力の流入は日本海内部の循環場に影響を与えている。実際、6月～9月の東シナ海と日本海の海面塩分の変化をみると、中国大陸付近の低塩分水が季節とともに東へ広がり、日本海内部の塩分が低下していることがわかる(図(2-1)-1)。また、大陸起源の淡水だけでなく様々な物質も淡水と同様に日本海へと輸送されており、特に窒素やリンなどの栄養塩の流入は日本海内部の低次生態系を変化させる可能性が高い。中国の急激な経済成長や三峡ダムの建設は、河川水中の栄養塩濃度の上昇や窒素、リン、シリ

力の比を変化させており、東シナ海・黄海の富栄養化やプランクトンの種組成の変化を引き起こすことが懸念されている。また、中国北部の水不足を解消するため、長江の水を運河により北部へと輸送する南水北調事業が実施されており、この事業により長江の30%の水が北部へと運ばれる計画となっている。このような長江河川水の栄養塩濃度の変化や、河川水の流量変化は、東シナ海・黄海だけでなく日本海の海洋環境に大きな影響を与える可能性がある。しかしながら、東シナ海の海洋環境変化が日本海へどのような影響を与えるかは分かっていない。東シナ海の海洋環境は今まさに激変しており、日本海へ影響を早急に明らかにすることが望まれる。



図(2-1)-1 船舶観測により得られた6月～9月の海面塩分の気候値。

## 2. 研究開発目的

本研究では、東シナ海の海洋環境変化が日本海の海洋環境、特に低次生態系に与える影響を定量的に示すことを目的とする。そのために以下の3つの手順で研究を実施する。日本海の入口である対馬海峽を通過し対馬暖流により日本海へ水平的に輸送される溶存態無機窒素(DIN)の量を海洋観測により測定し、その季節・経年変化を明らかにする。観測されたDINの輸送量の変化が起こることで、日本海内部の低次生態系がどのように応答するかを定量的に示すための物理・低次生態系モデルを構築する。この数値モデルにより、東シナ海の海洋環境変化により日本海のどこでどの程度の変化が起こりえるのかを示し、日本海の海洋環境モニタリングを実施すべき場所の提案を行う。日本海の低次生態系における長江河川水起源の栄養塩の影響を調べるため、東シナ海を対象とした物理・低次生態系モデルを構築する。このモデルにより、対馬海峽を通過する栄養塩の起源を調べ、対馬海峽を通り日本海へ流入する栄養塩に対する長江起源の栄養塩量を定量化する。これら3つの研究から得られる知見をサブテーマ(1)へ提供し、日本海の管理・監視方法の策定の基礎材料とする。

## 3. 研究開発方法

### (1) 対馬海峽を通過し日本海へ輸送される栄養塩量の観測

対馬海峽において、対馬暖流により日本海へ水平に輸送される溶存態無機窒素(DIN)の量の季節・経年変化を把握するため、対馬海峽の東水道に6測点、西水道に2測点を設定し、DINの濃度と対馬暖流の流量の測定を船舶により行った。この観測で得られたデータはDIN輸送量の把握だけでなく、日本海を対象とした物理・低次生態系モデルの境界条件と、東シナ海を対象とした物理・低次生態系モデルの検証データとしても使用した。

## (2)日本海の物理 - 低次生態系モデルの構築

東シナ海から日本海へと水平的に輸送されるDINの変化が、日本海の低次生態系、特に基礎生産にどのような影響を与えるかを調べるための物理 - 低次生態系モデルを構築した。本モデルは、九州大学応用力学研究所で開発された物理モデル(DREAMS\_M)の流速、水温、渦拡散係数の出力を使い、日本海における栄養塩、植物プランクトン、動物プランクトン、溶存および懸濁態有機窒素の挙動と、生態系での物質循環を計算するものである。このモデルを使い、以下の(3)、(4)の研究を実施した。

## (3)日本海の基礎生産に対する日本海深層、対馬海峡、日本の河川からの栄養塩の寄与率の見積もり

サブテーマ(1)が提案する日本海の3階層管理において、日本海の低次生態系、特に基礎生産がどこを起源とする栄養塩により行われているかを知る必要がある。(2)で開発したモデルにおいて、1)日本海の内部の栄養塩(主に中・深層の栄養塩)、2)東シナ海を起源とし対馬海峡から日本海へ流入した栄養塩、3)日本の河川から流入した栄養塩、の3つの栄養塩を設定し、それぞれの栄養塩がどの割合で日本海の基礎生産に使われているかを計算した。

## (4)対馬海峡から流入する栄養塩量の変化に伴う日本海の低次生態系の応答

(1)の対馬海峡での船舶観測から、夏季の対馬海峡のDIN濃度は平均で $4\mu\text{M}$ 、多い年で $6\mu\text{M}$ 、少ない年には $2\mu\text{M}$ であることが分かった。このような対馬海峡でのDIN濃度の変化が日本海の低次生態系に与える影響を調べるため、(2)で開発したモデルにおいて対馬海峡の栄養塩濃度を平均的な値、平均値の1.5倍、平均値の0.5倍、にそれぞれ変化させた感度実験を行った。この感度実験の結果は、サブテーマ(1)が提案する日本海の海洋環境監視場所の選定に利用される。

## (5)東シナ海の物理 - 低次生態系モデルの構築

(2)で開発した日本海を対象とした物理 - 低次生態系モデルにより、東シナ海から日本海へ水平的に輸送されたDINが日本海の低次生態系にどのように利用されているかを定量的に示すことが可能になった。しかし、このモデルでは、対馬海峡から流入するDINは船舶観測結果から境界条件として与えており、対馬海峡のDIN濃度が経年的に変化する要因を明らかにすることができない。そこで、東シナ海から日本海へと輸送されるDINの経年変化の要因を明らかにするため、東シナ海・黄海を対象とした物理 - 低次生態系モデルの構築を行った。本モデルは、基本的には(2)で開発した日本海を対象としたモデルと同じものであるが、長江から供給されるDIN濃度が極めて高く、長江河口域およびその周辺海域では植物プランクトンの増殖を律速する栄養塩がDINではなく、溶存態無機リン(DIP)であると予想されることから、DINとDIPの両方を栄養塩として考慮したモデルとした。このモデルにより以下の(6)、(7)の研究を実施した。

## (6)対馬海峡の栄養塩の起源の推定

船舶観測により、対馬海峡東水道の夏季の平均DIN濃度が $2\sim 6\mu\text{M}$ の範囲で経年的に変化することが明らかになった。対馬海峡に運ばれてくるDINの起源として、1)東シナ海・黄海の底質から溶出するDIN、2)台湾海峡を通過して東シナ海へ流入するDIN、3)黒潮および太平洋の中・深層のDIN、4)長江から供給されるDIN、5)黄河から供給されるDIN、6)大気中のダストに含まれる窒素、が考えられる。対馬海峡のDIN濃度の経年的な変化がこれら6つの起源のどの窒素が変化することにより起こっているのか、また、長江起源のDINがどの程度日本海へ入っているのかを調べた。この解析結果より、中国の経済発展や三峡ダム建設、南水北調による長江河川水中の栄養塩濃度変化が日本海の海洋環境に与える影響を示すことができ、将来の日本海の海洋環境を予測するうえでの重要な知見を与える。

## (7)長江流量の変化による日本海へのDIN供給量の変化

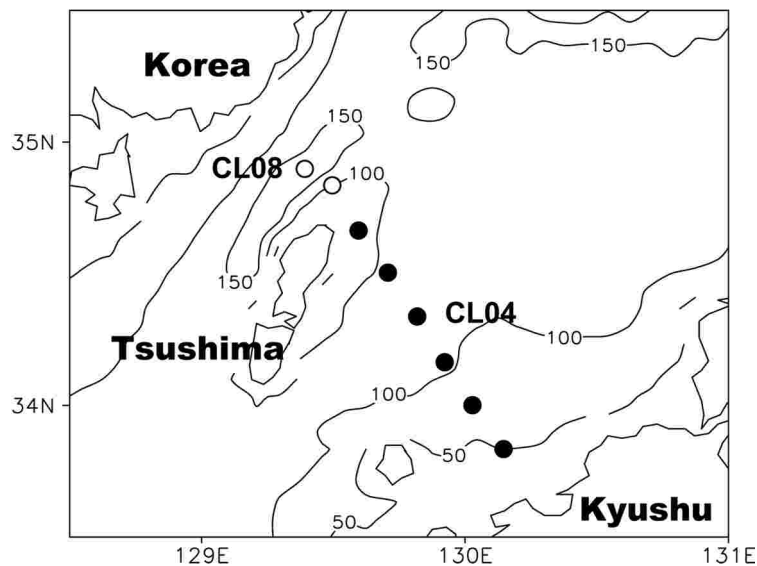
長江の流量変化により、東シナ海から日本海へ輸送されるDINがどの程度変化するのかを調べるため、東シナ海を対象とした物理 - 低次生態系モデルを使い、1981年以降で最も長江流量が多かった1998年と、流量が最も

少なかった2006年の長江起源のD Nの挙動を計算した。さらに、モデル内の生態系プロセスを動作させた場合とさせない場合の計算を行い、生物プロセスがD Nの輸送にどのように関与しているかを調べた。

#### 4. 結果及び考察

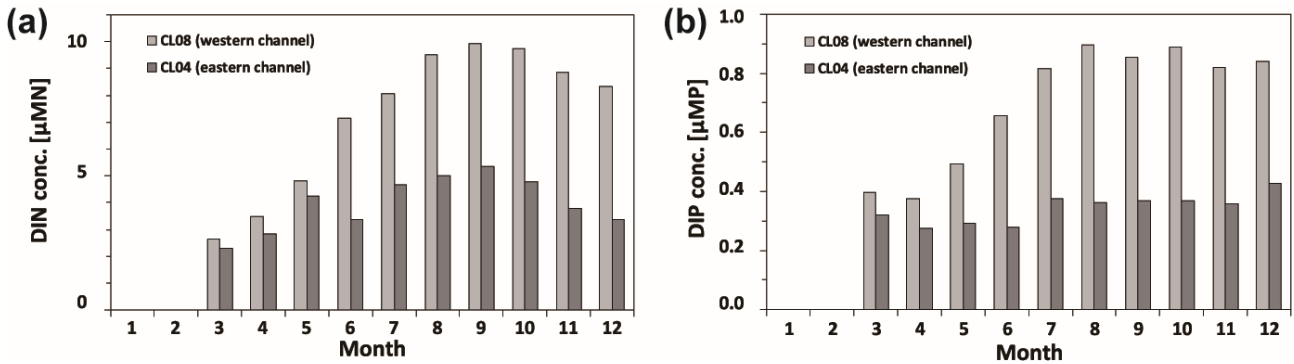
##### (1) 対馬海峡を通過し日本海へ輸送される栄養塩量の観測

日本海へどの程度の栄養塩が対馬暖流により水平的に輸送されているかを調べるため、対馬海峡の東水道に6点、西水道に2点の観測点を設定し、2005年より船舶観測を実施している(図(2-1)-2)。この観測ラインにおいては、任意の時刻の潮流を推定できることから、観測時の対馬暖流の流量を見積もることができる。各観測点において、標準層(0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200m)および各観測点の海底上5mでの採水を行い、溶存態無機窒素(D N)と溶存態無機リン(D P)の濃度を測定した。さらに、観測点間を移動する間、船底に取り付けられている超音波多層流速計により深さ方向に8m 間隔で水平流速を連続観測し、その流速データから潮流成分を除去することで観測時の対馬暖流の流速を見積もった。この流速データと栄養塩濃度から観測断面を通過する栄養塩フラックスを見積もった。



図(2-1)-2 対馬海峡における栄養塩および栄養塩フラックスの観測点。白丸は西水道の、黒丸は東水道の観測点を示す。

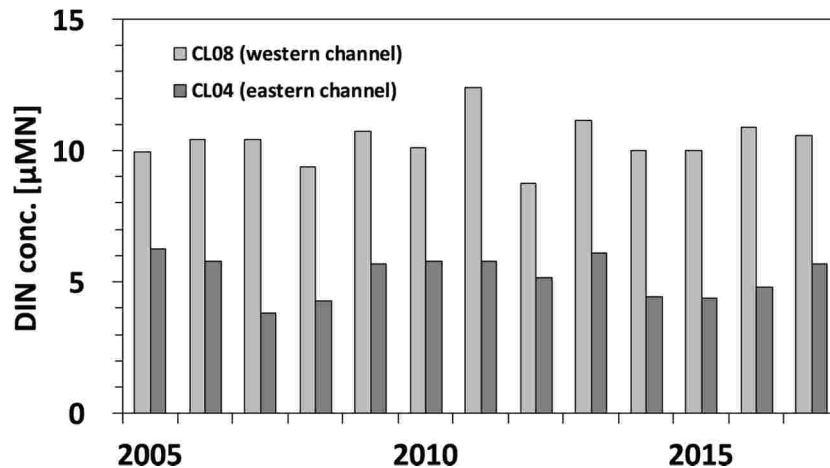
図(2-1)-3は、対馬海峡東西両水道それぞれを代表する観測点CL04とCL08におけるD NとD Pの季節変化を示したものである。D N濃度は東西両水道とも3月から濃度が上昇し9月に最大の濃度となり、その後12月まで少しずつ低下する。東水道、西水道の年平均D N濃度はそれぞれ $3.1\mu\text{M}$ 、 $7.0\mu\text{M}$ であり、西水道の栄養塩濃度は東水道の2.3倍程度高い。西水道のD N濃度が東水道より高い理由は、CL08の水深が220mと深く、150m以深には日本海を起源とする5℃以下の冷水があり、この水塊の栄養塩濃度が高いためである。D P濃度は3月から少し減少傾向を示した後、夏に向け上昇しその後高濃度を維持する。東水道、西水道の年平均D P濃度はそれぞれ $0.35\mu\text{M}$ 、 $0.69\mu\text{M}$ である。またN/P比(D N濃度とD P濃度の比)は東西両水道それぞれ、9.1、10.1であり、レッドフィールド比の16より小さく、対馬暖流域の植物プランクトンの増殖はD Nにより律速されていると考えられる。



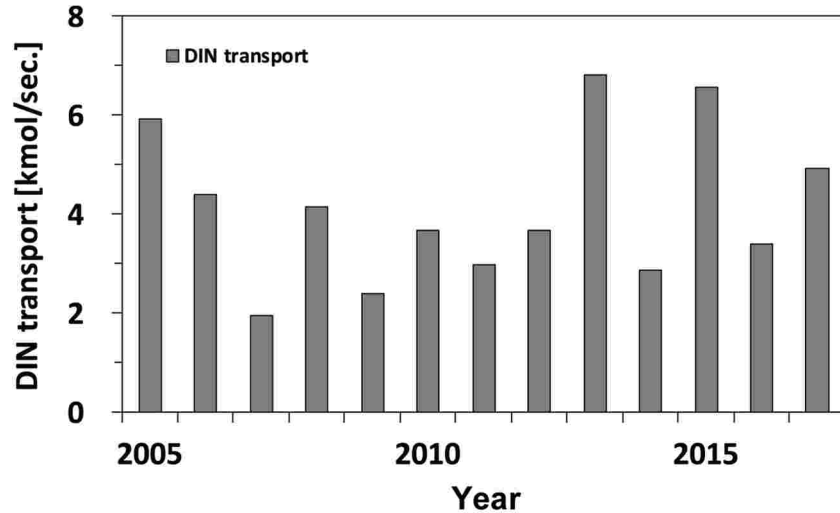
図(2-1)-3 2005年から2017年までのデータを平均した対馬海峡東水道 (CL04) と西水道 (CL08) の(a) D N濃度と(b) D P濃度の季節変化。

図(2-1)-4は7～9月(夏季)の東西両水道における平均D N濃度の経年変化を示している。東水道(CL04)と西水道(CL08)の夏季の平均D N濃度はそれぞれ $5.3\mu\text{M}$ 、 $10.1\mu\text{M}$ であり、標準偏差は $1.5\mu\text{M}$ 、 $0.84\mu\text{M}$ である。西水道のD N濃度は東水道のD N濃度より1.9倍程度高い。これは、垂表層での栄養塩濃度が西水道のほうが高いことと、西水道の水深が東水道より深く、底層に高濃度なD Nが存在するためである。東水道のD N濃度は2005、2012、2013年に $6\mu\text{M}$ 以上と高く、2007年に $4\mu\text{M}$ 以下と低くなっている。東水道を通過するD Nのフラックスをみると、2005、2013、2015年に大きく、2007、2009、2011、2014年に小さくなっており(図(2-1)-5)、東水道から流入するD Nフラックスが $2\sim 7\text{kmol/s}$ 程度のレンジで経年的に変化していることがわかる。西水道については、観測点が2点しかないため、D Nのフラックスを見積もることができないが、西水道の栄養塩濃度が東水道より約2倍高いという事実と、西水道の対馬暖流の流量が東水道と同じだと仮定すると、 $4\sim 14\text{kmol/s}$ のレンジでの経年変化があると考えられる。なお、西水道の対馬暖流流量は東水道のそれより多いことが分かっている(Takikawa *et al.*, 2005)。したがって、実際の西水道のD Nフラックスの変動はこの見積もりよりも大きいと予想される。

対馬海峡を通過するD N、D Pのフラックスの経年変化は、対馬暖流の流量の変化と対馬海峡の栄養塩濃度の変化の両方により起こっている。対馬暖流の流量の経年変化の要因についてはよくわかっていない。一方、夏季の栄養塩濃度の経年変化の要因については、黄海底層を起源とする栄養塩と太平洋起源の栄養塩の混合比が年によって変化すること(Morimoto *et al.*, 2012)、長江起源の栄養塩の供給量の年による違いが関係する(Kodama *et al.*, 2017)ことが既往の研究で示唆されている。長江中流に建設された三峡ダムの影響により、日本海へ流入する栄養塩量が変わることが懸念されているが、図(2-1)-4を見る限り三峡ダムが完成した2009年以降、対馬海峡の栄養塩濃度に系統的な変化はみられず、栄養塩濃度の経年変化は三峡ダムの影響ではなく別の要因により起こっていると考えられる。また、西水道と東水道の栄養塩濃度の経年変化傾向は一致しておらず、それぞれの水道に流入する栄養塩の起源、もしくはいくつかの起源の栄養塩の混合比が異なっていることが示唆される。



図(2-1)-4 2005年から2017年のデータのうち、7～9月のデータを平均した対馬海峡東水道 (CL04) と西水道 (CL08) のD N濃度の経年変化。

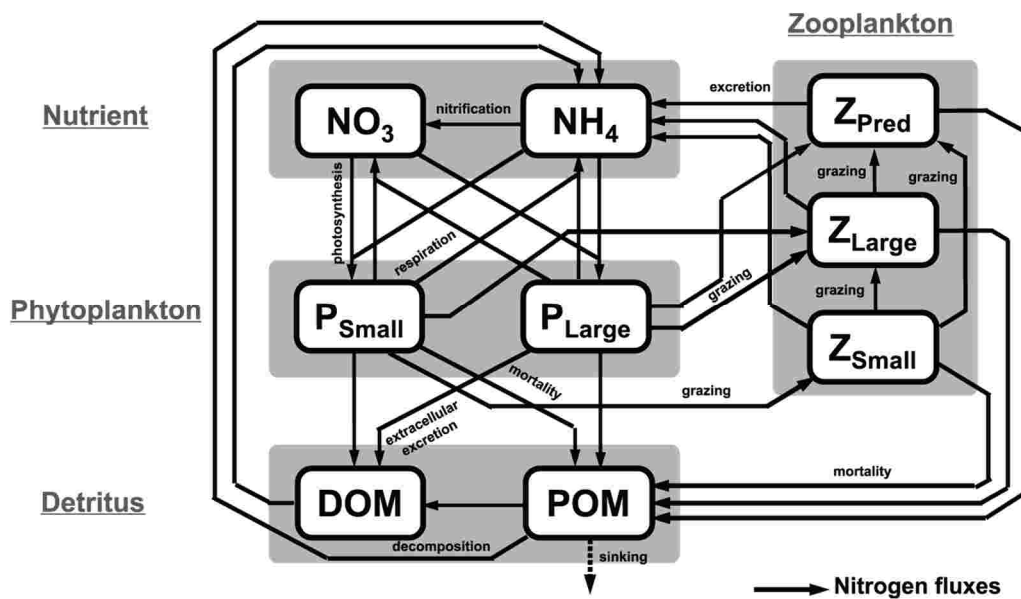


図(2-1)-5 7～9月の対馬海峡東水道を通過し日本海へ流入するDINフラックスの経年変化。

## (2)日本海の物理 - 低次生態系モデルの構築

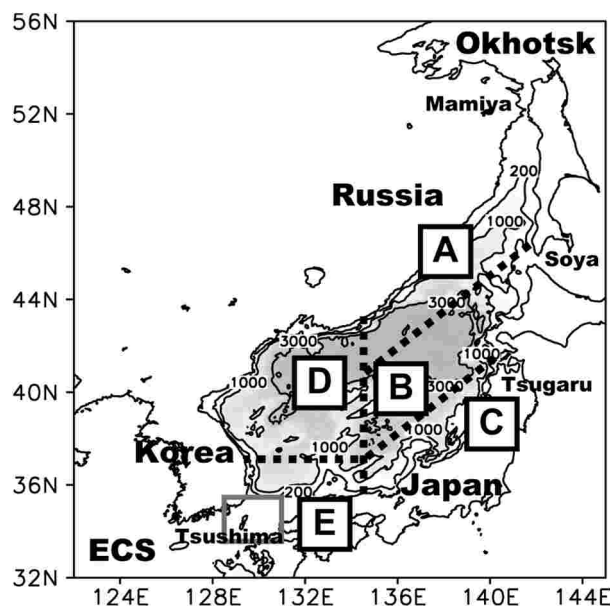
対馬海峡におけるDINフラックスの観測結果から、東水道では2～7kmol/s、西水道では4～14kmol/s程度のDINフラックスの経年変化があることが分かった。観測されたこのようなDINフラックスの変化が起こった場合、日本海の植物プランクトン量や栄養塩濃度が、どこで、どの程度、変化するかを調べる必要がある。観測データのみから低次生態系の応答を調べることは難しいため、数値モデルを使いDINフラックスの変化に伴う低次生態系の応答を調べる。栄養塩やプランクトンなどの物質は海流により移流・拡散され、光合成や捕食などの生物過程により生成・消滅する。このような物理的・生物的過程をモデル化し物質循環を調べるため、日本海を対象とした物理・低次生態系モデルを構築する。

モデル内の物理場は季節変化だけを起こさせる。ここで、流速、水温、水平および鉛直の渦拡散係数は九州大学応用力学研究所で開発された海洋同化物理モデルDREAMS\_M (Hirose *et al.*, 2013)の2000-2011年の月平均値を使用した。モデル内の生物過程としては、NEMURO (Kishi *et al.*, 2007)を参考に、栄養塩として硝酸とアンモニア、2種類の植物プランクトン、3種類の動物プランクトン、溶存態有機窒素、懸濁態有機窒素をコンパートメントとした比較的シンプルなモデルとした(図(2-1)-6)。



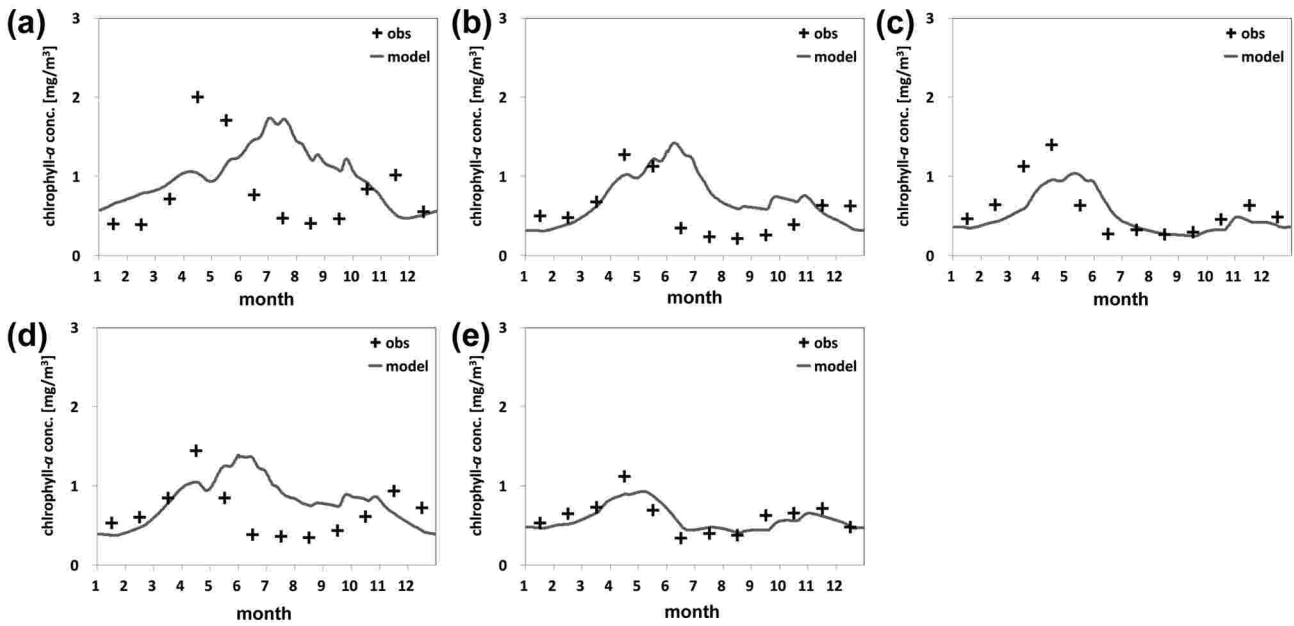
図(2-1)-6 日本海の低次生態系モデルの構成要素

本モデルは日本海を計算対象とし、対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡、間宮海峡を開境界とした(図(2-1)-7)。モデルの水平解像度は経度方向に1/12度、緯度方向に1/15度、鉛直方向は38層からなり水深100mまでの層厚は4~20mである。対馬海峡における栄養塩の境界条件は、船舶観測により得られたDIN濃度と水温データを使い月ごとの両者の関係式をもとめ、物理モデルから出力された対馬海峡の境界における水温データから栄養塩濃度を計算し与えた。間宮海峡ではアムール川起源の淡水に含まれるDINを考慮するため、アムール川中流のFuyuanにおけるDINの観測値の1/3の濃度を境界条件として与えた。さらに、日本の河川からの栄養塩供給を考慮するため、計算領域内の33河川からDINを与えた。各河川の流量は水文水質データベース(<http://www1.river.go.jp/>)の2000~2010年の月平均流量を与え、DIN濃度は富山県の小矢部川および神通川の2009~2010年の年平均DIN濃度を与えた。日本海内部の栄養塩濃度の初期値は、日本海を南北にカバーする気象庁の観測線PMラインの8、9月の硝酸態窒素濃度と水温のデータを使い、水温から硝酸塩濃度を計算する式を求めた。両者は相関係数0.98と極めて高い負の相関を示した。この関係式により、物理モデルの8月の水温データからモデル領域全体においてDIN濃度を計算し初期値とした。8月から計算を開始し、準定常となった計算開始3年後の結果を解析に使用した。



図(2-1)-7 計算領域と水深。図中のA~Eはモデルと衛星観測のクロロフィルa濃度を比較する際の領域区分を示している。

モデルの再現性の確認のため、人工衛星により観測された海面クロロフィルa濃度とモデルのクロロフィルa濃度を比較する。対馬暖流域(図(2-1)-7の領域C E)においては、モデルと観測のクロロフィルa濃度の差のRMSはそれぞれ、 $0.32 \text{ mg/m}^3$ 、 $0.12 \text{ mg/m}^3$ と小さく、ほぼ季節変化を再現できている(図(2-1)-8c, 8e)。領域BとDでは冬季~春季のクロロフィルa濃度や季節変化再現できているものの、夏季~秋季のクロロフィルa濃度が少し大きくなっている。領域Bと領域Dにおけるモデルと観測のクロロフィルa濃度の差のRMSはそれぞれ、 $0.24 \text{ mg/m}^3$ 、 $0.24 \text{ mg/m}^3$ であった。日本海北部の領域Aでは、クロロフィルa濃度が最大となる季節がずれており再現性はよくない。領域Aはロシア沿岸域を含んでおり、本モデルではアムール川の影響やロシア沿岸からの栄養塩供給がデータ不足のため正確に考慮できていないこと、物理モデルにおいて領域Aで冬季に形成される海水が考慮されていないことが再現性を悪くしている原因と考えられる。領域Aでのモデルの再現性は不十分であるが、対馬暖流の影響を受ける海域における再現性はかなり高いことから、本モデルにより対馬海峡から流入する栄養塩量の変化に伴う低次生態系の応答を調べる。



図(2-1)-8 図(2-1)-7の領域A B C D Eで平均した人工衛星により観測されたクロロフィルa濃度 (+ 印)とモデルで計算されたクロロフィルa濃度 (実線)の比較。(a) 領域A、(b) 領域B、(c) 領域C、(d) 領域D、(e) 領域E。

### (3)日本海の基礎生産に対する日本海深層、対馬海峡、日本の河川からの栄養塩の寄与率の見積もり

日本海内部に存在する栄養塩は日本海内部にもともと存在している栄養塩、対馬海峡から水平的に流入した栄養塩、日本の河川から供給された栄養塩、の3つの起源を持つものの合計と考えることができる。サブテーマ(1)が提案する日本海の3階層管理法では、上記3つの起源をもつ栄養塩が日本海の基礎生産にそれぞれの程度寄与しているのかを知ることが必要となる。例えば、ある海域の基礎生産が日本の河川から供給される栄養塩を多く利用し行われていれば、日本国内の対応で基礎生産をある程度コントロールすることができる。一方、対馬海峡を通り水平的に輸送されてきた栄養塩が基礎生産において重要な海域では、日本だけでなく中国、韓国など他国との調整が必要となる。したがって、日本海の基礎生産を支える主要な栄養塩供給源を明らかにすることが重要となる。そこで、開発した物理・低次生態系モデルを使い、対馬海峡から流入する栄養塩だけを使う生態系、河川からの栄養塩だけを使う生態系、すべての条件を与えた生態系、これらを同時に解くことで日本海の基礎生産が日本海起源、東シナ海起源、陸起源のDNをそれぞれ何割使い行われているのかを時空間で計算する。

具体的な計算方法としては、対馬海峡から流入する栄養塩による生態系の計算では、対馬海峡から流入する栄養塩を境界条件として与え、初期状態では計算領域の栄養塩濃度をゼロとする。日本の河川からの栄養塩による生態系では、同様に、日本の河川からの栄養塩を境界条件として与え、初期状態ではその他の領域の栄養塩濃度をゼロとする。すべてを考慮した生態系は(2)で説明した条件で計算する。この3つの計算を同時進行させると、ある時刻 $t$ 、ある場所 $x$ の栄養塩濃度 $N(x,t)$ は、

$$N(x,t) = \sum_{i=1}^3 N_i(x,t)$$

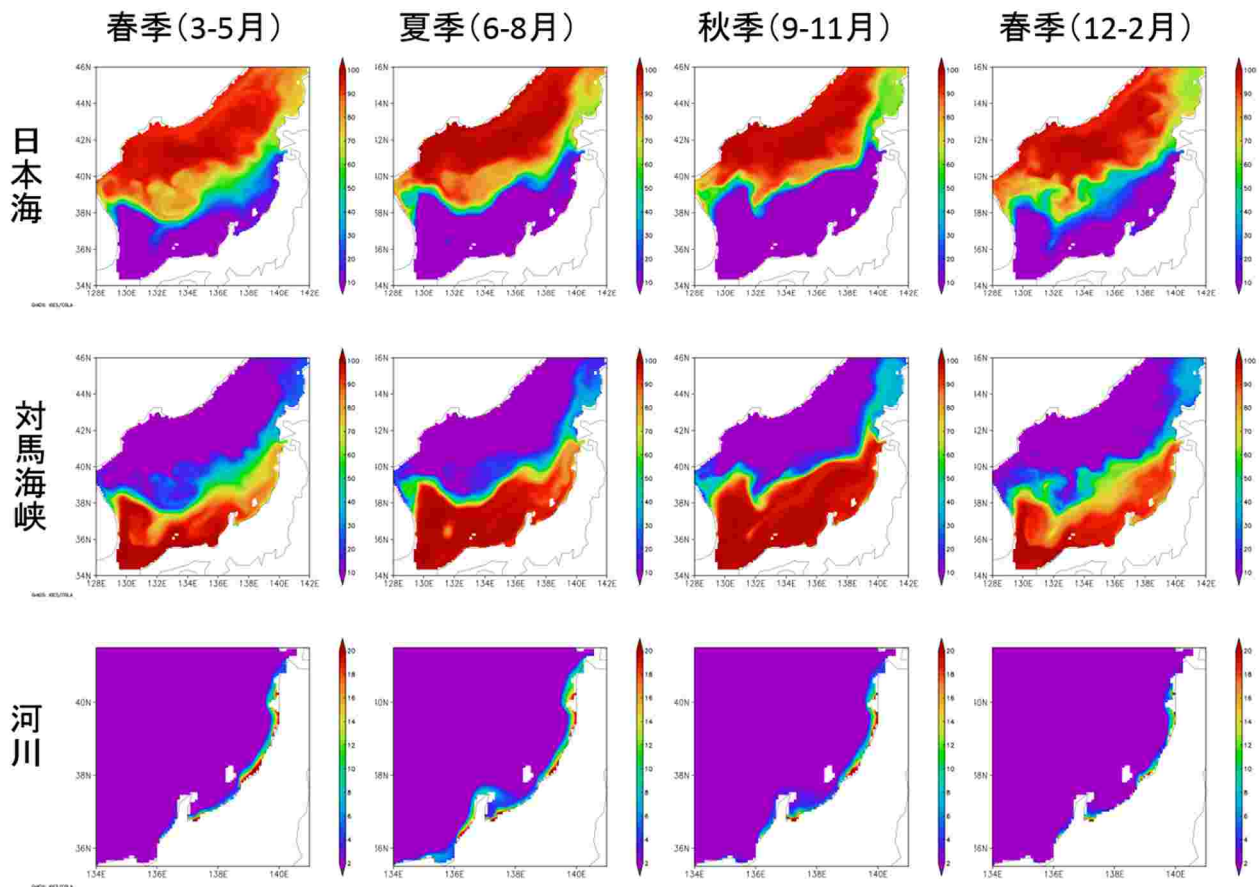
と表すことができる。ここで $N_1(x,t)$ 、 $N_2(x,t)$ 、 $N_3(x,t)$ はそれぞれ、対馬海峡起源の栄養塩濃度、日本の河川起源の栄養塩濃度、日本海にもともと存在していた栄養塩濃度を示す。なお、 $N_3(x,t)$ はその挙動を直接計算するのではなく、 $N(x,t) - N_1(x,t) - N_2(x,t)$ により求める。時刻 $t$ 、場所 $x$ における基礎生産はトータルの栄養塩濃度 $N(x,t)$ により計算し、栄養塩濃度の比 $N_1(x,t)/N(x,t)$ と $N_2(x,t)/N(x,t)$ により各生態系での基礎生産量に分配する。動物プランクトン、溶存態・懸濁態有機窒素の計算においても同様にすべてを考慮した生態系の変数にから増減を計算し、栄養塩濃度の比により分配する。この計算により、各起源の栄養塩が基礎生産にそれぞれ何パーセント寄与したかが計算できる。

日本海、対馬海峡、日本の河川、起源の栄養塩の各季節の基礎生産における寄与率を図(2-1)-9に示す。日



本海の南北で寄与率は大きく異なっており、北部は日本海起源の栄養塩、南部は対馬海峡起源の栄養塩がそれぞれ基礎生産に大きく寄与している。日本海南部では対馬海峡起源の栄養塩の寄与率は80%以上と高い。一方、河川起源の栄養塩の寄与は沿岸から数十Kmの範囲に限られており、その寄与率は高くても20%程度である。このことから、日本海南部の基礎生産は対馬海峡から流入する栄養塩、つまり東シナ海からの栄養塩の変化に敏感であると予想される。また、対馬海峡起源の栄養塩の寄与率の季節変化を見ると、秋季に最も高く春季に低くなっている。これは、夏季から秋季にかけて対馬海峡から流入する栄養塩量が増加することと、その栄養塩が生物過程により循環し密度躍層以深の栄養塩濃度を増加させ、さらに秋季の海面冷却による鉛直混合により再度有光層に栄養塩が供給されるためと考えられる。春季の寄与率の低下は、冬季の混合層の発達により有光層内の栄養塩に占める日本海起源の栄養塩が相対的に多くなるためである。

基礎生産に対する各栄養塩源の寄与率の計算結果から、日本海の低次生態系の管理において、特に極前線以南の海域においては、東シナ海から日本海へ流入する栄養塩量を監視することが重要である。栄養塩量の監視は、日本海の唯一の入口であり、アクセス面や観測範囲から対馬海峡が最適である。さらに、中国、韓国との国際共同監視体制を構築し、対馬暖流の上流域である東シナ海陸棚上にもいくつかの監視点を設定するのが望ましい。以上のことから、日本海南部海域の低次生態系の管理には国際協力体制が欠かせないことがわかるが、富山湾など能登半島以北の沿岸では、局所的に日本の河川からの栄養塩供給が基礎生産へ寄与する率が高くなっている。このような海域においては、河川の水質管理や土地利用の管理などにより海洋環境、特に低次生態系の状態をコントロールできる可能性がある。



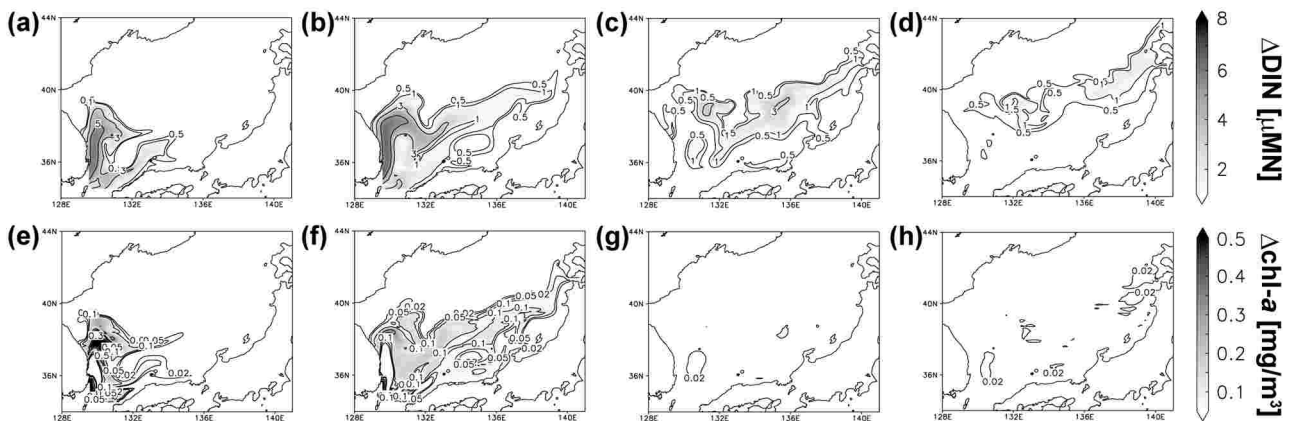
図(2-1)-9 日本海の水深0～50mの積算クロロフィルa量に対する、日本海、対馬海峡、日本の河川起源の栄養塩の寄与率とその季節変化。単位は%。

#### (4) 対馬海峡から流入する栄養塩量の変化に伴う日本海の低次生態系の応答

日本海南部海域の低次生態系、特に基礎生産は対馬海峡を通過して日本海へ流入する栄養塩によりほとんどの部分が支えられていることが(3)の結果より明らかになった。対馬海峡より流入する栄養塩量は経年的に大きく変化しており(図(2-1)-4, (2-1)-5)、このような変化により日本海南部の基礎生産は年ごとに大きく変化して

いと予想される。一方で、対馬海峡から流入する栄養塩の多くは対馬海峡底層より流入しており(Morimoto et al., 2009)、成層が発達する夏季などは流入栄養塩が増減しても基礎生産にはほとんど影響を与えない可能性も考えられる。そこで、本研究で開発した物理 - 低次生態系モデルを使用し、対馬海峡から流入する栄養塩を変化させた感度実験を行うことで、船舶観測で示された日本海へ流入する栄養塩量の経年変化が日本海の低次生態系に与える影響を定量的に調べる。

対馬海峡からのDINフラックスの変化に伴う低次生態系の応答を詳しく調べるため、対馬海峡からのDINフラックスを平均値より1.5倍多くした計算を行った。DINフラックスを平均値の1.5倍とするという条件は、図(2-1)-5の観測結果におけるDINフラックスが最大となった2013年を想定したものである。この計算では、1~5月と11~12月の栄養塩濃度は平均値を与え変化させず、6~10月までの栄養塩濃度を平均値の1.5倍に設定し、DINフラックスを増加させた。夏季のDINフラックスの増加に伴い、7月の日本海南海域の鉛直平均DIN濃度が増加しているのが分かる(図(2-1)-10a)。特に朝鮮半島に沿ってDINの増加量が大きい範囲が分布している。クロロフィルa濃度の増加量をみると、DINの増加の分布とほぼ同じ分布をしており、DINの供給量の増加に伴い植物プランクトンが増えたことが分かる(図(2-1)-10e)。10月になるとDIN濃度が増加した範囲はより東へと広がる。ただし、日本列島に沿ってはほとんど増加していない(図(2-1)-10b)。クロロフィルa濃度は対馬海峡付近と朝鮮半島東岸を除き広域で増加している(図(2-1)-10f)。1月のDIN濃度の増加のパターンは秋の分布と似ているが、対馬海峡からのDIN供給量の増加が10月までのため、朝鮮半島沿いのDIN増加量はほぼゼロとなっている(図(2-1)-10c)。クロロフィルa濃度の増加量はほぼ全域で低く、DINが増加した海域においてもほとんど増加していないことが分かる(図(2-1)-10g)。4月になるとDIN濃度は北緯38~40°で東西に帯状に増加した範囲が広がっている。その増加量は他の季節に比べ小さい(図(2-1)-10d)。クロロフィルa濃度の増加はDIN濃度の増加のパターンとは異なっており、津軽海峡の西で少し高くなっている(図(2-1)-10h)。基礎生産に対する3つの栄養塩起源の寄与率の計算から予想されたように、対馬海峡からのDINフラックスの増加は、日本海南部海域のクロロフィルa量を変化させることが分かる。その変化量は大きいところで $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ であり、平均的なDINフラックスを与えた場合に比べ最大で25%増加した。なお、対馬海峡からの栄養塩フラックスを平均値の0.5倍にしたケースでは、1.5倍にしたケースの符号を反対にしたような結果となった。



図(2-1)-10 対馬海峡からのDINフラックスを平均の1.5倍増加させた場合の、(a)7月、(b)10月、(c)1月、(d)4月の100mで平均したDIN濃度の増加量と、水深20mで平均した(e)7月、(f)10月、(g)1月、(h)4月のクロロフィルa濃度。

日本海南部海域の基礎生産の80%以上が対馬海峡起源の栄養塩により支えられていることを考えると、対馬海峡の栄養塩フラックスを1.5倍にした場合、日本海南部海域全体の栄養塩濃度やクロロフィルa濃度の上昇があると期待されるが、感度解析結果をみると栄養塩、クロロフィルa濃度の変化は空間分布を持っていることがわかる。このような空間分布になる理由を以下で考察する。

韓国東岸に注目すると、7月にはDIN、クロロフィルa共に増加しているが、10月になるとDIN濃度は $4\sim 5\mu\text{M}$ 程度増加しているが、クロロフィルa濃度の増加量は朝鮮半島に沿って帯状に小さくなっている。一方DINはその海域で増加している。DIN濃度が増加したにもかかわらず、クロロフィルa濃度が増加しない理由を考察する。夏季においては、韓国東岸は南風により沿岸湧昇が起こり(Park and Kim, 2010)、成層期である夏季においても平均

的な場におけるD N濃度は5 $\mu$ Mと比較的高い。さらに、対馬海峡西水道からのD Nフラックスの増加に伴いD N濃度が増加し、そのD Nを使い光合成が行われるためクロロフィルa濃度が増加する。10月に対馬海峡西水道からのD Nフラックスは増加している時期であり韓国東岸でD N濃度は増加している。しかし、海面冷却による鉛直混合によって韓国東岸の10月のD N濃度は10 $\mu$ M程度とかなり高くなる。すでに十分なD Nがあることと、水温の低下による光合成活性の低下によりクロロフィルa濃度は増加しなかったと考えられる。韓国東岸以外の海域では、元々のD N濃度が韓国東岸ほど高くないため、対馬海峡からのD Nフラックスの増加に伴いD N濃度が増加した底層の水が鉛直混合により有光層へ運ばれるためクロロフィルa濃度が増加したものと考えられる。

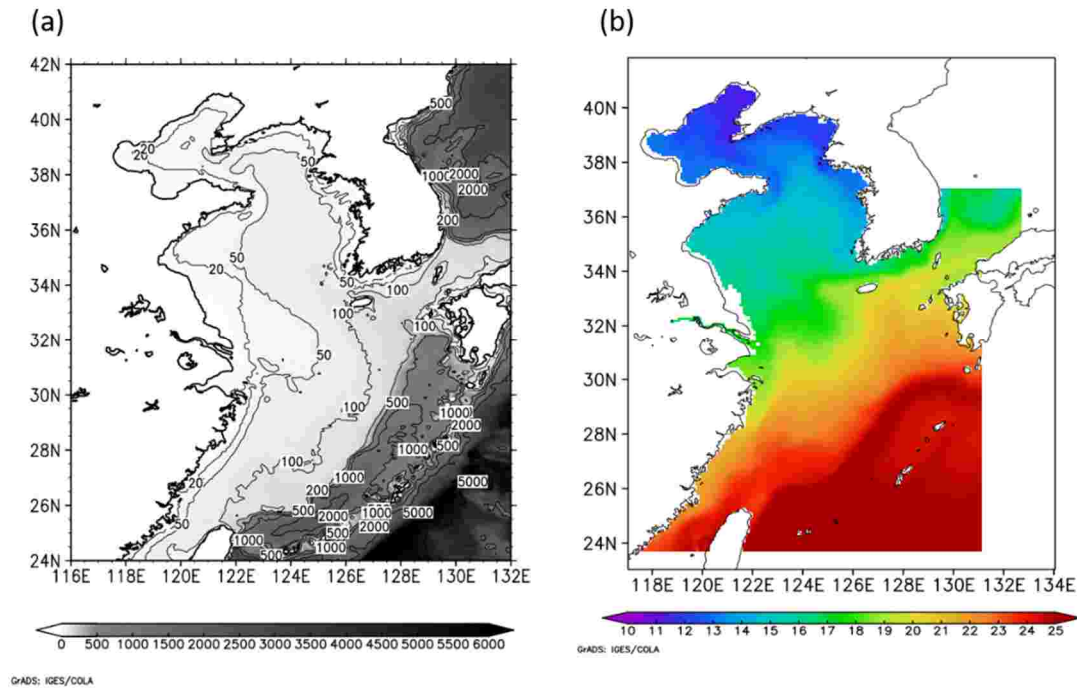
日本列島沿いのD Nの増加の分布とクロロフィルa濃度の増加の分布の違いがみられることについても考察する。対馬海峡東水道の深部から流入したD Nの多くが隠岐付近で北東方向へ輸送され、日本列島に沿って輸送されるD Nは少なくなる(図(2-1)-10a)。日本列島に沿って輸送されるD Nは植物プランクトンの生産にすぐに使われ有機物となるため、日本列島に沿ってD Nの増加が見られない。しかし、その有機物は対馬暖流の沿岸分枝流により日本列島に沿って北へと運ばれながら、分解により有機物からD Nへと変化し、それが再び植物プランクトンにより使われる。その結果、秋季にD N濃度の増加が見られない日本列島沿いにおいて、クロロフィルa濃度は増加すると考えられる(図(2-1)-10f)。この計算結果から、対馬海峡の東水道と西水道から流入するD Nが増加すると、その増加過程は異なるものの、北緯38°以南の広範囲において基礎生産が増えることが分かる。

上記の実験では、観測データを基に夏～秋のD Nフラックスが増加すると仮定したが、他の季節のD Nフラックスも増加している可能性がある。そこで、冬季のD Nフラックスを増加させた計算を行った。冬季のみD Nフラックスを増加させた場合、D N濃度とクロロフィルa濃度が大きく変化する海域は日本海南海域に限られた。これは、冬季は混合層が発達しているため、対馬海峡から流入したD Nはすぐに有光層へ運ばれ植物プランクトンの光合成に使われるためである。このことから、広域の基礎生産を増加させるのは、成層が発達した夏季のD Nフラックスの変化であることが分かる。

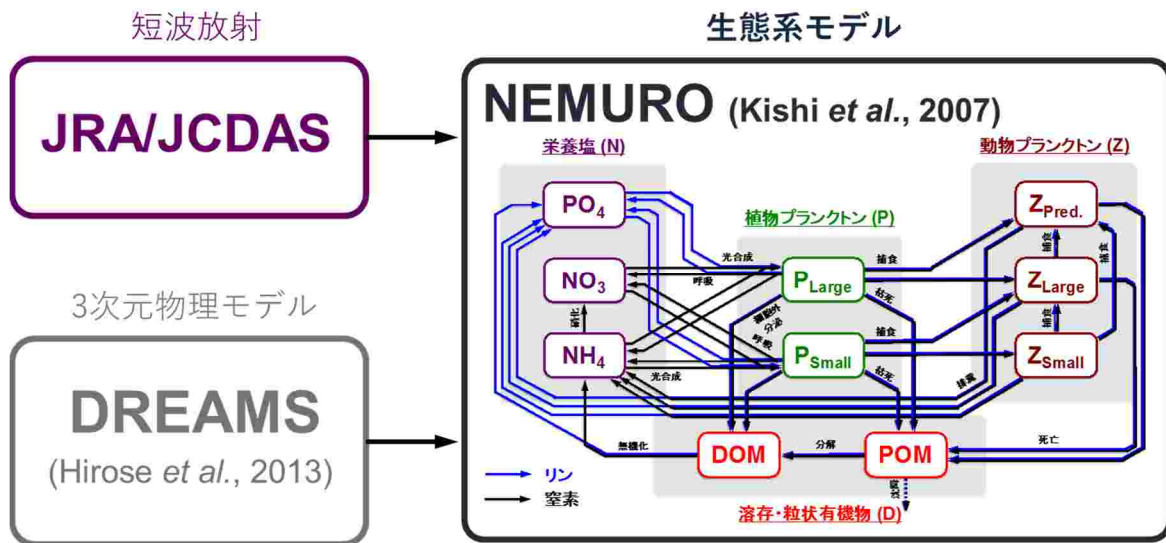
#### (5)東シナ海の物理 - 低次生態系モデルの構築

前節では、船舶観測結果に基づいて対馬海峡から流入するD Nフラックスを変化させ、その変化に対する日本海の低次生態系の応答を調べ、日本海南部の広範囲の基礎生産が変化することを明らかにした。しかしながら、対馬海峡を通過するD Nフラックスが変化する原因が分からなければ、今後のD Nフラックスの増減を予想することができなく、日本海の低次生態系が将来どのようなようになっていくかを知ることはできない。対馬海峡での横断観測から淡水の水平フラックスを見積もると、その量は長江流量とほぼ同程度であり、長江を起源とする淡水のほとんどが日本海へ流入していることが分かる(Morimoto *et al.*, 2009)。長江のD N濃度は100 $\mu$ M以上と報告されており(Wang, 2006)、D Nが淡水と同様な挙動をしているとすると、大量の長江起源のD Nが日本海へ流入していることになる。しかし、D Nは植物プランクトンの光合成に使われるため、淡水のように単純に東シナ海において移流・拡散されているわけではなく、その挙動を知ることは容易ではない。東シナ海における長江起源のD Nの挙動はわからないものの、中国の経済は現在もなお急激に発展しており、長江河川水中のD N濃度は今後増加し、N/P比の変化が起こる可能性も高く、対馬海峡を通過するD Nフラックスが将来大きく変化する可能性がある。長江河川水中のD Nがどの程度対馬海峡から日本海へ流入しているのか、そして、対馬海峡のD N濃度が経年的に大きく変化する要因を明らかにするため、東シナ海・黄海を対象とした物理 - 低次生態系モデルを構築する。

日本海を対象とした物理 - 低次生態系モデルをベースに東シナ海を対象としたモデルを作成した。東シナ海の海底地形と計算領域を図(2-1)-11に示す。計算領域は北緯24度～42度、東経117度～131度とし、日本海内部は北緯37度までとした(図(2-1)-11b)。本モデルは物理場と低次生態系を別々に計算するオフラインのモデルである。流速、水温、水平・鉛直渦拡散係数などの物理変数は、九州大学で開発された空間解像度1/12度×1/15度の物理同化モデルDREAMS\_Mの計算結果を使用した。低次生態系に関しては、NEMUROをベースとしたモデルとし、植物プランクトン2種類、動物プランクトン3種類、溶存態有機物、懸濁態有機物をそれぞれ2種類、栄養塩を3種類とした(図(2-1)-12)。日本海モデルでは栄養塩として窒素のみを考慮したが、東シナ海では長江など河川からN/P比の高い水が流入しており、特に長江河川水のN/P比は100以上と極めて高いことから、河口域を中心に植物プランクトンの増殖を律速する栄養塩がリンになっていると考えられる。したがって、硝酸塩とアンモニアに加えリン酸塩を変数に加えた。



図(2-1)-11 (a)東シナ海の海底地形と(b)モデルの計算領域。図中のカラーは年平均の海面水温を示している。

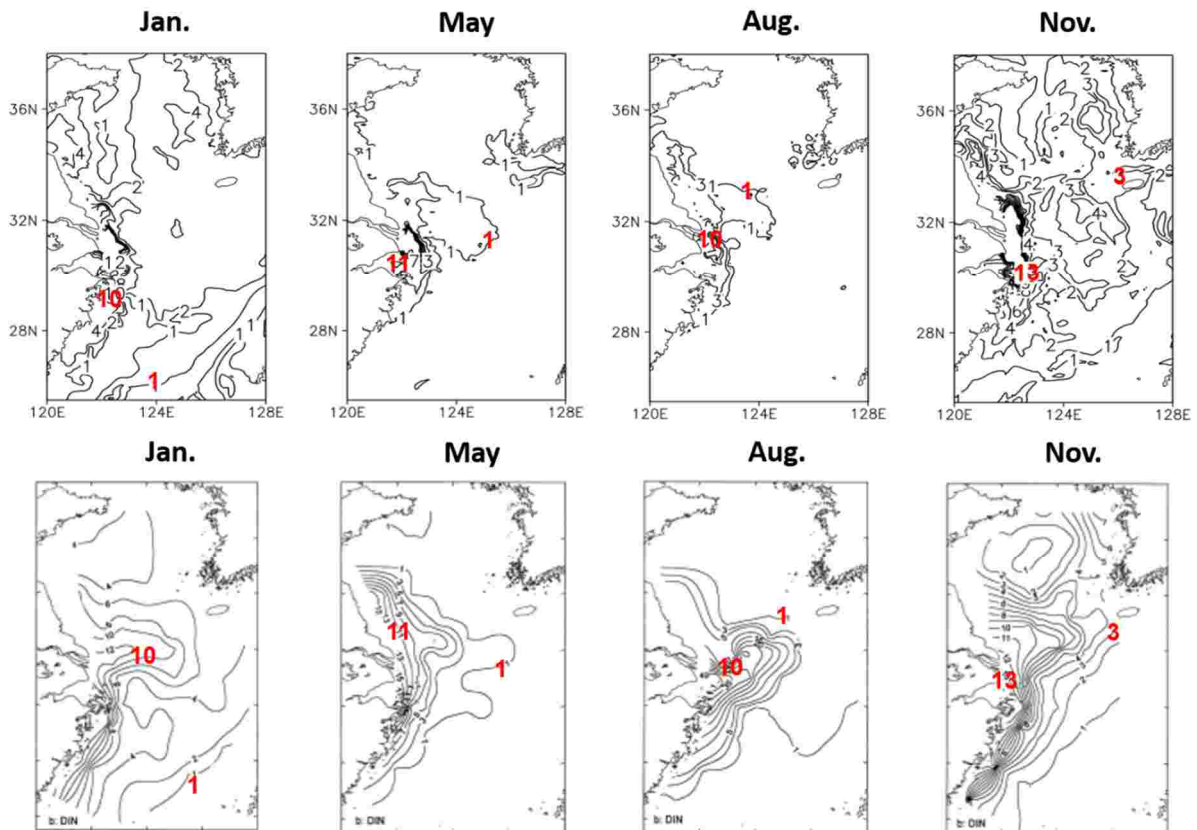


図(2-1)-12 東シナ海の低次生態系モデルの構成要素

台湾海峡、太平洋、日本海、長江・黄河の栄養塩の境界条件は以下のように設定した。台湾海峡については、(Liu *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2004) の水温と硝酸塩のデータから両者の回帰式を作成し、物理モデルの水温データから硝酸濃度に変換し与えた。太平洋については気象庁の137度観測線と東シナ海のPN線の栄養塩と水温データから両者の回帰直線を求め、台湾海峡と同様に物理モデルの水温データから硝酸濃度に変換して与えた。日本海については、硝酸塩については日本海モデルの計算結果を与え、リン酸についてはN/P比を14と仮定し窒素の濃度との比として与えた。長江についてはWang *et al.* (2003)による長江河口域における夏季の硝酸塩とリン酸塩の濃度を参考に設定した。また黄河については、長江の半分程度の濃度と設定した。東シナ海・黄海ではダストの降下による大気経由の窒素、リンの供給があることが知られている。Chen and Chen (2008)を参考にし、DNとPの年平均値を常に与えるように設定した。また、富栄養化環境においては、動物プランクトンの活性がさがることの報告があることから(Uye *et al.*, 1999)、長江河口域のような極端な富栄養化状態では動物プランクトンの増殖を制限させるように設定した。

まず、対馬海峡における夏季のDIN濃度が平均的な値であった2006年を対象に計算を行う。計算は2006年の1月から開始し準定常となる3年間積分した。ここで、栄養塩の初期値は200mより浅い陸棚上ではWei *et al.* (2013)による黄海冬季の鉛直分布を基に一定値として与え、NP比についてはWei *et al.* (2013)及びWang *et al.* (2003)の黄海冬季の栄養塩分布よりNP比を算出しDIN濃度を基に与えた。200mより深い太平洋においては、気象庁の137度線の冬季のDINとDIPの平均鉛直分布を与えた。物理場はDREAMS\_Mの2006年の日平均値を使用した。

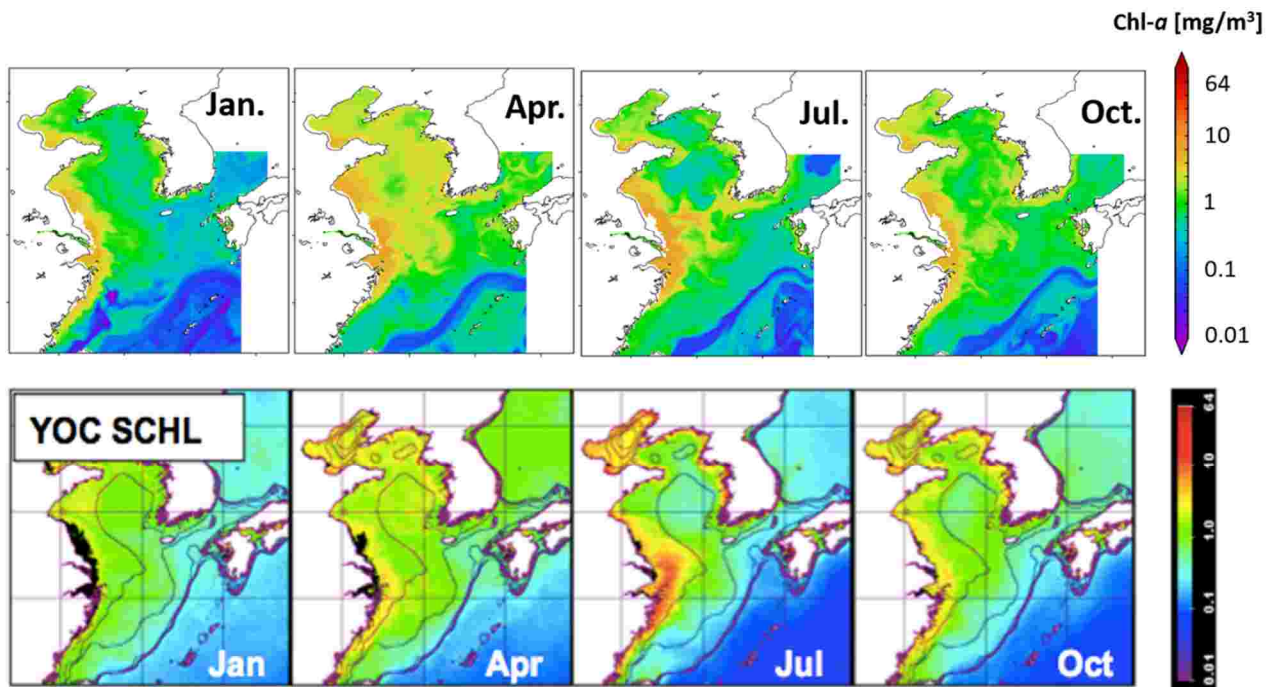
図(2-1)-13に本モデルにより計算された1,5,8,11月の月平均表層DIN濃度の分布図と、Wang *et al.* (2003)の表層DIN濃度の観測値を示す。1月については、東シナ海と太平洋の境界付近でDIN濃度が $1\ \mu\text{M}$ になることや、中国沿岸に沿って広域において $10\ \mu\text{M}$ 以上の高濃度となること、黄海の濃度が $4\ \mu\text{M}$ 程度になることが再現されている。しかしながら、観測に見られるような北緯32度付近の高濃度なDINの東への広がり再現できなかった。5月については濃度が $1\ \mu\text{M}$ になる海域はよく再現されているが、長江河口の北の沿岸域での高濃度な分布は再現できなかった。8月について長江河口域から東への高濃度なDINの分布域が観測に比べやや狭いが、おおよそ観測された分布を再現できている。11月についてはモデルでは小さな空間スケールでの変化がみられるが、長江河口からその南の沿岸に沿って高濃度域が分布すること、長江河口から東にDIN濃度が徐々に減少し済州島付近で $3\ \mu\text{M}$ 程度になること、黄海において北に向かって濃度が減少し北部では $1\ \mu\text{M}$ 程度になること、また、東シナ海陸棚縁付近に $1\ \mu\text{M}$ の等値線が位置することなど、観測結果が示すDIN濃度の空間分布をよく再現できている。以上のことから冬季と春季については中国沿岸においてDIN濃度が観測に比べ少し低い傾向があるが、全体的にみると観測されたDIN濃度分布をおおよそ再現できたといえる。



図(2-1)-13 東シナ海の物理 低次生態系モデルにより計算された1月、5月、8月、11月の海面DIN濃度分布(上段)とDIN濃度の観測値(下段)。

次に、植物プランクトンの再現性を確認するため1,4,7,10月の海色人工衛星データから計算された表層クロロフィルa濃度と本モデル結果の空間分布を図(2-1)-14に示す。人工衛星データによるクロロフィルa濃度データは、長江河口や沿岸域のような濁りが多いところでは過大評価する傾向にある。ここでは、東シナ海・黄海のクロロ

フィラ濃度の現場観測値を使い、人工衛星データからクロロフィルa濃度を推定するアルゴリズムを改良し求められたデータを比較データとして使用する(Yamaguchi *et al.*, 2013)。1月の結果をみると、モデルは中国沿岸域において観測値より濃度が高くなっており、黄海北部では観測値より少し低濃度となっている。4月については、黄海の濃度が観測に比べ全体的に高くなっている。7月は、長江河口から北東方向に高濃度域が分布していることや、黄海中央部の濃度が周りの海域に比べ低くなっている様子がよく再現されている。10月については、中国沿岸と朝鮮半島西岸で濃度が高く黄海中央部の濃度が低くなるなど分布の特徴をよく再現している。黄海・東シナ海については全体的に観測値のクロロフィルa濃度分布を再現できているが、陸棚縁より沖側の太平洋においてはすべての月で観測値に比べ濃度が高くなっている。特に南西諸島の島の周辺でクロロフィルa濃度が高くなっている。これは、このモデルにおいては島の周りの海底地形が急激に変化する場所で現実よりも強い上向きの鉛直流があり、その鉛直流により下層から高濃度の栄養塩が表層へ供給されているためクロロフィルa濃度が高くなったと考えられる。同様なことは九州西方の陸棚縁付近でも起こっており、九州西岸のクロロフィルa濃度が観測値に比べ高濃度になる傾向がある。本モデルは物理モデルと低次生態系モデルを別々に動かすオフラインモデルであり、日平均の水平流速から鉛直流を計算しているためにこのような大きめの上昇流が生じている可能性がある。しかし、少なくとも九州西方においては物理モデルと低次生態系モデルを同時に実行するオンラインモデルにおいても、クロロフィルa濃度が観測値に比べ高くなっていることから、物理モデルのさらなる高精度化が必要かもしれない。



図(2-1)-14 東シナ海の物理 - 低次生態系モデルにより計算された1月、4月、7月、10月の表層クロロフィルa濃度(上段)とYamaguchi *et al.*(2013)により人工衛星から見積もられた表層クロロフィルa濃度(下段)。

冬季の栄養塩濃度が少し低めになること、陸棚斜面より沖側の海域においてクロロフィルa濃度が全体的に高くなるという問題はあるものの、東シナ海・黄海のDINとクロロフィルa濃度分布をみると、季節変化はおおよそ再現されていると判断できる。つまり、本モデルを使い解析を行うことで、非保存性物質であるDINの挙動を理解することができる。以下では、東シナ海から日本海へ流入する栄養塩がどこを起源としたものであるのかを調べる。

#### (6) 対馬海峡の栄養塩の起源の推定

東シナ海・黄海のDINは、東シナ海・黄海底層起源、台湾海峡起源、黒潮および太平洋起源、長江起源、黄河起源、大気からのダスト起源、の6つを起源とするDINで構成されていると考えることができる。対馬海峡を通り日本海へ流入するDINは、これら6つの起源をもつDINがある割合で混合したものである。したが

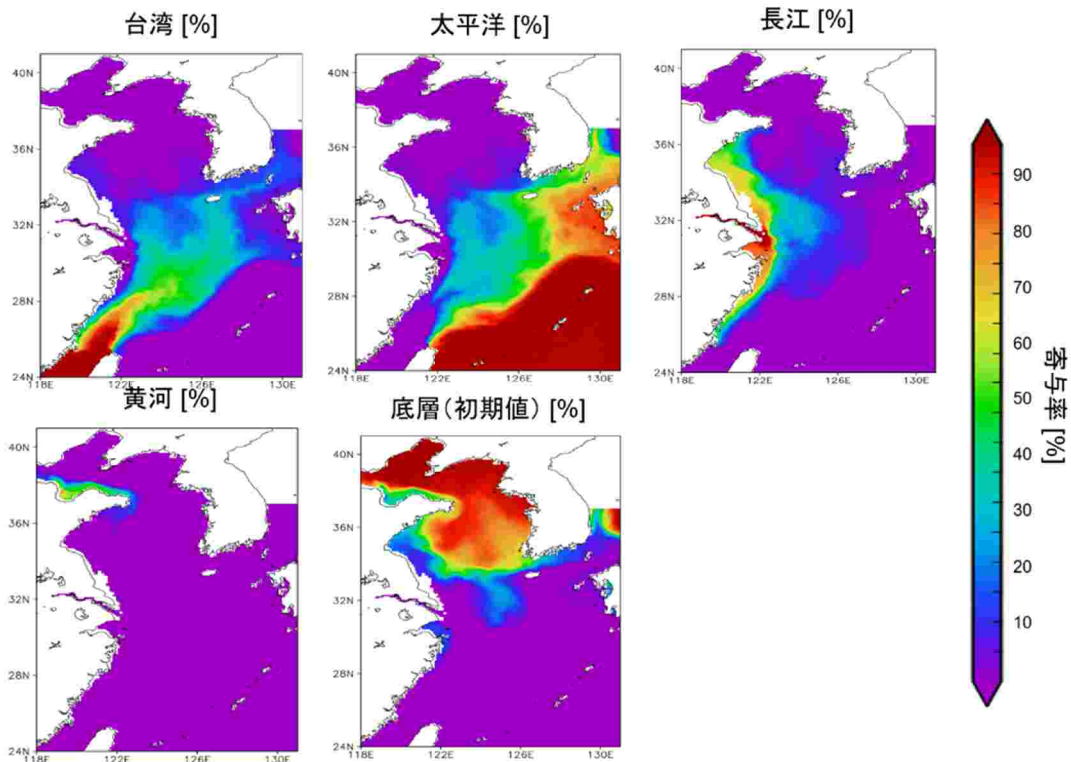
って、対馬海峡のD Nにおける各起源のD Nの割合を計算することができれば、対馬海峡のD N濃度をどの起源のD Nが決めているのか、そして、長江から流入する栄養塩量が変化した場合、日本海の海洋環境にどの程度影響を及ぼすのかを検討できる。そこで、日本海のモデルにおいて対馬海峡起源と日本の河川起源のD Nが日本海の基礎生産へ寄与する率を計算したのと同じ方法で6つの起源のD Nのそれぞれの挙動を調べる。具体的には、1)台湾海峡のみ栄養塩を与えるケース、2)水深が200mより深い場所にのみ栄養塩を与えるケース、3)長江からのみ栄養塩を供給するケース、4)黄河だけから栄養塩を供給するケース、5)ダストによる大気からの栄養塩供給のみを与えるケース、そして、6つすべての供給源を考慮したケース、のすべてを同時に計算する。つまりある時刻t,ある場所xにおけるD N濃度 $N_{ECS}(x,t)$ は、

$$N_{ECS}(x,t) = \sum_{i=1}^5 N_i(x,t) + N_R(x,t)$$

と表される。ここでは上述した計算ケースの番号に一致する。また、 $N_R(x,t)$ はすべての起源のD Nを考慮した場合と上述の5つのケースのD Nを合計したものの残差であり、計算開始時の初期値である。本計算の開始時における $N_R(x,t)$ は、水深200m以浅の海域にあるD Nであり、つまり、東シナ海・黄海のD Nを示している。したがって、時間積分後の $N_R(x,t)$ は主に、黄海・東シナ海底層と、その海域の底質から溶出するD Nを示していると考えられる。植物プランクトン、動物プランクトン、溶存態・懸濁態有機窒素などの計算は、日本海で行ったのと同様に全D N濃度に対する各起源のD N濃度の比により分配し計算をすすめた。上記の設定のもと、物理場は対馬海峡でのD Nフラックスが平均的な値であった2006年の水温・流速を与え、すべての起源のD Nを与え各変数の季節変化が安定する3年間積分した後、5つのD N起源の計算を追加しさらに3年間積分し、6年目の結果を解析に使用した。

図(2-1)-15に2006年の夏季の100m以浅で鉛直平均したD N濃度に対する各起源のD Nの占める割合の分布を示す。ここで、ダストの降下による大気からのD Nの割合は1%以下と極めて小さかったのでその分布は示していない。台湾海峡を起源とするD Nは東シナ海陸棚上を北東方向に輸送され、東シナ海陸棚上では40%以上の値となっている。その後、東経127度付近を北部へと輸送され済州島付近を通り、対馬海峡西水道へと輸送されていることがわかる。対馬海峡西水道のD Nに占める台湾海峡起源のD Nは20%と比較的高い値となっている。台湾海峡を通過する台湾暖流が対馬暖流の起源の1つと言われていることを考えると(Sobe, 1999)、日本海へ流入するD Nに占める台湾海峡起源のD Nが20%程度あることは妥当なものと考えられる。水深200m以深の太平洋・黒潮域を起源とするD Nは、東シナ海北部に広く分布しており、その海域のD Nの40%程度を占めている。特にその割合が高いのは九州西方であり70%以上の値となっている。この分布図から、陸棚斜面を横切る方向のD Nの輸送が東シナ海全体で起こっており、特に東経128~130度付近で北向きのD Nの輸送が多いことがわかる。このような傾向はGuo et al.(2006)が行ったトレーサー実験でも見られる。陸棚上へ供給された太平洋・黒潮起源のD Nの多くは対馬海峡東水道を通り日本海へ流入している。対馬海峡東水道と西水道における太平洋・黒潮起源のD Nの割合はそれぞれ約80%と約65%であり、東シナ海から日本海へ流入するD Nの多くが太平洋・黒潮の中層から供給されたものであることがわかる。長江起源のD Nは中国沿岸の広域で比率が高く60%程度の値となっている。また、長江河口の東方にも比率の比較的高い領域があり長江起源の淡水の輸送と同様に東へと移流されていると考えられる。しかしながら、その比率は東経126度付近では20%以下となっており、対馬海峡においては東西両水道において数%程度と極めて低い率となっている。長江河口からは40  $\mu\text{M}$  という高濃度なD Nが供給されているが、そのほとんどは速やかに植物プランクトンの光合成に使われ有機物となり東シナ海陸棚上に沈降・堆積していることがこの結果から示唆される。黄河起源のD Nについては、渤海南部の沿岸で比率が高くなっているが、黄海・東シナ海ではほとんどの場所で数%であり、黄海・東シナ海、さらには対馬海峡のD Nへの寄与は極めて小さいことがわかる。黄海・東シナ海底層起源のD Nを示すと考えられる初期値の比率をみると、黄海と渤海において極めて高い値となっている。これは、渤海や黄海の流れが遅いため3年間の積分では初期値がすべて計算領域から流出しないためにこのような結果となったと考えられる。一方、東シナ海をみるとその比率は低い値となっており、対馬暖流により計算初期に分布していたD Nがすべて計算領域外へ移流されたことがわかる。対馬海峡西水道をみると東シナ海・黄海底層起源のD Nが占める割合は10%程度となっている。計算初期に東シナ海と黄海に存在するD Nがそもそもどこを起源とするD Nにより構成されている

かを考えると、それはこの計算で起源として設定しているすべてのD Nである。つまり、初期値の中には長江起源のものもある程度含まれている可能性がある。これについては後で検討する。



図(2-1)-15 2006年夏季の水深100mまでの鉛直平均D N濃度に対する台湾海峡起源D N、太平洋・黒潮起源D N、長江起源D N、黄河起源D N、東シナ海・黄海底層D Nの寄与率の水平分布図

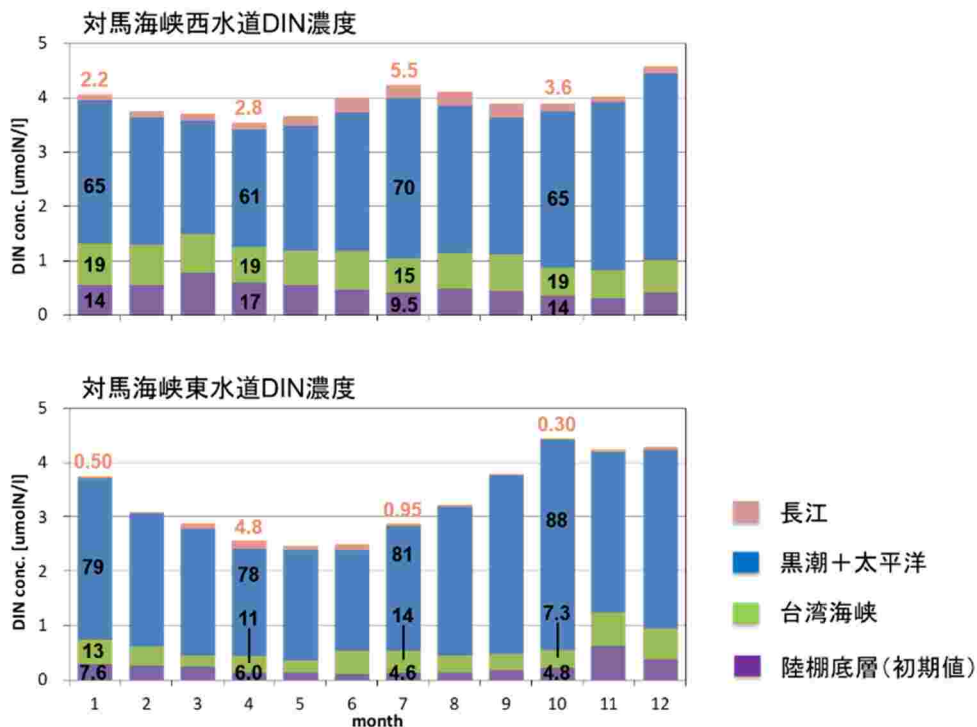
図(2-1)-15から夏季に対馬海峡を通り日本海へ流入するD Nの多くは太平洋・黒潮起源のD Nであることが分かった。次に対馬海峡を通過するD Nに対する各起源のD Nの割合が季節でどのように変化するかを調べる。図(2-1)-16は、対馬海峡西水道と東水道の2006年の水道全体で平均したD N濃度の季節変化と、各月のD N濃度に占める長江、黒潮・太平洋、台湾海峡、陸棚底層起源のD Nの割合を示したものである。対馬海峡西水道のD N濃度は春に低濃度の傾向を示すが季節変化は大きくない。各起源のD Nの空間分布図でみられたように、どの月においても太平洋・黒潮起源のD Nが占める割合が大きく、最大で11月の77%、最低でも3月の56%である。次に大きいのは台湾海峡起源のD Nであり、13~20%で一年を通し比較的安定している。長江起源のD Nについては、最大で9月の6.3%であり冬季には2%程度と全体的に割合は小さい。東シナ海・黄海底層起源(初期値)が占める割合は9.1~22%と比較的大きい。初期値には長江起源のD Nも含まれている可能性があることから、西水道における長江起源のD Nはこのグラフに示されているより多い可能性がある。

対馬海峡東水道のD N濃度は春に $2.5 \mu\text{M}$ 程度と低くなり夏から秋にかけて濃度が上昇し $4 \mu\text{M}$ 程度となる。この変化の傾向は西水道とは異なっている。東水道においても全D Nに対する割合が最も大きいのは一年を通し太平洋・黒潮起源のD Nであり、全D N濃度の季節変化は太平洋・黒潮起源のD N濃度の変化によるものである。太平洋・黒潮起源のD Nの割合は10月に最大の88%であり、一年を通し77%以上を占めている。次に割合が多いのは西水道と同様に台湾海峡起源のD Nである。西水道では台湾起源のD N濃度は一年を通し大きく変化していないが、東水道では春に濃度が低くなり夏と晩秋に濃度が高くなっている。東シナ海・黄海底層起源(初期値)のD Nの割合は4.6~14.9%で変化しており、11,12月に濃度が高くなり夏季に低くなる季節変化がみられる。台湾海峡起源、東シナ海・黄海底層起源(初期値)のD Nが季節変化するのは東シナ海陸棚上での輸送経路、つまり台湾暖流および対馬暖流の流路が変化するためと考えられる。東水道における長江起源のD Nの割合は0.3~4.8%と西水道よりも低く、濃度の絶対値も極めて低い。特に7月~2月の濃度は低く長江起源のD Nはほとんど東水道を通過していないことがわかる。この結果から考えると、中国の経済成長や人為的な変化により長江の栄養塩濃度が上昇しても、日本海の低次生態系に与える影響は極めて小さいと考えられる。しかし、前述したよ



うにこの図中に示されている東シナ海・黄海底層起源のDINには、長江起源のDINがいくらか含まれているはずである。したがって、この量を見積もらなければ、対馬海峡を通過するDINに含まれる長江起源のDIN量を把握できなかったことにならない。

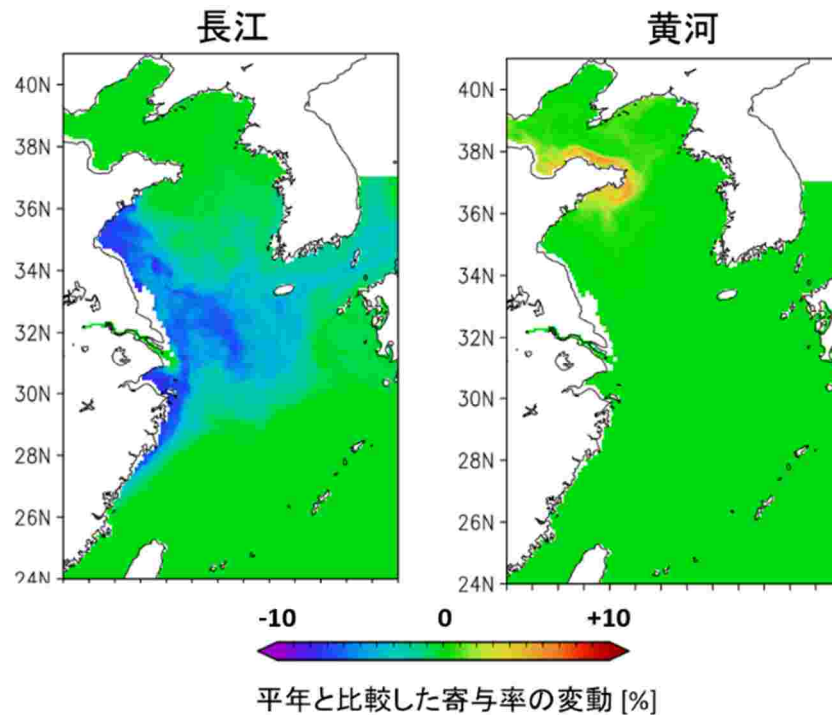
このモデルを3年間積分した結果では、東シナ海・黄海底層起源(初期値)のDINが、対馬海峡のDINに対して多い場合20%も含まれている。また、図(2-1)-15の東シナ海・黄海底層起源のDINの寄与率の空間分布をみると黄海北部では極めて高い値となっている。このことは、黄海のDINの滞留時間はかなり長く3年程度の積分ではすべてのDINを交換することができないことを示している。ある時に黄海や東シナ海にあるDINもまた、もともとは長江、太平洋・黒潮、台湾海峡などから供給されたものである。東シナ海・黄海の陸棚上に存在するDINの起源を調べるため、2006年の計算ケースを20年間積分した。20年間の積分では黄海にはいくらか初期値が残ったが、黄海のDINに占める各DIN起源の割合を計算したところ、台湾海峡起源が25~30%、太平洋・黒潮起源が30~35%、長江起源は20~30%、黄河起源が5~25%であった。つまり図(2-1)-16に示されている東シナ海・黄海底層起源DINのうちの20~30%は長江起源であると考えられる。したがって、対馬海峡西水道を通過して日本海へ入るDINに占める長江起源のDINの割合は最大9.7%、対馬海峡東水道を通過する長江起源のDINの割合は最大6.6%である。対馬海峡西水道のDIN濃度の9.7%と東水道の6.6%は濃度に換算すると0.5 $\mu$ m程度であり、対馬海峡から流入するDIN量を変化させた感度実験結果からすると、日本海のDIN濃度やクロロフィルa濃度の変化に与える影響はほとんどないと言える。



図(2-1)-16 対馬海峡西水道(上段)と対馬海峡東水道(下段)の水道平均したDIN濃度と長江、太平洋・黒潮、台湾海峡、東シナ海・黄海底層起源のDINの寄与率の季節変化。図中の数字は全DIN濃度に対する各起源のDIN濃度の寄与率

次に南水北調の影響についても検討する。ここでは、南水北調により長江の流量が30%減少し、その分黄河の流量が増えると仮定した。本モデルでは物理過程はDREAMS\_Mにより計算されているため、河川流量そのものを変化させることができないため、長江と黄河の栄養塩濃度を変化させることで栄養塩フラックスを30%変化させた。この条件のもと、長江起源のDINと黄河起源のDINの挙動を調べた。図(2-1)-17は、南水北調を行っていないケースに対して、南水北調を行った場合のDINの寄与率の変化を示している。南水北調を行うことで長江からのDINフラックスが30%減少するため、長江起源のDINが輸送される経路上において全DINに占める長江起源のDIN量が8%程度減少している。特にその減少が大きいのは中国沿岸域である。一方、黄河起源のDINについては、DINフラックスの増加により渤海南部と黄海北部の一部で寄与率が6%程度上昇している。しかし寄与率

が上昇する海域は限られており対馬海峡付近での寄与率の変化はほとんどない。この計算結果より、南水北調を行うことで長江からのDINフラックスが減少するため日本海へ輸送されるDINが数%減少すると予想される。しかし、対馬海峡を通過するDINに占める長江起源のDIN濃度は最大でも0.5 μM程度であり、実際に減少するDINの濃度はその数%であるためほとんど変化がないと言える。



図(2-1)-17 南水北調を実施した場合と現状における全DIN濃度に対する長江起源DIN濃度の寄与率の変化量(左図)と黄河起源DIN濃度の寄与率の変化量(右図)。

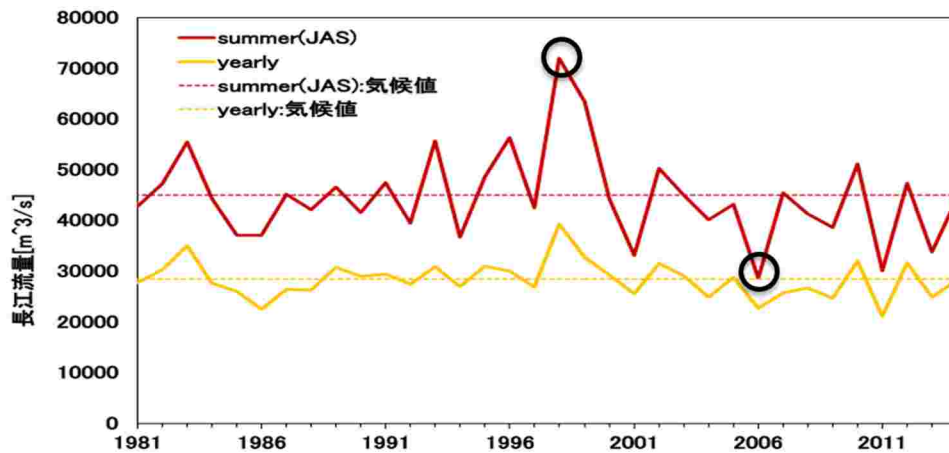
以上のことから、対馬暖流により東シナ海から日本海へ輸送されるDINのうち、長江起源のDINは9.7%以下と少なく、濃度になると0.5 μM程度であることが分かった。それゆえ、中国の経済発展や三峡ダム、南水北調により長江からの栄養塩フラックスが変化しても、日本海の低次生態系に与える影響は大きくないと言える。ただし、以下のことに注意が必要である。長江の河川水中のN/P比( DINとDPのモル比)は現在100程度であり、長江河口域における植物プランクトンの増殖を律速しているのはDINではなくDPである。それゆえ、長江河口付近ではDPが枯渇するとDINは植物プランクトンの増殖に利用されなくなり高濃度のまま東へと輸送される。東シナ海においては、DPは太平洋からそのほとんどが供給されており(Chen et al., )、このDPの供給により余剰なDINも植物プランクトンに取り込まれ濃度が減少する。その結果、長江起源のDINは東経126度付近までですべて使われ、東経126以东では表層においては長江起源のDINはほぼ枯渇している(図(2-1)-15)。したがって、もしも将来長江のDINが現在の濃度よりはるかに高くなりN/P比がさらに大きくなると、DPの枯渇により使われないDINが劇的に増え、それがすべて植物プランクトンに利用され枯渇する海域は東経126度より東に移動する。つまり、長江のDIN濃度が増加しすぎると、長江起源のDINが表層においてもすべて使われることなく対馬海峡まで到達し、日本海へのDINフラックスが劇的に増加する可能性がある。このようなことが起これば、日本海の低次生態系は大きく変化する可能性がある。日本海の海洋環境の管理のためには、長江、済州島付近、対馬海峡において栄養塩濃度のモニタリングを実施することが望まれる。

#### 7)長江流量の変化による日本海へのDIN供給量の変化

対馬海峡を通過するDINへの長江起源DINの寄与率は最大で9.7%とそれほど高くないことが分かった。この結果から考えると長江流量の変化により栄養塩フラックスが変化しても、対馬海峡を通過するDIN量は大きく変化しないことが予想される。一方で、長江流量が大きく変化すると東シナ海へ供給される浮力が変わるため、東シナ海の循環場が変化し物質の輸送経路が変わる可能性も考えられる。そこで、物理・低次生態系モデルによ

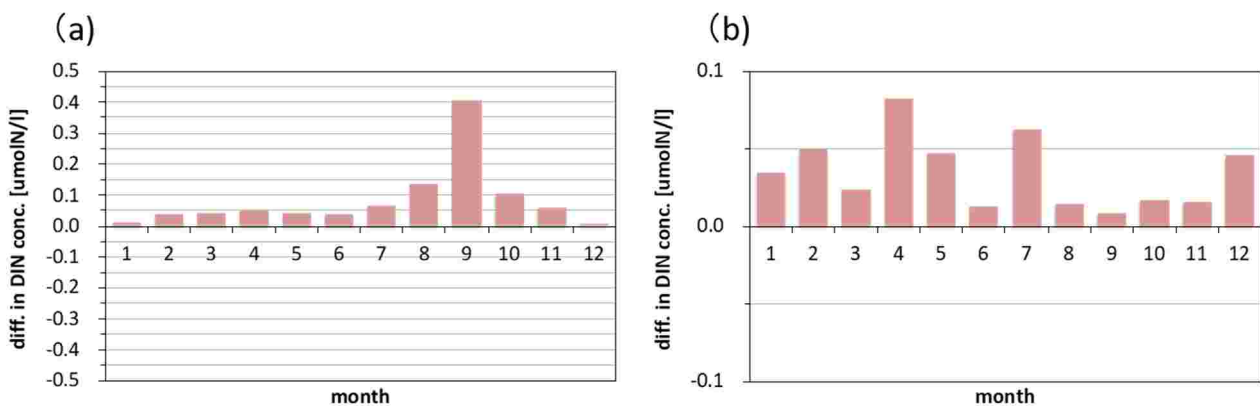
り長江流量が多かった年と少なかった年のケースにおけるD Nの挙動を計算し、長江流量の変化が日本海へ供給されるD N量にどのような影響を与えるかを調べる。

図(2-1)-18は長江中流のDatonにおける1981年から2014年までの夏季と年平均の長江流量の経年変化を示している。この図をみると、夏季の長江流量の平均値は $45000\text{m}^3/\text{s}$ であり、最も流量が多かったのは1998年の約 $70000\text{m}^3/\text{s}$ 、最も少なかったのは2006年の $29000\text{m}^3/\text{s}$ であった。また、物理モデルにより計算された1998年と2006年の夏季の対馬海峡底層の水温は平年値に近く、太平洋・黒潮から供給されたD N量に大きな違いがないと考えられる。それゆえ、1998年と2006年のD Nの挙動をモデルにより計算することで、長江流量の変化に伴うD N輸送過程の変化を調べることが可能になる。そこで、DREMSMにより計算された1998年と2006年の物理場を使い、(5)で開発した物理低次生態系モデルにより東シナ海における長江起源D Nの挙動を計算した。



図(2-1)-18 1981年～2014年までのDatonにおける7月～8月の平均長江流量(赤線)と年平均長江流量(黄線)の変化

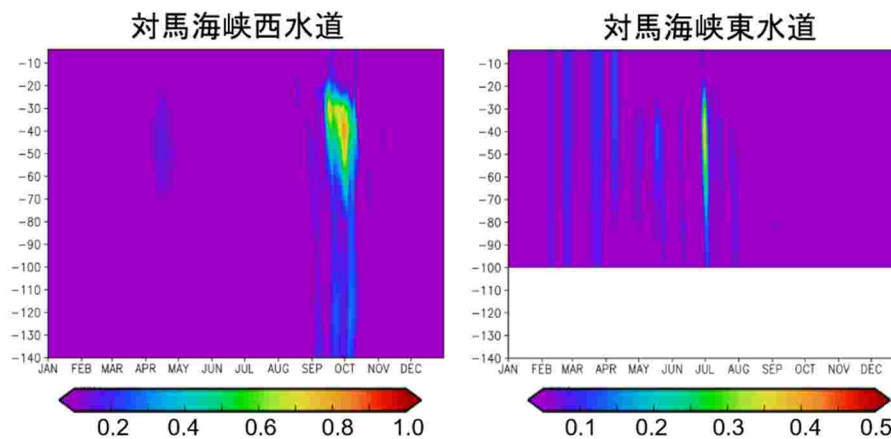
図(2-1)-19は対馬海峡西水道と東水道における長江起源D N濃度の1998年と2006年の差の季節変化を示している。ここで値が正の場合は1998年のD N濃度が2006年の濃度よりも高いことを表す。西水道の長江起源D N濃度をみると、すべての月において2006年より濃度が高くなっている。特に9月の濃度が最も高くなっており、2006年に比べ $0.4\mu\text{M}$ の増加がみられる。東水道でも一年を通し正の値となっており長江流量が多かった1998年のほうが長江起源D N濃度が高かったことがわかる。ただし、濃度差は最大では $0.15\mu\text{M}$ であり、西水道に比べ増加量は小さい。季節変化をみると西水道では8～9月に増加量が増えたのに対して、東水道では8～9月には増加量が減り、それより前の月に増加量が増えている。



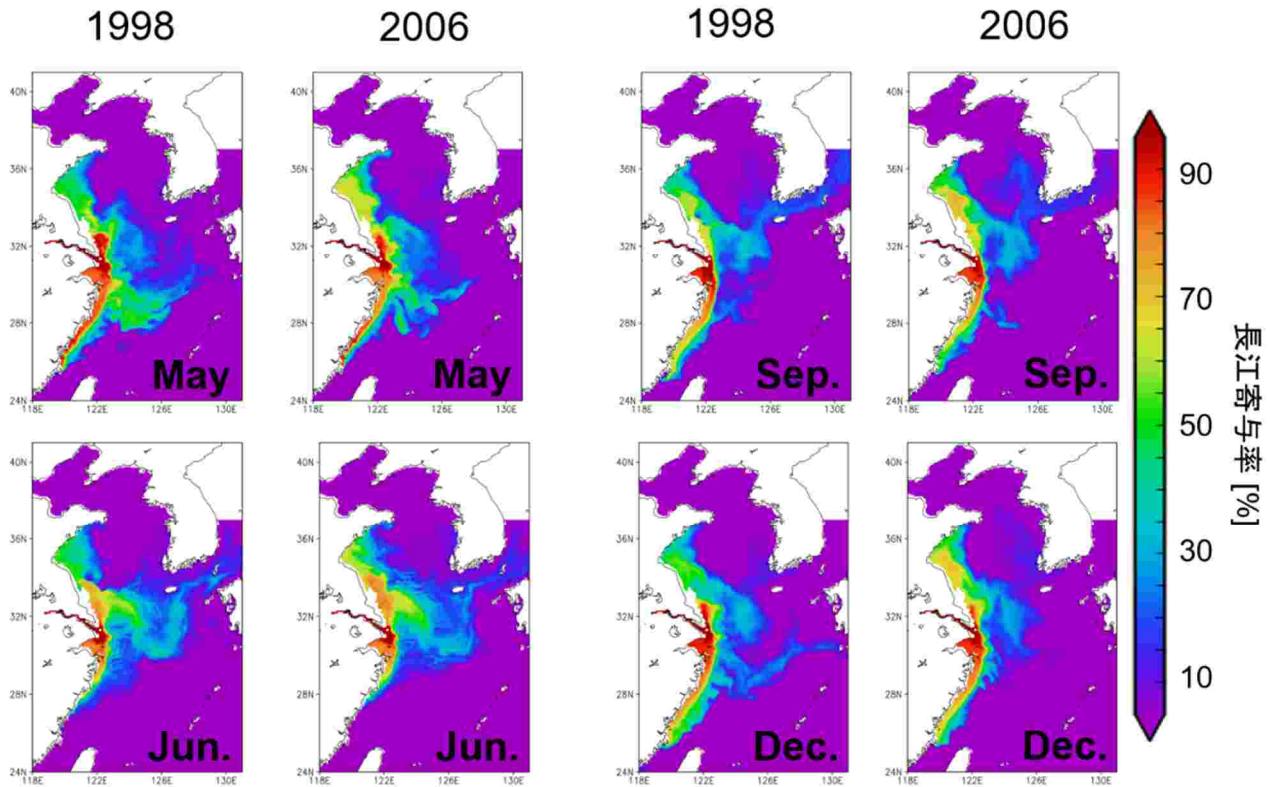
図(2-1)-19 (a)対馬海峡西水道と(b)東水道における長江起源D N濃度の1998年と2006年の差の季節変化。正の値は1998年の濃度が高いことを示す。

図(2-1)-19の対馬海峡における長江起源D Nの増加の鉛直構造をみるため、対馬海峡西水道と東水道にお

ける1998年と2006年の長江起源D Nの差の鉛直分布の時間変化を図(2-1)-20に示す。この図をみると、対馬海峡西水道においては9月～10月にかけて水深20～60mにおいて長江起源D Nが増加し、最大の増加は水深40mに位置していることがわかる。一方、東水道では7月上旬に増加しており水深20～80mで増加がみられる。1998年と2006年での長江起源D Nの水平輸送経路を見てみると、両年で大きな違いはなく長江流量が大きく変化しても水平的な輸送経路は変化しないことがわかる(図(2-1)-21)。また、図(2-1)-21をみると、5月や6月は長江起源のD Nは長江河口域から南へ輸送される傾向があり、主に対馬海峡東水道を通過して日本海へと流入していることがわかる。9月になると反対に北へ輸送されほとんどの長江起源D Nは済州海峡を通過し対馬海峡西水道から日本海へ流入している。これらのことから、長江流量が過去40年で最大であった1998年と最低であった2006年では、長江から供給されたD Nはほぼ同じ経路をたどり対馬海峡へと輸送され、輸送経路の季節変化の結果、7月までは対馬海峡東水道で長江起源D Nが増加し、8月以降は西水道で増加したことがわかる。また、対馬海峡における1998年と2006年の長江起源D Nの差が水深20～80mで大きくなることから、長江から供給されるD Nが2倍程度増えても、対馬海峡に到達するまでに植物プランクトンの光合成に利用されずすべて使われてしまい、光環境がよくない垂表層以深で多少のD Nの増加が起こったと考えられる。(6)において、長江のD Nが現在の濃度より増えてN/P比が増大すると対馬海峡のD Nが激増する可能性について議論したが、ここでの結果を見る限り、2006年の長江のD N濃度の2倍程度の増加では日本海へ流入する栄養塩量が劇的に増えないことがわかる。しかしながら、図(2-1)-21の6月と9月の結果をみると、全D N濃度に対する長江起源D Nの寄与率は2006年に比べ1998年は東シナ海東部から対馬海峡にかけて明らかに高くなっており、(6)で議論したようなN/P比の増加により余剰なD Nが東シナ海においてより東へ輸送されることがわかる。



図(2-1)-20 対馬海峡西水道と東水道における1998年と2006年の長江起源D N濃度の差の鉛直分布の季節変化。正の値は1998年の濃度が2006年より高いことを示す。



図(2-1)-21 1998年と2006年の5月、6月、9月、12月における、水深100mまでの鉛直平均D N濃度に対する長江起源D N濃度の占める割合。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

対馬暖流により東シナ海から日本海へ輸送される溶存態無機窒素(D N)の量を長期間実測し、その絶対量と季節・経年変化を明らかにした。さらに、この水平に輸送されるD Nが日本海南部海域の基礎生産の80%以上を支えており、水平に輸送されるD N濃度が変化することにより日本海の低次生態系が大きく変化することを明らかにした。

対馬海峡から流入するD Nの主な起源が太平洋および黒潮域の中層および深層を起源とするD Nであり、その量が年によって変化するため日本海へ供給されるD N量が変わることを明らかにした。さらに、長江河川水起源のD Nは、対馬海峡から日本海へ輸送されるD Nに対し最大でも9.7%程度であることを示し、中国の経済発展、三峡ダム、南水北調といった人為的要因による長江河川水の環境変化が起こっても、日本海の低次生態系に与える影響はあまり大きくないことを示した。一方で、現在の長江河川水のD N濃度が劇的に増えた場合には日本海へ輸送されるD Nが増える可能性を示した。ただし、現在の2倍程度の濃度では日本海へ輸送されるD Nはさほど増えないことも明らかにした。

### (2) 環境政策への貢献

#### < 行政が既に活用した成果 >

特に記載すべき事項はない。

#### < 行政が活用することが見込まれる成果 >

本研究では、科学的意義で述べたように、東シナ海と日本海における様々な起源のD Nの挙動を追跡できる物理・低次生態系モデルを開発した。本モデルで使っている手法は、東シナ海・日本海だけでなく他の縁辺海や沿岸域にも適用できることから、様々な海域における栄養塩の動態を調べることを可能にすることから、栄養塩管理手法の検討を行うためのツールとして利用できる。

日本海の海洋環境の管理・監視において、本研究によるモデル結果を使うことにより効率的に海洋環境をモニターできる場所の提案が可能になる。また、東シナ海や日本海の置かれている状況を他国に説明することができ、国際的な協力関係を締結するための基礎資料となりうる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### < 論文 (査読あり) >

- 1) Kodama, T., Morimoto, A., Takawa, T., Ito, M., Igeta, Y., Abe, S., Fukudome, K., Honda, N., Katoh, O. (2017): Presence of high nitrate to phosphate ratio in subsurface water in the Tsushima Strait during summer. *J. Oceanography*, 73 (6), 759-769.

#### < その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) 森本昭彦、柴野良太、伊藤雅、滝川哲太郎(2019): 日本海の栄養塩濃度・基礎生産の将来予測。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。国際エメックスセンター。145-158.

### (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 伊藤雅・森本昭彦・石坂丞二・高山勝巳: 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「東シナ海の循環と混合に関する研究」、福岡、2015  
対馬海峡を通過する栄養塩量の変化に伴う日本海の植物プランクトン量の変化
- 2) 吉田尚郁・刈茜・張勁・森本昭彦・石坂丞二・伊藤雅・広瀬直毅・高山勝巳・郭新宇・吉江直樹: 日本海洋学会2015年春季大会、東京海洋大学、2015  
国際的閉鎖性海域・日本海の海域管理法の開発
- 3) M. Ito, A. Morimoto, J. Ishizaka, and K. Takayama: 18th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, Okinawa, 2015  
Variation in phytoplankton biomass in the Japan/East Sea due to nutrient transport through the Tsushima/Korea Strait,
- 4) 伊藤雅・森本昭彦・石坂丞二・高山勝巳: 研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」、北海道、2015  
対馬海峡を通過する栄養塩量の変化に伴う日本海の植物プランクトン量の変化、
- 5) 伊藤雅・森本昭彦・高山勝巳・石坂丞二: 日本海洋学会2015年度秋季大会、松山、2015  
対馬海峡を通過する栄養塩量の変化に伴う津軽海峡西方沖の植物プランクトン量の変化
- 6) 伊藤雅・森本昭彦・高山勝巳・石坂丞二: 日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会「福岡」、2015  
対馬海峡を通過する栄養塩量が日本海の低次生態系に与える影響
- 7) A. Morimoto, M. Ito, R. Shibata and J. Ishizaka: EM ECS '11 SeaCoasts XXV I Joint Conference, St Petersburg, Russia, 2016  
Impact on lower trophic ecosystem in the Japan Sea associated with nutrient transport change through Tsushima Strait,
- 8) 柴野良太・森本昭彦・高山勝巳・伊藤雅: 2016年水産海洋学会研究発表大会、東京、2016  
河川供給に伴う日本海における栄養塩動態に対する影響評価
- 9) 柴野良太・森本昭彦・高山勝巳・伊藤雅: 第2回沿岸生態系の評価・予測に関するワークショップ、愛媛、2016

### 日本海低次生態系への東シナ海からの栄養塩輸送の影響

- 10) 森本昭彦:九州大学応用力学研究所共同利用研究集会、福岡、2017  
低次生態系モデルによる対馬海峡栄養塩起源の推定
- 11) 柴野良太:2017年日本海洋学会秋季大会、仙台、2017  
対馬暖流による栄養塩輸送が日本海へ及ぼす影響
- 12) R. Shibano:2018 Ocean Science Meeting, San Diego, USA, 2018  
"Impact of nutrient transport through Tsushima Straits on the ecosystem in Japan Sea"
- 13) 柴野良太・森本昭彦・高山勝巳・滝川哲太郎・伊藤雅:東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会:生態系モデルシンポジウム、千葉、2018  
東シナ海 対馬暖流域における低次生態系モデルの構築
- 14) 柴野良太・森本昭彦・高山勝巳・滝川哲太郎・伊藤雅:水産海洋学会研究発表大会、千葉、2018  
対馬海峡を經由し日本海へ供給される栄養塩の年々変動及び生態系への影響
- 15) 森本昭彦・柴野良太・高山勝巳・伊藤雅・滝川哲太郎:北海道大学低温科学研究所研究集会:宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム、札幌、2018  
対馬海峡を通過し日本海へ供給される栄養塩の起源
- 16) A Morimoto, R. Shibano, K. Takayama, T. Takikawa:EM ECS 12 "Cooperative stewardship for integrated management toward resilient coastal seas", Pattaya, Thailand  
"Interannual variability in nutrient transport from the East China Sea to the Japan Sea"
- 17) 森本昭彦・柴野良太・高山勝巳:金沢大学 環日本海域環境研究センター共同利用シンポジウム:  
海流が繋ぐ日本周辺縁辺海の海洋循環 物質循環の変動機構、金沢、2019  
東シナ海から日本海へ流入する栄養塩の起源

### (3)出願特許

特に記載すべき事項はない

### (4) 国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない

### (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

## 8.引用文献

- 1) Chen, C.T.A. (1996): The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf. *Oceanologica Acta*, 19, 523-527.
- 2) Chen, C.-T.A., L.-Y. Hsing, C.-L. Lin, S.-L. Wang (2004), Degree of nutrient consumption of upwelled water in the Taiwan Strait based on dissolved organic phosphorus or nitrogen, *Marine Chemistry*, 87, 73-86.
- 3) Chen, H.-Y., L.-D. Chen (2008), Importance of anthropogenic inputs and continental-derived dust for the distribution and flux of water-soluble nitrogen and phosphorus species in aerosol within the atmosphere over the East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 113, D11303.
- 4) Chen, S.-W., S. Jan, K.-K. Liu (2001), Nutrient fluxes through Taiwan Strait in spring and summer 1999, *J. Oceanogr.*, 57, 47-53.

- 5) Guo, X., Miyazawa, Y., Yamagata, T. (2006): The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: the origin of the Tsushima Warm Current. *J. Phys. Oceanogr.*, 36, 2205-2231.
- 6) Hirose, N., Takayama, K., Moon, J.H., Watanabe, T., Nishida, Y. (2013): Regional data assimilation system extended to the East Asian marginal seas, *Um i to Sora*, 89, 43-51.
- 7) Isobe, A. (1999): On the origin of the Tsushima Warm Current and its seasonality. *Cont. Shelf Res.*, 19, 117-133.
- 8) Kishi, M.J., Kashwai, M., Ware, D.M., Megrey, B.A., Eslinger, D.L., Emer, F.E., Noguchi-Aita, M., Azumaya, T., Fujii, M., Hashimoto, S., Huang, D., Izumi, H., Ishida, Y., Kang, S., Kantakov, G.A., Kim, H.-C., Komatsu, K., Navrotsky, V.V., Smith, S.L., Tadokoro, K., Tsuda, A., Yamamura, O., Yamataka, Y., Yokouchi, K., Yoshie, N., Zhang, J., Zuenko, Y.I., and Zvalinsky, V.I. (2007): NEMURO - a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. *Ecological Modelling*, 202, 12-25.
- 9) Kodama, T., Morimoto, A., Takikawa, T., Ito, M., Igeta, Y., Abe, S., Fukudome, K., Honda, N., and Katoh, O. (2017): Presence of high nitrate to phosphate ratio subsurface water in the Tsushima Strait during summer. *Journal of Oceanography*, 73, 759-769.
- 10) Liu, K.-K., T.Y. Tang, G.-C. Gong, L.-Y. Chen, F.-K. Shiah (2000), Cross-shelf and along-shelf nutrient fluxes derived from flow fields and chemical hydrography observed in the southern East China Sea off northern Taiwan, *Continental Shelf Research*, 20, 493-523
- 11) Morimoto, A., Takikawa, T., Onitsuka, G., Watanabe, A., Moku, M., Yanagi, T. (2009): Seasonal variation of horizontal material transport through the eastern channel of the Tsushima Straits. *J. Oceanogr.*, 65, 61-71.
- 12) Morimoto, A., Watanabe, A., Onitsuka, G., Takikawa, T., Moku, M., and Yanagi, T. (2012): Interannual variation in material transport through the eastern channel of the Tsushima/Korea Straits. *Progress in Oceanography*, 105, 38-46.
- 13) Park, K.-A., and Kim, K.-R. (2010): Unprecedented coastal upwelling in the East/Japan Sea and linkage to long-term large-scale variations. *Geophysical Research Letters*, 37, L09603, doi:10.1029/2009GL042231.
- 14) Takikawa, T., Yoon, J.-H., Cho, K.-D. (2005): The Tsushima Warm Current through Tsushima Straits estimated from Ferryboat ADCP data. *J. Phys. Oceanogr.*, 35, 1154-1168.
- 15) Uye, S., Iwamoto, N., Ueda, T., Tamaki, H., Nakahira, K. (1999): Geographical variations in the trophic structure of the plankton community along a eutrophic-mesotrophic-oligotrophic transect. *Fish. Oceanogr.*, 8, 227-237.
- 16) Wang, B.D., Wang, X.L., Zhan, R. (2003): Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China. *Estuar., Coast. Shelf Sci.*, 58(1), 127-136.
- 17) Wang, B. (2006): Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: History and perspective. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 69, 471-477.
- 18) Wei, Q.-S., Z.-G. Yu, R.-F. Ge, H.-W. Wang, B.-D. Wang (2013), Chemical hydrographic analysis of the role of the Yellow Sea western coastal cold water in forming the southern Yellow Sea western bottom cold water and its seasonal succession, *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 44(4), 890-905 (in Chinese).
- 19) Yamaguchi, H., Ishizaka, J., Sriswanto, E., Son, Y.B., Yoo, S., Kiyomoto, Y. (2013): Seasonal and spring interannual variations in satellite observed chlorophyll-a in the Yellow and East China Seas: New datasets with reduced interference from high concentration of resuspended sediment. *Cont. Shelf Res.*, 59, 1-9.



## - 2 - 2 日本海環境変動予測モデルの構築

九州大学 応用力学研究所

広瀬直毅

高山勝巳

金 海珍

平成26～30年度累計予算額 29,113千円

(うち平成26年度 :6,391千円、平成27年度 :6,070千円、平成28年度 :5,768千円、平成29年度 :5,768千円、平成30年 :5,116千円)

### 【要旨】

溶存酸素データを用いて物理・低次生態系結合モデルを最適化し、日本海の海洋環境の長期変化を予測した。Onitsuka et al. (2005, 2007)とほぼ同じ低次生態系モデルに溶存酸素の変化を導入したところ、表層の季節変化や空間分布をかなり正確に再現することができたが、主要パラメータをグリーン関数法で補正した結果、溶存酸素のモデル誤差は深層まで含めて20%以下まで劇的に改善された。気候変動シナリオRCP8.5と2.6に基づいて100年後までこの海洋環境予測モデルを計算したところ、日本海の海面水温は気温と同程度のペースで上昇したが、大和堆や北朝鮮付近では対馬暖流の北上により100年間で8℃以上の上昇もありうる。塩分も同様に上昇するため、意外にも日本海深層水の形成は弱化するしないという予測結果も得られた。

### 【キーワード】

日本海、低次生態系モデル、最適化、溶存酸素(DO)、気候変動予測シナリオ、高塩化

### 1. はじめに

地球温暖化に代表される大規模な気候変動に応じて、日本海は外洋の約3倍もの早さで高温化している。半閉鎖的な日本海の循環構造により、外的要因に対する応答も即時的となりやすい。PCCによる将来予測においても、日本海は特に水温上昇率の高い海域として報告されており、生態系への影響が懸念される。

陸域起源の淡水供給もまた、海洋生態系に大きなインパクトを与える可能性がある。日本付近の降水量(河川負荷量)は長期的に増加すると予測されているが、逆に長江など大陸の大河川の流量は減少傾向にある。即ち、対馬暖流の上流と下流の生態系では異なった変動傾向が生じる可能性があり、特に環境保護区や漁業権が設定されている沿岸域の海洋環境変化を詳細に検討する必要があるといえる。

ところが、気象庁や水産総合研究センターなどで海流や水温変化などの物理諸量がデータ同化モデルによって的確に再現・予測されるようになった反面、生態系システムの変動予測は未だ信頼性が低い。低次生態系のモデリング手法はNPZD(栄養塩・植物・動物プランクトン・デトリタス)システムにおける窒素やリンの循環として一般的に表現されるが、成分間の輸送係数など各種パラメータの不確実性が問題となっている。従来の日本海生態系モデリングでは無視されがちな河川負荷量も、沿岸域の生産性を決定づける重要なパラメータである。

### 2. 研究開発目的

そこで本サブテーマでは、客観的なデータ同化手法によって低次生態系モデルの不確定パラメータを最適化した上で、日本海の生態系システムの長期再解析と予測計算を行う。データ同化手法を適用することにより、推定値の誤差、つまり信頼性まで評価することが可能となる。その結果、海水温や海流などの物理的情報のみならず、生物・化学的な環境変化に関してもその信頼性が明記された予測資料が作成され、海洋の開発・利用・保護の政策が客観的に議論されることとなる。

### 3. 研究開発方法

(1)日本海海洋循環数値モデルの開発

本研究で使用する海洋モデルDREAMS\_B (DR\_B)の計算領域は日本海や東シナ海などの縁辺海を含んだ北西太平洋域 (105°E-180°, 15°N-63°N)で、水平分解能は1/4° x 1/5° (約20km)、鉛直方向には表層を細かく深層は粗い解像度となるように38層をとっている (図 (2-2)-1)。さらに、水平分解能を1/12° x 1/15° (約7km)として日本周辺海域を詳細に解像するDREAMS\_M (DR\_M)も使用する。DR2\_Mの境界にはDR\_Bの計算結果をネステイングするだけでなく、潮汐・潮流を陽に入射している。近似カルマンフィルターによって海面高度と水温の衛星データを同化し、当プロジェクト開始時点で既に高い再現性を得ている(Hirose, 2010; Hirose et al., 2013)。新たな改良として、DR2\_Mの単調和水平粘性スキームをSmagorinsky (1964)に変更した。同時に、倍調和型粘性係数も見直した ( $40 \times 10^8$  →  $5 \times 10^8$  m<sup>4</sup>/s)。

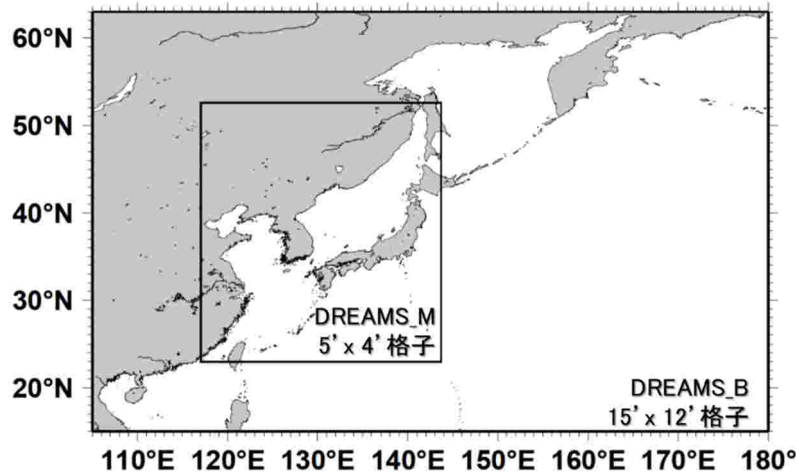


図 (2-2)-1 モデル計算領域

大河川 (長江, 黄河, アムール川)の流量は観測データ (中国河流泥沙公報, Global River Data Center等)に基づいて陽に入力したが、中小規模の河川効果は、陸上沿岸付近の降水量から推定した。沿岸付近の塩分分布 (気候値)とモデル結果を比較し、沿岸から100kmの範囲内でかつ標高450m未満の降水を河口出水量へと換算した。つまり、沿岸から100km以上離れた内陸部や標高450m以上の山岳地帯における降水は、大気への蒸発量に相当するとして無視した。

## (2)低次生態系モデルの開発

前節で説明した海洋循環数値モデルに低次生態系モデルをオンライン結合する。Onitsuka et al. (2005, 2007)に基づき、窒素循環のNPZD (溶存体無機窒素(DIN)、植物プランクトン(PHY)、動物プランクトン(ZOO)、デトリタス(DET)をコンパートメントに持つ)モデルを採用した (図 (2-2)-2)。本研究では過去の50年間の再現実験と将来100年間の予測計算を実行するため、計算負荷を考慮して可能な限りコンパートメント数を減らした単純な生態系モデルを選択した。モデルは単純ではあるが、植物プランクトンの光合成、動物プランクトンの呼吸や捕食、デトリタスの沈降、無機化 (分解)による栄養塩の生成、といった主要な生物過程は全て網羅している。自由度を抑えることにより、経験的パラメータの修正 (データ同化)も行いやすい。中国沿岸以外の河川から海中に放出されるDIN濃度 (栄養塩)は100 mmol m<sup>-3</sup>とした。つまり、河川からの栄養塩フラックスは河川水量に比例する。中国沿岸河川からのDIN供給については後述する。

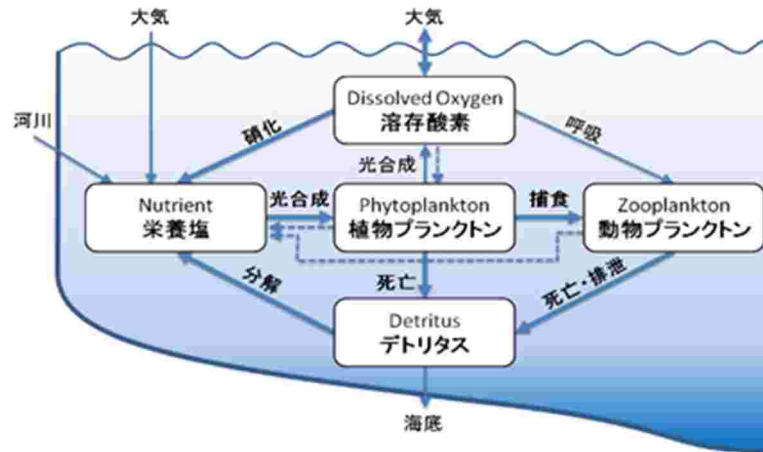


図 2-2)-2 生態系コンパートメント間の関係と溶存酸素濃度の予測モデルの模式図

当サブテーマでは、さらに生態系変化と密接に関連した溶存酸素(DO)濃度のシミュレーションも行う。海面付近のDO濃度は大気との混合過程でほぼ飽和状態にあるが、海洋内部では酸素が光合成によって生成され、あるいはプランクトンの呼吸やデトリタスの分解によって消費され、過飽和や貧酸素の状態になりうる。本研究で使用するモデルは窒素制限であるので、Redfield比から $N:O_2=16:138$ としてDO濃度の変化量を算出した。

生態系モデルに関するパラメータについては日本海の生態系モデルの先行研究であるOnitsuka et al. (2007)と同様のパラメータを当初は使用する。ただし、従来の生態系モデルでは海洋表層から沈降するDETが海底へ到達した際は系外に除去されるよう計算処理されていたため、水深の浅い東シナ海のDN濃度やDO濃度をモデルで再現するには、海底まで沈降したDETの再懸濁の効果が必要と判断し、プログラム処理とパラメータの修正をおこなう。この計算で必要となるDETの海底蓄積速度を含めて、生態系モデルに用いられる主要なパラメータの最適推定値をグリーン関数法により求め、生態系モデルの再現精度向上を図った。このパラメータ推定の結果については「結果と考察」の節で記述する。

### (3)日本海の将来変動予測シナリオの設定

このように最適化したNPZDO生態系モデルを使って1958年から2111年まで150年間に及ぶ長期シミュレーションを実行する。過去の再現をするためのモデル境界条件としては、1956年から2015年までの気象庁55年長期再解析データセット(JRA-55)から、気温、比湿、風、降水量、長波、短波のデータを使用し、2016年以降の将来予測については1968年から2015年までのJRA-55のデータを繰り返し使用する。ただし、モデル境界条件の1つである気温については、気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)の第5次評価報告書の代表濃度経路シナリオ(Representative Concentration Pathways; RCP)のうちで温暖化対策を十分に行ったシナリオRCP2.6の気温上昇率(100年間で約2℃気温上昇)と最も温暖化が進行するシナリオRCP8.5の気温上昇率(100年間で約4℃気温上昇)を参考にして、温暖化効果を加味した予測計算を実行する(図2-2)-3)。150年間という長期の計算と日本海内部の生態系の変化を高解像度に分解する両方を実現するために、本研究では解像度の粗いIDR\_Bを用いて150年間の連続計算をおこない、約50年毎のIDR\_Bの計算結果を初期値とした解像度の細かいIDR\_Mを10年間だけ年代別に計算して、時空間的に密な解析が行えるように工夫した。各年代別に1959~1966年を“50年前”、2007~2014年を“現在”、2055~2062年を“50年後”、2103~2110年を“100年後”とみなして解析する。正確に50年刻みでなく48年刻みである理由は、うるう年を考慮したためである。それぞれの年代で8年間の計算結果を月別に平均することで、渦の消長など短周期の変動を除去した。

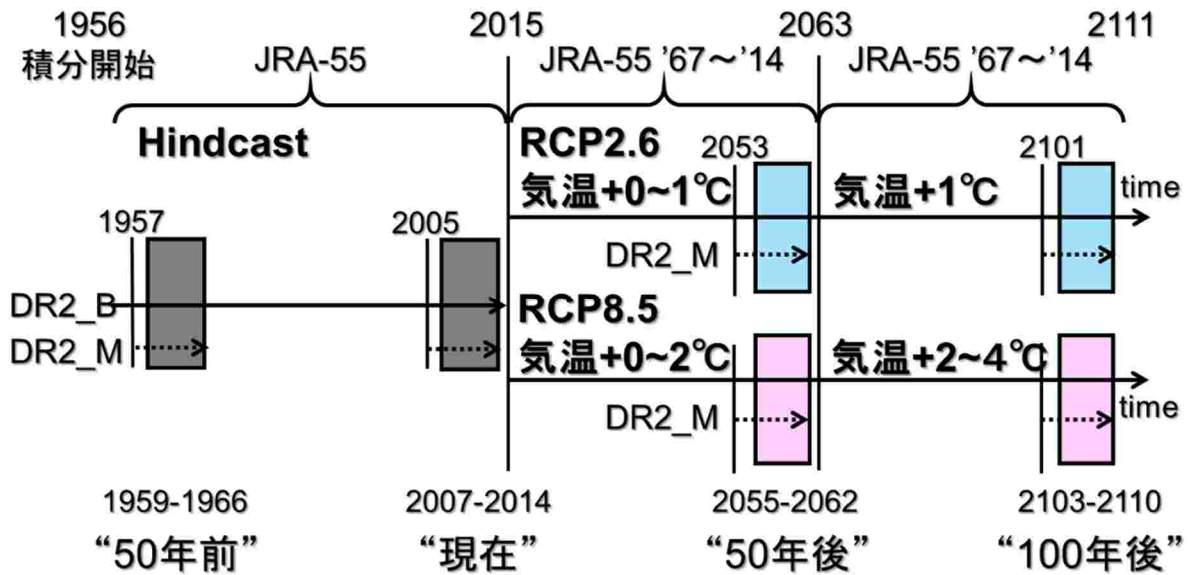


図 (2-2)-3 計算および解析期間と境界条件の設定。

大陸の河川から海洋へ流入するDIN濃度の長期変化については、Wang (2006)による長江河川DIN濃度の観測報告から推定し、1958年から1972年までは $20 \text{ mmol m}^{-3}$ の一定濃度、1973年から2004年までは $20 \text{ mmol m}^{-3}$ から年間 $2.5 \text{ mmol m}^{-3} \text{ year}^{-1}$ ずつDIN濃度を増加させた(図(2-2)-4)。2005年以降の河川DIN濃度は $100 \text{ mmol m}^{-3}$ で一定となるように設定した。中国の経済発展に伴い河川DIN濃度も上昇傾向にあるため将来の河川DIN濃度の条件設定については議論の余地があるが、大陸河川から供給される栄養塩の多くは東シナ海で消費されるため、日本海に与える影響は少ないと判断し(結果で記述)、将来も一定値( $100 \text{ mmol m}^{-3}$ )を選択した。

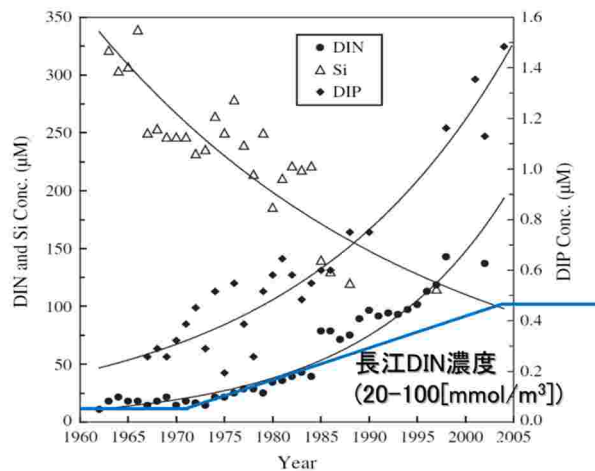


図 (2-2)-4 長江の栄養塩濃度の変化。青線は本研究での中国沿岸河川のDIN濃度。Wang (2006)の図を一部加工した。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) モデルスキームおよびパラメータの調整

O nitsuka et al. (2007)で使用したモデルパラメータを使用して過去再現実験を実施した結果、日本海の50m深の溶存酸素(DO)濃度(図(2-2)-5左)が観測気候値(図(2-2)-5右)と比べて低下しすぎる傾向が認められた。原因を分析した結果、表層においてデトリタスの分解量が当モデル結果では非現実的に多く、DIN濃度も観測と比べて過剰であることがわかった。Toyoda et al. (2013)の生態系モデルのパラメータ最適化研究に基づいて、デトリタスの沈降速度をO nitsuka et al. (2007)の8倍以上早い値に変更したところ、日本海表層で観測値に近いDO

濃度が得られた(図 Q-2)-5中央)。しかし、東シナ海長江河口域の貧酸素構造は逆に不明瞭になっている。沈降速度の修正だけでなく、海底付近のデトリタス(DET)の再懸濁の機構がモデルに必要である。

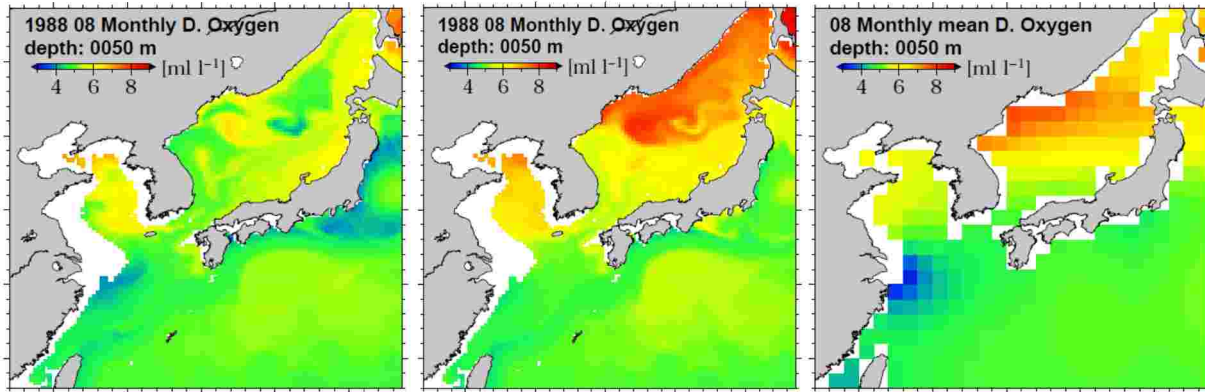


図 Q-2)-5 デトリタスの沈降速度を $5\text{ m day}^{-1}$ とした場合(左)と $43.2\text{ m day}^{-1}$ とした場合(中央)の溶存酸素濃度シミュレーション結果(50m深, 1988年8月)。右図は溶存酸素濃度の観測気候値(WOA09)。

そこで、海洋表層から海底まで沈降したデトリタス(DET)が海底直上に留まり、再懸濁によるDETから硝酸塩(DN)への分解ができるようにプログラム処理を変更した。特に、東シナ海の高底付近に滞留したDETが無機化される過程で溶存酸素(DO)が消費されるため、浅海域の高底付近で極端に低下するDO濃度分布がモデルで再現可能となった(図 Q-2)-6)。例えば、Ning(2011)の観測結果によると、東シナ海の高底付近で夏季に低DO濃度を持つ海水が形成されており、その形成要因として、1)夏季の密度成層強化によって鉛直対流が抑制される、2)高いDN濃度を持つ長江河口域で増殖した植物プランクトンの死骸(DET)が河口周辺の高底付近まで移流・沈降する、3)高底付近に溜まったDETが無機物に分解される過程でDOが消費される、というメカニズムを示唆している。今回改良したモデル結果ではNing(2011)と同様のメカニズムによって、東シナ海の高底付近で夏季に $4\text{ ml l}^{-1}$ 以下の低DO濃度の海水が形成されることを確認した(図 Q-2)-6右)。この夏季の高底における低DO濃度分布は、秋季から冬季にかけての海面冷却で成層が弱くなり鉛直対流が強化されることで、表層の高DO濃度の海水と混合して消滅するが(図 Q-2)-6左)、この現象についてもモデルでよく再現されている。

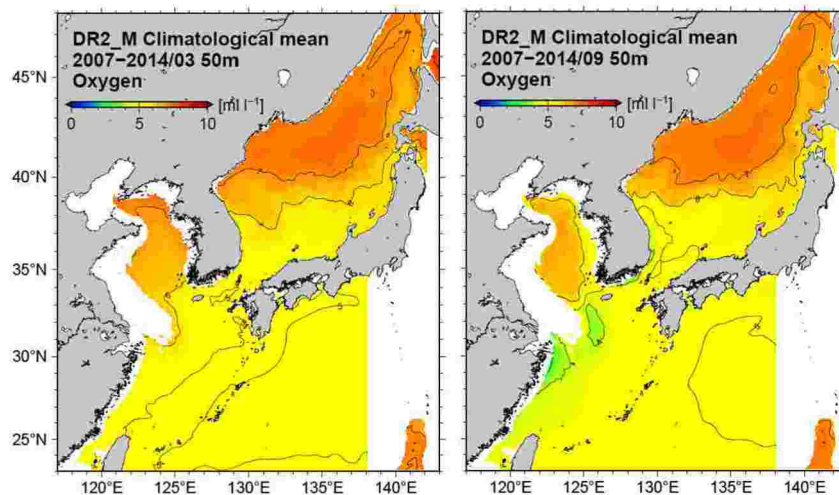


図 Q-2)-6 水深 50m における(左)3月と(右)9月の溶存酸素濃度

## (2) 溶存酸素濃度の季節変化に対する生態系の効果

日本海全体で平均した水温・塩分・DN濃度・クロロフィル濃度の鉛直プロファイルの季節変化を図 Q-2)-7に

示す。ここで、生態系モデルのPHY濃度の単位(窒素濃度)からクロロフィル濃度への変換には $1.00 \text{ mmol m}^{-3} : 1.59 \text{ mg m}^{-3}$ の比率を用いた。水温プロファイル(図 Q-2)-7a)については、冬季に海面冷却等で混合層が発達するため鉛直一様な構造となる。春季になると表層の水温が少し上昇し、夏季の水温が最大となる。秋季は再び海面冷却が始まり、表層の水温は下降する。塩分(図 Q-2)-7b)に注目すると、夏季から秋季に長江の淡水の影響を受けた低塩分水が東シナ海から日本海に流入するため、日本海の海面付近の塩分は低く、冬季から春季にかけては黒潮系の高塩分水の影響で塩分が高くなる。これらの物理的な変数の変化については Hirose (2011)で詳細に記述されている。

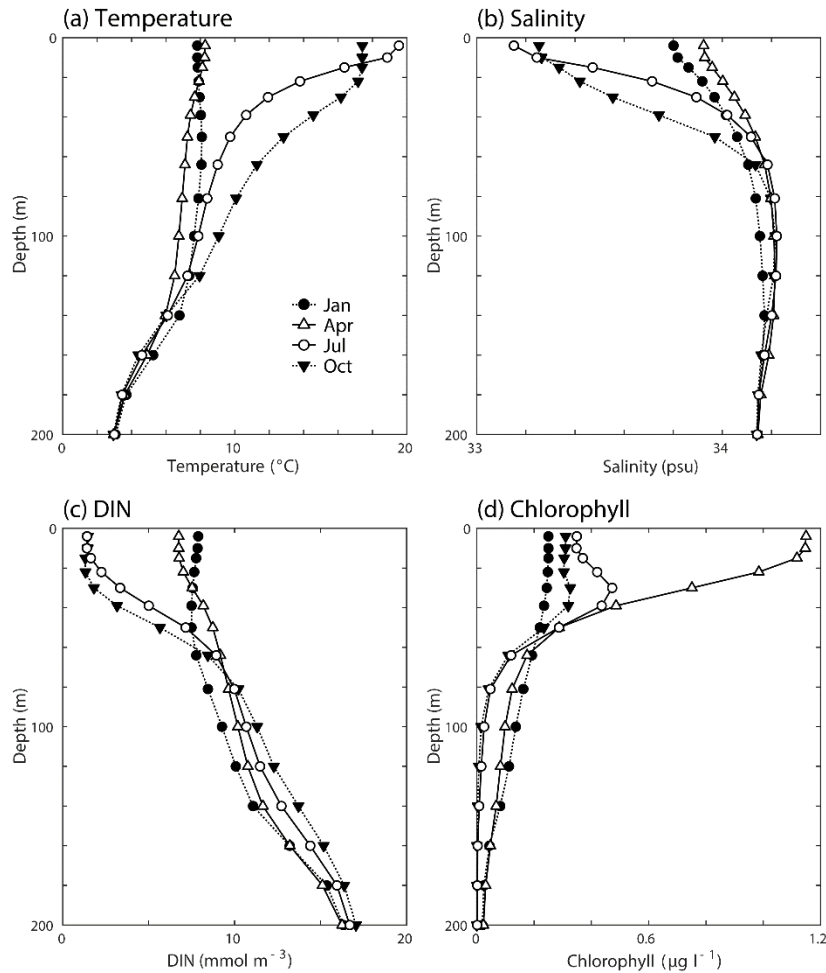


図 Q-2)-7 日本海におけるCTL実験の季節ごとの(a)水温[ ],(b)塩分[PSU] ,(c)D N [mmol m<sup>-3</sup>] ,(d)クロロフィル[mg m<sup>-3</sup>]の鉛直プロファイル。黒丸点線が1月,白三角実線が4月,白丸実線が7月,黒三角点線が10月を示している。

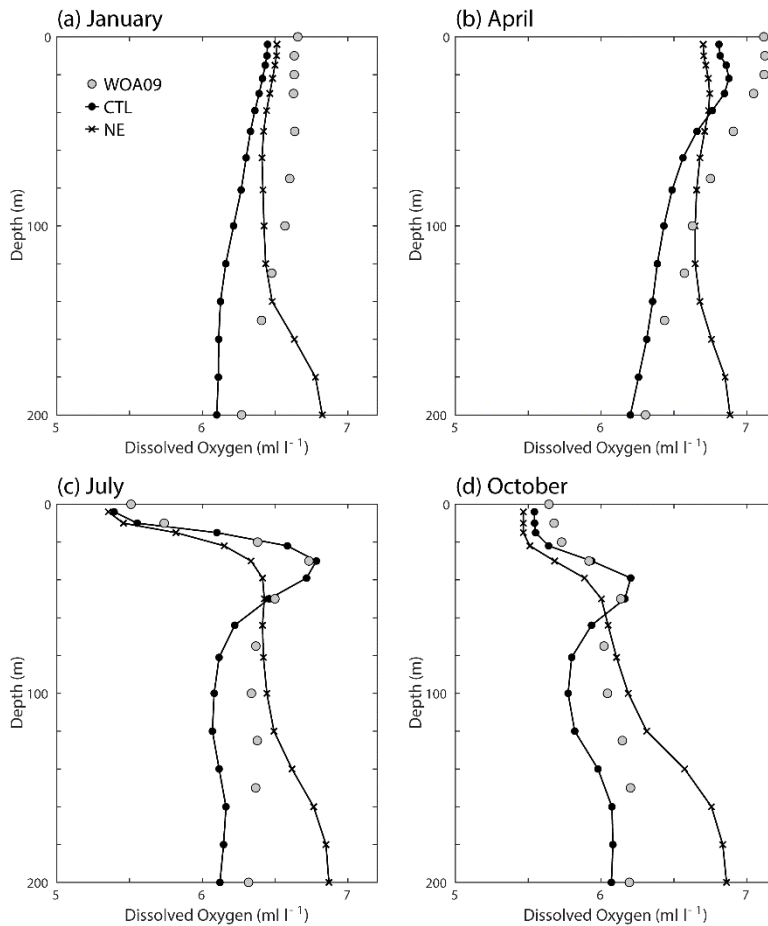
海面付近でD N濃度が最大となるのは冬季であり(図 Q-2)-7c),鉛直混合の強化によって深層から表層へ海水と栄養塩の供給がされていることを意味している。春季には海面加熱による成層の発達と光量の増加,豊富な栄養塩濃度によって春季ブルームが起こり(例えば, Yanagi et al., 2001),海面付近でクロロフィル濃度が $1.1 \text{ mg m}^{-3}$ 以上の最大値となる(図 Q-2)-7d)。夏季になると,PHYが表層の栄養塩を利用し尽くして枯渇するため表層でPHYが維持できず,栄養塩がまだ存在して光も届く水深30m程度の亜表層域にクロロフィルの極大が形成される。このクロロフィル極大層は秋季に向けて水深30mから50mまで徐々に深化していく。亜表層クロロフィル極大層の深化は観測結果と非常に良く似ていて,本研究の先行研究である Onitsuka et al. (2007)でも詳細な記述がある。

D O濃度の時空間変化に対する生態系の役割を調べるために,生態系が関係するD O濃度の変化を考慮しない Ino-ecosystem (NE)実験を行い,全ての変化を含む基準(CTL)実験と比較をした。つまり,NE実験は大気海洋のガス交換のみでD O濃度が変化し,CTL実験との違いを調べることで生態系がD O濃度の変化に及ぼす影響を

見ることができる。

### (2-1) 鉛直D0 プロファイル

図(2-2)-8は各季節の表層から200m深までのCTL実験とNE実験,およびWOA09(Bayer et al., 2013)のD0濃度プロファイルである。冬季のCTL実験のD0濃度プロファイルは鉛直的にほぼ一様であり,このパターンはWOA09と類似している(図(2-2)-8a)。表層でのCTL実験のD0濃度最大値は春季ブルームが始まる3月で,この最大値は春季から秋季にかけて亜表層(水深50m付近)まで深化していく(図(2-2)-8b-d)。この亜表層D0濃度極大はWOA09の観測結果からも確認できる。一方,NE実験はCTL実験にみられた亜表層D0極大が形成されおらず,全ての季節で水深100mから200mにかけてのD0濃度が徐々に増加している傾向がある。このような増加傾向はCTL実験や観測には見られない。CTL実験とNE実験の比較から,亜表層のD0濃度極大の形成には植物プランクトンの光合成による酸素の生成が強く影響し,また100m以深におけるNE実験とCTL実験のD0濃度の差は,有機物の分解による酸素の消費が大きく関係していることを意味している。



図(2-2)-8 日本海の溶存酸素濃度の鉛直プロファイル[ $\text{ml l}^{-1}$ ]。(a)1月,(b)4月,(c)7月,(d)10月。丸点は観測データ,黒丸付きの実線はCTL実験,クロス付きの実線はNE実験の結果を示す。

### (2-2) D0濃度の季節変化

図(2-2)-9に日本海全体平均した表層,30m深,200m深におけるD0濃度の季節変化を示している。表層のD0(図(2-2)-9a)は冬から春にかけて高濃度,夏から秋にかけて低濃度となる季節変化をしていて,CTL実験とNE実験に大きな差異はなく,両実験共に観測(WOA09)と似た変動を示している。両実験の違いがほぼ無いことから,海洋表層のD0濃度が大気海洋間のガス交換によって主に支配されていて,低水温期(高水温期)にD0が高濃度(低濃度)を示す酸素溶解度に依存して時間変化していることがわかる。水深30mのD0濃度の季節変化(図(2-2)-9b)は夏から秋にCTL実験とNE実験で違いが顕著である。夏から秋のCTL実験のD0濃度はNE実験よりも高濃度となり,観測に近い。両実験のD0濃度の違いは主に,有光層に存在する植物プランクトンの光合成

によって酸素が供給されたことに由来する。水深200mにおけるD<sub>0</sub>濃度(図 2-2)-9c)は両実験共に顕著な季節変化は見られないが、バイアス的な差がみられる。年平均のD<sub>0</sub>濃度はCTL実験が6.1 ml l<sup>-1</sup>, NE実験が6.9 ml l<sup>-1</sup>, WOA09が6.3 ml l<sup>-1</sup>であり, CTL実験のD<sub>0</sub>濃度が観測に近い値を示している。光がほぼ届かない無光層においては有機物の無機化で生じる酸素消費が両実験の差を生む主要因となっている。

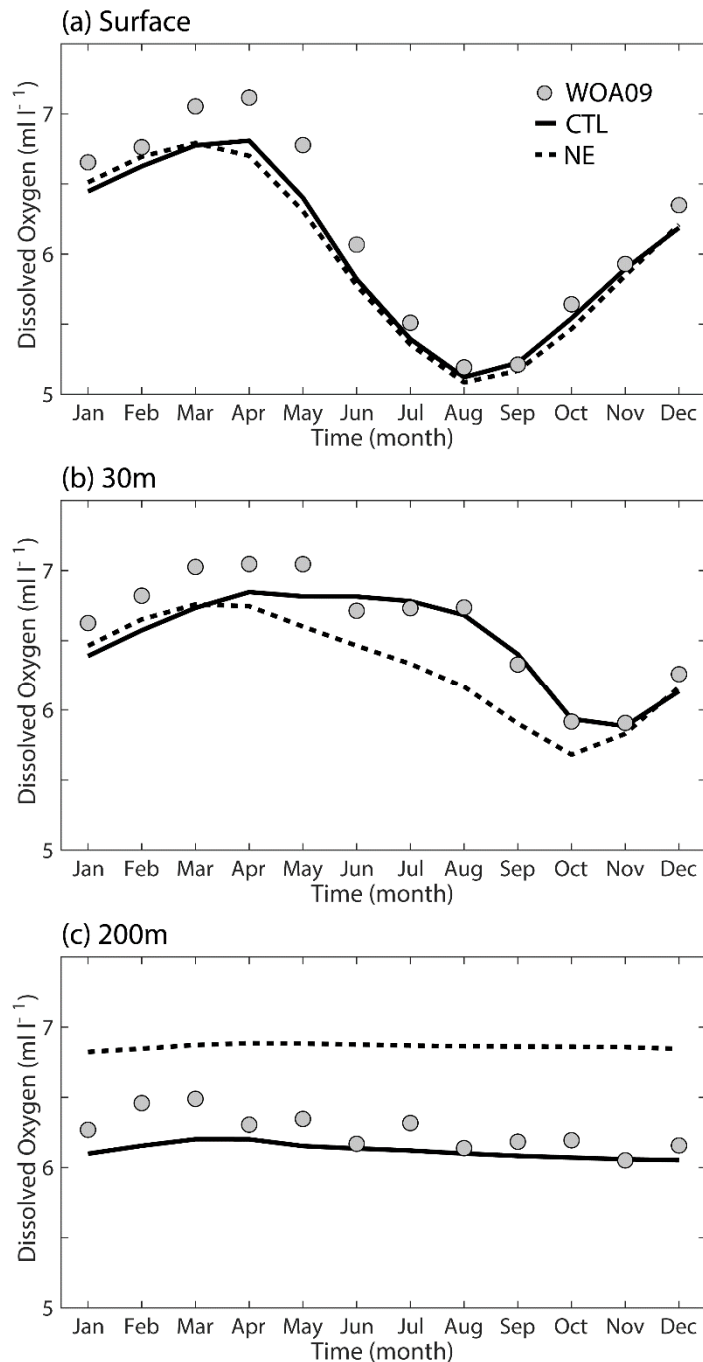


図 2-2)-9 日本海の溶存酸素濃度の季節変化 [ml l<sup>-1</sup>]. 上から表層, 30m 深, 200m 深。丸点, 実線, 点線はそれぞれ, 観測データ, CTL実験, NE実験の溶存酸素濃度を示している。

### (2-3) D<sub>0</sub> 濃度空間分布

季節ごとの水深30mにおける観測(WOA09)とCTL実験, NE実験のD<sub>0</sub>濃度空間分布を図 2-2)-10に示す。WOA09は1°格子間隔でデータが収録されており, 欠測が無くなるように広範囲の空間スケールで観測値の補間をしているため(Bayer et al., 2013), 局所的なD<sub>0</sub>濃度変化を捉えきれていない可能性はあるが, 全ての季節で日本海北部は高D<sub>0</sub>濃度, 日本海南部は低D<sub>0</sub>濃度の傾向を示している。



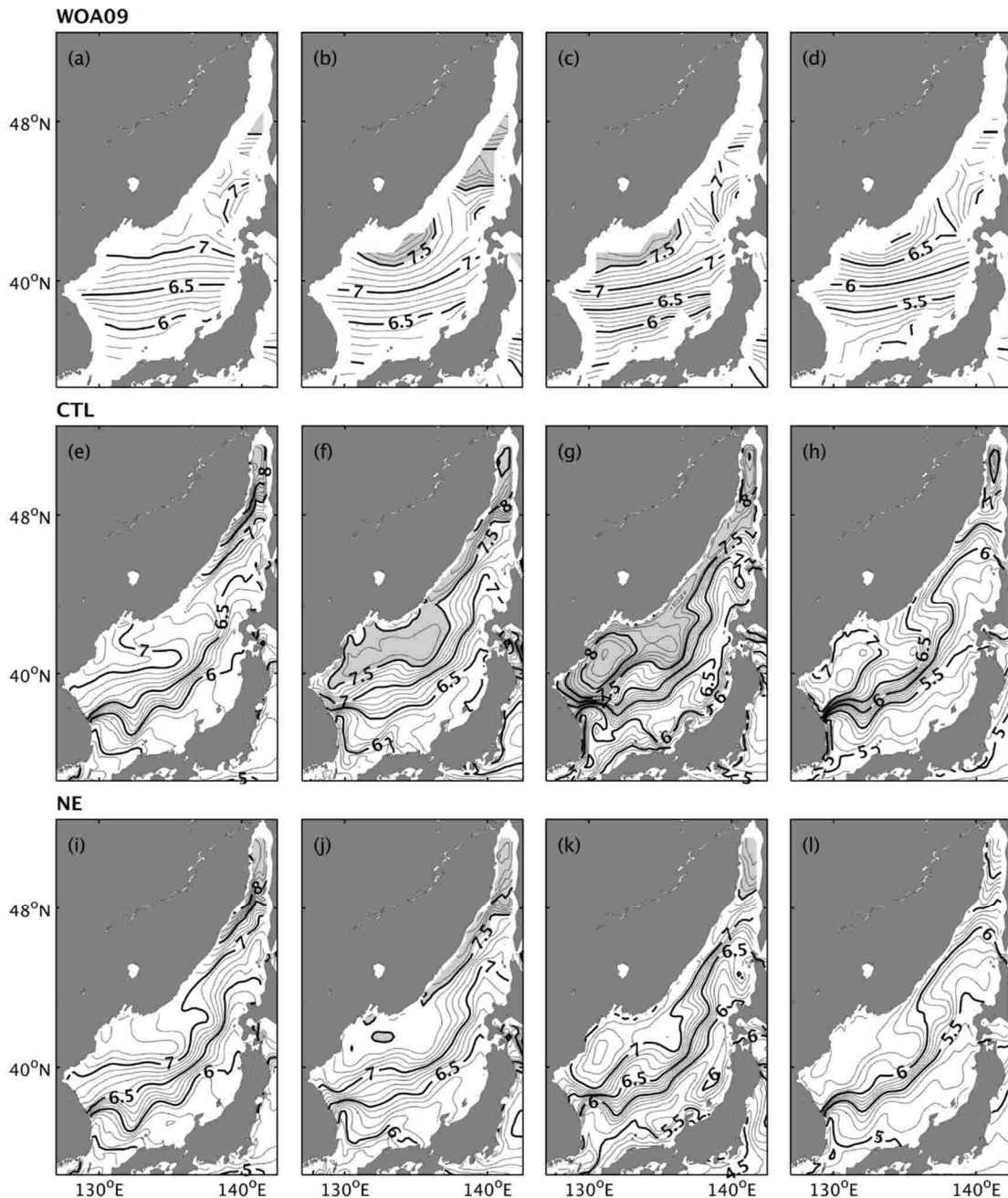


図 2-2)-10 水深30mにおける(上段)WOAと(中段)CTD実験,(下段)NE実験のDO濃度水平分布[m l l<sup>-1</sup>]. 左から1,4,7,10月。

CTL実験やNE実験の結果も観測にみられるDO濃度の南北勾配を表現しているが,CTL実験の濃度勾配はNE実験よりも大きい。特にCTL実験の春季から夏季にかけては,光合成によるDO供給の影響で7.5 m l l<sup>-1</sup>を超える高DO濃度が日本海北部の広い範囲に分布しているが(図 2-2)-10f, g),光合成によるDO増加の影響を受けないNE実験では7.5 m l l<sup>-1</sup>を超える海域はロシア沿岸に限られている(図 2-2)-10j, k)。なお,夏季のCTL実験(図 2-2)-10g)では,ウラジオストク南部にDO濃度が8.0 m l l<sup>-1</sup>を超える高濃度域が存在しているが,観測(図 2-2)-10c)には存在しない。しかしながら,この海域はDO濃度の観測データが非常に少ないため,CTL実験の結果が現実的か否かについては観測からは判別できない。また,秋季のCTL実験で日本海南部にはDO濃度が5.5 m l l<sup>-1</sup>以下の領域が広く分布しているが(図 2-2)-10h),この分布は観測(図 2-2)-10d)だけでなくNE実験(図 2-2)-10i)にも見ることができる。CTL実験とNE実験の結果に差がほとんどないことから,この低DO濃度の海水は日本海南部で有機物が分解されて低DO濃度になったわけではなく,対馬海峡を通じて東シナ海から日本海南部に低DO濃度の海水が移流されてきたと考えられる。

### (3)日本周辺海域の物理 低次生態系結合モデルの最適パラメータの推定

DR<sub>B</sub>を親モデルとして、解像度1/12° x 1/15°格子で日本周辺海域を表現する子モデル(DR<sub>M</sub>)の過去再現計算を行い、グリーン関数法を利用して溶存酸素(DO)濃度の観測データに近づくように結合モデルで使用される主要なパラメータの最適値を推定する。グリーン関数法とは、モデルの基準実験の結果と基準実験から複数のパラメータに摂動を与えたモデル実験の結果を用意し、それらのモデル結果と観測データを比較することで、観測(本研究ではDO濃度)の時空間変化をモデルで最大限説明できるような(つまり最適な)パラメータを逆推定する手法である。海洋物理モデルや海洋生態系モデルにグリーン関数法を適用した先行研究としては、Hirose(2011)やToyoda et al.(2013)が挙げられる。本事業では、観測されたDO濃度に最適となるDR<sub>M</sub>の主要なパラメータの推定を実施する。

船舶観測を主としたDOデータをWorld Ocean Database 2013(WOD13)のホームページサイト([https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr\\_wod.html](https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html))からダウンロードした。今回のグリーン関数法はモデルの長期計算結果が観測データに近づくようにモデルパラメータを調整する目的であることから、DO濃度の時間変化が年周期より長いと考えられる深層の観測データを採用し、逆に年周期より短い変動が卓越すると思われる海洋表層の観測データは解析から除外する。具体的には、1973年から1985年までの期間で日本海の水深200m以深のDO濃度データを抽出し、解析に利用する。この条件に適合するWOD13のDO観測データ数は21,060個となった。

今回の実験で推定されるパラメータは、DN濃度やDO濃度のモデル初期値(World Ocean Atlas: WOAのデータを使用)、デトリタスの分解速度や沈降速度など、長期的なDO濃度変化に影響を及ぼすパラメータを10個ほど選択した(表Q-2)-1参照)。留意点として、今回グリーン関数法で最適値を求める全てのパラメータは結合モデルの生態系部分やDO濃度に影響を及ぼすが、物理的な状態の変更には全く影響しない。つまり、グリーン関数法による最適パラメータを選択した後の実験でも、水温・塩分・流速などの物理的な状態は基準実験と同じである。モデルは基準実験と各摂動実験ともに1957年から1985年まで計算し、観測データ取得期間と同じ1973年から1985年までをグリーン関数法の適用期間とした。

表 Q-2)-1 グリーン関数法で推定したモデルパラメータとグリーン関数法で求めた最適値。「基準」は基準実験で使用した値、「実験値」は摂動実験の値、「倍率」と「誤差」はグリーン関数法で求めた摂動の倍率とその誤差、「最適値」はグリーン関数法で求めた最適値である。

No.	パラメータ	基準	実験値	最適値	単位
1	DN初期値	(WOA)	*0.9	*1.00 ± 0.07	mmol m <sup>-3</sup>
2	DO初期値	(WOA)	*1.1	*1.17 ± 0.01	ml l <sup>-1</sup>
3	光減衰係数	0.05	0.055	0.066 ± 0.004	m <sup>-1</sup>
4	プランクトン遮蔽係数	0.06	0.066	0.049 ± 0.005	m <sup>2</sup> mmol l <sup>-1</sup>
5	DO曝気係数	1.67	1.25	1.25 ± 0.13	day <sup>-1</sup>
6	DET海底蓄積速度	7.00	8.00	5.92 ± 0.70	day <sup>-1</sup>
7	DET分解速度	0.05	0.055	0.039 ± 0.004	day <sup>-1</sup>
8	DET沈降速度	43.2	38.88	54.30 ± 3.02	m day <sup>-1</sup>
9	水温係数(PHY)	0.0519	0.0693	0.0453 ± 0.0144	
10	水温係数(PHY以外)	0.0693	0.0519	0.0527 ± 0.0062	

表 Q-2)-1に注目すると、例えばDO初期値(実験2番)に関しては、基準実験ではWOAのDO濃度を初期値に

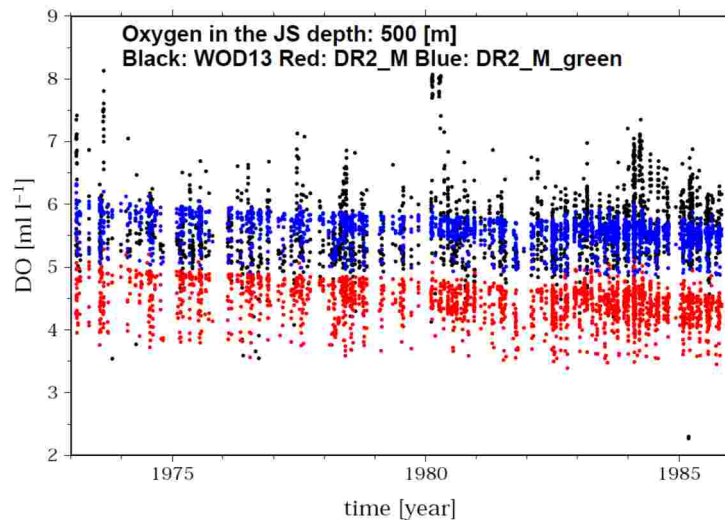
して、摂動実験ではW0Aの1.1倍の濃度を初期値に与えて実験した。グリーン関数法から求まる最適値は、W0Aの1.17倍が本モデルのD0濃度初期値として最適であると推定された。また、デトリタス分解速度(実験7番)の最適値は約 $0.04 \text{ day}^{-1}$ と基準実験よりも分解され難くなり、デトリタスの沈降速度(実験8番)は逆に $54.30 \text{ m day}^{-1}$ と基準実験より早く沈降するように修正された。つまり、実験7番と8番の両方のパラメータ修正は、デトリタスからDNへの無機化時に消費されるD0が基準実験よりも深層で行われるように変更されている。倍率の数値よりも誤差が大きい場合(例えば実験1番や9番)については、グリーン関数法で求めた最適値の推定精度が低いことを示唆して、観測期間や観測の種類を変更するなど再調節して精度を高めていく必要がある。

グリーン関数法の評価関数は以下の様に定義される。

$$J = \sum_{n=1}^{21060} \frac{(DO_n^O - DO_n^M)^2}{R}$$

nは観測番号、上付きのOとMはそれぞれD0観測値とモデルのD0濃度を意味し、RはD0観測の誤差分散(表現誤差を含む)で本研究では $1.0 \text{ (ml l}^{-1})^2$ を使用した。この評価関数の値が基準実験の値よりも最適値実験の結果が小さくなれば、グリーン関数法によってモデルが観測に近づいたと判断できる。観測と基準実験の評価関数は $J=58642$ であったが、観測と最適値実験の評価関数は $J=10662$ となり、80%以上の大幅改善となった。パラメータの最適化が極めて有効に作用したといえる。

グリーン関数法で求めた最適パラメータを用いてDR\_Mを再実行し、基準実験と最適値実験のモデル結果と観測とのRMS差と相関を計算した。日本海の200 m以深のD0観測値とのRMS差と相関は、基準実験でRMS差が $1.18 \text{ ml l}^{-1}$ 、相関が0.481、最適値実験でRMS差が $0.51 \text{ ml l}^{-1}$ 、相関0.484となった。相関は両実験で大差ないものの、RMS差については最適値実験が大幅に観測結果に近づいた。結果が観測に近づいた様子は図(2-2)-11のD0時間変化や図(2-2)-12のD0濃度空間分布においても確認できる。



図(2-2)-11 日本海の水深500mにおける溶存酸素濃度の時間変化。黒点が観測(WOD13)、赤点が観測地点に最寄りの格子点におけるDR\_Mの基準実験の結果、青点がグリーン関数法で求めた最適パラメータで実験した結果。

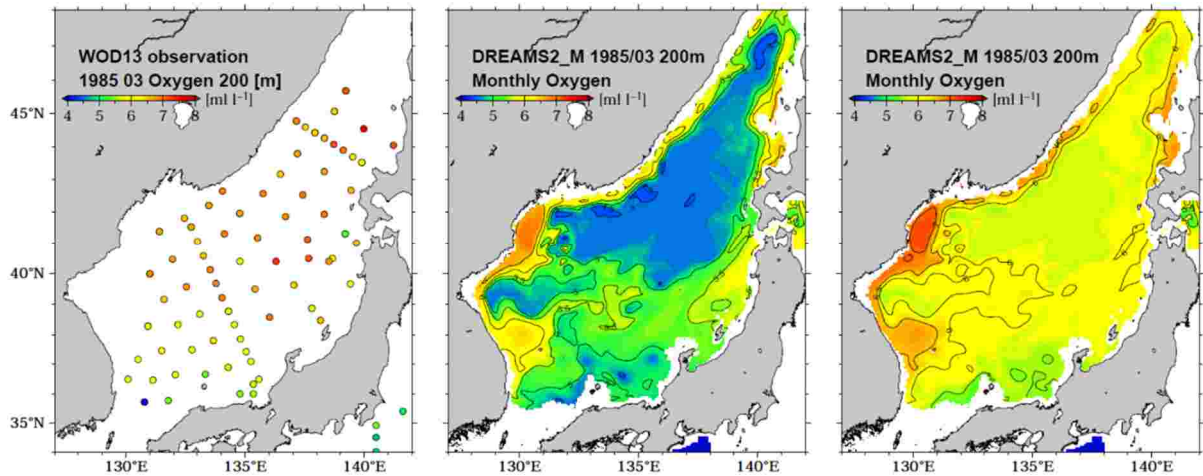


図 (2-2)-12 1985年3月の水深200mにおける溶存酸素濃度分布。左から観測 (WOD13)、DR\_Mの基準実験、グリーン関数法で求めた最適値の実験結果。

#### (4)大陸河川起源の栄養塩が日本海に及ぼす影響

大陸河川起源の栄養塩が日本海にどの程度影響を及ぼすか調べるために、モデルを使ってシミュレーションを実施した。実験設定としては、実験期間中(2004年から2009年まで)に大陸河川から供給されるDIN濃度が無いという仮定でシミュレーション実験をおこない、その結果として得られた対馬海峡のDIN濃度を通常の実験結果(基準実験)と比較した(図(2-2)-13)。さらに台湾海峡や台湾東部(黒潮源流域)のDIN濃度も無いと仮定した実験を個別に実施して、対馬海峡のDIN濃度を調べて基準実験と比較することで、対馬海峡を通過する栄養塩起源の比率を調査した。

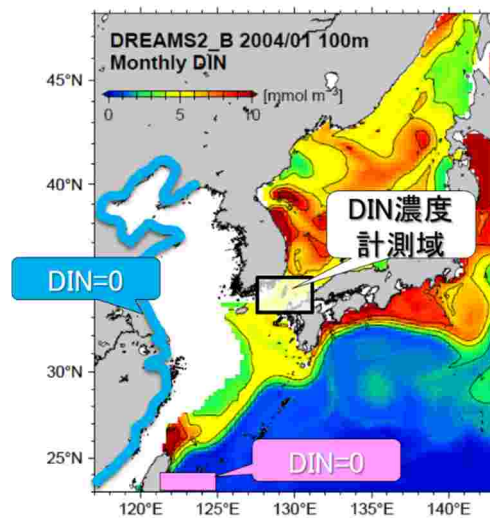


図 (2-2)-13 日本海に流入する栄養塩(DIN)濃度の起源調査実験の設定概念図。青線は河川DIN供給を無くした実験、赤枠は台湾東部(黒潮源流域)のDIN供給を無くした実験の設定海域。白枠がDIN濃度の起源内訳を調べた海域(対馬海峡)を表している。

対馬海峡のDIN濃度の起源は約80%が台湾東部(黒潮)起源で、大陸河川由来のDINは約6%、多い月でも10%程度であることが実験結果から示唆された(図(2-2)-14)。大陸河川から供給される栄養塩の多くは生物生産によって消費され、東シナ海の海底に沈降してしまうことが実験結果から推測できる。また、水深が100m程度の比較的浅い対馬海峡のDINの起源が、黒潮源流域の水深が深い(400m以深)ところから供給されているという実験結果についても大変興味深い。

大陸河川由来のDINが対馬海峡のDIN濃度の1割に満たないという結果は、大陸河川の栄養塩供給の長期

変化が日本海に流入する栄養塩供給に対して主要因とならないことを示唆している。そのため、以後の実験では気候変動に伴う気温上昇に対する日本海の物理・生態系の応答にのみ注力し、2005年以降の大陸河川の栄養塩は $100 \text{ mmol m}^{-3}$ で一定とする。

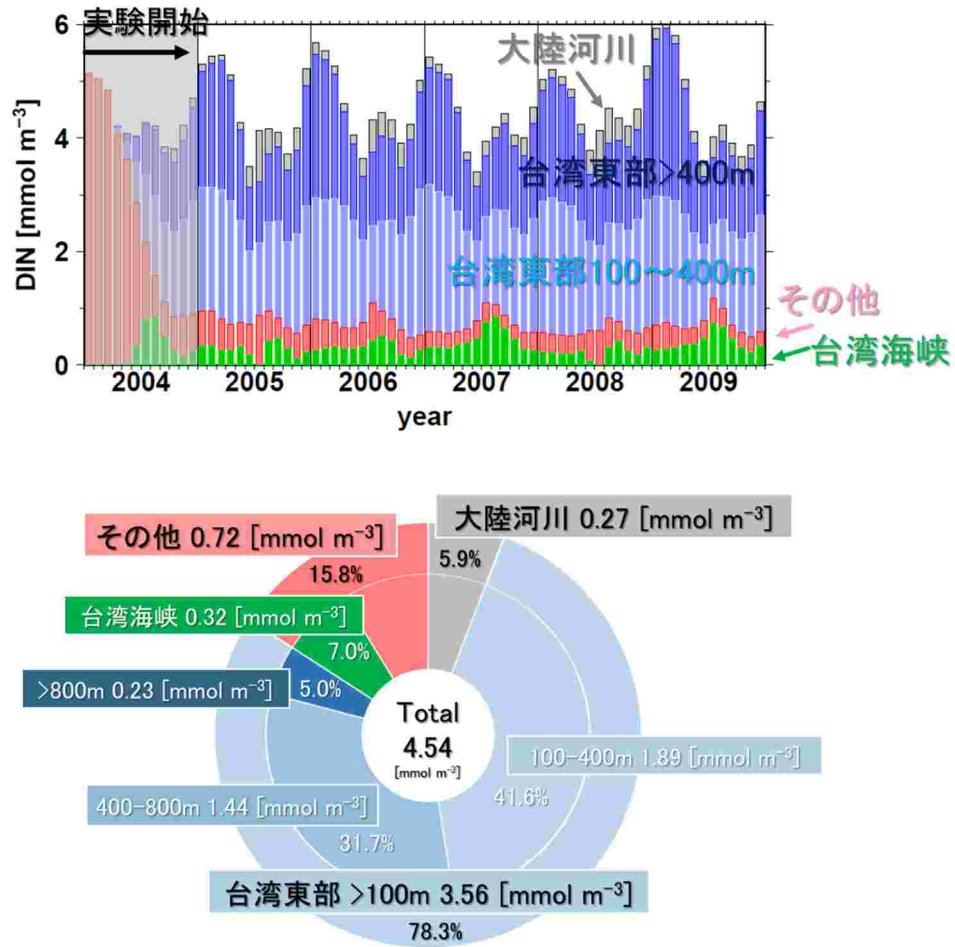


図 (2-2)-14 対馬海峡のDIN濃度の起源の内訳。上図 (棒グラフ)は対馬海峡域の月毎のDIN濃度とその起源を、下図 (円グラフ)は実験期間で平均したDIN濃度の起源を割合で表している。

#### (5)気候変動に対する日本海の物理・生態系の応答

過去50年の再現実験と、温暖化する気象条件 (IPCCのRCP2.6シナリオとRCP8.5シナリオ)を元に将来100年間に及ぶ予測実験をおこなった。過去50年間の再現実験の結果について、気象庁が20世紀の観測値から求めた海面水温長期変化傾向と比較した (図 (2-2)-15と図 (2-2)-16)。シミュレーションによる水温長期変化は過去50年の間で、日本海では $1.0 \sim 1.5$  /100年、東シナ海では約 $1$  /100年の水温上昇傾向を示し、この傾向は気象庁が推定した観測結果と同程度である。さらにIPCCのシナリオを模した将来の100年間の予測計算結果からは、日本海南部は $1.35 \sim 2.67$ 、東部は $0.62 \sim 1.77$ 、北部では $1.90 \sim 3.75$ の水温上昇が予測され、どのようなIPCCのシナリオであったとしても日本海の温暖化は今後も加速するとみられる。日本海の水温上昇率は東シナ海よりも大きく、これは日本海が気温上昇による海水温上昇の影響を受けやすいことを示唆している。

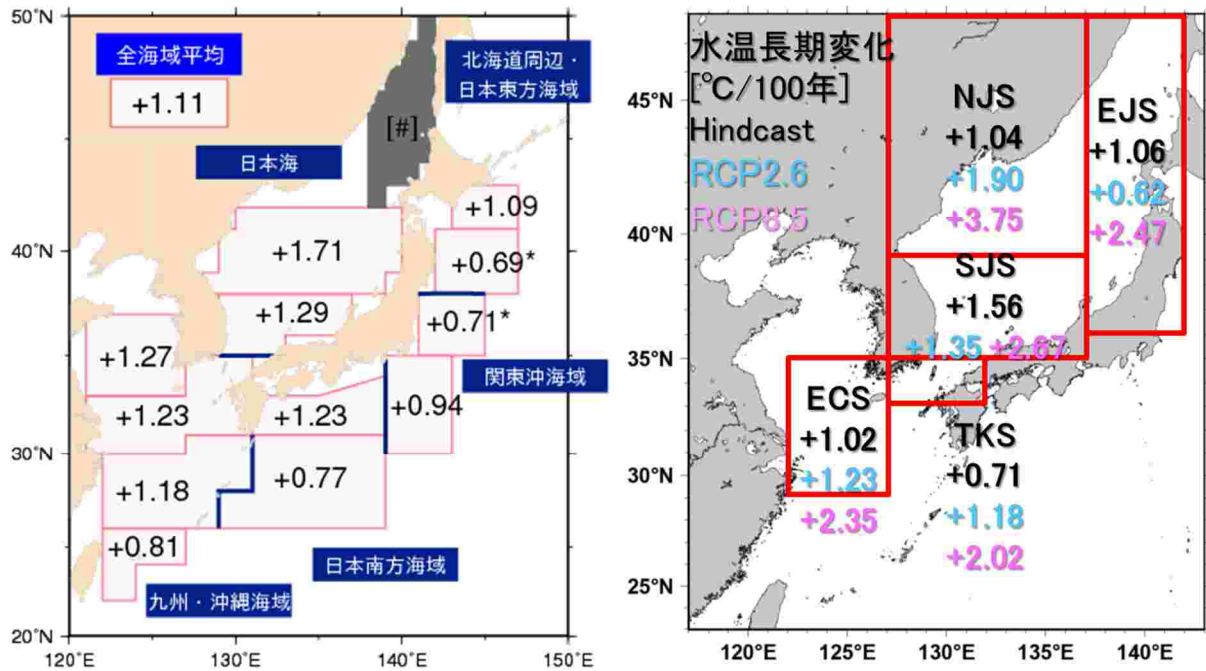


図 Q-2)-15 (左)日本近海の海面水温の長期変化傾向(気象庁)と(右)本モデルから求めた表層水温長期変化傾向。赤枠は解析をおこなった海域を示している(ECS:東シナ海、TKS:対馬海峡、NJS:日本海北部、SJS:日本海南部、EJS:日本海東部)。黒字は過去50年間、青字はRCP2.6、赤字はRCP8.5シナリオでの将来100年間から計算した水温長期変化傾向。単位は /100年。

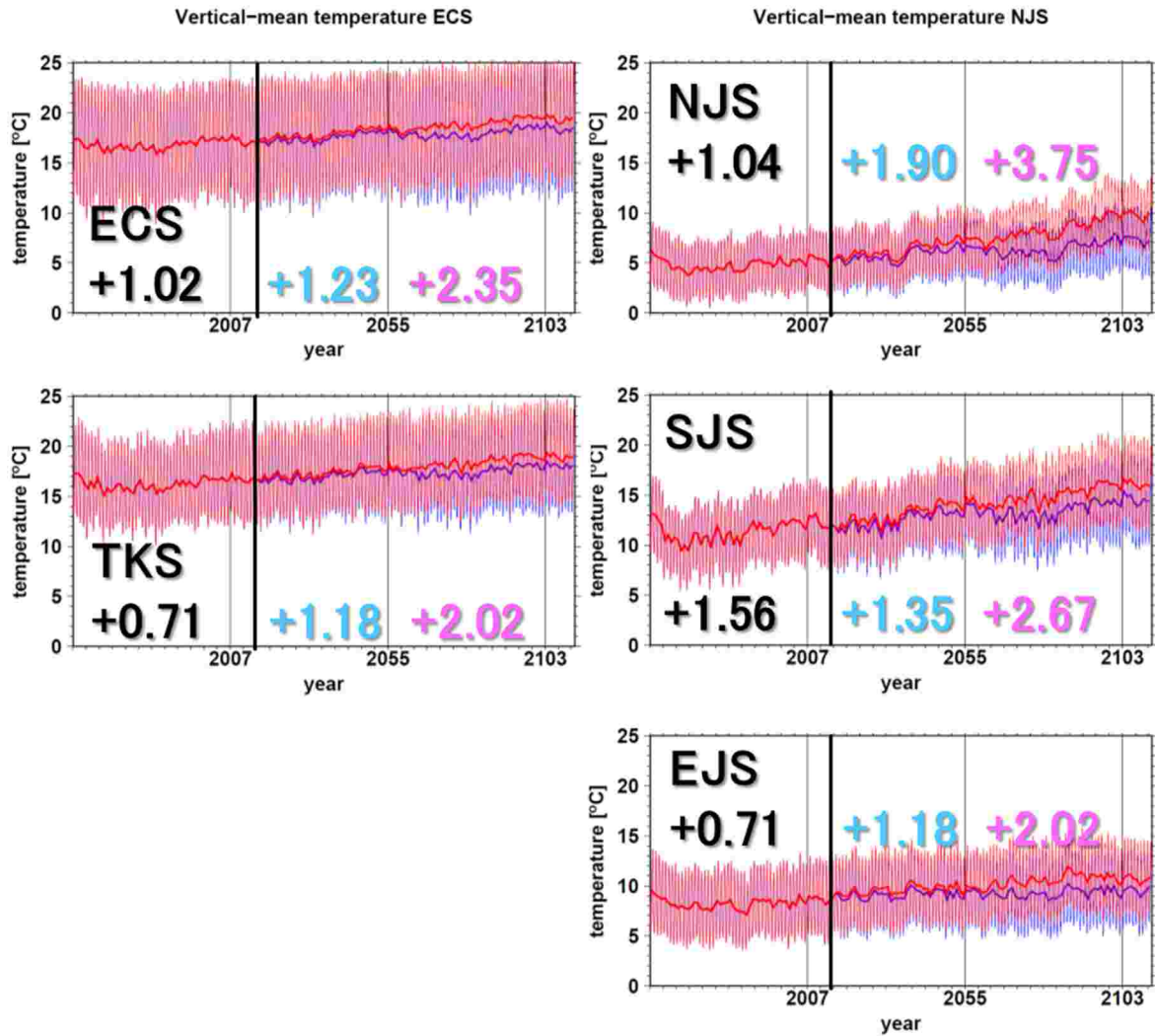


図 Q-2)-16 各海域 (ECS :東シナ海、TKS :対馬海峡、NJS :日本海北部、SJS :日本海南部、EJS :日本海東部)における0~110 m 深で平均した水温の時間変化。赤線はシナリオRCP8.5における月毎の水温変化で赤太線がその年平均。青線はシナリオRCP2.6における月毎の水温変化で青太線がその年平均。黒線はシナリオの分岐が実施された2015年を示している。各図中の数字は水温の上昇トレンドを表していて、単位は  $^{\circ}\text{C}/100\text{年}$  である。黒字、赤字、青字がそれぞれ再現実験期間中、RCP8.5シナリオ予測期間中、RCP2.6シナリオ予測期間中の水温トレンドを表している。

各年代の3月における100 m 深水温分布を図 Q-2)-17に示す。50年前および現在では、 $39^{\circ}\text{N}$  付近に等温線が集中し、水温の南北勾配が大きく、水温フロントが形成されている。 $39^{\circ}\text{N}$  以南の日本海南部は比較的水温の高い温暖な対馬暖流系の海水 (100 m 深で水温 $6\sim 12^{\circ}\text{C}$ ) が占めていて、逆に $39^{\circ}\text{N}$  以北の北部は冷たい亜寒帯系の海水 (100 m 深で水温 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ ) が占めている。50年後の水温分布ではRCP2.6とRCP8.5シナリオの両方で水温フロントの位置が $40^{\circ}\text{N}$  付近まで北上し、等温線の間隔が50年前の等温線間隔よりも広がっている。つまり、対馬暖流系の温暖な海水が日本海北部海域まで流入し、水温の南北勾配を弱めていることがわかる。100年後の水温分布からは対馬暖流系の温暖な海水がさらに日本海北部海域まで到達している様子が見える。特にRCP8.5シナリオの100年後は3月の100 m 深で水温が $2^{\circ}\text{C}$  以下となる水域が無くなり、50年前の日本海北部ではほぼ全ての領域で存在していた水温 $4^{\circ}\text{C}$  以下の水域が大幅に縮小されている。

図 Q-2)-17に示した3月における100 m 深水温分布から、50年後と現在の水温差、100年後と50年後の水温差を図 Q-2)-18に示す。50年後は現在と比べて水温上昇が顕著な海域と、逆に水温低下が起こる海域があることがわかる。50年後の温度上昇が顕著であった北朝鮮沖と大和堆では、100年後でも温度上昇が顕著であり、RCP2.6シナリオの実験では100年間で $5^{\circ}\text{C}$  以上、RCP8.5シナリオの実験結果では100年間で $8^{\circ}\text{C}$  以上の水温

上昇が起きている。また、RCP8.5シナリオの100年後の水温は50年後と比べて、日本海のほぼ全ての海域で水温が上昇している。この結果は、低温を好む生物の代わりに高温を好む生物に日本海の生態系が変わる可能性を示唆している。

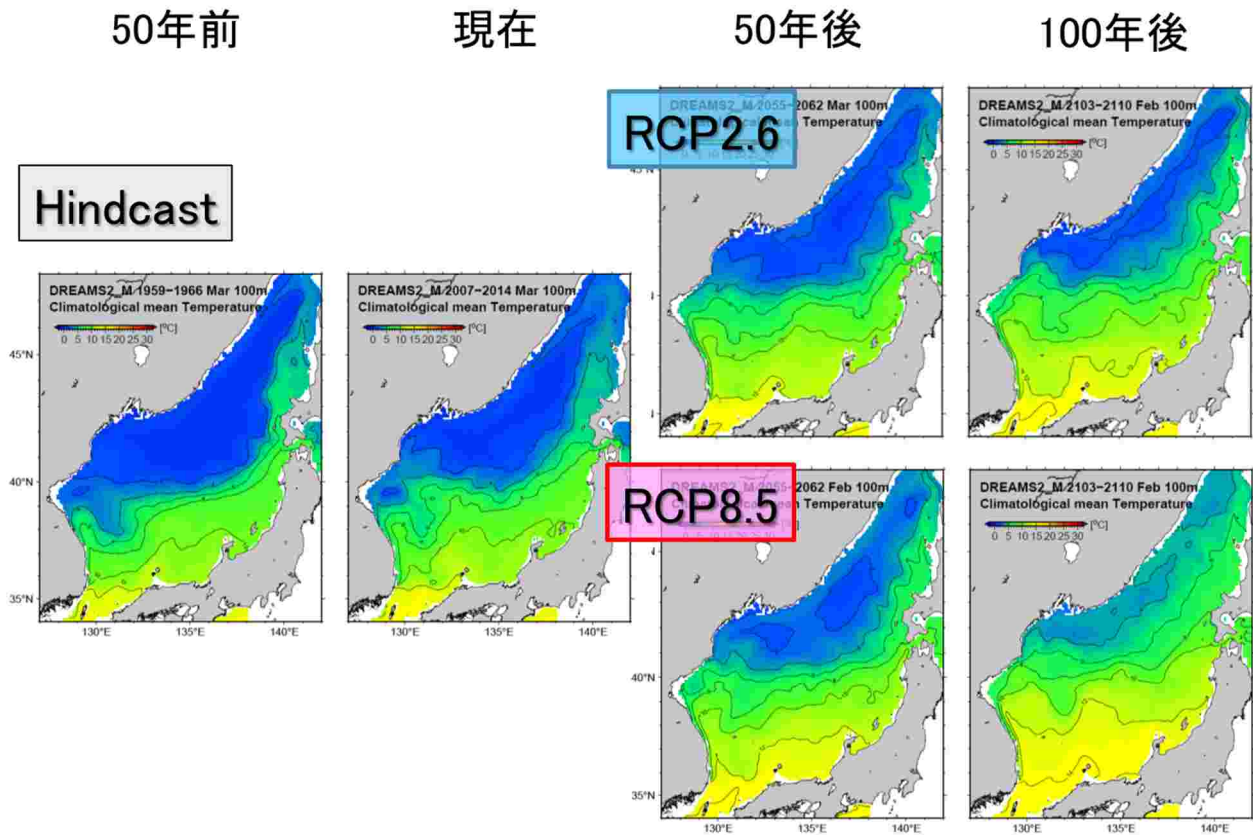


図 2-2)-17 各年代の3月の100 m 深水温分布。予測期間については上段にRCP2.6シナリオの結果、下段にRCP8.5シナリオの結果を示している。図中黒線で示した水温の等値線間隔は2 毎。



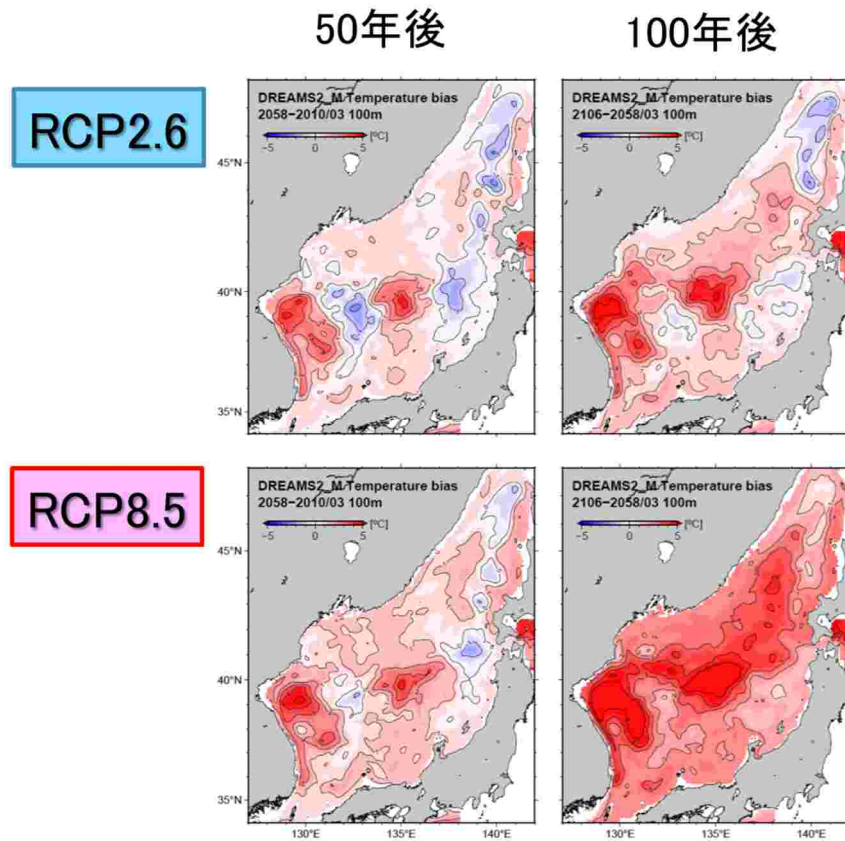


図 (2-2)-18 予測期間における3月の100m 深水温差。左は50年後と現在の水温差を、右は100年後と50年後の水温差を表している、上段にRCP2.6シナリオ、下段にRCP8.5シナリオの結果を示している。

日本海が温暖化する一因として、対馬海峡を通過して日本海に流入する対馬暖流の流量増加が考えられる(図(2-2)-19)。モデル計算結果の検証のため、対馬海峡を定期的に通っているフェリーに取り付けたADCP流速観測から見積もった対馬海峡の通過流量も同図中に示している。モデルから計算した流量は観測から見積もった流量と同程度となっている。解析期間中の1956年から2111年で、対馬海峡を通過する流量は1970年代の約1.6 Sv(スベルドラップ、1 Svは $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ に相当する)が最小で、その後は変動しつつも増加する傾向がみられる。RCP2.6シナリオ実験の通過流量よりもRCP8.5シナリオの実験のほうが多くなる傾向もみられる。日本海に高温の海水を供給する対馬暖流の勢力が増加したことが、日本海内部の温暖化を進めた主因とみてよいだろう。

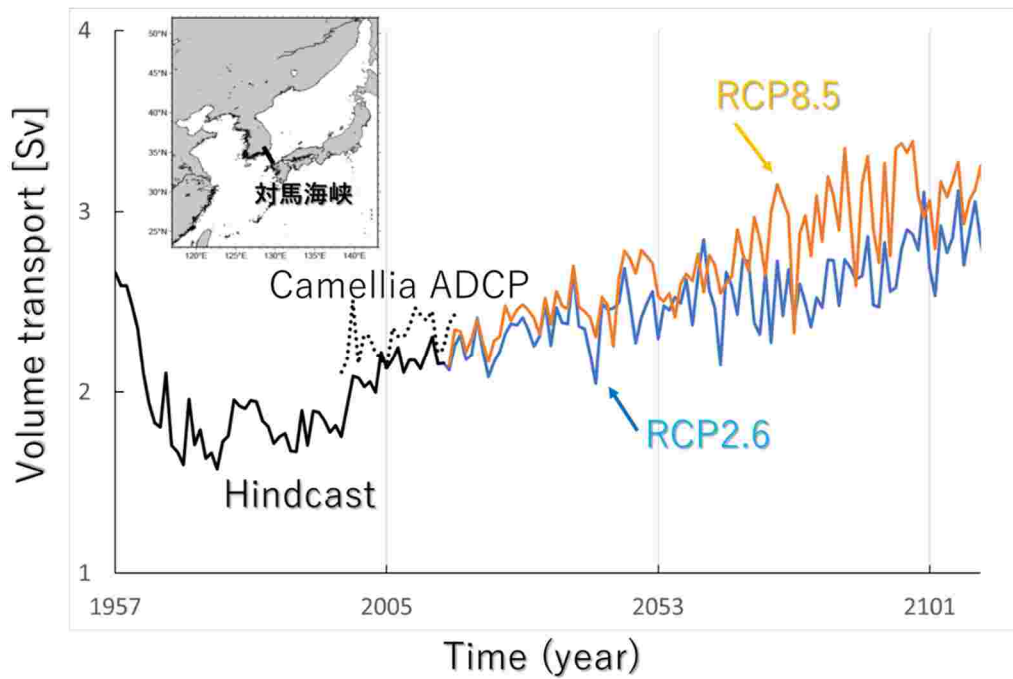


図 (2-2)-19 対馬海峡を通過する流量の時間変化。単位はスベルドラップ(Sv)で $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ に相当する。点線は対馬海峡を横断するフェリーに搭載されたADCP流速観測から推定した対馬海峡の通過流量。

温暖化によって日本海の栄養塩の環境がどのように変化したかに注目する(図(2-2)-20)。RCP2.6において日本海南部が $1.14 \text{ mmol m}^{-3}/100\text{年}$ 、北部が $2.08 \text{ mmol m}^{-3}/100\text{年}$ の上昇となった。栄養塩の観点からいえば日本海の将来の生態系は維持、または改善される予測である。RCP2.6よりも水温上昇幅が大きいRCP8.5の実験でも、日本海北部のDIN濃度変化は $2.64 \text{ mmol m}^{-3}/100\text{年}$ の上昇となり、これはRCP2.6のDIN濃度上昇幅よりもさらに大きい。

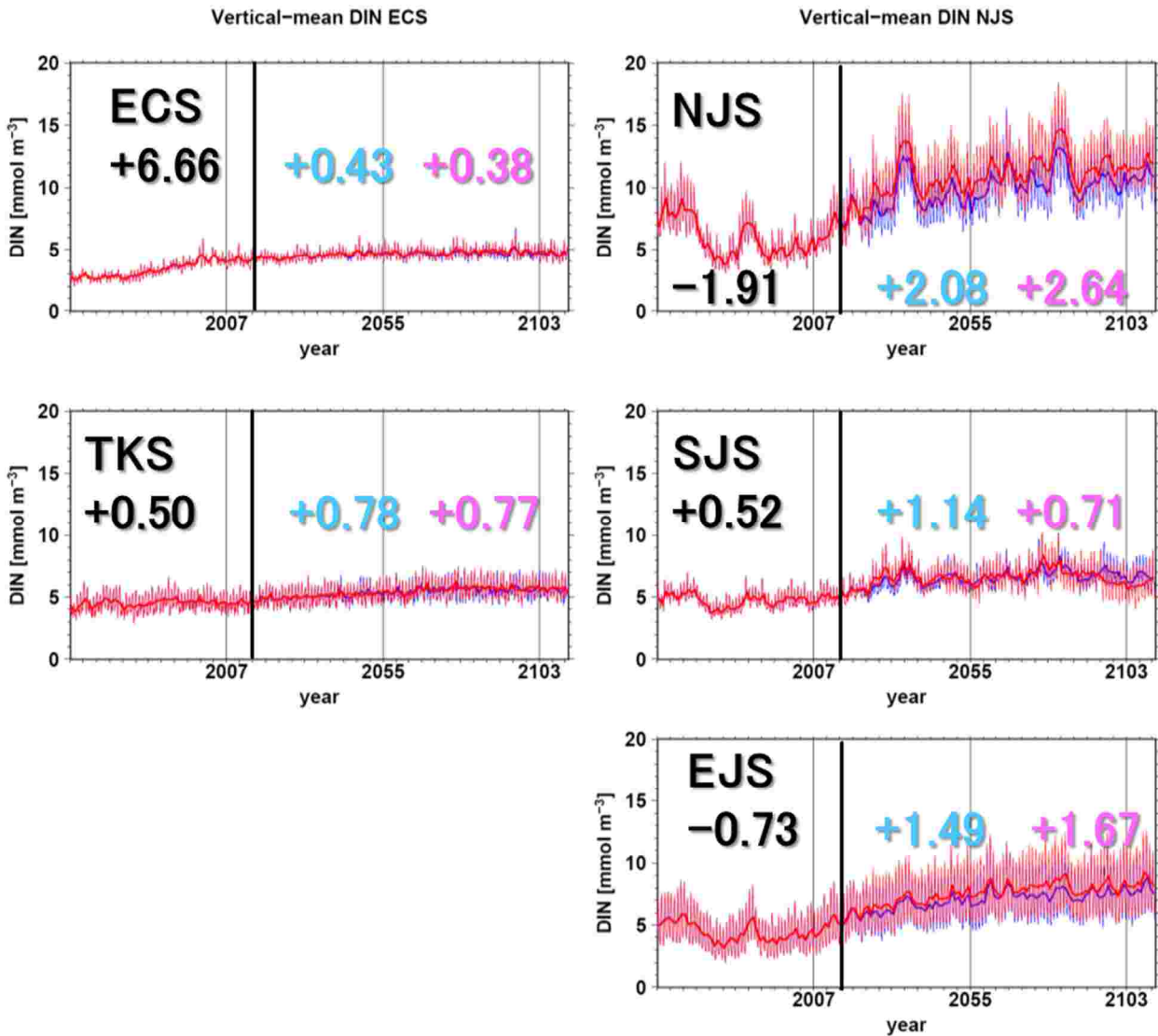


図 Q-2)-20 各海域の0~110m 深のDIN濃度時間変化。線種や数字は図16と同じ。

各年代3月の50 m 深におけるDIN濃度分布を図 Q-2)-21に示す。3 月における表層DIN濃度は、図 Q-2)-20のDIN濃度時系列でも示したように、現在が最も値が小さく、特に日本海北部で $10 \text{ mmol m}^{-3}$ を超える高いDIN濃度となる海域がロシア沿海州沖の小さな領域に限られている。50 年前は現在より寒冷で冬季の鉛直対流が活発であったため、高いDIN濃度を持つ深層水が表層まで対流し、結果として表層で高いDIN濃度を維持していた。現在は高温化で表層に軽い密度の海水が被ってしまい、冬季の冷却によっても深層と同じ密度にならずに表層に留まる結果、鉛直対流が弱体化し、深層の高いDIN濃度の深層水が海面付近まで表出できない状態になっている。一方、50年後と100年後の日本海北部DIN濃度は現在より高い濃度を示した領域が多い(年代毎のDIN濃度差を図 Q-2)-22に示した)。この傾向はRCP26とRCP85の両方のシナリオで同じである。表層の海水が現在よりも高温になるにも関わらずDIN濃度が高くなる原因を探る必要がある。

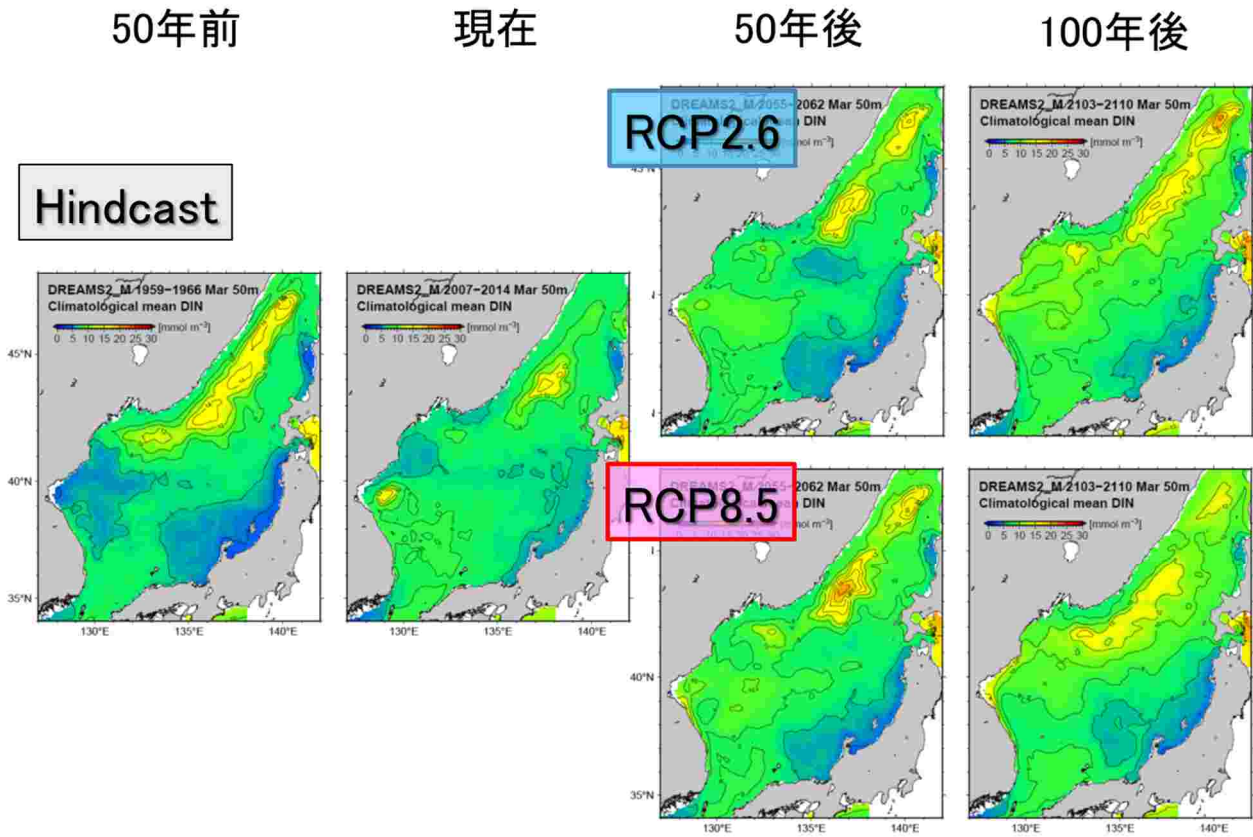


図 Q-2)-21 図 Q-2)-17と同じ。ただし、50 m 深DIN濃度。単位は $\text{mmol m}^{-3}$ 。

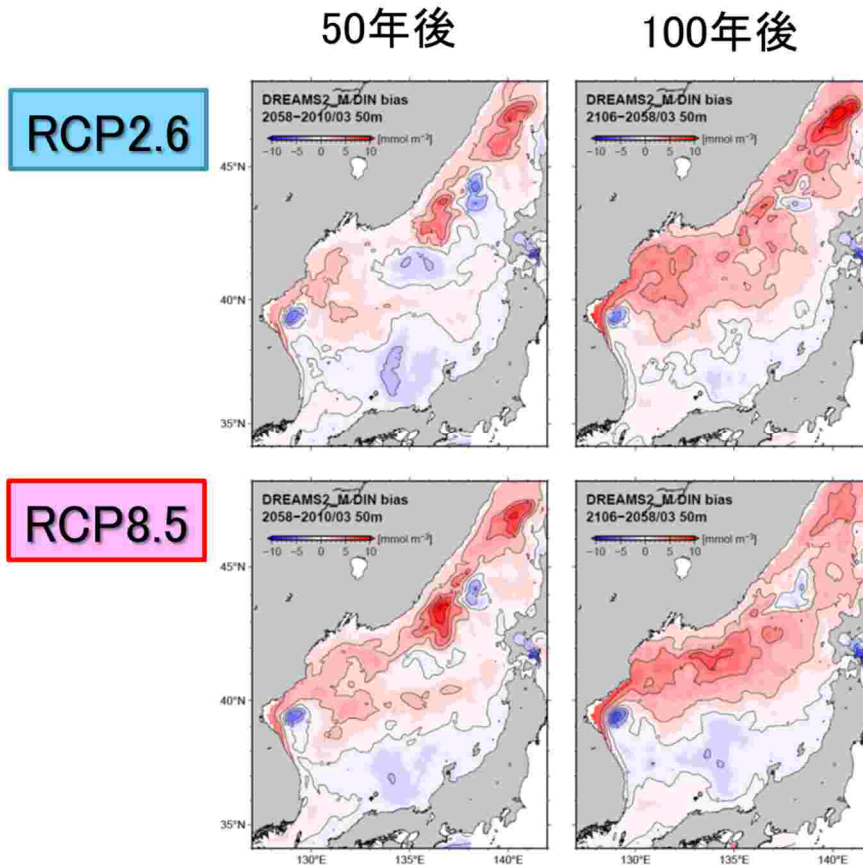
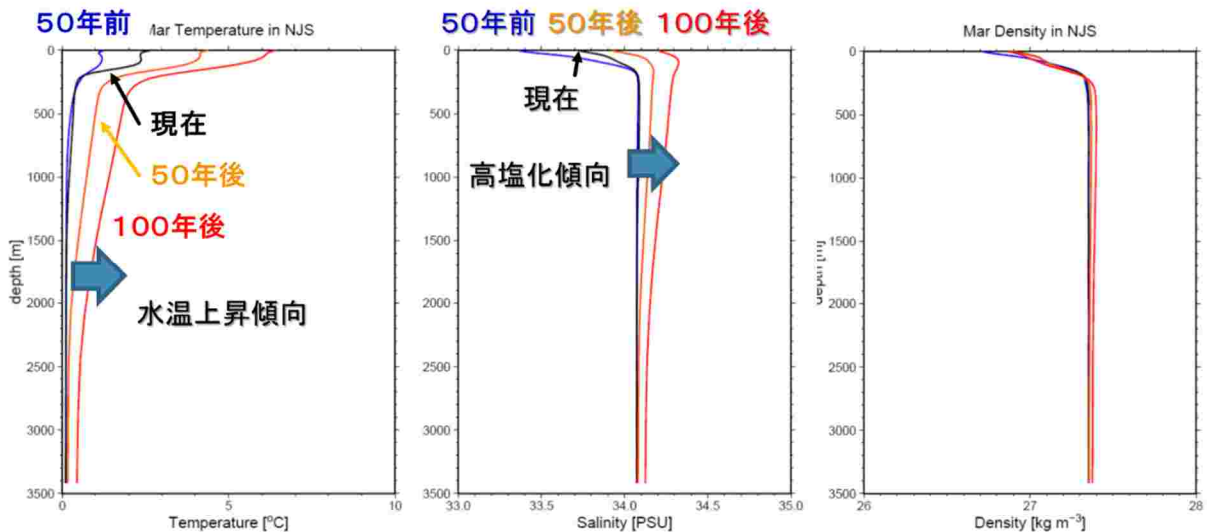


図 Q-2)-22 図 Q-2)-18と同じ。ただし、3月の50m 深DIN濃度差。

各年代の3月における日本海北部の水温と塩分のプロファイルを図(2-2)-23に示す(ここでの50年後と100年後の結果はRCP8.5の実験結果のみ)。水温のプロファイル(図(2-2)-23左)から、現在から50年後、100年後にかけて表層だけでなく深層でも水温が上昇している様子がわかる。一方で塩分プロファイル(図(2-2)-23中央)についても、現在から50年後、100年後にかけて深層で濃度が上昇している。つまり、日本海の深層では将来、高温・高塩化が進む予測結果となっている(Takayama and Hirose, 2019, Kim et al., 2019)。水温と塩分から海水の密度を計算すると(図(2-2)-23右)、100年後の海水密度は現在の密度と比べて同じか、高密度となっている。この結果は、日本海深層における海水の特性(水温・塩分)は将来高温・高塩傾向に変化するものの、密度的には現在の海水密度と変わらないために、深層の同密度の海水と海水交換が可能であることを意味している。一般的に、海洋表層の水温が上昇すると密度成層が強化されて、海洋表層と深層の鉛直混合が弱くなり、深層から表層への栄養塩供給が少なくなることで生態系環境は悪化すると考えられていた。しかしながら、本予測結果は水温が上昇するにも関わらず、DIN濃度も上昇するという意外な結果となった。



図(2-2)-23 日本海北部の(左)水温[°C]、(中央)塩分[PSU]、(右)密度の鉛直プロファイル。青線が50年前、黒線が現在、橙線が50年後、赤線が100年後。

100年後に高温傾向となる日本海で鉛直混合が起こっている更なる根拠として、各年代の日本海北部の溶存酸素(DO)濃度の鉛直プロファイルを図(2-2)-24に示す。50年前から現在にかけて、日本海北部の1000 m以下の深層のDO濃度は1 mg l<sup>-1</sup>以上の濃度低下を示している、表層付近のDO濃度が高い海水が深層に供給されていない。そして現在から50年後、100年後にかけては、深層のDO濃度こそ低下するものの、その低下幅は0.5 mg l<sup>-1</sup>以下であり、DO濃度の低下が抑制されている。表層から深層へのデトリタスの供給量が現在も将来もあまり変化がないことから、DO濃度の高い表層の海水が深層に沈みこまなければ、深層のDO濃度の低下幅が抑制されることはない。

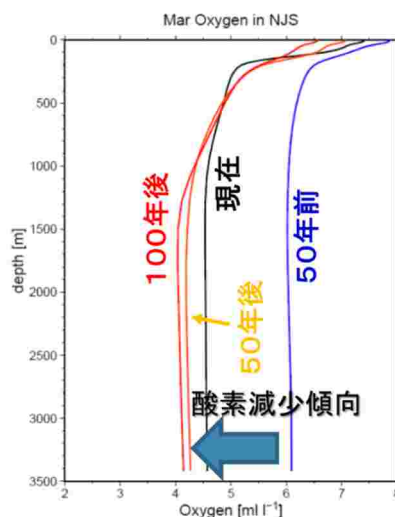


図 (2-2)-24 図 (2-2)-23と同じ。ただし、溶存酸素濃度 [ $\text{ml l}^{-1}$ ]の鉛直プロファイル。

上述した結果は、これまで日本海固有水のDO濃度変化の予測としては考えられてこなかった新しい知見である。Gam o (1999)やKang et al., (2004)は、これまでの日本海深層のDO濃度の減少率から100年後の日本海深層は無酸素になるのではないかと指摘している。この根拠は、日本海の水温が上昇し成層が強化されて、日本海固有水と同密度の海水が海面付近で形成され難くなり、新しい深層水の形成が止まるか弱化するという考察に基づいている。しかしながら本研究の結果は、日本海の高温暖化と同時に高塩化も起こるため、日本海固有水と同密度の海水が海面付近で形成され、新しい深層水が日本海の表層から深層に供給される。新しい深層水は高いDO濃度を持っているため、日本海深層は無酸素にはならない。最近の日本海のDO濃度観測結果から、近年のDO濃度の減少率がGam o (1999)の報告時よりも弱くなり、新しい深層水が形成されつつあるという報告もある (Yoon et al., 2018)。

日本海で高温暖化と同時に起こる高塩化の起源は、対馬暖流であると考えられる。対馬海峡から流入した対馬暖流は朝鮮半島東岸に沿いながら北上し、現在の水温フロントが形成されている北緯39～40度で東向きに離岸している(東韓暖流)。このフロント構造が日本海北部の深層水形成域(ウラジオストック南部や沿海州沖といわれている)に高温・高塩分の対馬暖流系の海水が直接流れ込むことを防いでいる。しかし50年後や100年後は対馬暖流の流量が増加する影響もあり(図(2-2)-19参照)、東韓暖流の離岸位置は北朝鮮沖の北緯40～42度まで北上するため(図(2-2)-17参照)、対馬暖流系の高温・高塩分水が深層水形成域に直接流れ込むと考えられる。

RCP2.6とRCP8.5シナリオでの各年代の3月のクロロフィル濃度を図(2-2)-25に示す。濃度が $1 \text{ mg m}^{-3}$ 以上の高濃度域は、どの年代にも日本海北部に出現している。温暖化していても、高いDN濃度が日本海の深層から表層へ供給されるために(図(2-2)-21参照)、生物の基礎生産には大きな影響を及ぼさないようである。将来の日本海南部のクロロフィル濃度については、RCP2.6とRCP8.5の両法で、現在より少し低いと同程度になり基礎生産に大きく影響はしないと考えられる。

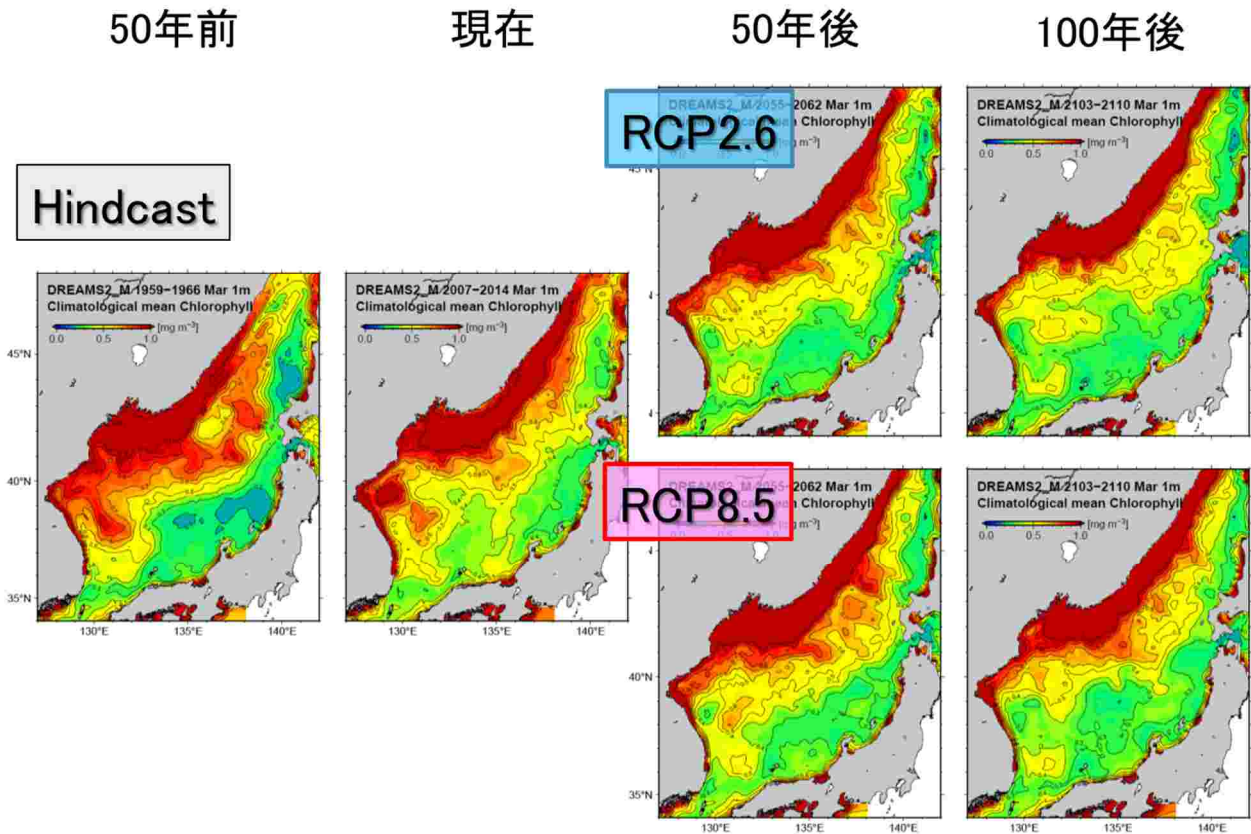


図 Q-2)-25 各年代の3月の表層クロロフィル濃度。単位は $\text{mg m}^{-3}$ 。図の配置は図 Q-2)-17と同じ。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

・溶存酸素データによって低次生態系の経験的パラメーターが修正できることを示した。

・日本海の表層から深層までの物理・化学・生物の環境変化を的確にモデルで再現することができた。

・気候変動シナリオRCP8.5と2.6に基づくと、日本海の海面水温は気温と同程度のペースで上昇するが、大和堆や北朝鮮付近では対馬暖流の北上により100年間で8℃以上の上昇もありうるということが分かった。

・塩分も同様に上昇するため、日本海深層水の形成は継続し、溶存酸素の低下は抑制されるという(従来説を覆す)予測結果も得られた。

### (2) 環境政策への貢献

#### < 行政が既に活用した成果 >

特に記載すべき事項はない

#### < 行政が活用することが見込まれる成果 >

・日本海の地球温暖化の影響に関して、そのメカニズムや深層水への影響など新たな知見が得られており、我が国の海洋政策上重要な海域である日本海の管理を考える上で非常に貴重な情報である。新たな海洋基本計画が閣議合意された中、我が国の海洋政策の実施に活用されることが期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### < 論文 (査読あり) >

- 1) Haejin Kim, Katsumi Takayama, Naoki Hirose, Goh Onitsuka, Takafumi Yoshida, Tetsuo Yanagi, Biological Modulation in the seasonal variation of dissolved oxygen concentration in the upper Japan Sea, Journal of Oceanography, 10.1007/s10872-018-0497-6, 2018
- 2) 吉田 尚郁・張 勁・森本 昭彦・柴野 良太・広瀬 直毅・高山 勝巳・郭 新宇・王 玉成・眞野 能・吉江 直樹, 日本海三階層管理の提案, 沿岸海洋研究, 56, 1, 31-38, 2018

#### < その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) 高山 勝巳, 広瀬 直毅, 鬼塚 剛, 東アジア縁辺海物理・生態系結合モデルの開発, 水産海洋研究, 79, 3, 157-159, 2015.08.
- 2) 高山 勝巳, 広瀬 直毅, 鬼塚 剛, 東アジア縁辺海の河川栄養塩供給変化に対する低次生態系の応答, 海洋と生物, 37, 5, 463-468, 2015.10.

### (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) Takayama, K., N. Hirose and G. Onitsuka: 18th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, Okinawa, 2015.4  
「Opposite response of phytoplankton to the variation of river nutrient discharge in the East Asian marginal seas」
- 2) 高山勝巳、広瀬直毅、鬼塚剛 :2015年度日本海洋学会秋季大会、松山、2015.9 「モデル高解像度化にともなう低次生態系の応答変化」
- 3) 広瀬直毅、高山勝巳 :S-13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 平成27年度公開成果発表会、東京、2015.11 「日本海高次生態系モデル」
- 4) 高山勝巳、広瀬直毅、鬼塚剛 :日本海洋学会2016年度春季大会、東京、2016.3 「グリーン関数法による日本海生態系モデルのパラメータ推定」(ポスター)
- 5) 高山勝巳、広瀬直毅、鬼塚剛 :2015年度九州沖縄地区合同シンポジウム「海洋表層の物理過程と海洋生態系・水産資源」、長崎、2015.12 「モデル解像度の違いで生じる日本海の生態系応答の変化」
- 6) Kim, H., N. Hirose and K. Takayama: the Korean Society of Oceanography 2016 meeting, Pusan, 2016.05.  
「Simulation of DO using a physics-ecosystem coupled model of the Japan Sea」
- 7) Kim, H., K. Takayama, and N. Hirose: 宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム, 札幌, 2016.6.  
「Simulation of DO in the upper layer of the Japan Sea using a physics-ecosystem coupled model」
- 8) 高山勝巳、金海珍、広瀬直毅、鬼塚剛 :日本海洋学会2016年度秋季大会、鹿児島、2016.9. 「物理-生態系結合モデルによる日本海の溶存酸素濃度の再現性」
- 9) 高山勝巳、広瀬直毅、吉田尚郁 :日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会、福岡、2016.12. 「100年後の日本海水温・生態系予測」
- 10) Haejin Kim, Katsumi Takayama, Naoki Hirose, Takafumi Yoshida, The biological contributions to DO variation in the upper East/Japan Sea, PAMS 2017 19th Pacific Asian Marginal Seas Meeting, 2017.04
- 11) Katsumi Takayama, Naoki Hirose, Takafumi Yoshida, Long term prediction of the physical and ecological conditions of the Japan Sea, PAMS 2017 19th Pacific Asian Marginal Seas Meeting, 2017.04
- 12) 吉田尚郁, 広瀬直毅, 高山勝巳, 日本海における黒潮系水および台湾暖流系水の挙動, 日本海洋学会2017年度秋季大会, 2017.10
- 13) 高山勝巳, 広瀬直毅, 吉田尚郁, 日本海の水温と栄養塩濃度の長期予測, 日本海洋学会2017年度秋季大会, 2017.10
- 14) 高山勝巳, 広瀬直毅, 対馬海峡の栄養塩はどこから来ているのか?, 2017年度水産海洋学会研究発表大会, 2017.11.



- 15) 広瀬直毅, 日本海高次生態系モデルの構築, 環境省「環境研究総合推進費」S-13 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 平成29年度公開成果発表会, 2017.11
- 16) 高山勝巳, 広瀬直毅, 対馬海峡に達する栄養塩の起源, 日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会, 2017.12.
- 17) Haejin Kim, Katsumi Takayama, Naoki Hirose, Goh Onitsuka, Takafumi Yoshida, Tetsuo Yanagi, The impact of biological activities on the dissolved oxygen (DO) concentration in the Japan Sea, American Geophysical Union 2018 Ocean Sciences Meeting, 2018.02
- 18) 高山勝巳・広瀬直毅, 溶存酸素データを制約条件とした物理・生態系結合モデルの最適パラメータ推定, 研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 2018.07.
- 19) Haejin Kim, Katsumi Takayama, and Naoki Hirose, Long-term variability of DO concentration with the 3D biogeochemical model for the East/Japan Sea., The 15th Korea-Japan (Japan-Korea) Joint Seminar in the Ocean and the Atmosphere, 2018.09
- 20) Takayama, Katsumi and Naoki Hirose, Effect of Altimeter Data Assimilation on the Ecosystem Distributions in the Japan Sea, "25 Years of Progress in Radar Altimetry" Symposium Ponta Delgada, 2018.09
- 21) Haejin Kim・高山勝巳・広瀬直毅・吉田尚郁, Simulation of DO concentration using a coupled physical-biogeochemical model in the Japan Sea, 2018年度九州沖縄地区合同シンポジウム「日本海研究の現状と今後について」, 2018.12.
- 22) Takayama, Katsumi and Naoki Hirose, Effect of Altimeter Data Assimilation on the Ecosystem Distributions of the DREAMS2, 4th International Joint Workshop on Computationally-Intensive Modeling of the Climate System and 9th OFES International Workshop, 2019.02
- 23) Kim, Haejin, Katsumi Takayama and Naoki Hirose, Long-term simulation of physical and biogeochemical components using DREAMS2, 4th International Joint Workshop on Computationally-Intensive Modeling of the Climate System and 9th OFES International Workshop, 2019.02
- 24) 広瀬直毅, DREAMS2で予測する100年後の日本海環境, 海洋大気プロジェクト(附置研プロジェクト)研究成果報告会, 2019.02
- 25) Takayama, Katsumi and Naoki Hirose, Water in the deep layer of the Japan Sea will not anoxic in the next century, 20th Pacific-Asian Marginal Seas meeting (PAMS 2019), 2019.03
- 26) Kim, Haejin, Katsumi Takayama, and Naoki Hirose, Biological contributions to the long-term decreasing trend of DO concentration in the deep layer of the Japan Sea, 20th Pacific-Asian Marginal Seas meeting (PAMS 2019), 2019.03

### (3)出願特許

特に記載すべき事項はない

### (4) 国民との科学・技術対話の実施

広瀬直毅、高山勝巳 :シンポジウム「日本海の沿岸海域管理」, 富山, 2015.1. 流動予測「変わりゆく日本海の将来」

広瀬直毅、高山勝巳 :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, 富山, 2016.5. 「日本海低次生態系の将来変動予測へ向けて」

広瀬直毅 :日本海の将来環境変動予測モデルの構築, S-13テーマ3成果報告シンポジウム, 富山, 2018.01

広瀬直毅 :日本海の将来変動予測, S-13テーマ3成果報告シンポジウム「地球温暖化や東シナ海が日本海的环境や生物に及ぼす影響～日本海沿岸海域の管理に向けて～」, 富山, 2019.02

### (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

## 8.引用文献

- 1) Boyer, T.P., J.I. Antonov, O.K. Baranova, C. Coleman, H.E. Garcia, A. Grodsky, D.R. Johnson, R.A. Locamini, A.V. Mishonov, T.D. O'Brien, C.R. Paver, J.R. Reagan, D. Seidov, I.V. Smolyar, M.M. Zweng (2013): World Ocean Database 2013. Sydney Levitus, Ed.; Alexey Mishonov, Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 72, 20 pp.
- 2) Gamo, T. (2001): Global warming may have slowed down the deep conveyor belt of a marginal sea of the northwestern Pacific: Japan Sea, *Geophysical Research Letters*, 26(20), 3137-3140
- 3) Hirose, N. (2011): Inverse estimation of empirical parameters used in a regional ocean circulation model, *Journal of Oceanography*, 67, 323-336.
- 4) Hirose, N., K. Takayama, J.-H. Moon, T. Watanabe, and Y. Nishida (2013): Regional data assimilation system extended to East Asian marginal seas. *Um iSora*, 89, 43-51.
- 5) Kang D.-J., K. Kim and K.-R. Kim (2004): The past, present and future of the East/Japan sea in change: a simple moving-boundary box model approach, *Progress in Oceanography*, 61, 175-191.
- 6) Ning, X., C. Lin, J. Su, C. Liu, Q. Hao and F. Le (2011): Long-term changes of dissolved oxygen, hypoxia, and responses of the ecosystems in the East China Sea from 1975 to 1995. *Jo*, 67, 59-75
- 7) Onitsuka, G. and T. Yanagi (2005): Differences in ecosystem dynamics between the northern and southern parts of the Japan Sea: Analyses with two ecosystem models. *Journal of Oceanography*, 61, 415-433
- 8) Onitsuka, G., T. Yanagi and J.-H. Yoon (2007): A numerical study on nutrient sources in the surface layer of the Japan Sea using a coupled physical-ecosystem model, *Journal of Geophysical Research*, 112, C05042, doi:10.1029/2006JC003981.
- 9) Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91 (3), 99-164.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
- 10) Toyoda, T. (2013): Improved state estimations of lower trophic ecosystems in the global ocean based on a Green's function approach, *Progress in Oceanography*, 119, 90-107.
- 11) Wang, B. (2006): Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: History and perspective, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 69, 471-477.
- 12) Yanagi, T., G. Onitsuka, N. Hirose and J.-H. Yoon (2001): A Numerical Simulation on the Mesoscale Dynamics of the Spring Bloom in the Sea of Japan, *Journal of Oceanography*, 57, 617-630.
- 13) Yoon, S.-T., K.-I. Chang, S. Nam, T. Rho, D.-J. Kang, T. Lee, K.-A. Park, V. Lobanov, D. Kaplunenko, P. Tishchenko and K.-R. Kim (2018): Re-initiation of bottom water formation in the East Sea (Japan Sea) in a warming world, *Scientific Reports*, DOI:10.1038/s41598-018-19952-4.

### - 3 日本海高次生態系モデルの構築

愛媛大学

郭 新宇

吉江直樹

王 玉成 (平成26～29年度)

眞野 能 (平成28～30年度)

季 悱 (平成30年度)

平成26～30年度累計予算額 :30,596千円

(うち平成26年度 :6,391千円、平成27年度 :6,071千円、平成28年度 :5,834千円、平成29年度 :6,224千円、平成30年度 :6,076千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

#### 【要旨】

地球温暖化の日本海の高次生態系に与える影響を予測するために、スルメイカとズワイガニを選んでそれぞれの生活史において水温変動に敏感な幼生を対象とした輸送・生残モデルを構築した。輸送・生残モデルに水温に依存する幼生のふ化・生残過程および海流に依存する輸送・拡散過程を考慮している。同モデルを利用してまずスルメイカとズワイガニ資源の経年変動を再現した。さらに再現した結果を用いてそれぞれの資源を効率よく保護する方法を考察した。その中で、海流の変化に合わせて保護する海域と時期を年毎に変更する方法(動的保護区)と保護する海域と時期を変えない方法(静的保護区)との比較を行い、ズワイガニ幼生において動的保護区が静的保護区より優位であることとスルメイカ幼生において二つの保護区の効率がほぼ同程度であることが分かった。また、地球温暖化に伴う日本海の高次生態系と海水温の予測結果を上記の輸送・生残モデルに導入し、スルメイカ幼生とズワイガニ幼生の温暖化に対する応答を考察した。スルメイカにおいて、地球温暖化による海水温の上昇はふ化幼生の量に一定の悪影響を与えることが見られるが、輸送・生残過程を経て日本海で生き残った幼生の量にむしろ良い影響を与えることが分かった。その原因は地球温暖化に伴い、対馬暖流が支配する海域の面積が増え、低温より死亡する幼生の数が減少したと考えられる。ズワイガニにおいてふ化幼生と資源量の地球温暖化に伴う変化についてスルメイカと似たような傾向も見られた。

日本海の高次生態系モデル以外に、富山湾陸海統合管理を検討するための富山湾低次生態系モデルを開発した。

#### 【キーワード】

スルメイカ幼生、ズワイガニ幼生、地球温暖化、海洋保護区、生残モデル

#### 1.はじめに

国際的な閉鎖性海域である日本海は現在、大きな変化にさらされている。一つは近隣諸国の急速な経済発展に伴う東シナ海環境変化である。東シナ海は日本海の上流域に位置し、対馬海峡を通じて熱、海水、魚の卵や幼生を含む様々な物質を日本海へと輸送される。東シナ海環境が日本海環境に多大な影響を及ぼすことは広く理解されているが、実際にその影響を定量的に評価した研究は十分に行われていない。もう一つの変化は地球温暖化の影響である。日本海は地球温暖化に伴う海水温上昇が世界的にも早い海域であり、世界の平均海水温上昇の2～3倍であることが知られている。今後、地球温暖化に伴い日本海環境がどのように変化するか、さらに日本海の高次生態系にどのような影響を及ぼすのかといったことは十分に解明されていない。

地球温暖化を含む環境変動が日本海の高次生態系に与える影響を予測するために、高次生態系モデルを構築する必要がある。また、高次生態系の適応策について海洋保護区(MPA)の視点から提案することが最適な方策と思われる。日本の海洋保護区(MPA)は自然公園や自然環境保全地域に加え、水産資源を対象とした

保護水面、沿岸域水産資源開発区域指定海域、共同漁業権区域も対象としている。しかしながら、その多くは沿岸域を対象としたものであり、外洋域の生物多様性の保全や水産資源の持続的利用の観点から設置されたMPAは少ない。愛知目標において海域の10%を海洋保護区として保護することが掲げられており、我が国の海洋保護区の設置が8.3%にとどまっている状況で、沖合域でその候補となりうる海域を提示することは我が国の新たな保護区の設置に資するものと考えられる。また、生物多様性条約においては生態学的・生物学的に重要な海域の抽出が通じて海洋生物多様性の保全を図っており、環境省が2016年に公表した「生物多様性の観点から重要度の高い海域」では生物の生活史に基づいて沖合域の重要海域も抽出されている。日本海の高次生態系に関して、東シナ海的环境変化や地球温暖化の影響を踏まえた保全策を提案することは、我が国の海洋生物多様性の保全に大きく貢献するものと考えられる。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、日本海の代表的な生物であるスルメイカとズワイガニに着目し、それぞれの生物種の幼生を対象とする生残・輸送生態モデルを構築し、過去20年余りの資源変動を再現した上でその変動を支配する要因を明らかにする。さらに幼生資源の変動要因を考慮した海洋保護区の設定方法を提案する。最後に同生残・輸送生態モデルを利用して、それぞれの生物種の幼生資源が地球温暖化にどう応答するかを明らかにする。

さらに、サブテーマ(1)と連携し、富山湾を対象海域とした日本海沿岸海域管理手法を検討するため、富山湾低次生態系モデルを新たに開発する。

## 3. 研究開発方法

### (1) スルメイカ幼生の輸送・生残モデル

3次元海洋循環モデル(九州大学応用力学研究所DREAMS\_M(Data assimilation Research of the East Asian Marine System Medium resolution model))の結果を用いて、スルメイカ(学名:*Todarodes pacificus*)幼生の索餌回遊をターゲットにする輸送・生残モデルを構築した。

スルメイカ幼生の水平運動は海流と一緒に動くことと仮定し、式(3)-1により、現在の位置( $x(t)$ ,  $(y(t))$ )と海流情報( $u(x,y,z,t)$ ,  $v(x,y,z,t)$ )から次の位置( $x(t+\Delta t)$ ,  $y(t+\Delta t)$ )を求めた。ここでは、 $\Delta t$ は時間ステップ、 $u$ ,  $v$ は東西方向と南北方向の流速、 $A_H$ は水平粘性係数、 $\xi$ は-1~1の範囲の値で標準偏差が0.28となる乱数である。これらの変数はDREAMS\_Mの1992年から2013年までの一日間隔の計算結果から得られる。

$$x(t+\Delta t) = x(t) + u\Delta t + \xi\sqrt{2A_H\Delta t} \quad (3)-1$$

$$y(t+\Delta t) = y(t) + v\Delta t + \xi\sqrt{2A_H\Delta t} \quad (3)-2$$

スルメイカ幼生の $z(t)$ から $z(t+\Delta t)$ への鉛直運動は鉛直速度 $V_T$ で計算する。

$$z(t+\Delta t) = z(t) + V_T\Delta t \quad (3)-3$$

$$V_T(x, y, z, t) = w(x, y, z, t) + V_R + V_S \quad (3)-4$$

$w$ は海水の鉛直運動速度、 $V_R$ はランダムウォークによる鉛直速度、 $V_S$ は個体の成長ステージに伴う鉛直移動(VM, Ontogenic Vertical Movement)の速度(life stage-specific directed swimming speed)である。 $w$ と $V_R$ はDREAMS\_Mの結果を利用して算出できるが、 $V_S$ は事前に与えなければならない。

$V_S$ の値は0.36 cm/sで、方向は幼生のライフステージに応じて存在すべき水深層に向かせる(Kim et al., 2015)。ただし、粒子がすでに幼生のライフステージに応じた水深層に存在している場合は $V_S$ をゼロとした。

計算の初期条件であるスルメイカ幼生の初期分布は、3つの条件で決定した。

## (a) 分布海域

桜井 (2014) によると、スルメイカの産卵は東シナ海から日本海にかけて水深100～500mの陸棚域および陸棚斜面域で行われる。そこで、モデル中では、スルメイカ幼生の初期分布を決定する条件の一つとして水深100～500mを設定した。

## (b) 海面水温

スルメイカの卵から孵化した幼生が海面まで上昇し海面水温が19.5～23の海域に存在する(桜井, 2014)。そこで、モデル中では、(a)の分布海域のうち、海面水温が19.5～23にあるグリッドを探し出し、そのグリッド中で均一に9個の粒子を設置した。

## (c) 親魚条件

親魚の多い年にはその卵も多いと仮定し、以上の(a)と(b)に加え、グリッドに配置する粒子の数を親魚の数に比例させた。この取り扱いには幼生の分布密度の変化に相当するものである。

本研究では、1992年10月から2013年3月まで式(3)-1～(3)-3で表す粒子追跡計算を行った。計算では、毎年10月1日から翌年の3月31日の間に、10日間隔で生まれた幼生を上記(a)、(b)、(c)の条件により表層(水深4m)に配置した。10月から12月までの9ケースはスルメイカの秋発生系群に相当し、1月から3月までの9ケースは冬発生系群に相当した。各日に生まれた卵の粒子追跡計算は、それぞれ180日間実施した。また、幼生の生残に関わる水温条件としては、下限水温を15～10(生後1か月間に日齢に応じて線形変化させ、1か月後には10で固定した)、上限水温を23と設定した。

追跡計算を行った180日間を、スルメイカ幼生の3つのライフステージに分ける(Yamamoto et al., 2002; Yamamoto et al., 2007; Kim et al., 2015)。ステージ1は最初の60日間であり、ふ化後の日数に応じて存在すべき水深を設定した(0-20日: 4-25m深、21-40日: 25-50m深、41-60日: 25-75m深)。ステージ2と3の存在すべき水深は50-100mとした。ステージ2は、ふ化後60日以後、幼生の体長(Mantle length, ML)が12mm未満の時である。ステージ3は、ふ化後60日以後、幼生の体長(Mantle length, ML)が12mm以上の時である。図(3)-1はある粒子の鉛直移動を示している。計算開始後の時間に応じて、徐々に深くなることわかる。

スルメイカ幼生のMLは個体の成長モデルから得る個体の湿重量から換算する(Araya, 1967)。

$$ML = e^{(\ln(W)+9.27)/2.72} \quad (3)-5$$

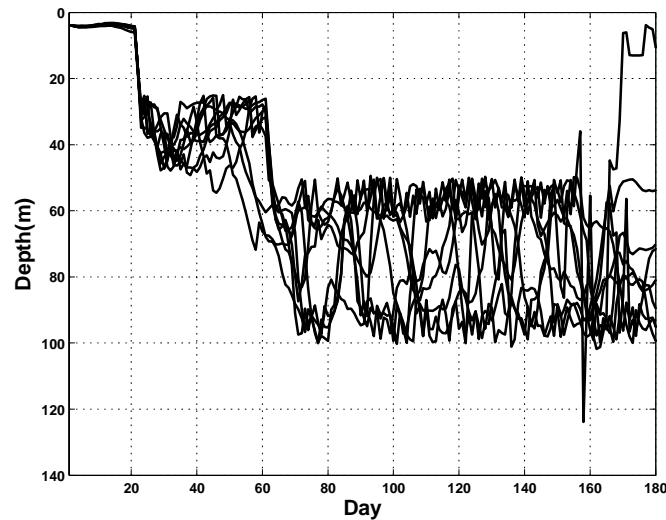
MLはMantle length (mm)で、Wは個体の湿重量(g)である。

スルメイカの個体成長モデル(Kishiet al., 2009)は個体の湿重量(W)を予報量とし、以下の式より求める。

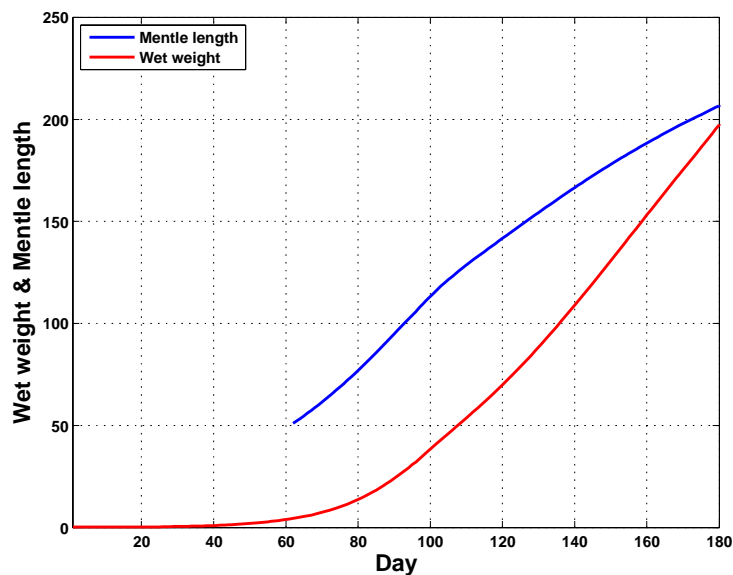
$$\frac{dW}{Wdt} = [C - (R + SDA + F + E)] \frac{CAL_z}{CAL_f} \quad (3)-6$$

Cは捕食(consumption)による成長、Rは呼吸による消耗(respiration or losses through metabolism)、SDA(specific dynamic action or losses due to energy costs of digesting food)は捕食及び運動による消耗、F(egestion or losses due to feces)は排出による損失、E(excretion or losses of nitrogenous excretory wastes)は排泄による損失、CAL<sub>z</sub>は餌の動物プランクトンのカロリー換算量(617.00 cal (g zooplankton)<sup>-1</sup>)、CAL<sub>f</sub>はスルメイカのカロリー換算量(1526.14 cal (g squid)<sup>-1</sup>)である。

式(3)-6に必要な餌情報はサブテーマ(2)-2で得られた動物プランクトン濃度の平均値(1981 - 1994年)を利用した。



図(3)-1 式(3)-3で計算したスルメイカ幼生の鉛直移動の一例。横軸は計算開始からの日数で、縦軸は水深である。



図(3)-2 1992年11月20日にリリースした粒子(14453個)の平均M L (mm)と平均湿重量(g)の推移。横軸は計算開始後の日数、縦軸は平均湿重量(g, 赤線)と平均M L (mm, 青線)である。

#### ②)ズワイガニ幼生の輸送・生残モデル

ズワイガニ幼生の計算方法はスルメイカ幼生とほぼ同じである。ズワイガニ幼生輸送モデルに必要な流動場と水温場は、スルメイカ幼生輸送モデルと同じく、DREAMS\_Mの日別の流速と水温結果を使用した。

ズワイガニ幼生の初期分布として、北緯36.5°から38.5°、東経130.5°から137.5°の範囲内で水深200-500m、表層(水深4m)水温5-14という条件を満足する表層グリッドに、ふ化幼生を代表する粒子を配置した。粒子の初期分布に親ガニ現存量を考慮するために、日本海西部海域を浜田沖、隠岐周辺、隠岐北方、但馬沖、若狭沖、加賀沖、能登沖の7海域に分け、産卵を行う個体は最終脱皮を終えた11齢の雌である(上田ら2015)ことから、それぞれの海域の11齢雌の現存量に比例するように粒子の配置密度を調整した。

粒子の水平方向の移動については海流の水平成分とランダムウォークを、鉛直方向の移動については海流の鉛直成分、粒子の沈降速度、日周鉛直移動を考慮して追跡計算を行った。沈降速度はKon et al.(2003)の若狭湾沖でのゾエア・メガロパ幼生の採取データを参考に、2 m/dayと設定した。日周鉛直移動は第2ゾエア期にあ

たる粒子 (初期配置後30-60日)のみを対象とし、午後11時から翌朝の9時まで5 m/h、午前9時から午後1時まで12.5 m/h、午後1時から午後11時まで-10.0 m/hという鉛直速度を与えた (いずれも鉛直下向きを正とした値)。生残条件は粒子追跡開始から60日後までは水温5-14 °C以内、60日以降は5-11 °C以内とし、この水温範囲外に1日以上存在した場合は死亡するものとし、追跡計算を止めた。

現実の海では幼生が着底してから成長するため、資源量になり得る粒子は着底したものに限定した。着底条件は、幼生はメガロパから稚ガニへの脱皮以後底生生活をする (安達 1994)、ズワイガニの分布水深が200mから500mである (上田ら 2015)<sup>35)</sup>、という2つの知見に基づいて決定した。具体的な方法として、粒子放流してから90日以降に水深200mから500mの海域で海底に達するものがあれば、その場で粒子の動きを停止させた。最終的に、本研究の対象領域である北緯36.5°から北緯38.3°、東経130.5°から東経137.3°の海域内で着底に成功した粒子を集計し、この海域の新規加入資源量とする。

追跡計算期間は11齢雌の現存量データのある期間 (1999年～2015年)と流動場モデル結果のある期間 (1993年～2013年)を考慮して、1999年～2013年とした。粒子の放流日は、主な産卵期である2月1日 (小西ら 2011)を初日として、その後10日間隔で4月末まで粒子を放流し、1年間に合計で9回行った。

粒子の追跡期間は、幼生が孵化から着底生活を始めるまでに要する期間と一致させる必要がある。孵化から着底までの期間についてはいくつかの報告があり、約3ヶ月程度と考えられるが、確定までまだ至っていない (安達 1994)。本研究では、粒子の追跡期間は粒子放流後120日と設定し、3ヶ月過ぎると着底有無の判定を行った。

計算中に粒子が、水面、岸、および海底に達した場合には1日前と同じ位置に粒子を戻して再度計算を行う。ただし、粒子放流後90日以降は着底条件を導入しているため、位置に関係無く着底した時点で粒子の動きを停止する。

### (3)スルメイカ・ズワイガニに関する海洋保護区の考え方と設計方法

スルメイカに関する海洋保護区はまだ存在しないため、ズワイガニの海洋保護区を参考にしてスルメイカの海洋保護区を考えていく。日本海におけるズワイガニ資源は、漁獲規制や海洋保護区の設置によって保護されている。漁獲規制は未成熟個体の漁獲禁止や乱獲を防ぐためのものである。既存のズワイガニの海洋保護区は、コンクリートブロックを沈めて人工魚礁を設置し、物理的に漁獲を行うことが出来ない領域である。海洋保護区は成体の住処となるだけでなく、未熟な個体の成長場所や雌ガニの再生産を行う領域にもなる。海洋保護区で沈められたコンクリートブロックを回収することは不可能であるため、その領域でトロール漁業を行わないことを前提とし、海洋保護区の設置には漁業者の協力が不可欠である。

既存のズワイガニの海洋保護区では、保護区設置後も2007年以降ズワイガニの資源量が減少傾向となっており資源管理が効率的に働いていない可能性がある。現在の漁獲規制は海域によっては少し異なるが、基本的には毎年同じ期間に漁期が決められている。また、ズワイガニ保護区の位置を物理的に移動させることは不可能であり、常に同じ場所を保護する。ズワイガニ成体の分布は毎年変化するため、その変化に合わせて漁獲規制を行うのが理想的であるが、現状では年ごとのズワイガニ成体の分布を事前に把握することは困難である。

毎年成体の分布を把握することは困難であるが、どの領域から誕生する幼生が将来着底に成功するかを導くことは可能である。本研究で構築したズワイガニ幼生の輸送生残モデルは、幼生の誕生から着底までを計算するため、どのグリッドに配置した粒子が着底しやすいかを求めることが可能である。これを利用することで、将来再生産に繋がる重要な幼生の誕生場所を予測し、その領域を保護区に設定することにより、再生産を行うズワイガニを効率的に保護できると考えられる。

本研究ではこの考え方に基づいた新しい資源管理手法を提案する。モデル結果から、粒子は海流の影響を強く受けることが示唆されたため、将来着底する可能性の高いグリッドは配置日によって変化するはずである。つまり、保護期間や保護領域を、幼生が将来着底する可能性の高い親ガニに合わせて毎年変更しながら設置する。本研究では、この考え方を動的保護区と名付ける。反対に、毎年同じ海域で同じ期間、漁獲規制を行う手法を静的保護区と名付ける。

動的保護区を設置するにあたり、ズワイガニ幼生の輸送生残モデルの結果を利用して、着底した粒子の初期配置グリッドを探し出す。続いて、それぞれの配置グリッド毎に着底した粒子数を集計し、着底した粒子の数が

最も多くなるように保護領域と保護期間を決定する。これらの作業を年毎に行い、保護領域と保護期間を変更することにより最適な保護効果を得る。動的保護区の効果を検証するために、領域と時期を固定する静的保護区の保護効果も算出した。動的保護区と客観的に比較するために、静的保護区の面積と期間を動的保護区のものと同じにする。静的保護区は1999年から2013年の間に着底した粒子の平均が最も高くなるものとなり、毎年保護領域と保護期間は同じである。

保護区に関してその面積と保護期間が大事なパラメータである。本研究では、まず保護面積を $1^{\circ} \times 4/5^{\circ}$ 、保護期間を1ヶ月間とし、ズワイガニの静的保護区・動的保護区の検討を行う。また、スルメイカについてもズワイガニと同じ考え方で、動的保護区と静的保護区の検討を行う。スルメイカの保護面積を $150\text{km} \times 350\text{km}$ 、保護期間を1か月とする。さらに保護面積の変化に伴い、保護効果の変化も算出する。

#### (4)地球温暖化のスルメイカ幼生・ズワイガニ幼生への影響

九州大学応用力学研究所が温暖化シナリオ RCP2.6 と RCP8.5 に合わせて計算した 2050 年代 (2056 ~ 2062 年) と 2100 年代 (2104 ~ 2110 年) の流動場と水温場 (日平均の出力) をこれまで開発してきたスルメイカ幼生の生残モデルに導入し、「50 年後」と「100 年後」の産卵と卵稚仔の輸送・生残について計算を行った。また、比較するために、「現代」を想定した 2008 年から 2014 年までの計算と「過去」を想定した 1960 年から 1966 年までの計算も行った。これらの計算では親魚の数に経年変動がないことを前提としている。また、温暖化に伴う季節のシフトも考えられるため、粒子の初期配置と追跡計算を秋と冬に限定せず 1 年中に行うことにした。これらのケースで、流動モデルのスピンアップの影響を避けるために、元々 10 年間のある流動場と水温場について最初の 3 年間のものを使用しないことにした。したがって、すべてのケースの計算期間は 7 年間である。

スルメイカ幼生の計算と同じ考え方で、ズワイガニ幼生の計算も「過去」、「現代」、「50 年後」と「100 年後」を想定して行った。温暖化の条件では産卵場の変動も考えられるため、幼生の初期配置の範囲を日本海全域に拡大した。また、季節を限定せず、1 年中に初期配置と追跡計算を行った。

## 4. 結果及び考察

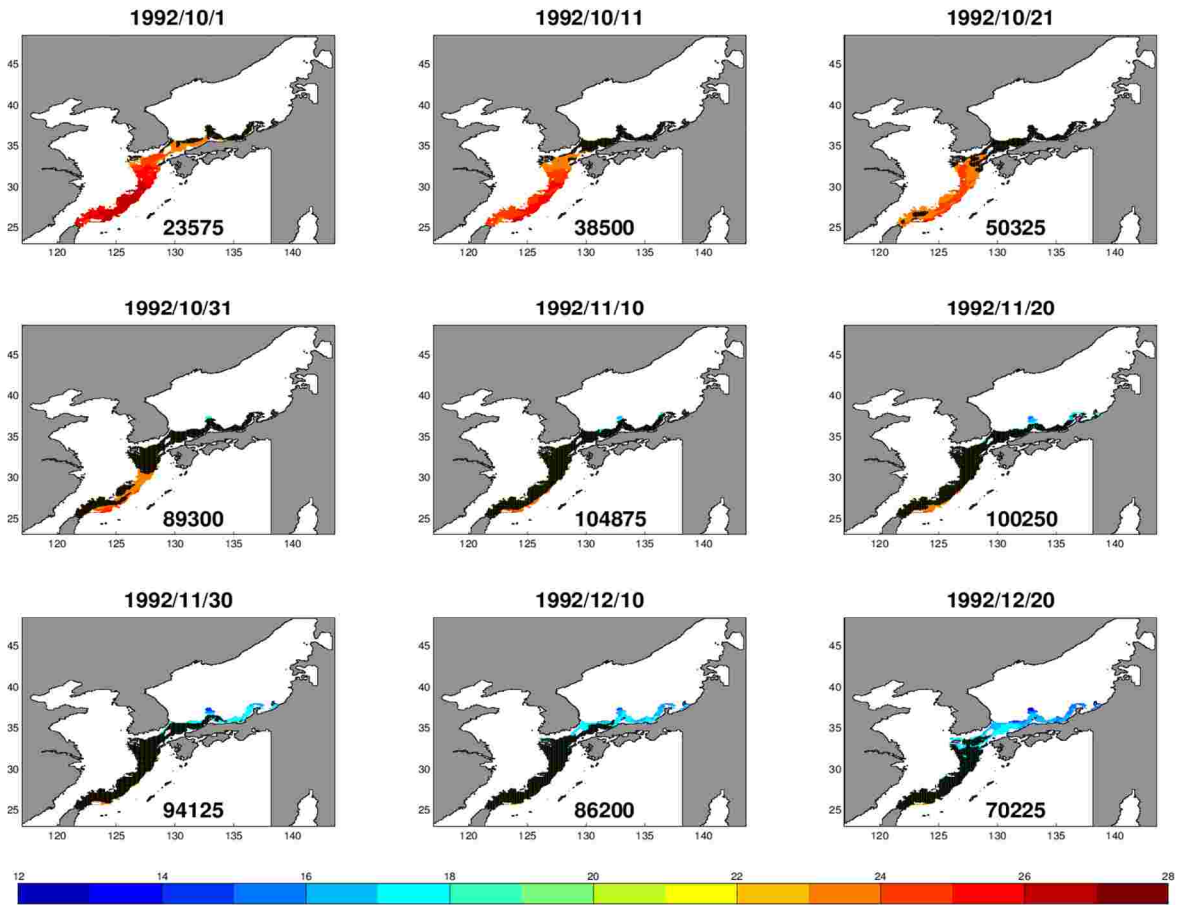
### (1)スルメイカ幼生の経年変動

#### 1)初期粒子数の経年変動

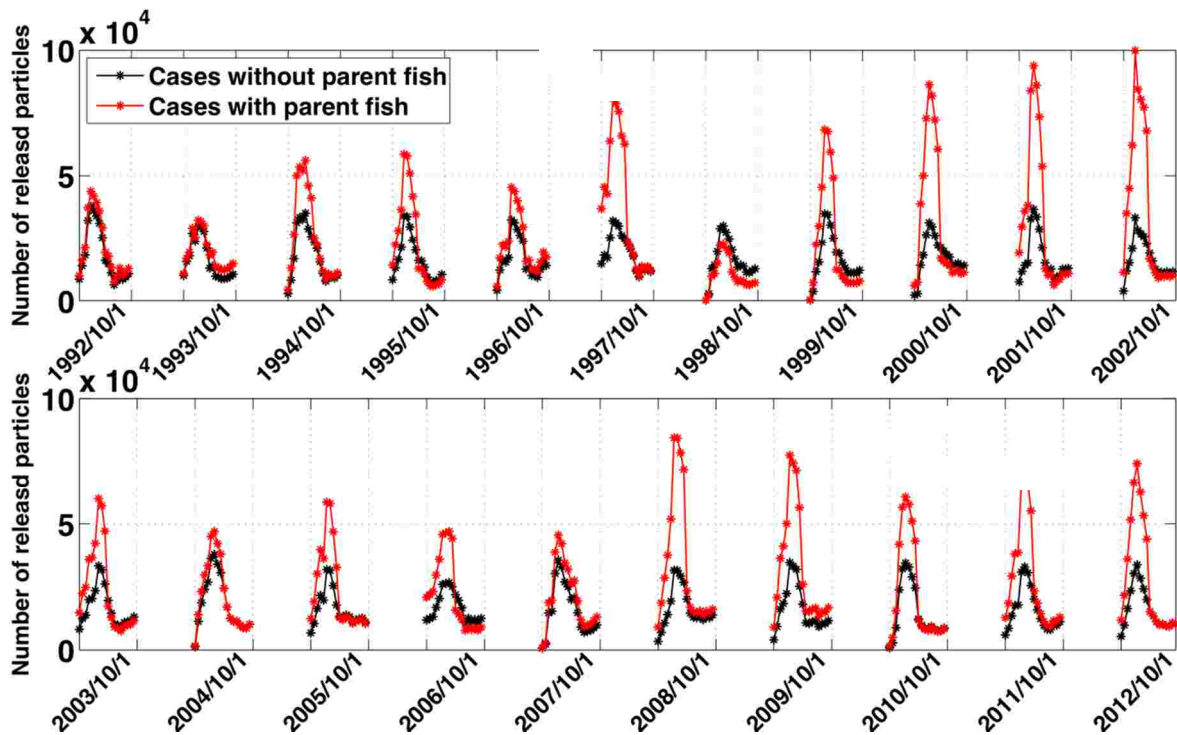
初期配置の粒子数の例として、1992年10月1日～12月20日の分布を図(3)-3に示す。1992年10月1日の産卵場に対応する初期粒子が日本海の沿岸域に分布しているが、季節の進行につれてその分布域が南下した。11月上旬と中旬に初期粒子が東シナ海の陸棚斜面から対馬海峡、さらに日本海の沿岸域までの広い範囲に分布し、その総数も最大になった。その後、日本海の沿岸域の海面水温が産卵可能の水温範囲に下回ったため、産卵息が東シナ海の陸棚斜面に集中し、総数も減った。

初期粒子分布は1992年から2012年までほぼ同じ季節変化を示すが、粒子の総数は季節変化以外に一定の経年変化も示している(図(3)-4、黒線)。この経年変化は海面水温のみ依存するため、変動幅は季節変化のそれより小さくなっている。一方、親魚の総数を重みにして調整した初期粒子の総数(図(3)-4、赤線)は同じ季節変化を有するが、経年変動の変動幅が季節変動のそれより大きくなっている。





図(3)-3 1992年10月1日～12月20日の初期粒子分布。黒点はスルメイカ幼生を表し、図中の数字は幼生を配置したグリッドの総数を示し、色は表層の海水温を示す。



図(3)-4 1992年～2012年の初期粒子の総数変化。黒線は親魚の情報を考慮しない場合の結果で、赤線は親魚の情報を考慮する場合の結果である。

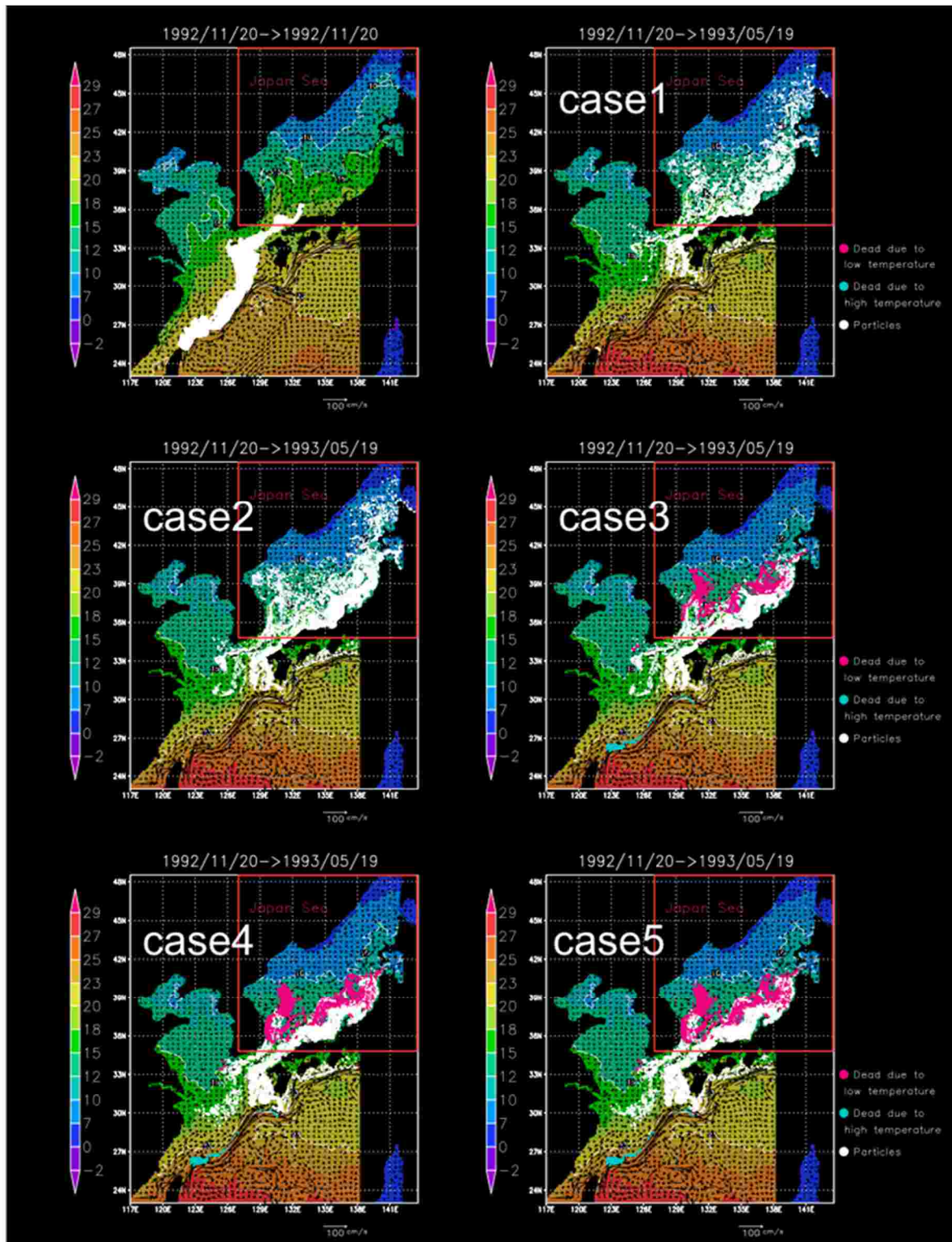
日本海のスルメイカ幼生資源の経年変動とその要因を明らかにするために、初期粒子総数だけでなく、日本海に輸送されかつ生き残った粒子を見る必要がある。そこで、表(3)-1に示された5つの計算条件の元で粒子追跡を実施した。計算の一例として、1992年11月20日に生まれた幼生の分布及び半年後の分布を図(3)-5に示した。1992年11月20日に幼生が東シナ海から対馬海峡をかけて分布していた。半年後には日本海では幼生が多く分布し、日本南岸では幼生が少ない。ケース1とケース2の違いが大きくないため、ランダムウォークの影響は限定的であると言える。生残条件を導入したケース3では、日本海の北部に到達した粒子が低温により死亡したため、生き残った粒子は対馬暖流の影響範囲にとどまっている。OVMを導入したケース4の結果はケース3とほぼ同じであることからOVMの日本海に生き残った粒子への影響も限定的であるとも言える。一方、ここでは図を示さないが、1月から3月まで生まれた幼生の多くは日本南岸に輸送され、日本海に入った割合が少なかった。このようなモデルで再現された季節変化は、スルメイカの秋発生系群及び冬発生系群の資源調査結果に一致している。

日本海に輸送されかつ生き残った幼生の経年変動を図(3)-6に示す。計算条件の違いにより、ケース1～4は若干の違いを示すものの、本質的に似たような経年変動となっている。親魚の数を考慮したケース5の結果は、他の計算条件の結果と大きく異なり、経年変動の幅も大きくなっている。秋発生系群の資源調査結果(木所ら, 2015)と比較すると、ケース5の相関係数は0.84であった。

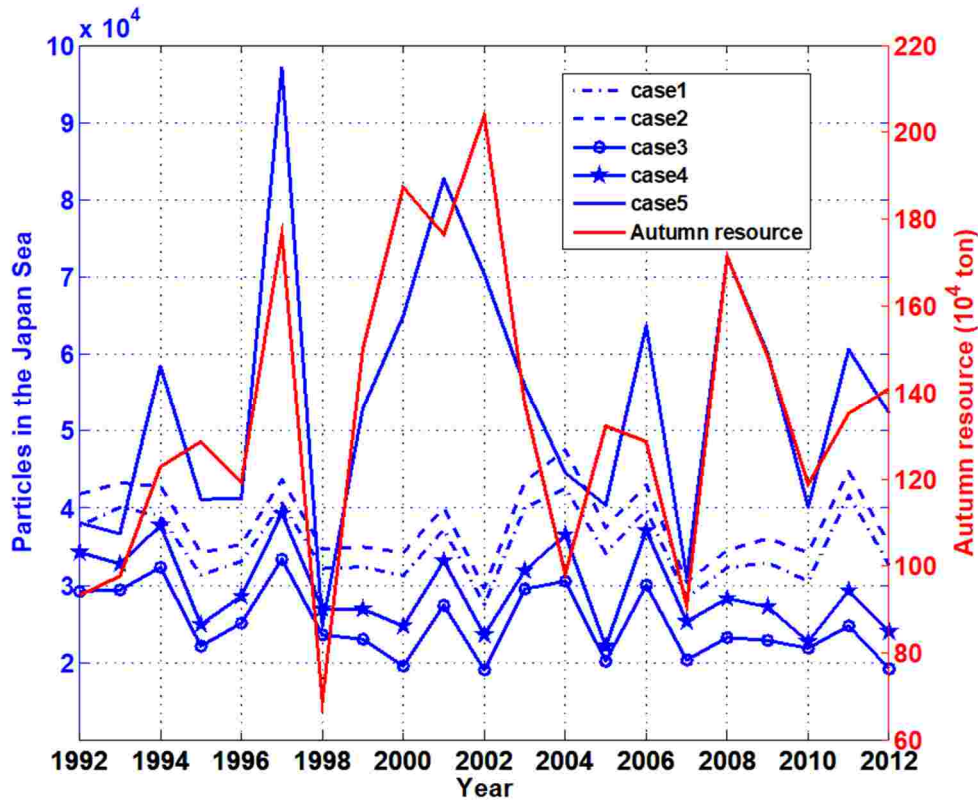
以上の結果から、本研究で構築したスルメイカの輸送・生残モデルより、日本海におけるスルメイカ資源量の経年変動を適切に再現することが可能となった。また、スルメイカ資源量の変動に影響を及ぼす要因に関する感度実験から、親魚数の影響が最も大きいことが明らかとなった。したがって、海洋保護区により産卵親魚の漁獲および乱獲を制限することにより資源量の保護効果が期待できると考えられる。

表(3)-1 計算に使用した条件

ケース	海流	ランダムウォーク	生残条件	OVM	親魚条件
ケース1	○	×	×	×	×
ケース2	○	○	×	×	×
ケース3	○	○	○	×	×
ケース4	○	○	○	○	×
ケース5	○	○	○	○	○



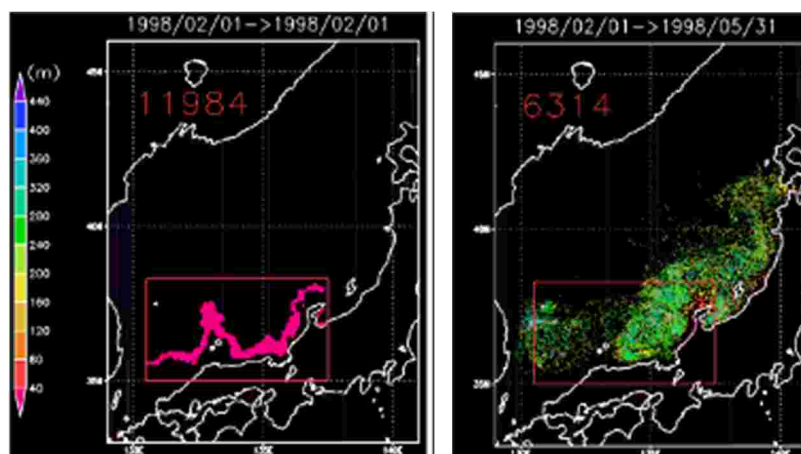
図(3)-5 1992年11月20日にリリースした時の粒子分布と5つのケースで得られた6か月後の粒子分布。赤枠は日本海に対応する範囲を示す。カラーは水温である。紫色は低温のため死亡した幼生で、水色は高温のため死亡した幼生である。



図(3)-6 5つのケースで得られた日本海に輸送されかつ生き残った粒子総数(青線)と秋季群集の資源量(赤線)の経年変化。

## (2)ズワイガニ幼生の経年変動

ズワイガニ幼生の初期分布に基づく、シミュレーション開始時は赤線の枠で示された対象海域の200mと500mの等深線間に粒子が多数分布する(図(3)-7の左図)。水温に対する依存性から粒子数に一定の経年変動が見られる(図省略)が、分布パターンはほぼ一定である。計算の一例として、1998年2月1日にリリースした粒子の追跡結果(図(3)-7の右図)を示す。対象海域から出発した粒子の一部は対馬暖流とともに東北方向に移動し、津軽海峡付近に到達するが、半分程度の粒子は120日後も対象海域に留まっている。



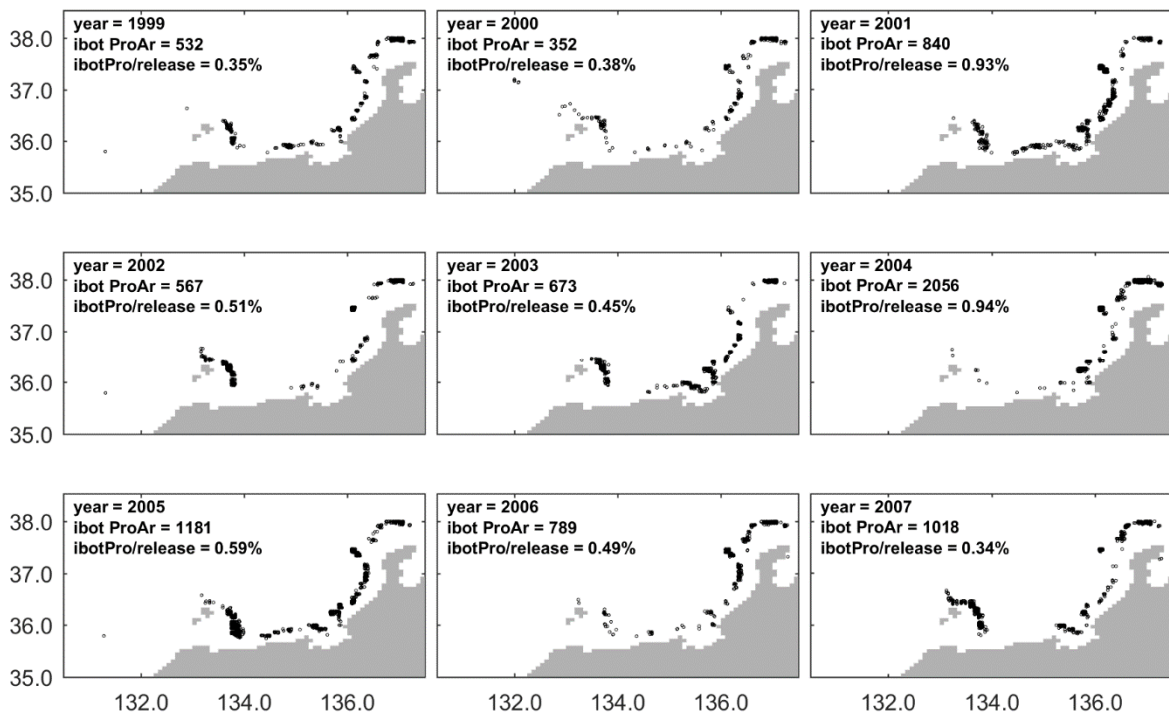
図(3)-7 1998年2月1日における粒子の初期分布(左),120日後の粒子分布(右)。赤線の枠は対象海域で、図面の左上の数字は対象海域にある粒子数を示す。粒子の色はその粒子の存在水深を意味する。

粒子追跡計算より得られた着底粒子の分布の一例を図(3)-8に示す。粒子が着底した場所と総数には明確な経年変動が見られる。例えば、2004年の着底数は全体的に多いが、着底粒子は浜田沖にほとんど無く、その他の海域に濃密に分布している。一方、2000年の着底数は全体的に少ないが、着底粒子は全域に見られる。全

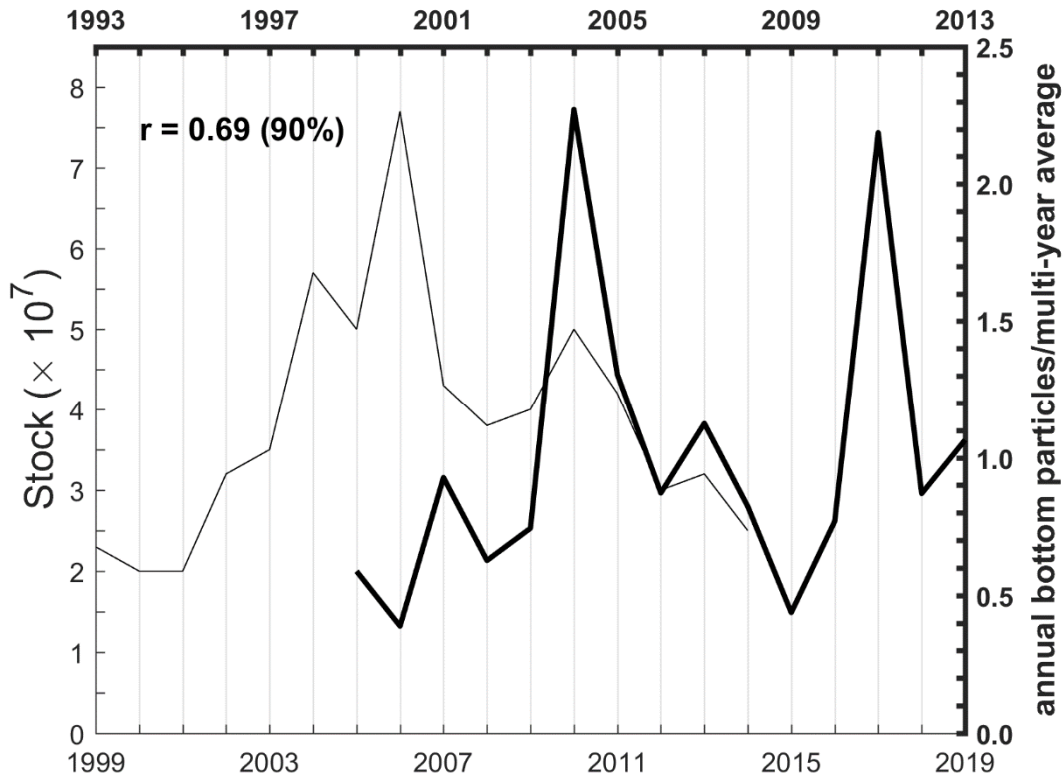
体的な傾向としては、浜田沖や隠岐北方などの西側に位置する海域より、若狭沖や加賀沖などの東側に位置する海域に多くの着底粒子があった。

モデルの精度検証は、ズワイガニの資源量とモデル結果から導き出した着底粒子数を比較することにより行う。ズワイガニの成長は、ふ化後6齢までは1年間に複数回脱皮を行うが、それ以後は1年間に1回脱皮を行う(上田ら 2015)。成長の仕方は第10齢まで雌雄共に同じで約6、7年を費やす。この特徴を利用して第10齢の資源量をモデル結果の比較対象とする。この脱皮齢期を使用することで雌雄の判別を必要とせず、さらに同じ脱皮齢期を複数年過ごした個体を含む可能性も低減する。

第10齢の資源尾数と着底粒子数を比較するには、着底から第10齢になるまでの期間を考慮しなければならない。第10齢になるまでには、ふ化から約6、7年を必要とするため、着底数の年と比較する資源量の年の間には、6年の時間差を与えた(図(3)-9)。つまり、1999年の着底粒子数を2005年の資源尾数と比較することになる。図(3)-9を見ると、2001年から2008年までの着底粒子数と2007年から2014年までの資源尾数の経年変動は同様の傾向となり、それ以外の2年間は傾向が異なる。全体として、数値モデルは資源尾数の経年変動を表現できていると言える。また、ここでは詳細を述べないが、親ガニの分布密度と総数は着底粒子数の経年変動に大きく寄与することが数値実験より分かった。



図(3)-8 1年間に着底した粒子の場所と着底総数(1999年から2007年)。図中の黒点は粒子が着底した地点を示し、着底した総数(ibot ProAr)と初期に出した粒子の比(ibotPro/release)を各年の図上部に示す。



図(3)-9 着底数(太線)と10齢雌雄の資源尾数(細線)との比較。太線の軸は図上と図右,細線の軸は図下と図左である。右軸には着底した粒子数(1999年から2013年までの着底粒子数の平均値に対する割合)を示している。資源尾数は1999年から2014年までのデータ(上田ら,2015)である。

### (3)スルメイカ・ズワイガニの海洋保護区

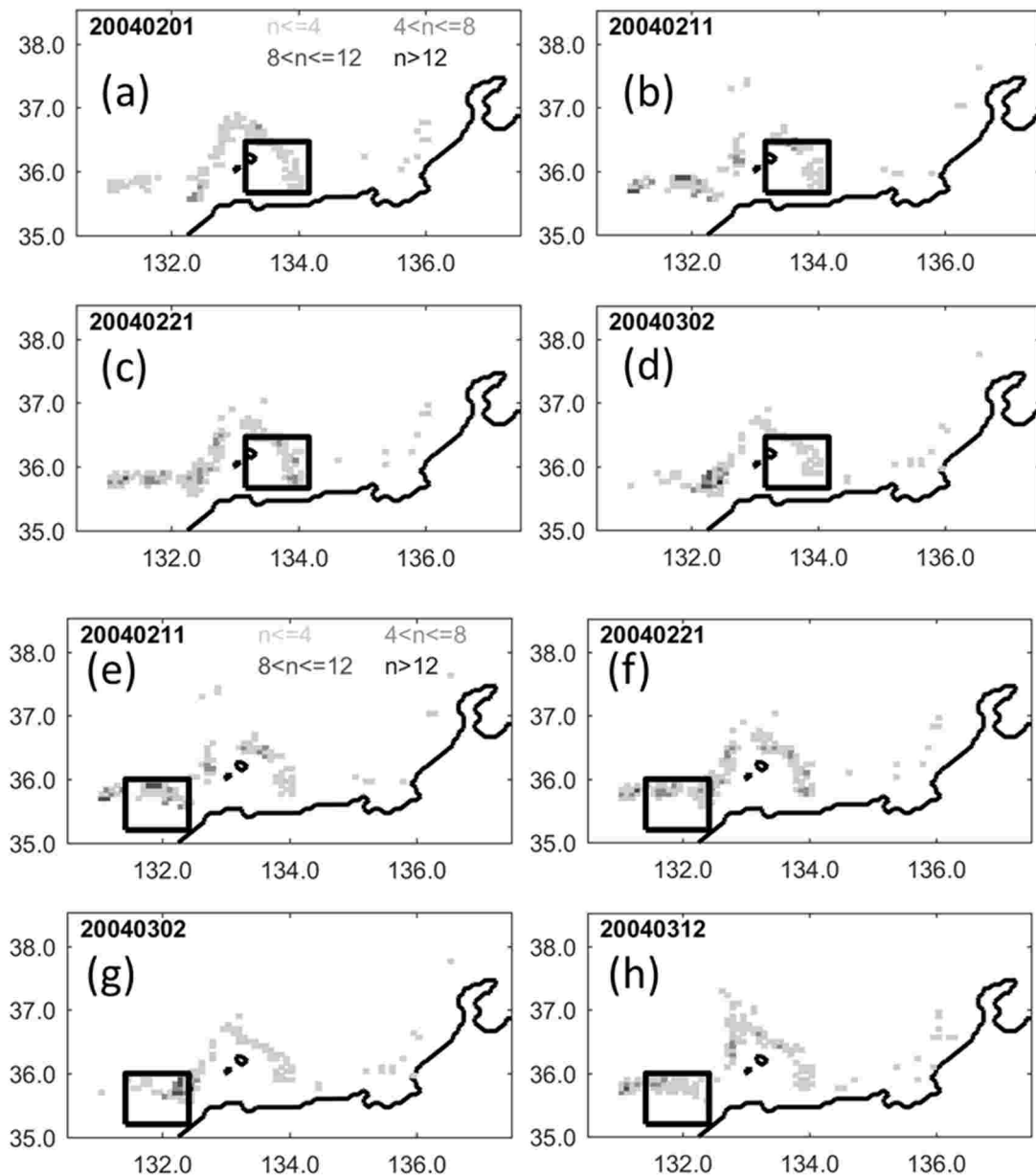
ズワイガニの動的保護区と静的保護区の比較の一例を図(3)-10に示す。2004年は動的保護区と静的保護区の設置期間及び位置が異なることが明確である。また、図面を示さないが、動的保護区と静的保護区の位置はほぼ同じであるが、保護期間が異なる年もある。また、動的保護区と静的保護区の設置期間と位置は両方ともほぼ同じとなっている年もある。このように、動的保護区は年によって変化することが確認できた。

動的保護区と静的保護区の違いを明確にするために、それぞれの年で両保護区によって保護される粒子の割合を集計した(図(3)-11)。1° × 4/5° の範囲と1か月の条件で、静的保護区は1割余りの、動的保護区は2割余りの着底粒子を保護できる。2011年は動的保護区と静的保護区の違いが顕著になり、動的保護区のほうが静的保護区よりも粒子の保護割合が13倍多かった。全体の傾向では、動的保護区の保護割合の方が高く、保護割合が20%を超える年が多かった。それに対して、静的保護区は保護割合が10%を下回る年が6年あり、中でも2011は保護割合が5%を下回っている。全期間の平均として、動的保護区の保護割合は25.7%で、静的保護区の保護割合は17.7%であり、その比は1.45である。

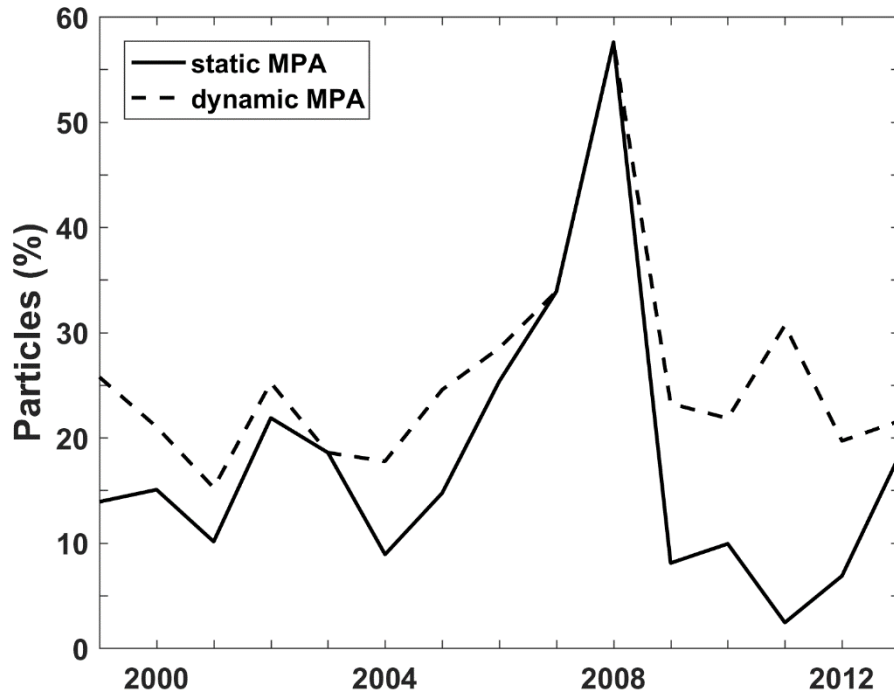
海洋保護区が保護できる粒子の割合は保護区の面積に依存する。同じ1か月の条件で、保護区的面積を増やすと、保護できる粒子の割合が3割を超えることができる(図(3)-12)。ただし、保護区がある程度の面積に達したら、保護区的面積を増やしても保護できる粒子の割合があまり増えないことを注目すべきである(図(3)-12)。さらに保護区的面積が増え、動的保護区が静的保護区に対する優位性が減る(図(3)-12)。

ズワイガニと同じ考え方で、スルメイカの保護区も検討した。日本海で生き残った粒子を初期配置日に合わせて最初の分布を図(3)-13に示す。時間的には10月末11月中旬までに配置した粒子が一番多く日本海に生き残ったことがわかる。また、その多くは九州の西側の沖合に分布していることも変わる。そこで、150km × 350km の範囲と1か月の条件で動的保護区と静的保護区の比較を行った(図(3)-14)。この条件で日本海に進入する粒子の2~4割を保護できることがわかる。ズワイガニと異なり、スルメイカは動的保護区と静的保護区の効果に大きな違いがない。スルメイカの産卵が依存する水温の経年変動は海流より少ないことと東シナ海から日本海まで

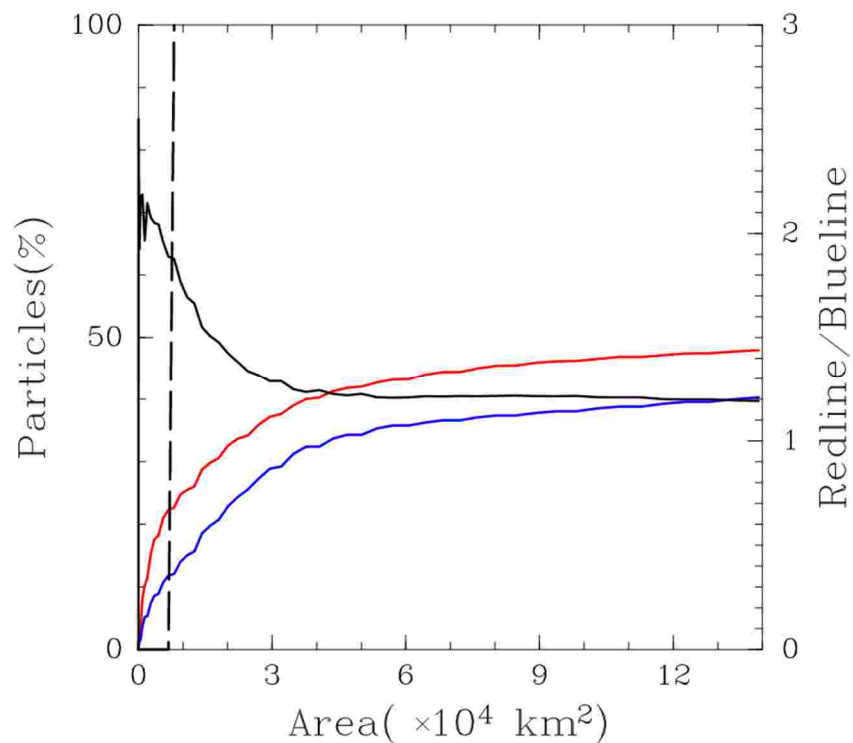
流れる対馬暖流も安定しているため、このような安定的な結果になったと考えられる。また、保護区の面積を変えても、動的保護区と静的保護区の効果は大きく変わらない(図(3)-15)。したがって、動的保護区と静的保護区のどちらが効率的であるかは水産資源の種類別に検討する必要がある。



図(3)-10 2004年におけるズワイガニの動的保護区(a-d)と静的保護区(e-h)の設置結果。濃淡は各配置日において配置から120日後までに着底した1グリッドあたりの粒子の数を示す。枠はズワイガニの保護区的位置を示す。

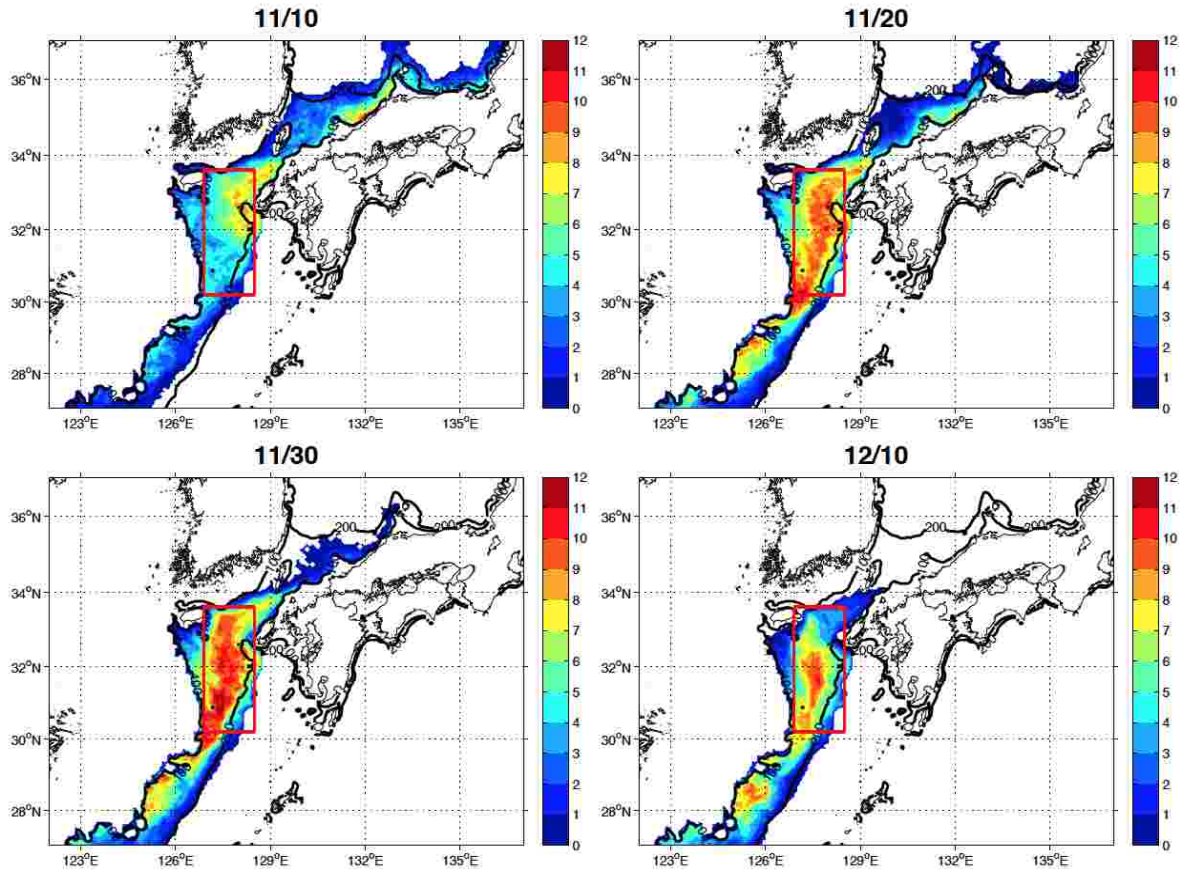


図(3)-11 スワイガニの保護区 ( $1^{\circ} \times 4/5^{\circ}$ ) によって保護される粒子の割合。縦軸は動的保護区 (破線) と静的保護区 (実線) で保護される着底粒子の割合を示す。

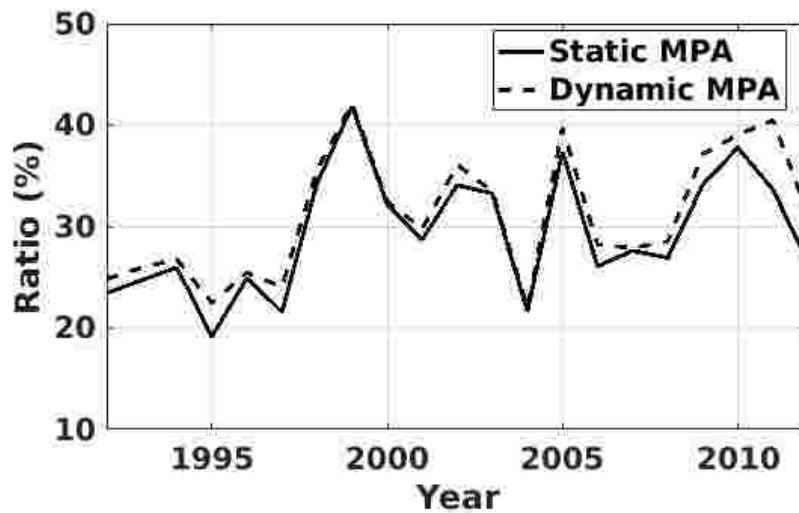


図(3)-12 海洋保護区の面積変化による保護されるズワイガニ幼生割合の変化。赤線が動的保護区、青線が静的保護区を示す。左軸は1999年から2013年まで着底した粒子の総数に対して保護できる粒子の割合。黒実線は赤線 (動的保護区) と青線 (静的保護区) の比を示し、右軸に対応する。黒破線は、保護区が大きさが  $1^{\circ} \times 4/5^{\circ}$  の場合の値を示す。

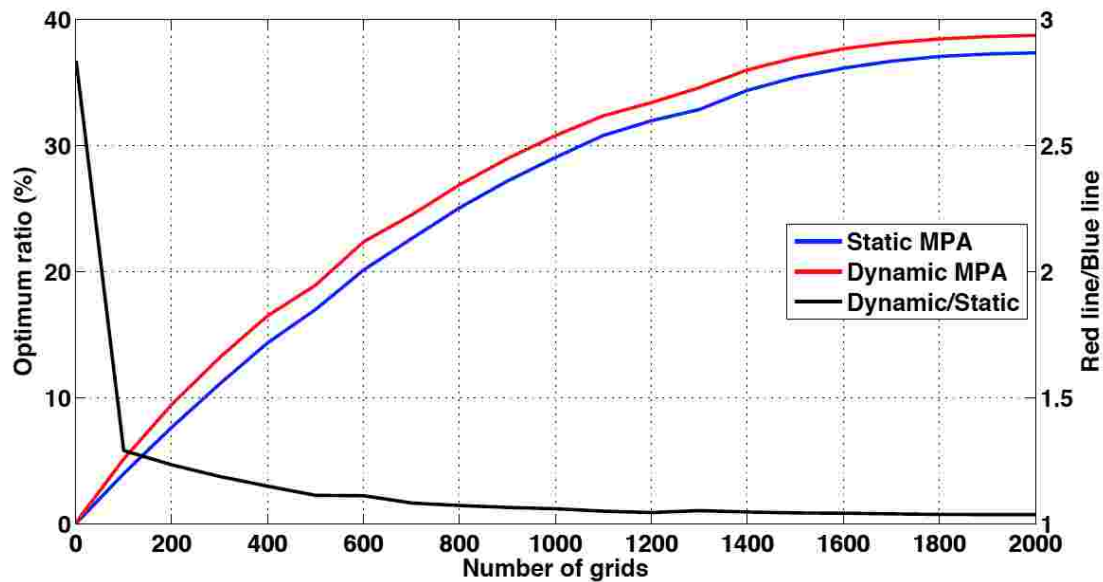




図(3)-13 日本海に生き残った粒子の初期配置。日付は粒子の初期配置した日である。カラーはグリッド毎の生き残った粒子数である。赤い枠はスルメイカの海洋保護区の設定領域。



図(3)-14 図(3)-13に示されたスルメイカの保護区によって保護される粒子の割合。縦軸は動的保護区(破線)と静的保護区(実線)で保護される粒子の割合を示す。保護区の面積を150km × 350km とした。

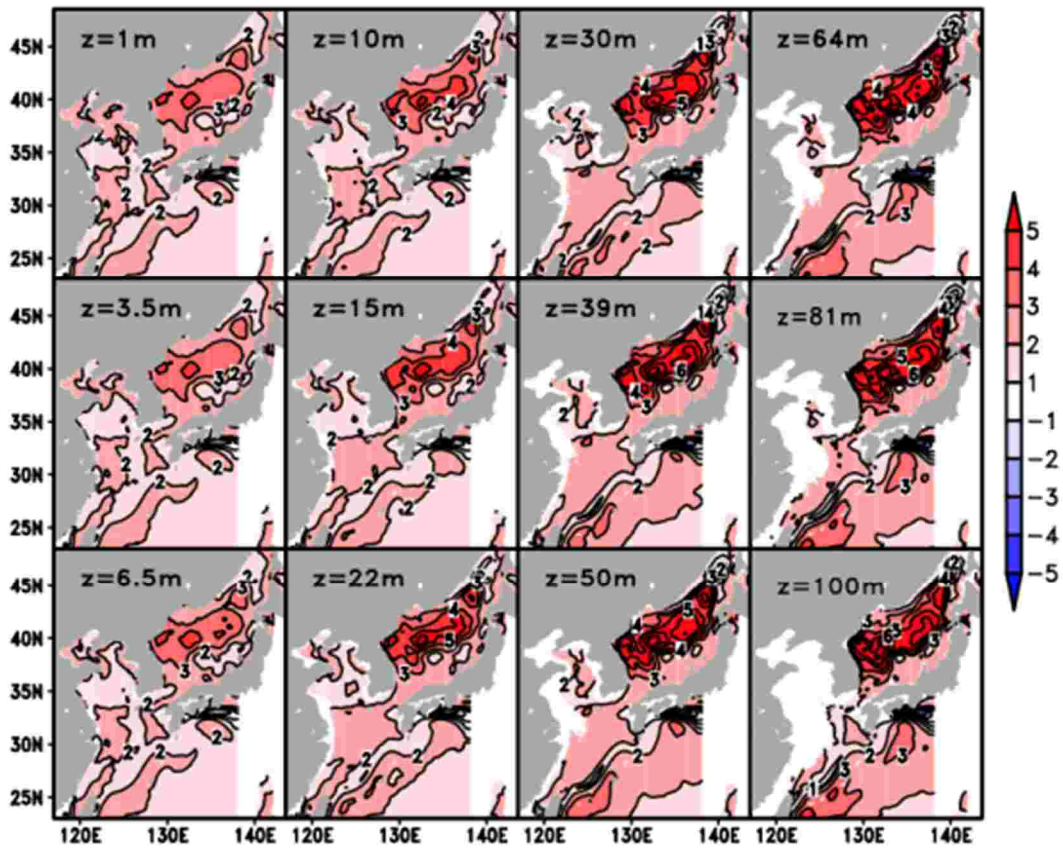


図(3)-15 海洋保護区の面積変化による保護されるスルメイカ幼生割合の変化。赤線が動的保護区、青線が静的保護区を示す。左軸は1999年から2013年まで日本海で生き残った粒子総数に対して保護できる粒子の割合。黒実線は赤線(動的保護区)と青線(静的保護区)の比を示し、右軸に対応する。横軸の1グリッドは約50km<sup>2</sup>に対応する。図(3)-13に示された領域は1050グリッドである。

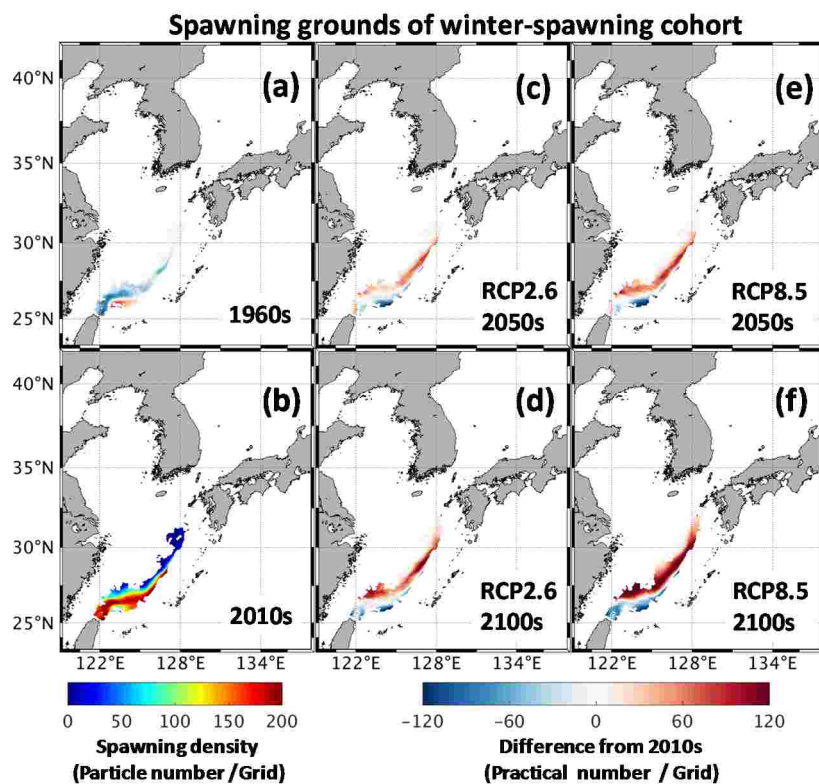
#### (4)地球温暖化のスルメイカ幼生への影響

温暖化の影響を確認するために、スルメイカ幼生の初期分布と生残に関わる表層100mのRCP8.5シナリオによる100年後と現在の年平均水温の差を求めた(図(3)-16)。表層(z=1m)では、東シナ海の陸棚域から日本海にかけて広範囲に1~3度の昇温が見られる。亜表層では、東シナ海では表層とほぼ同程度であるが、日本海では大きな昇温が見られる。特に水深20mより深い層では、日本海の北部では2~5度の昇温が見られる。これは対馬暖流の北上に伴い、南部の亜熱帯循環域が拡大したためである。

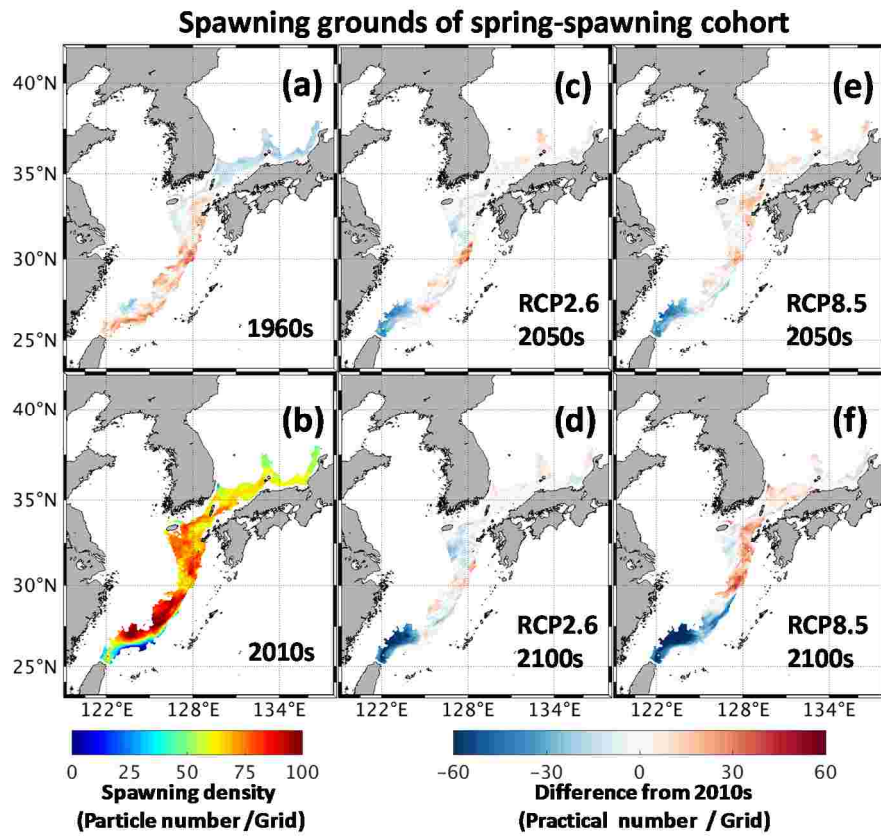
スルメイカ生残モデルでは、水深が100~500mであるグリッドを対象とし、表層水温が19.5~23度の範囲のグリッドに初期粒子を配置する。冬季は、「過去」、「現代」ともに、多くの粒子が台湾の東北部から東シナ海の陸棚斜面の中央まで分布している(図(3)-17a、図(3)-17b)。「50年後」と「100年後」の将来予測では、どの温暖化シナリオの場合でも分布パターンが北上する(図(3)-17c-d)。春季は、「過去」、「現代」では、産卵場所が東シナ海の陸棚斜面から対馬海峡まで拡張している(図(3)-18a、図(3)-18b)が、温暖化シナリオの「50年後」と「100年後」では台湾北部の産卵場所が消失する(図(3)-18c-f)。夏季の産卵場は、現在は東シナ海の陸棚斜面では水温が高すぎるため対馬海峡の北部海域だけに形成される(図(3)-19b)。温暖化シナリオによる「50年後」と「100年後」ではこの産卵場はほとんど消失する(図(3)-19c-f)。秋には、現在の環境では、東シナ海の陸棚斜面から対馬海峡の北部まで広範囲で産卵場が存在する(図(3)-20b)が、「過去」はこの傾向がより強い(図(3)-20a)。温暖化シナリオの「50年後」と「100年後」では、産卵場が北上し縮小する(図(3)-20c-f)。



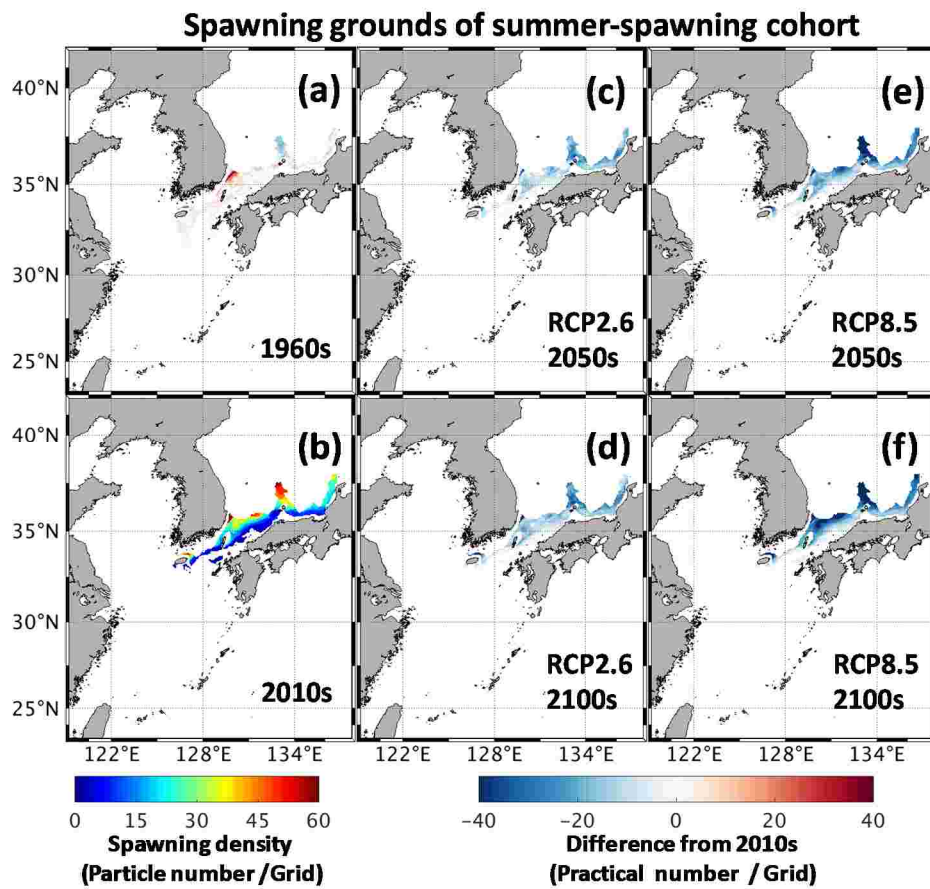
図(3)-16 RCP8.5「100年後」と現代」の0m～100mにおける年平均水温の差。



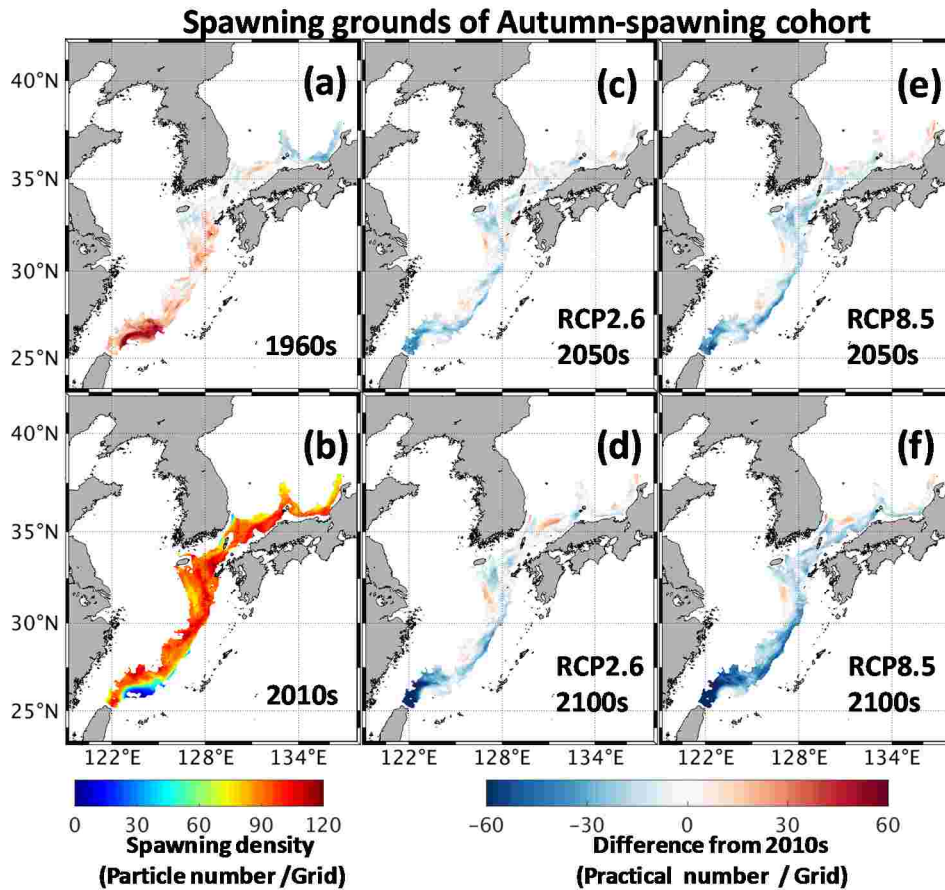
図(3)-17 (a) 過去、(b) 現代、(c)RCP2.6 50年後、(d)RCP2.6 100年後、(e)RCP8.5 50年後、(f)RCP8.5 100年後」において冬(1月～3月)の初期配置粒子の空間分布。(b)は1月～3月に初期配置した粒子の総数である。ほかの図面は(b)との差を示している。



図(3)-18 図(3)-17と同じであるが、春(4月~6月)の結果である。

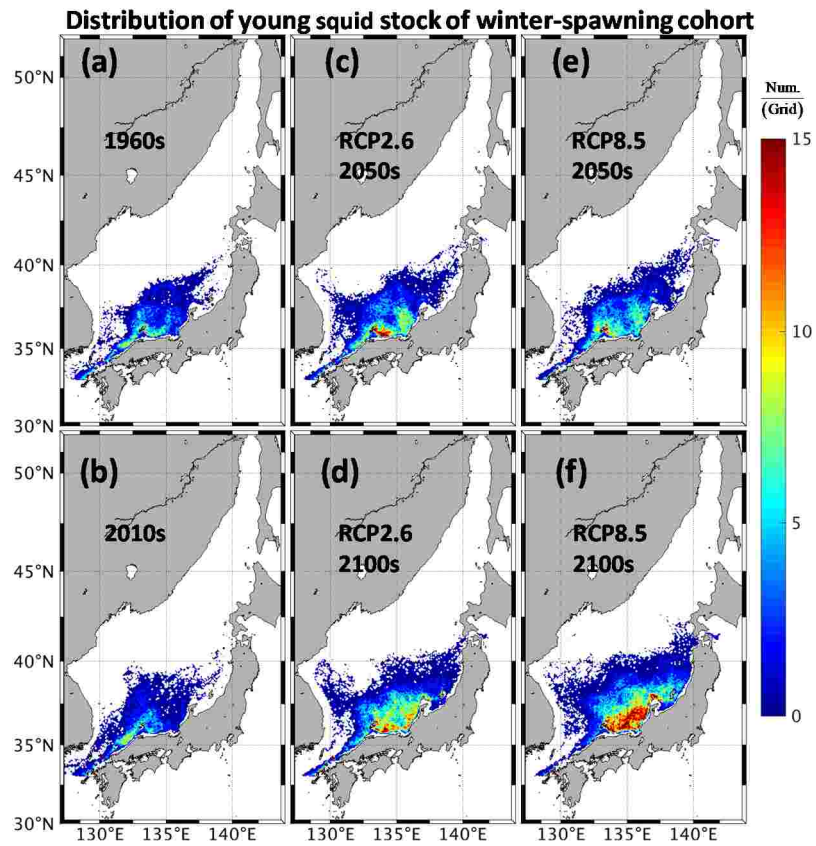


図(3)-19 図(3)-17と同じであるが、夏(7月~9月)の結果である。

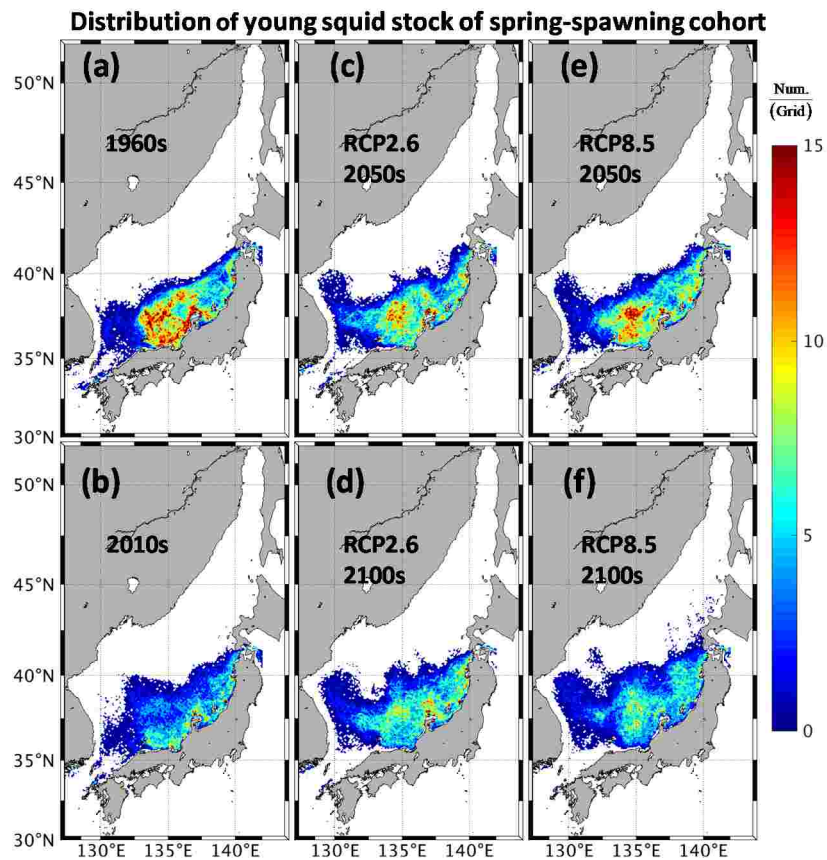


図(3)-20 図(3)-17と同じであるが、秋(10月~12月)の結果である。

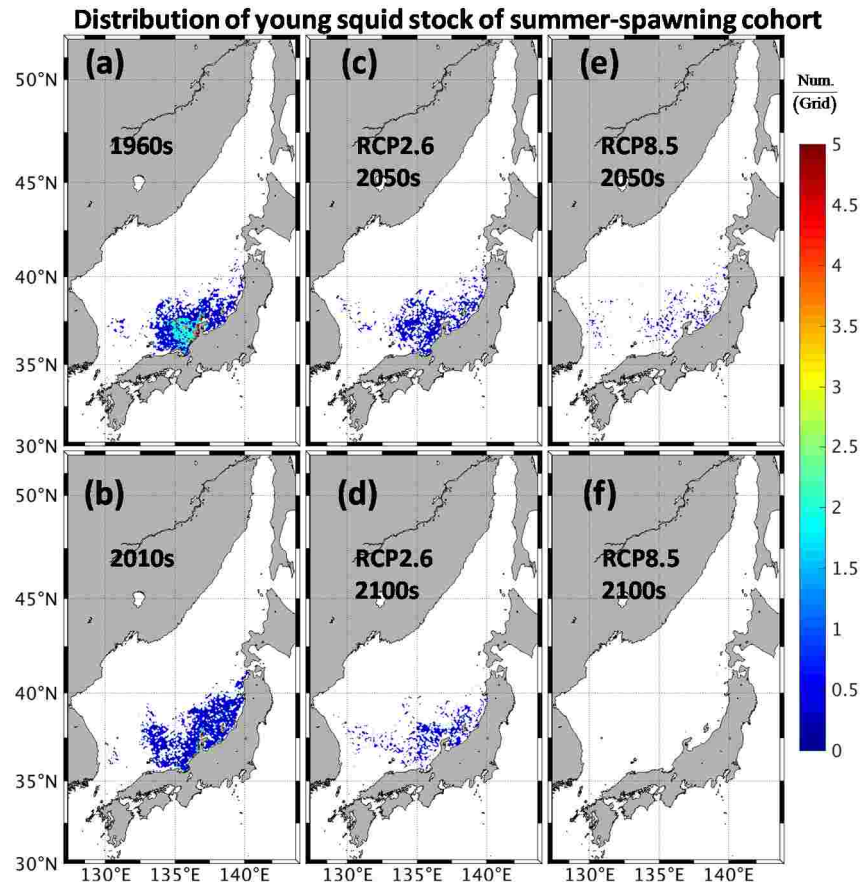
冬に産卵された粒子は、対馬暖流により輸送され、対馬海峡の東水道から山陰沖に分布する(図(3)-21)。過去」と現代」は分布の中心が山陰沖に形成されているが(図(3)-21a-b)、温暖化が進行した場合、分布域が東へと移動し、能登半島にまで達する(図(3)-21c-f)。春に産卵された粒子は近畿から北陸の沿岸から沖合にかけて広く分布している(図(3)-22)が、温暖化に伴い分布範囲が北へと拡大する様子が捉えられた。夏の産卵粒子は能登半島の周辺で少量に生き残っていたものが、温暖化に伴い日本海での生き残りが困難な環境となる(図(3)-23)。すべての計算ケースにおいて秋に初期配置した粒子が日本海南部の広い範囲で生き残っているが、粒子分布密度の高い領域に注目すると「過去」、「現代」、「50年後」と「100年後」の違いが明確である(図(3)-24)。



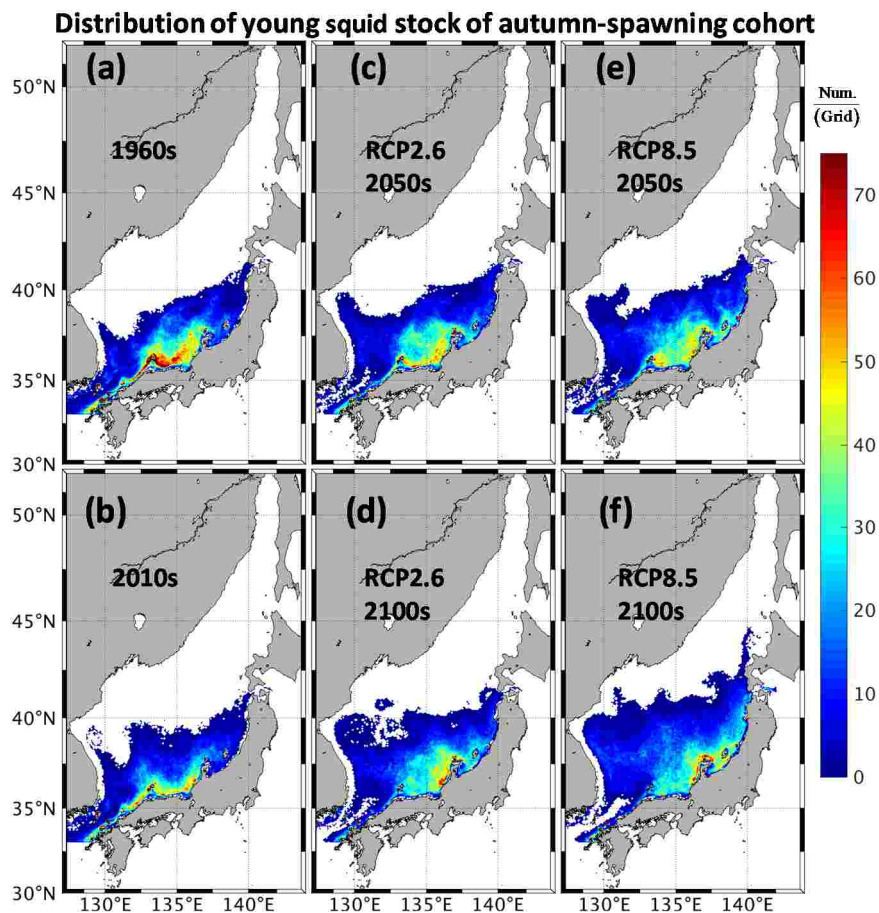
図(3)-21 (a) 過去、(b) 現代、(c)RCP2.6 50年後、(d)RCP2.6 100年後、(e)RCP8.5 50年後、(f)RCP8.5 100年後において冬(1月～3月)に初期配置した粒子のうち、日本海に生き残った粒子の水平分布。カラーは1グリッドあたりの粒子数を示す。



図(3)-22 図(3)-21と同じであるが、春(4月～6月)に初期配置した粒子の結果。



図(3)-23 図(3)-21と同じであるが、夏(7月~9月)に初期配置した粒子の結果。

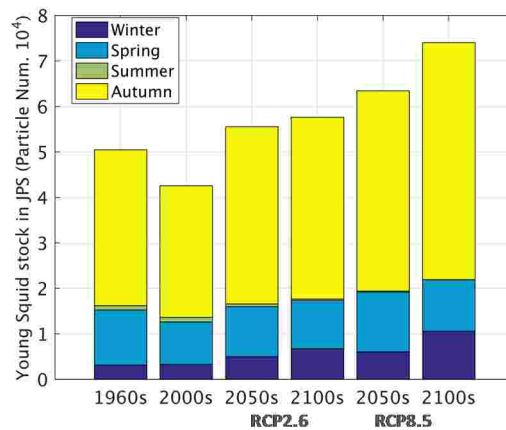


図(3)-24 図(3)-21と同じであるが、秋(10月~12月)に初期配置した粒子の結果。

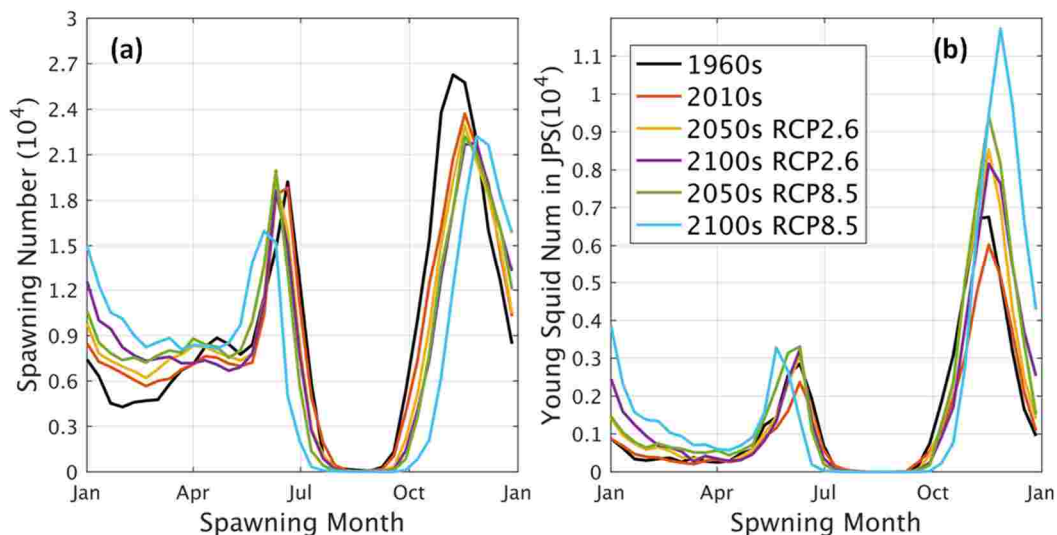
季節ごとの卵・幼生の生残量を見ると(図(3)-25)、温暖化の進行に伴い生残環境としてはより適した環境になる一方、秋・冬生まれの占める割合が顕著に増える。

温暖化は産卵時期にも影響を及ぼす。温暖化の進行に伴い、秋の産卵時期は遅くなり、春の産卵時期が早まることが明らかとなった(図(3)-26a)。これに伴い、日本海のスルメイカ資源において、秋生まれ系群の重要性が高まることとなった(図(3)-26b)。

スルメイカ幼生の生残環境を定量的に理解するために、初期配置粒子数、日本海に入った粒子数、日本海に生き残った粒子数、低温より死亡した粒子数、高温より死亡した粒子数、日本海から流出した粒子数、生残率(日本海に生き残った粒子数と日本海に入った粒子数の比)を表(3)-2に示す。初期配置粒子の総数と日本海に入った粒子の総数に大きな変化が見られないが、日本海に生き残った粒子の数が一番少ない「現代」から一番多いRCP8.5「100年後」まで1.8倍増えた。この増加には低温より死亡した粒子数の低下が一番寄与していると考えられる(表(3)-2のLow Temp. Mortality Rate)。図(3)-14に示されるように、温暖化に伴う日本海における亜熱帯循環の範囲拡大が引き起こした日本海南部の水温場の変化がその原因である。



図(3)-25 「過去」、「現代」、RCP2.6「50年後」、RCP2.6「100年後」、RCP8.5「50年後」、RCP8.5「100年後」で得られた日本海に生き残った粒子数。



図(3)-26 (a)六つのケースで得られた初期配置粒子の時間変化。(b)日本海に生き残った粒子の時間変化。(a)と(b)の横軸は粒子の初期配置の時間である。縦軸はそれぞれのケースの計算時間内で同じ日にリリースした粒子数の平均値である。



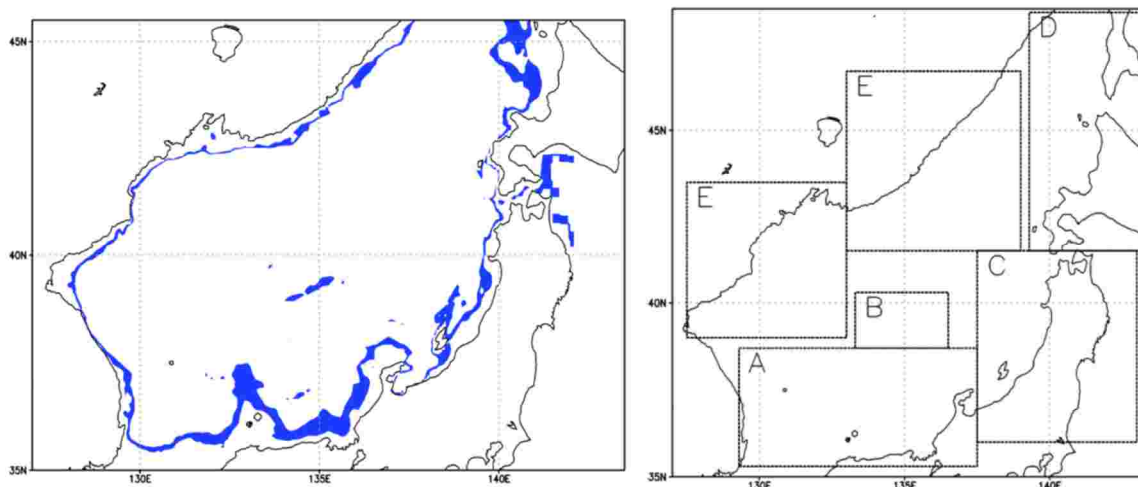
表(3)-2 初期配置粒子数、日本海に入った粒子数、日本海に生き残った粒子数、低温より死亡した粒子数、高温より死亡した粒子数、日本海から流出した粒子数、生残率(日本海に生き残った粒子数と日本海に入った粒子数の比)

		Spawning (particle number)	Migration into JPS (particle number)	Young stock (particle number)	Low Temp. Mortality Rate	High Temp. Mortality Rate	Fbw out Rate	Survival Rate
History	1950s	3.31E+05	1.43E+05	5.13E+04	47%	15%	3%	36%
Current	2010s	3.21E+05	1.33E+05	4.34E+04	49%	17%	2%	33%
RCP2.6	2050s	3.12E+05	1.36E+05	5.70E+04	37%	18%	4%	42%
	2100s	3.12E+05	1.40E+05	6.01E+04	34%	20%	3%	43%
RCP8.5	2050s	3.12E+05	1.36E+05	6.49E+04	32%	17%	3%	48%
	2100s	3.04E+05	1.39E+05	7.79E+04	19%	22%	3%	56%

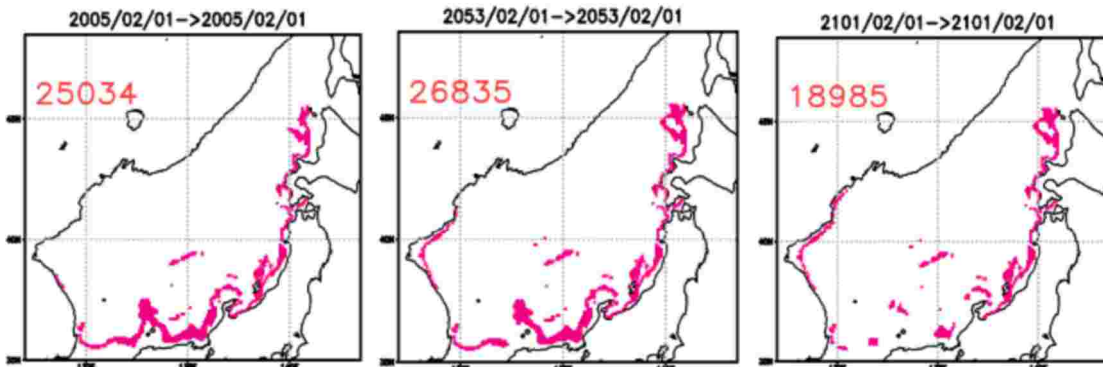
### (5)地球温暖化のズワイガニ幼生への影響

ズワイガニ幼生の生残モデルに使用する粒子の初期配置は北緯35.0度から北緯45.5度、東経127.0度から143.5度で囲んだ海域中の全水深が200mから500mまでのグリッドにおいて行った(図(3)-27)。第1期ゾエアの適正水温は5から14であること(山本ら 2011)と、第1期ゾエアは分布調査より水深0mから水深50mの表層付近に主に分布する(Kon et al., 2003)ことから、表層(1m深)水温が5から14までの範囲にあるグリッドに粒子を配置した。温暖化条件では粒子密度の設定に必要な漁獲データがないため、粒子密度(25個/グリッド)を一定にした。粒子の配置時間つまり放流日は、主な産卵期である2月1日(Konishi et al., 2011)を初日として、その後10日間隔で4月末まで粒子を放流し、合計で9回行った。粒子の追跡期間は粒子放流後120日と設定した。将来の資源になる粒子の判別は着底を条件としている。着底条件は、粒子放流後90日以降に水深200mから500mの領域で海底に達する粒子とする。計算は、(1)2005年から2014年の「現代」のケース、(2)2053年から2062年の「50年後」のケース、(3)2101年から2110年の「100年後」のケースを行った。

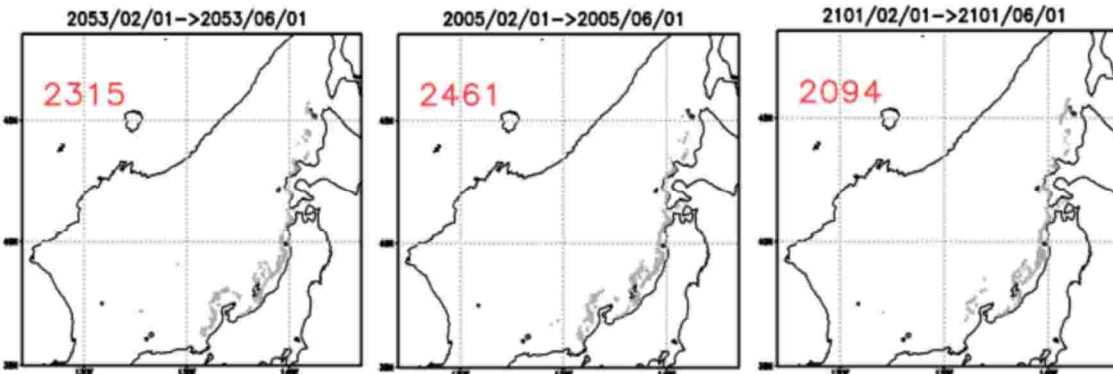
計算例として、それぞれのケースの最初の放流日に当たる2月1日に配置した粒子の分布と総数を図(3)-28に、そのうち着底できた粒子の分布と総数を図(3)-27に示す。2005年2月1日に配置された粒子は、主に本州沿岸や日本海中央部の大和礁、北海道周辺の沿岸域、朝鮮半島東岸の一部に分布し、その総数は25034個である(図(3)-28)。



図(3)-27 (左)ズワイガニ幼生の初期配置粒子の候補地(青色、全水深が200mから500mまでのグリッド)、(右)計算結果の解析に使用するA~Eの5海域。



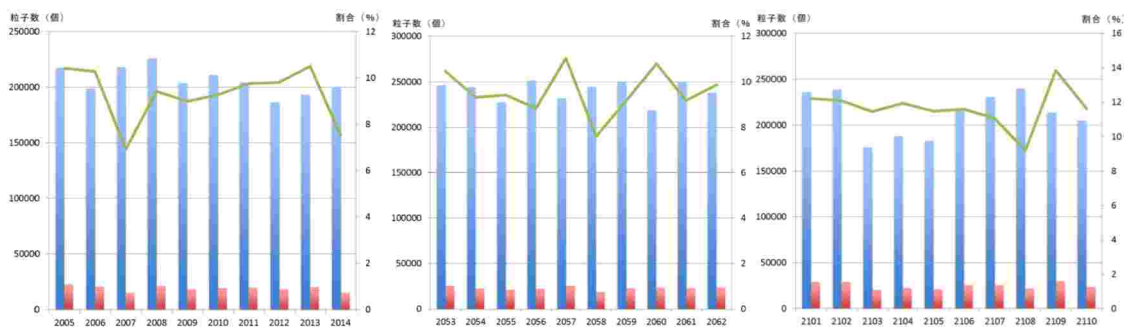
図(3)-28 2005年2月1日、2053年2月1日、2010年2月1日に配置した初期粒子の分布と総数



図(3)-29 2005年2月1日、2053年2月1日、2010年2月1日に配置した粒子の着底分布(灰色)と着底総数

放流後120日で、能登半島西部から北海道周辺にかけて、初期配置粒子の一分割の着底が見られる(図(3)-29)。「50年後」の2053年2月1日に粒子の配置場所は2005年2月1日に配置と類似しているが、日本海西部海域の隠岐周辺の産卵場がなくなったことと朝鮮半島東岸や北海道北部の西側の海域の分布が増えている(図(3)-28)。また、初期配置の粒子総数は2005年よりも1800個程度増えて26835個であった。120日の粒子追跡後の着底地点、着底粒子数に「現代」との大きな差は見られない。「100年後」の予測実験では、富山県以西の本州沿岸域の産卵場が大きく減少する一方、朝鮮半島東岸では北部で多くの粒子が配置されている。粒子の総数は、2005年と2053年に比べ7000個程度減って18985個になっている。120日の粒子追跡の結果、能登半島以西の着底が大きく減少し、北海道周辺の着底数は2005年と2053年よりも増加している。

「現代」、「50年後」、「100年後」の計算途中の初期配置粒子の総数、着底粒子の総数、着底割合の経年変動を図(3)-30に示す。どのケースも初期配置粒子の総数と着底粒子の総数が毎年異なっており、着底割合も変化している。しかしながら、全体の平均を見ると、「現代」と「50年後」を比較すると初期配置粒子の総数と着底総数が増加するが、着底割合に変化は見られず、「現代」と「100年後」を比較すると初期配置粒子の総数に大きな変化がないが、着底粒子の総数が増加したことにより着底割合が高くなった(表(3)-3)。



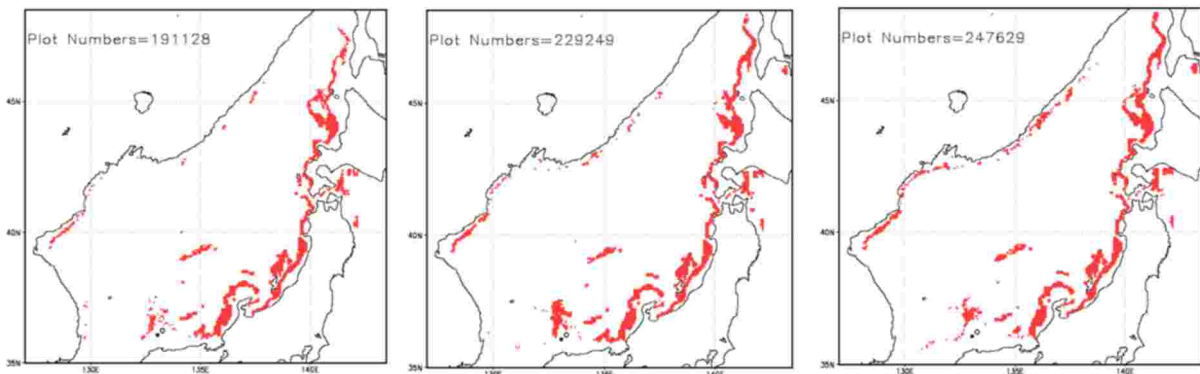
図(3)-30 「現代」、「50年後」、「100年後」の計算途中の各年の初期配置粒子の総数(青の棒)、着底粒子の総数(赤の棒)、着底割合(着底粒子の総数と初期配置粒子の総数の比、緑の折れ線)。

表(3)-3 現代(2005年から2014年)、50年後(2053年から2062年)、100年後(2101年から2110年)の初期配置粒子総数の年平均値、着底粒子総数の年平均値、着底の割合の年平均値。

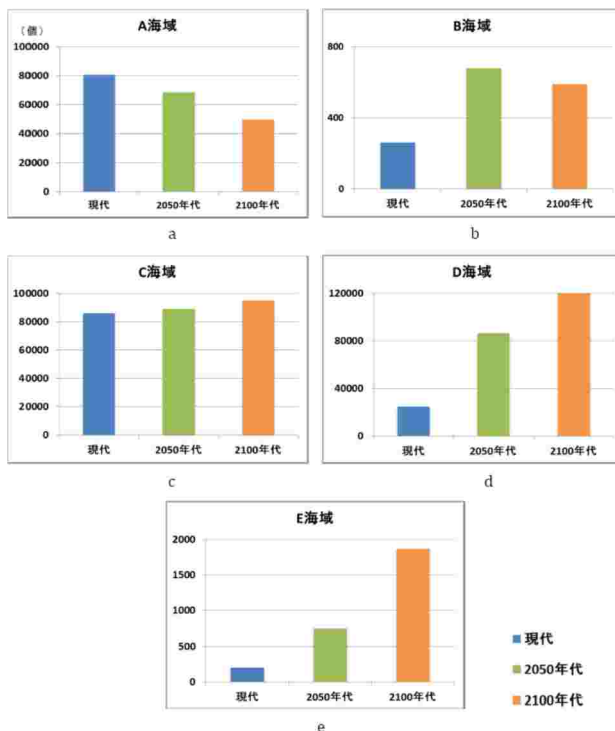
	配置数(個)	着底数(個)	着底率(%)
現代	2950000	5000	0.17
2050年代	2950000	15100	0.51
2100年代	2780000	34700	1.25

現代、50年後、100年後のそれぞれ10年間の計算中に着底した粒子の分布、着底した粒子の総数を図(3)-31に示す。温暖化の進行に伴い北海道西側の沿岸域、樺太島南部の西側、朝鮮半島東岸、日本海のロシア側の海域にて着底粒子の分布域が広がっているのが見られる。

そこで、日本海をA～E海域に分け(図(3)-25右)それぞれの海域に着底した粒子を集計した(図(3)-32)。A海域(富山県以西の海域周辺)では、温暖化の進行に伴い約2万個ずつ減少している(図(3)-32a)。一方、C海域(新潟県以北の沿岸域周辺)およびD海域(北海道西側の沿岸域と樺太島南部の西側の海域周辺)で着底量は増加し、D海域の増加量が大きい(図(3)-32d)。E海域(朝鮮半島東岸と日本海のロシア側の海域)も絶対数は少ないものの大幅に増加する(図(3)-32e)。



図(3)-31 (左)2005年から2014年、(中)2053年から2062年、(右)2101年から2110年間の着底粒子(赤色)の分布図。図中の数字(左上)は10年間の着底粒子の総数である。



図(3)-32 図(3)-27(右)に示される5つの海域(A海域-E海域)における現代、50年後、100年後のケースでの着底粒子総数の変化。

### (5)富山湾低次生態系モデルの開発

富山湾陸海統合管理を検討するための富山湾低次生態系モデルを開発した。

モデルのベースは、九州大学応用力学研究所のDREAMS\_I (Nakata et al., 2014)である。計算範囲は東経136.5-138.5°、北緯36.6-38.3°である。東西方向のグリッド間隔は1/60°で、南北方向のグリッド間隔は1/75°である。鉛直方向に36層を設ける。モデルを駆動する外力(海上風、熱フラックス、降雨)は気象庁のGPV-MSM (Mesoscale Model)の結果を利用して算出する。外洋側の側面条件は九州大学応用力学研究所のDREAMS\_Mの結果を利用する。

サブテーマ(2)-2で用いられた低次生態系モデル(NPZDモデル)を上記の富山湾流動モデルに結合することで、富山湾低次生態系モデルを構築した。また、元の低次生態系モデル中の栄養塩はDINのみであったが、本研究では新たにDIPを追加し、リン循環も計算できるようにした。これによりN/P比を計算できるようになり、窒素制限の海域とリン制限の海域を把握できるようになった。低次生態系モデルの初期値と外洋側の境界条件はDREAMS\_Mの出力結果を利用した。計算期間は2006年3月1日～2007年12月31日であり、栄養塩(DIN、DIP)、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタス、溶存酸素(DO)の計算結果が1時間ごとに出力される。

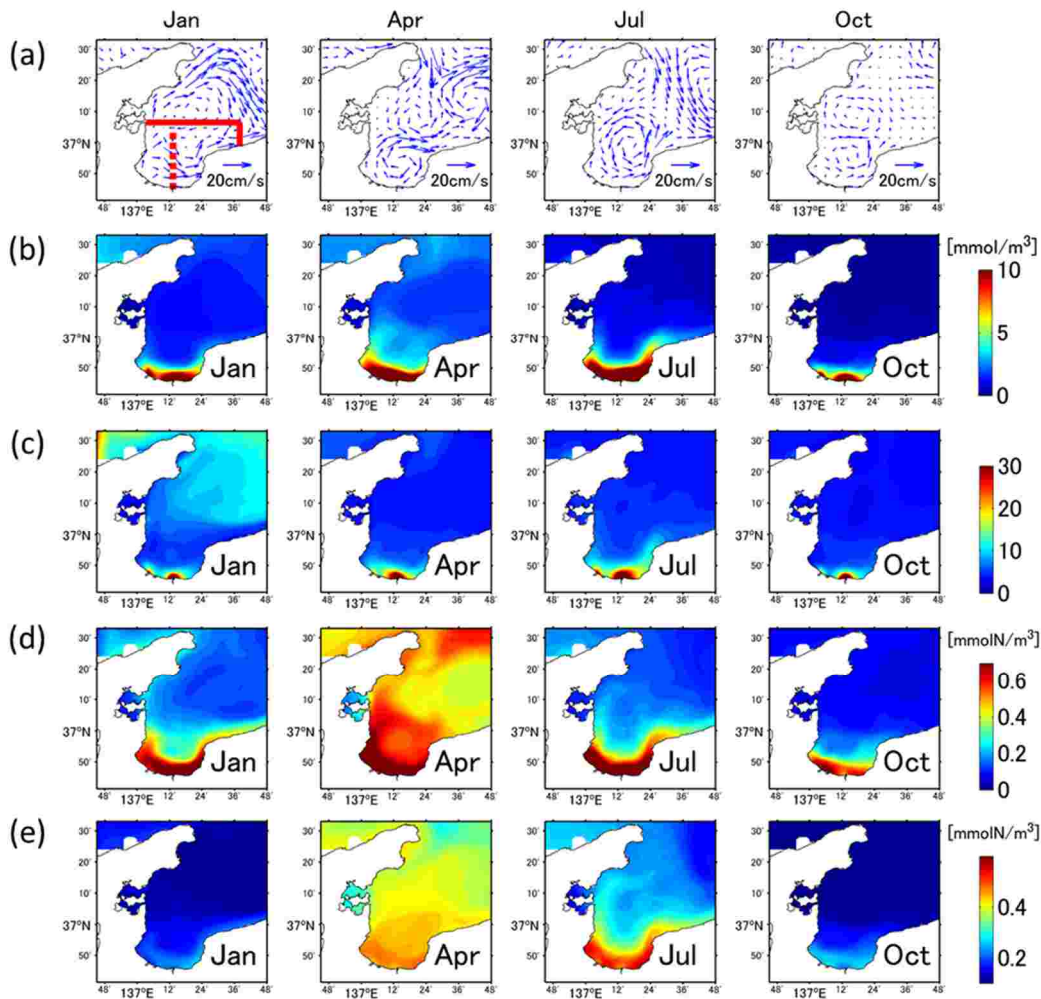
富山湾モデルでは、富山湾に流入する5本の一級河川(小矢部川、庄川、神通川、常願寺川、黒部川)の河川流量をそれぞれの河口のグリッドから与えている。河川流量データは国土交通省が公開している水文水質データベースの日別流量データを利用した。これら河川の栄養塩濃度には、辻本(2012)および富山県水産試験場(2007)を参考に各河川の栄養塩濃度を検討し、表(3)-4に示す値を与えた。

表(3)-4 富山湾モデルで各河川に与えたDIN濃度及びDIP濃度

	DIN (μM)	DIP (μM)	N/P比
小矢部川	80.0	5.0	16.0
庄川	7.8	2.2	3.5
神通川	80.0	2.5	32.0
常願寺川	39.0	2.3	17.0
黒部川	7.8	2.2	3.5

富山湾の海底湧水は、流量は河川水の25%程度だが栄養塩供給量は河川に匹敵する(八田ほか, 2005)ため、富山湾の低次生態系をより高精度で再現するためには海底湧水による栄養塩供給も考慮する必要がある。しかしながら海底湧水の正確な流量や湧出場所に関する観測データは乏しいため、海底湧水を想定する計算では海底湧水の流量をモデルに陽的に導入せず、河川の栄養塩濃度を2倍にして対応した。陸域からの栄養塩供給源が河川水のみで海底湧水なしの場合をCase1、河川水の栄養塩濃度を2倍にした海底湧水ありの場合をCase2として計算を行い、海底湧水の有無で富山湾の低次生態系にどのような変化が生じるか比較を行った。

Case1のモデル計算から得られた、2007年1月、4月、7月10月の月平均の流行流速、DIN濃度、N/P比、植物プランクトン、動物プランクトンの水深1mにおける分布を図(3)-33に示す。これらのモデルの計算結果をサブテーマ(1)に提供し、富山湾陸海統合管理の検討が行われた。



図(3)-33 2007年1月、4月、7月、10月の水深1mにおける月平均の(a)流行流速、(b)DN濃度、(c)N/P比、(d)植物プランクトン、(e)動物プランクトンの水平分布図

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究ではスルメイカ・ズワイガニ幼生の輸送・生残モデルを構築し、過去10数年の資源量変化を再現し、それぞれの経年変動の要因を数値実験より検討した。スルメイカ幼生の経年変動には親魚の数が、ズワイガニ幼生の経年変動には親ガニの数と分布密度が重要であることが分かった。どちらの計算も親の保護が大事であることを示唆している。

スルメイカやズワイガニのような生物種の親を保護するために、海洋保護区の設置が有効である。保護の効率を高めるために、従来の場所と時期を固定する保護区に加えて、海流や水温分布の違いに応じて場所と時期を年ごとに変更する動的保護区を新たに提案したい。ズワイガニを例として、動的保護区の有効性について検討した。静的保護区との比較では、動的保護区の方が平均で1.87倍粒子の保護割合が高くなった。さらに、保護区の面積が小さくなるとこの倍率が高くなり、動的保護区の有効性を証明した。

日本では愛知目標で定められた海域の10%を保護区化する目標達成に向けて、日本近海で海洋保護区の設置に力を入れている。海洋保護区には、生物多様性の保全や、科学的なデータに基づいて設置することが求められている(向井, 2009) (40)。本研究では孵化幼生の輸送・生残モデルを用いて、スルメイカには静的保護区、ズワイガニには動的保護区の導入を検討してきたため、科学的な根拠に基づいた方法と言えるが、実際に静的保護区と動的保護区を設置することは簡単ではない。数値モデルの解像度と将来予測の精度といった技術的な問題と、漁業者の理解を得るといった行政的な問題を解決していく必要がある。

## (2) 環境政策への貢献

### < 行政が既に活用した成果 >

特に記載すべき事項はない。

### < 行政が活用することが見込まれる成果 >

本研究で新たに提案した動的海洋保護区は、これまで我が国の海洋保護区として定義されていない新たな考え方である。動的海洋保護区の導入により、より効果的な保全が行えることも示されており、新たな海洋保護区を設置する参考となるものである。スルメイカ、ズワイガニともに近年資源の減少が報告されており、我が国にとって重要な水産資源の持続的利用の観点から、両種の保全に向けた検討が進められることが期待される。

生物多様性条約において、積極的に進められている生物学的・生態学的に重要な海域 (EBSA) にスルメイカ、ズワイガニの産卵場はまさに該当する海域である。それらの海域が今後地球温暖化の影響を強く受ける可能性が示されたことで、関係諸国と連携した国際的なEBSAの設定に向けた議論を開始するきっかけとなれば幸いである。

これまで、日本海の高次生態系を対象とした地球温暖化の影響に関する知見は少なかったが、本研究により、温暖化が日本海の高次生物の回遊経路、再生産戦略に大きな影響を及ぼす可能性を示した。海洋生物資源への温暖化対策が、我が国の環境政策として今後さらに盛り込まれていくことが期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### < 論文 (査読あり) >

- 1) X. Mao, X. Guo, Y. Wang and K. Takayama (2019): Influences of global warming on the larval survival and transport of snow crab (*Chionoecetes opilio*) in the Sea of Japan. Sustainability, 11, 2198, doi: 10.3390/su11082198

#### < その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) 郭新宇・王玉成・久保田泰士・吉江直樹 (2019) : 海洋環境保護区 (MPA) の設定法。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。国際エメックスセンター。158-171
- 2) 郭新宇・眞野能・高山勝巳・吉田尚郁 (2019) : 富山湾統合モデル。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。国際エメックスセンター。308-318

### (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) X. Guo, Y. Wang, T. Kubota, N. Yoshie: The 18th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, Okinawa, 2015  
Understanding interannual variations of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) resources in the Japan Sea and South of Japan
- 2) N. Yoshie, X. Guo, Y. Wang, and T. Kubota: Japan Geoscience Union Meeting 2015, Chiba, 2015  
Numerical analysis of controlling factors of the interannual variations of Japanese common squid around Japan,
- 3) X. Guo, Y. Wang, T. Kubota, and N. Yoshie: PICES 2015 Annual Meeting, Qingdao, 2015  
Modeling interannual variations of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) resources around Japan
- 4) 久保田泰士・郭新宇・王玉成・吉江直樹: 日本海洋学会2016年度春季大会、東京、2016

### 日本海西部海域におけるズワイガニ幼生の輸送シミュレーション

5) X. Guo, Y. Wang, T. Kubota and N. Yoshie: EM ECS '11 SeaCoasts XXVI Joint Conference, St Petersburg, Russia, 2016

On the interannual variations of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) resources in the Japan Sea

6) 久保田泰士・郭新宇・王玉成・吉江直樹 第2回沿岸生態系の評価・予測に関するワークショップ、愛媛、2016  
日本海西部海域におけるズワイガニ幼生の経年変動とその要因

7) Y. Wang, X. Guo and N. Yoshie: 10<sup>th</sup> WESTPAC International Science Conference, Qingdao, China, 2017

Study on the interannual variations of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) resources in the Japan Sea

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない

### (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

## 8. 引用文献

- 1) Kim, J.-J., Stockhausen, W., Kim, S., Cho, Y.-K., Seo, G.-H., Lee, J.-S., (2015): Understanding interannual variability in the distribution of, and transport processes affecting, the early life stages of *Todarodes pacificus* using behavioral-hydrodynamic modeling approaches. *Progress in Oceanography*, 38, 571-583.
- 2) 桜井泰憲(2014): スルメイカの繁殖生態と気候変化にตอบสนองする資源変動, 水産振興, 559号, 東京水産振興会出版, ISSN 1343-6074
- 3) Yamamoto, J., Masuda, S., Miyashita, K., Uji, R., Sakurai, Y., (2002): Investigation on the early stages of the 0 mm astrephid squid *Todarodes pacificus* near the Oki Islands (Sea of Japan). *Bulletin of Marine Science*, 71, 987-992.
- 4) Yamamoto, J., Shimura, T., Uji, R., Masuda, S., Watanabe, S., Sakurai, Y., (2007): Vertical distribution of *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) paralarvae near the Oki Island, southwestern Sea of Japan. *Marine Biology*, 153, 7-13.
- 5) 上田祐司, 養松郁子, 藤原邦浩, 松倉隆一, 山田達哉, 山本岳男, 本多直人 (2015): 平成26年(2014)年度ズワイガニ日本海系群の資源評価, <http://abchan.fra.go.jp/digests26/index.html>.
- 6) Kon T, Adachi T, Suzuki Y., (2003): Distribution of snow crab, *Chionoecetes* spp., larvae off Wakasa Bay in the Sea of Japan. *Fisheries Science*, 69, 1109-1115.
- 7) 安達二郎(1994): 日本海西部海域におけるズワイガニの生態と資源. 島根県水産試験場研究報告第8号, pp. 127-170.
- 8) 小西望美, 瀬戸雅文, 山本岳男, 高橋庸一 (2011): ズワイガニ人工幼生の遊泳生態に基づいた数値幼生モデルの開発. 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.67, No.2, I310-I315.
- 9) 木所英昭, 後藤常夫, 高原英生, 松倉隆一 (2015): 平成27(2015)年度スルメイカ秋季発生系群の資源評価, <http://abchan.fra.go.jp/digests27/index.html>.
- 10) Nakada, S., Hirose, H., Senjyu, T., Fukudome, K., Tsuji, T., Okei, N., (2014): Operational ocean prediction

experiments for smart coastal fishing. Progress in Oceanography, 121, 125-140.

- 11) 辻本良 (2012) 富山湾奥部における表層水中の栄養塩と植物プランクトン現存量の季節変動, 沿岸海洋研究, 第49巻, 第2号, 127-137.
- 12) 富山県水産試験場 (2007) 富山湾の漁場環境 (2006) - 水質・底質・藻場・餌料環境 -, 平成18年度富山湾漁場環境総合調査報告
- 13) 八田真理子, 張 勁, 佐竹洋, 石坂丞二, 中口譲 (2005) : 富山湾の水塊構造と河川水・沿岸海底湧水による淡水フラックス, 地球化学, 39, 157-164.



## III . 英文Abstract

**Development of methods for ocean management in the Japan Sea, an international enclosed sea that includes continental shelves and islands**

Principal Investigator: Takafumi YOSHIDA

Institution: Northwest Pacific Region Environmental Cooperation Center  
 5-5 Ushijimashin-machi, Toyama City, Toua,a 930-0856, JAPAN  
 Tel: +81-76-445-1571 / Fax: +81-76-445-1581  
 E-mail: yoshida@npec.or.jp

Cooperated by: Center for Marine Environmental Studies, Ehime University  
 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

[Abstract]

Key Words: Japan Sea, East China Sea, Global warming, Low- and high-trophic level, Future forecasting, International management, Land-ocean integrated management

The Japan Sea is a semi-enclosed international sea area which is surrounded by the Eurasia Continent and the Japanese archipelago. In recent years, the Japan Sea faced rapid environmental changes. The first change is global warming. It is well known that the rise of seawater temperature occurs much faster in the Japan Sea than in other sea areas. The second change is rapid environmental changes in the East China Sea due to rapid economic growth in the littoral countries. As the East China Sea is located in the upstream part of the Japan Sea, seawater, heat and various substances are transported from the East China Sea to the Japan Sea by the Tsushima Warm Current.

When we discuss the coastal management in the Japan Sea, it is necessary to identify how much influence these two changes have on the environment of the Japan Sea. Thus, our group developed new numerical ecosystem models: coupled physical-ecosystem models and a particle tracking numerical model for transport and survival of high trophic species of the Japan Sea. Using these numerical ecosystem models, we tried to understand the impacts of global warming and the environmental changes in the East China Sea on the Japan Sea as well as the mechanism of the impacts.

The Japan Sea receives strong impacts from global warming and from the environmental changes in the East China Sea. The sea water temperature will rise continuously in the next 100 years, and it will be accelerated if the future climate change has the bad scenario. The environment of coastal areas of Japan is strongly controlled from the East China Sea. The study shows that the Japan Sea is more sensitive to external/internal changes than we imagined.

Through our research, it is clear that an effective coastal management in the Japan Sea cannot be realized by existing local-level coastal managements but by a coastal management which has a wider view on global warming and various environmental changes in the East China Sea. So we proposed a new idea “Japan Sea Three Layer Management”. Japan Sea Three Layers Management aims to conserve the coastal environment with three different scale management.

Three-scale managements mean three different geographical scales, 1) wide-scale management: focusing on the Japan Sea and the East China Sea, 2) middle-scale management: focusing on the flow of the Tsushima Warm Current, and 3) local-scale management: focusing on each coastal area and bay on the Japanese coast. In each layer, predicted impacts and their mechanisms were studied and appropriate adaptations and management methods have been proposed.

Unfortunately, the Japan Sea has not received any strong attention in the ocean policy of Japan until now. We have to see the Japan Sea in a different light and implement environmental conservation and marine management more actively in the future. In addition, the Japan Sea is an international semi-enclosed sea area and international cooperation among relevant countries is essential for its management. In this area, there are several international environmental cooperation frameworks to pursue marine environmental conservation. It is recommended that the Japanese government use these frameworks more effectively for the conservation of the Japanese coastal area. We hope the outcomes of this project can contribute to the conservation of the Japan Sea.