沿岸海洋研究　第58巻，第1号，45-47，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 45-47, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.003

Extended Abstract

シンポジウム「変わりゆく海：沿岸海域への温暖化の影響*」のまとめ**

吉江　直樹†・張　　勁††・小松　輝久#

A Summary of the Symposium on “Changing Ocean : Effects of Climate Change on Coastal Regions”

YOSHIE Naoki, ZHANG Jing and KOMATSU Teruhisa

近年，地球温暖化に伴う気候変動による影響が世界的に顕在化しており，社会経済の発展に伴う人間活動の活性化と相乗的に沿岸海域に大きな影響を及ぼしている．日本海においては，世界平均の約３倍のペースで表層水温が上昇しており，海流の変動，日本周辺の気候や水循環の変動，魚介類の不漁による水産業の衰退などの影響が顕在化してきている．また，日本海の“上流域”といえる東シナ海においては，アジアモンスーンの変化や急速な経済発展に伴う広域での富栄養化がみられ，それらに伴う沿岸域での藻場植生変化やプランクトンを主体とした低次栄養段階生態系の変化が生じており，その影響は対馬暖流を介して日本の沿岸域にまで及んでいる．

本シンポジウムでは，沿岸海域における温暖化の影響を主軸に，気象，水文，海洋物理，海洋生物，海洋化学，水産学などの多岐にわたる研究分野から，最前線の研究者に話題を提供して頂き，今後の学際的な研究の発展について議論がなされた．沿岸海洋シンポジウムでは初めての試みとして，午前と午後の二部構成とし，午前の部では広域かつ学術的な視点から学際的な議論の場を設け，午後の部では日本海洋学会の富山での初開催を機に，富山をクローズアップした市民向けのアウトリーチ的な内容とした．開催地である富山は，わずか50 kmの水平的距離に，高さ3,000 m級の立山連峰と水深1,000 mを超える富山湾を内在し，その高低差は4,000 mに及ぶ非常に特徴的な地形を有する．富山における陸から海に纏わるこれまでの環境変化の情報を共有しながら，国連が提唱している持続可能な開発目標（SDGs）も視野に入れ，今後の実施可能な温暖化への対応策，市民レベルでの環境保全への意識向上を狙った活発な議論がなされた．

午前の部では，８名の研究者らによる学術的な講演と議論が繰り広げられ，その概要を以下にまとめた．松野は，東シナ海における物理要素（表面水温，黄海冷水，黒潮流量，長江希釈水の挙動など）の長期変動には，温暖化に対応した長期トレンドと同時に，太平洋十年規模震動（PDO）等の気候Indexと対応した数年から十数年スケールの長期変動があり，大気場の変動が直接的・間接的に変動要因となっていることを紹介した．この東シナ海における変動は，対馬海峡を通じて日本海に伝わるが，その影響については気候変動が直接日本海の物理環境に及ぼす影響と区別して考える必要があることも示された．石坂は，東シナ海における生物要素の長期変動について，社会問題化した赤潮・クラゲ・アオノリや褐藻類の増加などの話題を取り上げ，過去20年以上にわたる海色衛星データの解析から，東シナ海における植物プランクトンの量と質が変動してきたことを紹介した．植物プランクトン量は長江の影響により増加傾向にあったが最近減少傾向にあることや，長江からの高いN/P比の栄養塩供給により植物組成が小型種優占に変化しつつあり，水温上昇だけではなく化学環境の長期変化も重要であることが示唆された．瀬藤らは，温暖化に伴う将来の東シナ海の海水温・海流・生態系の変化について，物理・低次生態系結合温暖化モデルを用いて，気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の温暖化シナリオのうち最も温暖化が進むRCP 8.5シナリオを与えた際の今世紀

* 本シンポジウムは，日本海洋学会沿岸海洋研究会の主催，国立大学法人富山大学・富山テレビ放送株式会社の協賛で，2019年９月29日に富山国際会議場（富山県富山市）において開催され，学術的講演８件，市民向け講演６件の合計14件の講演と活発な討議が行われた．

** 2020年６月４日受領

† 愛媛大学沿岸環境科学研究センター
†† 富山大学理学部
# 横浜商科大学（2020年３月末に退職）
連絡先：吉江直樹，愛媛大学沿岸環境科学研究センター
〒790-8577 愛媛県松山市文京町2-5
E-mail：Yoshie.naoki.mm@ehime-u.ac.jp

末の将来予測を紹介した．2090年代の東シナ海では，現在より約3℃海水温が上昇し，済州島南部の流速が増加し，栄養塩濃度が減少することにより植物プランクトン量が減少することが予測された．これらから，高水温化による魚類の生息・産卵海域の変化，流速増加による卵や仔稚魚の輸送過程の変化，植物プランクトン減少に伴う餌料環境の悪化が生じる可能性が示唆された．金らは，日本海深層における溶存酸素濃度の長期減少トレンドについて，物理・生態系結合モデルを用いて再現し，溶存酸素濃度の減少をもたらす3つの要因（1．深層水形成量の減少，2．有機物輸送量の増加，3．底層水との混合強化）について議論した．特に，対馬暖流の変動に伴う表層での生物生産の変動が深層への有機物輸送量を変化させ，深層水の溶存酸素濃度の減少速度を数パーセント変動させうることが示唆された．森本は，東シナ海からの日本海への栄養塩輸送について，対馬海峡を通過する栄養塩量（溶存無機窒素量，DIN量）は経年変動が大きく，それに呼応して日本海の低次生態系が変動することを紹介した．この対馬海峡を通過するDIN量に対して，大陸での人間活動により大きく変動する長江起源のDINがどの程度影響を及ぼすかについて，物理・低次生態系モデルを用いて推定した．その結果，長江起源のDINの寄与率は10％程度と低く，長江の栄養塩濃度の増減が直接的に日本海の栄養塩環境を大きく変化させないことが示唆された．小松らは，日本海沿岸の藻場の特性とその長期変動と温暖化に伴う将来予測について紹介した．日本海の藻場は，アカモクなどの温帯性ホンダワラ類で構成されたガラモ場が大部分を占め，ブルーカーボンとして沿岸域に炭素を固定しており，その一部は流れ藻となり日本海を漂流しながらブリやマアジの産卵場や稚魚の生息場として重要な役割を果たしている．温暖化に伴うアカモク分布域の変化を，海洋物理モデルDREAMSによる将来の水温予測とアカモクの生息可能水温レンジ（4℃～28℃）から推定したところ，主に夏の高水温化により，2100年にはその南限が現在の長崎付近から新潟付近まで大幅に北上することが示唆された．井桁らは，日本周辺海域における水産資源変動の要因について，温暖化や十数年規模の気候変動に付随した日本周辺の海流変動が及ぼす影響を紹介した．日本海海況予測システムJADE 2を用いた粒子追跡実験により，2017年の特異的なマアジ太平洋系群の宮崎沿岸への新規加入増加イベントを引き起こした3つの要因が議論された．①温暖化や十数年規模気候変動に起因した対馬海峡通過流増加に伴う太平洋へ移動する粒子の十年規模での減少，②九州西方の時計回り渦に影響された黒潮流路による東シナ海大陸斜面縁辺産卵域起源粒子の宮崎沿岸への輸送，③上記渦に伴う南下流による例年日本海へ輸送される対馬海峡南方産卵域起源粒子の太平洋への輸送が重要であることが示唆された．堀川は，数千年スケールの長期的な対馬暖流の流量変動とその駆動要因について紹介した．古環境復元の新しいプロキシとして浮遊性有孔虫*N. incompta*殻のMg/Ca比水温計を用いて，日本海における過去7,000年間の水温変動を再現し，対馬暖流の長期的な流動変動を推定した．その結果，対馬暖流の変動の駆動要因としては，数百年～千年スケールの変動は太陽日射量の変動に起因し，十数年スケールの変動は北極振動（AO）やPDOなど太平洋の大気場の変動に起因することが示唆された．

午後の部では，6名の研究者らにより開催地「富山」をクローズアップした市民向けの講演と議論が繰り広げられ，その概要を以下にまとめた．安永は，気象の観点から富山での市民生活に大きな影響を及ぼす冬季の降雪量の長期変動を中心に富山の水循環ついて紹介した．冬季の降雪量は，温暖化に伴う気温上昇により近年減少中ではあるが，1990年頃を境に急激に減少しており，将来も減少傾向が予測されるが短期間の積雪に注意が必要である．一方，冬季の降水量は，現在増加傾向にあり，その要因は遠く離れた熱帯域における降水変動に起因することが示唆された．また，市民の関心の高い気象災害の観点からは，2018年の西日本豪雨のような夏季の長時間強雨に注意する必要があることが示された．張は，陸から海への物質輸送や海洋内部での物質循環に関する研究がどのように変遷してきたかについて紹介した．地球規模での物質循環がどのように変動しているかについて化学海洋学の視点から研究する国際的な枠組み「微量元素・同位体による海洋生物地球化学研究」（GEOTRACES）計画や，日本海に寄与する対馬暖流による物質とエネルギー輸送について概説された．また，これらの海洋循環規模での変動を背景として，陸から海への物質輸送に顕著な特徴を持つ富山湾に注目し，富山の美味しい水の理由を踏まえながら，気候変動が及ぼす影響について議論された．そして，これからの海洋変動を正しく理解するために，今後進めていくべき国際的な枠組みが紹介された．中田は，富山湾の流れ場と対馬暖流水・河川水との関連性について紹介した．静止衛星観測による高解像度・高頻度表層塩分分布の解析から，表層での流れは融雪出水期には河川プリュームが沖合に張り出すと共に対馬暖流も流入することにより複雑な相互作用が生じており，温暖化による積雪量の減少に伴いこのプリュームが縮小する可能性が示唆された．中層での流れは，夏季には時計回りの暖水渦が，夏季以外には反時計回りの渦が存在し，深層での流れは，反時計回りの渦が季節的に循

環の強さを変えて存在していることが示された．海底峡谷を持つ富山湾のような海は世界に広く分布し，沿岸域と沖合域の海水交換を強化し生物生産を高め炭素循環に寄与していることが示唆された．寺内は，世界規模で減少中の海草藻場（アマモ場）について，現場観測と衛星観測を組み合わせた新しい高精度の推定手法の開発と富山湾西岸における応用事例を紹介した．これまでの航空写真によるアマモ場面積の推定手法には推定精度に問題が残されていたが，アマモの成長ステージに合わせた季節毎の水中ビデオ画像データ，高解像度衛星画像データ，BRI 水柱補正処理を組み合わせることにより，正確に広範囲での時空間分布を把握できるようになった．また，アマモ場の変動要因として，水深が深い海域では濁度による水中の光環境変化が重要であり，浅い海域では冬季の波浪による物理的影響が重要であることが示唆された．井口は，富山湾における1990年代の動物プランクトン生活史に関する研究から主要な動物プランクトンの生態的特徴と，1997年以降20年以上にわたる長期モニタリングにより捉えられた生物イベントについて紹介した．富山湾表層には対馬暖流により運ばれた暖水性種が多く分布するが，その下層には冷水性種が分布し，沖合と繋がった海底峡谷が岸近くまで続いているため冷水性種が岸近くまで分布する．定期モニタリング以外では捉えにくい突発的な生物イベントとしては，2015年のオオサルパの大量発生，2019年のモモイロサルパの大量発生などが紹介された．小塚らは，富山湾における主要な漁獲対象であるブリ・スルメイカ・ホタルイカの資源変動要因と温暖化影響について紹介した．ブリ資源量は日本全体では温暖期に多い傾向があるが，近年富山湾の漁獲量は不安定であり温暖化影響は不明である．富山湾のスルメイカ漁獲量は北部日本海が低温であるほど増加する傾向があるため，温暖化による減少が懸念されている．富山湾のホタルイカ漁獲量は，以前は山陰沖の水温指標により予測可能だったが近年は予測が外れるようになり，温暖化による影響は不透明であることが示唆された．

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，49-51，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 49-51, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.004

Extended Abstract

東シナ海：物理的観点から*

松　野　　健**

A Physical View in the East China Sea

MATSUNO Takeshi

東シナ海における海洋物理現象，特に海面水温，黄海冷水，黒潮，長江希釈水，海水位の長期変動について，最近の文献に基づいて主なものを紹介した．気象庁は，東シナ海の北部と南部海域における海面水温が，100年でそれぞれ1.23℃および1.18℃上昇していることを示し，これらは全球平均に比べてかなり大きな値になっている．海面水温を含めて，黄海冷水や黒潮の流量・流路，さらに長江希釈水の広がりや海水位の長期変動は，北太平洋の気候変動指標と何らかの関係を持って変動していることが様々な文献によって報告されている．しかし，それぞれが相互に関連していること，また用いたデータの取得場所や期間によって様々に異なる関連性も示されていることから，トレンドの理解にはより長期的なデータを用いた解析が必要である．

キーワード：東シナ海，長期変動，海面水温，黒潮，長江希釈水

1. はじめに

東シナ海は，中国大陸の東に位置し，主として200 m以浅の大陸棚と，深いところでは2,000 mを超える沖縄トラフとからなる東アジアの代表的な縁辺海であり，北側は明確な自然の境界はないものの黄海と接している．陸棚域は陸域の環境の影響を強く受け，また陸棚斜面域には北太平洋亜熱帯循環の一部をなす黒潮が流れており，南端の台湾海峡からは南シナ海からの流入，北東端では対馬暖流として日本海への流出がある．陸棚域は季節風や陸域からの淡水の流入など強い季節変動を示す外部要因の影響を受け，台湾海峡からの流入にも顕著な季節変動がみられる．季節変動のみならず，様々な時間スケールを持った外部要因の影響を受けて複雑な変動を示す東シナ海の海洋構造について，本稿は特に地球温暖化を念頭に，数十年スケールの長期変動に注目し，物理現象を中心に最近の研究成果を紹介するものである．東シナ海における物理要素として，海面水温，黄海冷水に代表される鉛直構造，黒潮，長江希釈水，海水位の長期変動を取り上げる．

* 2020年3月12日受領
** 九州大学応用力学研究所
連絡先：松野　健，九州大学応用力学研究所
〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1
E-mail : matsuno@riam.kyushu-u.ac.jp

2. 海面水温

海面水温は，歴史的にも古くからのデータがあり，近年では衛星からもある程度の精度で計測できるようになっており，広範囲のデータが長期間にわたって蓄積されていることもあって，長期変動を議論する際，最も一般的な要素といえる．気象庁は1900年からの長期データに基づいて，東シナ海の北部海域と南部海域に分けて，その海面の平均水温の時系列を公表している．気候変動モニタリングレポート[1]によると，北部と南部海域における海面水温の上昇速度は100年でそれぞれ1.23℃および1.18℃としており，これらは全世界の平均0.73℃に比べてかなり大きな値になっている．この海面水温上昇は季節による相違があり，夏季に比べて冬季の方が上昇速度は大きい．

100年スケールの水温上昇トレンドの理由については明確な議論はなされていないが，Yeh and Kim (2010)[2]は1980年代後半以降の冬季の水温上昇に注目し，これが冬の季節風が弱まったこと，すなわち冬季の海面冷却の弱化に関連しているとした．一方，Wang et al. (2013)[3]は海洋構造の変化との関係に注目し，黒潮水の陸棚への進入が強まったことによって冬季水温が上昇傾向になったとしている．以下でも述べるように，陸棚域の水温や黒潮の変動は，いずれも風系などの気候変動に関連しており，個別の要素間との一元的な因果関係では説明できないことを示唆している．

3. 黄海冷水

水温の長期変動は海面水温だけでなく，内部構造にもみられる．特に北部陸棚域の下層には，黄海から水温の低い水塊が張り出すことが知られており，黄海冷水と呼ばれている．黄海冷水は顕著な季節変動を示し，夏季には済州島南方海域まで張り出す．この黄海冷水は季節変動のみならず，経年的にも大きく変動し，Park et al. (2011)[4]は黄海冷水の起源となる黄海東部の底層水温と，北太平洋10年振動（Pacific Decadal Oscillation; PDO）との関係を示している．PDOの時係数が正のときは偏西風が強くなっているときに対応し，これに2年～3年のラグで黄海底層の水温が下降する傾向が示され，黄海冷水の挙動は太平洋規模の気候変動に対応していることが示唆されている．

4. 黒　　潮

黒潮の経年変動については，主にその流量と流路について様々な報告がなされている．黒潮が北太平洋中緯度の風系によって形成されていることを考慮すると，その流量の変動が北太平洋の気候インデックスに関連していることが期待できる．実際Andres et al. (2009)[5]はPN線付近の黒潮流量とPDO Indexとの相関が良いことを示した．ただ，ほかの研究例[6),7)]では，用いたデータの期間や黒潮流量を見積もった場所によって，気候インデックスとの相関は異なった結果が示されている．

また，東シナ海に流入する黒潮の流路は，黒潮の流量と関連しており，黒潮流量が大きいときには陸棚斜面域から離れ，小さいときに斜面に近づく傾向にあり，Wang and Oey (2014)[8]は台湾北東部における黒潮流路が，太平洋規模のPDOよりも，ローカルな風のindexであるPhilippine-Taiwan-Oscillation（PTO）と関連していることを示している．黒潮の10年スケールの変動について，気候インデックスとの関係が論じられているが，そのメカニズムについてはまだ十分理解されていない部分も多い．また，より長期間のトレンドについて明瞭に示された報告は見られない．

5. 長江希釈水

東シナ海の陸棚域の環境に大きく影響する河川からの淡水の流入の大部分は長江からのものであり，夏季に降水量が増加することや風向の変動を反映して，顕著な季節変動を示す．長江希釈水（低塩分水）の広がりの長期変動もまた，長江流量に依存するとともに，陸棚上の風や海流，潮汐流にも依存し，大きなvariabilityがあるが，1950年代から2000年にかけて長江流量の増加を反映して低塩分化の傾向にある（Siswanto et al., 2008[9]）ことが示されている．ただ，三峡ダムの1期工事が完成した2003年以降はダムによる流量の管理もあって，長江流量自体の経年変動は小さくなっているように見える．長江希釈水の挙動の長期変動に関しては，中国大陸での降水量や，黒潮流量の変動に依存していることから，こちらも北太平洋の気候インデックスPDOとの関連が論じられている（Siswanto et al., 2008[9]）．

6. 海　水　位

潮位計による潮位のデータは，海洋データの中でも最も古くから蓄積があり，地球温暖化に伴う海面上昇にも直接関わるため，長期データはしばしば用いられる．しかし，潮位計はland motionを含んだ潮位を記録するので，長期変動を見ても場所による相違が大きく，海水位の上昇を評価する際，注意が必要となる．それに対して近年の衛星による海面高度計はジオイドに対する高度を与えるので，実際の海水位の長期変動を捉えるのに適している．海面高度計のデータは1992年から供されており，Han and Huang (2008)[10]は1992年から約10年間のデータを用いて，潮位計のデータと比較して，両者がほぼ一致していることを示しつつ，この期間の海水位の上昇速度を0.64 cm yr^{-1}～0.66 cm yr^{-1}とした．ただ，より長期間の潮位計のデータを用いた上昇速度と比較して，1980年～2002年のデータでは0.1 cm yr^{-1}と非常に小さくなることから，10年スケールの変動が大きいので，トレンドを見積もるにはより長期のデータが必要であることも示している．また，この海水位上昇の半分程度は水温上昇などによるsteric heightの寄与によるものとしており，水温上昇に伴って海水位も上昇していることは東シナ海のデータからも示されている．

7. ま　と　め

東シナ海における海洋物理現象の長期変動に関して，海面水温，黄海冷水，黒潮，長江希釈水，海水位を取り上げ，最近の文献に基づいて，現時点での知見から主なものを紹介した．これらの要素はそれぞれ独立の事象ではなく，長期変動に関しても相互に関連している部分も多い．特に10年スケールの変動に関しては，PDOなどの北太平洋の気候インデックスとの関連で論じられることが多く，風況や海流系を通じて大気の変動に応答して様々な物理要素が長期変動していることが示唆されている．

参　考　文　献

1）Japan Meteorological Agency (2017) : Climate Change Monitoring Report, Chapter 2 Climate Change. http://www.jma.go.jp/jma/en/

NMHS/ccmr/4_ccmr2017_chapter2.pdf.

2) Yeh, S.-W. and C.-H. Kim (2010) : Recent warming in the Yellow/East China Sea during winter and the associated atmospheric circulation. Continental Shelf Research, **30**, 1428-1434, doi : 10.1016/j.csr.2010.05.002.

3) Wang, F., Q. Meng, X. Tang and D. Hu (2013) : The long-term variability of sea surface temperature in the seas east of China in the past 40 a. Acta Oceanologica Sinica, **32**, 48-53, doi : 10.1007/s13131-013-0288-2.

4) Park, S., P. C. Chu and J. H. Lee (2011) : Interannual-to-interdecadal variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1967-2008 : Characteristics and seasonal forcings. Journal of Marine Systems, **87**, 177-193.

5) Andres, M., J.-H. Park, M. Wimbush, X. Zhu, H. Nakamura, K. Kim and K.-I. Chang (2009) : Manifestation of the Pacific decadal oscillation in the Kuroshio. Geophysical Research Letters, **36**, L16602, doi : 10.1029/2009GL039216.

6) Chang, Y.-L. and L.-Y. Oey (2011) : Interannual and seasonal variations of Kuroshio transport east of Taiwan inferred from 29 years of tide gauge data. Geophysical Research Letters, **38**, L08603, doi : 10.1029/2011GL047062.

7) Wei, Y., D. Huang and X.-H. Zhu (2013) : Interannual to decadal variability of the Kuroshio current in the East China Sea from 1955 to 2010 as indicated by in-situ hydrographic data. Journal of Oceanography, **69**, 571-589, doi : 10.1007/s10872-013-0193-5.

8) Wang, J. and L.-Y. Oey (2014) : Inter-annual and decadal fluctuations of the Kuroshio in East China Sea and connection with surface fluxes of momentum and heat. Geophysical Research Letters, **41**, 8538-8546, doi : 10.1002/2014GL062118.

9) Siswanto, E., H. Nakata, Y. Matsuoka, K. Tanaka, Y. Kiyomoto, K. Okamura, J. Zhu and J. Ishizaka (2008) : The long-term freshening and nutrient increases in summer surface water in the northern East China Sea in relation to Changjiang discharge variation. Journal of Geophysical Research, **113**, C10030, doi : 10.1029/2008JC004812.

10) Han, G. and W. Huang (2008) : Pacific decadal oscillation and sea level variability in the Bohai, Yellow, and East China Seas. Journal of Physical Oceanography, **38**, 2772-2783, doi : 10.1175/2008JPO3885.1.

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，53-55，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 53-55, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.005

Extended Abstract

東シナ海と日本海の植物プランクトンの変化：衛星データを中心に*

石　坂　丞　二**

Changes of Phytoplankton in East China Sea and Sea of Japan : Based on Satellite Data

ISHIZAKA Joji

日本の縁辺海の東シナ海・日本海でも水温の上昇が報告され，温暖化による生態系の影響が懸念される．一方でこの海域は人間による富栄養化の影響も大きいことが知られている．ここではこれらの海域での，衛星で測定したクロロフィル *a* 濃度の変化について報告する．過去の研究の10年スケールにおいても，最近の20年スケールの観測においても，東シナ海ではクロロフィル *a* 濃度の上昇傾向が観測されている．東シナ海では，中国の長江水の富栄養化が報告されており，直接的な富栄養化による植物プランクトンの上昇が考えられる．一方で，日本海は20年スケールでやはり上昇がみられ，気候変動による可能性が考えられ，今後の研究が必要である．

キーワード：植物プランクトン，クロロフィル *a*，東シナ海，日本海，長期変動，温暖化，富栄養化

1. はじめに

近年，日本周辺の縁辺海でも水温上昇が観測されている．一方で，このような地球規模の温暖化の影響の以外にも，人為的な影響を多く受けている沿岸海域は，より直接的な汚染物質の流入や富栄養化の影響も大きく，複合的な生態系の変化が危惧される．特に，東シナ海は長江を中心とした河川水の流入や，大気経由の栄養塩の負荷が大きいと考えられる．また日本海は，東シナ海と隣接しており東シナ海経由の中国からの淡水の流入が大きいことが知られているが，直接的な栄養塩の供給は東シナ海ほどではないと考えられている．

植物プランクトンは，様々な環境影響を直接的に受けるために，環境変化の指標として利用できると考えられる．衛星による海色の測定はすでに20年にわたるデータが蓄積し，長期にわたる環境の変化をとらえられるようになってきていると考えられる．Terauchi et al.(2018)[1]は，国連環境計画（UNEP）北西太平洋地域海行動計画（NOWPAP）の活動の一環で，日中韓ロに囲まれた縁辺海での衛星で測定したクロロフィル *a* の濃度と傾向から，富栄養化の予備的評価を行っている（NEAT: NOWPAP Eutrophication Assessment Tool, https://cloudgis.nowpap3.go.jp/neat-un-webstory/）．その結果では，東シナ海と日本海の多くの場所では，クロロフィル *a* が上昇傾向である．

ここでは著者のグループが，これまで行ってきた東シナ海・日本海での海色による植物プランクトン量（クロロフィル *a* 濃度）の解析結果に，最近のデータを付け加えた．また今後重要な指標となるであろう植物プランクトン群集の変化についても触れた．

2. 東シナ海のクロロフィル *a* 変動

東シナ海では，長江から流入する栄養塩の増加が以前から指摘されており，赤潮の増加の他，2008年の北京オリンピック時に注目されたアオノリの大発生や最近はアカモク類の大発生が報告されている．また後に述べる2002年から2010年ぐらいに日本海で大発生したエチゼンクラゲについても，その幼生の発生は長江河口域周辺からであると考えられている．

Yamaguchi et al.(2012, 2013)[2,3]は，1998年から2006年の東シナ海域のクロロフィル *a* の季節変動と長期変動を調べた．東シナ海の多くの海域では懸濁物質が多く，衛星のクロロフィル *a* 濃度の推定誤差が大きいことが知られているが，ここではSiswanto et al.(2011)[4]が衛星センサーSeaWiFS用に開発した東シナ海用のアルゴリズムを利用している．長江河口付近では長江流量の多い夏に最大値があるが，その北東の黄海では春季に最大値があった，長江河口付近の夏の最大値は，長江の流量に対応した変動を見せ，1998年から2006年の間は徐々に減少した．一方で，長江河口から少し離れた黄海

* 2020年4月2日受領
** 名古屋大学宇宙地球環境研究所
連絡先：石坂丞二，名古屋大学宇宙地球環境研究所
〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町
E-mail : jishizaka@nagoya-u.jp

では長江流量が減少しているのに対して，９年間で徐々に増加化傾向を示しており，河川や大気経由で流入している栄養塩が蓄積している可能性が示唆された．

Xu et al.（2013）[5]は，エチゼンクラゲの発生状況と比較するために，さらに衛星データをSeaWiFSからMODISに継続して，1998年から2010年の春季の衛星海表面水温とクロロフィル *a* の変動を調べた．表面水温はこの13年間で減少傾向であったが，クロロフィル *a* はブルーム時期もそれ以外も上昇傾向にあった．Terauchi et al.（2018）[1]も基本的に，同じ手法を利用しており，今回さらに2018年までのデータを検討したところ，東シナ海ではクロロフィル *a* が2013・2014年ごろまで上昇し，2015年から2018年はやや低い傾向にある．詳しい解析は行っていないが，2013年－2015年は表面水温がやや低い傾向にあり，それがクロロフィル *a* の増加に関連している可能性もある．いずれにしても，20年スケールではクロロフィル *a* が増加しており，富栄養化による可能性が高い．

3.　日本海のクロロフィル *a* 変動

日本海のクロロフィル *a* 変動に関しては，Yamada et al.（2004）[6]が1996年から2002年の７年間について調べている．日本海では，春季と秋季ブルームが毎年起こるが，特に春季ブルームについては，そのタイミングが年によって，１ヵ月程度変化することが示され，冬季の風の弱いエルニーニョ年にはブルームが早く，風の強い年はブルームが遅かった．この現象は最近ではフェノロジーと呼ばれ，魚のリクルートメントに重要であることがわかってきている．一方，ブルームの大きさについては，年によって異なってはいたが，エルニーニョ等との関係や長期変化は明らかでなかった．

1998年から2018年でのクロロフィル *a* の変動を見ると基本的には，春季と秋季のブルームが卓越していることに変化はない．また，春季ブルームの時期に関しては，年によって違いがあるが，長期的な変化は見られない．しかし，2010年以降特に日本海西部では春季ブルームが，またロシア沿海部では春季・秋季ブルームともに，クロロフィル *a* 濃度が増加傾向である．逆に日本海盆の中央部と能登沖では秋季ブルームが最近小さくなっているようである．東シナ海起源の栄養塩が日本海まで入り込んでいるとは考えにくく，大気経由の栄養塩の増加でもここまでの変化があるかどうかは疑問である．温暖化等の気候変動による変化の可能性があり，今後さらなる研究が必要である．

4.　東シナ海の植物プランクトン群集の変化

植物プランクトンの長期変化としてもう一つ注目すべきは，群集構造の変化である．人工衛星で群集構造を調べる試みは現在多く行われている．グローバルには全植物プランクトン量であるクロロフィル *a* と群集構造の関係が利用される場合も多いが，東シナ海ではそのような関係がないため，衛星データから植物プランクトンの大きさと関係のある吸収係数を求め，そこからサイズを判別する手法を作成した[7]．しかし残念ながら，まだ衛星では植物プランクトンの長期的な変化を調べてはなく，今後研究を行う予定である．

東シナ海で植物プランクトンの色素を用いて，その群集構造を数年分収集した．その結果，長江希釈水の影響の大きい済州島南の海域で，2009年と2013年には珪藻が優先していたのに対して，2010年と2011年にはより小型の植物プランクトンが多い，経年的な違いがみられた[8]．またこの時，珪藻が優先した年にはリン濃度が高かったのに対して，他の２年間はリンが枯渇していた．このことから，大陸近辺での湧昇によって亜表層のリンの多い水と十分混ざった場合に珪藻が優占するのに対して，長江起源の窒素が多くリンの枯渇した水では珪藻が優占できない可能性が考えられた．また長江と同様に大河川であるアマゾン河のプルームでは，珪藻が優占しており，人為的な影響の強さの違いと考えられた[9]．気候変動でも，植物プランクトン群集の長期変化が想定され，今後の研究が必要である．

5.　ま　と　め

東シナ海では，長期的なクロロフィル *a* の増加と年による植物プランクトン群集の変化が明らかとなっているが，これらは気候変動というよりも人為的な富栄養化の影響が強いと考えられる．一方で，東シナ海より富栄養化の影響は小さいと考えられる日本海でも，春季ブルームと秋季ブルームの大きさに変化がある．現状では，どの程度気候変動が影響しているかははっきりとしておらず，今後研究を進める必要がある．Terauchi et al.（2018）[1]の画像では，黒潮域ではクロロフィル *a* が減少傾向にあることも示されており，これも気候変動との関係を調べる必要がある．

参　考　文　献

1）Terauchi, G., E. R. Maúre, Z. Yu, Z. Wu, C. Lee, V. Kachur and J. Ishizaka（2018）: Assessment of eutrophication using remotely sensed chlorophyll-*a* in the Northwest Pacific region. Proceedings of SPIE, 10778, Remote Sensing of the Open and Coastal Ocean and Inland Waters, 107780H.　doi : 10.1117/12.2324641.

2）Yamaguchi, H., H.-C. Kim, Y. B. Son, S. W. Kim, K. Okamura, Y.

Kiyomoto and J. Ishizaka（2012）: Seasonal and Summer-Interannual Variations of SeaWiFS Chlorophyll *a* in the Yellow Sea and East China Sea. Progress in Oceanography, **105**, 22-29. doi.org/10.1016/j.pocean.2012.04.004.

3）Yamaguchi, H., J. Ishizaka, E. Siswanto, Y. B. Son, S. Yoo and Y. Kiyomoto（2013）: Seasonal and spring interannual variations in satellite-observed chlorophyll-*a* in the Yellow and East China Seas : New datasets with reduced interference from high concentration of resuspended sediment. Continental Shelf Research, **59**, 1-9.

4）Siswanto, E., J. Tang, H. Yamaguchi, Y.-H. Ahn, J. Ishizaka, S. Yoo, S.-W. Kim, Y. Kiyomoto, K. Yamada, C. Chiang and H. Kawamura（2011）: Empirical ocean color algorithms to retrieve chlorophyll-*a*, total suspended matter, and colored dissolved organic matter absorption coefficient in the Yellow and East China Seas. Journal of Oceanography, **67**, 627-650. doi : 10.1007/s 10872-011-0062-z.

5）Xu, Y., J. Ishizaka, H. Yamaguchi, E. Siswanto and S. Wang（2013）: Relationships of interannual variability in SST and phytoplankton blooms with giant jellyfish（*Nemopilema nomurai*）outbreaks in the Yellow Sea and East China Sea. Journal of Oceanography, **69**, 511-526. doi.org/10.1007/s10872-013-0189-1.

6）Yamada, K., J. Ishizaka, S. Yoo, H. Kim and S. Chiba（2004）: Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll *a* concentration in the Japan/East Sea（JES）. Progress in Oceanography, **61**, 193-211.

7）Zhang, H., S. Wang, Z. Qiu, D. Sun, J. Ishizaka, S. Sun and Y. He（2018）: Phytoplankton size class in the East China Sea derived from MODIS satellite data. Biogeosciences. doi : 10.5194/ bg-15-4271-2018.

8）Xu, Q., C. Sukigara, J. I. Goes, H. R. Gomes, Y. Zhu, S. Wang, A. Shen, E. R. Maúre, T. Matsuno, Y. Watanabe, S. Yoo and J. Ishizaka（2019）: Interannual changes in summer phytoplankton community composition in relation to water mass variability in the East China Sea. Journal of Oceanography, **75**, 61-79. doi : 10. 1007/s10872-018-0484-y.

9）Gomes, H.d.R., Q. Xu, J. Ishizaka, E.J. Carpenter, P.L. Yager and J. I. Goes（2018）: The Influence of Riverine Nutrients in Niche Partitioning of Phytoplankton Communities-A Contrast Between the Amazon River Plume and the Changjiang（Yangtze）River Diluted Water of the East China Sea. Frontiers in Marine Science. doi : 10.3389/fmars.2018.00343.

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，57-58，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 57-58, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.006

Extended Abstract

物理・生態系結合モデルに基づく日本海の溶存酸素（DO）濃度への生物学的寄与*

金　　海珍**・広瀬　直毅**・高山　勝巳**

Biological Contributions to the Dissolved Oxygen（DO）Concentration in the Japan Sea Based on a Coupled Physical-Biogeochemical Model

KIM Haejin, HIROSE Naoki and TAKAYAMA Katsumi

日本海の深層では，溶存酸素（dissolved oxygen：以後DOと省略）濃度が長期的に低下し続けている．DO濃度の減少に関してGamo et al.（1986）[1]は3つの要因：1. 深層・底層水の形成量が減少あるいは停止；2. 深層に沈み込む有機物の増加；3. 深層水と底層水の鉛直混合の強化，を可能性として例示している．これまでの研究では，要因1がDO濃度の長期的な減少をもたらす主因とみなしており，要因2と3の影響はまだ明らかにされていない．本研究では，物理・生態系結合モデルを利用して日本海のDO濃度減少に対する3つの要因の影響を定量的に明らかにした．要因1である深層水の形成の停止は，DO濃度の総減少量比で128％もの効果があり，確かにDO濃度の長期的な減少を起こす最も重要な原因である．深層に沈み込む有機物の長期的な増加（要因2）は，DO濃度の減少を加速させたが，それはDO濃度の総減少量に対して7％程度である．一方，生物学的分解を伴わない物理活動（要因3）は，逆に総減少量の35％相当分の深層DO濃度を増加させる効果が認められる．

キーワード：溶存酸素，日本海，物理・生態系結合モデル，長期変化

1. はじめに

日本海の深層では，地球温暖化による溶存酸素（dissolved oxygen：以後DOと省略）濃度の長期的な低下が観測されている．DO濃度の減少に関してGamo et al.（1986）[1]は3つの要因：1. 深層・底層水の形成量が減少あるいは停止；2. 深層に沈み込む有機物の増加；3. 深層水と底層水の鉛直混合の強化，を提示している．

これらの要因の中では，最初に示した新しい深層水形成の停止がDO濃度の長期的な減少をもたらす主な原因と考えられている（たとえば，Gamo et al., 1986[1]; Minami et al., 1999[2]; Kim et al., 2001[3]; Kang et al., 2004[4]）．次の要因である深層に沈み込む有機物の増加は，生物的な分解を促進させ，DOの消費を増加させる．さらに，最後の要因は，深層水と底層水の物質収支から予想されるように，DO濃度を変化させる．しかし，2番目と3番目の可能性である生物・物理環境の長期変化に起因するDO濃度の変化は，これまでの研究ではまだ明らかにされていない．

本研究の目的は物理・生態系結合モデルを利用してDO濃度の長期変動を再現し，DO濃度減少に対する3つの要因の影響を定量的に明らかにすることである．特に，上層での生物活動の変化が深層のDO濃度の長期変化にどのように影響を与えるのかを調べる．

2. 物理・生態系結合モデル：DREAMS2

この研究で用いる物理・生態系結合モデル（DREAMS2）は，海洋循環モデルRIAM Ocean Model（RIAMOM；Lee et al., 2003[5]）と低次生態系モデル（Kawamiya et al., 1995[6]；Onitsuka et al., 2007[7]）で構成される．海洋循環モデルとして使用したRIAMOMは，九州大学応用力学研究所で東アジア縁辺海の海況場を再現する目的で開発された．低次生態系モデルとしては溶存態無機窒素（dissolved inorganic nitrogen：DIN）・植物プランクトン（phytoplankton）・動物プランクトン（zooplankton）・デトリタス（detritus）の4成分を構成要素とする窒素循環のNPZDモデルを使用する．モデル計算領域は縁辺海を含めた北西太平洋域（105°－180°E, 15°－63°N）で，水平格子間隔は東西方向1/4°，南北方向1/5°，鉛直的にはz座標系の差分方法を採用し，表

* 2020年3月27日受領
** 九州大学応用力学研究所
連絡先：金　海珍，九州大学応用力学研究所
〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1
E-mail：hjkim@riam.kyushu-u.ac.jp

層から深層に向けて層厚が増すように38層を設定している（設定の詳細については Hirose, 2011[8]を参照）.

海中の DO 濃度は，海面におけるガス交換だけでなく光合成，プランクトンの呼吸およびデトリタスの分解などの生物化学的なプロセスによって決定される．海面での飽和 DO 濃度は Weiss（1970)[9]の式から水温と塩分から計算できる．生態系モデルの各要素と DO 濃度は海洋循環モデルの流動場に従って移流・拡散する．本研究では物理・生物学的プロセスの両方を含む実験をコントロール（control : CTL）実験として1990年から2012年まで時間積分した.

DO 濃度の長期減少をもたらす３つの原因の影響を明らかにするため，感度実験を行った．上述した要因３の可能性は物理プロセスのみに関係するため，生物活動による DO 濃度の変化を無視した非生態系（NE）実験を実施した．要因２の有機物の沈降フラックスの増加による DO 濃度の変化は，つまり生物環境の時間変化に起因する．この影響を調べるために，毎年デトリタスの沈降量を一定に維持するように設定した Constant Detritus Flux（CDF）実験を行った．したがって，要因２の寄与は，CTL 実験から CDF 実験の結果を差し引くことで得ることができる．３つの寄与の合計は CTL 実験の結果と同じでなければならないため，要因１の影響は CDF 実験と NE 実験の差から定義できる.

3.　結果及び結論

Fig. 1 は，各要因による深層（＞1618 m）の DO 濃度の23年間（1990年から2012年）の変化量を表している．日本海深層の DO 濃度は，1990年から2012年にかけて 0. 30 ml L^{-1}減少した．要因１による DO 濃度の変化は，表層水が深層に沈み込んだ後，有機物の分解によって消費された DO 濃度を意味する．これは DO 濃度の総減少量の約128 %を占め，DO 濃度の変化の大部分を説明する．深層に沈み込むデトリタスの長期的な増加（要因２）は，有機物の分解が促進されることで DO 濃度を減少させたが，それは DO 濃度の総変化量に対して７%程度であった．一方，生物学的分解を伴わない物理活動（要因３）は，深層の DO 濃度を増加させる傾向にあり，その結果，DO 濃度の総減少の約35 %が相殺された.

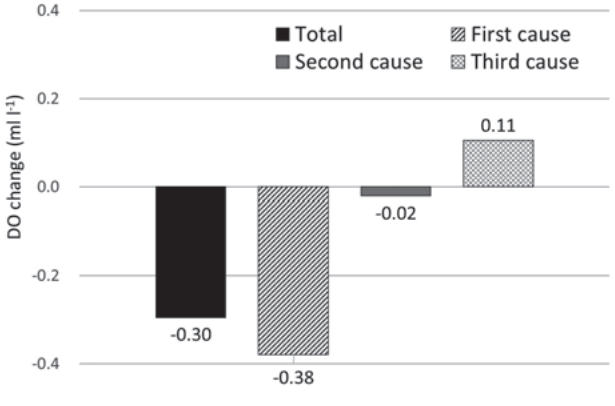

Fig. 1　Changes in DO concentration for the 23 years（1990 to 2012）attributed to each cause for the deep layer（＞1618 m）.

深層に沈み込む有機粒子フラックスの長期的な増加は，上層の生産量の上昇に起因している．最近の約20年間の衛星および現場観測データとモデルの結果は，表層のクロロフィル濃度の増加を示していた．生産量の増加は対馬暖流の強化に起因していると考えられる.

まとめると，深層水の形成の停止（要因１）は，これまでの研究で示唆されているように，日本海の深層における DO 濃度の長期減少傾向の主要因である．しかし，生物および物理環境の長期変化（要因２と３）も，深層での DO 濃度変化を数パーセントから数十パーセント加速または減速させることが確認された.

参　考　文　献

1）Gamo, T., Y. Nozaki, H. Sakai, T. Nakai and H. Tsubota（1986）: Spacial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer. Journal of Marine Research, **44**, 781-793.

2）Minami, H., Y. Kano and K. Ogawa（1999）: Long-term variations of potential temperature and dissolved oxygen of the Japan Sea Proper Water. Journal of oceanography, **55**, 197-205.

3）Kim, K., K. R. Kim, D. H. Min, Y. Volkov, J. H. Yoon and M. Takematsu（2001）: Warming and structural changes in the East（Japan）Sea : a clue to future changes in global oceans ? Geophysical Research Letters, **28**, 3293-3296.

4）Kang, D. J., K. Kim and K. R. Kim（2004）: The past, present and future of the East/Japan sea in change : a simple moving-boundary box model approach. Progress in Oceanography, **61**, 175-191.

5）Lee, H. J., J. H. Yoon, H. Kawamura and H. W. Kang（2003）: Comparison of RIAMOM and MOM in modeling the East Sea/Japan Sea circulation. Ocean and Polar Research, **25**, 287-302.

6）Kawamiya, M., M. J.Kishi, Y. Yamanaka and N. Suginohara（1995）: An ecological-physical coupled model applied to Station Papa. Journal of Oceanography, **51**, 635-664.

7）Onitsuka, G., T. Yanagi and J. H. Yoon（2007）: A numerical study on nutrient sources in the surface layer of the Japan Sea using a coupled physical-ecosystem model. Journal of Geophysical Research : Oceans, **112**, doi : 10 . 1029 / 2006 JC 003981.

8）Hirose, N.（2011）: Inverse estimation of empirical parameters used in a regional ocean circulation model. Journal of oceanography, **67**, 323-336.

9）Weiss, R. F.（1970）: The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. Deep Sea Research, **17**, 721-735.

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，59-60，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 59-60, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.007

Extended Abstract

東シナ海から日本海への栄養塩輸送*

森本　昭彦**・柴野　良太†・高山　勝巳††

Nutrient Transport from East China Sea to Japan Sea

MORIMOTO Akihiko, SHIBANO Ryota and TAKAYAMA Katsumi

東シナ海から日本海へは対馬暖流により栄養塩が水平的に輸送されている．この水平的に輸送される栄養塩量の変化は日本海の低次生態系，特に対馬暖流域の基礎生産を変化させる．対馬海峡における観測結果から，対馬海峡を通過する栄養塩量の経年変化が大きいことが分かっているがその変動要因は明らかになっていない．本研究では低次生態系モデルを使い，対馬海峡を通過する栄養塩の起源とその寄与率を明らかにし，どこを起源とする栄養塩の変化が対馬海峡の栄養塩を変えるのかを検討した．

キーワード：栄養塩輸送，栄養塩の起源，長江，黒潮

1. はじめに

東シナ海から日本海へは対馬暖流により大量の物質が輸送されている．東シナ海から日本海への物質輸送を示す現象として，長江を起源とする淡水が日本海へ輸送されることによる夏季の日本海の表層塩分の低下があげられる（Chang and Isobe, 2005[1]）．長江起源の淡水が日本海内部へ輸送されるということは，長江から流入した栄養塩もまた日本海へ輸送されている可能性がある．長江の溶存態無機窒素（DIN）の濃度は，1960年代40 μM 程度であったが2000年代には100 μM 以上と急激に濃度が上昇している（Wang et al., 2006[2]）．この事実は，東シナ海から日本海へ水平的に輸送される DIN が近年劇的に増加し，それに伴い日本海内部の基礎生産が変化している可能性を示唆している．Shibano et al.(2019)[3]は数値モデルにより，対馬海峡から流入する栄養塩量が変化した場合の日本海内部の低次生態系の応答を調べ，対馬暖流域，特に極前線に沿って基礎生産が変化することを示している．また，Morimoto et al.(2012)[4]は対馬海峡を通過する DIN 量を船舶観測により見積もり，その経年変化が極めて大きいことを明らかにし，アルカリ度のデータから対馬海峡を通過する DIN 量の経年変化が黒潮系と黄海系の海水の混合率の違いにより起こると述べている．しかしながら，どこを起源とした DIN がどのような割合で対馬海峡を通過し，また，対馬海峡の DIN に占める各起源の DIN の割合が季節・経年的にどのように変化するのかについては全くわかっていない．本研究では生態系モデルを用い，対馬海峡を通過する DIN に占める各起源の栄養塩の割合とその季節・経年変化を明らかにする．

2. 数値モデルと解析方法

本研究では，九州大学応用力学研究所で開発された水平解像度約9 km，鉛直方向に38層の物理モデル DREAMS_M（Hirose et al., 2013[5]）に，NEMURO（Kishi et al., 2007[6]）をベースとした低次生態系モデルをオフラインで結合したモデルを使用した．低次生態系モデルは栄養塩として硝酸，アンモニア，リン，２種類の植物プランクトン，３種類の動物プランクトン，溶存・粒状態有機物の計10変数から構成されている．長江流量および対馬海峡を通過する DIN 量が平均的な年であった2006年を対象に計算を行い，各種パラメータを調整した．

対馬海峡を通過する DIN に占める各起源の DIN の寄与率の計算は Shibano et al.(2019)[3]の方法により行った．DIN の起源として(1)台湾海峡，(2)太平洋，(3)長江，(4)黄河，(5)大気からのダスト，(6)陸棚底層の６つの起源を設定し，対馬海峡における６つの DIN 起源の割合の時間変化を調べた．さらに，長江流量の変化に伴う対馬海峡を通過する DIN 量の応答を調べるため，長江流量が大きかった1998年と流量が少なかった2006年の計算結果

* 2020年４月17日受領
** 愛媛大学沿岸環境科学研究センター
† 東京大学大気海洋研究所
†† 九州大学応用力学研究所
連絡先：森本昭彦，愛媛大学沿岸環境科学研究センター
〒790-8577 愛媛県松山市文京町2-5
E-mail : morimoto.akihiko.cl@ehime-u.ac.jp

の比較を行った.

3.　結果と考察

計算された東シナ海・黄海の表層 DIN の季節変化を観測値と比較した．長江河口域の高濃度な DIN の分布範囲は観測に比べ少し狭いが，1 μM の等値線の分布はすべての季節において観測とよく一致していた．表層クロロフィル *a* 濃度分布は人工衛星により観測された分布をほぼ再現していた．ただし，東シナ海陸棚縁から黒潮にかけてモデルのクロロフィル *a* 濃度は観測に比べ濃度が高くなっていた．以上の比較から，本モデルが東シナ海の低次生態系内での物質循環を再現できていると判断した.

夏季の東シナ海・対馬海峡の DIN における６つの起源からの DIN の寄与率の空間分布を調べた．長江起源の DIN の寄与率は中国の沿岸に沿って高いが，済州島以東では10％以下と低かった．東シナ海陸棚縁付近では台湾海峡起源の DIN と太平洋起源の DIN の割合がそれぞれ50％程度であった．対馬海峡東水道では太平洋起源の DIN の寄与率が高く，対馬海峡西水道では太平洋起源，台湾海峡起源，黄海底層起源の DIN の寄与率が高かった．対馬海峡の東西の水道によって DIN の起源が大きくことなることが分かった.

対馬海峡における各起源の DIN の寄与率の季節変化を調べた．東西両水道とも寄与率が最も高かったのは太平洋起源の DIN であり，西水道では60％～70％，東水道では75％～88％であった．長江起源の DIN の寄与率は西水道では６月～９月に高く５％程度で冬季は低く２％程度であった．東水道については４月に最も高く５％程度，冬季は１％未満と低かった．このことから，対馬海峡を通過し日本海へ輸送される DIN の変動に対する長江の影響は小さいことが分かる．しかしながら，以下のことを考慮する必要がある．陸棚底層起源の DIN の寄与率は西水道で15％程度，東水道で５％程度あった．本研究において陸棚底層起源としている DIN は計算上の初期値であり，陸棚底層の DIN は台湾海峡，太平洋，長江，黄河を起源とした栄養塩から構成されている．したがって，対馬海峡を通過する陸棚底層起源の DIN に長江起源の DIN が含まれている．そこで，陸棚底層の DIN の起源を調べるためモデルの長期積分を行い黄海底層の DIN の起源を推定した．その結果，黄海底層の DIN に占める長江起源の DIN の割合は20％～30％であった．したがって，対馬海峡における陸棚起源の DIN のうち20％～30％は長江起源である可能性がある．ただし，これを考慮しても対馬海峡東水道の DIN に占める長江起源の DIN は10％以下であり，長江の栄養塩濃度変化が日本海の栄養塩濃度に与える影響は極めて小さいことが示唆された.

長江流量の大きかった1998年と少なかった2006年の対馬海峡における DIN 濃度を比較したところ，流量の大きかった1998年のほうが最大で0.８μM 高くなっていた．この濃度の増加量は対馬海峡における長江起源の DIN の寄与率から計算される量よりもかなり大きい．これは，長江から流入する栄養塩の窒素・リン比が一定だったとすると，長江流量が増加することで東シナ海におけるリンが枯渇する海域が対馬海峡側にシフトし，その結果 DIN がより東側へ輸送されたためと考えられる.

4.　ま　と　め

長江起源の栄養塩が日本海へどの程度輸送されているのかを調べるために物理－低次生態系モデルを構築した．本モデルによる解析の結果，対馬海峡を通過する DIN に占める長江起源の DIN は10％程度と低く，長江の栄養塩濃度の増減が直接的に日本海の栄養塩環境を大きく変化させないことが示唆された．船舶観測結果から，対馬海峡東水道を通過する DIN 量の経年変化が大きいことが分かっている．日本海の低次生態系の変化を考える上では，今後対馬海峡を通過する DIN 量を変化させる要因を調べる必要がある.

参　考　文　献

1）Chang, P. -H. and A. Ishobe（2005）: Interannual variation of freshwater in the Yellow and East China Sea : roles of the Changjiang discharge and wind forcing. Journal of Oceanography, **61**, 817-834.

2）Wang, B.（2006）: Cultural eutrophication in the Changjiang（Yangtze river）plume : history and perspective. Estuary, Coastal and Shelf Science, **69**, 471-477.

3）Shibano, R., A. Morimoto, K. Takayama, T. Takikawa and M. Ito（2019）: Response of lower trophic ecosystem in the Japan Sea to horizontal nutrient flux change through the Tsushima Strait. Estuarine, Coastal and Shelf Science, **229**, 106386.

4）Morimoto, A., A. Watanabe, G. Onitsuka, T. Takikawa, M. Moku and T. Yanagi（2012）: Interannual variation in material transport through the eastern channel of the Tsushima/Korea Strait. Progress in Oceanography, **105**, 38-46.

5）Hirose, N., K. Takayama, J. -H. Moon, T. Watanabe and Y. Nishida（2013）: Regional data assimilation system extended to the East Asian marginal seas. Umi to Sora, **89**, 43-51.

6）Kishi, M. J., M. Kashiwai, D. M. Ware, B. A. Megrey, D. L. Eslinger, F. E. Werner, M. Noguchi-Aita, T. Azumaya, M. Fujii, S. Hashimoto, D. Huang, H. Iizumi, Y. Ishida, S. Kang, G.A. Kantakov, H. -C. Kim, K. Komatsu, V. V. Navrotsky, S. L. Smith, K. Tadokoro, A. Tsuda, O. Yamamura, Y. Yamanaka, K. Yokouchi, N. Yoshie, J. Zhang, Y. I. Zuenko and V. I. Zvalinsky（2007）: NEMURO-a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem. Ecological Model, **202**, 12-25.

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，61-63，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 61-63, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.008

Extended Abstract

地球温暖化と藻場：日本海を中心としたアカモク分布の変化*

小松　輝久**・水野紫津葉†・佐川　龍之††・高山　勝巳†††・広瀬　直毅†††

Influence of Gobal Warming on Macrophyte Beds : Change in Spatial Distribution of *Sargassum horneri* around the Sea of Japan

KOMATSU Teruhisa, MIZUNO Shizuha, SAGAWA Tatsuyuki, TAKAYAMA Katsumi and HIROSE Naoki

地球温暖化の影響は，水温上昇などを通じて固着生活を送る底生生物の分布域変化として現れる．長崎県の褐藻ホンダワラ類藻場（ガラモ場）では，温帯性から亜熱帯性への種組成の変化が既に報告されている．日本周辺ではホンダワラ類アカモクは流れ藻を構成する卓越種で広域に分布する．そこで，沿岸の2000年２月と８月の表面水温分布をもとにアカモクが分布する最低・最高水温範囲を求め，九州大学応用力学研究所開発の海況予測モデル DREAMS_B の RCP 8.5温暖化シナリオで得た2100年２月と８月の表面水温からアカモクの生息可能沿岸域を推定した．その結果，2000年に日本周辺の25°N から45°N の沿岸に分布していたアカモクは，2100年には35°N から45°N の沿岸に縮小し，縮小原因は８月の水温であった．東シナ海はブリの主要産卵場で，稚魚輸送にアカモク流れ藻が重要な役割を果たしているが，2100年にはその減少が稚魚輸送を妨げる．このように温暖化に伴う藻場分布域の変化は海洋生態系に広く影響を及ぼす．

キーワード：温暖化予測，藻場，アカモク，DREAMS，流れ藻

1. はじめに

ホンダワラ類，アラメ・カジメ，コンブなどの大型海藻やアマモなどの海草がつくる植物群落の藻場は，沿岸域の最も重要な一次生産者の一つで，多くの生物の生息場となり，その単位面積当たりの生態系サービスは熱帯林の約10倍と見積もられている．

藻場をつくる海藻の中で，葉が変形して内部にガスを貯蔵する気胞という器官をもつホンダワラ科海藻は，気胞の作りだす浮力により繁茂期に数メートルに達し，海中林をつくる．繁茂期前後には，基部あるいは茎部から波や流れにより切り離され，一部は海岸に打ち上げられるが，残りのものは，気胞の浮力で海面を浮遊し，流れ藻となって，海流により沖合を移動する．日本周辺では流れ藻はホンダワラ科海藻がその大部分のバイオマスを占めている．この流れ藻に，東シナ海ではマアジやブリの稚魚が一時期を随伴して過ごすこと，トビウオ類やサンマ，サヨリが産卵することから，水産資源を支える重要な役割を流れ藻は担っている．さらに，炭素を固定し，藻体をつくるホンダワラ科海藻の流れ藻は浮力がなくなると海底に沈降し，深海に入ると二酸化炭素貯留効果を生じる．底曳網により三陸沖で海底に堆積した海藻草類を採集した Kokubu et al. (2019)[1]によるとアカモクは海底に堆積する海藻草類で最大の生物量を占め，ブルーカーボンに寄与する．

大型海藻および海草は，生活史の中で固着生活期が長く，能動的に移動できない．固着生活を送る底生生物に及ぼす海洋温暖化の影響は，それらの分布域の変化として明瞭に現れる．長崎県では，温帯性のホンダワラ類が減少し，亜熱帯性のホンダワラ類が出現するようになった（桐山，2004[2]）．日本海に流入する対馬暖流の上流でみられたこのような温暖化の影響は，日本海の藻場にも生じると予測される．

高い経済成長と地域の独自性を仮定する IPCC (2000)[3]のA２シナリオの下で推定された2050年，2100年の表層水温データから，Komatsu et al. (2014)[4]はアカモク分布の変化を推定した．しかし，空間分解能は，経度1.1°，緯度0.55°と粗く，沿岸水温の再現性に問題があるため，より高い空間解像度での表層水温の将来予測

* 2020年３月25日受領
** 日本水産資源保護協会
† 東京大学大気海洋研究所
†† 宇宙航空研究開発機構
††† 九州大学応用力学研究所
連絡先：小松輝久，日本水産資源保護協会
〒104-0044 東京都中央区明石町1-1
E-mail : komatsu@aori.u-tokyo.ac.jp

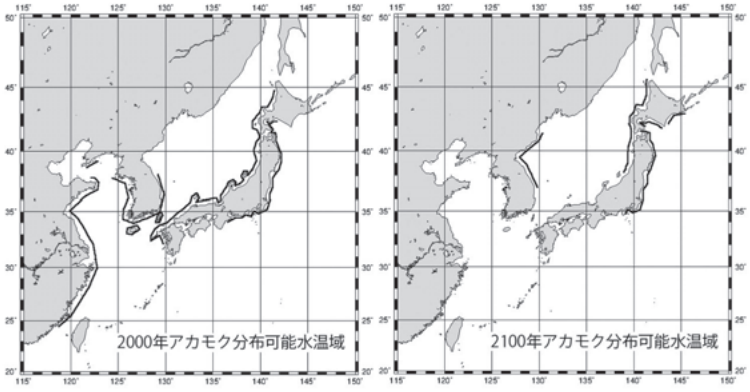

Fig. 1　Coasts with surface water temperatures where *Sargassum horneri* can grow in Northwestern Pacific（fat lines）in 2000（left map）and in 2100（right map）estimated with DREAMS_B developed by Hirose（2011）[12].

が望まれていた.

九州大学応用力学研究所では，北西太平洋における将来の水温分布を高空間分解能で推定するモデルDREAMSを開発している．そこで，DREAMSにより推定された2100年の表層水温を用い，ホンダワラ科海藻のつくる藻場ガラモ場の主要構成種で分布範囲が緯度方向で最も広く，生物量も多い温帯性のアカモクを対象として温暖化した将来の分布を推定することにした．アカモクは東シナ海における量的に卓越した流れ藻構成種である（e. g. Komatsu et al., 2008[5]；Mizuno et al., 2014[6]）．また，2100年におけるアカモク流れ藻利用するブリ稚魚とアカモク流れ藻との関係に及ぼす温暖化の影響も検討する.

2.　水温分布データ

九州大学応用力学研究所で開発された西部北太平洋を対象領域にした経度0. 25°，緯度0. 2°の予測モデルDREAMS_B（Hirose, 2011[7]）を用いて，RCP 8. 5高位参照シナリオ（2100年までの温室効果ガスの排出量を考えられる想定で最大量を排出しつづけるというシナリオ）の下で将来の北西太平洋の海洋環境を計算した．その結果をもとに，表層水温が最も高い８月と最も低い２月の表層水温を使用した．現在の状態として，2000年の８月と２月の表層水温分布と確認されたアカモクの分布を用い，アカモクが生育可能な沿岸域の表層水温の範囲を求めた．この水温範囲をもとに計算で得られた，2100年の２月と８月の表層水温とからアカモクが生育可能な沿岸を推定した.

3.　アカモクの生活史，分布と生育温度

アカモクは，一年性で冬から春にかけて１日に数センチの速度で大きくなり，成熟期を迎えるころには数メートルに達する．基質から流れや波により剝がされたアカモク個体は，海面を浮遊し，海岸に打ち上げられたものを除くと，ほとんど流れ藻となって海面を移動する（八谷ほか，2005[8]）．ブリやマアジの産卵場のある東シナ海では，アカモクからだけからなる流れ藻が２月から５月にかけて，28° N から30° N 付近の大陸棚縁辺部の海面付近に大量に分布している（Komatsu et al., 2007[9]）．日本海の佐渡海峡でも１月から６月まで大量のアカモク流れ藻が分布する（池原・佐野，1986[10]）.

アカモクの生育水温と生育場所について，日本海と太平洋岸に分けて検討する．アカモクの生育場所は，日本海側では，南は長崎まで，北は天売まで，太平洋側では，南は和歌山，北は国後までである（Fig. 1）（梅崎，1984[11]）．これらのデータと筆頭著者らが，日本，中国，台湾の研究者と共同で調べたアカモク分布も考慮し，国後については除外し，この分布域の2000年の水温を調べた．１年で最も低い水温と考えられる２月の水温は，東シナ海－日本海側の最高で15 ℃，最低で４℃であり，本州－北海道の太平洋側では，最高で14 ℃，最低で４℃，１年で最も高い水温と考えられる８月の水温は，東シナ海－日本海側では，最高で28 ℃，最低で22 ℃であり，太平洋側では，最高で28 ℃，最低で20 ℃であった．これをもとに潜在的なアカモク分布域を推定すると，ユーラシア大陸沿岸では，南は福建省のアモイ付近，北は朝鮮半島東海岸にある韓国の Uljin 付近の範囲となった（Fig. 1）．日本の東シナ海－日本海側では，南は九州の天草半島から北は北海道の天塩町付近，太平洋側では，南は三重県の熊野市付近，北は北海道の噴火湾付近となった.

4.　2100年の予測水温から推定されたアカモク分布可能域

2100年２月と８月の予測水温をもとに，アカモクが分

布可能である範囲を推定し，それらの積集合として潜在的なアカモク分布可能域を推定した（Fig. 1）．ユーラシア大陸沿岸では，南は朝鮮半島東岸の韓国の Pohan から北朝鮮の漁郎郡，日本の日本海側では，南は新潟付近から北は稚内付近まで，太平洋側では，南は伊豆半島東岸付近から北は襟裳岬周辺付近にアカモクが生育可能な水温域が分布すると推定された．これらのアカモク分布可能域を制限する主な原因は，夏季の高水温であった．

5. ブリ産卵場の移動と流れ藻

鹿児島県海域で採集された流れ藻に随伴していたブリ稚魚の耳石を解析したところ，最も若い個体の日齢は22日（宍道ほか，2019[12]）であり，東シナ海で産卵された稚魚が流れ藻とともに鹿児島県海域に輸送されると推定されている．また，この海域における流れ藻を同定したところすべてアカモクであった（水野私信）．孵化し20日程度の日齢のブリ稚魚が流れ藻と遭遇するには産卵された海域に近くなければならない．山本ほか（2007）[13]によると，東シナ海におけるブリの産卵好適水温は19℃～21℃である．そこで，2100年２月と３月の東シナ海における19℃～21℃の表層水温帯を調べると，２月では台湾北方，温州市沖合の東シナ海122°E～124°E，27°N～28°N の範囲，３月では九州長崎西方の東シナ海125°E～129°E，31°N～33. 8°N の範囲であり，20日齢のブリ稚魚がアカモク流れ藻と遭遇する可能性はない．日本海に近い九州西方で３月に産卵されたブリ稚魚が対馬暖流流軸上を１knot で流されると仮定すると（最も移動する場合），新潟沖まで約1, 200 km の距離を１日に約40 km で進むので30日かかる計算になる．モジャコが新潟沖でアカモク流れ藻に随伴できたとしても，対馬暖流により流れ藻が移動し，流れ藻から離脱し始める全長10 cm にブリ稚魚が達するのに２ヶ月程度必要とすると北海道周辺以北に達する．流れ藻の寿命は長くて２ヶ月～３ヶ月であるため北海道沿岸からの補給が不可欠であるが，北海道のオホーツク沿岸や樺太西岸にはそのようなアカモク藻場は分布せず（Fig. 1），ブリ稚魚の生き残りに大きな影響を生じると推定される．

6. ま と め

固着生活する大型海藻がつくる藻場は広域的には主に水温分布に生息場を制約されるため温暖化の影響をとらえやすい．また，第一次生産者として沿岸域で大きな役割を担っている藻場が消滅すると，藻場を生活場所とする魚類やアワビなど磯根資源も生息できなくなる．流れ藻供給源である藻場への温暖化の影響はマアジ，ブリにも及ぶ．このように，第一次生産者であり海産動物の生息場である藻場分布が生態系へ及ぼす影響のすそ野は広い．DREAMS_B という高い空間分解能で推定された水温予測にもとづき，本研究はアカモク分布についてより現実的な将来予測に近づけたと言えるだろう．

参 考 文 献

1）Kokubu, Y., E. Rothäusler, J. B. Filippi, E. D. Durieux and T. Komatsu（2019）: Revealing the deposition of macrophytes transported offshore : Evidence of their long-distance dispersal and seasonal aggregation to the deep sea. Scientific reports, **9**, 1-11.

2）桐山隆哉（2004）：長崎県における暖海性大型褐藻類の分布について－暖海性ホンダワラ類とアントクメの分布実態－，水産開発，**88**，1-5.

3）IPCC（2000）: Special report on emissions scenarios. Intergovernmental panel on climate change special reports on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, 570pp.

4）Komatsu, T., M. Fukuda, A. Mikami, S. Mizuno, A. Kantachumpoo, H. Tanoue and M. Kawamiya（2014）: Possible change in distribution of seaweed, *Sargassum horneri*, in northeast Asia under A2 scenario of global warming and consequent effect on some fish. Marine Pollution Bulletin, **85**, 317-324.

5）Komatsu, T., D. Matsunaga, A. Mikami, T. Sagawa, E. Boisnier, K. Tatsukawa, M. Aoki, T. Ajisaka, S. Uwai, K. Tanaka, K. Ishida, H. Tanoue and T. Sugimoto.（2008）: Abundance of drifting seaweeds in eastern East China Sea. Journal of Applied Phycology, **20**, 801-809.

6）Mizuno, S., T. Ajisaka, S. Lahbib, Y. Kokubu, M. N. Alabsi and T. Komatsu（2014）: Spatial distributions of floating seaweeds in the East China Sea from late winter to early spring. Journal of Applied Phycology, **26**, 1159-1167.

7）Hirose, N.（2011）: Inverse estimation of empirical parameters used in a regional ocean circulation model. Journal of Oceanography, **67**, 323-336.

8）八谷光介・西垣友和・井谷匡志・和田洋藏（2005）：若狭湾西部養老地先における流れ藻発生量の推定とその比重測定による浮遊期間の推定，月刊海洋，**37**，516-521.

9）Komatsu, T., K. Tatsukawa, J. B. Filippi, T. Sagawa, D. Matsunaga, A. Mikami, K. Ishida, T. Ajisaka, K. Tanaka, M. Aoki, W. D. Wang, H. F. Liu, S. Y. Zhang, M. D. Zhou and T. Sugimoto（2007）: Distribution of drifting seaweeds in eastern East China Sea. Journal of Marine Systems, **67**, 245-252.

10）池原宏二・佐野修（1986）：佐渡海峡における流れ藻の出現種と分布．日本海区水産研究所研究報告，**36**，59-75.

11）梅崎勇（1984）：日本沿岸域におけるホンダワラ属（バクトロフクス亜属）の分布について，東京大学海洋研究所大槌臨海研究センター報告，**10**，70-76.

12）宍道弘敏・水野紫津葉・小松輝久（2019）：鹿児島県海域で採集されたモジャコ（ブリ稚魚）の日齢と成長．水産海洋研究，**83**，87-92.

13）山本敏博・井野慎吾・久野正博・阪地英男・檜山義明・岸田達・石田行正（2007）：ブリ（*Seriola quinqueradiata*）の産卵，回遊生態及びその研究課題・手法について．水産総合研究センター研究報告，**21**，1-29.

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，65-67，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 65-67, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.009

Extended Abstract

日本海全海域の水産・漁獲変化
～粒子追跡実験で表現された2017年のマアジ太平洋系群新規加入量増加イベント～*

井桁　庸介**・佐々千由紀†・渡邊千夏子††・北島　　聡†・髙橋　素光†・
瀬藤　　聡††・渡慶次　力#

Interannual Variations in Abundance of Fisheries Resources in Japan Sea
− Increasing of Recruitment into Pacific Ocean of Japanese Jack Mackerel Larvae in 2017 Expressed by Numerical Experiment −

IGETA Yosuke, SASSA Chiyuki, WATANABE Chikako,
KITAJIMA Satoshi, TAKAHASHI Motomitsu, SETO Takashi and TOKESHI Tsutomu

2017年に日本太平洋岸西部海域で起きたとされるマアジ太平洋系群の新規加入量増加イベントを対象に，拡張版日本海海況予測システムJADE 2を用いた粒子追跡計算を行った．台湾北東沖から２・３月，五島列島周辺から４月に粒子を放出した結果，太平洋へ移動する総粒子数は2000年～2017年にかけて減少したが，宮崎沿岸に着底した粒子数は2017年に増加した．2017年の増加は両海域からの粒子の加入によって達成され，それは九州西方の沖縄トラフ北端部での時計回り循環が原因となっていた．太平洋への粒子の経年的な加入減少は，黒潮～対馬暖流の海流系の，温暖化に伴う流量変化等と関連すると推測された．

キーワード：マアジ，新規加入量変動，粒子追跡実験，拡張版日本海海況予測システムJADE 2

1.　はじめに

日本海における主な水産資源として，スルメイカ，ズワイガニ，マイワシ，マアジ等が挙げられる．これらの分布回遊・資源量の変化は，地球温暖化をはじめとする地球規模の気候変動に付随した，日本周辺の海洋環境の変化に強く影響されることが想像されている．しかし，その過程については多くの部分が不明である．水産資源の持続可能な利用を目指す上では，この種の問題を解決することが必要である．

そこで，本発表では，マアジの新規加入量変動の解明に対して，水産庁補助事業の資源量推定等高精度化事業により，水産研究・教育機構で取り組んでいる試みの一部を紹介し，その変動機構が温暖化等の気候変動と関連する可能性について議論する．

* 2020年３月31日受領
** 水産研究・教育機構日本海区水産研究所
† 水産研究・教育機構西海区水産研究所
†† 水産研究・教育機構中央水産研究所
# 宮崎県水産試験場
現所属：宮崎県庁
連絡先：井桁庸介，水産研究・教育機構日本海区水産研究所
〒951-8121 新潟県新潟市中央区水道町１丁目5939-22
E-mail : igeta@affrc.go.jp

2.　マアジの新規加入量変動仮説と研究目的

マアジは，２月～３月にかけて台湾北東沖（T）から太平洋と東シナ海へ，４月～５月に五島列島周辺（G）から日本海へ新規加入すると推測されている（例えばSassa et al., 2006[1]）．産卵域から東シナ海・日本海へ加入するマアジ対馬暖流系群のうち，日本海への規加入量は，2000年以降増加傾向にある．一方，太平洋へ移動する太平洋系群のそれは減少傾向にあるとされているが，2017年に宮崎～高知沿岸に限り新規加入指標値の増加が認められるというイベントが起きた（資源評価報告書）．2017年のイベントが東シナ海の流動変動に引き起こされたとすると，その解明を突破口に，マアジ仔魚の輸送過程の一端を明らかに出来る可能性が高い．その結果は，マアジ資源量推定，予報に関して大きく貢献できる．

本研究では，マアジ新規加入量の経年変動に対する流動変動の影響を理解するため，日本海海況予測システム

JADE 2（http://jade2.dc.affrc.go.jp/jade2/）を用いた粒子追跡計算を行い，2017年の上記イベントを軸にマアジ産卵域，新規加入仮説を検証する．

3.　データ・実験方法

JADE 2 の計算確定値のうち，2000年～2017年の22 m 深の流動データを用いた．設定水深はマアジ仔稚魚が，調査で採取される水深帯を根拠にしている．実験は，東シナ海全体の物質輸送を調べる実験１と，マアジ仔稚魚輸送に特化した実験２の２種類行った．

実験１では，東シナ海全域に粒子を 1/12° 間隔に配置して２月～４月の間に月２回放出し，実験２では，仮想産卵域 T・G（Fig. 1 ab）に 1/96° 間隔で配置した粒子を２，３，４月中旬に１日１回10日間放出した．各実験は75日間実施し，終了時の粒子分布を調べた．これは本種がふ化後60日後～90日後に近底層に移行し（着底と呼ぶ），その後はその海域で生活するという仮説に基づく．

4.　結　　果

実験１・２ともに，初期配置海域から，粒子が黒潮や対馬暖流によって輸送され，太平洋と日本海に移動・東シナ海に残留する様子が毎年表現された．特に，実験１では，東シナ海大陸斜面縁辺に配置された粒子が黒潮に乗って太平洋へ輸送され易いこと，対馬海峡南方の対馬暖流源流域に配置された粒子が日本海へ輸送され易いことが示された．粒子初期配置海域 T は太平洋と東シナ海に分配され易い海域，G は概ね日本海だがしばしば太平洋へ粒子の分配が見られる海域であることが，実験１から示された（Fig. 1 a）．

実験２の結果，T から太平洋へ移動する粒子数は実験期間を通して減少傾向にあったが，宮崎沿岸に着底した粒子数は2017年に増加した（Fig. 2 上）．G から太平洋へ移動する粒子は間欠的に現れ，2017年には多くの粒子が宮崎沿岸に着底した（Fig. 2 下）．これらの結果は，前述の2017年のイベントをうまく表現しているとともに，T と G の双方から太平洋西部海域・宮崎沿岸へマアジが加入した事を示唆する．

以上から，この2017年のイベントは，(1)太平洋への移動粒子が10年スケールで減少している中，(2) T 起源の粒子が黒潮によって宮崎沿岸に近い経路を輸送され，且つタイミング良く当該海域に着底したこと，(3)例年日本海へ輸送される G 起源の粒子が九州西方の南下流によって太平洋へ輸送された事によって引き起こされたことがモデルから示唆された．

5.　考　　察

実験１の結果から，海域が持つ輸送パターン変化の特徴に注目すると，2017年の太平洋への粒子移動の増加に

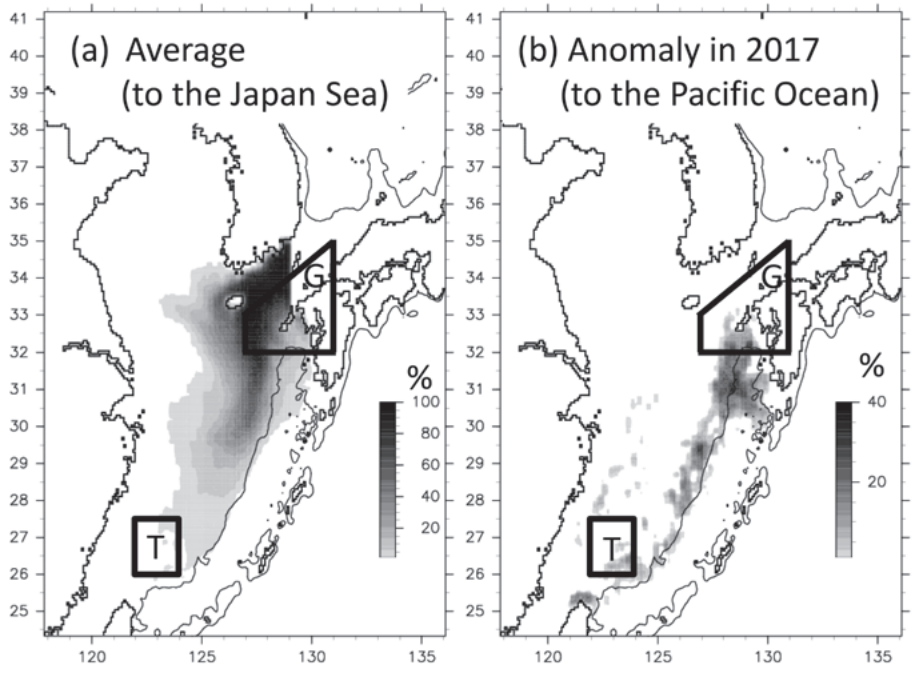

Fig. 1　(a) Densities of particles recruiting toward the Japan Sea. (b) Anomaly in 2017 from averaged value of densities of particles moving into the Pacific Ocean. (a) and (b) are estimated by experiment 2. T and G indicate virtual spawning regions around the northeastern off the Taiwan and Gotoh Island, respectively.

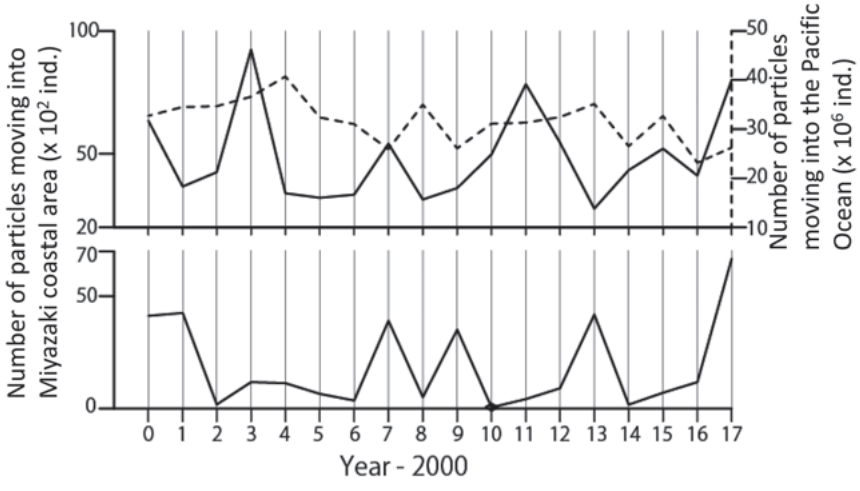

Fig. 2　Interannual variations of number of particles recruiting around Miyazaki coastal area. Upper and lower panel indicate results originated from T（particles released in February and March）and G（particles released in April）, respectively.　Dashed line shows total number of particles moving toward Pacific Ocean.

おいては，（A）九州西方に分布した粒子の移動による寄与が大きかったことが示された（Fig. 1 b）．それに加え，（B）黒潮の西側境界が分布する東シナ海の大陸棚縁辺部一帯から太平洋への移動も，貢献していた．この結果と流動場の解析から，上記(1)～(3)を考察する．

上記(3)の粒子の南下については，九州西方沖の沖縄トラフ北端部周辺に間欠的に発生する，時計回り渦が原因と考えられた．その特徴は実験１には上記（A）の特徴として現れている．この海域の流動は，時計回りと反時計回りの渦構造の形態を持ったり，単純な北上流の特徴を持ったりと変動が大きく，その流動構造変化に季節変動等の系統立った特徴を抽出することはできなかった．一方で，この流動が渦状の構造を持つ時期には，東シナ海陸棚縁辺部の黒潮に前線波動のような小蛇行が分布し，それが当該海域へ南から伝播する様子が見られた．従って，黒潮前線波動のような擾乱が存在する場合，上記のような時計回り渦が九州西方に発生し，マアジ仔稚魚を五島周辺から南方へ輸送するという過程が推測された．

(2)に関しては，T から黒潮縁辺に沿って九州西方へ移動した粒子のうち，３月～４月に当該海域に分布した粒子の殆どが，前述の九州西方の時計回り渦によって宮崎沖へ輸送されたことが原因と考えられた．その特徴は実験１には上記（B）の特徴として現れている．この経路で輸送された粒子は，必然的に鹿児島沿岸を移動し，黒潮の北部縁辺を宮崎沿岸へ移動することになる．従って，本州太平洋側の西部海域へのマアジの加入に関しては，黒潮流軸に九州西方の南下流の有無が大きな影響を与える可能性が高い．

一方，上記(1)については，２月～４月における，日本海への海水の流入量，つまり対馬海峡通過流量の経年的な増加が JADE 2 内で認められ，その変動と粒子の日本海への流入量増加と対応していた．従って，東シナ海に分布する海水が日本海へ流れやすくなった分，マアジ仔稚魚が仮想産卵域 T から北上しやすくなり，その結果，太平洋へ移動する粒子が減ったと考えられた．

この対馬海峡通過流量の増加は，九州西方の水温の経年的な上昇を伴っていた．従って，この水温上昇を原因とする九州西方～対馬海峡西端周辺の海面上昇が，対馬海峡を挟んだ潮位差の増幅に寄与した可能性がある．この推測は，一連の過程が地球温暖化若しくは十数年スケールの気候変動の結果であることを想起させる．

一方で，JADE 2 で見られた台湾海峡通過流についても対馬海峡通過流と類似した時間変動を持っていた．加えて，東シナ海陸棚縁辺部一帯の粒子が，2017年には太平洋へ移動していた結果も得られている（Fig. 1 b）．以上は，上記の対馬海峡通過流量の増加だけで無く，他の要因，たとえば，黒潮前線波動の発生の有無等も上記(1)のプロセスを理解する上で考慮する必要があることを示している．

参　考　文　献

1）Sassa C., Y. Konishi and K. Mori（2006）: Distribution of jack mackerel（*Trachurus japonicus*）larvae and juveniles in the East China Sea, with special reference to the larval transport by the Kuroshio Current.　Fisheries Oceanography, **15**, 508-518.

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，69-70，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 69-70, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.010

Extended Abstract

温故知新：過去7000年にみられる対馬暖流の流量変動と駆動因子*

堀川　恵司**・小平　智弘†・池原　　研††・村山　雅史#・張　　勁**

Fluctuations in Water Volume Transported by the Tsushima Warm Current in the Japan Sea and Their Driving Forces during the Past 7,000 Years

HORIKAWA Keiji, KODAIRA Tomohiro, IKEHARA Ken,
MURAYAMA Masafumi and ZHANG Jing

日本海南部で優先する浮遊性有孔虫 *Neogloboquadrina incompta* の Mg/Ca 水温換算式を日本海13地点の表層堆積物から作成した．また，佐渡沖で採取されたピストンコア試料から，*N. incompta* を拾い，*N. incompta* の Mg/Ca 水温換算式を使い過去7,000年間の佐渡沖表層水温をおよそ100年程度の時間解像度で復元した．*N. incompta* に記録されている水温は５月の表層水温と推定され，過去7,000年間にわたって春期水温が数千年規模の周期性で変動していたことを明らかにした．春期の水温変動は対馬暖流の流量変動を反映していると解釈され，数千年周期の対馬暖流の流量変動が，太陽放射強度の変動に駆動される北極振動（AO）様の空間パターンと負の太平洋10年規模振動（PDO）によって生じている可能性が示唆された．

キーワード：日本海，対馬暖流，Mg/Ca 水温計，完新世

1. はじめに

対馬暖流が日本海に流入しはじめた8000年前以降，珪藻の黒潮系種と寒冷系種の割合が1500年程度の周期で繰り返し変化していることが，日本海堆積物中の珪藻群集の解析から報告されている（小泉，1987[1]）．このような黒潮系珪藻種の量の増減は，日本海に流入していた対馬暖流の流量変動を反映していると考えられてきた．しかし，その駆動因子については，珪藻群集データの時間解像度が低いため，十分に議論できていない．また，地球化学的水温プロキシーであるアルケノン水温からは，黒潮系珪藻種の変動に類似する水温変動が見られていないという問題点もある（Bae et al. 2014[2]）．

そこで，本研究では，高精度の水温推定が可能な浮遊性有孔虫殻の Mg/Ca 水温計に着目し，(1)日本海堆積物において，はじめて過去7000年間の浮遊性有孔虫殻 Mg/Ca 水温を復元することと，(2)その高時間解像度の水温データをもとに，日本海に流入する対馬暖流の流量変動の有無を解析し，対馬暖流の流量変動の駆動因子について議論することを目的とした．

2. 試料および分析

本研究では，日本海の完新世の表層水温を浮遊性有孔虫殻の Mg/Ca 比から推定するために，8,000年前以降日本海で多産するようになった *Neogloboquadrina incompta* を対象とした．まず，日本海の *N. incompta* の Mg/Ca 水温換算式を作成するために，日本海の13地点の表層堆積物を対象とした．さらに，過去7000年間の *N. incompta* の Mg/Ca 水温を復元するために，佐渡沖で採取された YK10-7-PC09コアの分析を行った．酸素同位体比分析（Finnigan MAT253）および Mg/Ca 比などの微量元素分析（Thermo Element2）には，およそ30個体－50個体の *N. incompta* を用いた（Horikawa et al. 2019[3]）．

3. 結果および考察

日本海の13地点の表層堆積物の分析から，以下の *N. incompta* の Mg/Ca 水温換算式を構築した．$Mg/Ca = 0.311 \times exp(0.07 \times T)$（$r = 0.8$）

N. incompta の酸素同位体比の解析から，日本海にお

* 2020年４月13日受領
** 富山大学学術研究部理学系
† 富山大学大学院理工学教育部（理学）
†† 国立研究開発法人産業技術総合研究所
# 高知大学教育研究部総合科学系
連絡先：堀川恵司，富山大学学術研究部理学系
〒930-8555 富山県富山市五福3190
E-mail : horikawa@sci.u-toyama.ac.jp

ける *N. incompta* の殻形成（石灰化）深度は20 m－50 mで，生育時期は春季であることが分かった．また，得られたMg/Ca水温換算式を用いて復元したYK10-7-PC09コアの水温変動には，2℃－3℃の数千年スケールの水温変動が見られた．特に，6200－6000，4900－4500，4200－3800，2600－2100，900－400 cal. year BPの５つの期間は，比較的高水温時期にあたり，黒潮系珪藻種の増加期と概ね一致した．さらに，対馬暖流北端の北海道沖で温暖系二枚貝が産出する時期とも概ね一致していることから，高水温期が対馬暖流の流入量の増加時期にあたると考えられた．対馬暖流の流量が増加すると，夏の水温よりも，春や冬，年平均水温（の増加）に表れるため，春季の表層水温を記録する *N. incompta* のMg/Ca水温は，対馬暖流の流量変動を読み取るのに理想的であると言える．モデル研究によれば，強い太陽放射は，正の北極振動（AO）様の空間パターンと負の太平洋10年規模振動（PDO）を誘発する傾向にあることから，数百年－千年規模の対馬暖流の流量変動の原因として，AOとPDOを介した，太陽放射強度の変動（強い放射時に対馬暖流の流量が増加する）が関与しているのではないかと考えた．一方，大規模な火山噴火は後期完新世よりも中期完新世に発生しており，明瞭な水温低下が起こっている5900 cal year BPや6400 cal year BPについては，volcanic forcingが対馬暖流流入量の減少に影響を与えていた可能性がある．本発表内容は，Horikawa et al.（2019）[3]にまとめられているため，詳細は原著論文を参照されたい．

参　考　文　献

1）小泉格（1987）：完新世における対馬暖流の脈動．第四紀研究，**26**，13–25.

2）Bae, S. W., K. E. Lee, Y. Park, K. Kimoto, K. Ikehara and N. Harada（2014）: Sea surface temperature and salinity changes near the Soya Strait during the last 19 ka. Quaternary International, **344**, 200-210.

3）Horikawa, K., T. Kodaira, K. Ikehara, M. Murayama and J. Zhang（2019）: Millennial-scale fluctuations in water volume transported by the Tsushima Warm Current in the Japan Sea during the Holocene. Global and Planetary Change, **183**, 103028. doi : 10.1016/j.gloplacha.2019.103028.

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，71-73，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 71-73, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.011

Extended Abstract

物質輸送の観点から：陸から海へ*

張　　勁**

Material Transport : from Land into the Ocean

ZHANG Jing

地球温暖化が直接かかわる地球規模での変動把握に関する化学海洋学国際的な枠組みを紹介し，日本沿岸の海洋循環構造，特に日本海に寄与する対馬暖流による物質とエネルギー輸送について概説した．こうした海洋循環規模での変動を背景として，陸から海への物質輸送に関して顕著な特徴を持つ富山県と富山湾にズームインし，気候変動が陸から海への物質輸送にどのような影響を与えているかを論じる．最後に，このような状況を踏まえ，これからの海洋変動を正しく理解するために，今後進めていくべき国際的な枠組みについて紹介する．

キーワード：物質輸送，化学トレーサー，富山，陸水，海底湧水

1. 「海の３D診断」：GEOTRACES計画

海洋を流れるインクのように，化学元素を駆使して海洋循環像を捉えることが象徴的なGEOSECS計画（“Geochemical Ocean Sections Study” 地球化学的大洋縦断研究，1972－1979）は，化学海洋学の幕開けとも言える．放射性炭素^{14}Cによって発見された千年規模の海洋大循環ベルトコンベア（熱塩循環）は地球の気候そのものを支配し，ウォーレス・ブロッカー博士は“地球のエアコン”と喩えられた．この画期的な海洋物質循環研究から約30年が経ち，その第２フェーズとしてGEOTRACES（微量元素・同位体による海洋生物地球化学研究）計画が始まった．両計画の間の観測・分析・データ解析・シミュレーション技術の進展は著しく，周期律表をツールのように駆使し，複数の化学元素やその同位体を“指紋”として海水を追跡し，さらに海洋環境遍歴を辿ることが目的である．2005年にSCORに承認され，全球レベルでの観測・分析方法の校正を経て世界５大洋の探査が2010年より正式に発足し，現在40か国近くが参画して「海の３D診断」を行っている．

GEOTRACES計画は，外洋スケールでの横断・縦断セクション観測とその厳格なデータポリシー（試料やデータの共有，データ公表時期等）が象徴的である．既に，６大陸17か国により41以上の断面観測が完遂され，これらは太平洋・大西洋・インド洋・極域を網羅しており，海水・粒状物質・堆積物・生物・エアロゾル・雨などのデータが公表されている（Mawji et al., 2015[1)]；Schlitze et al., 2018[2)]；GEOTRACES Intermediate Data Product（IDP）2014 and 2017年版；https : //www.bodc.ac.uk/geotraces/data/idp2017/）．その代表的な微量元素・汚染物質・放射性核種・安定同位体など，500以上のパラメータと用途を下記に挙げる．

- Hydrography データ：ポテンシャル水温，CTD塩分，塩分，CFCs（11，12，13），SF6，He，Ne
- 生物地球化学データ：溶存酸素（Winkler or CTD），リン，シリカ，硝酸（NO_3，またはNO_2+NO_3），亜硝酸，アルカリニティ，溶存無機炭素，溶存有機炭素，pH，全窒素
- 栄養塩と水の同位体
- その他，GEOTRACESプログラムの象徴的な微量元素，汚染物質，放射性核種，安定同位体等パラメータ等
- 海洋の生産性と生態系を制御する微量栄養塩：例えば，Fe，Zn，Cd，Cu，Ni，Co，Mn
- 海洋のプロセスをトレースできる微量元素と同位体，例えば，Al，REEs；Ra，Th，^{3}He，^{15}N，Nd同位体
- 海洋における汚染物質：例えば，Pb，Hg
- 古海洋・古気候復元のプロキシ：例えば，Cd，^{231}Pa，^{230}Th，^{15}N，^{30}Si，Ba，εNd同位体

* 2020年６月３日受領
** 富山大学学術研究部理学系
連絡先：張　　勁，富山大学学術研究部理学系
〒930-8555 富山県富山市五福3190
E-mail : jzhang@sci.u-toyama.ac.jp

2. “海の大河”対馬暖流：上流東シナ海から下流日本海へ

対馬暖流は，上流域にあたる東シナ海から下流の日本海へ流れ，風下の日本列島に温暖な気候とモイスチャーをもたらす．古海洋研究の成果によると，対馬暖流が親潮に変わって日本海を流れ始めたのはおおよそ6000年前で，周辺域の平均気温を4℃も上昇させた（Horikawa et al., 2019[3]）．また，浅層の日本海の海水は数十年スケールで入れ替わり（Hatta and Zhang, 2006[4]），近年の気候変動に特に鋭敏に反応することから（Gamo et al, 2014[5]），縁辺海洋の物質循環解明には化学海洋学ツールの活用が期待されている．

上流域の東シナ海は豊かな漁場が形成されており，周辺国にとって重要な漁場であると同時に，日本海や本州南岸へ回遊する水産生物の繁殖場としても重要である．しかし近年，過剰漁獲による資源減少に加えて，温暖化の影響も懸念されている．この東シナ海では，長江などから流入する陸水や陸起源物質の影響が大きく，陸棚上では黒潮や陸棚底層水など様々な水塊が混合している．近年では，海洋資源として名高いレアアース希土類元素やその同位体比（例えば，Nd同位体）組成を駆使し，陸棚域における様々な水塊を化学トレーサーによって特徴づけることができる（Zhang et al., 2019[6]）．さらにZhang et al.（2018）[7]は陸棚底層水の最大で5割の栄養塩が黒潮中層水により供給されることを報告し，またCheand Zhang（2018）[8]は陸棚混合水が日本海に流入する海水の4割も占めることをNd同位体比の研究により明らかにした．

3. 陸から海へ：北半球地球環境縮図の富山モデル

富山県は標高3,000 m級の山々と日本海につながる水深1,000 mを超す富山湾との間に急峻な地形を有し，直線距離でわずか50 kmの間に約4,000 mもの高低差をもつ世界的にも非常にユニークな地域で，日本の縮図に喩えることができる．一般的に中緯度では，山の標高が100 m高くなると，緯度が北側に1度増した気候とほぼ同じになると言われている．北緯37度にある富山県では，北アルプスの高山地帯はほとんど北極圏周辺や寒帯と似たような気候・植生になっている一方で，富山湾の表層水には熱帯由来の対馬暖流水が流れ込んでおり，南方の魚介類も運んでくる．さらに富山県では狭い範囲に海洋・沿岸・都市・里山・森林・高山などがコンパクトに存在し，気候などの環境変化と人間社会との関わりの有り様がリアルに映し出される地域でもある．

富山県は量的・質的に優れた特性の水資源を有しているが，近年加速する気候変化や異常気象などによると思われる影響も顕著に現れ始めている．これら陸域の環境変化は，日本列島全域に熱と水蒸気をもたらす日本海の表層海水温上昇に起因するものと考えられる．気象庁によると，北陸地域において年降雪量（平年比；統計期間：1962年～2014年）は半世紀で約6割減少しており，立山・黒部ダム上流部ではこの40年間に2.5℃以上も気温が上昇し，春季の融雪や流出に影響している（Wada et al., 2004[9]）．これらの陸域の変化は沿岸海洋に輸送される河川水や地下水起源の栄養塩の質的・量的変化を引き起こし，さらに沿岸海洋の生態系を変化させる懸念がある．

海洋における物質循環や地球化学的収支において，河川からの流入，大気経由の降下，中央海嶺や海底火山の噴火に伴う熱水の湧出などと並んで，沿岸域の海底面からの湧水による物質供給は重要である．これら海底湧水は，①陸上の地下水系と連動する淡水性湧水系，②淡水と海水の混合性海底湧水，③潮汐に応答する海水－堆積物間の再循環水の3つに分類されている（張，2012[10]）．特に栄養塩の物質供給の観点からは，その存在が生物生産を含む沿岸海洋の物質循環を考える上で無視できない．

富山湾をモデルにした沿岸海底湧水の研究から，湾内へ流出する海底湧水は標高800 m～1,200 mの森林地域が起源であり，湧出量は世界屈指で河川流出量の最大25％にも及び，輸送される溶存態リンと窒素は河川水のそれらに匹敵し，沿岸海域の基礎生産に大きく貢献していることが実証された（Zhang and Satake, 2003[11]，Hatta and Zhang, 2013[12]）．また，山間部での積雪の融解時期の早期化や，1976年～2015年の数十年間の陸水モニタリングデータと地下水・土地利用等の変化から海底湧水量を試算し，2050年には浅層地下水が最大3割増加することが分かった（Zhang et al., 2017[13]）．更に，海底湧水は炭素供給経路として重要で，今後，進行する温暖化や活発になる人類活動の影響を明らかにするために，海底湧水の観点を加えた地球規模の炭素循環評価の緊急性を呼びかけている（Zhang and Mandel, 2012[14]）．

モンスーンアジアの東端に位置する日本は，近年の急激な気候変化の影響を顕著に受けている．特に年々顕在化する異常気象や降雪量減少などの気候変動は，水循環に大きな変動を及ぼし，集中豪雨に伴う氾濫や地下水の塩水化，沿岸海洋の赤潮の頻発などが想定される．日本列島の各地に，地形的多様性（山・森・里・都市・海）を有するモデル研究域を設定し，陸域－沿岸海域の物質循環像の把握，気候変動が水・物質輸送に与える影響の検証を経て，最新の科学的見識に基づき，リアルタイムで全国各地の地下水保全などに関する行政的な提案も行

えるように広角な研究教育の推進が喫緊の課題である．

4. 終わりにかえて

21世紀の地球環境の健全化を進めるには，気候変化をより正しく予測し，大気海洋－陸域流域圏－人間圏の研究領域を網羅する海洋環境研究が肝要である．2017年に政府間海洋学委員会傘下の「西太平洋に関する政府間地域小委員会 IOC/WESTPAC（以下 WESTPAC）」において，９か国（現在12か国加盟）が参画する「北西太平洋の縁辺海域における国際共同研究」の枠組みを構築するワーキンググループ（WG06）が発足した．「西部太平洋縁辺海における共同研究の枠組み：大陸と外洋間のエネルギーと物質交換」（A framework for cooperative studies in the Western Pacific Marginal Seas : Energy and materials exchange between land and open ocean）と題し，国際的な協力コミュニティを活性化して，学際的共同研究航海の計画・実施を目的としている．現在，北西太平洋に隣接する南シナ海・東シナ海・日本海・オホーツク海の４つの縁辺海域における共同観測調査を進める計画が検討され，本格的に国際的共同作業を始動している．また，2019年４月にマニラで開催された WESTPAC の第12回政府間会合にて，人口が多く海洋への影響も大きい WESTPAC 地域において，今後，UN10を視野に入れてより長期的に，本計画の枠組みに基づいた国際的な共同研究による SDGs への貢献を議論し始めたところである．今後の活動にご理解とご支援を賜りたい．

参 考 文 献

1）Mawji, E. et al.（2015）: The GEOTRACES Intermediate Data Product 2014. Marine Chemistry, **177**, 1-8. doi.org/10.1016/j.marchem.2015.04.005.

2）Schlitze, R. et al.（2018）: The GEOTRACES Intermediate Data Product 2017. Chemical Geology, **493**, 201-223. doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.040.

3）Horikawa, K., T. Kodaira, K. Ikehara, M. Murayama and J. Zhang（2019）: Millennial-scale fluctuations in water volume transported by the Tsushima Warm Current in the Japan Sea during the Holocene. Global and Planetary Change, **183**, 103028. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103028.

4）Hatta, M. and J. Zhang（2006）: Possible source of advected water mass and residence times in the multi-structured Sea of Japan using rare earth elements. Geophysical Research Letters, **33**, L 16606. doi.org/10.1029/2006GL026537.

5）Gamo, T., N. Nakayama, N. Takahata, Y. Sano, J. Zhang, E. Yamazaki, S. Taniyasu, N. Yamashita（2014）: The Sea of Japan and Its Unique Chemistry Revealed by Time-Series Observations over the Last 30 Years. Monographs on Environment, Earth and Planets, **2**, 1−22. doi : 10.5047/meep.2014.00201.0001.

6）Zhang, J., Q. Liu, Q. He and N. Nozaki（2019）: Encyclopedia of Ocean Sciences Rare Earth Elements and Their Isotopes in the Ocean. Elsevier, **Third Edition**, 181-197.

7）Zhang, J., Q. Liu, L. L. Bai and T. Matsuno（2018）: Water mass analysis and contribution estimation using heavy rare earth elements : Significance of Kuroshio intermediate water to Central East China Sea shelf water. Marine Chemistry, **204**, 172-180. doi.org/10.1016/j.marchem.2018.07.011.

8）Che, H. and J. Zhang（2018）: Water Mass Analysis and End-Member Mixing Contribution Using Coupled Radiogenic Nd Isotopes and Nd Concentrations : Interaction Between Marginal Seas and the Northwestern Pacific. Geophysical Research Letters, **45**, 2388-2395. doi.org/10.1002/2017GL076978.

9）Wada, N., K. Kawada, R. Kawamura, K. Aoki, A. Kume（2004）: Increasing Winter Runoff in a Middle-Latitude Mountain Area of Central Japan. Journal of the Meteorological Society of Japan, **82**, 1589-1597. doi.org/10.2151/jmsj.82.1589.

10）張 勁（2012）：海底湧水．地球と宇宙の化学事典，朝倉書店，173pp.

11）Zhang, J. and H. Satake（2003）: The chemical characteristics of submarine groundwater seepage in Toyama Bay, Central Japan, Land and marine hydrogeology, Elsevier, 45-60.

12）Hatta, M. and J. Zhang（2013）: Temporal changes and impacts of submarine fresh groundwater discharge to the coastal environment : A decadal case study in Toyama Bay, Japan, Journal of Geophysical Research : Oceans, **118**, 2610-2622. doi : 10.1002/jgrc.20184.

13）Zhang, B., J. Zhang and N. Yoshida（2017）: Temporal variations of groundwater table and implications for submarine groundwater discharge : A three-decade case study in Central Japan. Hydrology and Earth System Sciences, **21**, 3417-3425. doi.org/10.5194/hess-21-3417-2017.

14）Zhang, J. and A. K. Mandal（2012）: Linkages between submarine groundwater systems and the environment. Current Opinion in Environmental Sustainability, **4**, 219-226. doi.org/10.1016/j.cosust.2012.03.006.

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，75-76，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 75-76, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.012

Extended Abstract

現場観測と人工衛星リモートセンシングによる富山湾のアマモ場の時空間変動の把握*

寺内　元基**・原田　恭行**・松村　　航**,†・前田　経雄**,††

Detection of Seagrass Beds in Toyama Bay Using Field Survey and Satellite Remote Sensing

TERAUCHI Genki, HARADA Yasuyuki, MATSUMURA Wataru and MAEDA Tsuneo

富山湾におけるアマモ場の時空間変動を明らかにするため，水中ビデオカメラによる底質の現場観測データと人工衛星画像を用いて，氷見沿岸のアマモ場の抽出を試みた．2016年の水中ビデオカメラによる現場観測（6月下旬～7月上旬，11月下旬～12月上旬の2回実施）で得られた底質情報を主に用いて（岩礁性藻場のみ2017年のデータを一部使用），2016年3月17日に観測されたRapidEye衛星画像を最尤法による教師付き分類で解析したところ，富山湾の氷見沿岸においてアマモ場と分類されたエリアの総計は592 haとなり，現場観測で得られた底質情報と概ね対応した（全体精度64％，タウ係数0.54，アマモ場の精度74％）．

その後，2017年の初夏から2018年の春先にかけて実施したスキューバ潜水によるアマモの生育状況及び種子の分布状況調査から，氷見沿岸の深い海域（水深6 m以深）のアマモ場は1年性で，その分布が水温や濁り等の環境の変化とともに，ダイナミックに変化していることが示唆された．

キーワード：衛星リモートセンシング，アマモ場，マッピング

富山湾では，アマモ，コアマモ，スゲアマモ，ウミヒルモの4種の海草による砂泥性藻場（以下，アマモ場）が確認されており，富山湾の西側の沿岸域にその90％以上が分布しているとされている．これまで，2001年と2011年に富山県農林水産総合技術センター水産研究所が主体となり，空撮による富山湾沿岸の藻場の把握が試みられ，アマモ場の分布面積は，2001年が420 ha，2011年が323 haと推定されている（富山県，2002[1]，2013[2]）．この調査結果によると，10年間で約100 ha減少したことになるが，この原因が分布域の変動によるものか，あるいは写真判別精度によるものかが明確とはなっていない．

そこで，富山湾におけるアマモ場の時空間変動をより詳細に明らかにするため，2015年11月5日に実施した水中ビデオカメラによる底質の現場観測データを用いて，2014年11月22日に観測されたGeoEye-1衛星画像を最尤法による教師付き分類で解析し，氷見沿岸のアマモ場の抽出を試みた．その結果，衛星画像でアマモ場と分類された場所のうち，水中ビデオカメラによる底質の観測結果と一致したのは20％のみであった．この要因について次のように考察した．

衛星画像による解析からは，氷見漁港周辺の3 m～11 mの水深帯の広範囲においてアマモの分布を捉えたが，2015年11月に実施した現場調査によると，被度の高いアマモ場は，氷見漁港の北側では水深約3 m～5 mの範囲に限られ，氷見漁港の南側では水深5 m～6 m付近に限られていた．しかし，同年6月の調査では，調査対象海域の水深10 m付近でも密なアマモの分布が確認されていた．温帯域に分布するアマモ類は，4月から6月に主茎の先端に花穂をつけ，種子は7月～8月頃にできる．落下した種子は砂泥底に埋没し冬に発芽し，冬から春にかけて株分かれを繰り返し，夏にかけて繁茂・成熟し，枯死して海底に沈積するか流出し，秋になると草丈が短くなる（Nakaoka and Aioi, 2001[3]）．このことから，2015年6月から11月の間に，水深が6 mよりも深い場所のアマモが何らかの原因で枯死した可能性が高く，その結果として2015年11月の現場観測結果とその約1年前

* 2020年3月25日受領
** 公益財団法人環日本海環境協力センター
† 現所属：富山県農林水産総合技術センター　水産研究所
†† 現所属：富山県農林水産部　水産漁港課
連絡先：寺内元基，公益財団法人環日本海環境協力センター
調査研究部
〒930-0856 富山県富山市牛島新町5-5
E-mail : terauchi@npec.or.jp

に観測された2014年11月22日のGeoEye-1画像の分類結果の対応が悪くなったことが推察された（寺内・前田，2016[4]）．

そこで，さらに2016年の水中ビデオカメラによる現場観測（6月下旬～7月上旬，11月下旬～12月上旬の2回実施）で得られた底質情報を主に用いて（岩礁性藻場のみ2017年のデータを一部使用），2016年3月17日に観測されたRapidEye衛星画像を最尤法による教師付き分類で解析し，アマモ場の分布抽出を試みた．なお衛星画像は，水深による放射輝度の減衰の影響を除去するため，BRI（Bottom Reflectance Index）法（Sagawa et al., 2010[5]）による水柱補正処理をした．一方，2017年の初夏から2018年の春先にかけて，アマモの季節的消長を把握するため，アマモの繁茂期（7月），衰退期（11月），再生・発芽期（1月），再生・発芽・生長期（3月）の水中ビデオカメラによる現場観測に加え，7月，11月，12月，3月にスキューバ潜水によるアマモの生育状況及び種子の分布状況調査を実施した．

その結果，富山湾の氷見沿岸においてアマモ場と分類されたエリアの総計は592 haとなり，現場観測で得られた底質情報と概ね対応した（全体精度64％，タウ係数0.54，アマモ場の精度74％）．この結果は，航空写真により判別した富山県の調査（富山県2002，2013）と比較し，多く見積もられたが，BRI法による水柱補正の効果で，水深の深い海域のアマモ場が的確に抽出されたことが考えられた．

一方スキューバ潜水によるアマモ場調査から，氷見漁港北側から阿尾地区にかけての深い海域（水深6 m以深）では，夏季にアマモのほとんどの個体が花枝株となり種を形成しており，秋には大半は枯死し，翌年の春先にかけて地下茎の全く発達していない実生株のアマモの生育を確認した．したがって，氷見沿岸の深い海域（水深6 m以深）のアマモ場は1年性で，その分布が水温や濁り等の環境の変化とともに，ダイナミックに変化していることが示唆された．これらの調査結果から，氷見沿岸におけるアマモ場の推定に用いる衛星画像は，教師データとして使用する現場観測と近いタイミングで観測されたものを用いる必要があると考えられた．

参　考　文　献

1）富山県水産試験場（2002）：富山湾の漁場環境（2001）－水質・底質・藻場－．富山湾漁場環境総合調査報告書，pp. 174.

2）富山県水産試験場（2013）：富山湾の漁場環境（2011）－水質・底質・藻場－．平成23年度富山湾漁場環境総合調査報告書，pp. 178.

3）Nakaoka, M. and K. Aioi（2001）: Ecology of seagrasses *Zostera* spp.（Zosteraceae）in Japanese waters : A review, Otsuchi Marine Science, **26**, 7-22.

4）寺内元基・前田経雄（2016）：北西太平洋地域における衛星リモートセンシングによる富栄養化の評価と藻場マッピングの現状と課題．沿岸海洋研究，**54**，29-42.

5）Sagawa, T., E. Boisnier, T. Komatsu, K. B. Mustapha, A. Hattour, N. Kosaka and S. Miyazaki（2010）: Using bottom surface reflectance to map coastal marine areas : a new application method for Lyzenga's model. International Journal of Remote Sensing, **31** : 3051-3604.

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，77-79，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 77-79, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.013

Extended Abstract

富山湾の動物プランクトン*

井　口　直　樹**

Zooplankton in Toyama Bay, Southern Japan Sea

IGUCHI Naoki

富山湾では動物プランクトン生活史についての研究が1990年代に多く行われた．富山湾の動物プランクトンの生態的特徴についてこれら結果に基づいて紹介する．その後1997年からは富山湾で動物プランクトンの生物量や種組成の長期変動を把握するためのモニタリングが開始された．この動物プランクトンモニタリングの方法，結果の一部について報告する．

キーワード：動物プランクトン，富山湾，生活史，モニタリング

1.　富山湾の動物プランクトンの特徴

富山湾の動物プランクトンについては，1990年代に主要種の生活史について多くの研究が行われた[1),2)]．当時富山湾では栄養塩の豊富な深層の海水を洋上に散布する海域肥沃化プロジェクトが行われており，動物プランクトン研究はその関連調査に基づいたものである．近年では漁業資源の仔稚魚が分布する富山湾を含む能登半島周辺海域において，その餌料環境を把握することを目的に動物プランクトン種組成やカイアシ類ノープリウス幼生の水平分布が調査されている[3),4)]．以上の研究から富山湾の動物プランクトンはその生息環境を強く反映した生活史を持つことが明らかになった．日本海は東シナ海，太平洋，オホーツク海につながる海峡が浅いため，海洋構造は外洋や大気の影響を強く受ける表層と受けないそれ以深に分けることができ，日本海南部の富山湾も表層は対馬暖流が流入するが，約200 m～300 m 以深は，低温で溶存酸素が豊富な日本海固有水が広く存在している．このため表層には対馬暖流に運ばれてくる動物プランクトンの暖水性種が多く分布するが，その下には冷水性種も同所的に生息可能である[5)]．富山湾は急峻な海底谷となって沖合とつながっていることから，冷たい固有水をとおして岸近くまで動物プランクトンの冷水性種が分布することが可能となっている．そして冷水性動物プランクトンの多くが夏季に表層が高水温になると低温である下層へ潜る生活史を送っている[1)]．海底谷地形は沿岸を流れる対馬暖流を妨げる作用もあり，若狭湾などと比較して富山湾で冷水性種が優占する原因にもなっている[3)]．この他にも，日本海につながる海峡が浅いため深層種がいない，海峡が狭いため日本海に入り生息する種も限定的になっているなど出現する種数が少ないことも富山湾を含む日本海の特徴である．

2.　動物プランクトンモニタリング

1990年代の動物プランクトン研究により富山湾の主要な動物プランクトンの生態は明らかになったが，調査期間が短かったため長期的に動物プランクトンの生物量や生態がどのように変化するのかは不明であった．そこで1997年から動物プランクトンの長期的モニタリングが富山県水産試験場（現在富山県農林水産総合技術センター水産研究所）と日本海区水産研究所により開始された．動物プランクトンは富山湾の中央に位置する水深約1,000 m の1定点（北緯37度0.2分，東経137度13.8分）において，1997年4月から月1回，富山県農林水産総合技術センター水産研究所漁業調査船「立山丸」により採集されている．採集は，目合0.33 mm ノルパックネットによる毎秒1 m の0 m～500 m 鉛直曳，目合0.06 mm ノルパックネットによる毎秒0.5 m の0 m～50 m 鉛直曳である．CTD による水温，塩分測定，各層採水によるクロロフィル *a* 濃度測定を同時に行っている．

定点は1990年代に動物プランクトン生活史調査が実施された定点と同一である．動物プランクトン採集は150 m もしくは200 m 深から表面までの鉛直曳が一般的であるが，夏季に表層からいなくなる冷水性種を採集する，

* 2020年4月1日受領
** 水産研究・教育機構　日本海区水産研究所
連絡先：井口直樹，日本海区水産研究所
〒951-8121 新潟県新潟市中央区水道町1丁目5939-22
E-mail : iguchi@affrc.go.jp

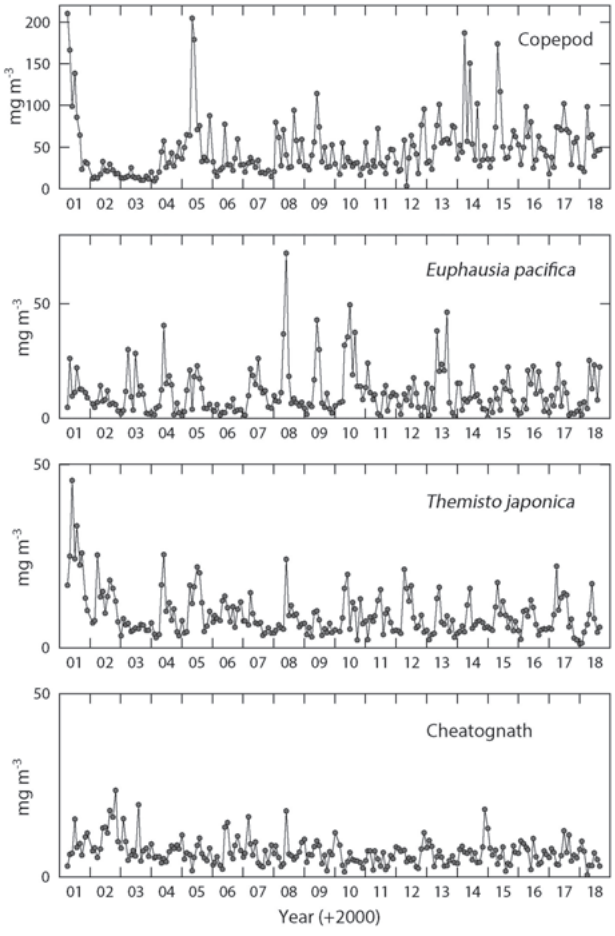

Fig. 1　Seasonal/annual changes of the zooplankton biomass (mg wet weight m^{-3}) at the station in the central part of Toyama Bay, southern Japan Sea.

動物プランクトンの昼夜鉛直移動による生物量や種組成の変化をなるべく排除する，といった理由から500 m 深からの鉛直曳を行っている．目合0. 06 mm の採集はカイアシ類ノープリウス幼生など小型動物プランクトンの採集が目的である．目合0. 33 mm ノルパックネットによる試料は適宜分割し種組成分析を行い，主要分類群であるカイアシ類，オキアミ類，端脚類，ヤムシ類について湿重量測定を実施している．目合0. 06 mm ノルパックネットではカイアシ類ノープリウス幼生総個体数を計測している．

現在の分析項目になった2001年４月から2018年９月までの主要４分類群の湿重量を Fig. 1 に示す．オキアミ類，端脚類はそれぞれ *Euphausia pacifica* と *Themisto japonica* が大部分であったため，その種のみの重量を示した．最も重量が多かったカイアシ類の全調査期間の月別平均湿重量は，４月～６月が多く，最大は６月であった．２番目に多かったオキアミ類 *E. paicifica* は７月に最大を示した．これらの湿重量の季節変化は1990年代の生活史調査結果と同様の傾向であった[5]．年平均湿重量は，カイアシ類では2001年，2005年，2014年が高く，オキアミ類 *E. pacifica* は2010年にピークがあり，各分類群で湿重量が多い年は異なっていた．また，水温，塩分，クロロフィルの年平均との直接的な相関は見られなかった．

3.　おわりに

富山湾でのモニタリングは１定点のみで行っており水平的な広がりはないが，月１回観測と時間的な頻度は高く，季節変化や短期的な特異現象を把握することに適している．今回のモニタリング結果では示していないが，例えば2015年にオオサルパが日本海で大量出現し漁業被害を発生させたが，この現象は富山湾の動物プランクトンモニタリングでサルパ類個体数の増加として把握されている．更に2019年では日本海南部の広い範囲にわたって体長10 cm を超えるモモイロサルパが春から夏にかけて大量出現し，底曳網にサルパが大量にからみつくなどの漁業被害が発生している（Fig. 2）．この様な突発的な動物プランクトンの出現や湿重量の変化は，発生してからの調査の計画・実行では遅く，現象を正確に捉えるためには普段からの継続的な観測が重要である．富山湾の動物プランクトンモニタリングは20年以上にわたり続いており，多くの関係者の尽力に感謝する．

Fig. 2　The mass occurrence of the salp *Pegea confoederata* was observed in the southern Japan Sea during spring-summer 2019.

参　考　文　献

1）池田勉（2001）：動物プランクトンの生活史と生産量の総合研究．月刊海洋号外，**27**，25-31.

2）Iguchi, N.（2004）: Spatial/temporal variations in zooplankton biomass and ecological characteristics of major species in the southern part of the Japan Sea : a review. Progress in Oceanography, **61**, 213-225.

3）Kodama T., T. Wagawa, N. Iguchi, Y. Takada, T. Takahashi, K. Fukudome, H. Morimoto and T. Goto（2018）: Spatial variations in zooplankton community structure along the Japanese coastline in the Japan Sea : influence of the coastal current. Ocean Science, **14**, 355-369.
4）髙橋卓・森本晴之・後藤常夫・井口直樹・山口篤（2019）：2005年５月の中部日本海能登半島周辺海域におけるカイアシ類ノープリウスの水平分布．日本プランクトン学会報，**66**，60-71.
5）Hirakawa, K., A. Imamura and T. Ikeda（1992）: Seasonal variability in abundance and composition of zooplankton in Toyama Bay, southern Japan Sea. Bulletin of the Japan Sea National Fisheries Research Institute, **42**, 1-15.

沿岸海洋研究　第58巻，第1号，81-86，2020
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 58, No. 1, 81-86, 2020
https://doi.org/10.32142/engankaiyo.2020.8.014

Extended Abstract

富山湾におけるブリ，スルメイカ，ホタルイカの漁況と日本海の海洋環境との関係*

小塚　晃**・北川　慎介**,†・南條　暢聡**・辻本　良**

Catches of Yellowtail *Seriola quinqueradiata*, Japanese Common Squid *Todarodes pacificus* and Firefly Squid *Watasenia scintillans* in Toyama Bay in Relation to Oceanographic Environment in the Sea of Japan

KOZUKA Akira, KITAGAWA Shinsuke, NANJO Nobuaki and TSUJIMOTO Ryo

富山湾では400年以上も前から定置漁業が盛んであり，暖水性の回遊魚を中心に漁獲してきた．主要漁獲物であるブリ，スルメイカおよびホタルイカについて，漁獲変動と海洋環境との関係を調べた．ブリでは，日本周辺海域の海水温の上昇に伴い分布域がオホーツク海まで拡大し，2000年代後半以降に北海道の漁獲量が急増した．また，南下期である冬季の富山湾への来遊状況は，12月に山形県沖が暖かく能登半島北西沖が冷たい水塊配置のときに好漁となる傾向が認められた．富山県沿岸で1月～3月に漁獲されるスルメイカは，日本海北部海域の1月期における水温が低い年に南下経路が沿岸よりとなり，漁獲量が多くなる傾向があった．日本海北部海域の水温上昇は，冬季の富山湾へのスルメイカの来遊量を減少させる要因となると考えられる．ホタルイカでは，2008年まで，日本海における主産卵場である山陰沖の5月の水温が高いと，翌年の富山湾漁獲量が多くなる傾向が認められた．しかし，2009年以降，山陰沖水温環境指標と富山湾漁獲量との間の関係性が悪くなり，その要因の解明が必要となっている．これらの種は，東シナ海や日本海を産卵場とし，日本海を広く回遊する．対馬暖流の勢力は，加入量や仔稚魚の分散にも関与し，富山湾への来遊は，日本海の水温や水塊配置に大きく依存している．地球温暖化やレジームシフトによる海洋環境の変化により，日本海や東シナ海において産卵場や回遊状況が変化し，長期的に富山湾の漁況が変化していくことが懸念される．

キーワード：ブリ，スルメイカ，ホタルイカ，富山湾，日本海

1. はじめに

富山湾では，定置網による漁業が盛んであり，富山県沿岸漁獲量の8割以上を占める（富山県，2019[1]）．2009年～2018年に，富山県沿岸漁獲量は12667トン～27939トン（平均22378トン）で推移してきた．富山湾の定置網で漁獲される魚種は豊富であり，魚種別漁獲量は，マイワシ，マアジ，ソウダガツオ，ホタルイカ，スルメイカの順で多かった．また，富山湾で冬季に漁獲されるブリは，「寒ブリ」として全国的に知名度が高く重要な水産生物である．富山県内の漁獲量の多くは暖水性の回遊魚で占められるが，富山湾は水深が急に深くなることから冷水性種も漁獲される．

世界各地の海域で地球温暖化の影響が現れており（Belkin, 2009[2]），2018年までのおよそ100年間にわたる海域平均海面水温の上昇率は，日本海中部で＋1.70 ℃，日本海南西部で＋1.29 ℃，東シナ海北部で＋1.23 ℃が確認されている（気象庁，2019[3]）．また，10年から数十年周期の変動を示すレジームシフトにより世界各地で水産資源が大きく変動し，日本海の対馬暖流域では1980年代終わりに寒冷レジームから温暖レジームに変化した（Tian et al., 2008[4]）．地球温暖化やレジームシフトは水産生物の分布や回遊経路，加入量等に影響を及ぼすことが懸念されており，富山湾での漁獲量にも変化をもたらす可能性がある．

本報では，富山湾を代表する水産生物であるブリ，スルメイカおよびホタルイカを例として，漁獲動向や水温環境にもとづいた漁獲予報に関する研究から導き出された関係性について報告する．

* 2020年4月6日受領
** 富山県農林水産総合技術センター水産研究所
† 現所属：富山県農林水産部水産漁港課
連絡先：小塚　晃，富山県農林水産総合技術センター水産研究所
〒936-8536 富山県滑川市高塚364
E-mail : akira.kozuka@toyama.pref.toyama.lg.jp

2.　富山湾と定置漁業

富山湾は日本海中央部の能登半島東側に位置し，全表面積約2120 km^2，最大水深1250 m，全容積約1280 km^{3}の外洋性内湾である（今村ほか，1985[5]）．富山湾には，対馬暖流に乗って暖水性の回遊魚が来遊し，日本海固有水には冷水性や深海性の水産生物が生息し，漁獲される魚介類は多種多様である．

富山県沿岸では定置漁業が盛んであり，定置漁業権にもとづく大型定置の免許件数は79件，共同漁業権にもとづく小型定置は38ヶ統ある．定置漁業は網に入ってくる魚だけをとる「待ちの漁法」であり，魚を捕り尽くす危険性が低く持続可能な漁法である．一方で，資源状況や来遊状況によって種ごとの漁獲量が大きく変動する特徴がある．

3.　ブ　　リ

ブリは東シナ海から北海道を広く回遊し，冬に産卵のため日本海を南下する途中で富山湾に来遊し，定置網で漁獲される．日本周辺海域の海面水温の上昇に伴い分布域がオホーツク海まで拡大し，北海道の漁獲量は，全サイズの合計漁獲量が1990年代には1000トン未満であったが，2013年には約1.2万トンに急増した（星野，2017[6]）．一方，富山県沿岸における10月～翌年３月のブリ銘柄（４kg以上）の漁獲量は，1989年～2018年の期間に24トン～1027トンと大きく変動した．特に2010年以降，不安定な状態が続いており，2015年漁期は26トンと極端な不漁になったが，新潟県では定置網で283トンを漁獲し，来遊地域の偏りが著しかった．このように北越地方の来遊に地域的な差が生ずる要因として，海況によってブリが来遊する地域が変化することが考えられる．

ブリの漁況と海況の関係について，ブリ成魚の南下期である冬季に島根沖冷水域が接岸していると山口県でブリが豊漁となるという報告がある（原，1990[7]）．日本海本州沿岸の富山県以北海域（以下，日本海北部海域という）においても，同様の関係があるか検証するため，日本海北部海域の水塊配置と南下期のブリ銘柄の漁獲量の関係を調べた．2000年以降，北上期である４月～８月の新潟県と秋田県での定置漁業によるブリ銘柄の合計漁獲量と，南下期である10月～翌年３月の富山県，石川県，新潟県の定置漁業による大ブリ（３歳以上）の合計漁獲量（以下，３県漁獲量という）の関係をみると，両者の間に有意な正の相関関係が認められた（Spearman's rank test, $r_s = 0.598$, $p = 0.006$）．３県漁獲量のうち，富山湾に面した富山県と石川県の合計漁獲量の割合を富山湾配分比とすると，配分比は2010年から変動が大きくなっている（Fig. 1）．国立研究開発法人水産研究・教育機構日本海区水産研究所が運用している拡張版日本海海況予測システムJADE2から，ブリの南下期の海洋環境を表す代表値として12月１日時点の水深100 mの水温を用いて緯度経度0.5度升目平均水温を作成し，2000年～2018年のデータにより，各々の升目の水温と富山湾配分比との相関解析を行った．その結果，富山湾配分比と日本海の100 m深水温の間に，山形県沖に正の相関，能登半島北西沖に負の相関が認められた（Fig. 2）．すな

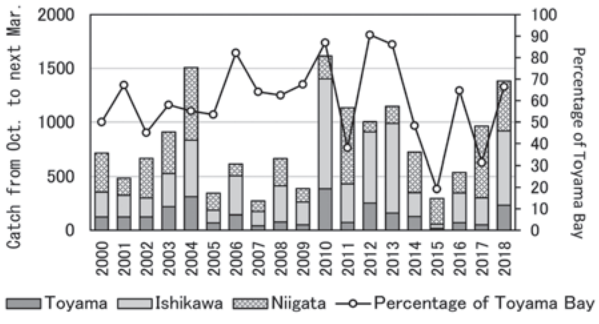

Fig. 1　Catches of yellowtail in Niigata, Toyama and Ishikawa Prefectures and the percentage of the catch in Toyama Bay (including Toyama and Ishikawa Prefectures).

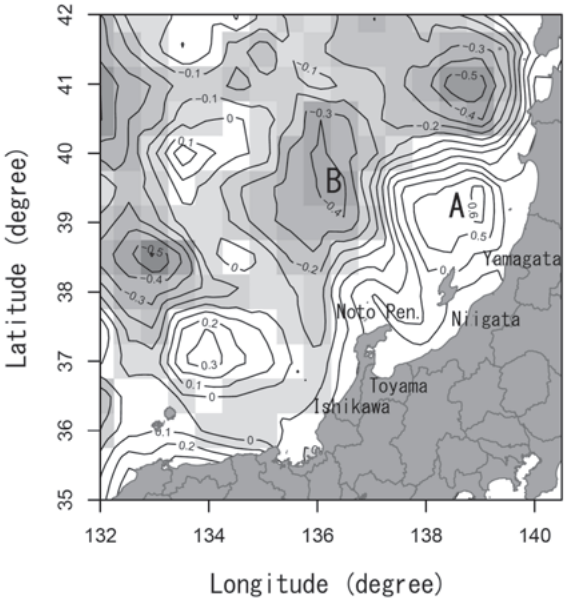

Fig. 2　Map with correlation coefficients between the percentage of yellowtail catch in Toyama Bay and the water temperature at the depth of 100 m on December 1 from 2000 to 2018. Area A off Yamagata Prefecture indicates positive correlations. Area B, northwest off Noto Peninsula indicates negative correlations. Data were acquired from the Japan Sea Data Assimilation Experiment (JADE2) operated by the Japan Sea National Fisheries Research Institute.

わち，山形県沖が暖かく，能登半島北西沖が冷たい年には，富山湾への配分が大きくなることを示している．

これまで，日本海の水塊配置によってブリの来遊量が変化する要因は不明であった．しかし，位置推定が可能なアーカイバルタグをブリに標識し放流することで，南下期に水深100 m で10 ℃～14 ℃ の佐渡島近くの冷水域を避けて本州沿岸側を回遊したことが明らかとなった（Furukawa et al., 2020[8]）．また，2016年以降の標識放流の結果から，日本海側の佐渡島で放流したブリが太平洋側に移動し，成熟した個体が高知県や宮崎県で再捕された．日本海を北上したブリは冬季に日本海を南下すると考えられてきたが，今後，南下経路が太平洋側をとる可能性についても検討していかなければならない．さらに，Na et al., 2012[9]は，1990年代，2000年代の日本海北部海域の表層の熱含量が上昇傾向であることを報告しており，北越地方沖の水塊配置もその影響を受けていると考えられる．引き続き，ブリの来遊に対する地球温暖化の影響を注視していく必要がある．

4. スルメイカ

我が国周辺海域に分布するスルメイカは，秋季発生系群と冬季発生系群が卓越している（加賀ほか，2019[10]）．冬季発生系群のスルメイカは，主に東シナ海で産卵・ふ化した後，太平洋側を北上し，常磐から北海道太平洋沿岸域に回遊する．北海道周辺で成長したスルメイカは，南の産卵場に向かうため日本海を南下する（桜井，2006[11]）．富山県沿岸において１月～３月に定置網によって漁獲されるスルメイカは主に冬季発生系群とされ，この南下回遊する群の一部が湾内に来遊してきたと考えられている（笠原ほか，1969[12]）．

我が国周辺のスルメイカ冬季発生系群の漁獲量は，2014年から減少傾向を示し，2015年以降は10万トンを下回っている（加賀ほか，2019[10]）．一方，富山県沿岸における１月～３月の定置網による漁獲量は，1989年～2018年に281トン～2087トンの範囲で大きく変動した（Fig. 3）．スルメイカ冬季発生系群の漁獲量と富山県沿岸における１月～３月の定置網による漁獲量の関係をみたところ，有意な相関は認められなかった．富山県沿岸におけるスルメイカ漁獲量は，系群全体の漁獲量との対応が明瞭ではなく，日本海の海洋環境による回遊ルートによって左右されていると考えられる．

富山県沿岸で漁獲されるスルメイカは，津軽海峡と宗谷海峡を抜けて日本海北部海域を北から南へ回遊する（加賀ほか，2019[10]）．スルメイカは，夜間は水深50 m 付近にいることが多く，飼育実験から生存できる下限水温は12 ℃ で，これ以下では数週間で死亡することが明

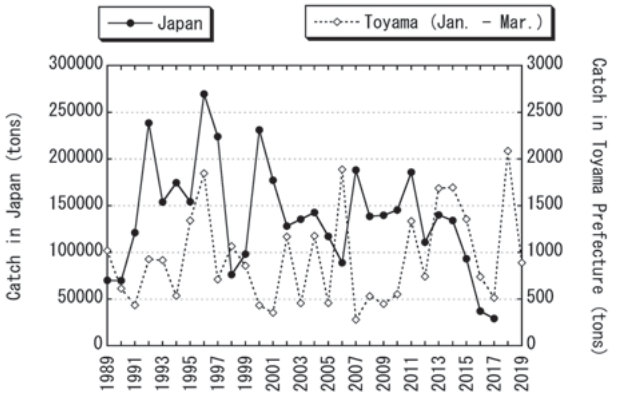

Fig. 3　Annual catch of the Japanese common squid of winter-spawning group in the seas adjacent to Japan and the catch in Toyama Prefecture by the set net fisheries from January to March.

らかにされている（桜井，2014[13]）．そこで，JADE2 を用いて，主漁期である冬季の始まりの１月10日時点について，2017年と2018年の日本海北部海域における水深50 m の水温分布を比較した（Fig. 4）．富山県で漁獲量が少なかった2017年では北方から冷水塊の張り出しが弱く，一方，富山県において1989年以降で最高の2087トンの漁獲量を記録した2018年には，冷水塊の張り出しが強かった．2018年冬季には，スルメイカが沖合の冷たい海域を避け，沿岸寄りを南下して富山湾内への来遊量が多くなった結果，富山県の定置網で豊漁となったと考えられる．

日本海北部海域の136° E，38° N と139° E，41° N で囲まれた Fig. 4 の枠内の水温を JADE2 から取得した．1993年～2019年の１月１日，１月10日，１月19日および１月28日の水深50 m における水温を平均して１月期の平均水温とした．１月期平均水温と当年の富山県沿岸の１月～３月に定置網で漁獲されたスルメイカ漁獲量との関係をみた（Fig. 5）．その結果，１月期平均水温と漁獲量の間には有意な負の相関が認められ（Spearman's rank test, $r_s = -0.649$, $p = 0.0002$），日本海北部海域の水温が低いと富山県沿岸での漁獲量が多くなることが示された．JADE2 では，３ヶ月先まで水温の予測値が公開されるため，予測水温値を関係式に代入することにより，富山県沿岸におけるスルメイカ漁獲量の予測が可能となった．

富山湾で１月～３月に漁獲されるスルメイカは冬季発生群が主体といわれているが，桜井（2014）[13]によると，IPCC の第５次報告のシナリオのとおり地球温暖化が進むと，2100年にはスルメイカ資源の主体は冬季と春季発生群へと変化し，海面水温が４℃ 上昇すると推定されている．したがって，今後温暖化の進行に伴い，産卵時

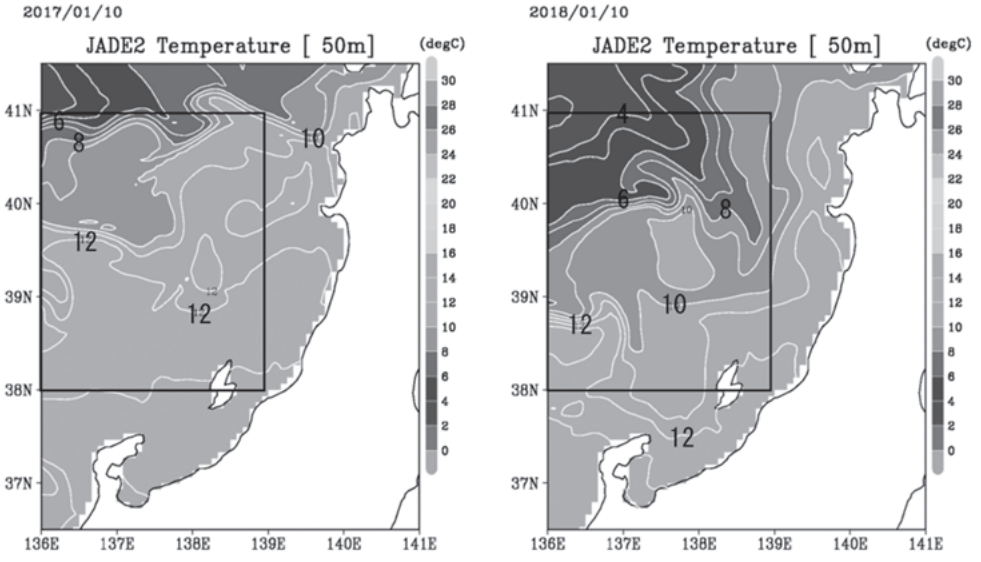

Fig. 4　Horizontal distribution of water temperature at the depth of 50 m in the northern area of the Sea of Japan. Left and right figures denote at January 10, 2017 and January 10, 2018, respectively. Data were acquired from the JADE2 operated by the Japan Sea National Fisheries Research Institute.

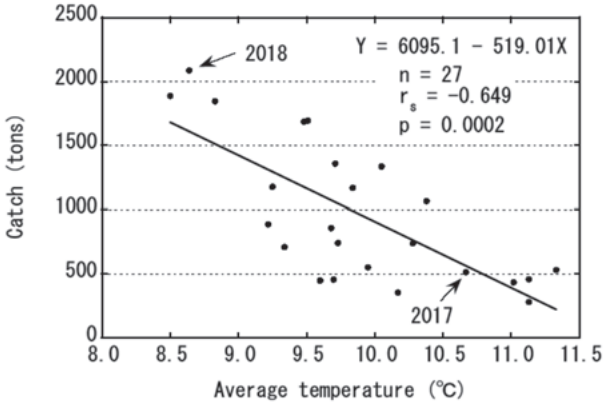

Fig. 5　Relationship between the catch of Japanese common squid by the set net fisheries in Toyama Prefecture from January to March and the average temperature at the depth of 50 m in January from 1993 to 2019 in the square in Fig. 4 .

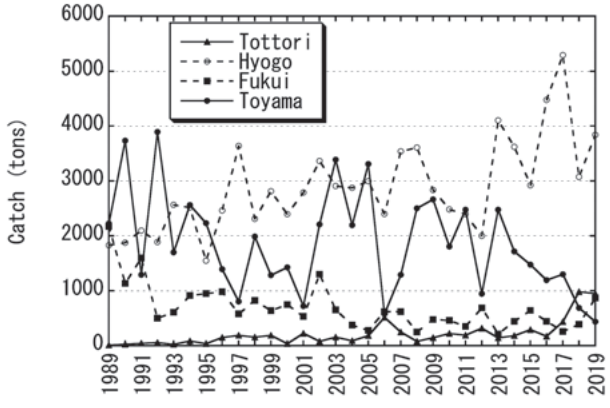

Fig. 6　Catches of firefly squid by Toyama, Hyogo, Fukui and Tottori Prefectures.

期が遅くなり，南下回遊期の海水温が高く変化することで，富山湾の漁獲サイズや漁獲量が変化していくと考えられる．

5.　ホタルイカ

ホタルイカは日本海に広く分布しており，産卵場は隠岐島西側の海域，隠岐島東側の若狭湾を中心とする海域および能登半島東側の富山湾の３ヶ所とされている（林，2000[14]）．漁場は新潟県から山口県沖に形成され，産卵のために来遊したホタルイカを漁獲している．2018年における日本海側各府県の総漁獲量は5139トンであり，兵庫県の漁獲量が3072トンで最も多く，鳥取県985トン，富山県689トンがそれに次いだ（Fig. 6）．ホタルイカは，富山県では主に３月～６月に定置網で，その他の府県では主に１月～５月に底びき網によって漁獲されている．

富山県におけるホタルイカの年間漁獲量は，1989年～2018年において582トン～3895トン（平均1915トン）と変動が大きい．また，富山県でのホタルイカ漁獲量は2014年から減少傾向が続いており，2019年には過去最低の437トンを記録した．ホタルイカ漁の豊凶は漁業経営体や水産加工業者に大きな影響を及ぼすことから，ホタルイカ漁獲量の予測が各業界から要望されている．そのため，富山県農林水産総合技術センター水産研究所（旧

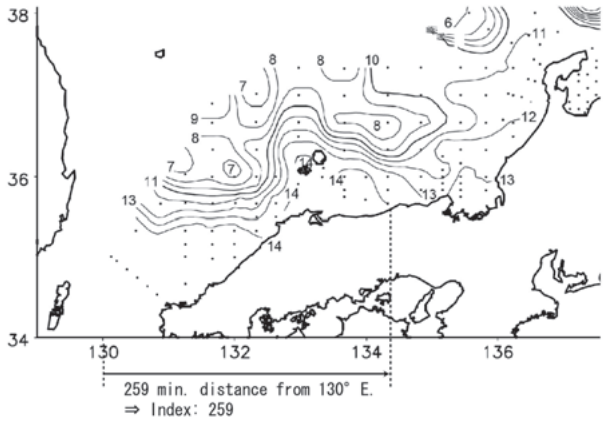

Fig. 7　Horizontal distribution of water temperature at the depth of 100 m in May 2015 and the temperature index off San'in District. The index is the gap of the minutes from 130 degree E to the eastbound minute of 14 ℃ isothermal line which touches the shoreline in the area of San'in to Wakasa Bay. The distribution of water temperature was obtained from bulletin of fishing ground marine condition in the Sea of Japan published by the Japan Sea National Fisheries Research Institute.

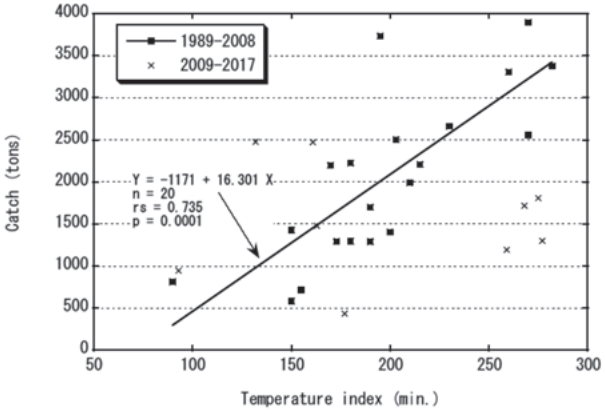

Fig. 8　Relationship between the temperature index off San'in District and the annual catch of firefly squid in the following year in Toyama Prefecture.

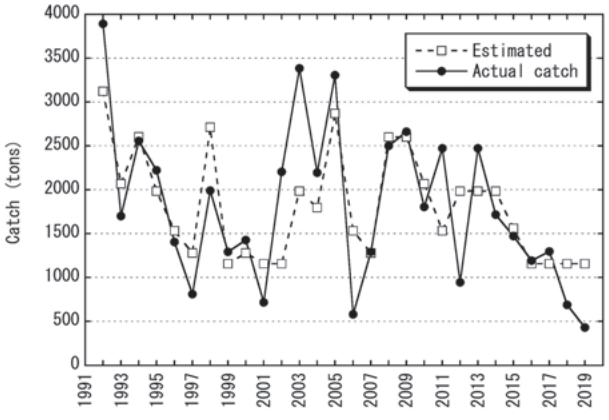

Fig. 9　Actual catch of firefly squid and estimated one using the general liner model in Toyama Prefecture. The solid circle with solid line indicates the actual catch, and the open square with dotted line indicates the estimated one.

富山県水産試験場）は，1971年からホタルイカの漁獲量を予測している（今村，1977[15]）．南條ほか（2009）[16]は，（X_1）２月における富山県内での定置網によるホタルイカ漁獲量，（X_2）２月下旬に調査船を用いた中層トロール網による富山湾内での採集個体数，（X_3）ホタルイカの卵が多く出現する５月の山陰沖から若狭湾沖にかけての水温の分布状況を説明変数とすることで，富山県のホタルイカ漁獲量を予測した．なお，説明変数（X_3）は，山陰から若狭湾にかけての水深100 m における水温14 ℃等温線と陸岸との接点を東経130度からの距離として，山陰沖水温環境指標と定義している（Fig. 7）．山陰沖水温環境指標と富山県の翌年の年間漁獲量の関係をみると，1989～2008年の間には有意な正の相関が認められた（Fig. 8，Spearman rank test, $r_s = 0.735$, $p = 0.0001$）．すなわち，1989年～2008年において，山陰沖の水深100 m の水温14 ℃等温線が５月に東側に大きく張り出した年の翌年には，富山県でのホタルイカ漁獲量が多くなる傾向が認められる．対馬暖流の勢力が強く水温が高いとホタルイカの産卵環境が良好となり卵から幼生までの初期生残に有利に働くことや，対馬暖流によって卵や幼生が沖合に輸送されることが要因となって，翌年の富山湾での漁獲量の増加につながると考えられる．ところが，2009年～2017年の山陰沖水温環境指標と翌年の漁獲量の対応をみると，有意な相関が認められなくなった（Fig. 8，Spearman rank test, $r_s = -0.067$, $p = 0.865$）．山陰沖水温環境指標と翌年の漁獲量の関係性が悪くなった要因は不明であり，今後の研究が待たれる．2009年以降，ホタルイカ産卵時期の山陰沖における水温環境指標を用いて，翌年の富山湾の漁獲量を予測することが困難となり，漁獲量の予測に説明変数（X_3）を用いたのは2016年までとした．2017年以降の予測には，（X_3）の代わりに，（X_4）気象庁が発表する北陸地方における３月～５月の平均気温を用いている．説明変数（X_4）は，富山湾でホタルイカの漁獲がもっとも多くなる時期の漁場水温は11 ℃～13 ℃とされており，春季の気温が高く水温の上昇が早い年は漁期が短くなる傾向があることを利用している．現在，（X_1）（X_2）（X_4）のデータにもとづいた一般化線形モデルによって，富山県におけるホタルイカ漁獲量を予測している（Fig. 9）．

6.　おわりに

ブリやスルメイカでは，南下回遊期の日本海の水温

データが，富山湾での漁獲量を予測する際に重要である．海洋同化モデル JADE2 を用いるとともに，水中グライダー（清水ほか，2017[17]）による実測データも，漁獲量の予測や回遊経路の解明に貢献することが期待される．

日本海におけるホタルイカの主産卵場は，山陰から若狭湾沖と考えられており，日本海南西部の春季における海洋環境と富山湾での漁獲量との関係について，改めて解明する必要がある．日本海でスルメイカやズワイガニの粒子追跡による輸送生残モデル実験（吉田ほか 2018[18]；Mao et al., 2019[19]）のように，ホタルイカでも卵や幼生を粒子に見立てた同手法を用いて，年ごとの分散と生残を計算し，翌年の漁獲量を予測できるか検証することが有効な手段と考えられる．また，ホタルイカ未成体は，対馬暖流とリマン寒流のぶつかる極前線帯に多く分布することが明らかとなっている（内山，2000[20]）．しかし，極前線におけるホタルイカ未成体の分布量については，断片的な情報しかないため，生活史を網羅した調査が求められる．

地球温暖化やレジームシフトによる海洋環境の変化により，これまでのデータを用いた解析では，富山湾での漁獲量予測が難しくなっている．日本海や東シナ海において産卵場や回遊状況が変化していることを想定した，新たな対応が求められる．

謝　辞

シンポジウムでの発表の機会を与えていただいたコンビーナに感謝します．日本海の水温については，国立研究開発法人水産研究・教育機構日本海区水産研究所の JADE2 と日本海漁場海況速報を利用させていただきました．ブリの漁獲量は，同機構日本海区水産研究所の久保田洋博士からご提供いただきました．また，ホタルイカ漁獲量は，福井県水産試験場の瀬戸久武主任研究員，兵庫県立農林水産技術総合センター但馬水産技術センターの大谷徹也主席研究員，鳥取県水産試験場の野々村卓美主任研究員からご提供いただきました．ここに記して感謝の意を表します．

参　考　文　献

1）富山県（2019）：富山県資源管理指針．17pp.　http : //www.pref.toyama.jp/cms_pfile/00014691/01275939.pdf
2）Belkin, I. M.（2009）: Rapid warming of large marine ecosystems. Progress in Oceanography, **81**, 207-213.
3）気象庁（2019）：海面水温の長期変化傾向（日本近海）．https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html
4）Tian, Y., H. Kidokoro, T. Watanabe and N. Iguchi（2008）: The late 1980s regime shift in the ecosystem of Tsushima warm current in the Japan/East Sea : Evidence from historical data and possible mechanisms. Progress Oceanography, **77**, 127-145.
5）今村明・石森繁樹・川崎賢一（1985）：富山湾Ⅱ物理．p. 990-1000, 日本全国沿岸海洋誌，日本海洋学会沿岸海洋研究部会編，東海大学出版会，東京．
6）星野昇（2017）：北海道におけるブリの来遊状況．北水試だより，**94**，1-4.
7）原哲之（1990）：日本海沿岸域におけるブリ成魚漁獲量の年変動について．日本水産学会誌，**56**，25-30.
8）Furukawa, S., A. Kozuka, T. Tsuji　and　H. Kubota（2020）: Horizontal and vertical movement of yellowtails *Seriola quinqueradiata* during summer to early winter recorded by archival tags in the northeastern Japan Sea.　Marine Ecology Progress Series, **636**, 139-156.
9）Na, H., K.-Y. Kim, K.-I. Chang, J. J. Park, K. Kim, and S. Minobe（2012）: Decadal variability of the upper ocean heat content in the East/Japan Sea and its possible relationship to northwestern Pacific variability. Journal of Geophysical Research, **117**, C02017.
10）加賀敏樹・山下紀生・岡本俊・濱津友紀（2019）：平成30（2018）年度スルメイカ冬季発生系群の資源評価，平成30年度我が国周辺水域の漁業資源評価，第１分冊，水産庁増殖推進部・国立研究開発法人水産研究・教育機構，652-697.
11）桜井泰憲（2006）：季節の旅人「スルメイカ」と日本海－資源変動のメカニズムを探る．p. 196-207，日本海の新世紀６海の力，蒲生俊敬・竹内章編，角川書店，東京．
12）笠原昭吾（1969）：1967年冬期に富山湾へ来遊したスルメイカ群について．日本海区水産研究所研究報告，**21**，55-65.
13）桜井泰憲（2014）：スルメイカの繁殖生態と気候変化に応答する資源変動．水産振興，48，一般財団法人東京水産振興会，東京，54 pp.
14）林清志（2000）：ホタルイカの資源．p. 59-84, ホタルイカの素顔，奥谷喬司編著，東海大学出版会，東京．
15）今村明（1977）：富山湾におけるホタルイカの漁況予測について．日本海ブロック漁況海況連絡会議研究発表報告集，**1**，17-35.
16）南條暢聡・内山勇・林清志（2009）：富山湾におけるホタルイカの漁況予報について．海洋と生物，**31**，266-270.
17）清水勇吾・奥西武・筧茂穂・長谷川大介・和川拓・井桁庸介・本多直人・瀬藤聡・黒田寛・伊藤進一（2017）：水産研究・教育機構における水中グライダー運用記録と今後の活用法．水産技術，**9**，33-41.
18）吉田尚郁・張　勁・森本昭彦・柴野良太・広瀬直樹・高山勝巳・郭新宇・王玉成・眞野能・吉江直樹（2018）：日本海の三階層管理の提案．沿岸海洋研究，**56**，31-38.
19）Mao, X., X. Guo, T. Kubota and Y. Wang（2019）: Numerical studies on snow crab（*Chionoecetes opilio*）larval survival and transport in the Sea of Japan.　Progress in Oceanography, **179**, doi.org/10.1016/j.pocean.2019.102204
20）内山勇（2000）：日本海沖に分布する小型ホタルイカは富山湾ホタルイカと関係があるか？　平成11年度富山県水産試験場研究発表会（第20回）要旨．p. 35-40.