

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

温暖化に対して脆弱な日本海の循環システム変化がもたらす

海洋環境への影響の検出

(2-1604)

平成28年度～平成30年度

Global warming impacts on thermohaline circulation and subsequent biogeochemical change
in the Japan Sea

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

九州大学 応用力学研究所

国立研究開発法人海洋研究開発機構

〈研究協力機関〉

静岡大学

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		
II. 成果の詳細		
II-1 海水循環および炭素循環の変動の検出	• • • • •	13
(国立研究開発法人国立環境研究所)		
要旨		
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		
II-2 深層水の構造変化とそれともなう深層流の変化	• • • • •	34
(九州大学 応用力学研究所)		
要旨		
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		
II-3 海洋生物生産量の変動の検出	• • • • •	53
(国立研究開発法人海洋研究開発機構)		
要旨		
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

III. 英文Abstract 70

I. 成果の概要

課題名 2-1604 温暖化に対して脆弱な日本海の循環システム変化がもたらす海洋環境への影響の検出
 課題代表者名 荒巻 能史（国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター
 炭素循環研究室主任研究員）

研究実施期間 平成28～30年度

累計予算額 116,038千円

（うち平成28年度：39,335千円、平成29年度：39,335千円、平成30年度：37,368千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 日本海、海水循環、炭素循環、溶存酸素、化学トレーサー、CO₂関連化学種、基礎生産量、海色衛星、係留観測、シミュレーションモデル

研究体制

- (1) 海水循環および炭素循環の変動の検出(国立研究開発法人国立環境研究所)
- (2) 深層水の構造変化とそれにもなう深層流の変化(九州大学 応用力学研究所)
- (3) 海洋生物生産量の変動の検出(国立研究開発法人海洋研究開発機構)

研究協力機関

静岡大学

1. はじめに(研究背景等)

日本海はユーラシア大陸と日本列島に挟まれた閉鎖性の強い縁辺海である一方、その最大水深は3700m 以上もあり、大洋で見られる様々な海洋現象が存在していることから「ミニチュア大洋」とも呼ばれている。例えば、冬季の北西部では結氷するほどに冷やされて密度が大きくなった表面海水が海洋内部に沈み込む、独自の鉛直的な大循環システムが存在している。大洋における循環システムがおよそ2000年のタイムスケールであるのに対して、日本海はおよそ100年と推定されているので、日本海をモニタリングすることで、あたかもDVDの倍速再生のように地球規模の海洋環境の変化を観察することが可能となる。実際、過去数十年間に日本海深層水中の水温が上昇、溶存酸素濃度が減少していることが明らかになっている。IPCC第四次評価報告書では「日本海は地球温暖化に対して最も脆弱な海域のひとつ」として継続的な監視の重要性を訴えている。本研究班は、過去の推進費課題(A-1002)によって日本海深層の真の溶存酸素消費量が約2μmol/kg/yearであることを見いだした。これは、表層水の深層への沈み込みが今後完全に停止してしまうと、100年以内に日本海深層が無酸素化することを意味する。さらに、温暖化にもなう表層水の深層への沈み込み規模が最近40年ではそれ以前の15～40%程度にまで激減していることも突き止めた。これらの発見は、温暖化の進行にもなう日本海の海水循環システムが急激に変化し始めていることを示唆している。

2. 研究開発目的

本研究では、以下に記す3つのサブテーマが有機的に連携しながら、日本海を対象として海水循環の変化や酸素減少傾向の監視を継続するとともに、海水循環システムの変化にもなう最近数十年における海洋環境の変化、すなわち生物生産や炭素循環の変化、さらには海洋酸性化の進行度などの検出を目指す。

サブテーマ(1)：海水試料中の化学トレーサーの分析と過去の観測データを数値モデルに組み込み、海水循環の変動を検出する。また、表層pCO₂やCO₂化学種濃度の断面観測を実施し、ニューラルネットワーク法を適用することで日本海全域のpCO₂分布を推定する。ここで得たアルゴリズムを歴史的資料にも適用することで時間変動を把握し、炭素循環の変化、酸性化の進行度を検出する。さらに、日本海流動・物質循環シミュレーションモデルを構築し、再現計算・感度解析を通じて温暖化の影響を定量的に評価するとともに、将来予測を行う。

サブテーマ(2)：既往観測資料及び新たに得られる海水特性と流れのデータを用いて、数十年スケールでの日本海深層の構造的な変化を明らかにし、他のサブテーマの結果との相互解析により、各種化学物質の分布を海洋物理学的視

点から検証する。

サブテーマ(3): 海水試料中の溶存酸素濃度の分析と過去の観測データを組み合わせて解析し、全水柱における溶存酸素存在量の経年変化を見積もる。また、基礎生産量の現場観測に基づき、衛星データによる日本海の基礎生産量推定アルゴリズムを開発する。さらに、これを衛星データ取得可能な最近の約20年に適用して生物生産量変動の検出を目指す。

本課題で得られる成果は、我が国に最も身近な縁辺海の近未来の環境変動予測だけでなく、温暖化に対するグローバルな海洋応答予測に資するものとなる。また、日本海は世界有数の水産資源の宝庫である。日本海の気候変動にともなう環境変動の検出とその将来予測は、我が国の水産業の持続性の確保及び振興を図る上で喫緊に求められる課題である。

3. 研究開発の方法

(1) 海水循環および炭素循環の変動の検出

1) 化学トレーサー分析を用いた海水循環変動の解析

海水試料中の化学トレーサーの分析と過去の観測データを数値モデルに組み込み、海水循環の変動を検出する。本研究では、過去データの蓄積のある、炭素14、トリチウムおよびクロロフルオロカーボン類(通称フロン類 CFCs)を海水循環トレーサーとして使用した。大学練習船等の実習及び研究航海を利用して、船上にてCTD/RMSを用いて海水特性の鉛直分布を測定するとともに海面から海底直上までの最大24層で多層採水を行い、各層から各成分分析用の海水を採取して適切な前処理等を行って実験室に持ち帰った。

2) CO₂関連化学種の分析・解析を用いた炭素循環変動の解析

CO₂化学種濃度の断面観測を実施し、炭素循環の変化、酸性化の進行度を検出する。CO₂関連化学種は全炭酸濃度、全アルカリ度およびpHを対象とした。化学トレーサーと同様に、船上にてCTD/RMSを用いて海面から海底直上までの最大24層で多層採水を行い、各層から各成分分析用の海水を採取して適切な前処理等を行って実験室に持ち帰った。

3) 表層pCO₂観測と観測データベースによるpCO₂分布推定

日本海の炭酸系の時空間変動を明らかにするために、大学練習船等にCO₂計と気液平衡器を載せ、260ppmから460ppmのCO₂標準ガス計4本を用いてCO₂計を約6時間毎に校正しながら、航路上のほぼすべてにおいて表層海水中のCO₂を連続的に測定した。また、観測データと衛星データの統合から日本海表層のpCO₂水平分布推定を開発した。本推定には、本研究で収集した観測データのほかに国際的なpCO₂観測データベースであるSurface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT)に登録された日本海の観測データを利用した。推定手法にはニューラルネットワーク手法を用い、水温・塩分・混合層深度データとして北西太平洋海洋長期再解析(FORA-WNP30)の出力結果を、クロロフィル濃度データはMODIS-Aquaのデータセットを利用した。さらに、推定されたpCO₂水平分布とともに、アメリカ海洋大気局の大気CO₂濃度データと、アメリカ航空宇宙局のCross-Calibrated Multi-Platform海洋表層風速データを活用して、日本海における大気海洋間CO₂フラックスを推定した。

4) 流動・物質循環モデルの構築および再現計算による溶存酸素の長期減少プロセスの解明

日本海底層の溶存酸素濃度の長期減少傾向の要因・プロセスを明らかにするために、日本海流動・物質循環シミュレーションモデルを構築し、再現計算を通じて温暖化の影響を評価する。本研究では、先行課題(推進費B-0906)において東シナ海を対象に構築され、その後改良が重ねられた3次元流動・物質循環モデルを用いた。解析領域は、日本海と東シナ海を含む東経116.5°～155.0°、北緯23.0°～53.4°に設定した。水平解像度は東西方向1/12°、南北方向1/15°とし、鉛直方向は海面から6000m深までを62層(層厚:500m以下では2～80m、500～2700m深では100m、2700～6000m深では150～500m)に分割した。解析対象期間は2001～2010年とし、気象条件には気象庁のJRA-55再解析データ(3時間値)を与えた。外洋の側方境界には、FORA-WNP30の残差流・水温・塩分、NAO.99bの潮位・潮流、World Ocean Atlas 2009の水質を与えた。数値計算には国立環境研究所のスーパーコンピュータシステムを使用した。

(2) 深層水の構造変化とそれにとともなう深層流の変化

1) 深層流のrevisit観測

深層流の長期的な変動傾向を調べるために、日本海盆東部と大和海盆南部に流速計を係留し、深層流の直接測流を実施した。これらの海域では過去に深層流の実測が行われており、今回得られたデータと比較することにより、流れの長期的な変動を評価した。

2) Sta.PM5での深層流の計測

大和海盆西部のSta.PM5に流速計を係留し、深層流を計測した。この観測点(37° 42.0' N 134° 42.0' E)は気象庁のモニタリングポイントの一つであり、1960年代から水温、塩分、溶存酸素量などの観測が継続されている。これらのデータに基づき、日本海深層の昇温や溶存酸素量の漸減が議論されてきたが、流れに関する情報が皆無であったため観測結果の解釈には限界があった。そこで、930m、1720m、2450mの3層に流速計を係留し、1年間にわたる深層流の実測を行うことで、当該海域深層で明らかになっている昇温や溶存酸素量漸減のメカニズム解明に資することとした。

3) Argoフロートによる広域的な海洋構造の変化の把握

日本海全域の海洋構造の変化を明らかにするために、Argoフロートのデータを解析した。Argoフロートとは任意の水深(通常は2000m)から海面までの間を自動的に浮き沈みして水温や塩分等を測定することができる装置で、国際的なプロジェクトのもとで日本海にも数多くの装置が投入されている。本研究では、全球気象通信回線(GTS回線)上に流通している2002~2016年の水温プロファイルデータを抽出した。これらデータ群を、極前線の南北、大和堆の東西で4つの海域に分類し、さらに3年ごとの期間に分けて、各海域の水温分布の時間変動を評価した。なお、本研究テーマは推進費中間報告会において評価委員より「Argoフロートで得られるデータを研究に反映できないか」との指摘を受けて開始したものである。

(3) 海洋生物生産量の変動の検出

観測航海において採取された海水中の溶存酸素濃度は、改良ウィンクラー法を用いて船上で測定された。繰り返し測定によって得られた測定精度は、約0.2 μ mol/kgであった。測定に用いたヨウ素酸カリウム標準物質は、国家計量機関である産総研計量標準総合センター(NMIJ)から配布されている認証標準物質を用いた。また、観測航海において海水を採取し、植物プランクトン量と基礎生産量の現場観測を実施した。植物プランクトンの指標であるクロロフィルa色素を蛍光光度計で測定し、各測点で植物プランクトンの鉛直的な分布変動を調査した。同時に、植物プランクトンのサイズ組成および高速液体クロマトグラフィー分析による植物プランクトン群集組成解析も実施した。基礎生産量は現場で採水した海水を使用し、炭素安定同位体を用いた植物プランクトンの光合成による炭素取り込み実験により見積もった。

さらに、衛星データを用いて最近20年程度における基礎生産量の推定法の開発を試みた。米国NASAのAqua衛星に搭載されている海色センサーMODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)の全球クロロフィルa濃度、PAR(光合成有効放射)、海面水温のデータをOcean Color Webより入手し、日本海のサイズで切り出して解析に用いた。衛星ベースの基礎生産量の推定は、日本周辺海域において一般的に用いられている既存モデルを改良することによって算出した。解析ではクロロフィルa濃度及び基礎生産の衛星推定値と、本研究で得られた現場観測データを比較し、精度の検証を行った。基礎生産の推定に関しては、誤差要因を検討して基礎生産モデルの改良を行った。さらに、基礎生産の月平均及び年平均値を計算して季節変動及び経年変動も調べた。

4. 結果及び考察

(1) 海水循環および炭素循環の変動の検出

1) 化学トレーサー分析を用いた海水循環変動の解析

日本海の3つの海盆(日本海盆、大和海盆、対馬海盆)すべてにおいて、炭素14(放射性炭素 $\Delta^{14}\text{C}$)、トリチウム(放射性水素 ^3H)およびクロロフルオロカーボン類(通称フロン類 CFCs)の鉛直分布を得た。深度500~2000m程度の水塊、すなわち深層水では、各海域における $\Delta^{14}\text{C}$ には日本海盆 \approx 対馬海盆 $>$ 大和海盆の関係があった。一方、2000m以深では、日本海盆ではほぼ一定の値をとるのに対して、大和海盆では海底直上で $\Delta^{14}\text{C}$ が高くなる傾向があった。これは、日本海盆の底層水が大和海盆底層に流入している可能性を示唆するものと考えられた。対馬海盆における底層水 $\Delta^{14}\text{C}$ の先行研究との比較から、2000~2001年の底層水新形成以降に新たな底層水の形成がなかったことが明らかになった。各海盆におけるトリチウムの鉛直分布を比較すると、大和海盆および対馬海盆の2000m以深では検出限界以下であるのに対して、日本海盆では微量ながら海底直上まで有意にトリチウムが検出された。これは、当該海域の底層水に熱塩循環によって新しい水塊が取り込まれたことを示唆するものであるが、上述の $\Delta^{14}\text{C}$ の結果と

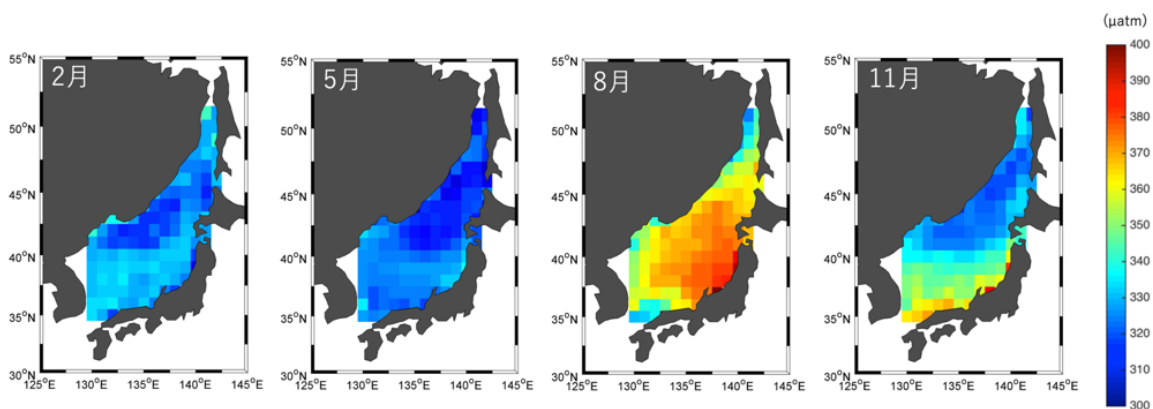
は明らかに相反する結果であり、今後の詳細なデータ解析が必要である。

2) CO₂関連化学種の分析・解析を用いた炭素循環変動の解析

日本海の広範な海域におけるCO₂関連化学種の観測をもとに、全炭酸濃度に占める人為起源CO₂濃度を推定した。その結果、日本海最深部に当たる日本海盆3700m深においても16.3μmol/kgが検出され、日本海はすでに水柱全体に人為起源CO₂の影響が及んでいることが明らかになった。深度500m、1000mおよび2000mにおける人為起源CO₂濃度平均値は、それぞれ38.8±7.9μmol/kg、1000mは28.0±7.0μmol/kg、2000mは23.3±8.0μmol/kgと推定された。これは、熱塩循環による表層水の深層への沈み込みが顕著な北大西洋における濃度（2000m以深：0～20μmol/kg）と比べても極めて高く、日本海の熱塩循環（深層循環）が海洋大循環に比べて非常に短いために外洋域に比べてより早く深層に広く人為起源CO₂が侵入していることを示唆しているものと思われる。先行研究との比較から、1999～2016年の最近17年間に2000m深平均で人為起源CO₂濃度が1.5倍以上に増加していることが示唆された。2000～2001年冬季に観測された底層水の大規模な新形成以降に新たな底層水形成が認められないことを考慮すると、この急激な増加は、大気から熱塩循環を介して深層へ人為起源CO₂が過剰に付加されたわけではなく、日本海の熱塩循環の弱体化が底層水の滞留時間を増大させ、その結果として何らかの理由により有機物分解が促進した結果であると考えた。つまり、温暖化の進行による海水循環システムの変化が深海での炭素循環の様式を変化させる可能性を示唆したものと思われる。一方、このような人為起源CO₂濃度の急激な増加にともないpHの低下も外洋域に比べて顕著であり、1000m深平均で0.096±0.024、2000m深平均で0.080±0.028と見積もられた。さらに、海洋酸性化の指標である炭酸カルシウム飽和度を算出すると、産業革命以前は500m以深が未飽和海域であったが現在は深度200～300mにまで上昇していることも明らかとなり、海洋生態系への影響が懸念される事態であることも分かった。

3) 表層pCO₂観測と観測データベースによるpCO₂分布推定

日本海の表層炭酸系の時空間変動を明らかにするために、北海道大学水産学部附属練習船・おしよ丸、および長崎大学水産学部附属練習船・長崎丸を用いて3年間で計5回の観測を実施し、観測海域や時期により海洋物理生物的な変動によりpCO₂が大きく変化することを示した。さらに国際的なpCO₂観測データベースであるSurface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT)に登録された日本海の観測データも利用して、ニューラルネットワーク手法を用いて海面水温・塩分・混合層深度・クロロフィル濃度分布からpCO₂分布を推定し、大気海洋間CO₂フラックス分布とCO₂交換量を評価した。再現されたpCO₂分布（図I-1）は、春季に最小、夏季に最大となる季節変化を示した。これは太平洋黒潮域の変動パターンに酷似しており、日本海の表層水が黒潮を起源とする対馬海流の影響を受けていることを強く示唆している。大気海洋間CO₂フラックス分布結果から、北海道沖の北西部やウラジオストク沖が強い吸収域であることが示された。同海域は日本海固有水の主要な形成域であり、吸収されたCO₂が効率よく底層へと輸送されるメカニズムが存在することを示唆しており、上述した人為起源CO₂濃度が海底直上で検出された観測および解析結果を強く支持するものである。したがって、今後の温暖化の進行によって固有水の形成、すなわち熱塩循環が弱化すると、日本海表層におけるCO₂吸収量が大幅に低下することを意味することになる。



図I-1 推定期間（1998～2014年）平均した2月、5月、8月、11月のpCO₂分布推定結果

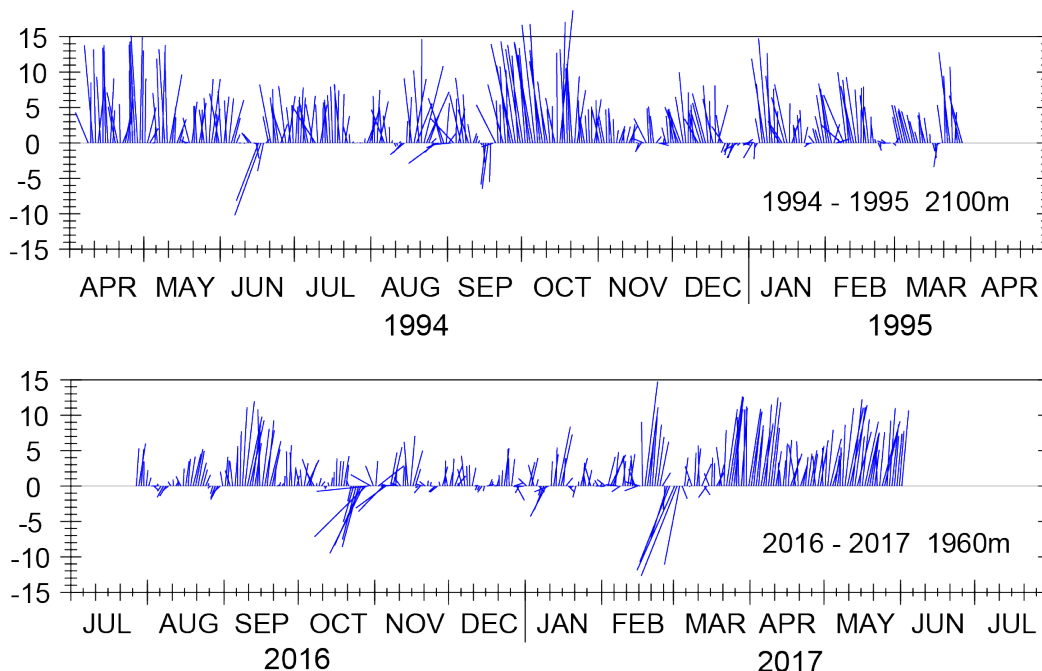
4) 流動・物質循環モデルの構築および再現計算による溶存酸素の長期減少プロセスの解明

日本海底層の溶存酸素濃度の長期減少傾向の要因・プロセスを明らかにするため、3次元流動・物質循環高解像度モデルを構築し、2001～2010年の長期再現シミュレーションを実施した。得られた計算値を観測値と比較したところ、2000m深の水温については概ね再現性が高かった一方で、溶存酸素量については観測値と同じ減少傾向を示したものの、大和海盆における溶存酸素量およびその減少速度はそれぞれ過小および過大となっており、定量的な再現性に課題が残された。再現期間において水温が比較的低い2002～2003年と高い2009～2010年のそれぞれ2年間を対象とし、流速および溶存酸素量の2年間平均値を比較したところ、両期間において明瞭な差が見られた。例えば、1000m深では寒冷期(2002～2003年)に日本海盆の東部や北東部に時計回りの循環流が発生し、タタール海峡から日本海盆・大和海盆へと南下する比較的溶存酸素が高い水塊の輸送が見られるのに対して、温暖期(2009～2010年)には東部の循環流が反時計回りに、北東部では北上流に変わり、大和海盆を中心に低い溶存酸素の水塊が拡がる様子が表現された。また、日本海盆・大和海盆における鉛直断面の経時変化より、溶存酸素の低下は1000～2000m深の極小層を中心として流向の変化によって生じていることが示された。以上のように、日本海盆・大和海盆の深層・底層に見られる溶存酸素量の変動は流動への依存性が高く、溶存酸素量の長期減少傾向は熱塩循環の変化によってもたらされていることが示唆され、これまでの観測事実と矛盾しない結果が得られた。

(2) 深層水の構造変化とそれともなう深層流の変化

1) 深層流のrevisit観測

日本海盆東部で1994～1995年と2016～2017年に得られた約2000m深の平均流を比較(図I-2)したところ、流向はどちらの期間もほぼ同じ北向きであったのに対し、流速は、1994～1995年は5.17cm/s、2016～2017年は3.28cm/sと約2/3に減少していた。一方、流れの標準偏差は両観測とも同程度となっており、渦活動についてはこの22年間に大きな変動がなかったことが示唆された。これらの結果は温暖化の影響による深層流の弱化を示唆したものと想定された。



図I-2 日本海盆東部の約2000m深における流れのスティックダイヤグラム

上段：1994～1995年、下段：2016～2017年

そこで、温暖化以外で影響を与える得る要因として、観測位置の違い、係留深度の違い、対馬海流の影響を評価するとともに、測器の差異による影響を調べるために大和海盆南部において2種類の流速計の比較実験を行った。しかし、いずれの要因も2回の測流結果の差を説明する決定的な要因とは認められなかった。以上のことから、この結果は温暖

化による深層流の弱化を世界ではじめて直接観測したものと考えられ、温暖化による日本海の熱塩循環の弱化を示す有力な証拠を発見したことになる。同様に、大和海盆南縁についても、2009～2011年の観測結果と、2016年5月～2017年1月に同一地点・深度で得られた測流結果を比較した。その結果、平均流向・流速、標準偏差とも各期間で同程度の値を示し、最近8年間では平均流にも渦活動にも大きな変化がなかった。また、流れの鉛直的な構造を調べたところ、底層で平均流速、標準偏差が若干小さくなるものの、変動の様子は各層とも類似しており、順圧的な特徴を持つことが分かった。温暖化により深層循環（熱塩循環）が弱まるのならば、その変化は最初に深層水の形成域が存在する日本海盆に現れると考えられる。大和海盆で深層流に大きな変化が認められなかった原因は深層水形成域の不在と限定的な海水交換にあると考えられる。したがって、近い将来に大和海盆や（今回観測が叶わなかった）対馬海盆でも変化の痕跡が検出される可能性は高く、今後の継続的な観測が期待される。

2) Sta.PM5での深層流の計測

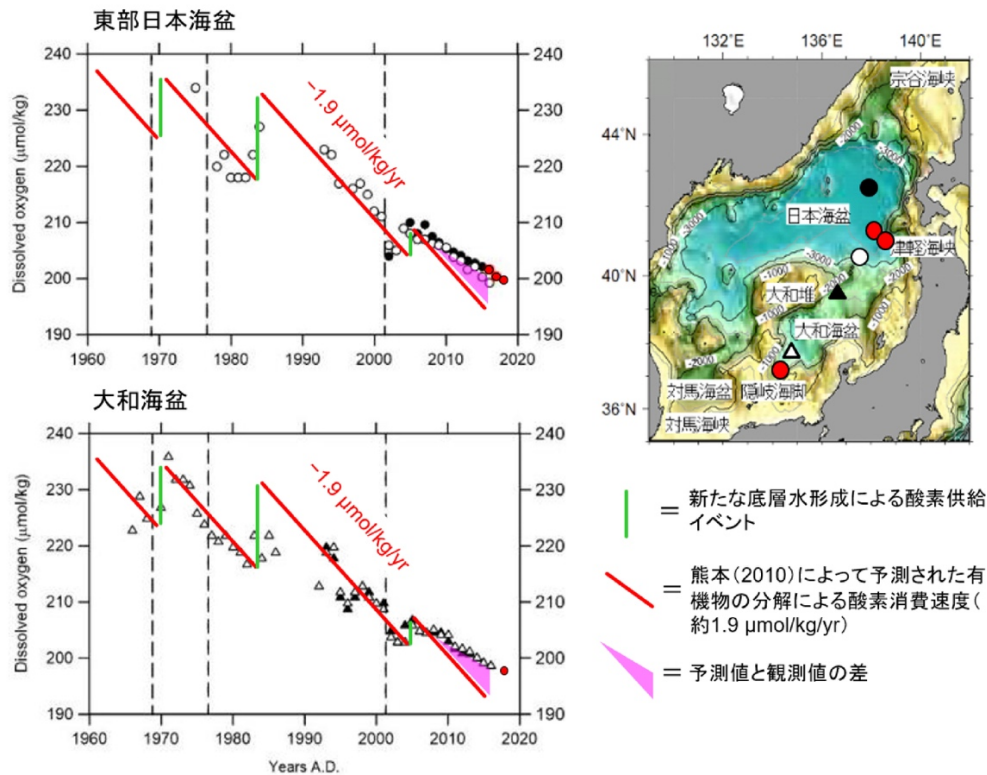
「研究開発の方法」に記載したように、観測点Sta.PM5は気象庁のモニタリングポイントとして長年にわたって水温や溶存酸素量などの観測が行われ、1960年代から続く日本海深層の昇温や溶存酸素の漸減傾向を世間一般に知らしめてきた。今回我々が実施した流れの観測によると、Sta.PM5では周年を通して南向きの流れが卓越しており、大和海盆内部の反時計回り循環の一部を構成していることが分かった。したがって、当該海域深層で確認される水温や溶存酸素量の変動傾向は、この循環流によって大和海盆北方、さらには日本海盆から移流されてきた水塊の時間変動を反映したものと考えられる。つまり、大和海盆深層における海水・物質循環の変動が、深層循環の上流に当たる日本海盆の変動に対して逐次的に起こっている可能性を明らかにしたことになる。これは、温暖化の進行による今後の深層循環（熱塩循環）の弱化と、これに続く物質循環の変化を観測および解析していく上で極めて重要な知見となる。

3) Argoフロートによる広域的な海洋構造の変化の把握

国際的なプロジェクトのもとで日本海全域に点在するArgoフロートの、2002～2016年の水温プロファイルデータを抽出・解析した。極前線の南北、大和堆の東西で4つに分類した海域におけるポテンシャル水温の鉛直分布の時間変化、および各層のポテンシャル水温の時間変化を比較したところ、日本海の深層水温（400～700m）は全域で昇温傾向にあり、特に極前線以南で昇温率が大きいことが分かった。このような海域的な昇温傾向の違いは、対馬海流系の暖水（熱源）の分布や、日本海固有水の形成域の位置と関係している。また各海域とも、近年（2011～2013年から2014～2016年）の水温上昇率が比較的小さくなっており、水温が低下している海域・深度も認められた。これまでは観測船等を利用した観測点による、日本および韓国EEZ（排他的経済水域）における深層2000m以深の昇温傾向が報告されていたが、今回の解析結果では深層での昇温傾向が深層水上部（上部固有水）にまで広がっており、しかも日本海全域に及んでいることを明らかにすることができた。

(3) 海洋生物生産量の変動の検出

日本海で観測された溶存酸素濃度は、概ね深度1000m以深では鉛直的にほぼ均一な分布を示しており、日本海固有水に相当すると考えられた。大和海盆及東部日本海盆における気象庁の定点観測点における深度2000mの海水中溶存酸素濃度の経時変化を解析した結果、我々は「断続平衡仮説」を提案した。すなわち、「日本海底深層水中の溶存酸素濃度は、有機物の分解による消費によって1年間の平均で約 $1.9\mu\text{mol}/\text{kg}$ ずつ減少しているが、数年から十数年に一回程度の頻度で発生する新たな底層水の形成によって表面水中の酸素が供給されるために一時的に増加する。その結果、見かけ上の平均濃度減少速度は約 $0.8\mu\text{mol}/\text{kg}/\text{年}$ となる」という仮説である（図I-3）。この仮説は、2000年くらいまでの観測結果をうまく説明したが、我々の2016～2018年の観測結果も含めて2013年以降では、実際に観測された濃度低下速度は上記仮説によって推定された速度の半分程度であったことが分かった（図I-3）。もし日本海底深層の海水循環が過去数十年間一定あったと仮定することができれば、この不一致は海洋表層から底深層に運ばれる粒子状有機物量が2013年以降に減少し、溶存酸素の消費速度が低下したことを示唆していることになるが、この期間に顕著な基礎生産量の減少は報告されていない。これらのことから、過去数十年間に確認された底深層水中溶存酸素濃度の変動は、生物化学的要因（有機物生産量）ではなく海洋物理的要因、すなわち底深層を含めた日本海における海水循環が停滞したことが原因である可能性が高いことが明らかになった。つまり、今回の深層における溶存酸素濃度の追跡調査の結果、その濃度減少傾向が温暖化の進行にともなう深層循環（熱塩循環）の弱化により引き起こされていることを改めて浮き彫りにしたことになる。

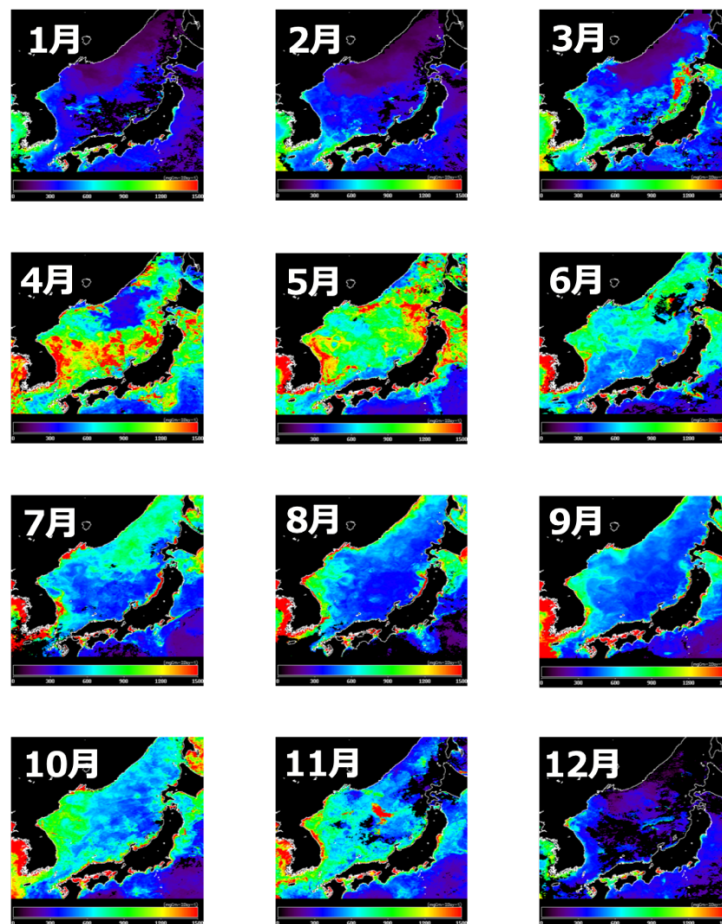


図I-3 気象庁の定点観測点（東部日本海盆：●と○、大和海盆：▲と△）における深度2000mの海水中溶存酸素濃度の経時変化。赤丸は本研究で得られた観測データを示す。

衛星データを用いて最近20年程度における基礎生産量の推定法の開発を試みた。これまでに既存のモデルを用いて日本周辺海域の基礎生産量を推定した先行研究が複数報告されているが、日本海における植物プランクトン群集や基礎生産量に関する現場観測データが致命的に少ないために、既存モデルから推定される基礎生産量は日本海での現場観測データに基づく検証が一切なされていない。そこで本研究では、3年という短期間で目的を達成するために、まず水塊構造の異なる海域かつ異なる季節において複数回に及んで集中的に現場観測を実施し、日本海における海洋生態系の知見の蓄積を行った。その結果、表面に豊富な栄養塩が存在している春季には大型珪藻がブルームを形成するが、ブルーム期である春季でも栄養塩の枯渇に伴い速やかに植物プランクトン群集組成が小型化することが明らかになった。これは、大型珪藻は栄養塩の枯渇によって増殖が大きく阻害されるとともに、ブルーム期には動物プランクトンによる大型珪藻の捕食が積極的に行われていることを示唆している。つまり、珪藻のような大型植物プランクトンは小型の動物プランクトンを介さずに直接大型動物プランクトンに捕食されるため、より上位の魚類へと効率的にエネルギーの転換が図られる。このことが豊かな日本海の漁業資源を育むことに繋がっていると考えられるが、一方で栄養塩の枯渇に伴い速やかに大型珪藻の現存量が低下することを意味している。したがって、温暖化の進行によって今後は表層の成層化がさらに強化されることが予想されるが、その結果として栄養塩が枯渇しやすくなると日本海では小型の植物プランクトンが優占となる低次生態系となることが予想される。これは、将来的に食物連鎖を介したエネルギー転換効率が低下することを意味し、従来の豊かな海洋生態系の維持が困難になることが危惧される。

こうして得られた観測データおよび知見を、観測当日の衛星データと同期することで既存モデルのアルゴリズム改良を行い、日本海に最適化された基礎生産量推定法を作成することとした。日本海における衛星観測によるクロロフィル a 濃度の値は、現場観測値に非常に近い値を示し、既存の海色衛星のクロロフィル a 濃度データが日本海において十分有用であることが分かった。現場観測による基礎生産量と既存モデルによって求めた衛星ベースの基礎生産量と比較すると、両者を比較可能な10観測点の全てにおいて衛星観測値が現場観測値と比べて過大評価となった。そこで同モデルに含まれる入力パラメータの推定誤差を検証した結果、有光層深度の誤差が大きいことが明らかになったため、現場観測による有光層内積算クロロフィル a 濃度と表面クロロフィル濃度、および有光層積算クロロフィル濃度と有光層深度との関係から

累乗関数のフィット曲線を求めて、日本海に最適化された有光層深度の推定式を提案した。新しく作成した有光層深度改良型－基礎生産推定モデルを用いて基礎生産を再計算した結果、既存モデルと比較して平均二乗誤差が0.24から0.15に減少し、これまでの過大評価を大幅に低減できることが分かった。今回開発した日本海に最適化された基礎生産量推定法(図I-4)を、MODISの観測開始以降の2003～2018年の衛星データに適用し、過去十数年スケールでの日本海における基礎生産の経年変化について議論した。本推定法を用いて日本海全域における1年当たりの基礎生産量の変動を求めると、2003～2018年の解析期間ではおよそ7%/10年の増加傾向であることが分かった。加えて、この増加傾向が気候変動指標である北太平洋十年規模振動(Pacific Decadal Oscillation: PDO)の変動とよく一致していることも明らかになった。唯一の先行研究では、我々が改良に利用した既存モデルを用いて2003～2012年の日本海の基礎生産を計算し、10年間で日本海全体の基礎生産量が約13%減少していることを示し、海水温の昇温による成層の強化に伴う栄養塩の表層への供給が弱まったことが主要因だと主張していた。そこで、今回開発した本推定法を用いて、先行研究と同じ解析領域における2003～2018年の計16年間の基礎生産の経年変動について調べた。その結果、基礎生産量は十数年の周期で増減を繰り返しており、2003～2012年はたしかに減少傾向であるものの以降はしばらく増加に転じたことが明らかとなった。先行研究では解析されなかった2013年以降も海水温の昇温が継続していることを考慮すると、我々の解析は明らかに先行研究と矛盾する結果となったが、既存モデルの改良によって過大評価の低減に努めた本推定法の結果がより正確に実態を表現しているものと考えられる。上述のように、日本海における海洋生態系に関する観測データには制限があったため、今回作成した日本海に最適化された基礎生産量推定法は日本海表層における海洋生態系の把握を飛躍的に進展させる上での重要なツールとなる。また、本推定法を海洋生態系の将来予測シミュレーションモデルとカップリングすることで、基礎生産量の将来予測にも応用できる可能性を秘めている。



図I-4 本研究で開発した基礎生産量推定法によって計算された2017年の月平均基礎生産量(イメージ図)

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

日本海全域にわたるCO₂関連化学種の観測は1990年代の国際プロジェクトの一環として実施された2例しかなく日本海における炭素循環の解明には至らない状況であったが、本研究によっておよそ20年ぶりにCO₂関連化学種の情報が得られたことに大きな意義がある。その結果、最近20年あまりで深海(2000m深)における人為起源CO₂が急増したことが明らかになった。我々は、その要因が日本海の熱塩循環の弱化による深海での有機物分解の促進であるとの仮説を提案した。もしこの仮説が成立するならば、温暖化の進行によって海洋内部のCO₂が増大すること、すなわち深海において酸性化が進行することを意味し、従来の海洋炭素循環の将来予測研究に新たな知見を与えることとなる。

大学練習船等による表層pCO₂観測では3年間で計5回の観測を実施することができ、過去20年間で20例しかなかった日本海のpCO₂観測データについて充実を図ることができた。これら観測データの充実と解析手法の高度化により、最近20年間にわたる日本海表層のpCO₂水平分布推定法を確立し、日本海全域におけるpCO₂分布の季節変化や経年変化を世界ではじめて再現することに成功した。

本研究で実施した日本海の3次元シミュレーションは、流動と物質循環の双方を力学ベースで解析するものとしては、水平・鉛直分解能の高さおよび解析期間の長さの点において他に例を見ないものである。現時点では大和海盆深海における溶存酸素量の再現性について課題を残しているが、この長期高解像度シミュレーションによって熱塩循環の変化と溶存酸素量の長期減少傾向の関係性が示されたことは極めて意義が高く、日本海の物質循環機構や気候変動影響の解明を加速させる有用な成果と言える。

日本海盆東部で1994～1995年と2016～2017年に得られた約2000m深の平均流を比較したところ、流向はどちらの期間もほぼ同じ北向きであったのに対し、流速はおよそ2/3に減少していた。この差異については、様々な検証の結果、温暖化の進行にともなう変化であるものと結論づけられた。本成果は、温暖化による深層流の弱化、すなわち熱塩循環の弱化を世界ではじめて直接観測より捉えたものである。

既存モデルの改良によって、衛星データを用いた日本海に最適化された基礎生産量推定法を確立した。これにより、観測データが限定的であった日本海表層における海洋生態系の把握を飛躍的に進展させることが可能となった。また、本推定法を海洋生態系の将来予測シミュレーションモデル等とカップリングすることで、基礎生産量の将来予測にも応用できる可能性を秘めている。

(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>

日本海深海における人為起源CO₂濃度が最近20年あまりで急増していることを明らかにし、この増加分が深海での有機物分解の影響による可能性が高いとする仮説を提案した。従来の炭素循環の概念では海洋は表層における大気中の人為起源CO₂の吸収域としての役割に焦点が当てられてきたところだが、本仮説は温暖化の進行による熱塩循環の変化という、海洋構造そのものの変化が深海のCO₂増加を促進させる可能性を見いだした最初の知見となる。今後、更なるデータの精査や解析が必要ではあるが、本成果は海洋炭素循環の将来予測の精緻化を実施していく上で極めて重要な情報を提供したものであり、現在執筆中の本成果を含む研究論文が大きなサイテーションを得る可能性は高い。また、温暖化の進行によって日本海の炭素循環がすでに変化していること、これにともなって酸性化の進行が極めて速いことを明示したことは、私たちにとって最も身近な日本海における温暖化影響の深刻さを実証したこととなる。これは行政による温暖化対策の重要性に関する啓発活動へ貢献するものと考えている。

IPCC第5次評価報告書では「現時点で全球熱塩循環の弱化を示す兆候は認められない」としながらも、「今後数十年のうちに熱塩循環が弱まることが高い確率で予測される」と述べている。本研究で明らかとなった日本海の海洋構造の変化や深層流の弱化は、これから起こる世界の海洋の「異変」の前兆である可能性があり、今後のIPCC報告書へのインプットを通じて重要な貢献を行うことが十分に可能だと考えている。

衛星データを用いた日本海に最適化された基礎生産量推定法を確立し、過去20年にわたる日本海の基礎生産量の時間変動をより高い精度で推定することを可能にした。また、3次元流動・物質循環高解像度モデルを構築し、日本

海の流動場、水温、および溶存酸素濃度の復元にも成功した。これらモデル・シミュレーションを活用した日本海の海洋生態系の経時変化と漁獲量等の分布の変遷を統合して解析を進めれば、すでに明らかになっている日本海における魚種交代や魚種サイズ変化との関係性を見いだすことにつながり、将来的な漁業資源管理や日本海沿岸の社会経済に対する適応策の提案などに貢献できるものと考えている。

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) T. SENJYU: Evolution of Marine Coastal Ecosystems under the Pressure of Climate Change, Proceedings of Coast Bordeaux and of the 17th French-Japanese Oceanography Symposium (2019)
The Japan Sea: a changing Pacific Asian marginal sea (in press)
- 2) T. SENJYU and J. YOSHIDA: La mer, 56, 3.4, 113-123 (2018)
A note on the abyssal circulation in the Japan Sea: suggestion from rotating-tank experiments
- 3) T. SENJYU and T. ARAMAKI: Journal of Oceanography, 73, 2, 235-247 (2017)
Volume transport from the Japan Basin to the Yamato Basin in the abyssal Japan Sea inferred from direct current observations

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 千手智晴、吉田次郎: 金沢大学環日本海域環境研究センター共同利用研究集会「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」(2019)
「回転水槽実験からみた日本海の深層循環」
- 2) T. SENJYU: The 20th Pacific-Asian Marginal Seas (PAMS) Meeting, Kaohsiung, Taiwan, 2019
“Weakening of deep flow in the eastern Japan Basin in the Japan Sea”
- 3) 千手智晴、吉田次郎: 2019年度地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」(2019)
「回転水槽実験によるStommel-Arons型深層循環に対する鉛直壁の効果の検討: 日本海深層流分布の解釈への応用」
- 4) 千手智晴: 第3回富山湾研究会(2019)
「富山深海長谷の中の深層流」
- 5) 千手智晴、吉田次郎: 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「東シナ海と日本海の海水循環と生物化学過程」(2019)
「日本海の深層循環に関する一考察: 回転水槽実験からの示唆」
- 6) 荒巻能史: 日本海洋学会西南支部・水産海洋学会合同シンポジウム「日本海研究の現状と今後について」(2018)
基調講演「気候変動に伴う日本海の海洋環境変動に関する研究」
- 7) 千手智晴: 日本海洋学会西南支部・水産海洋学会合同シンポジウム「日本海研究の現状と今後について」(2018)
「日本海盆東部における深層流の弱化について」
- 8) 千手智晴: 第73回日本海海洋調査技術連絡会(2018)
「日本海深層流のrevisit観測」
- 9) 荒巻能史、久保篤史、中岡慎一郎、熊本雄一郎: 日本海洋学会2018年度秋季大会(2018)
招待講演「日本海における人為起源二酸化炭素濃度の推定」
- 10) 松本和彦、笹岡晃正、熊本雄一郎、荒巻能史: 日本海洋学会2018年度秋季大会(2018)
「日本海の植物プランクトン分布・基礎生産力の時空間変動」
- 11) 熊本雄一郎、荒巻能史: 日本海洋学会2018年度秋季大会(2018)
「2004年以降日本海底層水の溶存酸素濃度が単調に減り続けているのは何故か?」
- 12) 千手智晴、磯田豊、申弘烈: 日本海洋学会2018年度秋季大会(2018)

- 「日本海盆と大和海盆における深層流のrevisit観測」
- 13) 千手智晴、申弘烈: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」(2018)
「日本海大和海盆南縁で観測された地形性ロスビー波の伝播と構造」
- 15) 中岡慎一郎、荒巻能史:日本海洋学会2017年度秋季大会(2017)
「日本海における海洋CO₂分圧観測」
- 16) 千手智晴、荒巻能史:海洋地球化学フォーラム2017 ～大気－海洋－海底の物質循環～(2017)
「水温と¹⁴Cの鉛直分布に基づく日本海深層の鉛直拡散係数の推定」
- 17) 千手智晴、荒巻能史:研究集会「東アジアから太平洋規模への海洋・大気循環に関わる素過程研究の精緻化と環境変動への応用」(2017)
「鉛直一次元モデルによる日本海深層の鉛直拡散係数の評価」
- 18) T. SENJYU, T. ARAMAKI: International Workshop on Mixing and Water Mass Modification in the East Asian Marginal Seas, Fukuoka, Japan, 2017
“Evaluation of vertical eddy diffusivity in the abyssal Japan/East Sea based on the one-dimensional advection-diffusion model in temperature and ¹⁴C profiles”
- 19) 熊本雄一郎、荒巻能史:日本地球惑星科学連合2017年大会(2017)
「2016年の日本海東部日本海盆、大和海盆、対馬海盆における溶存酸素濃度の鉛直分布」
- 20) 荒巻能史、田中伸一:日本地球惑星科学連合2017年大会(2017)
「溶存クロロフルオロカーボン類が示す日本海熱塩循環の急激な弱化的証拠」
- 21) T. SENJYU: COAST Bordeaux 2017 and the 17th French-Japanese Oceanography Symposium, Bordeaux, France, 2017
“The Japan Sea, a changing Pacific Asian marginal sea”
- 22) T. SENJYU, H.-R. SHIN: The 19th Pacific-Asian Marginal Seas (PAMS) Meeting, Jeju, Korea, 2017
“Near-inertial internal waves in the Yamato and Tsushima/Ulleung Basins in the abyssal Japan/East Sea”
- 23) 千手智晴:第72回日本海海洋調査技術連絡会(2017)
「大和海盆深層で観測された近慣性内部波と表層のフロント変動」
- 24) 千手智晴、申弘烈:日本海洋学会2016年度秋季大会(2016)
「大和海盆南縁で観測された深層流の数日周期変動」
- 25) T. SENJYU: The 8th PEACE Ocean Science Workshop, Vladivostok, Russia, 2016
“Mixing and inter-basin water mass exchange in the abyssal Japan Sea”

7. 研究者略歴

研究代表者

荒巻 能史

北海道大学水産学部卒業、北海道大学大学院地球環境科学研究科博士後期課程中途退学、博士(地球環境科学)、日本原子力研究所むつ事業所研究員、現在、国立環境研究所主任研究員

研究分担者

1) 越川 海

東京理科大学工学部卒業、東京理科大学大学院工学研究科工業化学専攻博士課程修了、博士(工学)、現在、国立環境研究所室長

2) 東 博紀

京都大学工学部卒業、京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)、防災科学技術研究所特別研究員、現在、国立環境研究所主任研究員

3) 中岡 慎一郎

東北大学理学部卒業、東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士後期課程修了、博士(理学)、

情報・システム研究機構国立極地研究所特任研究員、現在、国立環境研究所主任研究員

4) 千手 智晴

東海大学海洋学部卒業、東京水産大学大学院水産学研究科博士後期課程修了、博士(水産学)、農林水産省水産大学校助手、現在、九州大学応用力学研究所准教授

5) 熊本 雄一郎

広島大学総合科学部卒業、広島大学大学院生物圏科学研究科博士後期課程修了、博士(学術)、国立環境研究所特別研究員、現在、海洋研究開発機構主任技術研究員

6) 松本 和彦

三重大学生物資源学部卒業、三重大学大学院生物資源学研究科博士前期課程修了、博士(農学)、現在、海洋研究開発機構技術研究員

7) 笹岡 晃征

北海道大学水産学部卒業、北海道大学大学院水産科学研究科博士後期課程単位修得退学、博士(水産科学)、宇宙航空研究開発機構宇宙航空プロジェクト研究員、現在、海洋研究開発機構技術主任

II. 成果の詳細

II-1 海水循環および炭素循環の変動の検出

国立研究開発法人国立環境研究所

地球環境研究センター	炭素循環研究室	荒巻 能史
地域環境研究センター	海洋環境研究室	越川 海・東 博紀
地球環境研究センター	大気・海洋モニタリング推進室	中岡 慎一郎

<研究協力者>

静岡大学 理学部地球科学科 久保 篤史（平成29～30年度）

平成28～30年度累計予算額：48,731千円

（うち平成28年度：18,535千円、平成29年度：15,485千円、平成30年度：14,711千円）

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

温暖化の進行にともない海水循環システムに変化が生じている日本海において、この変化が海洋炭素循環に及ぼす影響を調査・評価した。また、化学トレーサーやシミュレーションモデルを活用して海水循環システムの変化についても追跡調査を実施した。

日本海の広範な海域におけるCO₂関連化学種の観測をもとに、全炭酸濃度に占める人為起源CO₂濃度を推定したところ、日本海最深部に当たる日本海盆3700m深においても16.3μmol/kgが検出され、すでに水柱全体に人為起源CO₂の影響が及んでいることが分かった。また、先行研究との比較から最近17年間で人為起源CO₂が約1.5倍に増加したことが明らかとなり、この急増には熱塩循環の弱化によって深海での有機物分解が促進した影響が関係している可能性が大きいことが示唆された。さらに、海洋酸性化の指標である炭酸カルシウム飽和度を算出すると、産業革命以前は500m以深が未飽和海域であったが現在は深度200～300mにまで上昇していることも明らかとなり、海洋生態系への影響が懸念される事態であることも分かった。表層pCO₂観測と観測データベースを用いて、1998～2014年における日本海全域での海洋表層pCO₂水平分布の復元に成功した。この結果をもとに大気海洋間CO₂フラックス分布を算出すると、復元期間を通して日本海全域がCO₂吸収域になっており、特に北部海域では4mol/m²/yrを超える強い吸収域であることが分かった。また、近年は年間50Tg程度のCO₂を吸収しているものと見られる。

炭素14の分析から、2000～2001年冬季に観測された底層水の大規模な新形成以降に新たな底層水の形成がなかったことが明らかになった。一方、日本海盆の2000m以深においてトリチウムの僅かな極大層が検出され、2000～2001年の底層水形成の痕跡である可能が示唆された。日本海底層の溶存酸素濃度の長期減少傾向の要因・プロセスを明らかにするために、日本海流動・物質循環シミュレーションモデルを構築し、再現計算を通じて温暖化の影響を評価した。その結果、日本海盆・大和海盆の深層・底層に見られる溶存酸素量の変動は流動への依存性が高く、溶存酸素量の長期減少傾向は熱塩循環の変化によってもたらされていることが示唆され、これまでの観測事実と一致した。

[キーワード]

海水循環、炭素循環、化学トレーサー、CO₂関連化学種、シミュレーションモデル

1. はじめに

日本海はユーラシア大陸と日本列島に挟まれた閉鎖性の強い縁辺海である一方、その最大水深は3700m 以上もあり、大洋で見られる様々な海洋現象が存在していることから「ミニチュア大洋」とも呼

ばれている。例えば、冬季の北西部では結氷するほどに冷やされて密度が大きくなった表面海水が海洋内部に沈み込む、独自の鉛直的な大循環システム（熱塩循環）が存在している。しかしながら、小規模な海域であるがゆえに、外乱応答が速く地球規模の温暖化影響が早送りのように現れる。実際、過去100年の日本周辺の海面水温の上昇は約1°Cであるが、日本海北部域は1.7°Cに達するとの報告¹⁾がある。一方、深海では少なくとも1960年代末から続く水温上昇と溶存酸素量の漸減が報告されており²⁾、その原因として温暖化にともなう深層水形成の停滞、すなわち熱塩循環の弱화가議論されている³⁾。我々研究班は、従前の推進費課題A-1002において、化学トレーサーの詳細な分析と解析をもとに、1975年を境に日本海の熱塩循環を「現在」と「過去」に分けた場合、「現在」の熱塩循環の規模は「過去」の15～40%に低下していることを明らかにした。これは温暖化の進行にともなって日本海の海水循環システムが急激に変化し始めていることを示唆している。そこで本サブテーマ(1)では、海水循環システムの変化が海洋環境に及ぼす影響を検出するために、海洋炭素循環に焦点を当て、その変化や酸性化の進行度を把握する。また、化学トレーサーやシミュレーションモデルを活用して、日本海の海水循環システムの変化についても追跡調査を実施する。

2. 研究開発目的

海水試料中の化学トレーサーの分析と過去の観測データを数値モデルに組み込み、海水循環の変動を検出する。また、表層pCO₂やCO₂関連化学種濃度の断面観測を実施し、ニューラルネットワーク法を適用することで日本海全域のpCO₂分布を推定する。ここで得たアルゴリズムを歴史的資料にも適用することで時間変動を把握し、炭素循環の変化、酸性化の進行度を検出する。さらに、日本海流動・物質循環シミュレーションモデルを構築し、再現計算を通じて温暖化の影響を評価する。

3. 研究開発方法

海水循環の指標となる化学トレーサーおよび炭素循環の指標となるCO₂関連化学種の鉛直観測、並びに表層pCO₂観測は、北海道大学水産学部附属練習船「おしよろ丸」および長崎大学水産学部附属練習船「長崎丸」による実習航海と、Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST, 大韓民国海洋科学技術院) 所属の「Eardo (イヨド) 号」による研究航海を利用して実施した。その観測一覧を表(1)-1に示す。

表(1)-1 本研究においてサブテーマ1が実施した観測一覧

No.	観測期間	船舶名	観測海域 ^{*1}	観測項目		
				化学トレーサー	CO ₂ 関連化学種	pCO ₂ 観測
1	2016/07/17～07/27	おしよろ丸	日本海盆・大和海盆	○	○	○
2	2016/09/05～09/11	イヨド号	対馬海盆	○	○	*2
3	2016/10/11～10/15	長崎丸	大和海盆・対馬海盆		○	○
4	2017/05/15～05/19	長崎丸	大和海盆・対馬海盆		○	○
5	2017/06/05～06/10	おしよろ丸	日本海盆	○	○	○
6	2017/10/11～10/17	イヨド号	対馬海盆	○	○	*2
7	2018/04/24～04/30	おしよろ丸	日本海盆	○	○	○
8	2018/10/08～10/12	長崎丸	大和海盆	○	○	

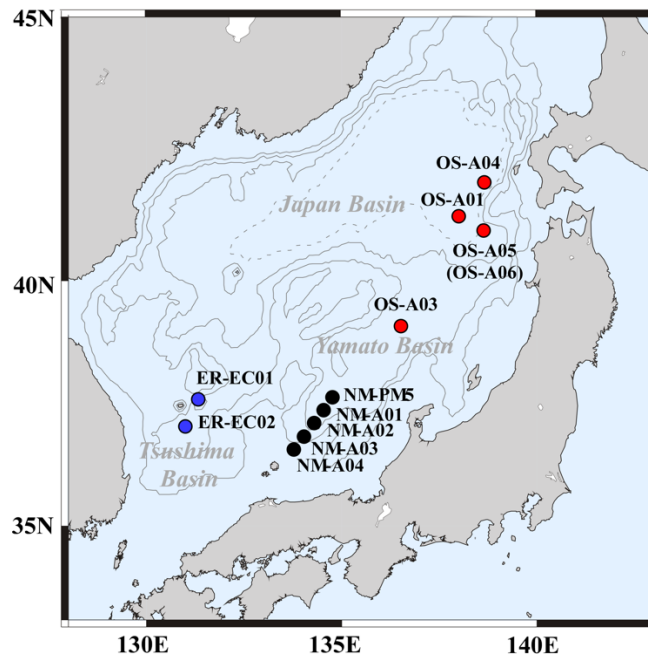
*1：化学トレーサー及びCO₂関連化学種の鉛直分布観測を実施した海域を示す。

*2：KIOSTよりイヨド号で取得された同航海中のpCO₂データの提供を受けた。

(1) 化学トレーサー分析を用いた海水循環変動の解析

海水試料中の化学トレーサーの分析と過去の観測データを数値モデルに組み込み、海水循環の変動を検出する。本研究では、過去データの蓄積のある、炭素14（放射性炭素 ¹⁴C）、トリチウム（放射性水素 ³H）およびクロロフルオロカーボン類（通称フロン類 CFCs）を海水循環トレーサーとして使用する。表

(1)-1に示した実習及び研究航海を利用して、船上にてCTD/RMS（現場型電気伝導水温水深計付ロゼット多筒採水器）を用いて海水特性（水温、塩分、溶存酸素）の鉛直分布を測定するとともに海面から海底直上までの最大24層で多層採水を行い、各層から各成分分析用の海水を採取して適切な前処理等を行って実験室に持ち帰った。図(1)-1には各トレーサー測定用試料の採取地点の詳細を示した。赤丸で示した海域では上記の3つのトレーサーすべての観測を実施できたが、黒丸で示した海域では機材繰りの都合により炭素14のみの観測となり、青丸で示した海域では韓国側EEZでの観測のために輸出入の都合によりCFCsの観測が叶わなかった。



図(1)-1 化学トレーサー測定用海水試料の採取地点
赤丸は $^{14}\text{C} \cdot ^3\text{H} \cdot \text{CFCs}$ 、青丸は $^{14}\text{C} \cdot ^3\text{H}$ 、黒丸は ^{14}C の採取地点を示す。

炭素14は海水中の CO_2 および炭酸物質を CO_2 ガスとして抽出⁴⁾した後に、これを炭素（グラファイト）に還元⁵⁾して、加速器質量分析装置⁶⁾を用いてグラファイト中の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を計測した。なお、本報告書における炭素14濃度は、標準物質の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比からの各試料の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比のズレ分の千分率として定義される $\Delta^{14}\text{C}$ 値⁷⁾で表現した。トリチウムは試料海水を脱塩後に、電気分解を用いて減容することで試料水中のトリチウム濃度を濃縮⁸⁾して、液体シンチレーションカウンタを用いて試料水中の ^3H の比放射能を測定した。なお、本報告書におけるトリチウム濃度は、試料採取日に壊変補正を行った上で、TU（トリチウム・ユニット：水素原子 10^{18} 個あたりトリチウム原子が1個存在する場合を1TUとして定義、水試料の場合は $1\text{TU} \equiv 0.118\text{Bq/L}$ ）として表現した。CFCsは先行研究（環境研究総合推進費A-1002）で開発した電子捕獲検出器付きガスクロマトグラフ（ECD-GC）を用いた「溶存ハロゲン化合物の多成分同時定量法」によって、CFC-11、CFC-12、およびCFC-113を同時定量した。

(2) CO_2 関連化学種の分析・解析を用いた炭素循環変動の解析

CO_2 化学種濃度の断面観測を実施し、炭素循環の変化、酸性化の進行度を検出する。 CO_2 関連化学種は全炭酸濃度、全アルカリ度およびpHを対象とする。化学トレーサーと同様に、船上にてCTD/RMSを用いて海面から海底直上までの最大24層で多層採水を行い、各層から各成分分析用の海水を採取して適切な前処理等を行って実験室に持ち帰った。なお、 CO_2 関連化学種については、表(1)-1に示した8つの実習及び研究航海すべてで観測することができた。

全炭酸濃度は海水中のCO₂および炭酸物質をCO₂ガスとして抽出した後に、電量滴定装置（クーロメーター）を用いてCO₂濃度の高精度定量を行った。全アルカリ度は一定量の海水試料に濃度既知の塩酸溶液を酸性になるまで添加して、添加した酸の量から残存する酸の量を差し引くことで測定した。なお、pHは全炭酸およびアルカリ度データをもとに計算により求めた。

（３）表層pCO₂観測と観測データベースによるpCO₂分布推定

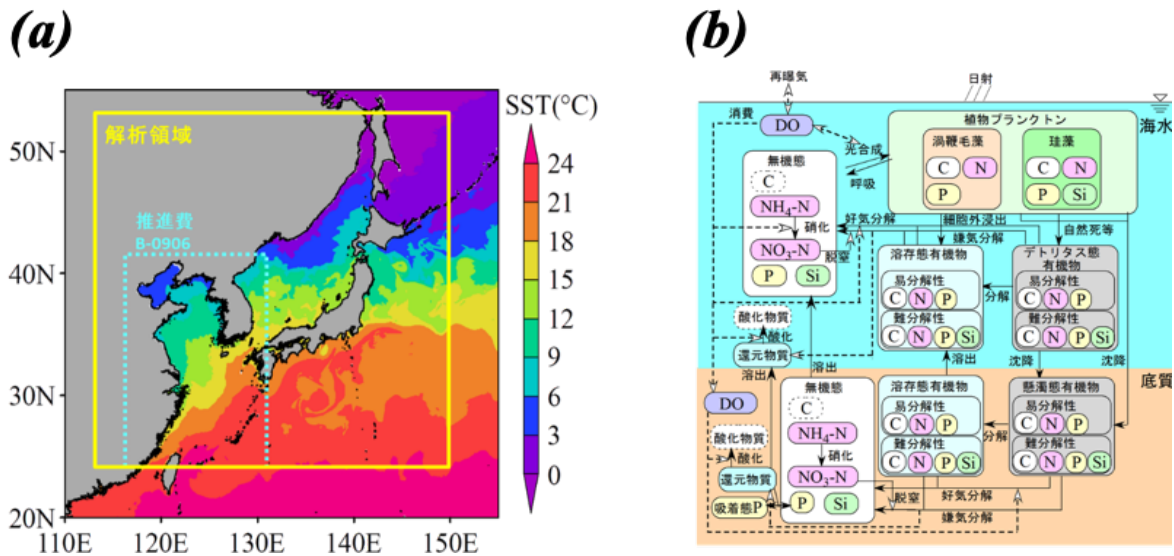
日本海の炭酸系の時空間変動を明らかにするために、おしよろ丸および長崎丸にCO₂計（紀本電子工業（株）社製 MOG-501）と気液平衡器を載せ、260ppmから460ppmのCO₂標準ガス計4本を用いてCO₂計を約6時間毎に校正しながら、航路上のほぼすべてにおいて表層海水中のCO₂を連続的に測定した。観測を実施した航海は表(1)-1に示した。表層海水は船底の取水口からポンプにて汲み上げており、装置の設置場所である海水観測室に設置した気液平衡器上部から導入される。一方、気液平衡器の下部からは室内空気を原料とする細かな気泡が吹き上げられ、気泡中のCO₂濃度は水面に到達するまでに海水中のCO₂濃度と同程度に達する。さらに平衡器上部から導入された海水が器内に取り付けられたプラスチック製の羽根（ミキサー）にぶつかり細かな水滴となって器内の空気と接する面積が増えることで気相と液相のCO₂濃度について平衡が達成される。海水中に存在するCO₂は分子状CO₂のほかに重炭酸イオン（HCO₃⁻）や炭酸イオン（CO₃²⁻）としてもふるまい、その存在比は水温によっても変化する。また、平衡器に導入される海水はポンプで組み上げられた際に昇温する。そのため、船底水温（海面水温）だけでなく平衡器水温を測定して観測されたpCO₂の温度補正を行った。さらに、物理生物的なpCO₂変動要因を把握するためにおしよろ丸では塩分と蛍光光度クロロフィル値の航走測定、長崎丸では塩分の航走測定を行った。

また、ニューラルネットワーク手法を用いて海面水温・塩分・混合層深度・クロロフィル濃度分布からpCO₂分布を推定した。本推定には、本研究で収集した観測データのほかに国際的なpCO₂観測データベースであるSurface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT) に登録された日本海の観測データも利用した。推定手法にはNakaoka et al. (2013)⁹⁾を採用し、水温・塩分・混合層深度データとして北西太平洋海洋長期再解析 (FORA-WNP30) の出力結果を、クロロフィル濃度データはMODIS-Aquaのデータセットを利用した。解析期間は1998年から2014年までであり、ひと月ごとの日本海のpCO₂分布を推定した。さらに推定したpCO₂分布とともにアメリカ海洋大気局の大気CO₂濃度データと、アメリカ航空宇宙局のCross-Calibrated Multi-Platform 海洋表層風速データを基にして大気海洋間CO₂フラックスを推定した。

（４）流動・物質循環モデルの構築および再現計算による溶存酸素の長期減少プロセスの解明

日本海底層の溶存酸素濃度の長期減少傾向の要因・プロセスを明らかにするために、日本海流動・物質循環シミュレーションモデルを構築し、再現計算を通じて温暖化の影響を評価する。本研究では、先行課題(推進費 B-0906)において東シナ海を対象に構築され、その後改良が重ねられた3次元流動・物質循環モデル¹⁰⁾を用いた。流動モデルは静水圧・ブシネスク近似のプリミティブ系方程式で構成されており、数値解法にはレベル座標系・コロケート格子の有限差分法、自由水面の追跡にはVOF法¹¹⁾、鉛直混合スキームにはFuruichi et al. (2012)¹²⁾、海面フラックスの算定にはKondo (1975)¹³⁾を採用している。物質循環モデルは水中および底泥中におけるC-N-P-O循環を解析する構造(図(1)-2)になっており、低次水界生態系による一次生産、有機物の好気・嫌気分解、海水-海底間における物質交換などの素過程が考慮されている。

解析領域は、日本海と東シナ海を含む東経 116.5° ~155.0°、北緯 23.0° ~53.4° に設定した(図(1)-2)。水平解像度は東西方向 1/12°、南北方向 1/15° とし、鉛直方向は海面から 6000m 深までを 62 層(層厚: 500m 以浅では 2~80m、500~2700m 深では 100m、2700~6000m 深では 150~500m)に分割した。解析対象期間は 2001~2010 年とし、気象条件には気象庁の JRA-55 再解析データ(3 時間値)を与えた。外洋の側方境界には、FORA-WNP30¹⁴⁾の残差流・水温・塩分(日平均値)、NAO.99b¹⁵⁾の潮位・潮流(1 時間値)、World Ocean Atlas 2009 の水質(気候値)を与えた。数値計算には国立環境研究所のスーパーコンピュータシステム(NEC SX-ACE)を使用した。

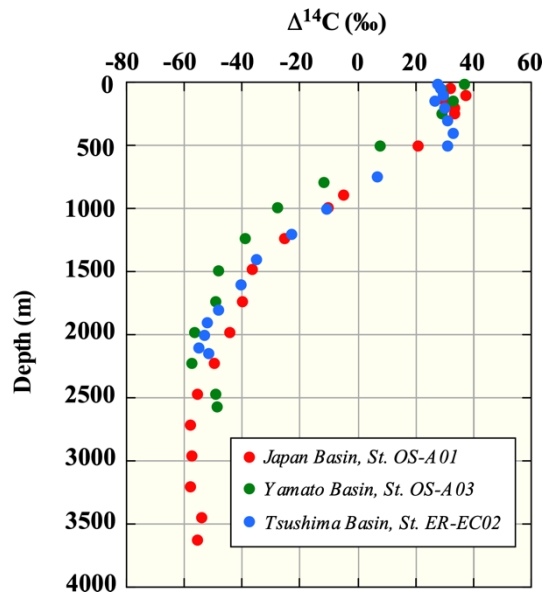


図(1)-2 (a)解析対象領域および(b)物質循環モデルの構造

4. 結果及び考察

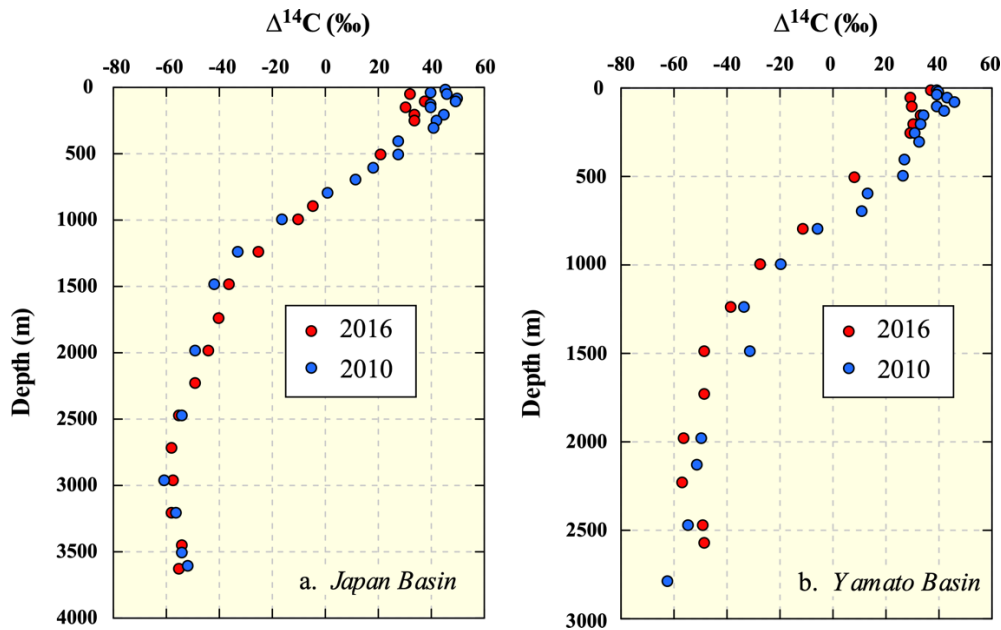
(1) 化学トレーサー分析を用いた海水循環変動の解析

3つの海盆で得られた炭素14 ($\Delta^{14}\text{C}$) の鉛直分布を図(1)-3で比較した。深度500~2000m程度の水塊、すなわち深層水では、各海域における $\Delta^{14}\text{C}$ に日本海盆 \approx 対馬海盆 $>$ 大和海盆の関係がある。 $\Delta^{14}\text{C}$ は、その値が大きいほど見かけ上の海水年齢が若いことを意味するので、深度2000mよりも浅い深層水については大和海盆よりも日本海盆や対馬海盆の方が“新しい海水”ということになる。およそ2000m以深で水温・塩分が一樣になることで定義されている底層水については、日本海盆ではほぼ一定の値をとるのに対して、大和海盆では海底直上で $\Delta^{14}\text{C}$ が高くなる傾向があった。これは、日本海盆の底層水が大和海盆底層に流入している可能性がある。そこで、図(1)-4では先行研究（環境研究総合推進費A-1002課題）で得た2010年6月の日本海盆および大和海盆における分布と比較した。日本海盆では深度1000mより浅い層で現在の $\Delta^{14}\text{C}$ が10~20‰低い値をとるが深度1000~2000mでは逆に最大で10‰程度高い値になっており、



図(1)-3 3つの海盆における炭素14 ($\Delta^{14}\text{C}$) の鉛直分布

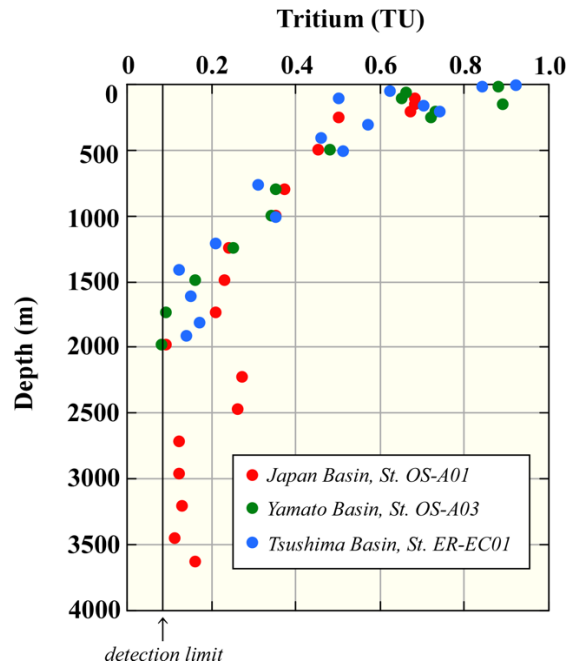
赤丸：日本海盆，緑丸：大和海盆，青丸：対馬海盆（観測点名は図中に示した）



図(1)-4 2010年と2016年の炭素14 ($\Delta^{14}\text{C}$) 鉛直分布の比較
(a)は日本海盆、(b)は大和海盆を示す。

最近6年間で表層水が中層へと輸送されている様子を示唆している。また、深度2000m以深の底層では $\Delta^{14}\text{C}$ に変化がないことから、この期間の底層水の循環が活発ではなかったことを示唆しているものと思われる。これに対して、大和海盆では海底直上の2層を除く全層で $\Delta^{14}\text{C}$ が低下しており、2010年と本研究(2016年)の観測では各観測点の鉛直海洋構造が異なる、すなわち観測点は近いもののまったく異なった水塊を調査した可能性が否定できない。一方、対馬海盆は1900m以深でほぼ一定の値となっており(図(1)-3)、これを底層水と定義すれば、その平均値は -53.1 ± 1.3 ‰であった。Aramaki et al. (2013)¹⁶⁾ は2001年当時の対馬海盆における底層水の $\Delta^{14}\text{C}$ を -50 ± 7 ‰と報告していることから、最近15年余りに渡って当該海域には新たな底層水の流入がなかったこと、つまり2000~2001年冬季に観測された底層水の大規模な新形成¹⁷⁾以降に新たな底層水の形成がなかったことが明らかになった。

3つの海盆で得られたトリチウムの鉛直分布を図(1)-5で比較した。なお、本研究におけるトリチウム測定の検出限界は 0.08 TU ($\equiv 0.01 \text{ Bq/L}$)であった。先行研究によると1998年当時の日本海表層におけるトリチウム濃度はおおよそ $0.15 \sim 0.21 \text{ Bq/L}$ と報告¹⁸⁾されており、これをTU単位に換算した上で2017年1月1日に壊変補正すると $0.5 \sim 0.6 \text{ TU}$ に相当する。今回観測された300m以浅の海水のほとんどが 0.6 TU を超えていることから、2016~2017年時点での日本海表層水、すなわち対馬海流水には福島第一原発事故由来のトリチウムが含まれている可能性が示唆される。一方、500m以深では 0.5 TU 以下となり他の化学トレーサーと同様に単調減少していることから、深層水や底層水には原発事故の影響はなく深層循環のトレーサーとして有効であることが分かる。各海盆におけるトリチウムの鉛直分布を比較すると、大和海盆および対馬海盆が2000m以深では検出限界以下であるのに対して、日本海盆では微量ながら海底直上まで有意にトリチウムが検出された。ただし、日本海盆においても深度2000mまでは深度とともに減少して深度2000m付近で一旦検出限界レベルまで減少し、2000m以深で濃度増加に転じている。これは、2000~2001年の底層水新形成¹⁷⁾により日本海北西部域の表層水が底層水中に沈み込み、日本海の反時計回りの深層循環¹⁹⁾に取り込まれて、日本海盆東部域へ数年遅れて輸送²⁰⁾された結果を反映している可能性があるが、炭素14の鉛直分布からはそのような痕跡が確認できない。今後は、この相反する結果が示唆する要因を探るべくデータ解析を進めていく必要がある。

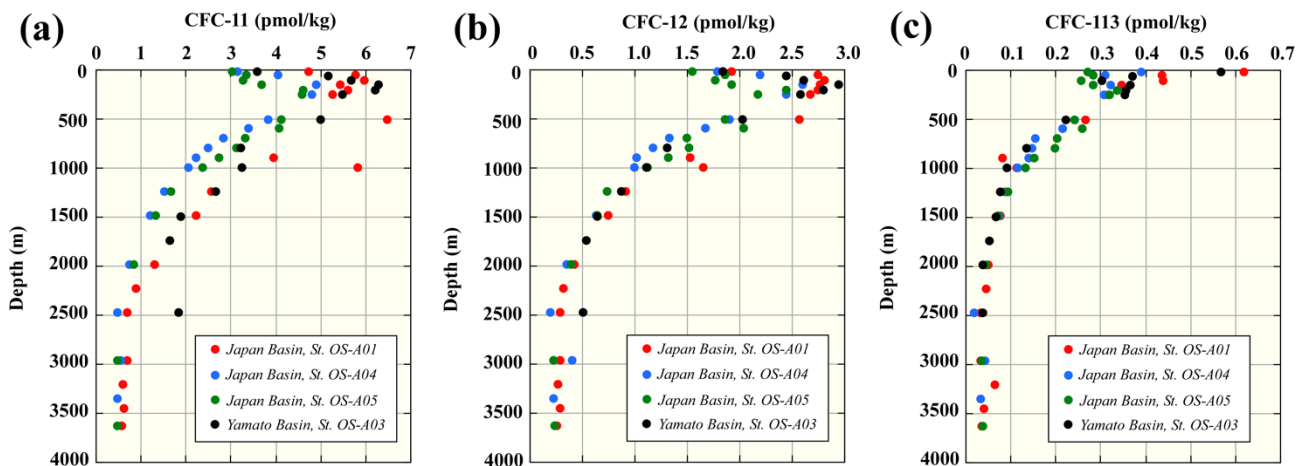


図(1)-5 3つの海盆におけるトリチウムの鉛直分布

赤丸：日本海盆，緑丸：大和海盆，青丸：対馬海盆（観測点名は図中に示した）

グラフ内実線は本研究におけるトリチウム測定の検出限界を示し、検出限界以下の値は非表示とした。

図(1)-6には本研究で観測されたすべてのCFCs（CFC-11，CFC-12，CFC-113）の鉛直分布を示した。ただし、ここで示したCFCsデータは現時点ではクオリティ・コントロール作業が完了しておらず絶対値の議論ができないため、現時点では観測を行った事実のみの報告に留める。

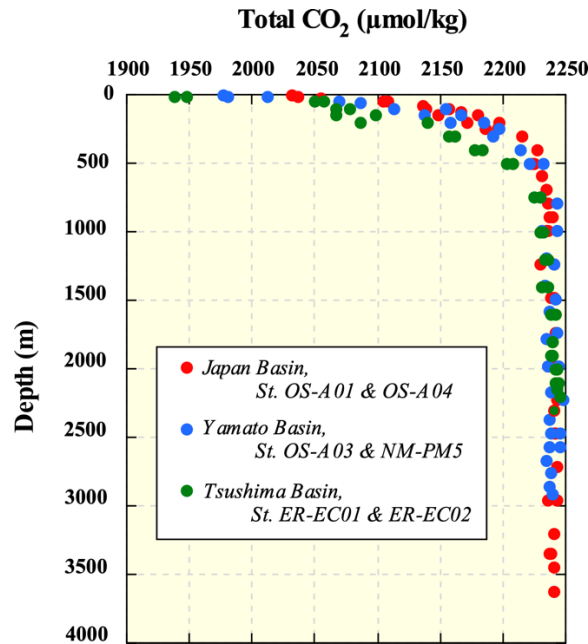


図(1)-6 日本海盆および大和海盆におけるCFCsの鉛直分布

(a) CFC-11, (b) CFC-12, (c) CFC-113（観測点名は図中に示した）

(2) CO₂関連化学種の分析・解析を用いた炭素循環変動の解析

3つの海盆で得られた全炭酸の鉛直分布を図(1)-7で比較した。なお、観測点名および位置関係は図(1)-1に示されている。表層付近では生物活動の影響を受けて海域により独自の分布を示すものの、1000m以深ではほぼ一様の濃度を示し観測点間の相違も見られなかった。Chen et al. (1995)²¹ は、1992年にロシアの排他的経済水域内の広範囲において全炭酸の精密測定を行い、深度2000m以深の底層水では塩



図(1)-7 3つの海盆における全炭酸の鉛直分布

赤丸：日本海盆，青丸：大和海盆，緑丸：対馬海盆（観測点名は図中に示した）

分35に規格化した全炭酸が $2297 \pm 5 \mu\text{mol/kg}$ で一定であったと報告している。本研究についても同様の規格化を施して2000m以深の値の平均をとると、 $2304 \pm 3 \mu\text{mol/kg}$ であった。このことから、2000m以深の水塊では最近24年間で全炭酸が単純計算でおよそ $7 \mu\text{mol/kg}$ 増加した可能性がある。

そこで我々は、この増加分を詳細に解析するために、測定された全炭酸濃度に占める人為起源 CO_2 濃度を推定し、先行研究との比較からその長期的変動を評価することとした。人為起源 CO_2 濃度の推定方法については、 ΔC^* 法²²⁾とTrOCA法²³⁾が一般的に利用されている。 ΔC^* 法は全炭酸が測定された水塊が大気と接していた時期の推定のためにCFCsデータを用いるが、上述のように本研究のCFCsデータは現時点では使用不可なので、本研究ではTrOCA法を用いた。TrOCA法は、全炭酸濃度 (DIC)、溶存酸素濃度 (O_2) およびアルカリ度 (TA) を組み合わせた独自の保存性成分であるTrOCA (Tracer Oxygen Carbon Alkalinity) を用いる手法であり、式(1)によって定義される。

$$\text{TrOCA} = \text{O}_2 + a \left(\text{DIC} - \frac{1}{2} \text{TA} \right) \quad (1)$$

ここで、 a はレッドフィールド比から算出された化学量論比であり、有機物分解によってDICが1 mol増加した場合に O_2 が a mol 減少し、炭酸カルシウムの溶解によってDICが1 mol増加した場合にTAが 2 mol増加する。そのため、いずれの場合でも水塊が形成した後のTrOCAの値は一定に保たれる。しかし、現代においてはDICに人為起源 CO_2 濃度 (DIC^{anth}) が付加されているため、TrOCAの値はわずかに上昇する。したがって、TrOCAは式(2)に書き直すことができる。

$$\text{TrOCA} = \text{O}_2^{\text{obs}} + a \left[(\text{DIC}^{\text{PI}} + \text{DIC}^{\text{anth}}) - \frac{1}{2} \text{TA}^{\text{obs}} \right] \quad (2)$$

ここで、 O_2^{obs} 、 TA^{obs} は現場で測定された O_2 および TA、 DIC^{PI} は産業革命以前のDICであり、現場で測定したDIC (DIC_{obs}) は DIC^{PI} に DIC^{anth} が上乘せされた値と表現される。一方、産業革命以前のTrOCA (TrOCA^{PI}) は式(3)となる。

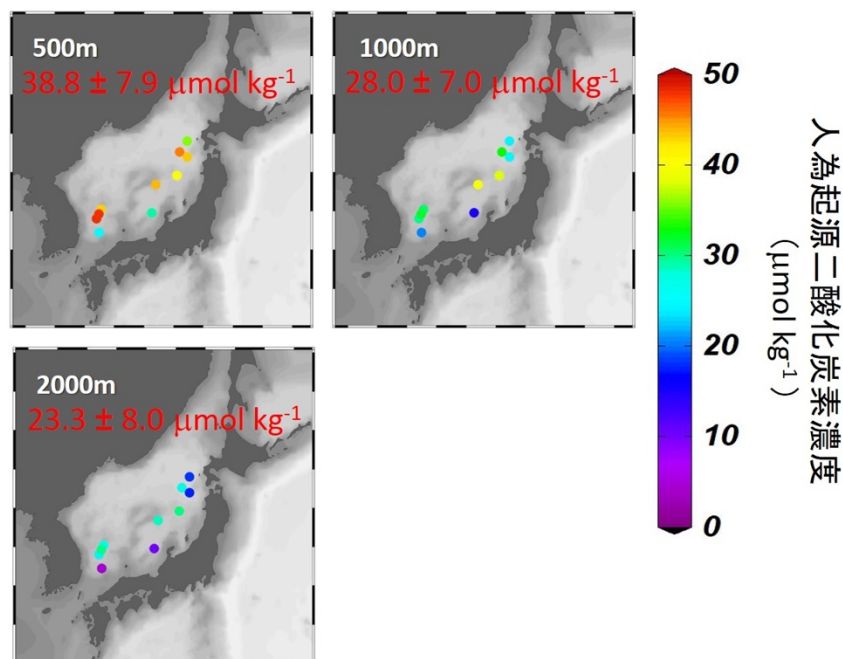
$$TrOCA^{PI} = O_2^{PI} + a \left[DIC^{PI} - \frac{1}{2} TA^{PI} \right] \quad (3)$$

ここで、 O_2 およびTAは二酸化炭素分圧の上昇によって変化しないため $O_2^{PI} = O_2^{obs}$ 、 $TA^{PI} = TA^{obs}$ と仮定できることから、式(2)および(3)から DIC^{anth} は式(4)として表現できる。

$$DIC^{anth} = (TrOCA - TrOCA^{PI})/a \quad (4)$$

なお、本研究における人為起源 CO_2 濃度 (DIC^{anth}) は、上述の方法を改良したTouratier et al. (2007)²⁴⁾の方法に従って算出した。

算出された現在 (2016~2018年) の人為起源 CO_2 濃度は、全ての観測点において表層で高く深層に向かって低下していた。日本海最深部に当たる日本海盆 (観測点OS-A05, 図(1)-1参照) の深度3700mにおいても $16.3 \mu\text{mol}/\text{kg}$ が検出され、日本海はすでに水柱全体に人為起源 CO_2 の影響が及んでいることが明らかになった。深度500m、1000mおよび2000mにおける人為起源 CO_2 濃度の水平分布を図(1)-8に示した。全観測点における人為起源 CO_2 濃度は、各深度の平均値で深度500mは $38.8 \pm 7.9 \mu\text{mol}/\text{kg}$ 、1000mは $28.0 \pm 7.0 \mu\text{mol}/\text{kg}$ 、2000mは $23.3 \pm 8.0 \mu\text{mol}/\text{kg}$ であった。これは、熱塩循環による表層水の深層への沈み込みが顕著な北大西洋における報告 (深度500~1000m: $20 \mu\text{mol}/\text{kg}$ 、2000m以深: $0 \sim 20 \mu\text{mol}/\text{kg}$)²⁵⁾と比べても極めて高い。この結果は、日本海の熱塩循環 (深層循環) が海洋大循環に比べて非常に短いために、外洋域に比べてより早く深海に広く人為起源 CO_2 が侵入していることを示唆しているものと思われる。



図(1)-8 深度500, 1000, 2000mにおける人為起源 CO_2 濃度の水平分布

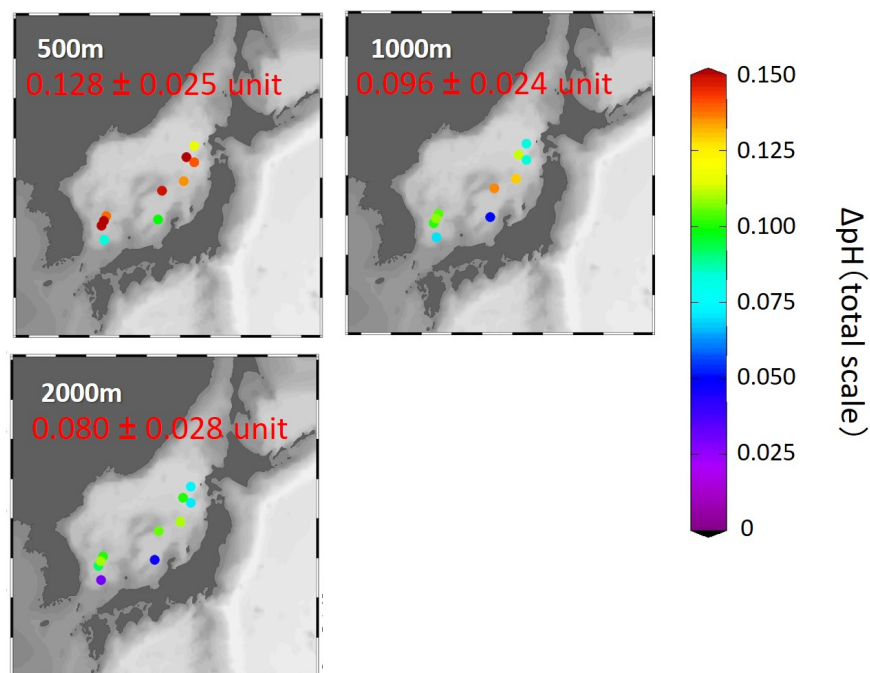
日本海全域における全炭酸測定が実施された唯一の先行研究²⁶⁾によると、測定を行った1999年当時の人為起源 CO_2 濃度は2000m以深で最大 $15 \mu\text{mol}/\text{kg}$ だったと報告されている。したがって、1999年以降のおよそ20年間で人為起源 CO_2 濃度が1.5倍以上に増加したことになる。私たちの報告にもあるように日本海深層では1960年代以降は溶存酸素 (DO) 濃度が減少しており、その減少速度は約 $0.7 \mu\text{mol}/\text{kg}/\text{yr}$ と報告²⁷⁾さ

れている。また、上述の化学トレーサーの観測結果が示すように、2000～2001年冬季に観測された底層水の大規模な新形成¹⁷⁾以降に新たな底層水の形成が認められないことから、大気から熱塩循環を介して深層へ人為起源CO₂が過剰に付加されたとは考えにくい。そこで以下には、深層における有機物分解が促進したことにより、DOの消費が増加してCO₂濃度増加につながった場合について試算を行った。深層での有機物分解によるCO₂生成がレッドフィールド比に従うと仮定するならば、17年間（1999～2016年）のDO濃度減少に伴うCO₂増加量は、以下の式(5)で表すことができ、

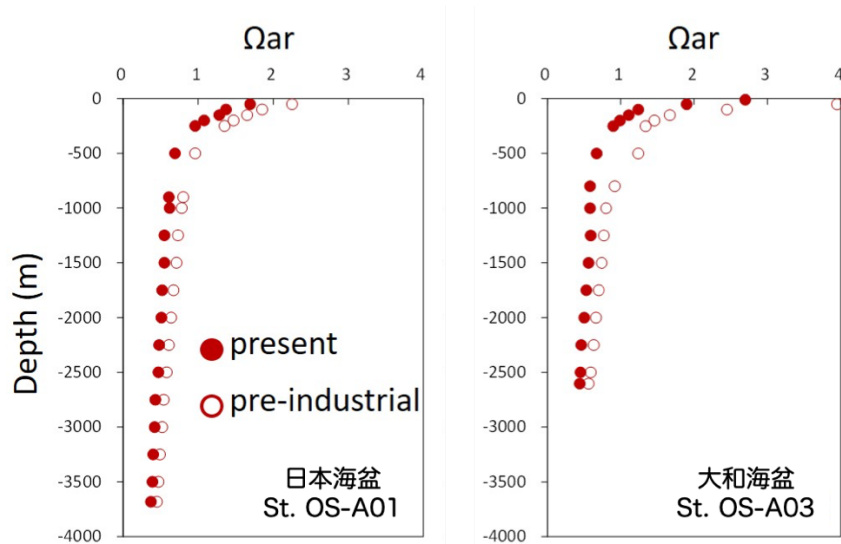
$$0.7 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{ year}^{-1} \times \frac{106}{138} \times 17 \text{ year} = 9.1 \mu\text{mol kg}^{-1} \quad (5)$$

9.1 μmol/kgと見積もられる。この値は17年間に深度2000m平均で増加した人為起源CO₂量の約8 μmol/kg (=23.3 μmol/kg-15 μmol/kg)と概ね一致している。この結果は、日本海における近年の人為起源CO₂濃度の急増の要因が、大気から海洋へのCO₂吸収だけではなく、深海での有機物分解の影響が無視できないほど大きい可能性を意味する。つまり、熱塩循環の弱体化が底層水滞留時間を延伸させ、これが何らかの理由により有機物分解を促進させることで海洋内部のCO₂濃度を増大させたという仮説が成り立つ。言い換えれば、温暖化の進行による海水循環システムの変化が海洋炭素循環の様式を変化させ、深海の海洋酸性化を進行させる可能性を示唆したことになる。

このような人為起源CO₂濃度の急激な増加とともに、日本海におけるpH・炭酸カルシウム飽和度も低下していることが明らかになった。深度500m、1000mおよび2000mにおけるpHの水平分布を図(1)-9に示した。全観測点における、深度500mのpH減少は0.128 ± 0.025、1000mでは0.096 ± 0.024、2000mでは0.080 ± 0.028であった。現在、外洋域では海洋表層のpHが約0.1低下したと報告されている²⁸⁾が、日本海ではすでに深度1000m程度でも同程度の変化が起こっていることが明らかになった。さらに、図(1)-10には日本海盆及び大和海盆で得られた、海洋酸性化の指標である炭酸カルシウム飽和度 (Ω_{arag}) 変化を示した。産業革命前の炭酸カルシウム飽和度未飽和 (Ω_{arag} < 1) 深度は約500mにあったが、現在では200～250m程度でも未飽和となっている。外洋域における炭酸カルシウム飽和度の未飽和深度の上昇は数十メートルと報告されている²⁵⁾が、現在の日本海では未飽和域は200～300mも上昇している計算であり、海洋生態系への影響が外洋域よりも早く現れる可能性が懸念される。



図(1)-9 深度500, 1000, 2000mにおけるpHの水平分布



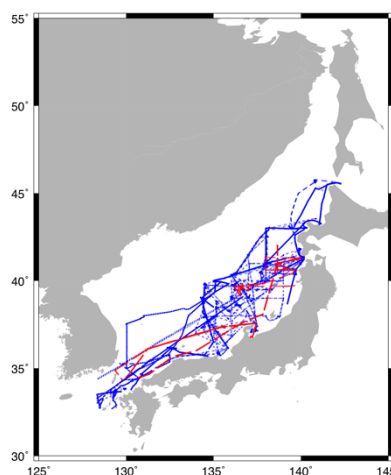
図(1)-10 日本海盆（左）および大和海盆（右）で得られた炭酸カルシウム飽和度の鉛直分布
観測点名は図中に示した。

(3) 表層pCO₂観測と観測データベースによるpCO₂分布推定

本課題では、おしよろ丸と長崎丸にpCO₂測定装置を取り付けて計5回の観測を実施した。表(1)-2に本課題期間中に実施したpCO₂観測の概要を示すとともに、図(1)-11にその観測航路を赤線で示した。観測は課題期間内の2016年～2018年の4月～10月にかけて実施し、日本の経済水域内での観測データ充実を図ることができた。観測結果の一例として、2018年4月に神戸～函館間でのpCO₂空間分布と、日本海海域

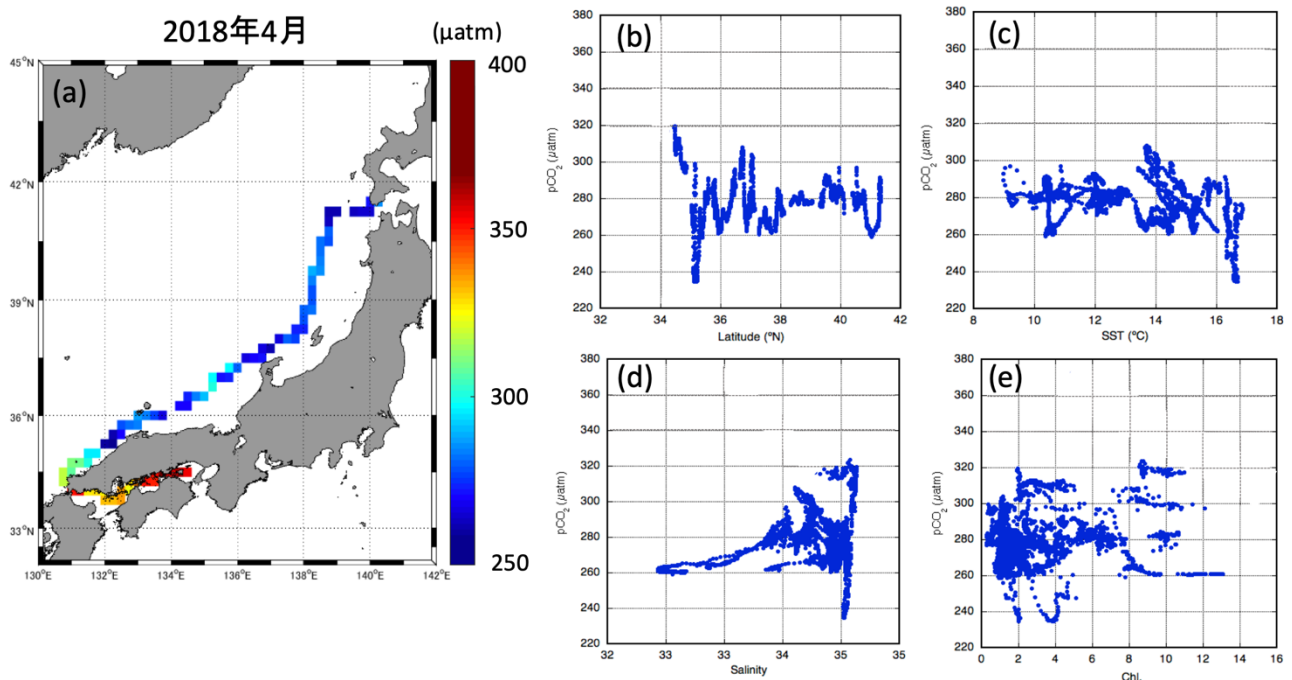
表(1)-2 本研究で実施したpCO₂観測航海の概要

Period	Ship	Route
2016/7	おしよろ丸	八戸～函館～秋田
2016/10	長崎丸	富山～長崎
2017/5	長崎丸	富山～長崎
2017/6	おしよろ丸	函館～函館
2018/4	おしよろ丸	神戸～函館



図(1)-11 本研究による観測分布（赤線）とSOCATの観測分布(青線)

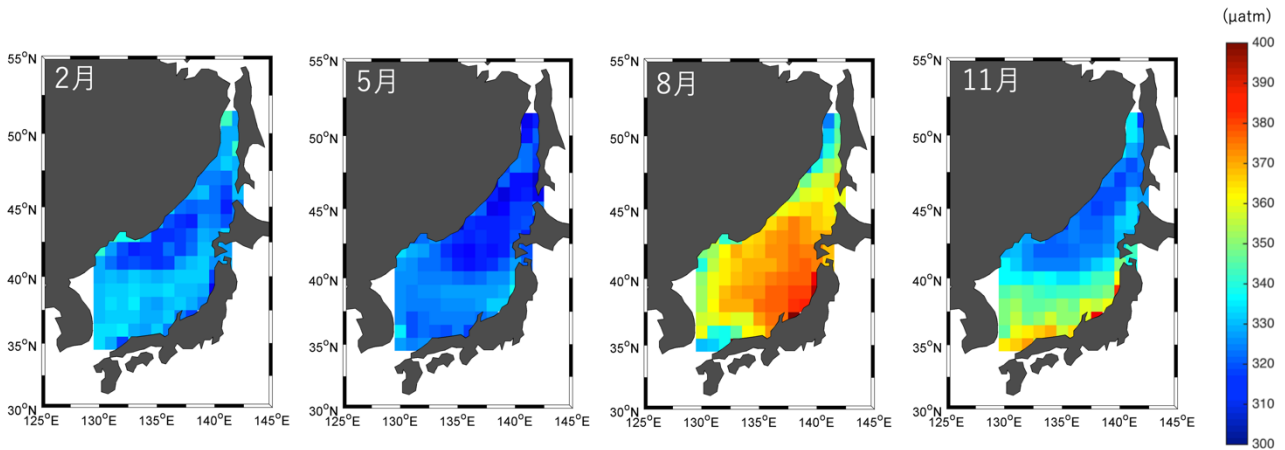
内での $p\text{CO}_2$ 緯度分布、 $p\text{CO}_2$ と海面水温、塩分、クロロフィル蛍光の関係を図(1)-12に示す。この時期の日本海の $p\text{CO}_2$ は約240~300 μatm の間で変化しており、水塊の異なる瀬戸内海に比べ非常に低いことが図(1)-12(a)から分かる。日本海の $p\text{CO}_2$ 緯度分布について見てみると、下関近海から島根近海で $p\text{CO}_2$ が320 μatm から240 μatm に急激に低下した後に福井沖で300 μatm まで回復し、その後は280 μatm 前後で細かく変動している様子が分かる(図(1)-12(b))。 $p\text{CO}_2$ と海洋生物物理パラメータの関係をしてみると、島根近海の海面水温が16度以上(図(1)-12(c))、塩分が35以上(図(1)-12(d))の水塊で $p\text{CO}_2$ が最小値となっているものの、クロロフィル蛍光値は他の海域と大きな違いはみられていない(図(1)-12(e))。このことから黒潮起源の全炭酸濃度が低い水塊が対馬海流として流入し、水温が低下することで $p\text{CO}_2$ が低下した可能性が考えられるが、要因の特定にはより詳細な解析が必要である。以上のように、本課題で行われた一連の観測により、日本海の観測海域や観測時期により物理場の変化が $p\text{CO}_2$ の変動要因として支配的なケースと生物活動の変化が支配的になるケースがあることを示すことができた。



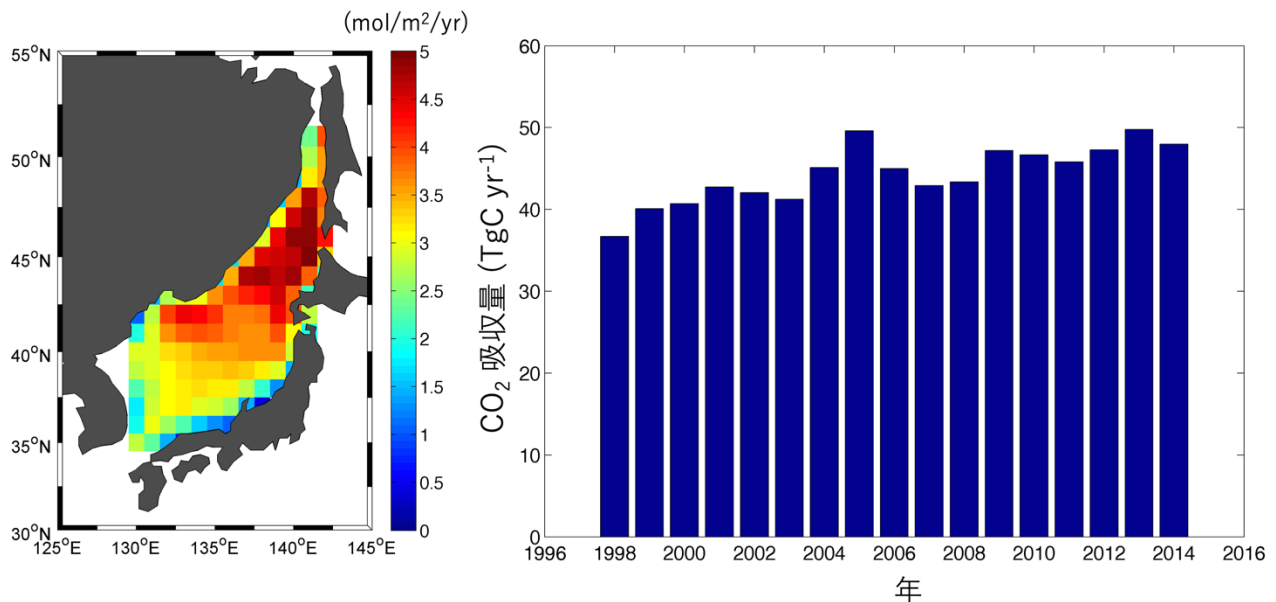
図(1)-12 (a)神戸～函館間での $p\text{CO}_2$ 空間分布, (b)日本海海域内での $p\text{CO}_2$ 緯度分布, (c) $p\text{CO}_2$ と海面水温の関係, (d) $p\text{CO}_2$ と塩分の関係, (e) $p\text{CO}_2$ とクロロフィル蛍光の関係

次に国際的な海洋表層 $p\text{CO}_2$ データベースであるSOCATに収録されたデータ(図(1)-11)も合わせて用いることで、日本海の $p\text{CO}_2$ 時空間分布を推定した。図(1)-13に1998年~2014年平均の2月、5月、8月、11月の推定された $p\text{CO}_2$ 分布をそれぞれ示す。始めに各月の分布から季節変化について見てみると、2月から5月には $p\text{CO}_2$ が全体的に低下しており、8月には日本沿岸域を中心に上昇し、11月には北緯40度以北で顕著に低下している(図(1)-13)。このような変化パターンは太平洋黒潮域の変動パターンに酷似しており、冬季に最大値を、夏季に最小値をとる親潮域の変動パターンとは異なっている。このことは日本海の表層水が黒潮を起源とする対馬海流の影響を受けていることを強く示唆している。推定結果については観測結果との比較で良い一致を示しているだけでなく、得られた分布の時空間変動も整合的であることから本推定が妥当であることを示している。

さらに得られた $p\text{CO}_2$ 分布推定結果と大気 CO_2 濃度データ、風速データを用いて、大気海洋間 CO_2 フラックスを評価し、図(1)-14に期間平均の大気海洋間 CO_2 フラックス分布と海洋による年間 CO_2 吸収量の時間変化を示す。まず大気海洋間 CO_2 フラックスの分布について見てみると、北海道沖の北西部やウラジオストク沖で $4\text{mol}/\text{m}^2/\text{yr}$ を超える強い吸収域となっている。日本海固有水の形成域であるウラジオストク沖



図(1)-13 推定期間（1998～2014年）平均した2月，5月，8月，11月のpCO₂分布推定結果



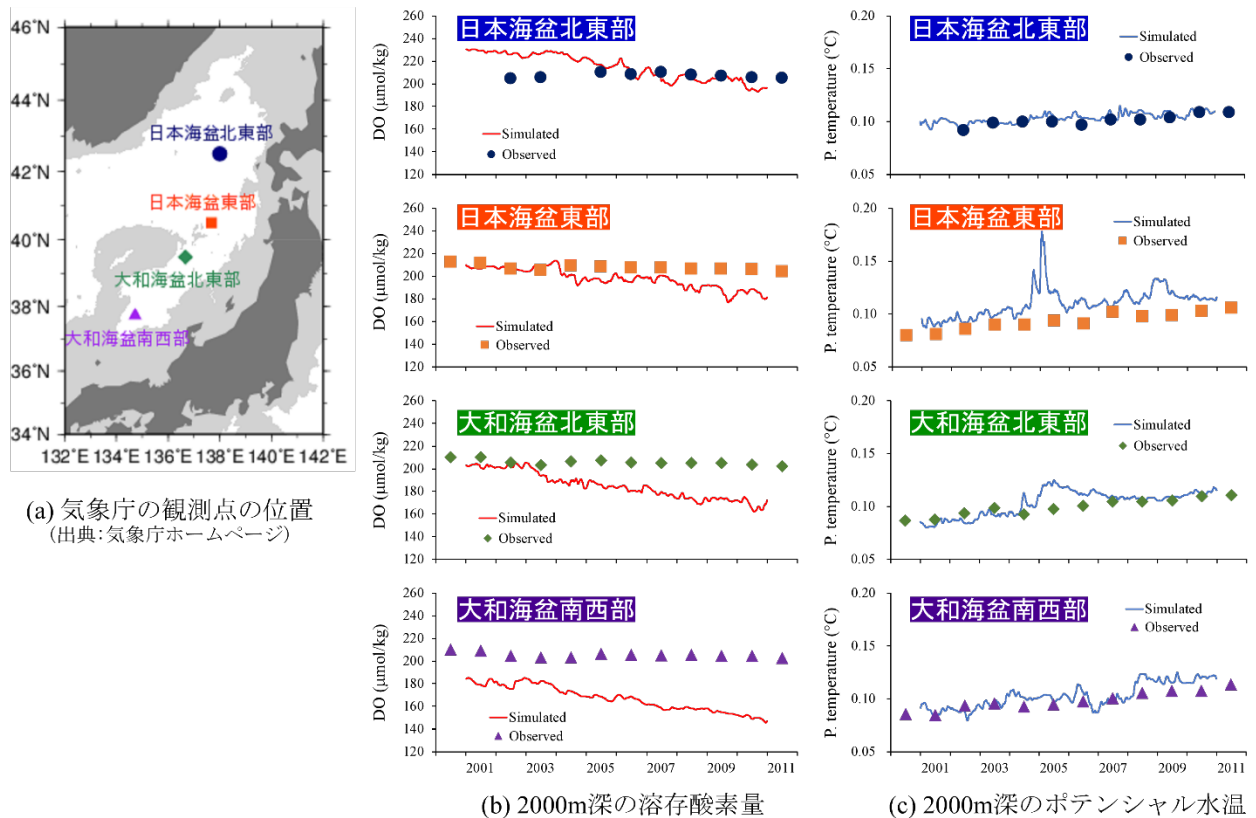
図(1)-14 推定期間平均の大気海洋間CO₂フラックス分布（左）と海洋によるCO₂吸収量の年変化（右）
正の値は海洋によるCO₂吸収を意味している。

で強いCO₂吸収が引き起こされているということは、大気から吸収されたCO₂が効率よく底層へと輸送されていることを意味しており、今後、温暖化によって固有水の形成が弱化し、CO₂吸収量が低下する恐れがあることが示唆される。一方、海洋CO₂吸収量の年変化について見てみると、推定期間中に吸収量が緩やかに増加している様子が見られ、近年は年間50TgC程度のCO₂を吸収していると見られる。このような増加傾向は全球の海洋CO₂吸収量の増加傾向とも一致しており、現時点でCO₂吸収量増加が弱化しているとは言えない。そのため今後もpCO₂観測を充実させるとともに、推定期間を伸ばすことでCO₂吸収量変動傾向についても詳細に把握する必要があると考えている。

（4）流動・物質循環モデルの構築および再現計算による溶存酸素の長期減少プロセスの解明

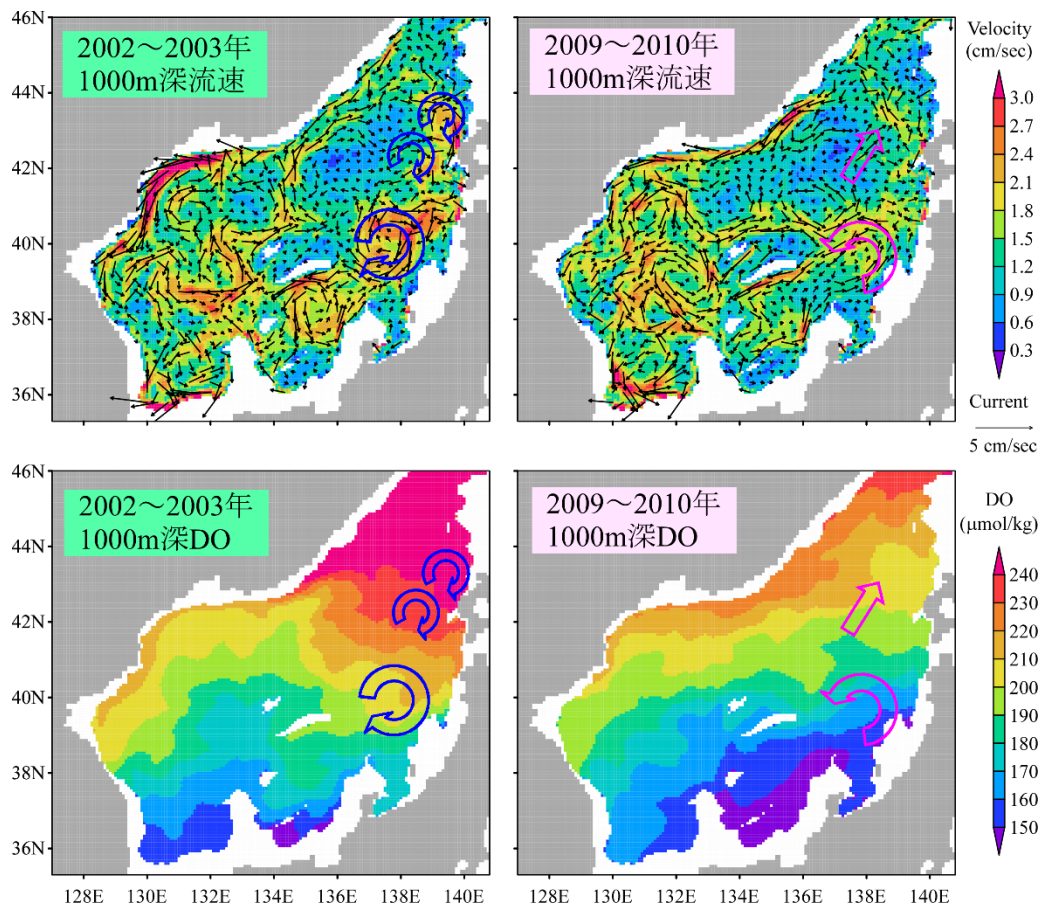
気象庁が公開している日本海の観測値を用いて流動・物質循環モデルの再現性を検討した。図(1)-15に日本海盆2測点および大和海盆2測点における2000m深の溶存酸素量およびポテンシャル水温の観測値と計算値の比較を示した。再現計算を実施した2001～2010年における観測値には、ポテンシャル水温に

については昇温、溶存酸素量については減少の線形トレンドがわずかながら見られる。計算値のポテンシャル水温については、2004～2005年の日本海盆東部において比較的大きな変動が見られるものの、それを除けばほぼ直線的な昇温傾向を示しており、観測値を概ね再現している。一方、計算値の溶存酸素量については、日本海盆では観測値と概ね一致しているが、大和海盆においては、定性的には観測値と同じ減少傾向を示してはいるものの、溶存酸素量の値およびその減少速度はそれぞれ過小および過大となっており、定量的な再現性に課題を残している。



図(1)-15 2000m深における溶存酸素量・ポテンシャル水温の計算値と観測値(気象庁)の比較

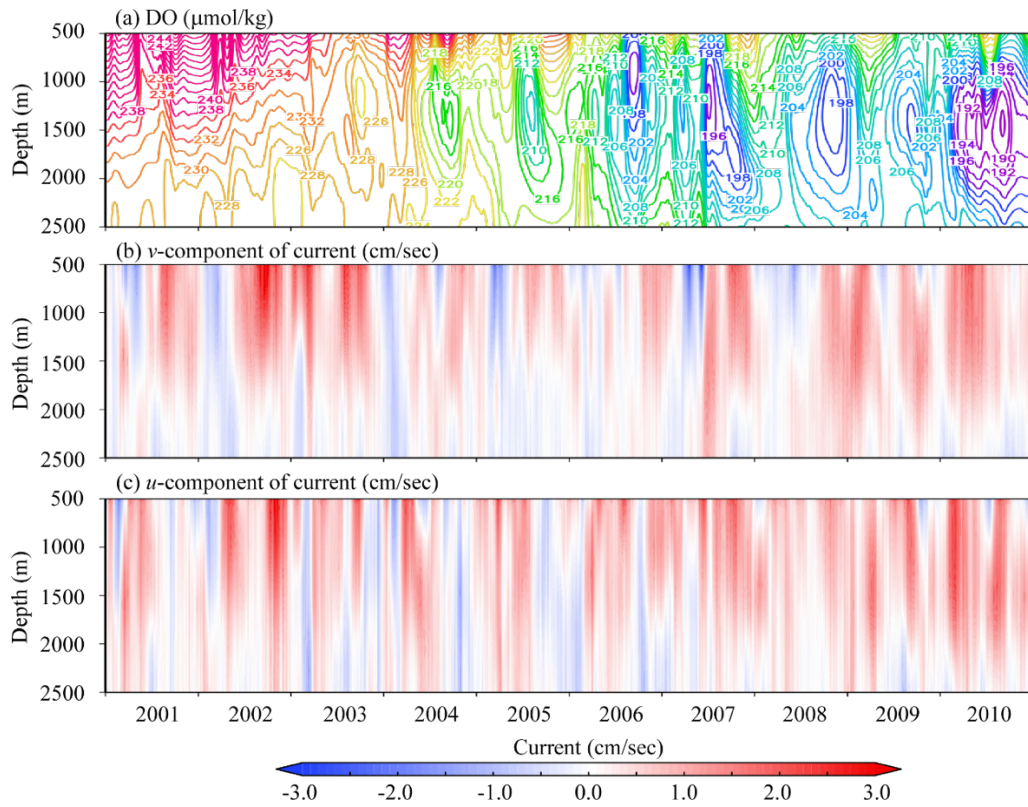
再現シミュレーションに見られた溶存酸素量の長期減少のプロセス、併せて上述の大和海盆における溶存酸素量の誤差要因について考察した。結果の一例として、図(1)-16に2002～2003年と2009～2010年それぞれ2年間平均の1000m深における流速・溶存酸素量の比較を示した。再現計算の期間において2002～2003年、2009～2010年はそれぞれポテンシャル水温が比較的低いとき、高いときとなる(図(1)-15)が、図(1)-16の両期間における1000m深の流速には、2年間平均で示しているにも関わらず、明瞭な差が見られる。とくに日本海盆の北東部・東部における流向の違いは顕著であり、東部における循環流は時計回りから反時計回りに、北東部における2つの時計回りの循環流は消滅して1つの北上流に変わっている。図(1)-16の両期間における1000m深の溶存酸素量を見ると、日本海盆北東部から大和海盆南西部にかけて日本海の東側で減少傾向が顕著であるが、上述の流向・流速の変化によって、タタール海峡から日本海盆・大和海盆へと南下する比較的高い溶存酸素を含む水塊輸送が弱まり、大和海盆を中心に低い溶存酸素の水塊が広がっている様子が見取れる。



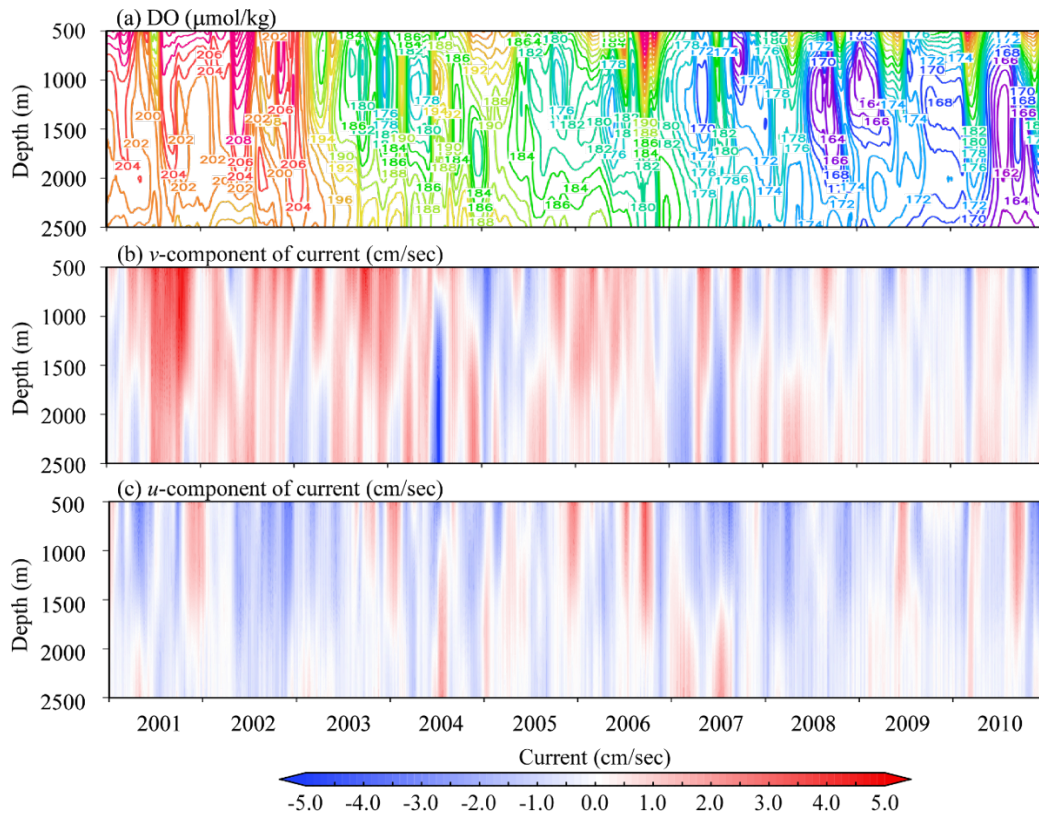
図(1)-16 1000m深における2002～2003年と2009～2010年それぞれ2年間平均の流速・溶存酸素量の比較

図(1)-15(a)の日本海盆北東部測点および大和海盆南西部測点における溶存酸素量・流速の鉛直構造(500～2500m深)の経時変化を図(1)-17および図(1)-18にそれぞれ示した。両測点に共通してみられる傾向としては、溶存酸素量の上昇が見られる日時・深さでは比較的強い南向き(流速 v 成分が負)の流れが発生していること、溶存酸素量の低下が1000～2000m深を中心を生じていることである。前者については、上述したとおり、比較的高い溶存酸素を含む水塊の南下と考えられる。後者については、先行研究^{29), 30)}において極小層と呼ばれているものに相当し、1960年代には深度800m付近に見られたものが、1990年代後半には本シミュレーション結果とほぼ同じ深度1500m付近に現れるようになっていたことが指摘されている³¹⁾。図(1)-17および図(1)-18では、1000～2000m深における溶存酸素量の極小層の出現は北向き(流速 v 成分が正)の流れが発生するときと対応しているように見える。この関係は2001～2003年頃の日本海盆北東部測点においては必ずしも当てはまらないが、これは周辺に溶存酸素量が低い水塊が存在しないためと考えられる(図(1)-16)。

以上の結果より、日本海盆・大和海盆の深層・底層に見られる溶存酸素量の変動は流動への依存性が高く、溶存酸素量の長期減少傾向は熱塩循環の変化によってもたらされていることが示唆された。ただし、本シミュレーションは、計算期間が10年間とはいえ現象を解析するには不足である上、大和海盆における溶存酸素量の低下を過大に評価する問題があるため、ここで得られた知見は不確実性を残していると言わざるを得ない。誤差をもたらした原因としては、上述の熱塩循環の変化による溶存酸素の供給低下が過剰であること、大和海盆における有機物の上層からの沈降量、深層・底層の分解量が過大であることが考えられ、今後現場観測等を通じてモデルの再現性の向上を図る必要がある。



図(1)-17 日本海盆北東部測点における溶存酸素量・流速の鉛直構造の経時変化



図(1)-18 大和海盆北東部測点における溶存酸素量・流速の鉛直構造の経時変化

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

日本海は独自の熱塩循環を持つ世界でも稀な縁辺海である。したがって、産業活動によって大気へ排出された人為起源CO₂が他の海域に比べてより早く、そしてより多く海洋内部へと吸収される可能性が高い。しかしながら、周辺を4つの国に囲まれた国境の海であるために観測の実施そのものが難しく、日本海の広範にわたるCO₂関連化学種の観測は、1990年代のCREAMS (Circulation Research of the East Asian Marginal Seas)³²⁾と、その後継プロジェクトのCREAMS-IIの一環として実施された2例^{21), 26)}しかなく、日本海における炭素循環の解明には至らない状況であった。したがって、今回およそ20年ぶりにCO₂関連化学種の情報が得られたことに大きな意義がある。その結果、最近20年あまりで深海(2000m以深)の人為起源CO₂が急増したことが明らかになった。その要因が日本海の熱塩循環の弱化による深海での有機物分解の促進であるとする仮説は、温暖化の進行によって海洋内部のCO₂が増大すること、すなわち深海において酸性化が進行する可能性を示唆するものであり、海洋炭素循環の将来予測の精緻化を行う上で極めて重要な知見となるものであろう。また、大学練習船等による表層pCO₂観測では3年間で計5回の観測を実施することができ、過去20年間で20例しかなかった日本海のpCO₂観測データについて充実を図ることができた。これら観測データの充実と解析手法の高度化により、最近20年間にわたる日本海表層のpCO₂水平分布推定法を確立し、日本海全域におけるpCO₂分布の季節変化や経年変化を世界ではじめて再現することに成功した。さらに、この推定法をもとに大気海洋間CO₂フラックスを評価できたことは、気候変動による日本海炭素循環応答を評価する上でのマイルストーンになったと考えている。

本研究で実施した日本海の3次元シミュレーションは、流動と物質循環の双方を力学ベースで解析するものとしては、水平・鉛直分解能の高さおよび解析期間の長さの点において他に例を見ないものである。現時点では大和海盆深海における溶存酸素量の再現性について課題を残しているが、この長期高解像度シミュレーションによって熱塩循環の変化と溶存酸素量の長期減少傾向の関係性が示されたことは極めて意義が高く、日本海の物質循環機構や気候変動影響の解明を加速させる有用な成果と言える。

(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>

日本海深海における人為起源CO₂濃度が最近20年あまりで急増していることを明らかにし、この増加分が深海での有機物分解の影響による可能性が高いとする仮説を提案した。従来の炭素循環の概念では海洋は表層における大気中の人為起源CO₂の吸収域としての役割に焦点が当てられてきたところだが、本仮説は温暖化の進行による熱塩循環の変化という、海洋構造そのものの変化が深海のCO₂増加を促進させる可能性を見いだした最初の知見となる。今後、更なるデータの精査や解析が必要ではあるが、本成果は海洋炭素循環の将来予測の精緻化を実施していく上で極めて重要な情報を提供したものであり、現在執筆中の本成果を含む研究論文が大きなサイテーションを得る可能性は高い。また、温暖化の進行によって日本海の炭素循環がすでに変化していること、これにともなって酸性化の進行が極めて速いことを明示したことは、私たちにとって最も身近な日本海における温暖化影響の深刻さを実証したこととなる。これは行政による温暖化対策の重要性に関する啓発活動へ貢献するものと考えている。

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）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 千手智晴、荒巻能史：号外海洋「海洋システムの謎に挑む化学－蒲生俊敬教授退職記念号」， 61, 132-139 (2018)
「ポテンシャル水温と放射性炭素の鉛直分布に基づく日本海深層の鉛直拡散係数の推定」
- 2) 荒巻能史：Ocean Newsletter, 427, 2-3 (2018)
「日本海底層の無酸素化の懸念－地球温暖化との関係」
- 3) 荒巻能史：一般社団法人日本ボイラ協会・ボイラニュース2017年12月号 (2017)
「時の動き－地球温暖化による日本海の深層循環の弱化」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 荒巻能史：日本海洋学会西南支部・水産海洋学会合同シンポジウム「日本海研究の現状と今後について」 (2018)
基調講演「気候変動に伴う日本海の海洋環境変動に関する研究」
- 2) 荒巻能史、久保篤史、中岡慎一郎、熊本雄一郎：日本海洋学会2018年度秋季大会 (2018)
招待講演「日本海における人為起源二酸化炭素濃度の推定」
- 3) 松本和彦、笹岡晃正、熊本雄一郎、荒巻能史：日本海洋学会2018年度秋季大会 (2018)
「日本海の植物プランクトン分布・基礎生産力の時空間変動」
- 4) 熊本雄一郎、荒巻能史：日本海洋学会2018年度秋季大会 (2018)
「2004年以降日本海底層水の溶存酸素濃度が単調に減り続けているのは何故か？」
- 5) 中岡慎一郎、荒巻能史：日本海洋学会2017年度秋季大会 (2017)
「日本海における海洋CO₂分圧観測」
- 6) 千手智晴、荒巻能史：海洋地球化学フォーラム2017 ～大気－海洋－海底の物質循環～ (2017)
「水温と¹⁴Cの鉛直分布に基づく日本海深層の鉛直拡散係数の推定」
- 7) 千手智晴、荒巻能史：研究集会「東アジアから太平洋規模への海洋・大気循環に関わる素過程研究の精緻化と環境変動への応用」 (2017)
「鉛直一次元モデルによる日本海深層の鉛直拡散係数の評価」
- 8) T. SENJYU, T. ARAMAKI: International Workshop on Mixing and Water Mass Modification in the East Asian Marginal Seas, Fukuoka, Japan, 2017
“Evaluation of vertical eddy diffusivity in the abyssal Japan/East Sea based on the one-dimensional advection-diffusion model in temperature and ¹⁴C profiles”
- 9) 熊本雄一郎、荒巻能史：日本地球惑星科学連合2017年大会 (2017)
「2016年の日本海東部日本海盆、大和海盆、対馬海盆における溶存酸素濃度の鉛直分布」
- 10) 荒巻能史、田中伸一：日本地球惑星科学連合2017年大会 (2017)
「溶存クロロフルオロカーボン類が示す日本海熱塩循環の急激な弱化の証拠」

(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) 市民向け講演会「日本海で進みつつある環境の変化～その驚くべき実態に迫る～」を主催する（共催：九州大学応用力学研究所、2019年2月16日、九州大学西新プラザ、参加者25名）とともに、当サブテーマから以下の講演を行った。荒巻能史「温暖化に伴う日本海的环境変化ー化学分析が捉えた決定的証拠」
- 2) 市民向け講演会「日本海で進みつつある環境の変化～その驚くべき実態に迫る～」を主催する（共催：新潟大学理学部、2018年1月21日、新潟大学駅南キャンパスときめいと、参加者80名）とともに、当サブテーマから以下の講演を行った。荒巻能史「ミニ大洋・日本海～忍び寄る温暖化の影を追う～」
- 3) 市民向け講演会「日本海で進みつつある環境の変化～その驚くべき実態に迫る～」を主催する（共催：金沢大学環日本海域環境研究センター、2017年1月22日、金沢市文化ホール、参加者20名）とともに、当サブテーマから以下の講演を行った。中岡慎一郎「二酸化炭素を吸収する日本海」

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHKワールド（国際放送）「Science View」（2019年1月9日放映、A Warning from the Sea of Japan - a "Miniature Ocean"）
- 2) 産経新聞（2018年7月30日、全国版15面、「日本海で進む「海の温暖化」ー異変が世界に先行 漁業に打撃懸念」）
- 3) 日本経済新聞（2018年4月15日、全国版30面、「日本海、温暖化を先取り」）
- 4) 新潟日報（2018年2月17日、33面オピニオン欄・探る2018、「「世界の海の縮図」日本海」）
- 5) 北陸朝日放送・HABスーパーJチャンネル（2018年2月2日放映、「特集 ミニ大洋 日本海の温暖化を追う」）
- 6) NHK Eテレ「サイエンスZERO」（2017年9月3日放映、「小さな大洋“日本海”からの警告」）
- 7) 読売新聞（2017年5月15日、夕刊全国版10面、「日本海の海水循環 半減」）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 気象庁地球環境・海洋部：
https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html (2019), 海面水温の長期変化傾向（日本近海）.
- 2) H. Minami, Y. Kano, K. Ogawa: J. Oceanogr., 55, 197-205 (1999), Long-term variations of potential temperature and dissolved oxygen of the Japan Sea Proper Water.
- 3) T. Gamo: Geophys. Res. Lett., 26, 3137-3140 (1999), Global warming may have slowed down the deep conveyor belt of a marginal sea of the northwestern Pacific: Japan Sea.
- 4) T. Aramaki, T. Mizushima, Y. Mizutani, T. Yamamoto, O. Togawa, S. Kabuto, T. Kuji, A. Gottdang, M. Klein, D.J.W. Mous: Nucl. Instrum., Meth B 172, 18-23 (2000), The AMS facility at the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI).
- 5) H. Kitagawa, T. Masuzawa, T. Nakamura, E. Matsumoto: Radiocarbon, 35, 295-300 (1993), A batch preparation method of graphite targets with low background for AMS ^{14}C measurements.
- 6) H. Kume, Y. Shibata, A. Tanaka, M. Yoneda, Y. Kumamoto, T. Uehiro, M. Morita: Nucl. Instrum., Meth B 123, 18-23 (1997), The AMS facility at the National Institute for Environmental

Studies (NIES).

- 7) M. Stuiver, H. A. Polach: Radiocarbon, 19, 355-363 (1977), Discussion: reporting of ^{14}C data.
- 8) 斉藤正明, 高田茂, 島宗孝之, 綿善則, 清水秀人, 林貴信: Radioisotope, 45, 285-292 (1996), 固体高分子電解質を用いたトリチウム電解濃縮.
- 9) S. Nakaoka, M. Telszewski, Y. Nojiri, S. Yasunaka, C. Miyazaki, H. Mukai and N. Usui: Biogeosciences, 10, 6093-6106 (2013), Estimating temporal and spatial variation of ocean surface pCO_2 in the North Pacific using a self-organizing map neural network technique.
- 10) 国立環境研究所: 国立環境研究所研究プロジェクト報告, 115, 115p. (2016), 東アジア広域環境研究プログラム(重点研究プログラム).
- 11) C. W. Hirt and B. D. Nichols: J. Comput. Phys., 39, 201-225 (1981), Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries.
- 12) N. Furuichi T. Hibiya, Y. Niwa: J. Oceanogr., 68, 285-294 (2012), Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using a large eddy simulation model.
- 13) J. Kondo: Bound. -Lay. Meteorol., 9, 91-112 (1975), Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions.
- 14) N. Usui, T. Wakatsuchi, Y. Tanaka, N. Hirose, T. Toyuda, S. Nishikawa, Y. Fujii, Y. Takatsuki, H. Igarashi, H. Nishikawa, Y. Ishikawa, T. Kuragano, M. Kamachi: J. Oceanogr., 73, 205-233 (2017), Four-dimensional Variational Ocean Reanalysis: A 30-year high-resolution dataset in the western North Pacific (FORA-WNP30).
- 15) K. Matsumoto, T. Takanezawa, M. Ooe: J. Oceanogr., 56, 567-581 (2000), Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan.
- 16) T. Aramaki, S. S. Tanaka, S. Kushibashi, Y. -I. Kim, C. -J. Kim, G. -H. Hong, T. Senjyu: Radiocarbon, 55, 1675-1682 (2013), Spatial distribution of radiocarbon in the southwestern Japan/East Sea immediately after bottom water renewal.
- 17) T. Senjyu, T. Aramaki, S. Ootosaka, O. Togawa, M. Danchenkov, E. Karasev, Y. Volkov: Geophys. Res. Lett., 29, doi:10.1029/2001GL014093 (2002), Renewal of the bottom water after the winter 2000-2001 may spin-up the thermohaline circulation in the Japan Sea.
- 18) T. Gamo, N. Momoshima, S. Tolmachyov: Geophys. Res. Lett., 29, 4143-4146 (2001), Recent upward shift of the deep convection system in the Japan Sea, as inferred from the geochemical tracers tritium, oxygen, and nutrients.
- 19) T. Senjyu, H. R. Shin, J. H. Yoon, Z. Nagano, H. S. An, S. K. Byun, C. K. Lee: Deep-Sea Res. II, 52, 1726-1741 (2005), Deep flow field in the Japan/East Sea as deduced from direct current measurements.
- 20) Y. Kumamoto, T. Aramaki, S. Watanabe, M. Yoneda, Y. Shibata, O. Togawa, M. Morita, K. Shitashima: J. Oceanogr., 64, 429-441 (2008), Temporal and spatial variations of radiocarbon in Japan Sea Bottom Water.
- 21) C. T. A. Chen, S. L. Wang, A. S. Bychkov: J. Geophys. Res., 100, 13737-13745 (1995), Carbonate chemistry of the Sea of Japan.
- 22) N. Gruber, J. L. Sarmiento, T. F. Stocker: Global Biogeochem. Cycles, 10, 809-837 (1996), An improved method for detecting anthropogenic CO_2 in the oceans.
- 23) F. Touratier and C. Goyet: J. Mar. Sys., 46, 169-179 (2004), Definition, properties, and Atlantic Ocean distribution of the new tracer TrOCA.
- 24) F. Touratier, L. Azouzi, C. Goyet: Tellus, 59B, 318-325 (2007), CFC-11, $\Delta^{14}\text{C}$ and ^3H tracers as a means to assess anthropogenic CO_2 concentrations in the ocean.

- 25) R.A. Feely, C.L. Sabine, K. Lee, W. Berelson, J. Kleypas, V.J. Fabry, F.J. Millero: Science, 305, 362-366 (2004), Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans.
- 26) G.-H. Park, K. Lee, P. Tishchenko, D.-H. Min, M.J. Warner, L.D. Talley, D.-J. Kang, K.-R. Kim: Global Biogeochem. Cycles, 20, GB4013 (2006), Large accumulation of anthropogenic CO₂ in the East (Japan) Sea and its significant impact on carbonate chemistry.
- 27) C.T.A. Chen, H.K. Lui, C.H. Hsieh, T. Yanagi, N. Kosugi, M. Ishii, G.C. Gong: Nature Climate Change, 7, 890-894 (2017), Deep oceans may acidify faster than anticipated due to global warming.
- 28) C.L. Quéré et al.: Earth Syst. Sci. Data, 10, 405-448 (2018), Global carbon budget 2017.
- 29) T. Gamo and Y. Horibe: J. Oceanogr. Soc. Japan, 39, 220-230 (1983), Abyssal circulation in the Japan Sea.
- 30) T. Senjyu and H. Sudo: J. Mar. Sys., 4, 349-362 (1993), Water characteristics and circulation of the upper portion of the Japan Sea Proper Water.
- 31) 金慶烈, 金垢, 姜東鎮, Y.N. Volkov, 尹宗煥, 竹松正樹: 海の研究, 11(3), 419-429 (2002), CREAMSで見た変化する東海/日本海.
- 32) M. Takematsu: J. Oceanogr., 55, 101 (1999), Foreword.

II-2 深層水の構造変化とそれにともなう深層流の変化

九州大学 応用力学研究所

地球環境力学部門 海洋動態解析分野

千手 智晴

平成28～30年度累計予算額：26,975千円

(うち平成28年度：8,450千円、平成29年度：9,500千円、平成30年度：9,025千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

温暖化にともなう日本海の深層水（日本海固有水）の形成の停滞が示唆されている。一方、近年の数値モデル研究からは、深層水の形成量の減少は、深層循環の弱화를引き起こすことが予測されている。そこで、過去に深層流の観測が行われた日本海盆東部と大和海盆南部で深層流の再観測（revisit観測）を実施し、流動場の長期的な変動傾向を調べた。その結果、日本海盆東部では過去22年間に平均流速が約2/3にまで弱まっていることが示された。これに対して大和海盆南部では、過去8年間で平均流に大きな変化はみられなかった。また両海域とも、渦活動には大きな経年変動は認められなかった。

大和海盆西部に位置する気象庁のモニタリングポイント（Sta. PM5）に流速計を係留し、1年間にわたる深層流の実測を行った。観測の結果、この地点では周年を通して南向きの流れが卓越しており、海盆内部の反時計回り循環の一部を構成していると考えられた。これまでSta. PM5で観測されてきた海水特性量の変動は、この循環流によって移流された水塊の時間変動を反映したものと考えられる。

日本海全域の海洋構造の変化を調べるため、Argoフロートのデータを解析した。2002～2016年に得られた水温プロファイルデータ（14614点）を極前線の南北、大和堆の東西で4つの海域に分類し、さらに3年ごとの期間に分けて、各海域の水温分布の時間変動を検討した。その結果、日本海の深層水温（400～700m）は全域で昇温傾向にあり、特に極前線以南で昇温率が大きいことがわかった。

[キーワード]

日本海固有水、熱塩循環、深層循環、係留観測、海洋構造の変化

1. はじめに

日本海は独自の熱塩循環を有する「ミニチュア・オーシャン」として知られているが、その大きさ故に温暖化に対して脆弱であると考えられる。実際、日本海深層では少なくとも1960年代末から続く水温上昇と溶存酸素量の漸減が報告されており^{1),2)}、その原因として温暖化にともなう深層水（日本海固有水）の形成の停滞が議論されている³⁾。一方、日本海を想定した、単純化された数値モデル研究によると、深層循環の強さは新たに形成される深層水の量に強く依存することが示されている⁴⁾。この実験結果は、温暖化により日本海固有水の形成量が減少傾向にあるのならば、日本海の深層流も弱まる傾向にあることを示唆するものである。もしも本当に深層流が弱まっているならば、日本海全体の熱や物質分布、さらにはそれに依存する海洋生態系にも大きな変化が生じることが懸念される。そこで本研究では、過去に深層流の実測が行われた地点で再観測（revisit観測）を行い、長期的な流れの変動傾向を明らかにする。また、長期間にわたって水温や溶存酸素量が観測されている気象庁のモニタリングポイントに流速計を係留し、そこでの深層流の特徴を明らかにすることで、海水特性の長期変動に対する流動場の影響を検討する。さらに、公開されているArgoフロートデータを利用して、日本海全域にわたる海洋構造の変化を把握する。

2. 研究開発目的

温暖化にともなう日本海深層の海洋構造の変化と、それにともなう深層流の変化を、海洋観測と既往

観測資料の解析を通して明らかにする。

3. 研究開発方法

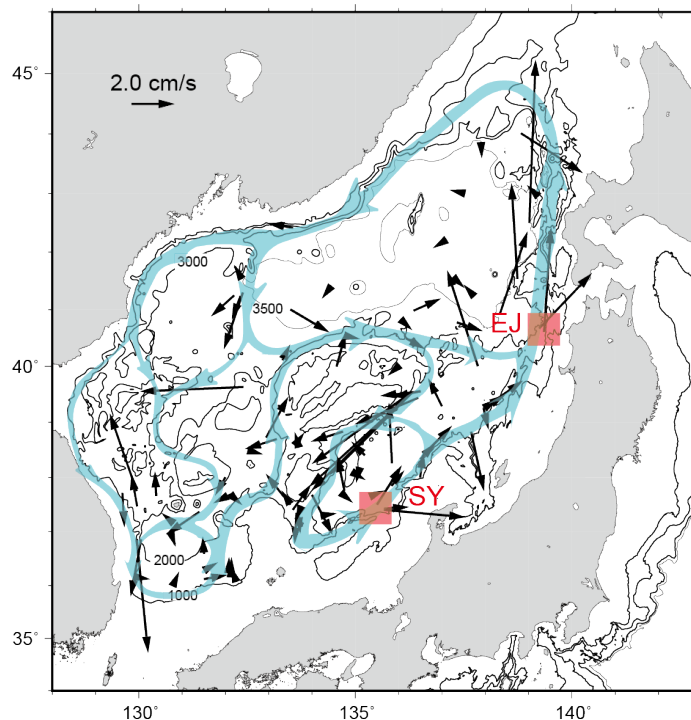
本研究で行った係留観測の一覧を表(2)-1に示す。以下、この表を参照しつつ、項目毎に研究開発方法を説明する。

表(2)-1 流速計の係留位置、係留点の水深、観測深度、観測期間
JBは日本海盆、YBは大和海盆の観測点を示す。

Basin	Sta.	Lat.	Long.	depth (m)	Obs. depth (m)	Period
JB	EJ	40-37.1	139-22.0	2269	970, 1960	2016/07/22 - 2017/06/06
	A6	40-58.3	138-40.5	3403	970, 2530, 3330	2017/06/07 - 2018/04/29
YB	PM5	37-42.4	134-41.6	2960	930, 1720, 2450	2017/10/12 - 2018/10/04
	X16	37-18.0	135-15.1	2070	1980	2016/05/09 - 2017/05/10
	Y16	37-21.6	135-40.3	1970	1890	2016/05/09 - 2017/01/25
	P16	37-21.5	135-29.5	2230	2140	2016/10/12 - 2017/05/10
	Q16	37-19.8	135-40.2	1740	1690	2016/10/12 - 2017/05/10
	R16	37-23.5	135-40.3	2690	1990	2016/10/12 - 2017/05/10
	R17	37-24.0	135-38.5	2700	1080, 2100, 2610	2017/05/17 - 2018/05/10
	Y18	37-22.1	135-39.9	2200	1940	2018/05/15 - 2018/10/06
	Z18	37-25.6	135-46.4	2196	1880	2018/05/15 - 2018/10/04

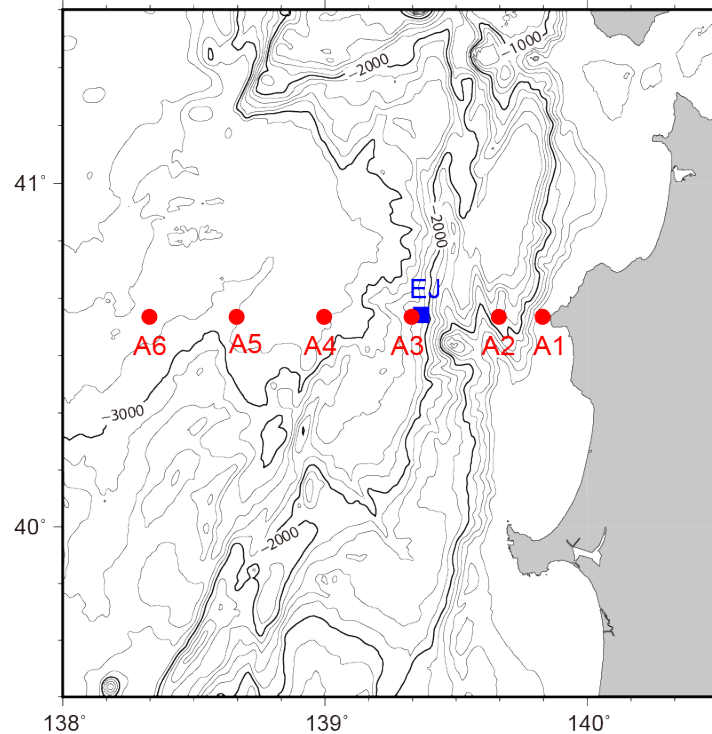
(1) 深層流のrevisit観測

深層流の長期的な変動傾向を調べるために、日本海盆東部(EJ)と大和海盆南部(SY)に流速計を係留し、深層流の直接測流を実施した(図(2)-1)。これらの海域では過去に深層流の実測が行われており、今回得られたデータと比較することにより、流れの長期的な変動傾向を評価できる。また、観測点が海盆に沿った比較的安定した流路の中に位置することも、これらの海域を選択した理由である⁵⁾。



図(2)-1 日本海深層における平均流ベクトルの分布と深層循環の概念図
EJ(日本海盆東部)とSY(大和海盆南部)はrevisit観測域を示す。

日本海盆東部の観測は、図(2)-2のSta. EJ (40° 37.11' N 139° 22.00' E) において実施した。この地点では1994年4月2日～1995年4月3日に、300mと2100mの流れの観測が行われている⁶⁾。今回の観測では、流速計 (Nortek社の超音波ドップラー流速計、Aquadopp-DW) を970mと1960mの2層に設置し、10分毎に1分間の平均流向・流速を記録した。係留系は北海道大学練習船おしよる丸により、2016年7月22日に設置し、2017年6月6日に回収した。



図(2)-2 日本海盆東部における観測点

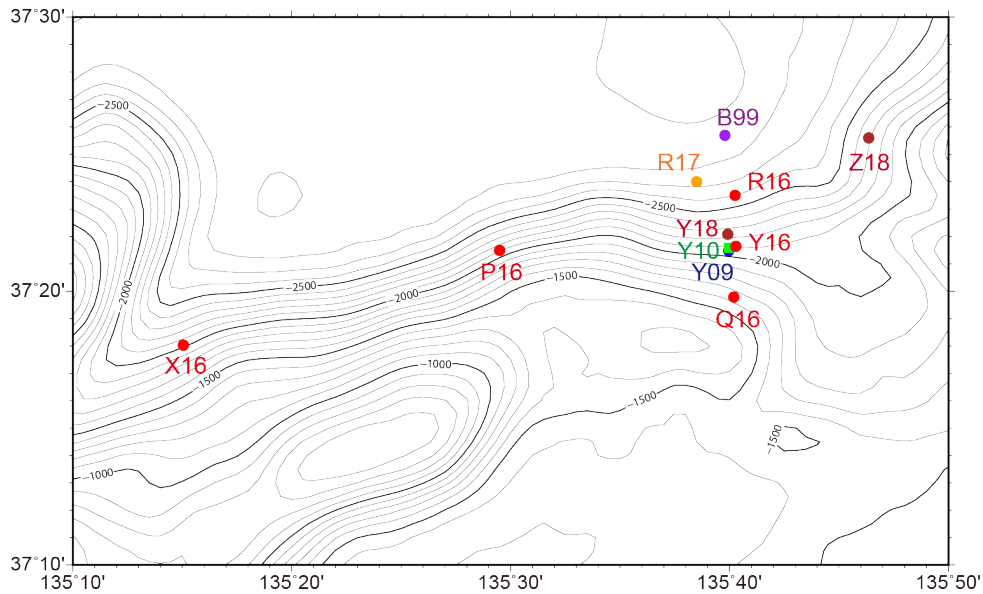
青四角のSta. EJ：流速計の係留点、赤丸のSta. A1～A6：青森県水産試験場による観測定点

大和海盆南部での観測は、図(2)-3のSta. X16, Y16, P16, Q16, R16, R17, Y18, Z18で行った。用いた流速計は、いずれも超音波ドップラー流速計(Nortek社のAquadopp-DW、またはAANDERAA社のSEAGUARD)である。なお、図(2)-3には過去に実施した深層流の観測点 (Sta. B99, Y09, Y10) も記載している。これらのデータを相互に比較することにより、深層流の時間変動と空間構造を評価した。

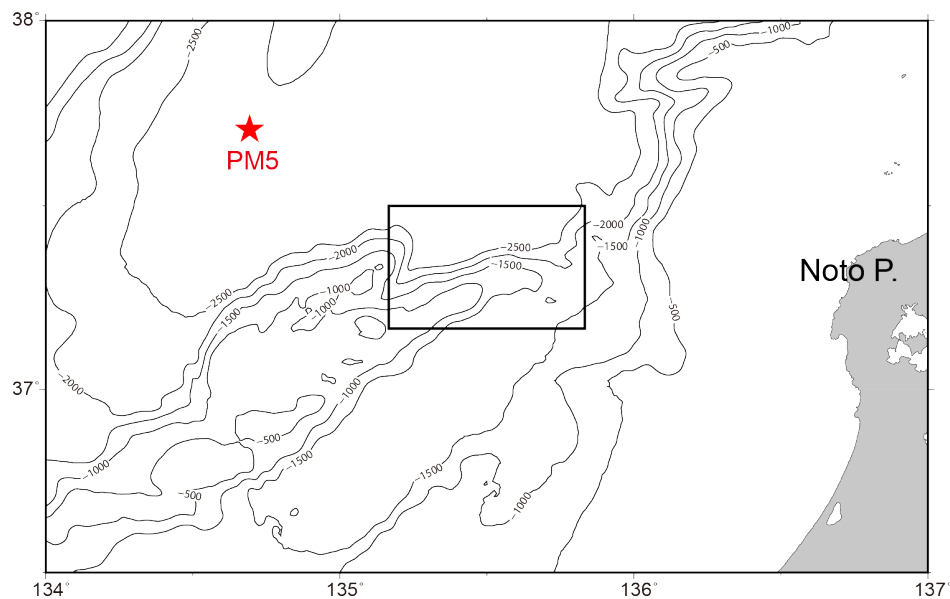
なお過去のすべての深層流の観測では、ベクトル平均型の流速計 (AANDERAA社製のRCM8またはRCM7) を用いている。例えば1994～1995年にSta. EJで行われた観測では、72秒ごとに流れを測定し、それを観測インターバル (1時間) にわたってベクトル平均したものを1時間毎のデータとして記録している。これに対して本研究のSta. EJでの観測では、上述のように10分毎のバースト観測を行っている。そこで等価なデータセットとするために、今回得られた10分毎のデータに60分 (7点) の移動平均を施し、毎正時の値をサブサンプリングしたものを作成した。大和海盆南部のデータについても、ほぼ同様の処理を施した上で過去のデータとの比較を行った。データセットに48時間のタイドキラーフィルター⁷⁾を施し、短周期変動を除去したものを解析の基本データセットとした。

(2) Sta. PM5での深層流の計測

大和海盆西部のSta. PM5に流速計を係留し、深層流を計測した (図(2)-4)。この測点 (37° 42.0' N 134° 42.0' E) は気象庁のモニタリングポイントの一つであり、1960年代から観測船により水温、塩分、溶存酸素量などの観測が継続されている。このデータに基づき日本海深層の昇温や溶存酸素量の漸減が議論されてきたが²⁾、流れに関する情報が皆無であったため、観測結果の解釈には限界があった。そこで



図(2)-3 大和海盆南部における流速計の係留点。図(2)-4の四角で囲った領域の拡大図を示す。



図(2)-4 Sta. PM5の位置（赤色星印）と図(2)-3の領域（四角で囲まれる領域）の位置関係

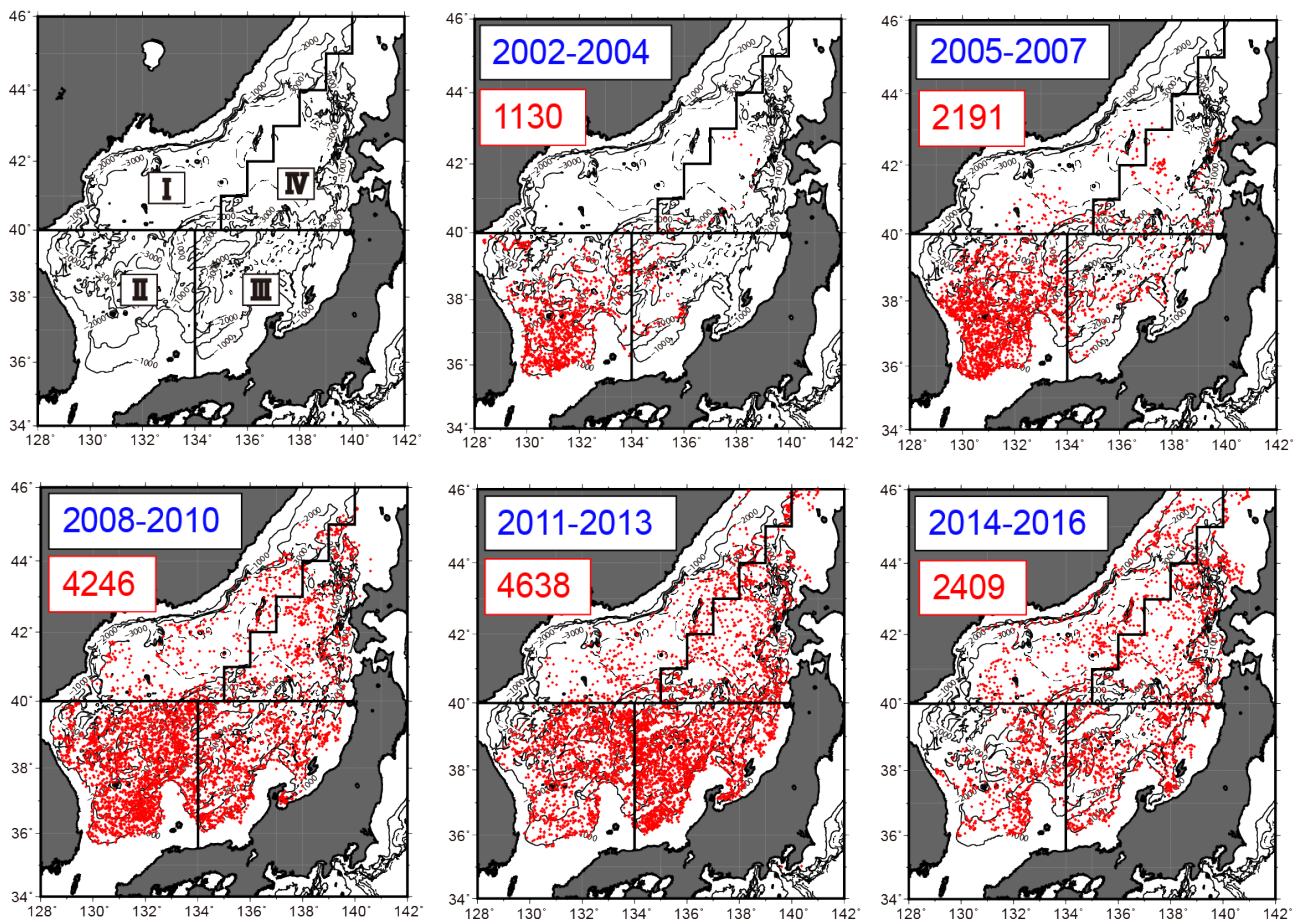
長崎大学練習船長崎丸によりこの地点の930m, 1720m, 2450mに流速計を係留し、2017年10月12日～2018年10月4日の期間の流れを測定した。用いた流速計は、JFEアドバンテック社製の電磁流速計AEM-USB(960m)とAANDERAA社製の超音波ドップラー流速計SEAGUARD(1720mと2450m)である。(1)と同様、48時間のタイムドカラーフィルター⁷⁾を施し、短周期変動を除去したものを解析の基本データセットとした。

(3) Argoフロートによる広域的な海洋構造の変化の把握

船舶を利用した観測では、日本の排他的経済水域外での調査は非常に困難である。そこで、日本海全域の海洋構造の変化を明らかにするために、公開されているArgoフロート（海洋中層を漂流するフロートで、数日に1回海面まで浮上し、水温・塩分の鉛直分布を計測する）のデータを解析した。全球気象通信回線（GTS回線）上に流通している2002～2016年の水温プロファイルデータ（14982点）に対して、観

測層が10層以上で、500m以深まで観測されているデータを抽出し、最終的には14614点のデータを解析した(図(2)-5)。なおArgoデータの塩分には異常値が含まれていたため、本研究では使用を断念し、ポテンシャル水温の算出の際には日本海固有水の一般的な塩分値(34.067)を与えた。また日本海域のArgoフロートは韓国が投入したものが多く、ほとんどのデータの観測最深層が600~800mとなっていたため、700mまでを解析の対象とした。

抽出されたArgoデータを先行研究⁸⁾に基づき極前線の南北、大和堆の東西で4つの海域に分類し、さらに3年ごとの期間に分けて、各海域の水温分布の時間変動を検討した(図(2)-5)。なお、海域平均値を求めるあたり、各年代でデータが10個以上存在する場合にだけ平均値と標準偏差を計算した。そのため、Argoフロートが対馬海盆(海域Ⅱ)に集中していた2002~2004年については、海域Ⅰは欠測、海域ⅢとⅣについても700mは欠測となっている。さらに海域Ⅰの700mについては、2005~2006年も欠測となっている。

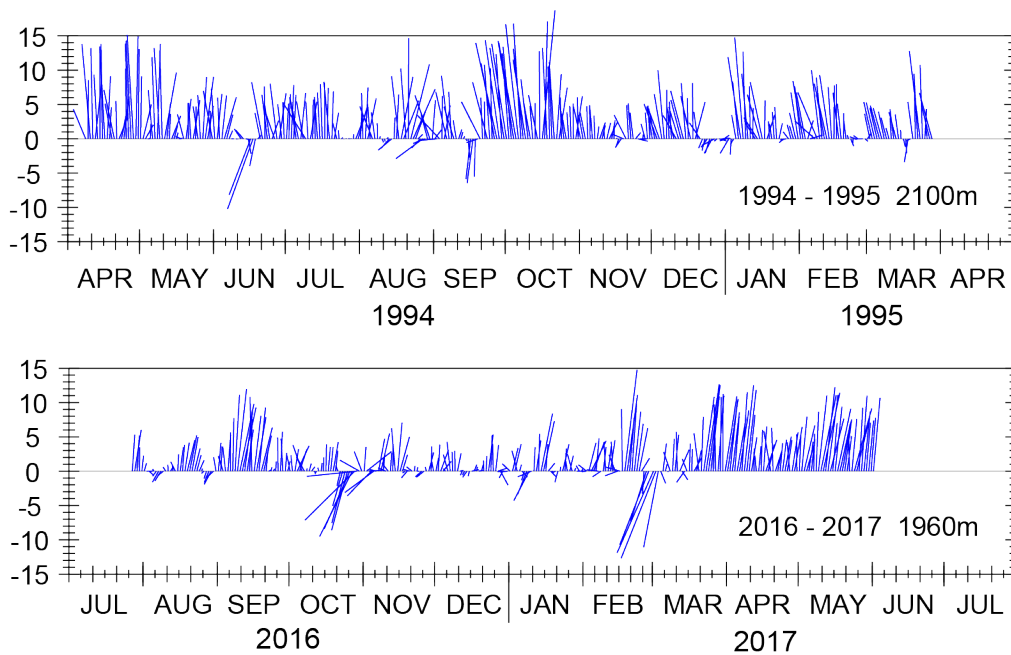


図(2)-5 Argoフロートデータの解析に用いた海域区分(上段左)と3年ごとに区分したArgoフロートデータの分布。各図の左上の数値は年代(青字)とデータ数(赤字)を示す。

4. 結果及び考察

(1) 深層流のrevisit観測

まず、日本海盆東部(EJ)での観測結果について述べる。Sta. EJにおける1994~1995年と2016~2017年の約2000m深における流れの時系列を図(2)-6に示す。両期間とも海底地形に沿った北向きの流れが卓越しているが、1994~1995年当時に比べて、2016~2017年の観測では全体的に流れが弱くなっていることがわかる。実際、両期間に共通な8~5月の平均流を比べると(表(2)-2)、2016~2017年の平均流速は1994~1995年の値の約2/3となっている。一方、標準偏差に注目すると、両期間とも同程度の値を示して



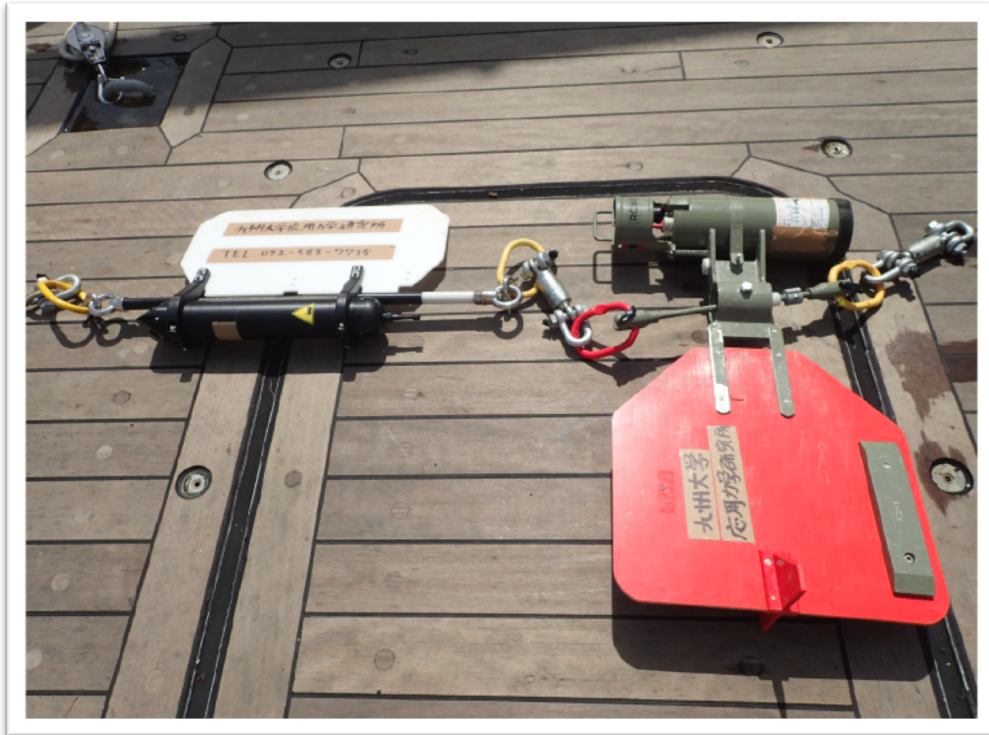
図(2)-6 日本海盆東部のSta. EJの約2000m深における流れのスティックダイアグラム
上段：1994～1995年、下段：2016～2017年

いる。すなわち、変動の大きさはそのまま、平均流速のみが小さくなっており、両期間の平均流速の差 (1.86cm/s) は統計的に有意なものである。標準偏差の大きさは、主に海流の蛇行や中規模渦等の渦活動に依存すると考えられる。このことから、観測海域の渦活動は22年間で大きな変化が無かったことが示唆される。

表(2)-2 日本海盆東部のSta. EJで得られた約2000m深の平均流と標準偏差 (SD)
値は両期間に共通な8～5月の10ヶ月間についてのものである。

Period	Mean (cm s ⁻¹)				SD (cm s ⁻¹)	
	Dir. (°T)	Speed	E-W	N-S	E-W	N-S
1994-1995	355.2	5.17	-0.43	5.15	1.00	4.64
2016-2017	2.6	3.29	0.15	3.28	1.30	4.43

平均流速に影響する要因として、①観測位置の違い、②観測深度の違い、③計測機器の違い、④対馬海流の影響について検討した。その結果、①については両地点間の距離が1マイル以下であり、付近に海山等の特徴的な地形が存在しないことから、主要因とは考えられないことがわかった。また②については、1994～1995年の観測では2100m、2016～2017年の観測では1960mと観測深度が異なるが、流れの傾圧性を考慮しても両期間の平均流速の差を説明できないことが示された。さらに③を検討するため、2018年5月15日～10月6日の期間、大和海盆南縁のSta. Y18にAquadopp-DWとRCM8を同時に係留し、比較実験を行ったが(写真(2)-1)、平均流速と標準偏差を同時に説明するようなデータは得られなかった。④については、青森県水産試験場による定線観測データ(図2-(2))から対馬海流の流路変動を検討した。その結果、1994～1995年は対馬海流が接岸しつつある時期に、2016～2017年は離岸しつつある時期に対応することが示されたが、表層の流れが2000m深の流れに及ぼす影響については不明であった。したがって、いずれの要因も観測された平均流の弱화를説明する決定的な原因とは考えにくいことがわかった。しかしながら、原因を温暖化と断定するには、まだデータが十分ではないことから、追加的な観測を行うなど、今後も注目していく必要がある。

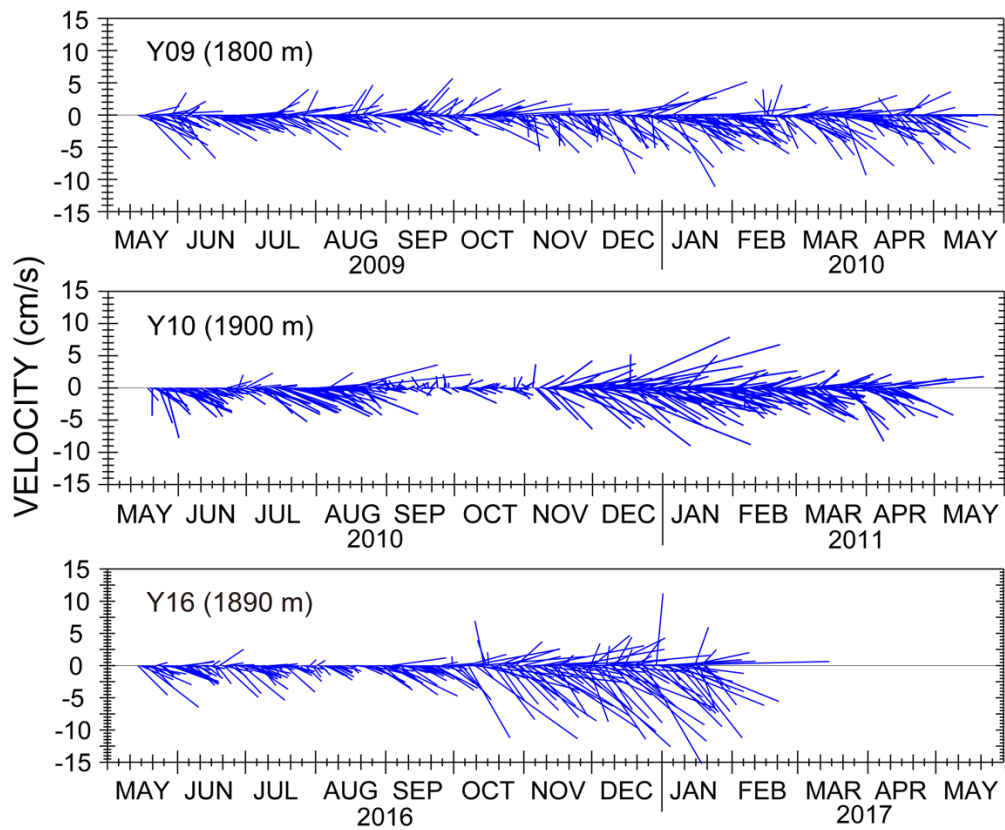


写真(2)-1 Sta. Y18で行った超音波ドップラー流速計（Nortek Aquadopp-DW、写真左側の測器）とローター式流速計（AANDERAA RCM8、右側の測器）の比較実験の様子

次に大和海盆南縁（SY）での結果について述べる。図(2)-3や表(2)-1にあるように、大和海盆南縁では複数回の観測を実施したが、ここでは2009～2011年に実施した観測（Sta. Y09, Y10）の結果と、2016年5月～2017年1月に同一地点・深度で実施したSta. Y16の測流結果を図(2)-7に示す。測器のトラブルによりSta. Y16での観測は2017年1月25日で中断しているが、いずれの観測でも海底地形に沿う東向きの流れが卓越していることがわかる。すべての観測に共通する5～1月の9ヶ月間の平均流と標準偏差を表(2)-3に示す。日本海盆東部とは異なり、平均流向・流速、標準偏差とも各期間で同程度の値となっており、最近8年間では、平均流にも渦活動にも大きな変化がなかったことを示している。流れの鉛直的な構造を調べるために、Sta. R17では1080m, 2100m, 2610mの3層で測流を実施した。各深度の流れの時系列を図(2)-8に示す。また各層の平均流向・流速と標準偏差を表(2)-4に示す。底層で平均流速、標準偏差とも小さめの値を示すが、変動の様子は各層とも類似しており、順圧的な構造をもつことがわかる。

以上をまとめると、日本海盆東部の2000m深では過去22年間で平均流速が約30%弱まっていたが、大和海盆南縁では少なくとも過去8年間で深層流に大きな変化はみられなかった。また両海域とも、渦活動には大きな変動傾向は認められなかった。数値モデル研究⁴⁾から予想されるように温暖化により深層循環が弱まるのならば、その変化は最初に深層水の形成域が存在する日本海盆に現れると考えられる⁹⁾。これに対して大和海盆は、日本海盆とは狭い水路によってのみ接続しており、両海盆間の海水交換は限られたものとなっている^{10), 11)}。大和海盆で深層流に大きな変化が認められなかった原因は、深層水形成域の不在と限定的な海水交換にあると考えられる。このことは、日本海盆と対馬海盆の接続域でも深層流に大きな経年変動がみられないという研究結果からも支持される¹²⁾。

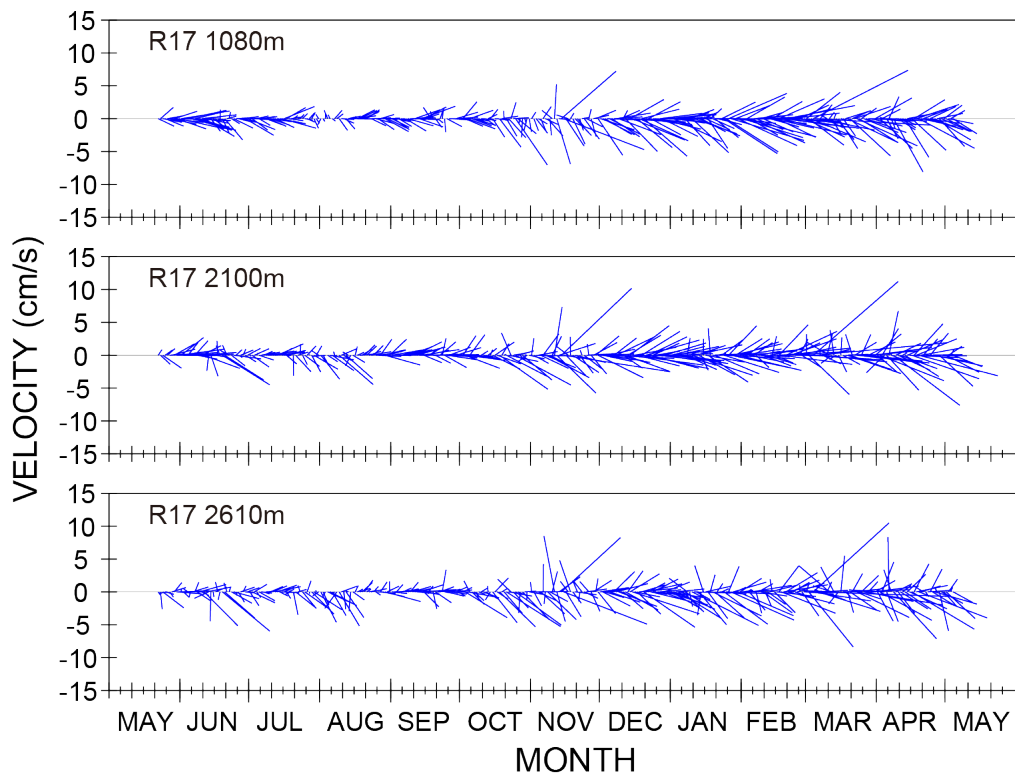
以上は平均流に関する議論であるが、大和海盆南縁では数日周期の流速変動が卓越しており⁵⁾、これらの空間構造が平均流に影響している可能性がある。例として、Sta. Y17の2610mにおける流れの回転スペクトルを図(2)-9に示す。時計回り、反時計回り成分とも、2～4日周期帯にエネルギーピークが認められる。数日周期変動の原因は、海盆南縁の海底斜面に捕捉された地形成ロスビー波が原因と考えられ¹³⁾、その構造が Sta. X16, Y16, P16, Q16, R16, Y18, Z18 での測流結果、および2016年5月、10月に実施



図(2)-7 大和海盆南部のSta. Y09, Y10, Y16の約1900m深における流れのスティックダイヤグラム
 上段：Y09, 2009年5月～2010年5月, 中段：Y10, 2010年5月～2011年4月,
 下段：Y16, 2016年5月～2017年1月

表(2)-3 大和海盆南部のSta. Y09, Y10, Y16 で得られた約 1900m 深における平均流と標準偏差 (SD)
 値はすべての観測に共通な 5～1 月の 9 ヶ月間についてのものである。

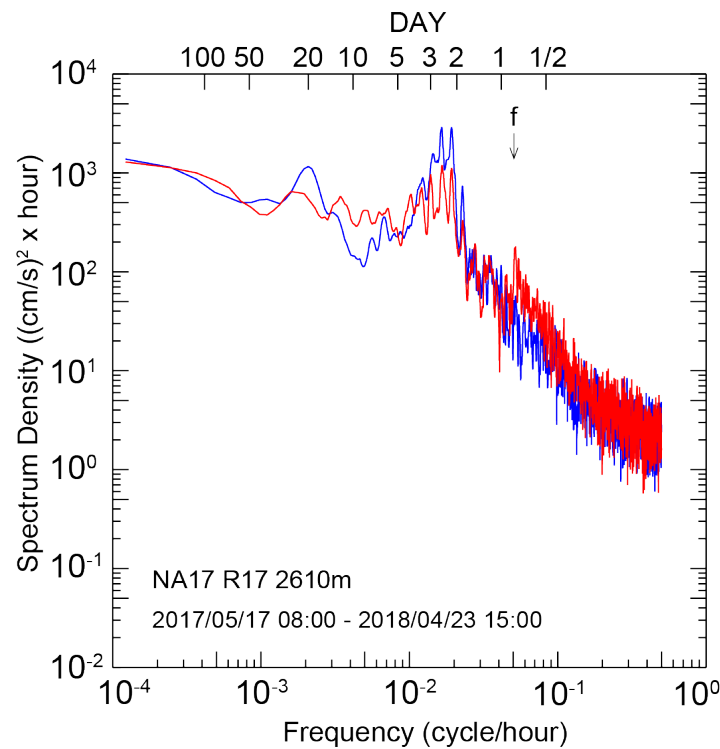
Sta. (depth)	Mean (cm s ⁻¹)				SD (cm s ⁻¹)	
	Dir. (°T)	Speed	E-W	N-S	E-W	N-S
Y09 (1800 m)	105.1	5.58	5.38	-1.46	3.41	2.46
Y10 (1900 m)	102.1	5.50	5.38	-1.16	4.80	2.45
Y16 (1890 m)	110.9	5.62	5.25	-2.01	4.39	3.45



図(2)-8 大和海盆南部のSta. R17における流れのスティックダイアグラム
 上段：1080m, 中段：2100m, 下段：2610m

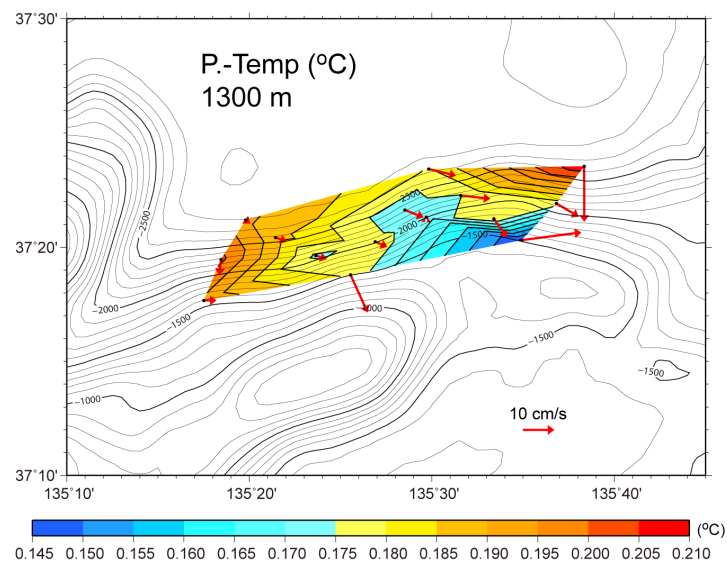
表(2)-4 大和海盆南部のSta. R17における各層の平均流と標準偏差 (SD)

Depth (m)	Mean (cm s ⁻¹)				SD (cm s ⁻¹)	
	Dir. (°T)	Speed	E-W	N-S	E-W	N-S
1080	100.9	5.58	3.62	-0.68	2.63	2.06
2100	88.3	5.50	3.73	0.11	3.88	1.64
2610	101.1	5.62	2.64	-0.51	2.92	1.86



図(2)-9 Sta. R17の2610m深における流れの回転スペクトル
赤：時計回り成分，青：反時計回り成分。図中のfは慣性周波数を表す。

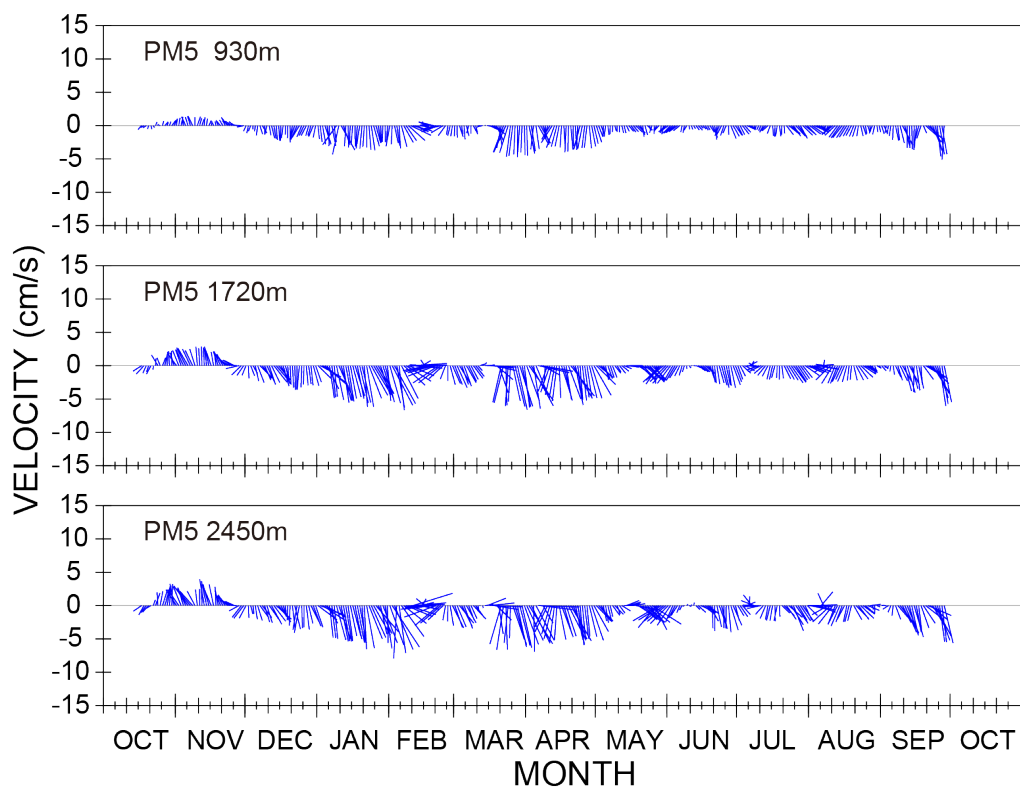
したCTD/LADCP観測結果によって明らかにされている。2016年10月の観測で得られた1300m深におけるポテンシャル水温の水平分布を図(2)-10に示す。観測海域の北東部と西部には比較的高温な領域が、中央部から南東部にかけては低温の領域が広がっており、東西に暖水域と冷水域が交互に分布している様子がわかる。また暖水域と冷水域は温度勾配の大きな領域で仕切られており、蛇行したフロントの存在を示している。測流記録にみられる数日周期の流速変動は、このような暖水域・冷水域にともなう渦列が等深線に沿って伝播するために生じたものと考えられる。



図(2)-10 2016年10月の観測で得られた大和海盆南縁におけるポテンシャル水温の水平分布 (1300m)
赤い矢印はLADCP観測に基づく水平流を示す。

(2) Sta. PM5での深層流の計測

Sta. PM5で観測された流れの時系列を図(2)-11に示す。各層とも類似した変動を示しており、順圧的な特徴が認められる。周年を通して南向きの流れが卓越しているが、観測開始直後の2017年10～11月には北向きの流れが認められる。また、1～4月に流速が大きくなるような季節変動が認められる。平均流の流向は各層とも南南西から南向きとなっているが(表(2)-5)、この流れは大和海盆内部の反時計回り循環の一部を構成していると考えられる⁵⁾(図(2)-1)。このことから、これまで気象庁によりSta. PM5で観測されてきた水温、溶存酸素量などの変動は、この循環流によって大和海盆北方、さらには日本海盆から移流されてきた水塊の時間変動を反映したものと考えることができる。なお、960m深の平均流速、標準偏差は他の深度に比べて小さな値を示しているが(表(2)-5)、計測に用いた流速計の計測方式が異なるため、解釈には注意が必要である。



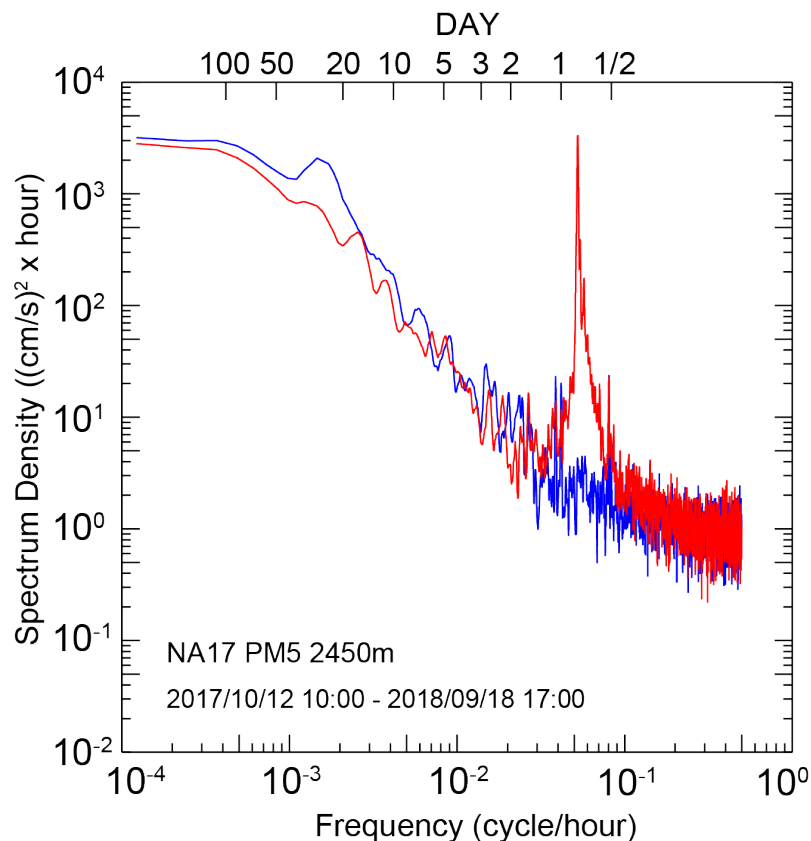
図(2)-11 大和海盆のSta. PM5における流れのスティックダイアグラム

上段：930m, 中段：1720m, 下段：2450m

表(2)-5 大和海盆のSta. PM5における各層の平均流と標準偏差 (SD)

Depth (m)	Mean (cm s ⁻¹)				SD (cm s ⁻¹)	
	Dir. (°T)	Speed	E-W	N-S	E-W	N-S
930	178.1	1.55	0.05	-1.55	0.85	1.38
1720	162.7	2.20	0.65	-2.11	1.54	2.20
2250	162.8	2.18	0.65	-2.08	1.71	2.42

変動の卓越周期をみるために、流れの回転スペクトルを計算した。例として最深層の2450mの流れのスペクトルを図(2)-12に示す。時計回り成分の20時間周期帯に、近慣性内部重力波と考えられる鋭いエネルギーピークが認められるが、この特徴は日本海の広い領域に共通してみられるものである^{5),14)}。興味深いのは反時計回り成分の日周期帯にエネルギーピークが認められることで、これは大和海盆東部の深層流にはみられない特徴である⁵⁾。日周期の波動は観測点の慣性周期(19.62時間)よりも長い周期をもつため、地球自転の効果により海底地形に捕捉され、浅い方を右手に見つつ等深線に沿って伝播する。対馬海盆と隠岐海脚のギャップで得られた過去の測流記録には日周期の変動がみられることから⁵⁾、東シナ海から対馬海盆へ入射した日周期の潮汐波の一部は、隠岐海脚のギャップを通過して大和海盆にも伝播していると考えられる。今回、Sta. PM5で観測された日周期帯のエネルギーピークは、この潮汐波の一部を捉えたものと考えられる。

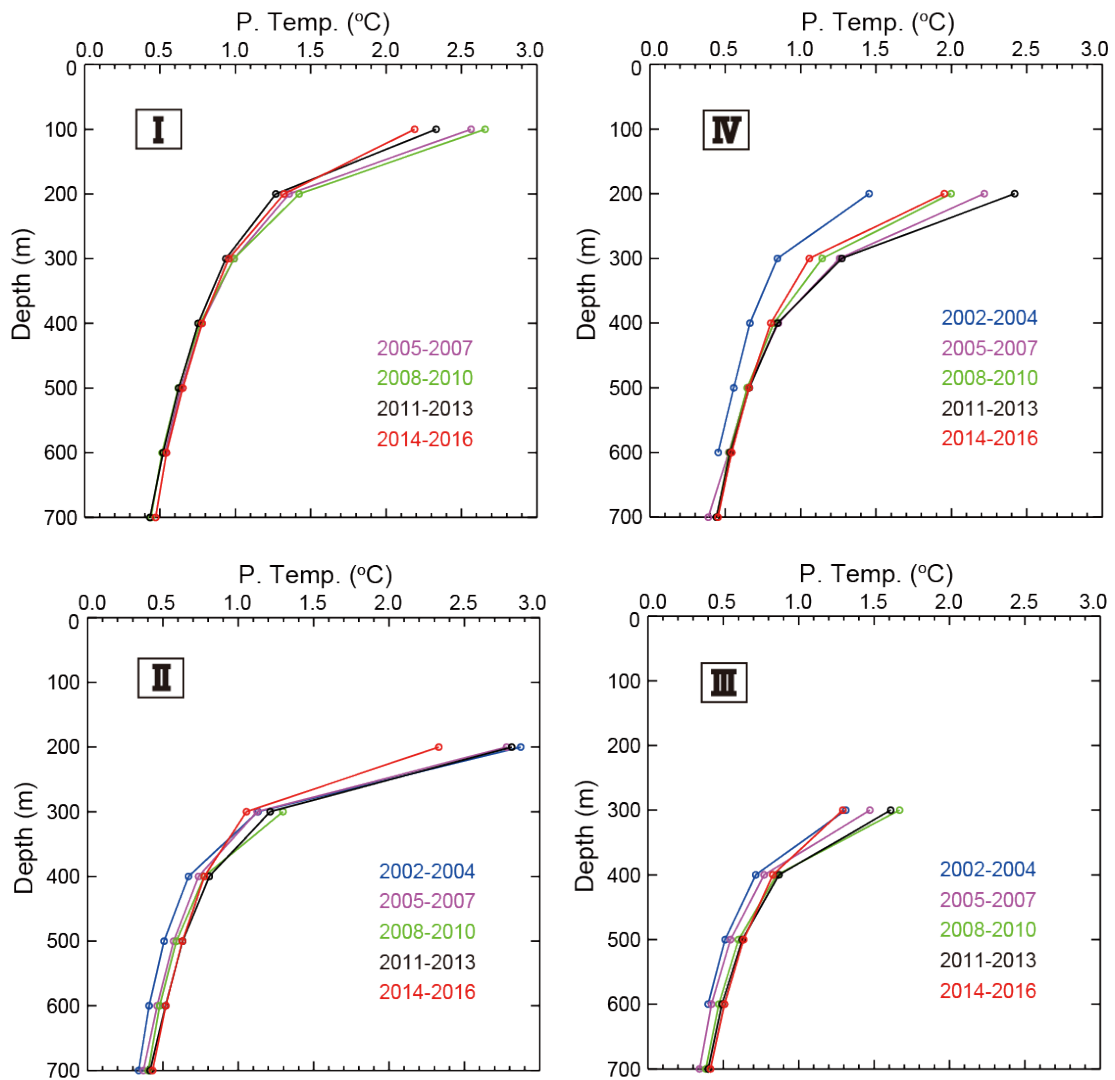


図(2)-12 Sta. PM5の2450m深における流れの回転スペクトル
赤：時計回り成分，青：反時計回り成分

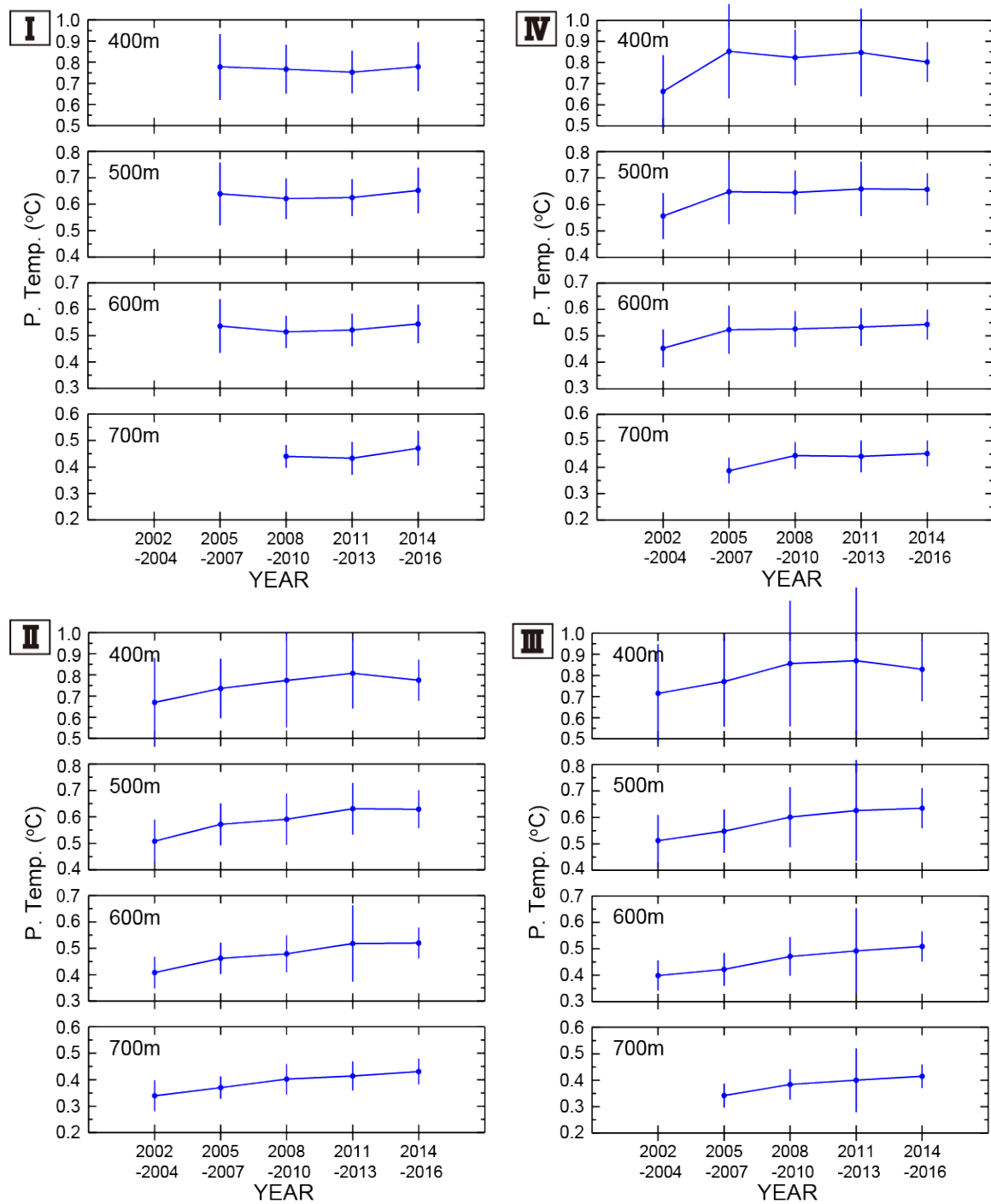
(3) Argoフロートによる広域的な海洋構造の変化の把握

分類した4海域(図(2)-5)における平均的なポテンシャル水温の鉛直分布の時間変化を図(2)-13に示す。極前線以南(北緯40度以南)の海域ⅡとⅢでは、水深によって多少の変動はあるが、年代とともに300~700mの水温が徐々に上昇していることがわかる。ただし、近年(2011~2013年から2014~2016年にかけて)は両海域ともプロファイルが重なり、水温の上昇が小さくなっている。この様子は、各層のポテンシャル水温の時間変化を示した図(2)-14に明瞭に現れている。大和海盆に相当する海域Ⅲでは比較的大きな標準偏差を示しているが、これは極前線以南の海域では対馬海流系の暖水が海洋上層に分布しており、また傾圧不安定による渦活動も活発なため^{15),16)}、躍層深度の変動が激しいためと考えられる。一方、極前線以北の海域ⅠとⅣでは、平均水温の変動はほぼ横ばいであり(図(2)-14)、特に海域Ⅰの

300m以深と海域Ⅳの400m以深では、最近11年間（2005年～2016年）で水温プロファイルがほとんど変化していない（図(2)-13）。



図(2)-13 Argoフロートデータ解析による各海域で平均したポテンシャル水温プロファイルの時間変化
水温が3°C以下の部分のみを表示している。



図(2)-14 各海域における400~700m深のポテンシャル水温の時間変化
丸は各年代における領域平均値、縦線は標準偏差を表す。

最小自乗法により、図(2)-14の水溫時系列から算出した各海域の年間昇温率を表(2)-6に示す。領域 I の400m深以外は、すべて正の値(昇温)となっている。また極前線以南(海域 II, III)の昇温率は、極前線以北(海域 I, IV)に比べて概して大きく、特に大和海盆(海域 III)で昇温率が最大となっている。昇温トレンドの統計的な有意性をMann-Kendall rank statisticによって検定した¹⁷⁾。表(2)-6の中で下線を付した数値は有意水準95%で、二重下線を付した太字の数値は有意水準99%で統計的に有意な値である。極前線以南の海域 II と III では、400~700mのすべての層で統計的に有意な昇温傾向にあることがわかる。一方、極前線以北の海域 I と IV でも500mと600mで有意な昇温傾向となっている。

以上より、日本海の深層水溫(400~700m)は全域で昇温傾向にあり、特に極前線以南で昇温率が大きいことがわかった。このような海域的な昇温傾向の違いは、対馬海流系の暖水(熱源)の分布や、日本海固有水の形成域(冷源)の位置と関係するのかもしれない。また各海域とも、近年(2011~2013年から2014~2016年)の水溫上昇率が比較的小さくなっており、むしろ水溫が低下している海域・深度も認められる。データの質や偏りなどを考慮に入れた、より厳密な解析が求められる。

表(2)-6 図(2)-15より求めた各海域、各深度の昇温率

下線を付した数値は有意水準95%で、二重下線を付した太字の数値は99%で統計的に有意な値を示す。

°C/year	Region I	Region II	Region III	Region IV
400 m	-0.0004	<u>0.0094</u>	<u>0.0109</u>	0.0091
500 m	<u>0.0014</u>	<u>0.0100</u>	<u>0.0108</u>	<u>0.0071</u>
600 m	<u>0.0010</u>	<u>0.0093</u>	<u>0.0097</u>	<u>0.0064</u>
700 m	0.0052	<u>0.0076</u>	<u>0.0078</u>	0.0064

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで日本海の深層流には、中規模渦などともなう短周期の変動はあるものの、数ヶ月間の平均をとった平均流には大きな変動はないと考えられてきた。しかし、本研究によって得られた日本海盆東部での観測結果は、平均流も30%程度の大きな振幅で変動し得ることを示すものであり、従来の常識に一石を投じたという意味で大きな意義がある。さらに、観測された深層流の弱化は、日本海固有水の形成の停滞を示す深層での水溫上昇・溶存酸素量の漸減や、モデル研究結果⁴⁾と整合的であることから、日本海の熱塩循環の弱化を示す有力な証拠の一つとなり得るものである。

観測の困難さ故に、深層流の長期変動に関する研究は世界的にも少なく、日本海においては韓国の研究グループによる日本海盆と対馬海盆の接続域(Ulleung Interplane Gap)でのものが唯一であった¹²⁾。今回、日本海盆と大和海盆の深層流の長期変動傾向に関する情報が得られたことは、日本海全体の熱塩循環の動向を考える上で非常に有用と考えられる。

Argoフロートデータの解析から明らかとなった極前線の南北での昇温傾向の違いは、日本海全体の温暖化を考える際に重要である。日本の排他的経済水域以外での長期モニタリングは困難であるため、これまでは大和海盆や日本海盆東部での観測結果から温暖化を議論せざるを得なかったが、これらの海域が日本海全体の中でどのような位置づけにあるのかを認識した上で議論を展開できるようになったことの意義は大きい。大和海盆のモニタリングポイント(Sta. PM5)における流動場の情報とともに、既往の観測資料、さらには今後得られるモニタリング結果を解釈する上で大きな助けになると期待される。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

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>

IPCC第5次評価報告書では「現時点で全球熱塩循環の弱化を示す兆候は認められない」としながらも、「今後数十年のうちに熱塩循環が弱まることが高い確率で予測される」と述べられている。さらに、熱塩循環の弱化の規模や時期については不確定要素が大きく、予測が難しいとされている。本研究で明らかとなった日本海の海洋構造の変化や深層流の弱化は、これから起こる世界の海洋の「異変」の前兆である可能性がある。日本海の深層流の継続的な監視を通じて、IPCCへの大きな貢献が期待される。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) 九州大学応用力学研究所共同利用研究（国際研究），Circulation and water mass modification in the abyssal Japan/East Sea. Prof. Hong-Ryeol Shin, Kongju National University, Korea (2018)
- 2) 九州大学応用力学研究所共同利用研究（国際研究），Water mass modification in the Japan Sea and East Asian marginal seas, Prof. Hong-Ryeol Shin, Kongju National University, Korea (2016, 2017)

分担者・千手は、上記の通り、日本海深層の流れについて韓国・公州大学の申弘烈教授と共同研究を続けており、2016年、2017年、2018年の5月、10月の長崎丸航海に参加頂いた。2017年2月13日には九州大学応用力学研究所において“International Workshop on Mixing and Water Mass Modification in the East Asian Marginal Seas”（参加者 21名）を開催した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) T. SENJYU: Evolution of Marine Coastal Ecosystems under the Pressure of Climate Change, Proceedings of Coast Bordeaux and of the 17th French-Japanese Oceanography Symposium, The Japan Sea: a changing Pacific Asian marginal sea. (in press)
- 2) T. SENJYU and J. YOSHIDA: La mer, 56, 3.4, 113-123 (2018), A note on the abyssal circulation in the Japan Sea: suggestion from rotating-tank experiments.
- 3) T. SENJYU and T. ARAMAKI: Journal of Oceanography, 73, 2, 235-247 (2017), Volume transport from the Japan Basin to the Yamato Basin in the abyssal Japan Sea inferred from direct current observations.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 千手智晴、荒巻能史：号外海洋「海洋システムの謎に挑む化学―蒲生俊敬教授退職記念号」，61, 132-139 (2018)
「ポテンシャル水温と放射性炭素の鉛直分布に基づく日本海深層の鉛直拡散係数の推定」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 千手智晴、吉田次郎：金沢大学環日本海域環境研究センター共同利用研究集会「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」（2019）

- 「回転水槽実験からみた日本海の深層循環」
- 2) T. SENJYU: The 20th Pacific-Asian Marginal Seas (PAMS) Meeting, Kaohsiung, Taiwan, 2019
“Weakening of deep flow in the eastern Japan Basin in the Japan Sea”
 - 3) 千手智晴、吉田次郎: 2019年度地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」
(2019)
「回転水槽実験によるStommel-Arons型深層循環に対する鉛直壁の効果の検討: 日本海深層流分布の解釈への応用」
 - 4) 千手智晴: 第3回富山湾研究会 (2019)
「富山深海長谷の中の深層流」
 - 5) 千手智晴、吉田次郎: 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「東シナ海と日本海の海水循環と生物化学過程」 (2019)
「日本海の深層循環に関する一考察: 回転水槽実験からの示唆」
 - 6) 千手智晴: 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「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」 (2018)
「ローター式流速計と超音波ドップラー流速計の比較実験」
 - 7) 千手智晴: 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)
「日本海盆東部における深層流の弱化について」
 - 8) 千手智晴: 第73回日本海海洋調査技術連絡会 (2018)
「日本海深層流のrevisit観測」
 - 9) 千手智晴、磯田豊、申弘烈: 日本海洋学会2018年度秋季大会 (2018)
「日本海盆と大和海盆における深層流のrevisit観測」
 - 10) 千手智晴、申弘烈: 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」 (2018)
「日本海大和海盆南縁で観測された地形性ロスビー波の伝播と構造」
 - 11) 千手智晴: 九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「東シナ海と日本海の海水循環と生物化学過程」 (2018)
「日本海大和海盆南縁の地形性ロスビー波について」
 - 12) 千手智晴: 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「海流が繋ぐ日本海—オホーツク海の海洋環境・物質循環の変動機構」 (2017)
「大和海盆深層で観測された近慣性内部重力波」
 - 13) 千手智晴: 2017年度九州沖縄地区合同シンポジウム (2017)
「日本海深層で観測された近慣性内部重力波の構造と伝播」
 - 14) 千手智晴: 第72回日本海海洋調査技術連絡会 (2017)
「大和海盆深層で観測された近慣性内部波と表層のフロント変動」
 - 15) T. SENJYU: COAST Bordeaux 2017 and the 17th French-Japanese Oceanography Symposium, Bordeaux, France, 2017
“The Japan Sea, a changing Pacific Asian marginal sea”
 - 16) T. SENJYU, H.-R. SHIN: The 19th Pacific-Asian Marginal Seas (PAMS) Meeting, Jeju, Korea, 2017
“Near-inertial internal waves in the Yamato and Tsushima/Ulleung Basins in the abyssal Japan/East Sea”
 - 17) 千手智晴、荒巻能史: 海洋地球化学フォーラム2017 ~大気—海洋—海底の物質循環~ (2017)
「水温と¹⁴Cの鉛直分布に基づく日本海深層の鉛直拡散係数の推定」
 - 18) 千手智晴、荒巻能史: 研究集会「東アジアから太平洋規模への海洋・大気循環に関わる素過程研究の精緻化と環境変動への応用」 (2017)
「鉛直一次元モデルによる日本海深層の鉛直拡散係数の評価」

- 19) T. SENJYU, T. ARAMAKI: International Workshop on Mixing and Water Mass Modification in the East Asian Marginal Seas, Fukuoka, Japan, 2017
 “Evaluation of vertical eddy diffusivity in the abyssal Japan/East Sea based on the one-dimensional advection-diffusion model in temperature and ^{14}C profiles”
- 20) 千手智晴、申弘烈：第71回日本海海洋調査技術連絡会（2016）
 「大和海盆南縁で観測された深層流の数日周期変動」
- 21) 千手智晴、荒巻能史：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「対馬暖流系の変動機構の解明に向けて」（2016）
 「大和海盆は日本海における乱流混合のHotspotか？」
- 22) 千手智晴、申弘烈：日本海洋学会2016年度秋季大会（2016）
 「大和海盆南縁で観測された深層流の数日周期変動」
- 23) T. SENJYU: The 8th PEACE Ocean Science Workshop, Vladivostok, Russia, 2016
 “Mixing and inter-basin water mass exchange in the abyssal Japan Sea”
- 24) 千手智晴、申弘烈：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」（2016）
 「日本海大和海盆南縁で観測された深層流の数日周期変動について」

(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

- 1) 市民向け講演会「日本海で進みつつある環境の変化～その驚くべき実態に迫る～」（主催：国立研究開発法人国立環境研究所、共催：九州大学応用力学研究所、2019年2月16日、九州大学西新プラザ、参加者25名）において以下の講演を行った。千手智晴「地球温暖化と海—日本海異変」
- 2) 市民向け講演会「日本海で進みつつある環境の変化～その驚くべき実態に迫る～」（主催：国立研究開発法人国立環境研究所、共催：金沢大学環日本海域環境研究センター、2017年1月22日、金沢市文化ホール、参加者20名）において以下の講演を行った。千手智晴「小さな大洋～日本海のふしぎ」
- 3) 平成28年度九州大学大学院総合理工学府公開講座「大気と海洋の環境学～地球温暖化から越境汚染まで～」（主催：九州大学大学院総合理工学府、2016年8月20日、九州大学筑紫キャンパス、参加者70名）において以下の講演を行った。千手智晴「地球温暖化と海—日本海異変」

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHKワールド（国際放送）「Science View」（2019年1月9日放映、A Warning from the Sea of Japan - a “Miniature Ocean”）
- 2) 産経新聞（2018年7月30日、全国版15面、「日本海で進む「海の温暖化」—異変が世界に先行 漁業に打撃懸念」）
- 3) 日本経済新聞（2018年4月15日、全国版30面、「日本海、温暖化を先取り」）
- 4) NHK Eテレ「サイエンスZERO」（2017年9月3日放映、「小さな大洋”日本海”からの警告」）

(6) その他

日本海洋学会2018年度秋季大会（東京）において、セッション「海盆を結ぶ海峡の様々な役割」のコンピニャーを務め、この中で本研究課題に関連する6題の講演の座長を務めた。

8. 引用文献

- 1) T. Gamo, Y. Nozaki, H. Sakai, T. Nakai, H. Tsubota: *J. Mar. Res.*, 44, 781-793 (1986), Spatial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom water.
- 2) H. Minami, Y. Kano, K. Ogawa: *J. Oceanogr.*, 55, 197-205 (1999), Long-term variations of potential temperature and dissolved oxygen of the Japan Sea Proper Water.
- 3) T. Gamo: *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3137-3140 (1999), Global warming may have slowed down the deep conveyor belt of a marginal sea of the northwestern Pacific: Japan Sea.
- 4) Y. Yoshikawa: *J. Oceanogr.*, 68, 971-983 (2012), An eddy-driven abyssal circulation in a bowl-shaped basin due to deep water formation.
- 5) T. Senjyu, H.R. Shin, J.H. Yoon, Z. Nagano, H.S. An, S.K. Byun, C.K. Lee: *Deep-Sea Res. II*, 52, 1726-1741 (2005), Deep flow field in the Japan/East Sea as deduced from direct current measurements.
- 6) 森康輔, 磯田豊, 村上敬, 大谷清隆: *海の研究*, 10(1), 1-13 (2001), 津軽海峡南西海域における深層流の長周期変動.
- 7) 花輪公雄, 三寺史夫: *沿岸海洋研究ノート*, 23(1), 79-87 (1985), 海洋資料における日平均値の作成について—日平均潮位を扱う際の留意点.
- 8) T. Senjyu and H. Sudo: *J. Oceanogr.* 50, 663-690 (1994), The upper portion of the Japan Sea Proper Water; its source and circulation as deduced from isopycnal analysis.
- 9) T. Senjyu, T. Aramaki, S. Ootosaka, O. Togawa, M. Danchenkov, E. Karasev, Y. Volkov: *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2001GL014093 (2002), Renewal of the bottom water after the winter 2000-2001 may spin-up the thermohaline circulation in the Japan Sea.
- 10) T. Senjyu, T. Aramaki, S.S. Tanaka, J. Zhang, Y. Isoda, Y. Kumamoto, S. Hibino, T. Nakano: *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 4878-4888 (2013), Abyssal water mass exchange between the Japan and Yamato Basins in the Japan Sea.
- 11) T. Senjyu and T. Aramaki: *J. Oceanogr.*, 73, 2, 235-247 (2017), Volume transport from the Japan Basin to the Yamato Basin in the abyssal Japan Sea inferred from direct current observations.
- 12) K. I. Chang, W. J. Teague, S. J. Lyu, H. T. Perkins, D. K. Lee, D. R. Watts, Y. B. Kim, D. A. Mitchell, C. M. Lee, K. Kim: *Prog. Oceanogr.*, 61, 105-156 (2004), Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea: Overview and review.
- 13) P. Rhines: *Geophys. Fluid Dyn.*, 1, 273-302 (1970), Edge-, bottom-, and Rossby waves in a rotating stratified fluid.
- 14) K. Mori, T. Matsuno, T. Senjyu: *J. Oceanogr.*, 61, 761-773 (2005), Seasonal/spatial variations of the near-inertial oscillations in the deep water of the Japan Sea.
- 15) A. Morimoto, T. Yanagi, A. Kaneko: *J. Oceanogr.*, 56, 449-462 (2000), Eddy field in the Japan Sea derived from satellite altimetric data.
- 16) T. Watanabe, D. Simizu, K. Nishiuchi, T. Hasegawa, O. Katoh: *J. Oceanogr.*, 65, 791-801 (2009), Surface current structure of the Tsushima Warm Current region in the Japan Sea derived by satellite-tracked surface drifters.
- 17) 松山洋, 谷本陽一: *UNIX/Windowsを使った実践! 気候データ解析*. 古今書院 (2005)

II-3 海洋生物生産量の変動の検出

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球環境観測研究開発センター

熊本 雄一郎・松本 和彦・笹岡 晃征

平成28～30年度累計予算額：40,332千円

(うち平成28年度：12,350千円、平成29年度：14,350千円、平成30年度：13,632千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

観測船を用いた現場観測と衛星データを組み合わせることにより、衛星データを用いて日本海表層のクロロフィル濃度の精度検証および基礎生産量を推定するためのアルゴリズムの改良を行った。それを用いて解析を行った結果、日本海における基礎生産量は十数年スケールで増減している可能性が示唆された。現場観測の植物プランクトン群集組成の結果からは、将来の温暖化による水温躍層の強化は基礎生産量の減少だけでなく、優占種が大型種から小型種へ移行することによって食物連鎖を介したエネルギー転換効率が低下するリスクがあることが明らかにされた。また、極前線の南北を比較した場合、南側の観測点における基礎生産量が相対的に高いことも明らかになった。これらの結果は、将来の日本海における温暖化予測研究に資するものである。過去十数年間中、日本海表層水中基礎生産量と底深層水中溶存酸素濃度の時間変化の間には相関関係が見いだせなかった。このことは、底深層水中溶存酸素濃度の増減が生物化学的要因すなわち底深層水に沈降する有機物量よりも、海洋物理的要因すなわち海水循環の時間変動に影響を受けていることを強く示唆した。

【キーワード】

溶存酸素、基礎生産量、植物プランクトン群集組成、クロロフィル a 、海色衛星

1. はじめに

日本海はユーラシア大陸と日本列島に挟まれた閉鎖性の強い縁辺海である一方、その最大水深は3700m以上もあり、大洋で見られる様々な海洋現象が存在していることから「ミニチュア大洋」とも呼ばれている。例えば、冬季の北西部では結氷するほどに冷やされて密度が大きくなった表面海水が海洋内部に沈み込む、独自の鉛直循環システムが存在している。大洋における循環システムがおよそ2000年のタイムスケールであるのに対して、日本海はおよそ100年と推定されているので、日本海をモニタリングすることで、あたかもDVDの倍速再生のように地球規模の海洋環境の変化を観察することが可能となる。実際、過去数十年間に日本海底深層水中の水温が上昇、溶存酸素濃度が減少していることが明らかになっており、IPCC第四次評価報告書では「日本海は地球温暖化に対して最も脆弱な海域のひとつ」として継続的な監視の重要性を訴えている。サブテーマ(3)では、地球温暖化に伴う海洋表層における基礎生産量の変動を定量化し、その基礎生産量の変動と底深層水中での酸素濃度減少傾向との関連を議論することを目的とした。

2. 研究開発目的

日本海底深層水中の溶存酸素濃度の測定は、1930年代の日本の観測調査¹⁾を嚆矢とする。またその濃度が数十年の時間スケールで減少をしていることを、最初に報告したのも日本人研究者であった²⁾。熊本(2010)³⁾は、過去の測定データを取りまとめ、日本海底深層水中の溶存酸素濃度は、約2 $\mu\text{mol}/\text{kg}/\text{年}$ の割合で減少していることを見積もった。現在の日本海底深層水中溶存酸素濃度は約200 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ であるので、単純計算をすると同底深層水は約100年後には酸素が全く存在しない還元的な環境になってしまうことになる。日本海における海洋観測によって底深層水を含む日本海全水柱の溶存酸素濃度を測定し、この溶存酸素濃度の低下傾向が現在でも継続しているのかどうかを確認することを、本サブテーマの目

的のひとつとした。

植物プランクトンによる有機物生産量、すなわち基礎生産量は通常単位体積 (m³)、単位時間 (日) あたりに生産される炭素重量 (g) として測定される。先行研究における日本海の基礎生産量の測定例および植物プランクトン分布の観測例は限られているため⁴⁻⁷⁾、可能な限り異なる季節・海域での現場観測を多く実施してデータの蓄積を図る。現場観測では基礎生産量の測定に加えて、植物プランクトン各種色素濃度の測定およびそのサイズ分画を調査することで植物プランクトン分布の群集組成解析も行い、日本海における基礎生産メカニズムを定性的・定量的に議論することを本サブテーマの2つめの目的とした。

海色衛星は、海洋表面における植物プランクトン現存量及び基礎生産量を広域にわたり繰り返し観測できることから、本サブテーマにおける日本海の生物生産の季節変動・経年変動を理解する上で非常に重要な手段となる。衛星から観測されるクロロフィル*a*濃度は、全球のクロロフィル*a*濃度を推定するための標準アルゴリズムによって算出され、基礎生産を推定する際の重要なパラメータとなっているが、アルゴリズムの開発・検証のために現場データを取得した海域が空間的・季節的にも限定されていることから、日本海における衛星観測精度は必ずしも保証されていない。そこで、まず既存のクロロフィル*a*濃度推定アルゴリズムが日本海で研究用途に十分な観測精度を満たしているか現場観測データによる検証を行った。次に、既存の衛星ベースの基礎生産推定モデルの結果と現場観測値とを比較して誤差要因を検討し、アルゴリズムの改良を行った。最終的に改良した基礎生産推定アルゴリズムを取得可能な最近20年ほどの衛星データに適用して、日本海における基礎生産量の季節変動・経年変動を明らかにすることを3つ目の目的とした。

上記3つから得られる成果をとりまとめ、最終的に地球温暖化に伴う海洋表層における基礎生産量の変動を定量化し、その基礎生産量の変動と底深層水中での酸素濃度減少傾向との関連を議論する。

3. 研究開発方法

(1) 底深層水中の溶存酸素濃度の変化

海水中溶存酸素濃度は、表(3)-1に挙げる観測点において改良ウィンクラー法を用いて船上で測定された。繰り返し測定によって得られた測定精度は、約0.2μmol/kgであった。測定に用いたヨウ素酸カリウム標準物質は、国家計量機関である産総研計量標準総合センター (NMIJ) から配布されている認証標準物質を用いた。

(2) 植物プランクトン及び基礎生産量の現場観測

おしよろ丸および長崎丸で実施した航海 (表(3)-1) において海水を採取し、植物プランクトン量と基礎生産量の現場観測を実施した。植物プランクトンの指標であるクロロフィル*a*色素を蛍光光度計で測定し、各測点で植物プランクトンの鉛直的な分布変動を調査した。同時に、植物プランクトンのサイズ組成を評価するため、植物プランクトンを<1μm、1-3μm、3-10μm、>10μmの4サイズに分画測定した。さらに、高速液体クロマトグラフィー分析による植物プランクトン群集組成解析も実施した。

基礎生産量は、炭素安定同位体を用いた植物プランクトンの光合成による炭素取り込み実験により見積もった。実験は甲板上の自然光下培養実験および人工光源水槽で行う光合成-光曲線実験を行った。自然光下培養実験では海表面における1日当たりの基礎生産量を求め、光合成-光曲線実験では以下の式により光合成速度 P (mg-C/mg-Chl*a*/h) を算出した⁸⁾。

$$P = P_{max}(1 - e^{-\alpha E / P_{max}}) e^{-bE / P_{max}} \quad (1)$$

ここで、 P_{max} (mg-C/mg-Chl*a*/h) は最大光合成速度、 α ((mg-C/mg-Chl*a*/h) / (μmol-quanta/m²/s)) は光合成-光曲線の立ち上がり勾配、 E (μmol-quanta/m²/s) は光量、 b ((mg-C/mg-Chl*a*/h) / (μmol-quanta/m²/s)) は光阻害パラメータを表す。算出した P_{max} は衛星による基礎生産推定式に用いる光合成活性の実測パラメータとして利用し、水中光と日射の計測データから水柱の1日当たり基礎生産量も算出した。

表(3)-1 サブテーマ3に関連する観測点一覧

船 舶	観測点	観測日時 (JST)	北緯	東経	水深 (m)	溶存酸素 測定	基礎生産 測定
おしよろ丸	A1	2016/7/21	41.3	138.0	3621	○	○
	A2	2016/7/23	39.8	137.8	2617	○	○
	A3	2016/7/25	39.2	136.5	2593	○	○
イヨド号	M	2016/9/6	37.0	131.0	2195	○	-
	EC-Trap	2016/9/7	37.6	131.4	2356	○	-
	EC-2	2016/9/8	37.3	131.2	2240	○	-
長崎丸	P	2016/10/12	37.4	135.5	1950	○	○
	TB	2016/10/14	36.1	131.2	1726	○	○
長崎丸	R17	2017/5/17	37.4	135.7	1991	○	○
	TB	2017/5/18	36.1	131.2	1722	○	○
おしよろ丸	A4	2017/6/5	41.0	138.7	3403	○	○
	A5	2017/6/7	42.0	138.7	3682	○	○
イヨド号	EC-Trap1	2017/10/14	37.6	131.4	2239	○	-
	EC-Trap2	2017/10/16	37.0	131.0	2142	○	-
おしよろ丸	M1	2018/4/27	35.8	133.1	76	○	○
	M2	2018/4/28	37.9	137.4	361	-	○
	A6	2018/4/29	41.0	138.7	3400	○	○
長崎丸	PM5	2018/10/9	37.7	134.7	3021	○	-
	A01	2018/10/10	37.4	134.5	2782	○	-
	A02	2018/10/10	37.2	134.2	2294	○	-
	A03	2018/10/10	36.9	134.0	1680	○	-
	A04	2018/10/10	36.6	133.8	1072	○	-

(3) 衛星データによる基礎生産量の推定と経年変動の検出

米国 NASA の Aqua 衛星に搭載されている海色センサーMODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) の全球クロロフィル *a* 濃度、PAR (光合成有効放射)、海表面水温のデータ (時空間解像度 = Daily, 4km) を Ocean Color Web (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) より入手し、日本海のサイズで切り出して解析に用いた。衛星ベースの基礎生産量の推定は、先行研究でも良く用いられている亀田・石坂モデル⁹⁾によって算出した。亀田・石坂モデルは、Behrenfeld and Falkowski (1997)¹⁰⁾によって提唱された単純な深度積算モデルである VGPM (Vertical Generalized Production Model) の改良型であり、次式で表される。

$$PP_{eu} = 0.66125 \times P_{opt}^b \times \left[\frac{E_0}{E_0 + 4.1} \right] \times Z_{eu} \times C_{surf} \times D_{irr} \quad (2)$$

ここで、 PP_{eu} は有光層深度 (Z_{eu}) 内の積算基礎生産量、 C_{surf} は表面のクロロフィル *a* 濃度 (mg/m^3) であり、 E_0 は 1 日あたりの海表面の PAR (光合成有効放射照度: $\text{mol quanta}/\text{m}^2$)、 Z_{eu} は有光層深度 (m) で、表面 100% として、1% の PAR となる深さで定義する。 Z_{eu} の計算には、Morel and Berthon (1989)¹¹⁾ に従い、表面クロロフィル *a* 濃度 (C_{surf}) から有光層深度を求めることができる。 D_{irr} は日照時間 (h) であり、天測計算によって積算日数から赤緯を求め、緯度と赤緯の関係から時角を算出し、日照時間を求める。 P_{opt}^b (深度方向に最適条件での単位クロロフィル *a* 当たりの基礎生産量 ($\text{mg-C}/\text{mg-Chl}a/\text{h}$) は光合成活性を表すパラメータであり、VGPM では水温の 7 次関数で表される。亀田・石坂モデルでは VGPM による過大評価を解消するため、クロロフィル *a* 濃度の変動は主に大型プランクトンの変動で決まること、植物プランクトンの光合成速度はサイズが大きいほど小さいと仮定し、次式に記すように P_{opt}^b を海表面温度とクロロフィル *a* の関数として改良した。

$$P_{opt}^b = \frac{(0.071 \times T - 3.2 \times 10^{-3} \times T^2 + 3.0 \times 10^{-5} \times T^3)}{C_{surf} + (1.0 + 0.17 \times T - 2.5 \times 10^{-3} \times T^2 - 8.0 \times 10^{-5} \times T^3)} \quad (3)$$

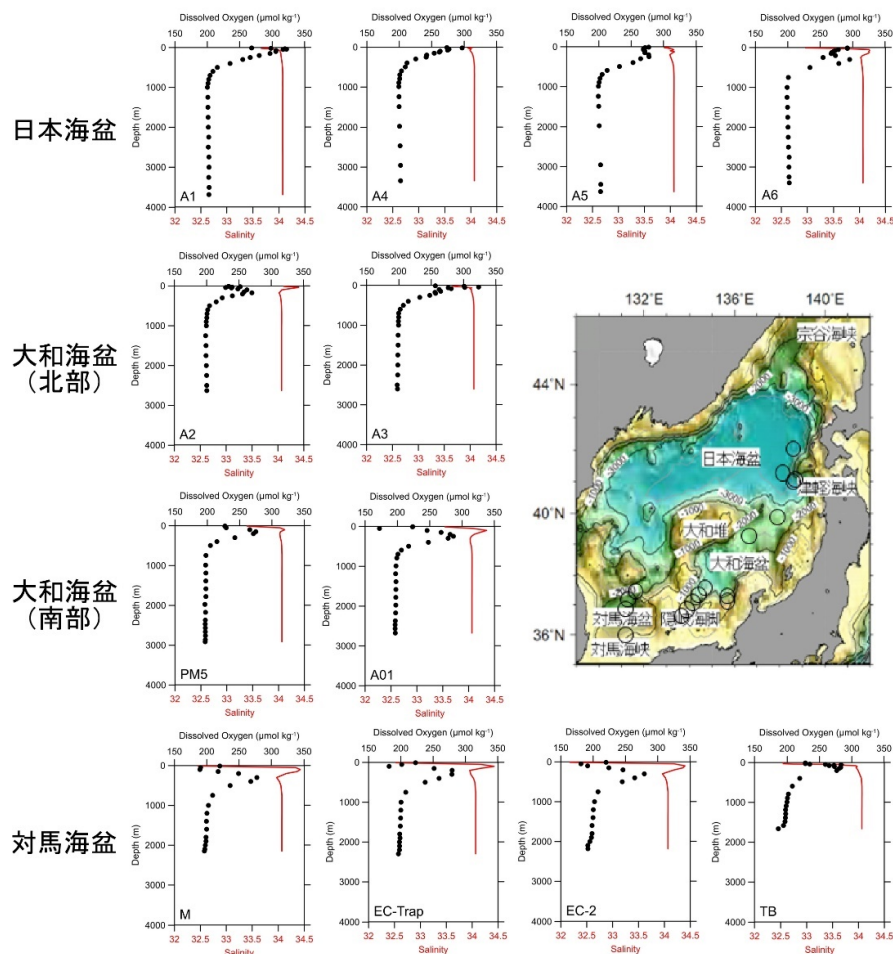
ここで、Tは海表面水温（℃）である。本研究では、 C_{surf} 、 E_0 、TはそれぞれMODISのクロロフィルa濃度、PAR、海面水温を入力データとし、(2)および(3)式によって基礎生産量を推定した。

解析ではクロロフィルa濃度及び基礎生産の衛星推定値と現場観測データを比較し、精度の検証を行った。基礎生産の推定に関しては、誤差要因も検討して基礎生産モデルの改良も行った。さらに、基礎生産の月平均及び年平均値を計算して季節変動及び経年変動も調べた。

4. 結果及び考察

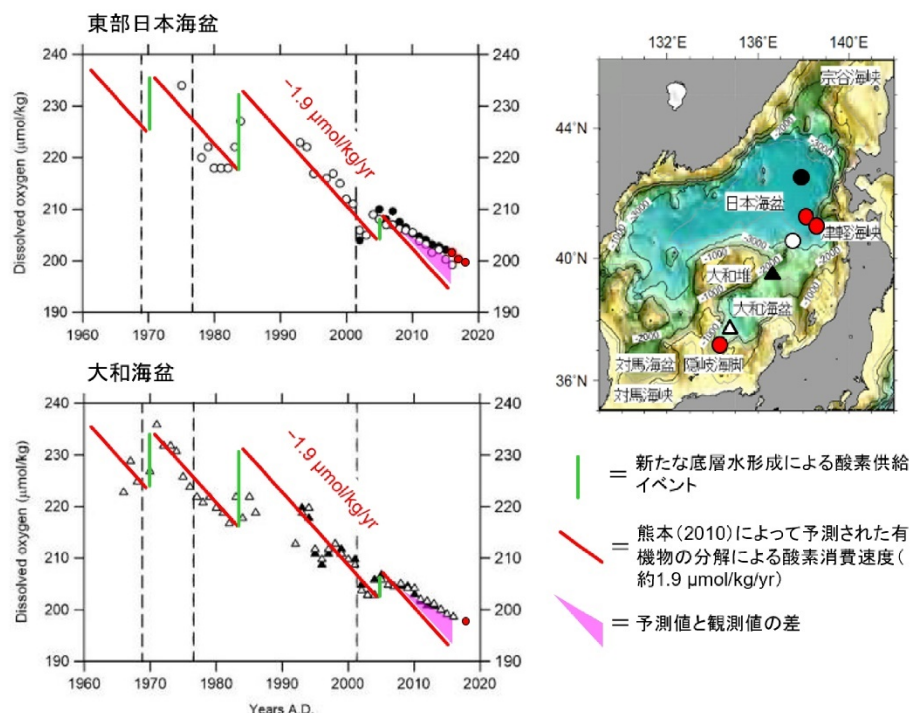
(1) 底深層水中の溶存酸素濃度の変化

2016年から2018年の3年間に、日本海で観測された溶存酸素濃度（ $\mu\text{mol/kg}$ ）の鉛直分布を図(3)-1に示す。概ね深度1000m以深では、鉛直的にほぼ均一な分布を示しており、日本海固有水¹⁾に相当すると考えられる。また数 $\mu\text{mol/kg}$ であるが、日本海盆の底深層水中の溶存酸素濃度は、大和海盆および対馬海盆のそれらに比べて有意に高い。北緯40度付近の極前線より南側の観測点においては、深度数百mに濃度極大が観測された。これらの溶存酸素極大層は塩分極小層と一致しており（図(3)-1）、日本海中層水¹²⁾に相当すると考えられる。



図(3)-1 2016年から2018年の3年間に、日本海の観測点（○）で測定された溶存酸素濃度（ $\mu\text{mol/kg}$ 、●）と塩分（赤線）の鉛直分布。観測点位置は、表(3)-1を参照。

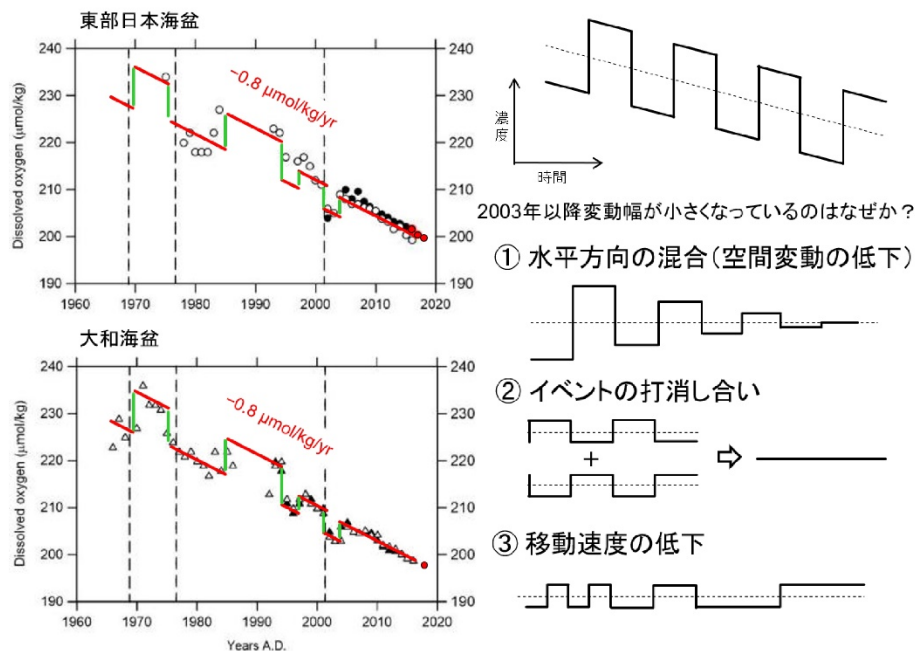
図(3)-2に、気象庁の定点観測点における深度2000mの海水中溶存酸素濃度の経時変化を示す。熊本(2010)³⁾はこれらを含む日本海における歴史データを解析し、「断続平衡仮説」を発表した。すなわち、「日本海底深層水中の溶存酸素濃度は、有機物の分解による消費によって1年間の平均で約 $1.9\mu\text{mol}/\text{kg}$ ずつ減少しているが、数年から十数年に一回程度の頻度で発生する新たな底層水の形成によって表面水中の酸素が供給されるために一時的に増加する(図(3)-2中の破線)。その結果、見かけ上の平均濃度減少速度は約 $0.8\mu\text{mol}/\text{kg}/\text{年}$ となる」という仮説である。この仮説は、2000年くらいまでの観測結果をうまく説明したが、我々の2016年から2018年の観測結果も含めて2013年以降では、予測値と観測値に齟齬が生じている(図(3)-2)。2013年以降の単調な濃度減少は、その期間に新たな底層水の形成が無かったことを示唆している。もし上記仮説が正しければ、その期間中に東部日本海盆及び大和海盆底層水中溶存酸素濃度は約 $1.9\mu\text{mol}/\text{kg}$ の割合で減少するはずであるが、実際に観測された減少速度は約 $0.8\mu\text{mol}/\text{kg}$ であった。Yoon et al. (2018)¹³⁾は、本件について2010年代以降溶存酸素の消費速度が低下した可能性を指摘しているが、その原因については特定されていない。もし日本海底深層の海水循環が過去数十年間一定あったと仮定することができれば、2010年代以降の酸素減少測定値の低下は海洋表層から底層に運ばれる粒子状有機物量が2013年以降に低下したことで説明できるかもしれない。しかしながら、下記で述べるようにこの期間に顕著な基礎生産量(有機物生産量)の減少は確認されていない。さらに日本海表層水中の基礎生産量には北太平洋の数十年周期変動に対応した増減が見られるに対して、底層水中溶存酸素濃度は単調に減少している。このことは、過去数十年間に確認された底層水中溶存酸素濃度の変動は、生物化学的要因ではなく海洋物理的要因、すなわち底層を含めた日本海における海水循環が停滞したことが原因である可能性が高いこと示唆している。



図(3)-2 気象庁の定点観測点(東部日本海盆:●と○、大和海盆:▲と△)における深度2000mの海水中溶存酸素濃度の経時変化。赤丸は、本研究で得られた観測データを示す。

日本海の底層水中溶存酸素濃度の減少速度が、底層水中に沈降する有機物量に比例すると考えられる表層水中の基礎生産量に因らず約 $0.8\mu\text{mol}/\text{kg}/\text{年}$ で一定であると仮定した場合、その濃度変化を説明する仮説を図(3)-3に示した。この場合、新たな底層水形成と底層水中溶存酸素濃度の変動の間には関連が見られない。この仮説では、溶存酸素濃度に見られる急激な増減は、新たな底層水の沈み込みによって形成された、溶存酸素濃度の高い底層水塊が反時計回りの日本海底層水循環¹⁴⁾に沿って循環していることで説明される。さらに2013年以降、その濃度が単調に減少(約 $0.8\mu\text{mol}/\text{kg}/\text{年}$)している原因

として、①水塊混合による底層水中溶存酸素濃度の均一化、②複数の新底層水形成イベントの打消し合い、③底層水循環速度の低下による見かけ上の濃度増減頻度の低下、の可能性が指摘された。

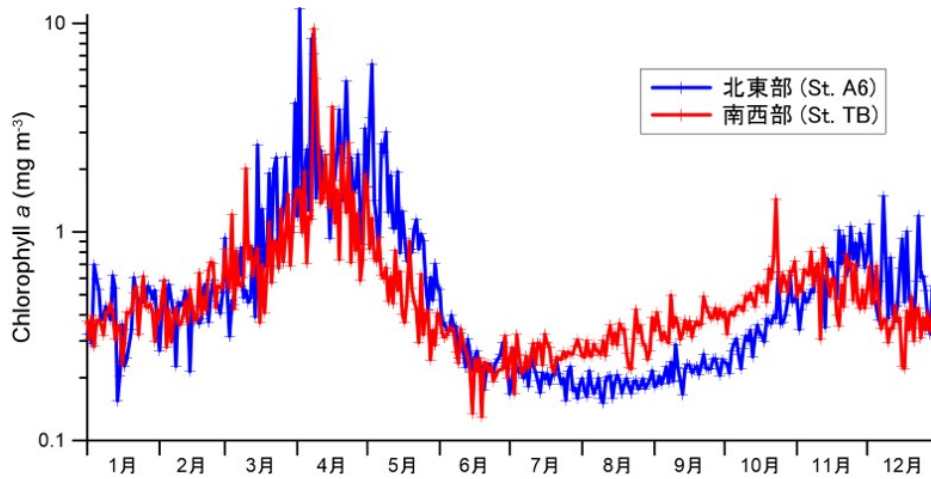


図(3)-3 左図：図(3)-2と同じ。ただし、溶存酸素消費速度は約 $0.8 \mu\text{mol/kg/年}$ (赤線) で一定であると仮定した場合。右図：その場合に 2003 年以降溶存酸素濃度の増減が小さくなっていることを説明する仮説。

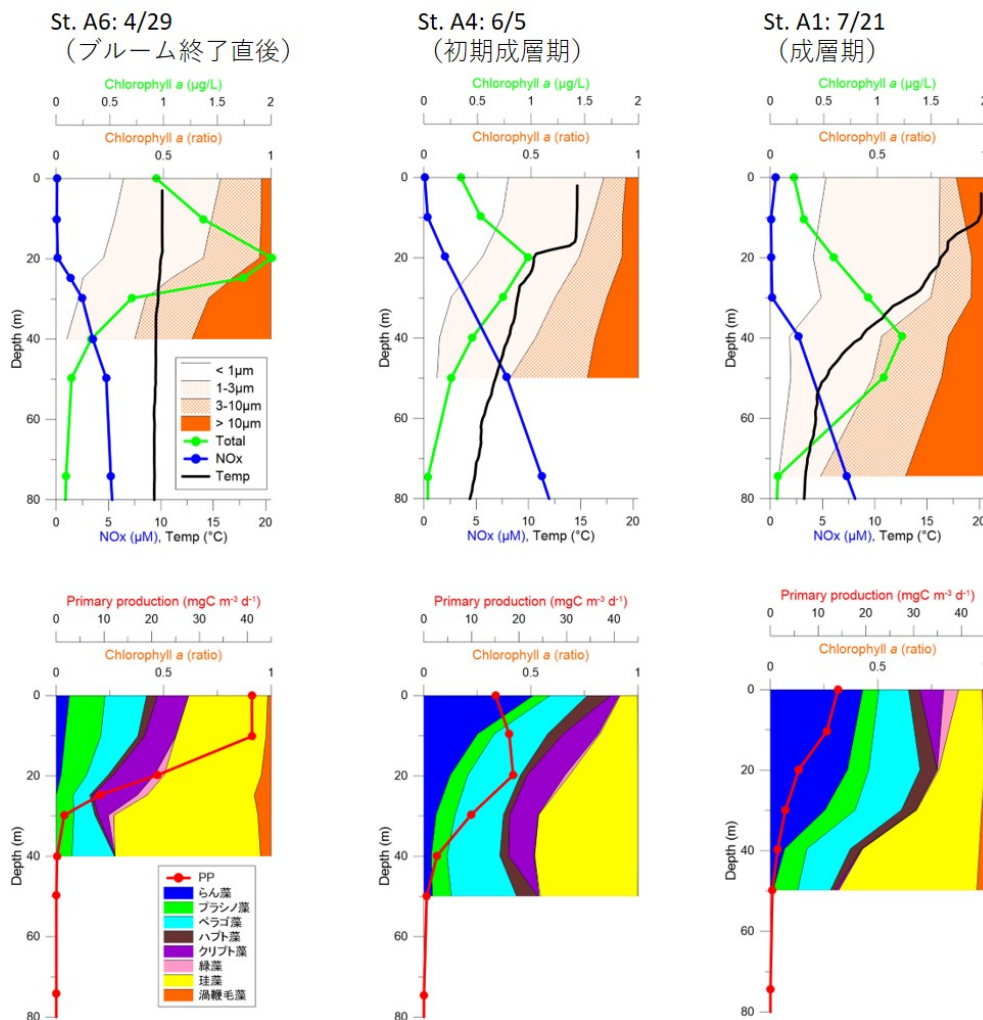
(2) 植物プランクトン及び基礎生産量の現場観測

おしよろ丸で 2016 年 7 月、2017 年 6 月、2018 年 4 月に行われた航海に乗船し、日本海北東部で現場観測を実施した。また、2016 年 10 月、2017 年 5 月には長崎丸にて日本海南西部で現場観測を実施した。日本海の表層には北緯 40 度付近を境に日本海極前線が存在しており、北側では冷水、南側では対馬暖流がもたらす暖水が分布している。おしよろ丸では主に極前線北側の日本海盆内に位置する日本海北東部での観測を行い、長崎丸では主に極前線南側で対馬海盆内に位置する日本海南西部での観測を行った。日本海での植物プランクトン群集や基礎生産量に関する現場観測データはこれまでわずかに報告されているのみであり、衛星から推定される基礎生産量は日本海での現場観測データに基づく検証がなされたものではない。水塊構造の異なる海域で、また異なる季節において複数回に及んで衛星観測と同期した現場観測を実施することで、日本海の衛星基礎生産推定アルゴリズムの改良に必要な現場検証用データを取得することができた。

日本海では北東部、南西部ともに春に植物プランクトンの大増殖(ブルーム)が発生する様子が衛星観測で捉えられており(図(3)-4)、ブルーム期に当たる 3~5 月期の基礎生産量は年間の約 4 割にも達すると見積もられる。一方で、夏に昇温して表層水塊が成層し、栄養塩が枯渇すると表面の植物プランクトン量は大きく低下する(図(3)-4)。特に日本海北東部では 3 年間の観測を通して同一測点での観測を実施し、春のブルーム期から夏の成層期までの植物プランクトン群集組成や基礎生産量の経時的な鉛直方向の変化を捉えることができた(図(3)-5)。ただし、ブルーム期には観測された表面クロロフィル a 量は 1 mg/m^3 以下と低く、鉛直観測から表面のクロロフィル a 量は低下して亜表層極大を形成していることが捉えられた。栄養塩は水深 20m 付近まで枯渇しており、観測点付近の観測所データでは 4 月中旬以降に風が弱まっていたことから、観測を実施した 4 月下旬には鉛直混合が抑制されて下層からの栄養塩供給が弱まっていたと考えられる。実際には観測時にはブルームは終了していたことを示していたが、観測日の 1 週間前には現場海域で高いクロロフィル a があったことが衛星で捉えられており、船舶観測ではブルーム終了直後の様子を捉えていたことが分かった。



図(3)-4 日本海北東部 (Stn. A6:青線) と南西部 (Stn. TB:赤線) における表面クロロフィル *a* 量 (mg/m^3) の季節変動



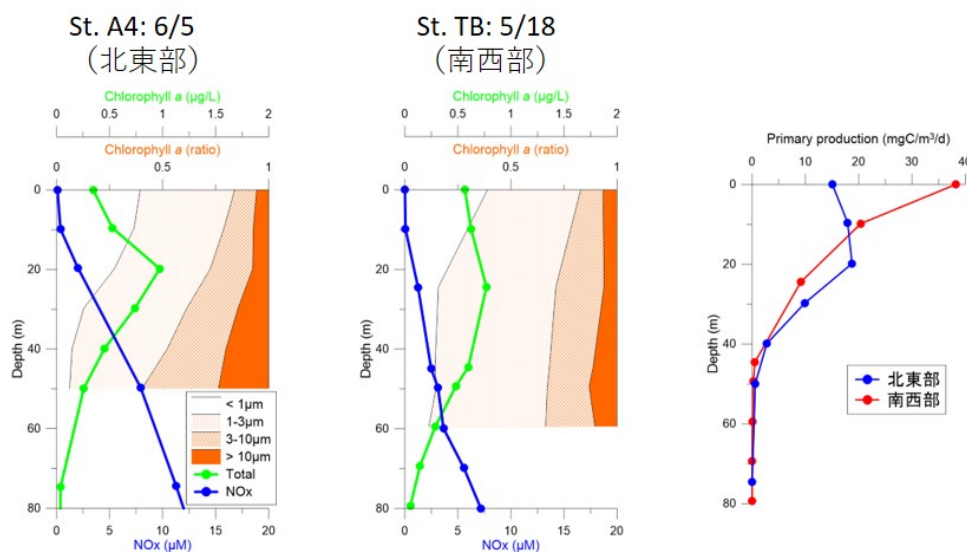
図(3)-5 上段：日本海北東部における水温、栄養塩、クロロフィル *a*
下段：基礎生産および植物プランクトン群集組成の鉛直分布

ブルーム期の植物プランクトン群集は、栄養塩が枯渇した 20m 以浅では $3\mu\text{m}$ 以下の小型植物プランクトンが全体の約 75% を占め、栄養塩が存在する 20m 以深では $10\mu\text{m}$ 以上の大型植物プランクトン（珪藻）

が優占となった。また季節の進行につれて、表層は昇温して成層はより強固になり、栄養塩はさらに深くまで枯渇する様子が捉えられている(図(3)-5)。この間、植物プランクトン群集組成は季節によらず、栄養塩の分布に応じた変動をしていることが明らかとなった。このことは二つの興味深い結果を示している。一つは、栄養塩が豊富に存在する層では大型珪藻が卓越することである。これは、表面に豊富な栄養塩が存在している春季には大型珪藻がブルームを形成している可能性が高いことを示唆している。二つ目は、定常的に栄養塩が枯渇している夏季表層と同様に、ブルーム期である春季でも栄養塩の枯渇に伴い速やかに植物プランクトン群集組成が小型化していることである。これは、大型珪藻は栄養塩の枯渇によって増殖が大きく阻害されるとともに、ブルーム期には動物プランクトンによる大型珪藻の捕食が積極的に行われていることも示唆している。

上記の観測結果から、日本海の海洋生態系に関して興味深い事象が示唆される。日本海では大型珪藻が春に顕著な植物プランクトンブルームを形成しており、動物プランクトンの主要な餌生物として食物連鎖の出発点を担っていると考えられる。珪藻のような大型植物プランクトンは小型の動物プランクトンを介さずに直接大型動物プランクトンに捕食されるため、より上位の魚類へと効率的にエネルギーの転換が図られる。このことが豊かな日本海の漁業資源を育むことに繋がっていると考えられるが、一方で栄養塩の枯渇に伴い速やかに大型珪藻の現存量は低下する。これは温暖化によって成層が強化され、栄養塩が枯渇しやすくなると小型の植物プランクトンが優占となる低次生態系となることも示唆する。それは食物連鎖を介したエネルギー転換効率が低下することを意味し、従来の豊かな海洋生態系の維持が困難になることが危惧される。

さらに南西部と北東部の観測結果を比較すると、初期成層期に実施した観測ではどちらも表面は栄養塩が枯渇しており、両海域の植物プランクトン群集組成は似た鉛直分布をしていることが捉えられた(図(3)-6)。ところが表面の最大光合成速度(P_{max})は南西部の方が高く(表(3)-2)、基礎生産量の鉛直分布をみると南西部の表面だけ非常に高いことが捉えられた(図(3)-6)。これは同様に栄養塩が枯渇している状態であっても、南西部の方が北東部よりも高い基礎生産量があったことを示している。また、南西部と北東部では夏季成層期の表面クロロフィル *a* は南西部の方が高いことから(図(3)-4)、南西部における高い基礎生産量が示唆される。南西部では対馬暖流の影響や、大陸に近いことから表面ではエアロゾル沈着による影響がある可能性も考えられる。この結果は、日本海の低次生態系は必ずしも平面的に様な構造をしているわけではないことを示しており、日本海極前線を挟む水塊構造の特徴や大陸や沿岸域からの影響も加味して観測研究を行う必要性を示唆した。



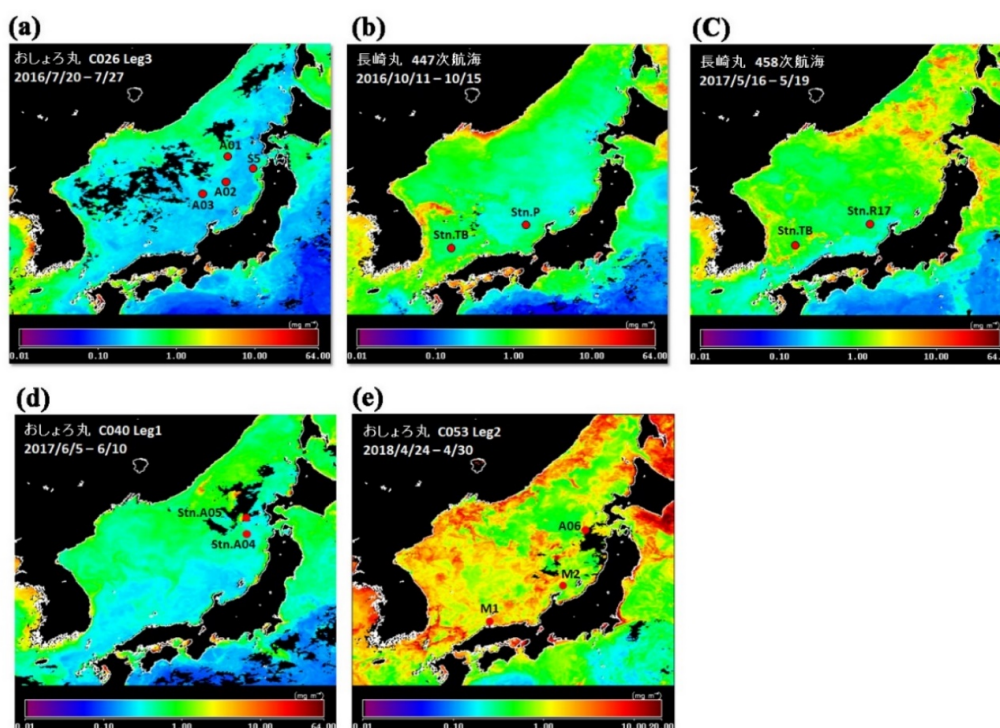
図(3)-6 初期成層期の日本海北東部と南西部における栄養塩、クロロフィル *a*、基礎生産量鉛直分布

表(3)-2 初期成層期の日本海北東部および南西部における基礎生産パラメータ

海域	P^b_{max} (表面) (最大光合成速度)	日射量 ($\text{mol quanta m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	Chl. a (水柱) (mg m^{-3})	基礎生産量 (水柱) ($\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
北東部 (St. A4)	3.96	49	32	434
南西部 (St. TB)	7.53	46	34	483

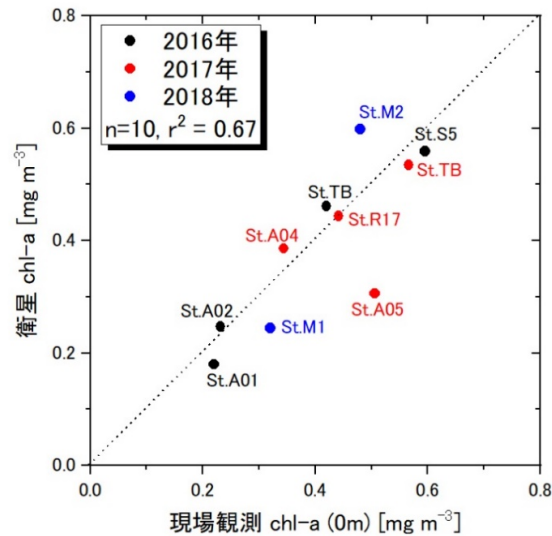
(3) 衛星データによる基礎生産量の推定と経年変動の検出

図(3)-7に北海道大学水産学部附属練習船「おしよろ丸」(図(3)-7-(a), (d), (e))と長崎大学水産学部附属練習船「長崎丸」(図(3)-7-(b), (c))で2016-2018年の3年間に実施した計13点の測点図を示す。背景の衛星画像は観測の実施した月の月平均クロロフィル a 濃度画像、左上の年月日は船舶観測期間を表す。これらの現場観測実施日に、晴れていて衛星によるクロロフィル a 濃度データも取得できた計10測点について、船舶による現場観測値と衛星観測値とを比較した結果を図(3)-8に示す。日本海における衛星観測によるクロロフィル a 濃度の値は、現場観測値に非常に近い値を示した。過去にも日本海では海色センサーのクロロフィル a 推定値の精度が良いことが報告されており¹⁵⁾、今回の観測からも、既存の海色衛星のクロロフィル a 濃度データは日本海において十分有用であることが明らかとなった。



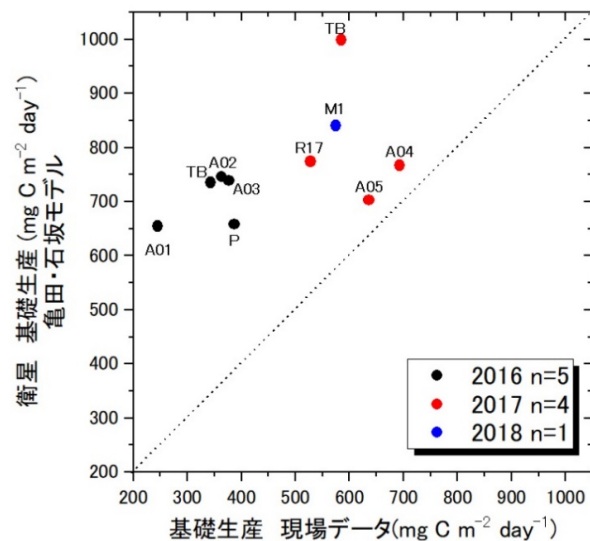
図(3)-7 「おしよろ丸」及び「長崎丸」で実施した生物観測の測点図

背景の画像は観測の実施した月の月平均クロロフィル a 濃度画像、左上の年月日は船舶観測期間を示す。測点詳細は表(3)-1を参照。



図(3)-8 現場観測による海表面のクロロフィル a 濃度と衛星観測値との比較図
衛星の値は観測点を中心とした100kmのBox内の平均値を用いた。

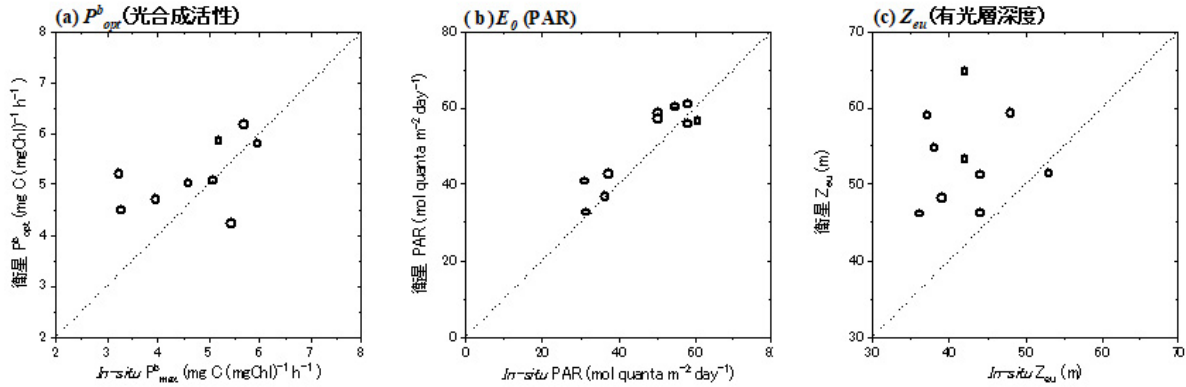
現場観測による基礎生産量と亀田・石坂モデルによって求めた衛星ベースの基礎生産量との比較を図(3)-9に示した。先行研究⁽⁶⁾と同様に、現場観測と衛星観測値と比較可能な10測点全てで衛星観測値が現場観測値と比べて過大評価となった。



図(3)-9 現場観測による基礎生産量と亀田・石坂モデルによって推定された基礎生産量との比較図
亀田・石坂モデルの値は観測点を中心とした100kmのBox内の平均値を用いた

衛星ベースのモデルが過大評価する原因を調べるため、亀田・石坂モデルに含まれる入力パラメータの推定誤差を検証した。亀田・石坂モデルでは、衛星の表面のクロロフィル a 濃度 (C_{surf})、PAR (E_0)、有光層深度 (Z_{eu})、光合成活性 (P^b_{opt}) によって基礎生産が算出される ((2), (3) 式参照)。有光層深度 (Z_{eu}) と光合成活性 (P^b_{opt}) も、クロロフィル a 濃度や水温等を入力パラメータとした衛星を使った

モデルから求めることができる。表面クロロフィルa濃度 (C_{surf}) に関しては前述したとおり衛星の推定精度が非常に良かったので、それ以外の3つのパラメータ (P_{opt}^b , E_0 , Z_{eu}) に関して現場観測値との比較を行った (図(3)-4)。日本周辺海域では、衛星による基礎生産の推定が過大評価する原因としてこれまでに光合成活性に関するパラメータである P_{opt}^b が過大評価することが大きな要因であると考えられていたが⁹⁾、今回日本海で検証した結果、 P_{opt}^b よりも有光層深度 (Z_{eu}) の誤差が大きいことが明らかになった (図(3)-10)。



図(3)-10 基礎生産推定入力パラメータの現場観測値と衛星推定値との比較

(a): 光合成活性 (P_{opt}^b), (b): PAR (E_0), (c): 有光層深度 (Z_{eu})

以上から、有光層深度 (Z_{eu}) が基礎生産推定の大きな誤差要因になっていると考えられ、既存の推定式の改良を試みた。有光層深度 (Z_{eu}) は以下の式によって求めることができる¹¹⁾。

$$Z_{eu} = \begin{cases} 568.2(Chl_{tot})^{-0.746} & (Z_{eu} < 102m) \\ 200.0(Chl_{tot})^{-0.293} & (Z_{eu} \geq 102m) \end{cases} \quad (4)$$

$$Chl_{tot} = \begin{cases} 38.0(C_{surf})^{0.423} & (C_{surf} < 1.0 \text{ mgm}^{-3}) \\ 40.2(C_{surf})^{0.505} & (C_{surf} \geq 1.0 \text{ mgm}^{-3}) \end{cases} \quad (5)$$

Chl_{tot} : 有光層内積算クロロフィルa濃度, C_{surf} : 表面クロロフィル濃度

ここで、現場観測による有光層内積算クロロフィルa濃度と表面クロロフィル濃度、及び有光層積算クロロフィル濃度と有光層深度との関係から累乗関数のフィット曲線を求め、日本海に特化した有光層深度の推定式への改良を行った (式(6)と(7))。現場観測データが 1.0 mg/m^3 より低い濃度のデータしかなかったため、 1.0 mg/m^3 以上の場合は既存の式のみで計算することとした。

$C_{surf} < 1.0 \text{ mg/m}^3$ の場合、以下の改良式を使う。

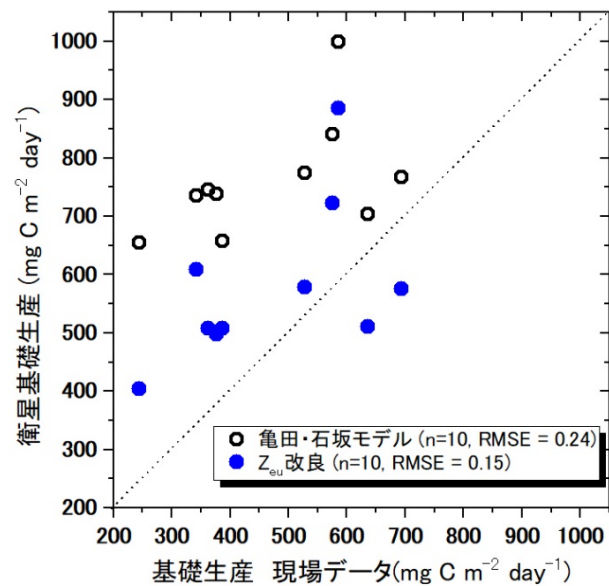
$$Z_{eu} = 80.21(Chl_{tot})^{-0.19}, \quad Chl_{tot} = 41.01(C_{surf})^{0.029} \quad (6)$$

$C_{surf} \geq 1.0 \text{ mg/m}^3$ の場合、既存の式のみで計算する。

$$Z_{eu} = 568.2(Chl_{tot})^{-0.746}, \quad Chl_{tot} = 40.2(C_{surf})^{0.505} \quad (7)$$

新しく作成した有光層深度 (Z_{eu}) 改良型基礎生産推定モデル (式(2), (3), (6), (7)) を用いて日本海における基礎生産を再計算した結果、既存の亀田・石坂モデルと比較して平均二乗誤差 (RMSE) が 0.24

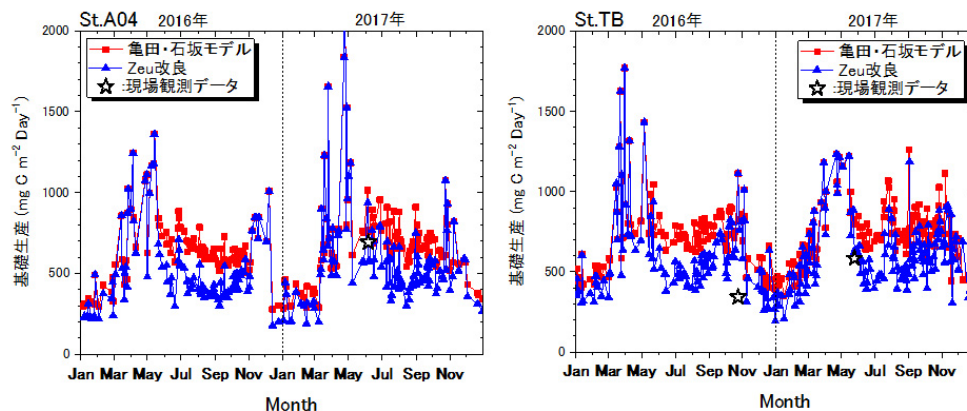
から0.15に減少し、衛星による推定モデルの過大評価が低減できた(図(3)-11)。図(3)-12に観測点St. 04とTBにおける衛星推定の基礎生産量の季節変動プロットを示す。Z_{eu}改良型モデルによって、春・秋の植物プランクトンブルーム期以外の時期における衛星の過大評価が低減された。



図(3)-11 現場観測と衛星推定モデルによる基礎生産量の比較

○：亀田・石坂モデル、●：Z_{eu}改良型モデルによる推定値

衛星観測値は観測点を中心とした100kmのBox内の平均値を用いた。



図(3)-12 観測点St. 04とTBにおける衛星による基礎生産推定値の季節変動

赤線+■：亀田・石坂モデル，青線+▲：Z_{eu}改良型モデル，☆：現場観測値

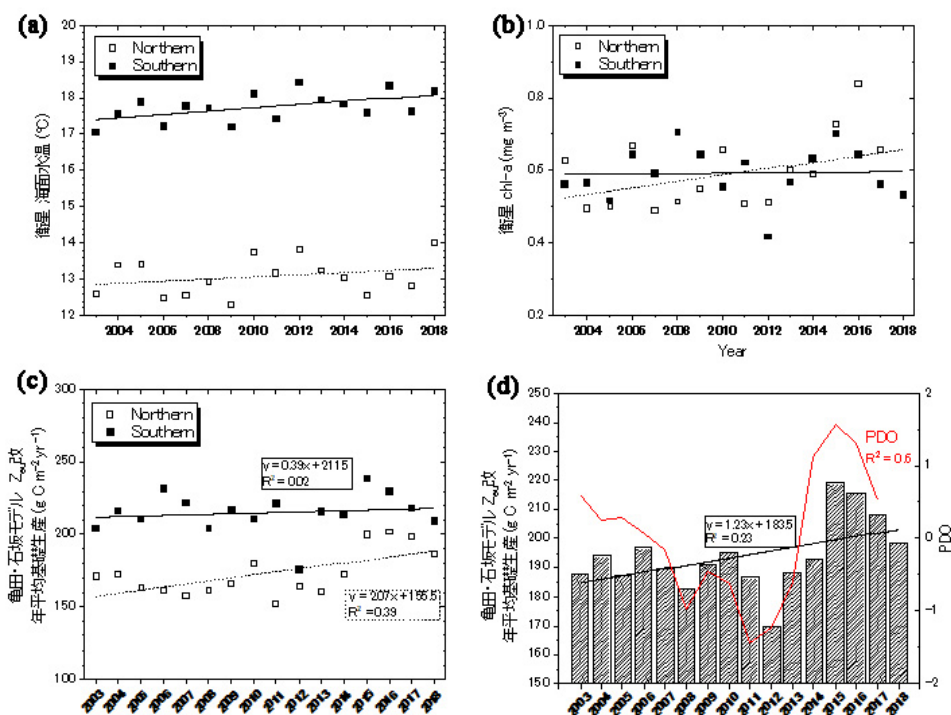
衛星による推定値は日平均で観測点を中心とした100kmのBox内の平均値を用いた。

本研究では、現場と衛星観測を同時に実施することによって、日本海における既存の衛星基礎生産推定モデルが過大評価する要因として、これまであまり議論されてこなかった有光層深度の推定誤差による影響が最も大きいことが初めて示唆された。有光層深度の推定誤差の要因として、現場観測の結果でも述べたように、日本海では表面ではなく亜表層にクロロフィルa濃度極大がしばしば観測されることが明らかとなり、既存の有光層深度の推定式では亜表層極大が考慮されていないため亜表層での光の減

衰が無視されてしまい、実際よりも衛星推定値が深く見積もってしまうことが原因ではないかと考えられた。今回の研究解析期間では、通年で最も基礎生産量の高い春季ブルームのピーク期を現場観測で十分に捉えることが出来なかった。衛星基礎生産推定モデルの精度をより高めるため、今後もより詳細な解析と継続した観測を行っていく必要がある。

ここからは、今回新しく作成した Z_{eu} 改良型モデルをMODISの観測開始以降2003年から2018年までの衛星データに適用し、過去十数年スケールでの日本海における基礎生産の経年変化について議論する。日本海における数年スケールでの衛星を用いた基礎生産の経年変動を議論した先行研究として、Joo et al. (2016)¹⁷⁾は亀田・石坂モデルを用いて2003年から2012年までの日本海の基礎生産を計算し、10年間で日本海全体の基礎生産量が約13%減少し、海水温の昇温による成層の強化に伴う栄養塩の表層への供給が弱まったことが主要因であると述べた。そこで、 Z_{eu} 改良型モデルを用いて、Joo et al. (2016)¹⁷⁾と同じ解析領域における2003～2018年まで計16年間の基礎生産の経年変動について調べた。

図(3)-13は2003年から2018年までの衛星観測による(a) 海面水温、(b) 海面クロロフィル a 濃度、(c) と(d)は Z_{eu} 改モデルによる基礎生産の経年変動を示す。全て年平均値をプロットしており、Joo et al. (2016)¹⁷⁾によるそれぞれの解析領域内における全てのpixelの平均値である。Northernは極前線北部の解析領域の平均、Southernは極前線南部の平均値を表す。日本海中部周辺の海面水温は、100年でおおよそ $+1.7^{\circ}\text{C}$ の上昇率と全球平均 $+0.54^{\circ}\text{C}$ と比較して極めて高いことが気象庁から報告されている (https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html)。2003年から2018年までの海面水温の衛星観測値においても極前線北部、南部ともに昇温の傾向であることがわかる(図(3)-13-(a))。クロロフィル a 濃度は極前線北部の領域で増加傾向が強く、南部はほぼ横ばいであり変化はない(図(3)-13-(b))。基礎生産は、クロロフィル同様に北部で増加トレンドが顕著で(10年間でおよそ13.5%の増加トレンド)で、南部は横ばい(10年間で約2%の増加)で増減の変化は弱い(図(3)-13-(c))。



図(3)-13 衛星データから求めた2003～2018年までの極前線北部と南部の(a) 海面水温、(b) 海面クロロフィル a 濃度、(c) Z_{eu} 改モデルによる基礎生産の経年変動。(d)は Z_{eu} 改モデルによる日本海全体の基礎生産の経年変動(棒グラフ)と北太平洋十年規模振動の経年変動(赤線)との比較を示した。

日本海全体の年間基礎生産量を北部+南部の平均値で代表してプロットしてみると、過去16年間の衛星データ解析からはおよそ7%/10年の増加トレンドとなった(図(3)-13-(d))。さらに、図に赤線で示した北太平洋十年規模振動(Pacific Decadal Oscillation: PDO)¹⁸⁾の変動ともよく一致しており、PDOといった気候変動指標にも日本海の基礎生産が応答している可能性も示唆された(図(3)-13-(d))。この結果は、Chiba et al. (2008)¹⁹⁾による先行研究の議論と整合性がとれている。

我々の結果からは、日本海の基礎生産量は十数年の周期で増減を繰り返しており、2003年から2012年までは減少トレンド、以降はしばらく増加に転じたことが明らかになった。Joo et al. (2016)¹⁷⁾は、水温の長期的な上昇と基礎生産量の減少を結びつけて議論しているが、今後のより詳細な解析と継続した衛星観測によるモニタリングが必要であると考えられる。

(4) 総合考察

観測船を用いた現場観測と衛星データを組み合わせることにより、衛星データを用いて日本海表層のクロロフィル濃度の精度検証および基礎生産量を推定するためのアルゴリズムの改良を行った。それを用いて解析を行った結果、日本海における基礎生産量は十数年スケールで増減している可能性が示唆された。これは、地球温暖化による日本海表面水温の上昇が同海域の基礎生産量の低下の原因となっていると結論した先行研究とは矛盾する結果であり、今後さらなる観測と衛星によるモニタリングが必要とされる。現場観測の植物プランクトン群集組成の結果からは、将来の温暖化による水温躍層の強化は基礎生産量の減少だけでなく、優占種が大型種から小型種へ移行することによって食物連鎖を介したエネルギー転換効率が低下するリスクがあることが明らかにされた。また、極前線の南北を比較した場合、南側の観測点における基礎生産量が相対的に高いことも明らかになった。この原因については、対馬暖流の温かい水温の影響、大陸起源の 대기からの栄養塩供給を挙げることができる。これらの結果は、将来の日本海における温暖化予測研究に資するものである。過去十数年間中、日本海表層水中基礎生産量と底深層水中溶存酸素濃度の時間変化の間には相関関係が見いだせなかった。このことは、底深層水中溶存酸素濃度の増減が生物化学的要因すなわち底深層水に沈降する有機物量よりも、海洋物理的要因すなわち海水循環の時間変動に影響を受けていることを強く示唆した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

植物プランクトン群集組成と基礎生産量については、これまで日本海における観測データは極めて限られており、貴重な現場観測データが得られ蓄積されたことが第一の成果である。加えて、衛星観測と同時に行うことによって、これまでに過大評価だと指摘されてきた既存の代表的な衛星ベースの基礎生産推定モデルの比較検証、さらに初めて日本海に特化したモデルの改良を行い、過去十数年スケールでの基礎生産量の経年変化の検出に向けて大きく前進できた。今後の日本周辺海域における海色衛星の利用研究への貢献が十分期待される。現場観測の植物プランクトン群集組成の結果からは、将来の温暖化によって植物プランクトンの優占種が大型種から小型種へ移行することによって食物連鎖を介したエネルギー転換効率が低下するリスクがあること、極前線の南北を比較した場合、南側の観測点における基礎生産量が相対的に高いことも明らかになった。過去十数年間中、日本海表層水中基礎生産量と底深層水中溶存酸素濃度の時間変化の間には相関関係が見いだせなかった。これらの結果は、将来の日本海における温暖化予測研究に資するものである。

(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>

日本海の基礎生産量の時間変動を、より高い精度で推定することに成功した。また、日本海の植物プ

ランクトン群集組成の特徴と栄養塩濃度に応じた分布変動を捉えることができ、低次生態系のみならず海洋生態系全体に及ぼす温暖化リスクが示唆された。これらの観測結果は、将来的な漁業資源への影響評価も含めた地球温暖化適応策の立案に貢献す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)>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 熊本雄一郎、荒巻能史：日本海洋学会2018年度秋季大会(2018)
「2004年以降日本海底層水の溶存酸素濃度が単調に減り続けているのは何故か？」
- 2) 松本和彦、笹岡晃正、熊本雄一郎、荒巻能史：日本海洋学会2018年度秋季大会(2018)
「日本海の植物プランクトン分布・基礎生産力の時空間変動」
- 3) 熊本雄一郎、荒巻能史：日本地球惑星科学連合2017年大会(2017)
「2016年の日本海東部日本海盆、大和海盆、対馬海盆における溶存酸素濃度の鉛直分布」

(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

- 1) 市民向け講演会「日本海で進みつつある環境の変化～その驚くべき実態に迫る～」(主催：国立研究開発法人国立環境研究所、共催：九州大学応用力学研究所、2019年2月16日、九州大学西新プラザ、参加者25名)において、当サブテーマから以下の講演を行った。笹岡晃征「宇宙から見た日本海の植物プランクトン分布～人工衛星を用いた地球環境変動観測～」
- 2) 市民向け講演会「日本海で進みつつある環境の変化～その驚くべき実態に迫る～」(主催：国立研究開発法人国立環境研究所、共催：新潟大学理学部、2018年1月21日、新潟大学駅南キャンパスときめいと、参加者80名)において、当サブテーマから以下の講演を行った。松本和彦「日本海の温暖化～植物プランクトンから始まる海洋生態系への影響～」
- 3) 市民向け講演会「日本海で進みつつある環境変化～その驚くべき実態に迫る～」(主催：国立研究開発法人国立環境研究所、共催：金沢大学環日本海域環境研究センター、2017年1月22日、金沢市文化ホール、参加者20名)において、当サブテーマから以下の講演を行った。熊本雄一郎「低酸素化が進む日本海の深層海水」

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) NHKワールド(国際放送)「Science View」(2019年1月9日放映、A Warning from the Sea of Japan

- a "Miniature Ocean")

- 2) 新潟日報 (2018年2月17日、33面オピニオン欄・探る2018、「世界の海の縮図」日本海)
- 3) NHK Eテレ「サイエンスZERO」 (2017年9月3日放映、「小さな大洋“日本海”からの警告」)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 須田皖次: 海洋時報4-1, 221-240 (1932), 日本海の底層水について (予報) .
- 2) T. Gamo, Y. Nozaki, H. Sakai, T. Nakai, H. Tsubota: J. Mar. Res., 44, 781-793 (1986), Special and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer.
- 3) 熊本雄一郎: 月刊海洋, 2010年1月号, 51-57 (2010), 生物地球化学から見た日本海底層水の時空間変動.
- 4) H. Nagata: Plankton Biology and Ecology, 45, 159-170 (1998), Seasonal changes and vertical distributions of chlorophyll a and primary productivity at the Yamato Rise, central Japan Sea.
- 5) T. Yoshikawa and K. Furuta: Continental Shelf Research, 28, 962-976 (2008), Phytoplankton photosynthetic parameters and primary production in Japan Sea and the East China Sea: Toward improving primary production models.
- 6) T.-H. Kim and G. Kim: Journal of Marine Systems 115-116, 1-9 (2013), Factors controlling the C:N:P stoichiometry of dissolved organic matter in the N-limited, cyanobacteria-dominated East/Japan Sea.
- 7) J.H. Kwak, S.H. Lee, J. Hwang, Y.-S. Suh, H.J.E. Park, K.-I. Chang, K.-R. Kim, C.-K. Kang: Journal of Geophysical Research: Oceans, 119, 4505-4519 (2014), Summer primary productivity and phytoplankton community composition driven by different hydrographic structures in the East/Japan Sea and the Western Subarctic Pacific.
- 8) T. Platt, C.L. Gallegos, W.G. Harrison: J. Mar. Res., 38, 687-701 (1980), Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton.
- 9) T. Kameda and J. Ishizaka: J. Oceanogr., 61, 663-672 (2005), Size-fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing.
- 10) M.J. Behrenfeld and P.G. Falkowski: Limnol. Oceanogr., 42, 1-20 (1997), Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration.
- 11) A. Morel and J.F. Berthon: Limnol. Oceanogr., 34, 1545-1562 (1989), Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications.
- 12) T. Senjyu: J. Oceanogr., 55, 111-122 (1999), The Japan Sea intermediate water; its characteristics and circulation.
- 13) S. Yoon, K.-I. Chang, S. Nam, T. Rho, D.-J. Kang, T. Lee, K.-A. Park, V. Lobanov, D. Kaplunenko, P. Tishcheko, K.-R. Kim: Scientific Reports, 8, 1576 (2018), Re-initiation of bottom water formation in the East Sea (Japan Sea) in a warming world.
- 14) T. Senjyu, H.-R. Shin, J.-H. Yoon, Z. Nagano H.-S. An, S.-K. Byun, C.-K. Lee: Deep-Sea Research II, 52, 1726-1741 (2005), Deep flow field in the Japan/East Sea as deduced from direct current measurements.
- 15) K. Sasaoka, S. Saitoh, I. Asanuma, K. Imai, M. Honda, Y. Nojiri, T. Saino: Deep Sea Res., Part II, 49, 5557-5576 (2002), Temporal and spatial variability of chlorophyll a in the

Western subarctic Pacific determined from satellite and ship observations from 1997 to 1999.

- 16) K. Yamada, J. Ishizaka, H. Nagata: *J. Oceanogr.*, 61, 857–869 (2005), Spatial and temporal variability of satellite primary productivity in the Japan Sea from 1998 to 2002.
- 17) H.T. Joo, S.H. Son, J.W. Park, J.J. Kang, J.Y. Jeong, C.I. Lee, C.K. Kang, S.H. Lee: *Remote Sens.*, 8, 25; doi:10.3390/rs8010025 (2016), Long-Term Pattern of Primary Productivity in the East/Japan Sea Based on Ocean Color Data Derived from MODIS-Aqua.
- 18) S. Chiba, M.N. Aita, K. Tadokoro, T. Saino, H. Sugisaki, K. Nakata: *Prog. Oceanogr.*, 77, 112–126 (2008), From climate regime shifts to lower-trophic level phenology: Synthesis of recent progress in retrospective studies of the western North Pacific.
- 19) N.J. Mantua and S.R. Hare: *J. Oceanogr.*, 58, 35–44 (2002), The Pacific Decadal Oscillation.

III. 英文Abstract

Global Warming Impacts on Thermohaline Circulation and Subsequent Biogeochemical Change in the Japan Sea

Principal Investigator: Takafumi ARAMAKI

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN
Tel: +81-29-850-2124 / Fax: +81-29-850-2124
E-mail: ara@nies.go.jp

Cooperated by: Kyushu University, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

[Abstract]

Key Words: Japan Sea, Thermohaline circulation, Carbon cycle, Dissolved oxygen, Chemical tracers, oceanic ecosystem, Primary production, Satellite data, Moored observation, Simulation model

The Japan Sea is called a “miniature ocean” because it has its own thermohaline circulation, which is similar to that of the open ocean. Therefore, it may be possible to detect oceanic responses to warming impacts in a relatively short time by monitoring physical and biogeochemical conditions in the Japan Sea. In this study, we have been trying to quantitatively detect impacts on oceanic ecosystems, such as biological productivity and the carbon cycle caused by the weakened thermohaline circulation, using observational methods and a simulation model.

Revisiting observations with moored current meters revealed that the mean deep flow in the eastern Japan Basin was reduced by about 30% during the last 22 years, though no significant changes were found in the southern Yamato Basin in the last 8 years. Southward deep flows were dominant at Sta. PM5, which is a long-term hydrographic station in the Yamato Basin, suggesting that the historical trends in water characteristics at Sta. PM5 reflects water mass condition in the northern basin. Argo float data showed warming trends in the deep layer of the whole Japan Sea with the highest warming rate in the Yamato Basin.

We estimated the distribution of anthropogenic CO₂ in the Japan Sea using the observational data of the dissolved inorganic carbon, total alkalinity and dissolved oxygen. According to trial calculation using the spatial distributions of anthropogenic CO₂ and chemical tracers, it was indicated that the weakened thermohaline circulation may be accelerated decomposition of organic matter in the deep layer.

We improved the algorithm to estimate the primary production in the surface water of the Japan Sea using satellite data. The primary production in the Japan Sea has fluctuated during the past decades. No correlation was found between the temporal changes in the primary production in the surface water and the dissolved oxygen concentration in the deep/bottom water in the Japan Sea. This suggests that the temporal changes in the dissolved oxygen concentration in the deep/bottom water have been derived from the stagnation of seawater circulation.

To elucidate environmental processes of the dissolved oxygen decreasing, we developed a hydrodynamic-biogeochemical model for the Japan Sea and performed a numerical simulation

for 2001–2010. The simulation suggests that spatiotemporal variation of dissolved oxygen in the deep layer at the Yamato and the Japan Basins strongly depends on thermohaline circulation, which is consistent with observations.