

## 資 料

# 海生研シンポジウム2018「気候変動と海生生物影響」

## シンポジウム報告にあたって

香川謙二<sup>\*1 §</sup>

公益財団法人海洋生物環境研究所は、発電所取放水が漁場環境に与える影響について科学的に解明する調査研究機関として1975年に設立され、以来様々な調査・研究活動を実施してきた。そして、時代とともに変化する社会的ニーズに応えるため、「エネルギー生産と海域環境の調和」と「安心かつ安定的な食料生産への貢献」を目標として掲げ、発電所取放水の影響解明に加えて、海洋環境放射能のモニタリング、海生生物への化学物質の影響・蓄積実態の把握、地球温暖化に伴う海水温上昇や海洋酸性化などの調査研究にも研究対象を広げてきた。

平成30年7月に閣議決定された第5次エネルギー計画において、2030年エネルギーミックスの実現と2050年シナリオの方針が示された。この中でエネルギー起源のCO<sub>2</sub>削減については、2020年頃のCCUS<sup>\*2</sup>技術の実用化を目指した研究開発、国際機関との連携、CCS<sup>\*3</sup>の商業化の目途等を考慮しつつできるだけ早期のCCS Ready<sup>\*4</sup>導入に向けた検討などを進めることとされている。さらに風力発電については、陸上風力発電の導入可能な適地が限定的な我が国において、洋上風力発電の導入拡大は不可欠であるとうたわれている。

このような動きの中で、平成30年7月31日に、海生研シンポジウム2018「気候変動と海生生物影響—エネルギー生産と海域環境の調和の視点から考える—」を開催した。

本シンポジウム前半では、当所の喜田がイントロダクションとして気候変動による沿岸域の変化と対策について、地球温暖化と海洋環境、気候変動への世界的な対応、気候変動緩和策について概説した。気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響として、まず始めに、(国研)水産研究・教育機構 水産工学研究所 桑原氏には水温上昇に伴う藻場への影響と回復対策として、藻場の減少要因、磯焼け対策による藻場の回復状況を説明して頂いた。次に(国研)海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター 原田氏には海洋酸性化の環境・資源への影響について、二酸化炭素の吸収域としての海、海洋酸性化による海洋生物への影響、経済的インパクトを説明して頂いた。最後に当所の林が海生研における海洋酸性化研究について、沿岸海域の実態調査、生物影響調査、種苗生産現場での対策例について説明した。後半では、気候変動緩和策としての海洋利用とその課題について、始めに当所の吉川がCCSと環境影響評価について、日本のCCSプロジェクト、海底下CCSの環境影響評価、海洋環境の監視計画とその実態について説明した。次に当所の三浦が洋上風力発電と環境影響評価について、風力発電とその世界的動向、洋上風力発電の世界的動向と日本の現状、洋上風力発電に係る環境影響評価調査について説明した。最後に、当所中央研究所長の三浦を座長としてパネルディスカッションを実施し、会場の質問に答える時間も設けた。一般市民の他、行政、水産、電力、研究機関、マスコミ等から当初予定を上回る約130名の方へ出席いただいた。

\*1 公益財団法人海洋生物環境研究所 事務局 (〒162-0801 東京都新宿区山吹町347番地 藤和江戸川橋ビル7階)  
§ E-mail: kikaku@kaiseiken.or.jp

\*2 CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage, 二酸化炭素回収・有効利用・貯留)

\*3 CCS (Carbon dioxide Capture and Storage, 二酸化炭素回収・貯留)

\*4 CCS Ready (大規模排出源の設計・建設の段階から、CO<sub>2</sub>回収設備等を設置するための用地確保等の準備を予め行うこと)

## プログラム

日時：平成30年7月31日（火）13：00－17：15

場所：御茶ノ水ソラシティ カンファレンスセンター2階 Hall West

開会挨拶 （公財）海洋生物環境研究所 理事長 香川謙二

### I. イントロダクション

#### 1. 気候変動による沿岸域の変化と対策

中央研究所 所長代理 喜田 潤

### II. 気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響

#### 1. 水温上昇に伴う藻場への影響と回復対策

（国研）水産研究・教育機構 水産工学研究所 水産土木工学部長 桑原久実

#### 2. 海洋酸性化の環境・資源への影響

（国研）海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター センター長代理 原田尚美

#### 3. 海生研における海洋酸性化研究

実証試験場 応用生態グループ 主査研究員 林 正裕

### III. 気候変動緩和策としての海洋利用とその課題

#### 1. CCSと環境影響評価

実証試験場 応用生態グループマネージャー 吉川貴志

#### 2. 洋上風力発電と環境影響評価

中央研究所 海洋生物グループマネージャー 三浦雅大

### IV. 総合討論：海洋における気候変動緩和策実施とその課題（座長 中央研究所長 三浦正治）

開会挨拶 （公財）海洋生物環境研究所 業務執行理事 木下 泉



## I. イントロダクション

### I-1. 気候変動による沿岸域の変化と対策

喜田 潤

#### 1. はじめに

2018年の夏は、気候変動を実感する豪雨や酷暑となっている。ここでは、続く講演のイントロダクションとして、我々がなぜ気候変動に対応しなければならないのか、またそのために沿岸域でどのような対策が必要とされるのか、この2点について振り返る。

#### 2. 地球温暖化と海洋環境

IPCC第5次評価報告書によると、産業革命以降これまでに世界平均地上気温は上昇し続け、温暖化対策をとらなければ2100年まで気温が上昇し続けるが、厳しい温暖化対策をとれば気温上昇をある程度に抑えることができる、という予測が示された。また、気候変動による追加的リスク水準をみると、リスクが及ぶ事項によってリスク水準は若干異なるものの、「世界全体で総計した影響」は世界平均地上気温の上昇が2℃より高くなるとリスク水準が高いあるいは非常に高いものとなることが示された。

海洋に目を向けると、観測結果から気候変動の影響が明瞭に示されている。気象庁は世界の年平均海面水温の変化を示しているが、海面水温の長期変化傾向は100年あたり0.5℃の上昇であることが分かる。この上昇率は、同じ期間の陸上気温の上昇率0.8℃より小さな値だが、海洋の表面温度は確実に上昇していることが観測によって示されている。

海水温が上昇すると、海の生物の生息場所が変化してしまうことが容易に想像できる。1900年から2010年の観測に基づく海生動物群の分布域の平均移動速度（すなわちこれは海の生物がかつてはより低温だった水域に10年で何キロメートル移動したかを示している）をみると、全ての生物がかつてより低温だった水域に移動したことがわかる。注目されるのは海の基礎生産を担う植物プランクトンの移動が大きく、続いて一次消費者の動物プランクトンの移動が大きいことである（IPCC第5次評価報告書）。このように生態系を通じて海水温上昇の影響が生物分布域に及ぶことが見て取れる。このことについては、桑原氏の次の講演で詳しく紹介していただく。

気候変動は海水温だけでなく、海水の化学にも大きな影響を与える。大気中の二酸化炭素濃度が

上昇すると海水に溶け込む二酸化炭素が増加し、海水が酸性化する。もし温暖化対策をとらなかった場合に、現在から百年後に海水のpHがどれだけ低下するかをみると、すべての海域でpHが低下することが示されている。社会経済的に人間と関連のある生物群である軟体動物、冷水サンゴと造礁サンゴは沿岸海域に分布しているが、これら生物の海洋酸性化への感度を比較すると、石灰質の殻をもつ軟体動物やサンゴ類が甲殻類より負の影響、すなわち生物にとって好ましくない影響を受ける（IPCC第5次評価報告書）。海洋酸性化については、原田氏の次の講演で詳しく紹介していただくとともに、海生研の研究について当所の林氏が紹介する。

海水温が上昇し、生物の分布域が変化するということは、当然ながら漁業にも大きな影響がある。中・高程度に温暖化するシナリオにおいて、2001～2010年と2051～2060年の10年平均を比較して、約1,000種の魚類や無脊椎動物の最大漁獲量の変化をみると、漁獲量がほぼ変わらない海域は少なく、多くの海域で漁獲量が半分以下になることが示されている（IPCC第5次評価報告書）。なお、この予測には乱獲や海洋酸性化の潜在的影響は考慮されていないので、これらを考慮するとさらに漁獲量が減少してしまうことも考えられる。

#### 3. 気候変動への世界的な対応

これまで見てきたように、気候変動によって様々なリスクが増えるということが、科学的な知見をもとに明確に示されるようになった。

そこで、1992年に「国連気候変動枠組条約」が採択され、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを究極の目標として、世界は地球温暖化対策に世界全体で取り組んでいくことに合意した。そして、国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）が1995年から毎年開催されるようになった。

COP21のパリ協定では、京都議定書に代わる取組みとして、「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求すること」、「できるかぎり早く温室効果ガス排出量を減少に転じ、今世紀後半には、温室効果ガス排出量と吸収量のバランスをとる、すなわち排出をゼロにすること」が目標として定められた。パリ協定が歴史上、最も画期的である点は、途上国を含むすべての参加国に、排出削減の努力を求める枠組みということである。

パリ協定の目標達成にむけて、「主要排出国を

含むすべての国が削減目標を5年ごとに提出・更新すること」, 「長期目標の設定および各国の適応計画プロセスと行動の実施」, 更に「世界全体の進捗状況を2023年以降に, 5年に1回検討すること」が取り決められた。なお, 世界全体の進捗状況の検討は, 2018年から世界全体の進捗確認の機会が促進的対話 (Facilitative Dialogue) として設けられることになった。これは, いわゆるタラノア対話と呼ばれるものである。

最初に示した過去と未来の世界平均地上気温の変化をみると, 将来予測の部分は, モデルによる不確実性のため幅があることが分かる。2100年には, 温暖化対策をとらない場合, 気温は2.6~4.8°C上昇し, さらに上昇し続けるのに対し, 厳しい温暖化対策をとった場合, 気温は0.3~1.7°C上昇するものの一定に保てること分かる (IPCC第5次評価報告書)。

世界平均の海面pH, すなわち海洋酸性化の変化をみると, 温暖化対策をとらなければ, 海洋酸性化はさらに進行してしまうのに対し, 厳しい温暖化対策をとれば海洋酸性化の程度を一定に留めることができることがわかる。しかし, 世界平均の海面水位上昇をみると, 厳しい温暖化対策をとっても, 海面上昇は続いてしまうことが予測されている (IPCC第5次評価報告書)。このように, 気候変動はリスクによって及ぼす影響の度合いが異なるということに注意が必要である。

#### 4. 気候変動緩和策

気候変動を緩和するために厳しい温暖化対策をとるということは, すなわち温室効果ガスの排出量を今後マイナスにしていく, ということである。気温上昇を産業革命前に比べて2°C未満に抑えられる可能性が高い緩和シナリオでは, 2100年に大気中の二酸化炭素濃度が約450ppmとなる (IPCC第5次評価報告書)。

気温上昇を2°C未満に抑え, 大気中の二酸化炭素濃度を約450ppmで安定化させるためには, 低炭素エネルギーの規模拡大が欠かせない。特に, 発電の脱炭素化が費用対効果の高い緩和戦略として必要となる。

一次エネルギー中に占める低炭素エネルギーの割合をみると, より低い大気中二酸化炭素濃度で安定化するためには, 低炭素エネルギーの割合を80%以上に増やさなければならないことが分かる (IPCC第5次評価報告書)。このような発電の脱炭素化には, 「エネルギー効率の改善 (省エネ)」とともに, 「再生可能エネルギー (風力・水力・太陽光/熱発電)」, 「原子力エネルギー」, 「CCSすな

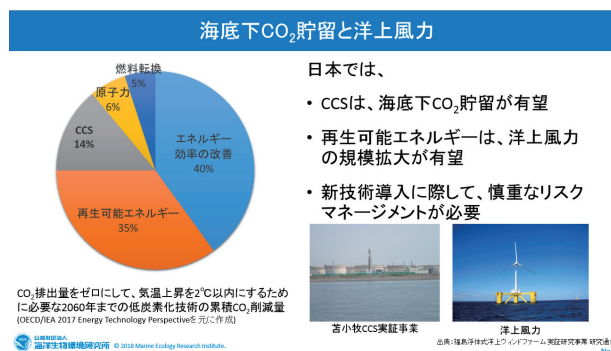
わち二酸化炭素の地中貯留技術付き化石エネルギー」, また「ネガティブCO<sub>2</sub>エミッションとされるCCS付きバイオエネルギー」などがある。

海洋はエネルギー生産の重要な場となっている。

枯渇性エネルギーとしてみると, 海底の石油・天然ガス, 将来のメタンハイドレートなどが挙げられ, 枯渇性エネルギーに対する気候変動緩和策として海底下地層へのCO<sub>2</sub>貯留 (CCS) がある。再生可能エネルギーに目を向けると, 洋上風力発電のほかに, 将来の波力・潮力・海流発電, 海洋温度差・塩分濃度差発電などもある。

二酸化炭素排出量をゼロにして, 気温上昇を2°C未満にするために必要な2060年までの低炭素化技術の割合については, CCSと再生可能エネルギーで約半分を占めることが示されている (OECD/IEA 2017 Energy Technology Perspective)。

日本では, CCSは海底下CO<sub>2</sub>貯留が有望とされており, 再生可能エネルギーにおいては, 洋上風力の規模拡大が有望とされている。一方, これらの新技術導入に際しては, 慎重なリスクマネジメントが必要となる。シンポジウムの後半部では, CCSについて当所の吉川氏から, 洋上風力発電については, 当所の三浦氏から紹介する。



第1図 地球温暖化対策として期待されるCCSと洋上風力。

#### 引用文献

IPCC (2014). Climate change 2014 : Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>

OECD/IEA (2017). Energy technology perspectives 2017 Catalysing energy technology transformations. <https://www.iea.org/etp2017/>

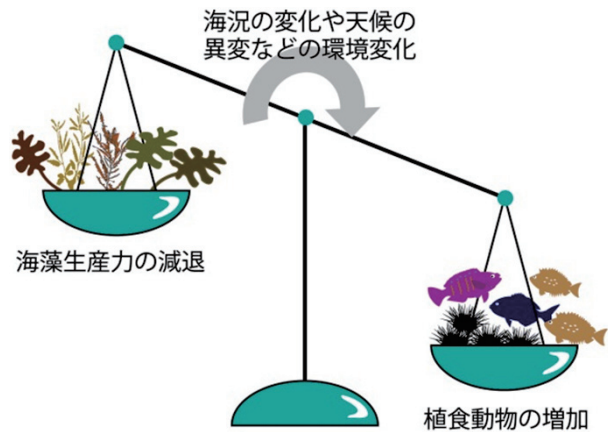
II. 気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響  
II-1. 水温上昇に伴う藻場への影響と回復対策

桑原久実

1. 藻場は、今どうなってるの？

我が国の藻場（もば）は構成する海藻種によりコンブ場、アラメ・カジメ場、ガラモ場、アマモ場などに区別され（写真1）、水深や底質等により単一種だけではなく複数種で構成される場合が多い。藻場は、我々人間にとって、直接・間接的に重要な役割を担っている。例えば、①沿岸の一次生産の場であると共に、②栄養塩吸収（CO<sub>2</sub>吸収も）などの環境保全の場、③水産上有用な魚介類を含む多様な生物にとっての生息の場、④我々人間にとって快適な景観や環境学習の場などを提供している。しかし、このように重要な藻場は全国的に著しい減少傾向にある。水産庁の調べによると、この20年間で藻場面積は大きく減少し、2018年は1980年代と比較し半分の10万ヘクタール程度と予想されている。このような藻場の減少は上述した藻場がもたらす多様な機能の低下をもたらし、水産業をはじめ沿岸生態系への影響が危惧されている。

藻場が減少する要因を第1図に天秤のイラストで示した。ある海域において温暖化等の環境変化を背景に、天秤の右の皿はウニや魚などの植食動物が海藻を食べる量、左の皿は海藻が生産する量

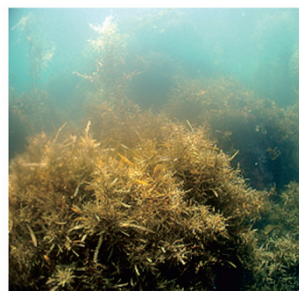


第1図 藻場の減少要因。

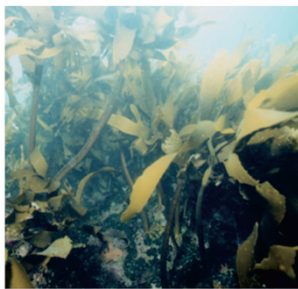
を示している。この天秤は藻場が減少傾向にあるため時計回りに傾いている。藻場の減少要因については、これまで種々の意見が出されてきたが、現在、高水温などの環境変化が直接海藻の生残に影響する場合と植食動物の食害を通じて影響する場が考えられている。前者の事例を写真2に示す。2013年8月、日本海西部では平年より2℃以上高い水温（約30℃が数日継続）が中旬から下旬にかけて続いた。この高水温によりアラメやカジメの葉状部が白くなり、やがて、茎の根本部分から倒れ、9月上旬の台風に伴う高波浪により大量に海岸に打ちあがった。この被害は長崎県対馬・壱岐から福岡県沿岸を経て山口県北部まで達し総延長距離は200kmと推定された。同様な事例は全国で局所的に見られるものの、このように大規模な藻場の流失は稀である。後者の事例を写真3と4に示す。写真3はウニが高密度に分布（黒い丸）し、これらのウニが海藻の幼芽を食べることにより、その後、藻場が形成されない状況を示している。ウニは餌となる海藻が無いため可食部（生殖葉）



コンブ場



ガラモ場



アラメ・カジメ場



アマモ場

写真1 我が国の代表的な藻場。



写真2 高水温の影響で大量に打ち上がったカジメ。

が痩せ、商品にならないため漁業者は漁獲できず、この状態が継続する。写真4は魚によりカジメの葉状部が全て食べられ茎だけになった状況を示している。茎の先端部にある成長帯まで食べられるとカジメは枯れる。藻場を消失させる魚は、主にアイゴ、ブダイ、イスズミ類が考えられており、これらはいずれも亜熱帯性の魚種である。これら植食性魚類による藻場の消失は毎年各地で報告されており、我が国沿岸水温の上昇が影響しているためと考えられる。

藻場が一旦減少し、その状態からなかなか回復できず貧植生状態が継続することを磯焼けと言う。我が国における磯焼けの大部分は、後者の植

食動物の食害であることがわかっている。

2. 水温が、さらに上昇すると、どうなる？

今後、我が国周辺の水温が、さらに上昇すると藻場はどうなるのか？現状の水温（過去10年平均）より3°C上昇した場合を想定し検討した。まず、我が国沿岸で見られる海藻種が生息できる水温帯を明らかにする必要がある。この水温帯の上・下限値は既存文献から収集・整理して求めた。次に、我が国周辺の現状の海面水温分布とそこから全域一律に3°C上昇させたものを作成した。海藻の分布は、年最低の海面水温分布（2月）と海藻の生息水温の下限値から北限を、年最高の水温分布（8

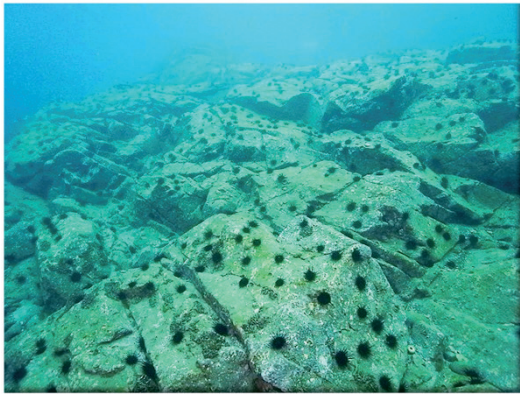


写真3 ウニの食害。

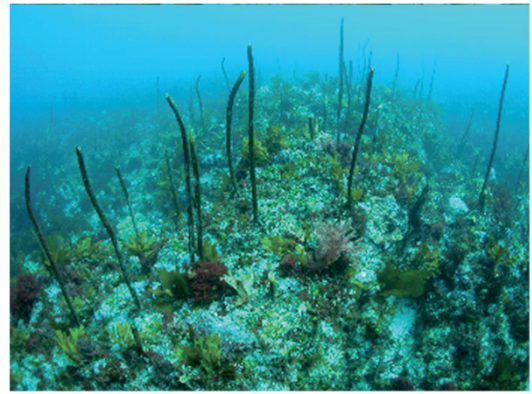


写真4 魚の食害。

第1表 海面水温の上昇（+3°C）に伴う海藻、サンゴ、植食動物の分布変化（太平洋側）

（赤色=消失、水色=拡大、緑色=現状維持）

分類	地域 生物名	地域																																						
		八重山・宮古諸島	沖繩諸島	奄美諸島	大隅諸島	鹿児島	宮崎	大分	愛媛	高知	徳島	和歌山	三重	愛知	静岡	神奈川	東京	千葉	茨城	福島南部	福島北部	宮城南部	宮城北	岩手南部	岩手中部	岩手北部	青森東部	北海道渡島	北海道胆振	北海道十勝	北海道釧路	北海道根室	北海道歯舞	北海道色丹	北海道国後					
コンブ類	ミツイシコンブ																																							
	リシリコンブ																																							
	ナガコンブ																																							
モク類	ウガノモク																																							
	ヤツマトモク																																							
	ノギリモク																																							
	フタエモク																																							
	ラツパモク																																							
	オオバモク																																							
	ヤナギモク																																							
アラメ・カジメ類	アラメ																																							
	カジメ																																							
	クロメ																																							
	リュウキュウスガモ																																							
サンゴ	ウミショウブ																																							
	ウミシグザ																																							
	ユビミドリイシ																																							
魚類	アイゴ																																							
	ブダイ																																							
ウニ類	ムラサキウニ																																							
	ガンガゼ																																							
	キタムラサキウニ																																							
	エゾバフンウニ																																							

月)と海藻の生息水温の上限値から南限を評価した。現状とそれより3℃上昇させた水温分布に上記の方法で海藻分布を示し、水温上昇による分布域の変化を予測した。

第1表は、海面水温3℃上昇した場合の太平洋側の海藻分布の変化を都道府県の地区別に予測したものである。海藻と同様な手法で評価したサンゴ、ウニや魚の植食動物の予測も併記してある。赤色は分布の消失、水色は拡大、緑色は変化が無く継続して分布(現状維持)することを示している。3℃上昇すると、水色の地区に分布が拡大する一方、赤色の地区で消失するので、緑色と水色のところに分布することになる。温帯性の海藻(ヤツマタモク、ノコギリモク、オオバモク、ヤナギモク、アラメ、カジメ、クロメ等)は、南方から消失し、北方へ拡大することがわかる。しかし、この変化は同じ分布幅でそのまま北に移動するのではなく、分布幅を減少する場合が多い。また、温帯性の海藻は亜熱性の海藻(フタエモク、ラッパモク等)やサンゴの北上により着生基質に新たな競争が生じること、植食動物の北上(アイゴ、ブダイ、ムラサキウニ、ガンガゼ)により、現在よりも被食圧が増加することなどから、さらに生息困難な環境になることが予想される。第2表は日本海側について示しており、太平洋側とほぼ同様な傾向にあることがわかる。ここでは水温上昇の

影響を検討するため、大幅に3℃の水温上昇を設定したので藻場分布に大きな影響が現れた。現在の水温上昇は、ここまでは達していないが、今後、モニタリングを継続して対応や適応方法を検討していく必要がある。

### 3. 藻場は、どうやって回復するの？

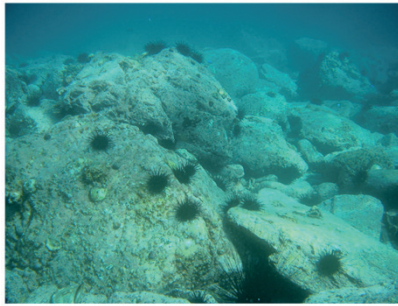
藻場回復は第1図の天秤のバランスを回復(釣り合った状態に)することである。1つ目の対策は温暖化などの気候変動を緩和や縮小するもので、これについてはCO<sub>2</sub>排出規制、低炭素エネルギーの推進など地球全体で取り組みつつある課題である。本シンポジウムでは、海洋生物環境研究所からCCS(二酸化炭素の回収・貯蔵)や洋上風力発電等に関する話題提供があり、詳しくはそれらを参照いただきたい。2つ目の対策は天秤の右の皿からウニや魚などの植食動物を除去し海藻が食べられる量を減少させ、左の皿から海藻の生産量を増加させることである。この際、植食動物を除去する前に海藻の生産を高める取り組み(例えば、母藻移植等)をしても、植食動物の餌を増やすことになってだけで藻場回復は期待できない。まず植食動物を除去してから海藻の種まきや種苗の設置などの海藻生産量を増加させる対策を実施する必要がある。

2つ目の対策事例として、漁業者が主体となっ

第2表 海面水温の上昇(+3℃)に伴う海藻、サンゴ、植食動物の分布変化(日本海側)

(赤色=消失、水色=拡大、緑色=現状維持)

分類	地域 生物名	八重山・宮古諸島	沖縄諸島	奄美諸島	大隅諸島	鹿児島	熊本	長崎	佐賀	福岡	山口	島根	鳥取	兵庫北部	京都	福井	石川	富山	新潟	山形	秋田	青森西部	北海道渡島	北海道釧路	北海道後志	北海道石狩	北海道留萌	北海道宗谷	北海道網走
		コンブ類	ミツイシコンブ																										
	リシリコンブ																												
	ナガコンブ																												
モク類	ウガノモク																												
	ヤツマタモク																												
	ノコギリモク																												
	フタエモク																												
	ラッパモク																												
	オオバモク																												
	ヤナギモク																												
アラメ・カジメ類	アラメ																												
	カジメ																												
	クロメ																												
海藻類	アマモ																												
	リュウキュウスガモ																												
	ウミシユウブ																												
	ウミジグザ																												
サンゴ	ユビミドリイシ																												
魚類	アイゴ																												
	ブダイ																												
ウニ類	ムラサキウニ																												
	ガンガゼ																												
	キタムラサキウニ																												
	エゾバフンウニ																												



(a) 磯焼けした海底 (2007年)



(b) SCUBA潜水によるウニ除去



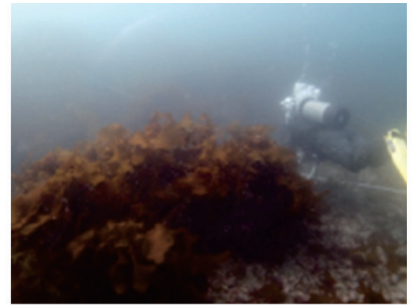
(c) 刺し網によるブダイ除去



(d) 海底に母藻の設置



(e) 回復したガラモ場 (2016年)



(f) 回復したクロメ場 (2016年)

写真5 漁業者主体で実施した藻場回復の取り組み事例 (大分県佐伯市名護屋地区)。

て実施している大分県佐伯市名護屋地区の取り組みを紹介する。当地区は大分県の一番南側に位置し、名護屋支店の正組合員数が70名余りである。リアス式地形を利用して、定置網、養殖、刺し網、一本釣りなど様々な漁業が行われている。豊かな藻場があった頃は県全体の約1/4のアワビやサザエの水揚げがあったが、1995年頃から磯焼けが発生し磯根資源の漁獲量は激減した。藻場を回復させるためにウニ除去等の対策を漁業者自らが自主的に実施したが磯焼けからの回復は見られなかった。こうした状況を打開するため、2007年に「名護屋地区磯焼け対策部会」が発足され、市、県、国からの協力を得た対策を開始した。この部会では、取り組みの基本方針として、①自分達(漁業者)ができる対策から始める、②磯焼けを継続させる要因を1つでも少なくする、③徐々に規模を拡大させるなどを決めている。当海域ではウニが高密度に分布することからウニによる被害が、藻場回復を阻害している主要因と考えられた(写真5(a))。SCUBA潜水によるウニ除去を徹底して実施し(写真5(b))、開始当初の2007年は5ha程度の除去面積であったが、2016年には100haに達している。また、海藻を移植すると、多数のブダイの蝟集や採食がインターバルカメラにより確認された。そこで2012年頃から刺し網によるブダイの除去(写真5(c))を実施し10日間で645尾(418kg)を除去したこともある。しかし、除去尾数が非常

に少ない場合もあり、より効率的で安定した除去手法の開発が必要である。海藻の種まきは、生分解性の布に成熟した雌雄の海藻を取り付け小石を重しにして海底に設置する手法(オープンスポアバックと言う)を用いた(写真5(d))。海藻の種の到達距離は数メートルと小さいため数多くのスポアバックが必要となる。この製作には地元の小学生に環境教育の一環としてお手伝いいただいている。この取り組みは小学生や父兄、学校関係者に好評で、現在も継続されケーブルテレビ等で放送されている。対策実施直前(2007年)は、ほとんど藻場が見られなかったが、上記の対策を繰り返し実施することにより2013年頃から成果が急激に現れ、2016年にはガラモ場(写真5(e))やクロメ場(写真5(f))等の回復面積は100ha程度に達した。このように大規模な藻場の回復事例は全国的にまだ少なく、先進的な成功事例と言える。現在、当海域では漁場を約30地区に分割し定期的なモニタリングと回復藻場の維持管理が行われている。

#### 4. むすび

現在、我が国の藻場の減少は、高水温が海藻の生育水温の上限を超えるまでには至っておらず、水温上昇などの環境変化を背景にした植食動物の被害が主要因となっている。このため植食動物の除去対策を徹底して実施すれば名護屋地区と同様



に藻場が回復した事例は全国で確認されている。しかし、植食動物の対策は時間と労力がかかり、計画通りに成果が得られていない地区も数多い。藻場回復に向けて行政と研究の担当者が一丸となり、これまで以上に効果的で確実な技術開発が早急に求められている。

なお、本稿は、「地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価及び対策技術の開発」（農林水産技術会議）と「磯焼け対策ガイドライン」（水産庁）の成果の一部であることを付記する。

## 引用文献

- 農林水産省農林水産技術会議事務局（2008）. 地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価及び対策技術の開発, 農林水産省農林水産技術会議事務局, 東京, 1-119.
- 全国漁港漁場協会（2007）. 磯焼け対策ガイドライン, 全国漁港漁場協会, 東京, 1-208.

## II. 気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響 II-2. 海洋酸性化の環境・資源への影響

原田尚美

### 1. はじめに

海洋酸性化は、温室効果ガスの二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) が引き起こすもう1つの問題として、近年、温暖化に加えて深刻な全球規模の環境ストレスとされ、その進行の把握や海洋生物並びに海洋生態系への影響把握が喫緊の課題となっている。海洋表層に  $\text{CO}_2$  が溶け込むと水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) と反応し、炭酸水素イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) を形成する。その際、水素イオン ( $\text{H}^+$ ) が放出されるために海水の水素イオン濃度が増加し、その結果、水素イオン濃度を表す水素イオン濃度指数 (pH: potential hydrogen) が低下する。全海洋表層水pHの平均値は約8.1とアルカリ性であるが、徐々に酸性方向にpH値が変化していくさまを海洋酸性化と称する。2012年に開催された国連の持続可能な開発会議 (リオ+20) の合意文書「The Future We Want」に於いて、各国が取り組まねばならない世界共通の課題として特に海洋酸性化がクローズアップされ、現在では2015年9月国連サミットで採択された「持続可能な開発のための国際目標 (SDGs)」No.14の海洋生物多様性やバイオマスの維持への影響を明らかにするために、引き続き海洋酸性化への取り組み強化が喫緊の課題とされている。ここでは海洋研究開発機構での海洋酸性化の取り組みについて紹介する。

### 2. 二酸化炭素の吸収域としての海

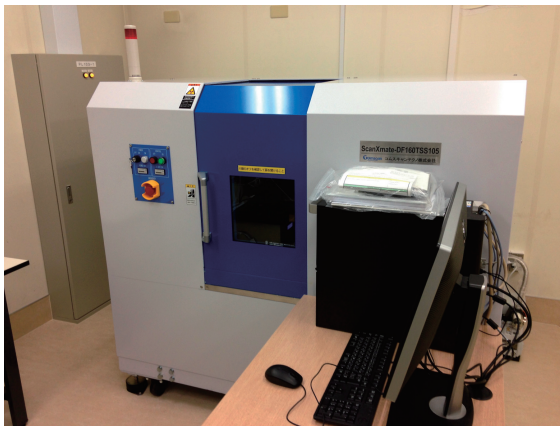
IPCC第5次評価報告書によると、現在、大気中に毎年6.4ギガトンの炭素が放出され、その内、海洋には2.4ギガトン吸収されていると見積もられており海洋は地球上で最大の炭素の貯蔵庫となっている。では一体、海洋のどこで吸収されているのだろうか？海洋表面での大気-海洋間の二酸化炭素収支の現場観測や逆解法モデルを駆使して地域別の温室効果ガスの収支を見積もった結果、全海洋の中でも北太平洋、南太平洋、南インド洋で主に吸収されていることがわかった (Patra *et al.*, 2014)。このように日本の前浜である北太平洋における温室効果ガス吸収は、海洋酸性化の深刻な進行を懸念させる。外洋域の酸性化に関して、太平洋、大西洋、インド洋など熱帯から亜寒帯域までの全海域にて継続実施されている世界の9つの時系列観測点における海洋表層の長期にわたるpHの観測結果が2014年に報告された (Green-

house Gas Bulletin 2014 世界気象機関発行)。それによると、全球海洋における酸性化はpH値で年間0.0011~0.0024の低下として進行しており、わが国の近傍である北西部北太平洋St. KNOT/K2 (北緯47度, 東経160度) で観測された年平均のpH低下速度0.0024 (Wakita *et al.*, 2013) は9つの観測点の中でも大きな数値であり、酸性化の進行が深刻であることがデータからも示された。

### 3. 海洋生物への影響

現在、地球を脅かす10大ストレスが提唱されている (Steffen *et al.*, 2015)。海洋酸性化についてはまだ安全レベルの範囲内とされているが、生物については種や機能の多様性がすでに危機的領域にあるとされており、酸性化の進行がわずかであっても昇温など他の要素と複合的に飛躍的に影響を及ぼす可能性がある。生物への影響を考える上で重要な指標が炭酸塩飽和度 ( $\Omega$ ) である。1以上が過飽和、1未満が未飽和の状態であることを示す。 $\Omega$ が未飽和になると貝やサンゴなど炭酸カルシウムの骨格を持つ生物が骨格を作りにくくなる上、溶解の恐れがある。では、具体的にはどのような反応が起きているのだろうか？先にも述べたように海洋に  $\text{CO}_2$  が溶解すると、 $\text{HCO}_3^-$  と、 $\text{H}^+$  に変化し、 $\text{H}^+$  濃度が増加していく。海洋には変化するとその変化を元に戻そうとする緩衝作用があり、 $\text{H}^+$  濃度が増えると減らそうと、海洋中の  $\text{CO}_3^{2-}$  と結びつく反応が進み、 $\text{HCO}_3^-$  を作り出す。次に量が減った  $\text{CO}_3^{2-}$  濃度を増やす反応が起きる。それが炭酸カルシウムの溶解で、海洋中に生息する生物の炭酸カルシウム殻の溶解や、海底に化石となって堆積した炭酸カルシウムが溶解するなど、 $\text{H}^+$  濃度を減らす緩衝作用が起きる。以上が、酸性化によって殻が溶解するという一連の反応になる。真っ先に影響を被るとされる生物は微小炭酸塩有殻プランクトン、ホタテ、カキ等の貝類、エビやカニなどの甲殻類などである。微小サイズの炭酸塩有殻プランクトンは、全海洋の80%もの炭酸塩沈降量を占める世界最大の炭酸塩生産生物である。にもかかわらず、海洋酸性化に対する応答を定量的に評価する世界標準的な手法がないため、海洋酸性化に対する影響評価が全く行われてきていない。そこで海洋研究開発機構では東北大学と共同で、炭酸塩有殻プランクトンの海洋酸性化に対する応答を定量的に評価するためにマイクロX線コンピュータトモグラフィーによる炭酸塩殻の骨格密度を計測する手法 (MXCT) を新たに開発してきた (第1図)。この手法は、対象とする生物にX線を照射し、2次元で骨格の空隙率 (CT

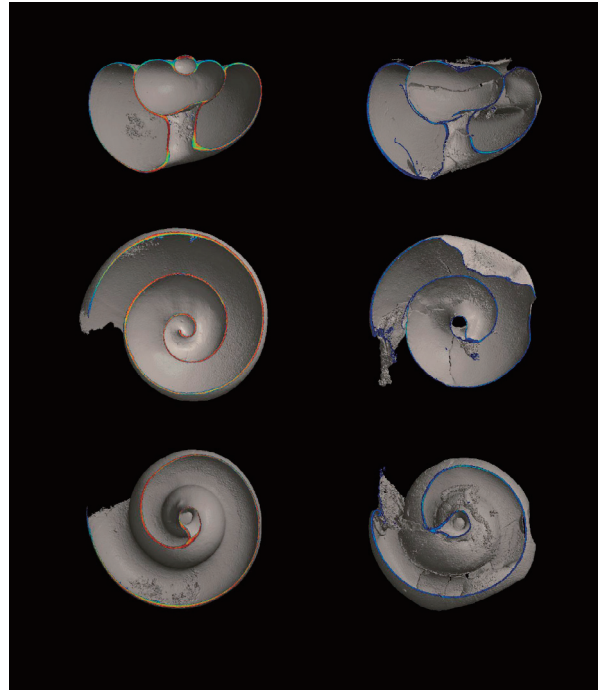
値)を測定し、最終的に1個体全ての2次元データを3次元データにコンパイルして容積を求める。1個体の炭酸カルシウムの含有量をICP質量分析計で求め、CT値と標準物質とから求められた経験式を用いて骨格密度を計算する。この手法により求められたプランクトン生物の炭酸塩骨格密度が現場のpHや炭酸塩飽和度と相関関係があり(木元私信)、海洋酸性化による生物の応答を定量的に評価する手法として確立しつつある(第2図)。我々が研究対象としているプランクトンサイズの炭酸塩生物は、高次の生物の餌となり、食物網を通じて生態系全体に酸性化の影響が及ぶ。水産資源となる魚類など高次生物への影響評価が重要になってくる。



第1図 マイクロX線コンピュータトモグラフィー(MXCT)装置(海洋研究開発機構 木元克典)。

#### 4. 経済的インパクト

南北極や亜寒帯域など冷水塊海域では、海水に二酸化炭素が良く溶け込むことから海洋酸性化の進行が深刻で、2100年にはこの海域の海洋表層が炭酸カルシウム(アラゴナイト)の未飽和海域になると予測される。一方で、熱帯や亜熱帯域では未飽和にはならないまでも酸性化の進行は確実に生じ、その「変化」そのものが生息する生物にとって脅威となろう。世界各地で海洋酸性化のモニタリング観測が始まっており、どこの海域でどの程度酸性化が進行しているのか、その情報を共有し交換するための国際観測ネットワークが構築され(Global Ocean Acidification Observing Network, <http://goa-on.org/>), 4年に一度、国際ワークショップが開催されている。この国際ワークショップでも紹介された海洋酸性化の経済的影響



第2図 西部北極海にて採取された翼足類の骨格の平面図(MXCTで測定)。色が赤いほど密度が高く、青いほど低い。左は健康な個体の骨格。右は溶解が進み、殻がスカスカの個体の骨格(海洋研究開発機構 木元克典)。

は甚大である。ユネスコ政府間海洋学委員会の試算によると、多様な水産資源に加えて観光産業を支えるサンゴ礁海域は3~37.5兆円、魚類は6.5兆円、甲殻類で3.7兆円、貝類では2.4兆円の経済価値を失うとされている。

一方、日本の国内漁業への影響評価はまだ行われていないものの、沿岸域では、海洋生物環境研究所、北海道大学、東京海洋大学、筑波大学、琉球大学、水産研究・教育機構、海洋研究開発機構などが忍路(北海道)、厚岸(北海道)、大間(青森)、宮古(岩手)、館山・御宿(千葉)、下田(静岡)、柏崎(新潟)、瀬底(沖縄)など全国で水中のCO<sub>2</sub>分圧やpH値の定点観測を実施している。沿岸域の大きな特徴は、1日の間でpHやCO<sub>2</sub><sup>2-</sup>濃度が大きく変化することであり、pHの日周変動幅は場所や季節、大雨等の気象イベントや付近の富栄養化など様々な要因によって変わる。現時点で西日本には観測定点がないことから、各沿岸域における定点観測網の充実と、日周変動を含めたpH動態の把握が急務となっている。加えて、貝や魚類などの水産資源に海洋酸性化の影響が及ぶことも一般には知れ渡っていない。国内観測ネットワークの構築と生物への影響評価、養殖漁業を担

う漁業者などへの周知や、海洋酸性化の現状を知りたい人々が知りたいときに直ぐにアクセス可能な情報環境づくりが大切である。

#### 引用文献

- Patra, P.K., Krol, M.C., Montzka, S.A., Arnold, T., Atlas, E.L., Lintner, B.R., Stephens, B.B., Xiang, B., Elkins, J.W., Fraser, P.J., Ghosh, A., Hints, E.J., Hurst, D.F., Ishijima, K., Krümmel, P.B., Miller, B.R., Miyazaki, K., Moore, F.L., Mühle, J., O’Doherty, S., Prinn, R.G., Steele, L.P., Takigawa, M., Wang, H.J., Weiss, R.F., Wofsy, S.C. and Young, D. (2014). Observational evidence for interhemispheric hydroxyl-radical parity. *Nature*, **513**, 219–223.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Rayner, B. and Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, **347**, 1259855.
- Wakita, M., Watanabe, S., Honda, M., Nagano, A., Kimoto, K., Matsumoto, K., Kitamura, M., Sasaki, K., Kawakami, H., Fujiki, T., Sasaoka, K., Nakano, Y. and Murata, A. (2013). Ocean acidification from 1997 to 2011 in the subarctic western North Pacific Ocean. *Biogeosciences*, **10**, 7817–7827.

## II. 気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響

### II-3. 海生研における海洋酸性化研究

林 正裕

#### 1. はじめに

近年の気候変動に伴い、海生研では従来の温排水研究や海洋環境放射能調査などに加え、気候変動関連の研究に着手している。ここでは、海生研がこれまでに実施してきた海洋酸性化の研究概要を紹介する。海生研では、大きく分けて沿岸海域の実態調査と生物影響調査を実施している。

#### 2. 沿岸海域の実態調査

外洋海域においては、海洋酸性化の観測を世界各国で実施しており、日本でも気象庁が30年以上に渡って北西太平洋の表面海水中のpHを長期観測している(気象庁, 2018)。それによると、観測点の表面海水中のpHは、10年あたり約0.02低下しており、海洋酸性化の進行が明確に観測されている。

一方、沿岸海域においては、pHの長期観測例が乏しく、海洋酸性化の実態が把握されていない。海生研では、取水している海水のモニタリングを毎日実施しており(中央研究所では1982年から、実証試験場では1992年から継続している)、沿岸海域の長期の水質データが記録されている。そこで、これらのデータが沿岸海域における海洋酸性化の実態把握に適用できるのではないかと考えて、データを解析した。その結果、解析途中ではあるが、沿岸海域でも海洋酸性化が進行している可能性が示された。

#### 3. 生物影響調査

海洋酸性化は、海洋生物や海洋生態系に対して様々な影響を及ぼすことが懸念される。海洋酸性化がもたらす生物影響については、大きく分けて石灰化への影響と代謝への影響の二つが考えられる。石灰化への影響については、前項で原田氏が詳しく説明しているので、ここでは割愛し、生物の代謝への影響について説明する。

水生動物(水呼吸をする動物)では、環境と体内のCO<sub>2</sub>分圧差が、陸上動物(空気呼吸をする動物)と比べて小さくなっている(水や空気のCO<sub>2</sub>分圧は約380 μ atm, 水生動物の体液のCO<sub>2</sub>分圧は1,300–5,300 μ atm, 陸上動物の体液のCO<sub>2</sub>分圧は20,000–53,000 μ atm)。このため、水生動物では、環境のCO<sub>2</sub>分圧の上昇により環境水と体液間におけるCO<sub>2</sub>分圧勾配が、陸上動物に比べて逆転し易

く、環境水中からCO<sub>2</sub>が体内に拡散するようになる。生物の体内では、代謝によってCO<sub>2</sub>は絶えず産生されているため、体内でのCO<sub>2</sub>産生と環境水へのCO<sub>2</sub>排出が新たな平衡に達するまで体液のCO<sub>2</sub>分圧は上昇を続ける。体内でのCO<sub>2</sub>分圧の上昇は、海水と同様に体液を酸性化させ、アシドーシス(acidosis)と呼ばれる体内環境異常を引き起こす。

海洋酸性化の生物影響について、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の報告書(AR5: IPCC, 2014)で既往知見がまとめられ、生物群別の影響について分析された(Wittmann and Pörtner, 2013)。その分析によると、海洋酸性化に対して石灰化生物が一般的に脆弱であり、中でも軟体動物、棘皮動物および造礁サンゴ類は酸性化に対して比較的感受性が高く、甲殻類の感受性は低いとされている。また、初期生活期における脆弱性が高い例がある。

海生研においても海洋酸性化の生物影響調査に着手したが、既往知見を調べると水産有用種の知見が乏しいことから、日本で重要な水産有用種への影響を中心に調査を開始した。

#### 1) 魚類に対する調査

現在、海洋酸性化の魚類への影響評価は、熱帯性小型魚類の行動を対象とした研究に偏っており、実験例不足で中長期的な影響が不明とされている(Wittmann and Pörtner, 2013)。また、繁殖や成長への影響といった慢性的影響については未だ知見が乏しく、その充実が望まれている。そこで、我々は魚類の繁殖に対する海洋酸性化影響を明らかにすることを目的として、シロギス*Sillago japonica*及びマダイ*Pagrus major*を用いた繁殖試験を行った。

シロギスを、対照海水(CO<sub>2</sub>分圧が約530 μ atm)から最高でCO<sub>2</sub>分圧を4,100 μ atm(≒pH 7.1)まで上昇させた試験海水中で繁殖させた結果、最高の4,100 μ atmでも産卵が確認され、産卵回数や産卵数に対してCO<sub>2</sub>分圧の変化による有意な違いは認められなかった。また、産卵で得られた受精卵の正常発生率及び孵化率は、ともに90%以上と高く、CO<sub>2</sub>分圧の変化による有意な差は確認されなかった。一方、マダイでも同様の繁殖試験を行った結果、2,000 μ atm(≒pH 7.5)で孵化率の有意な低下が認められたことから、酸性化に対する感受性はシロギスに比べてマダイの方が高いことが推察された。このことから、種によって酸性化に対する感受性が変わることが示唆された。

次に、魚種の繁殖に及ぼす酸性化と温暖化の複

合影響を調べた。酸性化単一影響の試験と同様に試験海水のCO<sub>2</sub>分圧を上昇させるとともに、それぞれのCO<sub>2</sub>分圧に対し水温26℃と28℃の試験区を設けた。その結果、2,000 μ atmの28℃試験区において、シロギスの産卵は影響を受けなかったが、受精卵の正常発生率は有意に低下した。このことから、シロギスの繁殖は、酸性化単一では影響が出ないレベルであっても、水温上昇が加わると影響を受けることが分かった。現在、マダイの繁殖についても同様の複合影響試験を実施しているが、マダイでも複合影響を被る傾向が示されている。

## 2) 石灰化生物に対する調査

海洋酸性化の貝類への影響に関する既往知見は充実しているが、卵期や幼生期といった初期生活史段階への影響を扱った研究例が大部分を占める。また、地球規模で考えた場合に酸性化によって石灰化生物に与える影響がより早い時期に生じると考えられているのが高緯度海域であるが(Orr *et al.*, 2005), 貝類に限らず、冷水域に生息する生物に対しての知見はまだ不足している。そこで、我々は冷水域にも生息する水産有用種であるウバガイ *Pseudocardium sachalinense* (別名: ホッキガイ) 稚貝とバイ *Babylonia japonica* 成体の成長に対する酸性化影響を調査した。

ウバガイ稚貝(当歳貝)の試験では、試験海水を対照海水(CO<sub>2</sub>分圧が約400 μ atm)から最高でCO<sub>2</sub>分圧を1,200 μ atm (≒pH 7.7)まで上昇させ、20週間の成長を調査した。その結果、ウバガイ稚貝の重量、殻長、殻高、殻幅、殻重量及び軟体部重量に有意な変化は認められなかった。しかし、CO<sub>2</sub>分圧800 μ atm以上において、試験期間中に成長した殻の厚さが薄くなった。また、バイの80日間の試験の結果、CO<sub>2</sub>分圧が5,700 μ atm以上で殻皮の維持に影響を及ぼすことが確認された(Kita *et al.*, 2013)。

貝類において、殻の形成が不完全になると、物理的な衝撃や捕食に対する耐性が低下するため、自然界では生存が危ぶまれ、資源量の減少に繋がる可能性がある。また、海生研では国立研究開発法人産業技術総合研究所と共同で、海洋酸性化のサンゴ類への影響に関する研究を進めており、酸性化はサンゴ類の成長に対して負の影響を及ぼしていることが確認されている。

## 4. 種苗生産現場での対策例

海生研では、供試生物の健全性を担保するため、多くの生物を独自に種苗生産して試験に供してい

るが、近年、シロギスの種苗生産において仔魚の生残率が低下する事例がしばしば生じた。その原因については、現在調査中ではあるが、生残率が低かった時において、仔魚養成水槽への供給水のpHが通常よりも低い場合があった。そこで、低pH緩和水槽(泡沫分離による有機物除去や強曝気によるCO<sub>2</sub>除去を用いてpHを上昇させる)を設けて、そこから仔魚養成水槽へ海水を供給したところ、仔魚の生残率の低下を防ぐことができた。このことは、海洋酸性化が種苗生産に影響を及ぼす可能性を示唆しており、早急な実態解明を行い、海洋酸性化が原因であるならば更なる対策の検討が必要である。

## 5. おわりに

日本の沿岸海域における海洋酸性化の実態を正確に把握するためには、海生研の調査だけでは当然不十分である。今後は、全国規模で高精度の観測が必要である。また、海洋酸性化の生物影響に関しては、我々の調査でもその必要性が示されたように、今後は複合影響や慢性影響の調査が重要になってくる。しかし、これらの調査は、技術的に困難な部分も多く、まずは調査手法の確立が急務である。

## 引用文献

- IPCC (2014). Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Meyer, L.A.). IPCC, Geneva, Switzerland, 1-151.
- 気象庁 (2018). 表面海水中のpHの長期変化傾向(北西太平洋). <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a.3/pHtrend/pH-trend.html> (2018年7月2日アクセス)
- Kita, J., Kikkawa, T., Asai, T. and Ishimatsu, A. (2013). Effects of elevated pCO<sub>2</sub> on reproductive properties of the benthic copepod *Tigriopus japonicus* and gastropod *Babylonia japonica*. *Mar. Pollut. Bull.*, **73**, 402-408.
- Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R.M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R.G., Plattner, G.-K., Rodgers, K.B., Sabine, C.L.,

Sarmiento, J.L., Schlitzer, R., Slater, R.D., Totterdell, I.J., Weirig, M.-F., Yamanaka, Y. and Yool, A. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, **437**,

681-686.

Wittmann, A.C. and Pörtner H.O. (2013). Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nat. Clim. Change*, **3**, 995-1001.

### Ⅲ. 気候変動緩和策としての海洋利用とその課題

#### Ⅲ-1. CCSと環境影響評価

吉川貴志

##### 1. はじめに

気候変動の対策には、「緩和策」と「適応策」がある。緩和策とは、気候変動の直接の原因である温室効果ガスそのものを削減するような、根本的な対策を指す。例えば、省エネルギーや再生可能エネルギーの導入といった化石燃料を使わない対策や、大気中に放出してしまった二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を植林等の手段によって吸収する対策、そして、CO<sub>2</sub>を大気へ放出することなく回収し、地中深くに貯留するCO<sub>2</sub>の分離・回収・貯留(Carbon dioxide Capture and Storage ; CCS)等が、この緩和策として挙げられる。他方、適応策とは、すでに生じている影響に適応していくものであり、渇水や洪水への対応、熱中症の予防や、高温に強い農作物を作出することなどを指す。こうした気候変動対策は、持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals ; SDGs)の一つとして、193の国連加盟国が全会一致で採択しており、注力すべき優先課題となっている。なお、我が国の対策については、「気候変動の影響への適応計画(2015年11月27日閣議決定)」や「地球温暖化対策計画(2016年5月13日閣議決定)」として公表されている。本稿では、気候変動緩和策として海洋を利用するCCSと、その環境影響評価について現状を報告する。

##### 2. 日本のCCSプロジェクト

CCSとは、製油所や発電所など大規模なCO<sub>2</sub>排出源からCO<sub>2</sub>を分離・回収し、地中深くに貯留する技術である。日本においては、CO<sub>2</sub>を海底下1,000m以深の地層に圧入する、「海底下CCS」の実証試験が進んでいる(経済産業省, 2016)。パリ協定のいわゆる「2°C目標」を達成するためには、2040年には2,500のCCS設備が稼働している必要があるとも言われている(Global CCS Institute, 2017)。そしてCCSによるCO<sub>2</sub>排出量削減は、電力業界では再生可能エネルギーと同様に、主要なオプションであると位置づけられている(OECD/IEA, 2017)。

CCSのプロジェクトは世界中に存在しており、17の大規模な商用CCS設備が稼働している(Global CCS Institute, 2017)。日本においては、2003年から2005年にかけて新潟県長岡市において、総量1万トンのCO<sub>2</sub>を陸域で圧入した実証プロジェクト

が実施された。次いで、2016年からは、北海道苫小牧市において、10万トン規模(実用規模の10分の1規模)の海底下へのCO<sub>2</sub>圧入が、実証試験として行われている(以下、「実証試験」という)。実証試験は、経済産業省が事業主体であり、2015年に設備建設、2016年から2018年にかけて監視を行いながら海底下へCO<sub>2</sub>を圧入し、圧入終了後も継続して監視を行うものである。この圧入試験と同時並行で、安全性評価等の研究開発や、CO<sub>2</sub>貯留ポテンシャル調査も実施されており、国は2020年頃の技術実用化を目指している(経済産業省, 2016)。

##### 3. 海底下CCSの環境影響評価

大規模な事業を実施する際には、「環境影響評価法」に基づいて、事業実施前に環境への影響を評価する、環境アセスメント制度がある。同法では道路、ダム、鉄道、空港、発電所など13種類の事業を評価の対象としており、事業者は、事業の実施、工事中・供用中の影響を事前に予測評価しなければならない。これに対して、海底下CCSは、「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」(海洋汚染防止法)に基づいて、環境影響評価を行う。

海底下CCSは、圧入したCO<sub>2</sub>が海底下から漏れ出てこない場所を選定して実施することが前提となる。しかし、海洋汚染防止法に基づく海底下CCSの環境影響評価では、「CO<sub>2</sub>が海底下から海洋へ漏出する」という仮説を立て、海洋環境への影響を評価する必要がある。ただし、海水中へのCO<sub>2</sub>漏出があった場合においても、海洋環境の保全に障害を及ぼすおそれがないこと、すなわち、万が一漏出しても、影響の範囲が限定的で、二次的な影響を引き起こさない、あるいは生じる変化が軽微と推定されることが求められる。影響が大きいと予測される場合は、環境に配慮するよう計画の見直しが求められることになる。つまり、環境影響評価法と同様の「環境保全」の考え方が、海底下CCSの環境影響評価においても適用されているといえる。

事業実施前の環境影響評価を中心に、CCS事業着手までの手順を以下に述べる。大まかな手順としては、①事前調査、②潜在的影響評価、③申請書作成、④許可申請、⑤CO<sub>2</sub>圧入と監視実施(事業着手)、と整理できる。

まず、事前の現地調査で、監視のベースラインとなるデータを取得する(前述の手順①)。そして、机上でのシミュレーション等を経て、「万が一の漏出」という潜在的な影響評価を行う(②)。



これらの結果をもって、環境大臣に対する事業の許可申請書を作成する。許可申請にあたっては、指針（環境省、2008）を参照しつつ準備を進めていく。実証試験では、この指針が例示する事前評価項目例（第1表）を参考に、水質、底質および海洋生物の一部について四季調査を実施し、その他文献調査を行って、ベースラインデータを整備した。②の潜在的影響評価を実施した後は、申請書を作成して許可申請を行うこととなる（③および④）。

第1表 事前評価項目の例\*

環境要素等の区分	調査項目
水環境（水質）	二酸化炭素濃度（関連指標；全炭酸，アルカリ度等），水素イオン濃度（pH），有害物質の濃度等
海底環境（底質）	二酸化炭素濃度（技術的に困難），有害物質の濃度
海洋生物	浮遊生物，魚類等遊泳動物，海藻・草類，さんご類，および底生生物の生息状況
生態系	藻場，干潟，さんご群集，脆弱な生態系，産卵・生育場，熱水生態系等特殊な生態系
海洋の利用等	レクリエーション，海中公園等の保全区域，漁場，航路，海底ケーブル，資源探査・掘削

\*環境省（2008）

申請書には、事前評価結果に関する書類、その他、省令で定める書類を添付しなければならない。これらの許可申請書等の記載要領は、告示で示されている（環境省、2007a, 2007b）。なお、許可申請では、環境影響評価法に見られる「配慮書」、「方法書」、「準備書」、および「評価書」に相当するステップがなく、今のところ必要な書類を整備すれば、申請が可能である。ただし、実証試験では、必要書類の内容を事前に環境省と協議する必要があった。

実証試験においてこれら一連の手順に要した期間は、①と②が約1年間、③と④で約1.5年間、公告縦覧が1ヶ月であった。

#### 4. 海洋環境の監視計画

監視計画全体は、圧入ガスに関する監視、地層内に関する監視、そして海洋の監視から成る。また、監視段階は、監視結果等の状況により次のよ

うに移行するシステムである。

通常は「通常時監視」を実施し、CO<sub>2</sub>漏出のおそれが生じていることを類推させる異常を検出した場合、確認の調査を行う。それでもなお同様の結果を得た時は、CO<sub>2</sub>の圧入を停止して「懸念時監視」を実施する。懸念時監視の、状況を的確に把握する調査により、漏出のおそれがあると判断された場合、「異常時監視」に移行する。異常時監視では、具体的な漏出防止措置（あるいは影響緩和措置）を検討する観点からの詳細な監視を実施することになる。いずれのケースにおいても、漏出のおそれが解消されていけば、すなわち、漏出していないことが確認されれば、通常時監視に戻る。

#### 5. 監視の実態

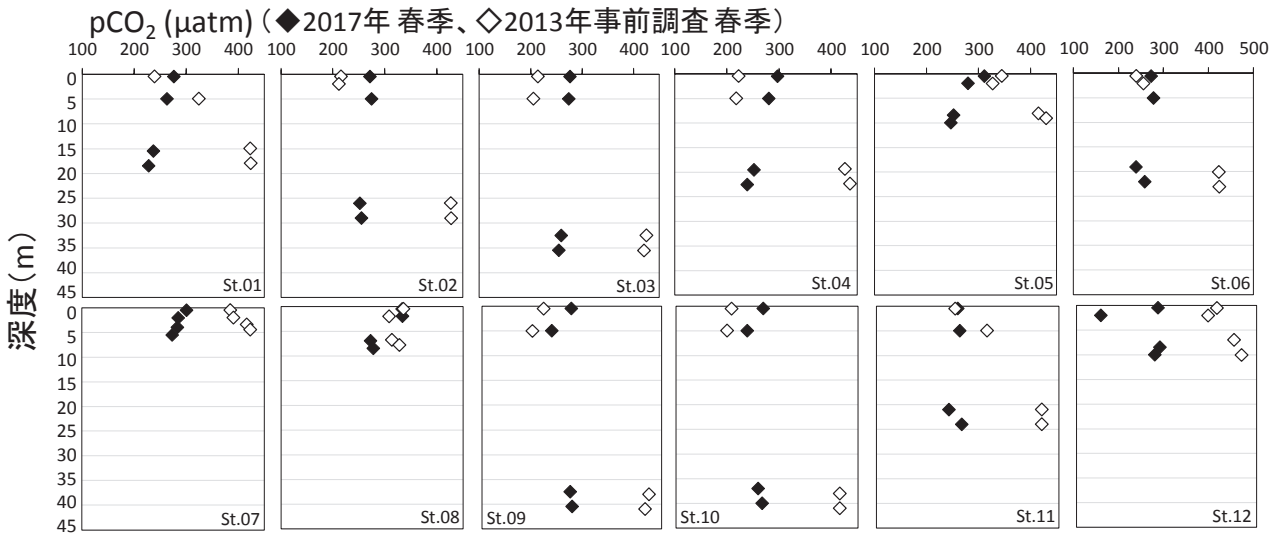
監視は、海洋環境調査によって、CO<sub>2</sub>貯留海域における環境影響が事前の予測・評価の範囲に収まっていることを確認するものである。この業務は経済産業省が日本CCS調査株式会社に委託しており、海生研では、海洋環境調査と監視報告（監視計画に従って、事業者である経済産業省が環境大臣へ報告するまで）の一部を、平成28年度より担当している。

監視では、北海道苫小牧西港沖、約5km四方のエリアに設定してある12調査測点を対象に調査を行っている。調査測点の最大水深は約40mである。

監視結果の例を幾つか紹介する。2017年春季の二酸化炭素分圧（pCO<sub>2</sub>）を第1図に示す。事前調査と比較すると、底層のpCO<sub>2</sub>は低いことがわかる。しかしながら、2016年の春季、2017年の夏季、および2018年冬季では、事前調査よりも高いpCO<sub>2</sub>を観測しており、確認のための調査を実施した。

生物監視の例として、メガロベントスの監視について述べる。ここでは、遠隔操作無人探査機を使った観察と、苫小牧特産の水産物であるウバガイを対象とした貝けた網調査を組み合わせ、メガロベントスの分布状況を調べている。事前調査では、ウバガイ、カシパン類、キヒトデ、キンコ、クモヒトデ類、ゴカイ類、ニッポンヒトデ、ヒダベリイソギンチャク、およびホタテガイを主要種としており、2017年夏季の調査では、すべての主要種を確認した。

実証試験では、事前調査を各季節1回ずつ実施したのみであるが、監視によってデータを蓄積していくことにより、ベースとなるデータの年変動や日変動などがより明らかになってくると期待される。



第1図 二酸化炭素分圧の観測結果例。

前述のとおり、通常時監視で漏出のおそれが生じていることを類推させる異常を検出した場合には、確認調査を行う。この確認調査の第1段階である「現地概況調査」の内容を以下に述べる。

この調査では、漏出懸念範囲の絞り込み、特定を試みる。まず、pCO<sub>2</sub>が高かった調査測点で、採水の再調査を実施する。そして、気泡確認調査とセンサー調査を実施する。気泡確認調査は、pCO<sub>2</sub>が高かった調査測点を中心とした1km四方のエリアについて、サイドスキャンソナーを曳航し、海底下からCO<sub>2</sub>が気泡となって漏出してないかを調べるものである。また、センサー調査は、気泡確認調査と同じエリアについて、底層のpH分布状況を確認するものである。このような調査データに、地層内データ等をあわせて、漏出懸念点の絞り込みや特定ができるかについて環境省が総合的に判断する。なお、これまで実施した現地概況調査では、いずれも「漏出のおそれなし」と環境省が判断し、通常時監視を継続する結果となった。

## 6. おわりに

これまで実証試験の海洋監視を実施した実績から言えることをいくつか述べる。まず、ベースラインデータの不足が挙げられる。監視結果を正しく評価し事業を進めるためには、事前調査データの拡充が必要である。CO<sub>2</sub>の圧入前に、ベースとなる水質の変動幅等が十分に把握できるようなデータを保有することが望ましい。ベースデータの拡充に関して言えば、事業者以外の調査・監視データも共有できれば、非常に効率的である。海洋環境調査は費用も時間もかかり、個々のデータ

はいずれも大変貴重なものと言える。このことから事業者の調査以外で使えるデータがあるならば、それらを集約して活用することで、当該海域の性状の理解を深めることができる。現行の許可申請指針は、知見の集積や技術の発展によって改訂していくものとされている。改訂にあたっては、実証試験のプロセスから、例えば影響評価項目の選定、実施頻度、監視段階の移行基準の設定方法等について、蓄積した監視データ等をもとに、科学的な検討が加えられるものと思われる。

## 引用文献

- Global CCS Institute (2017). The global status of CCS: 2017, Australia. 1-82.
- 環境省 (2007a). 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可等に関する省令 (平成19年環境省令第23号).
- 環境省 (2007b). 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可の申請に関し必要な事項を定める件 (平成19年環境省告示第8号).
- 環境省 (2008). 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可の申請に係る指針 (平成20年1月).
- 経済産業省 (2016). 我が国のCCS政策について. [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso\\_nenryodenchi/co2free/pdf/006\\_02\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/co2free/pdf/006_02_00.pdf) (2018年8月31日アクセス)
- OECD/IEA (2017). Energy technology perspectives 2017.

### Ⅲ. 気候変動緩和策としての海洋利用とその課題

#### Ⅲ-2. 洋上風力発電と環境影響評価

三浦雅大

##### 1. はじめに

最後の演題として、CCSとともに温暖化ガス削減のための対策の一つである風力発電のうち、近年建設が増加している洋上風力について、その現状と環境影響評価について概説する。

##### 2. 風力発電とその世界的動向

2015年のパリ協定で「産業革命前からの世界の平均気温上昇を2℃未満に抑える」と言う目標が示された。その目標を達成するためにIEA(国際エネルギー機関)が提示したシナリオ(IEA, 2017)における今後の電源構成の変化を見ると、世界の全電源発電量の3%程度を風力発電に転換し、2060年には全体の約20%にする必要があるとされている。

これまでの風力発電の動向を見ると、風力発電はまずヨーロッパで発展したが、2000年代から次第にアメリカ、中国の導入量が増大し、近年は特に中国の伸びが著しい。世界全体の累積導入量は継続的に増加し、2017年には500GWを突破した(GWEC, 2018)。一方、年間導入量は近年鈍り始めており、その理由の一つとして、風力発電所を建設する陸上の適地が残り少なくなってきたことが挙げられる。なお、日本の風力発電導入量は、世界の風力先進国に比べて非常に少なく、2017年における電力容量(3,400MW)は世界で19番目の値である。

##### 3. 洋上風力発電の世界的動向と日本の現状

洋上風力は、まだ多くの建設スペースが残されているとともに、陸上に比べて風が安定して吹く、風車の大型化が可能等のメリットがある。着床式と浮体式に分けられ、水深50mまではタワーを海底に固定する着床式が一般的で、これが現在の主流である。一方、浮体式の方は、現在洋上風力全体の導入量に対して0.1%程度に過ぎないが、2017年世界初の商用浮体式洋上風力発電所であるイギリスのHywind Scotlandが稼働したように、浮体式の導入も始まっており、沖合への設置が可能となれば、ますます建設スペースが広がることになる。

世界の洋上風力発電累積導入量は継続して伸び続けており、年間導入量は2016年に一旦減ったが、

2017年には持ち直してこれまでで最大の導入量となった。大規模な洋上風力の導入は、風力発電の先進地域であるヨーロッパが中心となっており、発電量の多い洋上風力発電所の上位10事業はヨーロッパ諸国のもので占められている。

日本では、ごく沿岸に位置する小規模のもの、あるいは経済産業省、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、環境省主導の実証事業があるのみで、ヨーロッパのような大規模な洋上風力発電所はまだ建設されていない。しかし、数万~100万kW級の建設計画が、東北地方の北部を中心に各地で進行中である。日本政府も海洋基本計画やエネルギー基本計画において洋上風力の導入を促進する意向を示しており、そのため、日本における洋上風力導入の障害の一つとなっている「海域の利用のルールがしっかりと法制化されていない」と言う問題を解消するため、港湾法の改正等による海域占有許可制度の創設や、審査の合理化等が進められている。このような法整備等にも後押しされ、今後、我が国でも洋上風力の導入が進むと考えられる。

##### 4. 洋上風力発電に係る環境影響評価調査

以上のように、地球温暖化対策の一つとして洋上風力は今後さらに発展して行くと考えられるが、その一方で、洋上風力発電が海域環境や海生生物に与える影響が懸念される。わが国の環境影響評価法では、出力1万kW以上の風力発電所を第一種事業として、環境影響評価の手続きを行うよう定めている(出力0.75~1万kWの第二種事業については、知事意見を勘案して環境影響評価を実施すべきか否かを主務大臣が個別に判定する)。また、風力発電に係る環境影響評価の項目については、経産省の「発電所の設置又は変更の工事の事業に係る環境影響評価の項目並びに当該項目に係る調査、予測及び評価を合理的に行うための手法を選定するための指針、環境の保全のための措置に関する指針等を定める省令」の別表第五に参考項目が示されている(ただし、陸上と洋上の区別はしていない)。風力発電については、火力発電所のような稼働に伴う排ガスや排水がないので、これらに関わる参考項目が省かれている一方、風力発電に特有な項目として超低周波音、風車の影が挙げられている。ただし、これらは人間の生活に係る項目であり、洋上風力の場合のごく沿岸に立地するケースを除けば人の居住区から離れているため、このような近隣住民への影響は、陸上風力と比べて少ないと考えられる。

野生生物への影響を考えた場合、まず懸念されるのは、風車への鳥類やコウモリ類の衝突、いわゆるバードストライクであろう。これは、陸上・洋上共通の問題であるが、洋上の場合、海鳥類の生態やコウモリ類の海上の利用状況等に関する知見が不足していること、実際の影響を見るための死骸調査が難しいこと等が、影響の予測・評価や実態把握を困難にしている。

海中に生息する生物への影響としては、工事や施設の存在・稼働による水中騒音や濁りの発生、海底地形の改変、流れの変化等による生息環境の悪化や行動阻害等が想定される。ただし、洋上風力では、風車等の施設が広い間隔で離散的に配置されるため、事業実施区域は広大であるが、その内の施設の占める面積は非常に小さく1%未満に過ぎない。そのため、濁りや海底地形の改変、流れの変化等は、風車のタワー等の近傍に局所的には発生するが、事業実施海域全体で見ればそれほど大きな変化はないものと思われる。

これらに対して、水中音は発生源から広く伝播するため、工事や風車の稼働により発生する水中騒音が、海生哺乳類・爬虫類、魚類等の聴覚の発達した生物群に与える影響は留意されるべきものであろう。実際に、NEDOの銚子沖洋上風力発電実証事業において、イルカ的一种であるスナメリの出現個体数が、工事による水中騒音発生期間中に減少し、工事終了後に回復したことが報告されている(NEDO, 2015)。一方、風車の稼働により発生する水中音は、建設工事によって発生する騒音に比べれば微弱なものであるが、建設後の長い期間にわたって発生するため、慢性的な影響を及ぼす可能性がある。

水中音の影響については、現在行われている環境影響評価では、発生する水中騒音の音圧レベルと音源からの距離の関係、海域における背景雑音の大きさ、対象生物の聴覚閾値のデータに基づき、対象生物に聴こえる音圧レベルの騒音が発生源からどのくらいの範囲まで伝わるかを求めることによって、影響の大きさを評価するという方法例がある。ただし、この方法にはいくつか検討の余地があり、その一つは、音圧レベルによっては、水中騒音が対象生物に聴こえてはいても特に影響は生じないケースも考えられることから、影響を過大評価してしまう可能性があることである。

海生研では、現在、水中音の魚類への影響予測・評価のためのデータとして、どの程度の音圧レベルで魚類の行動への影響が現れるかについて実験を行っている。マダイ稚魚を100Hzの水中音(風

力発電が稼働した場合の水中音は100 Hz 前後にピークがあると言われている)に暴露したところ、140 dB re 1  $\mu$  Paの音圧レベルで曝露開始時に摂餌行動が一時的に抑制されることが確認された(島ら, 未発表)。このような行動に影響する音圧レベルに関する知見が集積されれば、より精度の高い影響予測・評価が可能になると思われる。

## 5. おわりに

環境省が立ち上げた「洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会」の報告書(環境省, 2017)では、洋上風力の環境影響評価項目を整理しているが、その選定理由が「現時点では環境影響の程度が不明確であるが、当面は評価項目として選定する」となっているものが多い。このことから、まだ大規模な洋上風力発電所の建設事例のないわが国では、まずは今後建設される洋上風力発電所についてモニタリング調査、事後調査を実施し、各評価項目の影響の有無・程度に関するデータを集積することが肝要と言えよう。これにより、必要な評価項目を絞り込むことによって、環境影響評価の精度も高まるものと期待される。

また、影響予測・評価のための基礎的な知見として、どの程度の環境変化で生物への影響が認められるかに関するデータを実験等により集積することも大事である。ただし、有用なデータの取得の前段階として、有効な実験・調査手法の開発も必要であり、水中音影響を例にとれば、音は水槽壁面や水面に反射して強め合ったり、打ち消し合ったりするので、試験水槽内に均一の条件を作り出すことが難しく、試行錯誤で実験を進めているのが実態である。このように、洋上風力の環境影響評価に関しては、必要な知見が極めて不足している状況であるため、海生研も引き続き洋上風力発電の環境影響評価に資する調査研究に取り組んで行く所存である。

## 引用文献

- International Energy Agency (IEA) (2017). Energy Technology Perspective 2017, IEA Publications, Paris, France, 1-438.
- Global Wind Energy Council (GWEC) (2018). Global Wind Report-Annual Market Update 2017, GWEC, Brussels, Belgium, 1-69.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2015). 着床式洋上風力発電の環境影響評価

手法に関する基礎資料 (第一版). <http://www.nedo.go.jp/content/100758586.pdf> (2017年7月1日アクセス)

環境省 (2017). 洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会報告書. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/105434.pdf> (2017年7月9日アクセス)

#### IV. 総合討論：海洋における気候変動緩和策実施とその課題

座長：三浦正治

パネリスト：喜田 潤・桑原久実・原田尚美  
林 正裕・吉川貴志・三浦雅大

##### 座長

総合討論のテーマは「海洋における気候変動緩和策実施とその課題」です。工学的な課題や政策的な課題もありますが、今日は、海洋生物や海洋環境について議論したいと思います。

まず、最大漁獲可能性が赤道域と南極海のあたりで減少するという予測でした。赤道域だと海洋生物は中緯度に移動すれば何とか生き残れると思いますが、南極海だと、もう逃げる場所がないのではと思いますがどうですか。

##### 喜田

おそらく逃げる場所はないと思います。特に南極海では、大きな漁業資源ではないですけれども、オキアミの資源が生態系を支えています。漁獲量がどれだけ減少するかを、絶対量ではなく率で示しましたが、温暖化の影響を受けやすい漁業資源の減少率が大きいという結果になっています。

また、島嶼国で一番大きな問題は、海面上昇による国土の消失です。それにプラスして多獲性魚種の漁獲が減少する。気候変動による影響というのは、複合的にさまざまなものが重なって起こるということになると思います。

##### 座長

藻場の現状、磯焼け対策について、海水温上昇でウニや南方系の魚が増加して、海藻の温度耐性より低い温度でも藻場に影響が出ると理解してよいですか。

##### 桑原

高水温が直接藻場の消失原因になる事例はありますが、現在の水温の上昇では生息水温の上限値を毎年超えて消失することはありません。それよりも、南方性のアイゴやブダイなどの植食性魚類の北上やウニ等の植食動物の食圧が高くなり海藻が食べられ、全国各地で磯焼けが発生しています。

これまで、藻場が消失する要因として、種々の意見がありましたが、海洋の酸性化が磯焼けに影響していると言うものは、今のところありませ

ん。我々の水研機構では、藻場回復を行う場合、海藻の生えない制限要因を特定して、その要因の除去・緩和に努めることが重要と考えています。海藻を実海域に移植して、植食動物の食害にあわないようにケージで囲う区と囲わない区を設けて実験を行いました。ケージで囲った区では海藻が生育しましたので、栄養塩、水温、塩分等の水質は制限要因とは考えられず、囲わなかった区で海藻は消失しましたので植食動物の食害が考えられました。このような現地試験は全国的に実施され、藻場が回復しない主要因は植食動物の食害であることがわかりました。

##### 座長

地球温暖化というと南から進むという印象があるのですが、海洋酸性化は北から進むということでしたが、その理由は何ですか。

##### 原田

端的には海水温が低いということがあります。気体は水温が低い方が溶け込みやすいということが、第1の理由です。また、極域の場合は、海水が融け出して淡水が増加しているということも、もう1つの大きな要因になっておりまして、希釈の効果といえますか、よけい酸性度を高める二重の効果になっています。

##### 座長

飼育海水のpHを上げると種苗生産が上手くいくという話がありましたが、プロテインスキマーを使うということはpHを下げている要因はCO<sub>2</sub>だけではないということですか。

##### 林

そうです。pH低下には有機物の影響とか富栄養化の影響などもあり、そういうのを除去するためにプロテインスキマーを使用しています。CO<sub>2</sub>自体を飛ばしているのは強曝気ですが、このまま大気中のCO<sub>2</sub>がどんどん上昇していけば、当然曝気では追いつかなくなるので、将来的にはアルカリを添加するなど、根本的に海水を作るというようなことも必要かと思っています。特に、仔魚の時期は環境の変化に弱いので、その弱い時期に注意する必要があります。

##### 座長

CCSの監視調査で、通常時監視から確認調査な

どに移行する状況というのは、事前のベースライン調査で把握されたCO<sub>2</sub>濃度を通常時監視で超えた場合ということですか。

### 吉川

大まかに言うとそういうことになります。実際には事前に調べたCO<sub>2</sub>濃度、酸素濃度のデータセットから基準線を引いて、それを超えた場合に確認調査等へ移行するわけですが、事前に得られているデータは限られたものですので、判断が難しくなります。

現段階では実証的な事業という位置づけで調査項目も多岐にわたって実施されているように思います。この実証事業の中でCO<sub>2</sub>漏洩を判断する基準の見直しなども提案したいと思っています。

### 座長

洋上風力の環境影響評価について、経産省の手引きと環境省の基本的な考え方から見て、今後、水中音の影響評価の開発が必要という話でしたが、洋上風力で懸念されるのは水中音だけですか。

### 三浦

他にはバードストライクという大きな問題があります。それから工事に伴う水質や底質変化、施設の存在による流れの変化があります。流れの変化があれば、それに伴って底質や水質も変化する可能性があります。

洋上風力の場合は、これから予定されている大規模なものと、海上に100本位のタワーを建てたりします。このタワーをローター径の3倍位になるような間隔で作りますので、事業実施区域は非常に広がります。ただ、そのうち発電施設が占有する面積は事業実施面積に比べると非常に小さく1%未満だと思います。それがさらに分散的に配置されるということを考えて、流れや底質の変化が発生しても、局所的なものになるのではないかと思います。ただ局所的とは言っても、全く影響がないわけではないので、そこはしっかり調査をして、影響が少ないなら少ないなりのデータを取って、事例が積み重なってきたら、これはやっぱり影響がないから調査項目から外しても良いといった検討ができればよいと感じています。

### 座長

バードストライクあるいはバットストライクで

は衝突して死ぬので、影響があるかもしれませんが、クジラや魚はそれほど心配しなくてはならないものではないでしょうか。

### 三浦

鳥では実際に衝突して死ぬ個体があります。魚やクジラでは、そこまでの影響はないと思いますが、なぜ調査されているかという、海生生物の中でも聴覚が発達している生物群であるので、水中音の影響を受ける可能性があるためです。発表の中でご紹介しましたように、スナメリに対して工事の際の水中音が影響したという実例があります。また洋上風力の稼働後に発生する低周波音の影響については、これまではそれによって大きな影響が報告された例はないと思います。ただ日本の場合、洋上風力が先行しているヨーロッパとは海域特性が違いますし、生息している生物も違う。そういう意味では、その影響についても注視する必要があると思います。

### 座長

ヨーロッパで先行しているという話がありましたが、CCSも世界的に色々な場所で行われていますが、事前のベースライン調査やモニタリング調査は、世界的にはすでに実施されているのではありませんか。

### 吉川

実施されているようです。ノルウェーではセンサーを製作して調査が実施されているようです。我々も装置を海中に設置して連続的なデータを得れば、CO<sub>2</sub>の日変動や季節変動が分かるようになると思います。

### 座長

皆さんにお聞きしますが、今日の話提供では水平的な話が多かったと思いますが、鉛直的な方向、海の深い方向への気候変動の影響というのはどうでしょうか。

### 喜田

二酸化炭素による海洋酸性化はなぜ起こるかという、大気中の二酸化炭素濃度が上昇して、それが海の表面から吸収されるということで、海の表層から伝わってくるということです。ただし、徐々に深い方向に海洋酸性化が進んでいるという現状が、知られてきているところです。その他、

酸素濃度等がありますけれども、それについては原田さんの方が詳しいと思います。

#### 原田

鉛直的な方向というのは、まさに海洋酸性化にとっては実は非常に深刻な状況になっています。今日20分の説明の中で紹介しきれないなと思いましたが、なぜ私たちが北太平洋に観測計を設けているかの理由として、北太平洋というのは全球規模の海洋大循環の最終地点だからです。非常に古い海水が全体的に湧昇してきて、どこで湧昇してきているかというのはまだまだ研究の余地がありますが、そういった古い水塊、水というのは、途中でいろんな有機物を溶け込ませて、最終地点にたどり着いた頃には非常に酸性度の高い水質となります。それが200mとか15mといった亜表層まで上がってきています。カルサイトという、アラゴナイトよりも溶解し難い結晶系の炭酸カルシウムでさえ未飽和な水質状態になっています。それが、場所によっては、もはや200m、150mの水深なのです。

ある種の動物プランクトンは、その水深で生活史を回しているわけですから、非常に深刻です。そういった亜表層の酸性化も、表層からさらにCO<sub>2</sub>を取り込むことによって加速されていきます。酸性化の問題というのは、鉛直的にもかなり深刻な状況になっているのが現状だと思います。

また、温暖化、酸性化で、3つ目のストレスとして貧酸素という問題があります。これも海の深い方からやってくる課題ですけれども、今日の林さんの講演でよくお分かりになったかと思いますが、1つ1つのストレスに対しては、生物はあまり大きく影響を受けない可能性があるのですが、これが2つ3つと重なってくると単にプラスではなくて、掛け算式にドラスティックに影響を受ける可能性があると思います。3つ目の要素として貧酸素というのが、特に日本海の場合ですと、比較的深いところにいい水産資源の漁場とかがあったりしますので、日本の周辺でそういった複数のマルチストレスの影響評価というのは、今後大きな課題になってくるのではないかと個人的には思います。

#### 座長

貧酸素というのは、内湾の海水の汚いところで起こる現象ではないかと素人的には思うのですが、日本海でも深いところから貧酸素が上がって

くるのですか。

#### 原田

有機物の分解によって海水中の酸素が使われてしまって、酸素の供給源は表層にしかないのです。深ければ深いほど酸素濃度が低いということになります。日本海の詳しい状況はわかりませんが、身近な海域として、太平洋側よりは日本海側のほうが貧酸素の影響を受けているのではないかと、海洋循環の仕組みからして、そういうふうだと思います。

成層化という点も、おそらく規模的にはグローバルな規模での話に結び付くかなと思います。ローカルというよりはグローバルにじわじわということだと思います。ただ貧酸素に関しては、まだ非常に深い方での影響ですので、私たちもとっさに生物への影響をどう監視していったらいいのかなというのは、まだ手探りの状況ですけれども、次の計画では確実に、キーワードの一つに貧酸素化というのは入ってくると思っています。1,000mから、500m、200m、表層ぐらいまでのところの水深を考えています。

#### 座長

日本海の1,000mだとベニズワイの生息水深と重なりますね。今後の課題というところですか。

#### 原田

動物プランクトンも結構深くまで潜ります。1,000m近くまで潜っているという種もいるので、我々が対象にしている生物は、そういった水深から亜表層までの200mぐらいまでを生息水深にしている低次生物を対象に考えています。そういった水産資源の餌になるような重要な種も心配です。

#### 座長

今後、温暖化対策を進める上でも海のモニタリングが必要だと思います。モニタリングとして何をすれば良いのでしょうか。

#### 喜田

例えば酸性化の問題であれば一番測りやすいのはpHですが、一般的なpHセンサーの精度では、CO<sub>2</sub>濃度の数~数十 $\mu$  atmという差がなかなか検出できません。そういった精度まで求めるには、全炭酸を調べる必要があります。ただし全炭酸を



測定するには、海水をサンプリングしなければなりません。連続観測が必要であれば、pHやpCO<sub>2</sub>による精度の良いセンサーを求めているかなければなりません。また温度については、高精度のセンサーがありますので、そういったものを使えばよいと思います。海洋酸性化の観測方法については世界的に、こういう方法で、こういうことをしたらいいというマニュアル本が出ていますので、それに従えばよいでしょう。

もう一方で大事になってくるのは、海洋の物理、化学変化に呼応するかたちで、日本の沿岸であれば生物の分布や資源が如何に変化しているかをどのようにとらえていくか。例えば本日、桑原さんがご発表になりましたけれども、生物分布変化を気候変動と合わせて、どのようにモニタリングしていくのか、ストラテジーの構築が必要だと思います。

#### 桑原

海藻や貝等のあまり移動しない生物は、その場所の環境をモニターしており、定点等を設定して、モニタリングしておくべきと考えます。また、漁獲統計データは、漁業を通じて重要なモニタリングデータが得られていると考えられます。しかし、カレイにはいろいろな種がありますが「カレイ類」と1つにまとめられていたり、南方の魚類が北上しても「その他雑魚」に含められたり、水温上昇による魚種変化を把握しにくい状況にあります。漁獲統計データは、温暖化影響のモニタリングといった重要な側面を加えて、今後データの充実が必要と考えます。

#### 原田

酸性化以外のストレスが関与してくるとなると、甲殻類等も比較的深いところでは新たな問題となるかもしれません。JAMSTEC（海洋研究開発機構）としては、どうしても研究対象海域は外洋域が主になってきます。その中でも食物網を支える重要生物である低次生態系、プランクトン類が中心になっていくというのは今後も変わらないと思います。

#### 座長

次にCCSなどの緩和策の影響について議論したいと思います。CCSや洋上風力はCO<sub>2</sub>削減には効果的だと思いますが、それらにはそれ独特の環境影響もあり、懸念の声もあります。あまり懸念ばか

りしていてもなかなか温暖化対策は進まないと思いますが、これはどのようなスタンスで研究を進めればいいでしょうか。

#### 吉川

CCSに関してはとにかく実証事業段階であり、許可申請の中で、CO<sub>2</sub>が漏洩した場合を想定して、どのくらいのCO<sub>2</sub>が出てくるのかといったことをシミュレーションしています。

シミュレーション等で明らかに心配ないと言えればよいと思いますが、現状ではデータがやっぱり少ないという事情があるので、調査を重ねていく必要があると思っています。

#### 三浦

今後のエネルギーミックスの一つのピースとして、洋上風力も増やしていかなければいけないだろうと思います。ただやはり、日本に建てた場合、どういう影響があるかということは未知数だと思うので、そこはしっかりと調査して結果を蓄積していけば、実際はこんな影響があったとか、心配したけれど実はそのような影響はなかったというようなことも分かってくると思います。現段階では、影響把握のための調査をしっかりとやることが必要な状況にあると思います。

#### 喜田

温暖化緩和策は、ヨーロッパ、アメリカでは実用化されており、CCSはアメリカではすでに電力からのCO<sub>2</sub>隔離が陸域で実施されています。三浦さんの発表にありましたように、洋上風力もヨーロッパですでに発展してきています。その中で彼らがどのようにやってきているかというのをいろいろ聞いてみると、一番大事なのは learning by doing, やりながら学ぶということでした。やはりそういう姿勢が最初に必要で、やるかやらないかを最初に決めて、また環境影響評価だけやって事前に懸念を払拭しようとするのではなく、やってみて、ああしよう、こうしようとか、そこから学んでいってやっていく。そういった姿勢も日本でも必要ではないかと思います。

ヨーロッパはすでに洋上風力の経験が長いので、稼働を始めてから7年後に周辺の魚類資源増減への影響がどれくらいあったのかを調べて、減少しているところかむしろ増えているという結果を示した例があります。このような事後モニタリングは重要だと思います。

### 座長

地球温暖化影響に関して、複合影響の話も出ましたが、実験的にはどうですか。

### 林

複合影響になると、やはり実験のレベルが数段上がります。私の研究事例でも、酸性化だけでは影響が出なかったけれども、そこに高水温が加わると影響が出るということもありますし、先ほど言ったような酸性化に貧酸素が加わった場合に、どのような影響が出るのか分かりません。沿岸の場合だと富栄養化が問題になっていますが、富栄養化と酸性化、さらにはそこに温暖化が加わるということになると、その影響は全く分からないので、今後はそういった調査が重要になるだろうと思います。ただ、やはり手法が難しいので、実験手法の検討から始まると思います。また、さらに長期になると影響が出てくるという事例もあります。当然、温暖化や酸性化は短期で終わるものではなくて、今後ずっと続くものなので、やはり長期的な実験というのは必要ではないかと思えます。5年とか10年スパンの予算で研究できるのであれば、非常にありがたいと思えます。

### 座長

今後、海藻のモニタリングも必要という話がありました。モニタリングするとしたら何が重要ですか。

### 桑原

鹿児島の水産技術開発センターでは、南方種の海藻がどのように増加しているか調べています。頻繁に見かけない海藻が多く、本州の研究者も加わり勉強会を開いています。このような藻場を監視するネットワークが全国的に広がることはすばらしいと思えます。

### 原田

最近よく言われているオープンサイエンス、オープンデータという流れもあり、外洋域では、海洋酸性化のグローバルネットワークができています。実は地域ごとにも、例えばラテンアメリカとかウエストパシフィックとか、海洋酸性化研究について連携した地域ごとのコミュニケーションを取るグループというのは一応できてはいます。まだ積極的にオープンにはなっていないのかもしれませんが、グローバルとローカルを結びつけたよう

な形のオープン化というのは、非常に重要になってくるのではないかと思います。

### 喜田

桑原さんと原田さんのお話に加えて、もう1つ大事な視点として、例えば、漁業という経済、産業に対する影響を考えると、地域ごとに影響の度合いも違ってきます。温暖化なり酸性化の影響は、例えば温暖化による海水温上昇は太平洋側と日本海側で違って、酸性化の程度も違います。またおそらくそれらの影響は、藻場、干潟、開放沿岸域、内湾、そういうところでも全く違ってきます。そういった個々の地域の経済、それから個々の地域の特徴的な生態系を勘案して、どこを拠点にしてモニタリングしていくのかといったような視点も必要ではないかと思えます。

### 三浦

洋上風力のところでご説明しましたように、環境影響を評価するためのデータが現状では乏しいので、実験等でデータを積み重ねる必要があると思えます。ただ、例えば水中音の実験というのは非常に難しいです。水槽の中に様な音の条件を作り出すのが困難だからです。従って、実験手法の開発も必要です。また、現場調査の手法についても同様です。A-tagというクジラの鳴音を受信する機械をご紹介しましたが、海中に吊り下げておけば、勝手に調査してくれるという便利な機器ですから、現在スタンダードな手法となっています。ただし、問題は種の特定ができないことです。マイルカ科とネズマイルカ科という科レベルの区別はできるのですが、何の種かというのは分かりません。ただ文献情報によると、水中で録音した鳴音を分析することにより、種まで特定することが可能になりつつあるそうです。このような現場調査についても、手法や機器の開発が必要だと思えます。

### 座長

会場からもご意見を頂きたいと思えます。

### 会場

大変感動する素晴らしいお話を伺えまして、発電産業の方々も勇気をもらえたような気がいたします。ただそういう中で、我々なりに気をつけなくてはいけないのは、前だけを向いているということではいけないような気がいたします。風力発

電という美名の中で、世界に冠たる美しい森、山の稜線、スカイライン、それを持ったわが国の非常に美しい風景が損なわれるとしたら、ちょっと耐えられません。

そういう中で、洋上発電というところに活路を見出したような気がしていたのですけれども、海に沈む夕日が見えるという日本でも有数の景観を誇る町にも洋上の風車が海岸近くに林立するというような話を聞いたときは残念な思いがいたしました。私はやはり産業にかかわる者としては、今、目に見えないものでも、何か忘れちゃいけないものというのはきっとあるはずだと。ふと今日の会の中で感じました。そういう気持ちだけは忘れないようにしたいと思います。

特に洋上風力で大変心配なのは、海鳥、渡り鳥です。陸地に接近したときに干潟等があれば、必ずそこでお休みをするわけです。そういうように、今見えていないものにまで気を使うというのが、これから必要なことなのかなという気がいたしました。無責任な話ですが、誰かが発信していただければと思います。

#### 座長

ありがとうございます。今回のシンポジウムの総合討論は、取りまとめて、海生研研究報告に掲載する予定です。見えないものへ配慮ということも含めて、今のご意見を文章に残しておきたいと思います。

#### 会場

大変興味深いお話を、幅広いトピックの中から伺わせていただきました。ありがとうございます。私がちょっと気になった言葉の一つとして、桑原さんから指摘があった、例えば海で何が起きているかということモニタリングしていくときに、漁獲統計とかそういったものが、もう少し種レベルとかになっていくといいというお話がありました。しかしながら、日本の最近の行政を見ていると、統計とかそういうところにかかる労力、お金といったものを、むしろ削っている状況にあるのではないかと思います。一方で漁業のためというよりは、こういった世界的な問題に使うべきレーダーみたいなものというような視点であれば、もっと大きな視点から、魚種別なりにデータが取れるような仕組みを再構築するようなことができるのではないかと。それは水産行政というよりは、例えば内閣府にある海洋政策本部のような

ところで、海洋の政策として、大きな視点から組み立て直せないのかとか、あるいは行政だけではなくて、いろんな力を集めて、そういったデータを集めていくといったことができないのか、そういう視点で、モニタリングの力の強化というものを今後考えていく必要があるのではないかと気がいたしました。

#### 会場

水産改革の中で資源管理が最大の使命となっています。資源管理・資源評価からすると水産改革の中で、予算を大幅に増やすとかいう話を聞いていますから、必要な調査のレベルは確保されるように期待したいと思います。漁獲データについては、確かに農林水産統計事務所を通じて行くと予算削減や時間が掛かるという問題があると思いますが、市場や漁協からデータを取ることで、シンプルで迅速にできるのではないかと思います。最近、外国もそうやっているようです。

別件ですが、海藻といえばCO<sub>2</sub>を吸収すると思いますが、これについてどのようにお考えかお聞きしたい。最近、カリブ海では海藻が増え過ぎて困っていて、日本から何とか協力してくれないかという話がありました。CO<sub>2</sub>の吸収に関しては、カリブ海での海藻繁茂について何が起きているかという知見があれば、教えて頂きたい。

#### 桑原

カリブ海の藻場について知見は持っていませんが、海藻のCO<sub>2</sub>固定については、海藻の成長と枯死、沖への流失や岸への打ち上げ、分解過程等を各生活史段階で考慮する必要があり、また、他動物への摂食による取り込みなどを考慮すると非常に難しい課題だと考えます。また、海藻のCO<sub>2</sub>固定だけでなく、藻場には付着性の動・植物が数多くいますので、これらの生物を含めた藻場のCO<sub>2</sub>固定についても検討する必要があると考えます。

#### 座長

それでは今日の総合討論をまとめます。まず1つは気候変動の現状を把握するためにも、あるいは対策の効果を検証するためにも、モニタリングが必要であるということが挙げられたと思います。ただモニタリングの水域、項目、水深等で工夫する必要はあります。またモニタリングについては、世界的な海洋ネットワークはありますが、日本沿岸はまだネットワーク化されていないとい

うことで、今後の課題でしょうか。沿岸は富栄養化があったり淡水の流入があったり、複雑なので今後留意する必要があると思います。

温暖化に対して、他に有効な手がないのでCCSや洋上風力が必要ということですが、日本は経験が浅いので、環境影響評価や事後調査、CCSの監視調査等については、注意深く進めて、経験を増やすという段階にあります。ただし、CCS実証事

業の中で合理化の考えも必要だし、洋上風力も経験を積む中で評価項目の見直しも考えたいということでした。更に今後の課題として調査機器の開発や予測手法、調査手法の開発も必要ということでした。

発表者の皆さん、会場の皆さん、ご協力どうもありがとうございました。これで総合討論を終了します。

## 資 料

# 海生研シンポジウム2018「気候変動と海生生物影響」

## シンポジウム報告にあたって

香川謙二<sup>\*1 §</sup>

公益財団法人海洋生物環境研究所は、発電所取放水が漁場環境に与える影響について科学的に解明する調査研究機関として1975年に設立され、以来様々な調査・研究活動を実施してきた。そして、時代とともに変化する社会的ニーズに応えるため、「エネルギー生産と海域環境の調和」と「安心かつ安定的な食料生産への貢献」を目標として掲げ、発電所取放水の影響解明に加えて、海洋環境放射能のモニタリング、海生生物への化学物質の影響・蓄積実態の把握、地球温暖化に伴う海水温上昇や海洋酸性化などの調査研究にも研究対象を広げてきた。

平成30年7月に閣議決定された第5次エネルギー計画において、2030年エネルギーミックスの実現と2050年シナリオの方針が示された。この中でエネルギー起源のCO<sub>2</sub>削減については、2020年頃のCCUS<sup>\*2</sup>技術の実用化を目指した研究開発、国際機関との連携、CCS<sup>\*3</sup>の商業化の目途等を考慮しつつできるだけ早期のCCS Ready<sup>\*4</sup>導入に向けた検討などを進めることとされている。さらに風力発電については、陸上風力発電の導入可能な適地が限定的な我が国において、洋上風力発電の導入拡大は不可欠であるとうたわれている。

このような動きの中で、平成30年7月31日に、海生研シンポジウム2018「気候変動と海生生物影響—エネルギー生産と海域環境の調和の視点から考える—」を開催した。

本シンポジウム前半では、当所の喜田がイントロダクションとして気候変動による沿岸域の変化と対策について、地球温暖化と海洋環境、気候変動への世界的な対応、気候変動緩和策について概説した。気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響として、まず始めに、(国研)水産研究・教育機構 水産工学研究所 桑原氏には水温上昇に伴う藻場への影響と回復対策として、藻場の減少要因、磯焼け対策による藻場の回復状況を説明して頂いた。次に(国研)海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター 原田氏には海洋酸性化の環境・資源への影響について、二酸化炭素の吸収域としての海、海洋酸性化による海洋生物への影響、経済的インパクトを説明して頂いた。最後に当所の林が海生研における海洋酸性化研究について、沿岸海域の実態調査、生物影響調査、種苗生産現場での対策例について説明した。後半では、気候変動緩和策としての海洋利用とその課題について、始めに当所の吉川がCCSと環境影響評価について、日本のCCSプロジェクト、海底下CCSの環境影響評価、海洋環境の監視計画とその実態について説明した。次に当所の三浦が洋上風力発電と環境影響評価について、風力発電とその世界的動向、洋上風力発電の世界的動向と日本の現状、洋上風力発電に係る環境影響評価調査について説明した。最後に、当所中央研究所長の三浦を座長としてパネルディスカッションを実施し、会場の質問に答える時間も設けた。一般市民の他、行政、水産、電力、研究機関、マスコミ等から当初予定を上回る約130名の方へ出席いただいた。

\*1 公益財団法人海洋生物環境研究所 事務局 (〒162-0801 東京都新宿区山吹町347番地 藤和江戸川橋ビル7階)  
§ E-mail: kikaku@kaiseiken.or.jp

\*2 CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage, 二酸化炭素回収・有効利用・貯留)

\*3 CCS (Carbon dioxide Capture and Storage, 二酸化炭素回収・貯留)

\*4 CCS Ready (大規模排出源の設計・建設の段階から、CO<sub>2</sub>回収設備等を設置するための用地確保等の準備を予め行うこと)

## プログラム

日時：平成30年7月31日（火）13：00－17：15

場所：御茶ノ水ソラシティ カンファレンスセンター2階 Hall West

開会挨拶 （公財）海洋生物環境研究所 理事長 香川謙二

### I. イントロダクション

#### 1. 気候変動による沿岸域の変化と対策

中央研究所 所長代理 喜田 潤

### II. 気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響

#### 1. 水温上昇に伴う藻場への影響と回復対策

（国研）水産研究・教育機構 水産工学研究所 水産土木工学部長 桑原久実

#### 2. 海洋酸性化の環境・資源への影響

（国研）海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター センター長代理 原田尚美

#### 3. 海生研における海洋酸性化研究

実証試験場 応用生態グループ 主査研究員 林 正裕

### III. 気候変動緩和策としての海洋利用とその課題

#### 1. CCSと環境影響評価

実証試験場 応用生態グループマネージャー 吉川貴志

#### 2. 洋上風力発電と環境影響評価

中央研究所 海洋生物グループマネージャー 三浦雅大

### IV. 総合討論：海洋における気候変動緩和策実施とその課題（座長 中央研究所長 三浦正治）

開会挨拶 （公財）海洋生物環境研究所 業務執行理事 木下 泉



## I. イントロダクション

### I-1. 気候変動による沿岸域の変化と対策

喜田 潤

#### 1. はじめに

2018年の夏は、気候変動を実感する豪雨や酷暑となっている。ここでは、続く講演のイントロダクションとして、我々がなぜ気候変動に対応しなければならないのか、またそのために沿岸域でどのような対策が必要とされるのか、この2点について振り返る。

#### 2. 地球温暖化と海洋環境

IPCC第5次評価報告書によると、産業革命以降これまでに世界平均地上気温は上昇し続け、温暖化対策をとらなければ2100年まで気温が上昇し続けるが、厳しい温暖化対策をとれば気温上昇をある程度に抑えることができる、という予測が示された。また、気候変動による追加的リスク水準をみると、リスクが及ぶ事項によってリスク水準は若干異なるものの、「世界全体で総計した影響」は世界平均地上気温の上昇が2℃より高くなるとリスク水準が高いあるいは非常に高いものとなることが示された。

海洋に目を向けると、観測結果から気候変動の影響が明瞭に示されている。気象庁は世界の年平均海面水温の変化を示しているが、海面水温の長期変化傾向は100年あたり0.5℃の上昇であることが分かる。この上昇率は、同じ期間の陸上気温の上昇率0.8℃より小さな値だが、海洋の表面温度は確実に上昇していることが観測によって示されている。

海水温が上昇すると、海の生物の生息場所が変化してしまうことが容易に想像できる。1900年から2010年の観測に基づく海生動物群の分布域の平均移動速度（すなわちこれは海の生物がかつてはより低温だった水域に10年で何キロメートル移動したかを示している）をみると、全ての生物がかつてより低温だった水域に移動したことがわかる。注目されるのは海の基礎生産を担う植物プランクトンの移動が大きく、続いて一次消費者の動物プランクトンの移動が大きいことである（IPCC第5次評価報告書）。このように生態系を通じて海水温上昇の影響が生物分布域に及ぶことが見て取れる。このことについては、桑原氏の次の講演で詳しく紹介していただく。

気候変動は海水温だけでなく、海水の化学にも大きな影響を与える。大気中の二酸化炭素濃度が

上昇すると海水に溶け込む二酸化炭素が増加し、海水が酸性化する。もし温暖化対策をとらなかった場合に、現在から百年後に海水のpHがどれだけ低下するかをみると、すべての海域でpHが低下することが示されている。社会経済的に人間と関連のある生物群である軟体動物、冷水サンゴと造礁サンゴは沿岸海域に分布しているが、これら生物の海洋酸性化への感度を比較すると、石灰質の殻をもつ軟体動物やサンゴ類が甲殻類より負の影響、すなわち生物にとって好ましくない影響を受ける（IPCC第5次評価報告書）。海洋酸性化については、原田氏の次の講演で詳しく紹介していただくとともに、海生研の研究について当所の林氏が紹介する。

海水温が上昇し、生物の分布域が変化するということは、当然ながら漁業にも大きな影響がある。中・高程度に温暖化するシナリオにおいて、2001～2010年と2051～2060年の10年平均を比較して、約1,000種の魚類や無脊椎動物の最大漁獲量の変化をみると、漁獲量がほぼ変わらない海域は少なく、多くの海域で漁獲量が半分以下になることが示されている（IPCC第5次評価報告書）。なお、この予測には乱獲や海洋酸性化の潜在的影響は考慮されていないので、これらを考慮するとさらに漁獲量が減少してしまうことも考えられる。

#### 3. 気候変動への世界的な対応

これまで見てきたように、気候変動によって様々なリスクが増えるということが、科学的な知見をもとに明確に示されるようになった。

そこで、1992年に「国連気候変動枠組条約」が採択され、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを究極の目標として、世界は地球温暖化対策に世界全体で取り組んでいくことに合意した。そして、国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）が1995年から毎年開催されるようになった。

COP21のパリ協定では、京都議定書に代わる取組みとして、「世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求すること」、「できるかぎり早く温室効果ガス排出量を減少に転じ、今世紀後半には、温室効果ガス排出量と吸収量のバランスをとる、すなわち排出をゼロにすること」が目標として定められた。パリ協定が歴史上、最も画期的である点は、途上国を含むすべての参加国に、排出削減の努力を求める枠組みということである。

パリ協定の目標達成にむけて、「主要排出国を

含むすべての国が削減目標を5年ごとに提出・更新すること」、「長期目標の設定および各国の適応計画プロセスと行動の実施」、更に「世界全体の進捗状況を2023年以降に、5年に1回検討すること」が取り決められた。なお、世界全体の進捗状況の検討は、2018年から世界全体の進捗確認の機会が促進的対話 (Facilitative Dialogue) として設けられることになった。これは、いわゆるタラノア対話と呼ばれるものである。

最初に示した過去と未来の世界平均地上気温の変化をみると、将来予測の部分は、モデルによる不確実性のため幅があることが分かる。2100年には、温暖化対策をとらない場合、気温は2.6~4.8℃上昇し、さらに上昇し続けるのに対し、厳しい温暖化対策をとった場合、気温は0.3~1.7℃上昇するものの一定に保てること分かる (IPCC第5次評価報告書)。

世界平均の海面pH、すなわち海洋酸性化の変化をみると、温暖化対策をとらなければ、海洋酸性化はさらに進行してしまうのに対し、厳しい温暖化対策をとれば海洋酸性化の程度を一定に留めることができることがわかる。しかし、世界平均の海面水位上昇をみると、厳しい温暖化対策をとっても、海面上昇は続いてしまうことが予測されている (IPCC第5次評価報告書)。このように、気候変動はリスクによって及ぼす影響の度合いが異なるということに注意が必要である。

#### 4. 気候変動緩和策

気候変動を緩和するために厳しい温暖化対策をとるということは、すなわち温室効果ガスの排出量を今後マイナスにしていく、ということである。気温上昇を産業革命前に比べて2℃未満に抑えられる可能性が高い緩和シナリオでは、2100年に大気中の二酸化炭素濃度が約450ppmとなる (IPCC第5次評価報告書)。

気温上昇を2℃未満に抑え、大気中の二酸化炭素濃度を約450ppmで安定化させるためには、低炭素エネルギーの規模拡大が欠かせない。特に、発電の脱炭素化が費用対効果の高い緩和戦略として必要となる。

一次エネルギー中に占める低炭素エネルギーの割合をみると、より低い大気中二酸化炭素濃度で安定化するためには、低炭素エネルギーの割合を80%以上に増やさなければならないことが分かる (IPCC第5次評価報告書)。このような発電の脱炭素化には、「エネルギー効率の改善 (省エネ)」とともに、「再生可能エネルギー (風力・水力・太陽光/熱発電)」、「原子力エネルギー」、「CCSすな

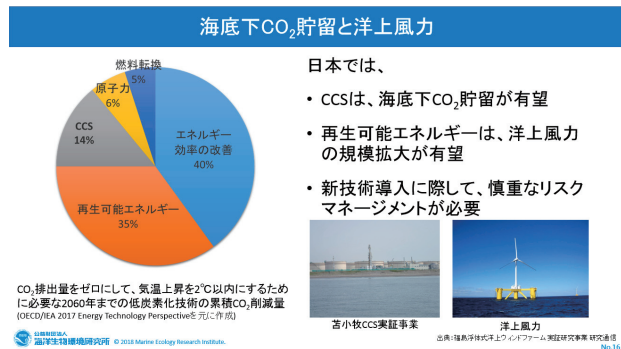
わち二酸化炭素の地中貯留技術付き化石エネルギー」、また「ネガティブCO<sub>2</sub>エミッションとされるCCS付きバイオエネルギー」などがある。

海洋はエネルギー生産の重要な場となっている。

枯渇性エネルギーとしてみると、海底の石油・天然ガス、将来のメタンハイドレートなどが挙げられ、枯渇性エネルギーに対する気候変動緩和策として海底下地層へのCO<sub>2</sub>貯留 (CCS) がある。再生可能エネルギーに目を向けると、洋上風力発電のほかに、将来の波力・潮力・海流発電、海洋温度差・塩分濃度差発電などもある。

二酸化炭素排出量をゼロにして、気温上昇を2℃未満にするために必要な2060年までの低炭素化技術の割合については、CCSと再生可能エネルギーで約半分を占めることが示されている (OECD/IEA 2017 Energy Technology Perspective)。

日本では、CCSは海底下CO<sub>2</sub>貯留が有望とされており、再生可能エネルギーにおいては、洋上風力の規模拡大が有望とされている。一方、これらの新技術導入に際しては、慎重なリスクマネジメントが必要となる。シンポジウムの後半部では、CCSについて当所の吉川氏から、洋上風力発電については、当所の三浦氏から紹介する。



第1図 地球温暖化対策として期待されるCCSと洋上風力。

#### 引用文献

IPCC (2014). Climate change 2014 : Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>

OECD/IEA (2017). Energy technology perspectives 2017 Catalysing energy technology transformations. <https://www.iea.org/etp2017/>



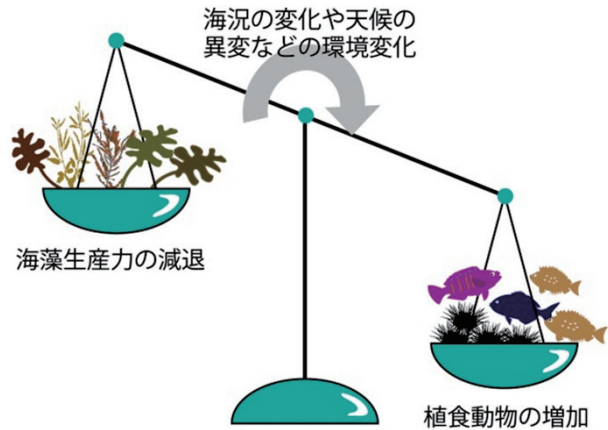
II. 気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響  
II-1. 水温上昇に伴う藻場への影響と回復対策

桑原久実

1. 藻場は、今どうなってるの？

我が国の藻場（もば）は構成する海藻種によりコンブ場、アラメ・カジメ場、ガラモ場、アマモ場などに区別され（写真1）、水深や底質等により単一種だけではなく複数種で構成される場合が多い。藻場は、我々人間にとって、直接・間接的に重要な役割を担っている。例えば、①沿岸の一次生産の場であると共に、②栄養塩吸収（CO<sub>2</sub>吸収も）などの環境保全の場、③水産上有用な魚介類を含む多様な生物にとっての生息の場、④我々人間にとって快適な景観や環境学習の場などを提供している。しかし、このように重要な藻場は全国的に著しい減少傾向にある。水産庁の調べによると、この20年間で藻場面積は大きく減少し、2018年は1980年代と比較し半分の10万ヘクタール程度と予想されている。このような藻場の減少は上述した藻場がもたらす多様な機能の低下をもたらし、水産業をはじめ沿岸生態系への影響が危惧されている。

藻場が減少する要因を第1図に天秤のイラストで示した。ある海域において温暖化等の環境変化を背景に、天秤の右の皿はウニや魚などの植食動物が海藻を食べる量、左の皿は海藻が生産する量

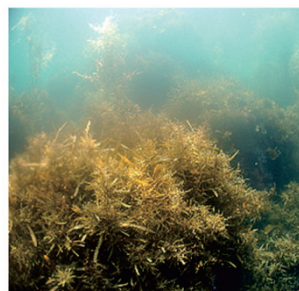


第1図 藻場の減少要因。

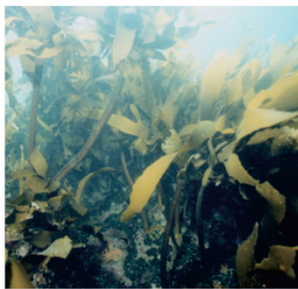
を示している。この天秤は藻場が減少傾向にあるため時計回りに傾いている。藻場の減少要因については、これまで種々の意見が出されてきたが、現在、高水温などの環境変化が直接海藻の生残に影響する場合と植食動物の食害を通じて影響する場が考えられている。前者の事例を写真2に示す。2013年8月、日本海西部では平年より2℃以上高い水温（約30℃が数日継続）が中旬から下旬にかけて続いた。この高水温によりアラメやカジメの葉状部が白くなり、やがて、茎の根本部分から倒れ、9月上旬の台風に伴う高波浪により大量に海岸に打ちあがった。この被害は長崎県対馬・壱岐から福岡県沿岸を経て山口県北部まで達し総延長距離は200kmと推定された。同様な事例は全国で局所的に見られるものの、このように大規模な藻場の流失は稀である。後者の事例を写真3と4に示す。写真3はウニが高密度に分布（黒い丸）し、これらのウニが海藻の幼芽を食べることにより、その後、藻場が形成されない状況を示している。ウニは餌となる海藻が無いため可食部（生殖葉）



コンブ場



ガラモ場



アラメ・カジメ場



アマモ場

写真1 我が国の代表的な藻場。



写真2 高水温の影響で大量に打ち上がったカジメ。

が痩せ、商品にならないため漁業者は漁獲できず、この状態が継続する。写真4は魚によりカジメの葉状部が全て食べられ茎だけになった状況を示している。茎の先端部にある成長帯まで食べられるとカジメは枯れる。藻場を消失させる魚は、主にアイゴ、ブダイ、イスズミ類が考えられており、これらはいずれも亜熱帯性の魚種である。これら植食性魚類による藻場の消失は毎年各地で報告されており、我が国沿岸水温の上昇が影響しているためと考えられる。

藻場が一旦減少し、その状態からなかなか回復できず貧植生状態が継続することを磯焼けと言う。我が国における磯焼けの大部分は、後者の植

食動物の食害であることがわかっている。

## 2. 水温が、さらに上昇すると、どうなる？

今後、我が国周辺の水温が、さらに上昇すると藻場はどうなるのか？現状の水温(過去10年平均)より3℃上昇した場合を想定し検討した。まず、我が国沿岸で見られる海藻種が生息できる水温帯を明らかにする必要がある。この水温帯の上・下限値は既存文献から収集・整理して求めた。次に、我が国周辺の現状の海面水温分布とそこから全域一律に3℃上昇させたものを作成した。海藻の分布は、年最低の海面水温分布(2月)と海藻の生息水温の下限値から北限を、年最高水温分布(8

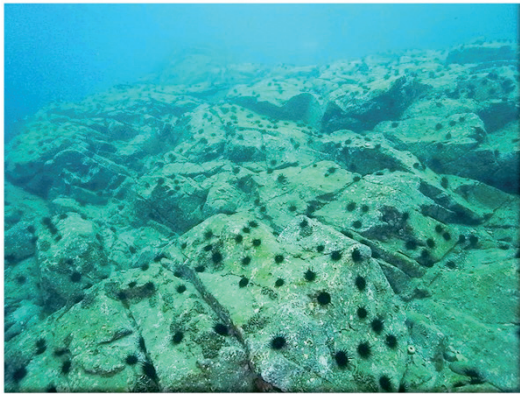


写真3 ウニの食害。

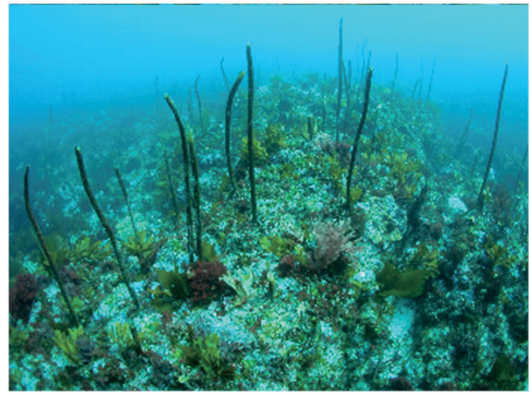


写真4 魚の食害。

第1表 海面水温の上昇(+3℃)に伴う海藻、サンゴ、植食動物の分布変化(太平洋側)

(赤色=消失、水色=拡大、緑色=現状維持)

分類	地域 生物名	八重山・宮古諸島	沖繩諸島	奄美諸島	大隅諸島	鹿児島	宮崎	大分	愛媛	高知	徳島	和歌山	三重	愛知	静岡	神奈川	東京	千葉	茨城	福島南部	福島北部	宮城南	宮城北	岩手南部	岩手中部	岩手北部	青森東部	北海道渡島	北海道胆振	北海道十勝	北海道釧路	北海道根室	北海道歯舞	北海道色丹	北海道国後			
		コンブ類	ミツイシコンブ																																			
	リシリコンブ	太平洋側に分布無し																																				
	ナガコンブ																																					
モク類	ウガノモク																																					
	ヤツマタモク																																					
	ノギリモク																																					
	フタエモク																																					
	ラツパモク																																					
	オオバモク																																					
アラメ・カジメ類	ヤナギモク																																					
	アラメ																																					
	カジメ																																					
	クロメ																																					
	リュウキュウスガモ																																					
サンゴ	ウミショウブ																																					
	ウミジグザ																																					
	ユビミドリイシ																																					
魚類	アイゴ																																					
	ブダイ																																					
	ムラサキウニ																																					
ウニ類	ガンガゼ																																					
	キタムラサキウニ																																					
	エゾバフンウニ																																					

月)と海藻の生息水温の上限値から南限を評価した。現状とそれより3℃上昇させた水温分布に上記の方法で海藻分布を示し、水温上昇による分布域の変化を予測した。

第1表は、海面水温3℃上昇した場合の太平洋側の海藻分布の変化を都道府県の地区別に予測したものである。海藻と同様な手法で評価したサンゴ、ウニや魚の植食動物の予測も併記してある。赤色は分布の消失、水色は拡大、緑色は変化が無く継続して分布(現状維持)することを示している。3℃上昇すると、水色の地区に分布が拡大する一方、赤色の地区で消失するので、緑色と水色のところに分布することになる。温帯性の海藻(ヤツマタモク、ノコギリモク、オオバモク、ヤナギモク、アラメ、カジメ、クロメ等)は、南方から消失し、北方へ拡大することがわかる。しかし、この変化は同じ分布幅でそのまま北に移動するのではなく、分布幅を減少する場合が多い。また、温帯性の海藻は亜熱性の海藻(フタエモク、ラッパモク等)やサンゴの北上により着生基質に新たな競争が生じること、植食動物の北上(アイゴ、ブダイ、ムラサキウニ、ガンガゼ)により、現在よりも被食圧が増加することなどから、さらに生息困難な環境になることが予想される。第2表は日本海側について示しており、太平洋側とほぼ同様な傾向にあることがわかる。ここでは水温上昇の

影響を検討するため、大幅に3℃の水温上昇を設定したので藻場分布に大きな影響が現れた。現在の水温上昇は、ここまでは達していないが、今後、モニタリングを継続して対応や適応方法を検討していく必要がある。

### 3. 藻場は、どうやって回復するの？

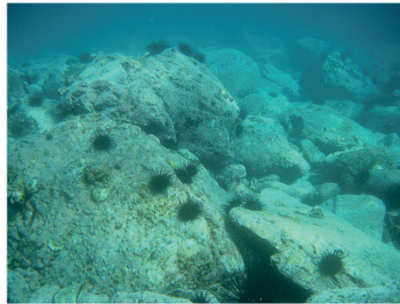
藻場回復は第1図の天秤のバランスを回復(釣り合った状態に)することである。1つ目の対策は温暖化などの気候変動を緩和や縮小するもので、これについてはCO<sub>2</sub>排出規制、低炭素エネルギーの推進など地球全体で取り組みつつある課題である。本シンポジウムでは、海洋生物環境研究所からCCS(二酸化炭素の回収・貯蔵)や洋上風力発電等に関する話題提供があり、詳しくはそれらを参照いただきたい。2つ目の対策は天秤の右の皿からウニや魚などの植食動物を除去し海藻が食べられる量を減少させ、左の皿から海藻の生産量を増加させることである。この際、植食動物を除去する前に海藻の生産を高める取り組み(例えば、母藻移植等)をしても、植食動物の餌を増やすことになってだけで藻場回復は期待できない。まず植食動物を除去してから海藻の種まきや種苗の設置などの海藻生産量を増加させる対策を実施する必要がある。

2つ目の対策事例として、漁業者が主体となっ

第2表 海面水温の上昇(+3℃)に伴う海藻、サンゴ、植食動物の分布変化(日本海側)

(赤色=消失、水色=拡大、緑色=現状維持)

分類	地域 生物名	八重山・宮古諸島	沖縄諸島	奄美諸島	大隅諸島	鹿児島	熊本	長崎	佐賀	福岡	山口	島根	鳥取	兵庫北部	京都	福井	石川	富山	新潟	山形	秋田	青森西部	北海道渡島	北海道檜山	北海道後志	北海道石狩	北海道留萌	北海道宗谷	北海道網走	
		コンブ類	ミツイシコンブ																											
	リシリコンブ																													
	ナガコンブ																													
モク類	ウガノモク																													
	ヤツマタモク																													
	ノコギリモク																													
	フタエモク																													
	ラッパモク																													
	オオバモク																													
	ヤナギモク																													
アラメ・カジメ類	アラメ																													
	カジメ																													
	クロメ																													
海藻類	アマモ																													
	リュウキュウスガモ																													
	ウミシユウブ																													
	ウミジグザ																													
サンゴ	ユビミドリイシ																													
魚類	アイゴ																													
	ブダイ																													
ウニ類	ムラサキウニ																													
	ガンガゼ																													
	キタムラサキウニ																													
	エゾバフンウニ																													



(a) 磯焼けした海底 (2007年)



(b) SCUBA潜水によるウニ除去



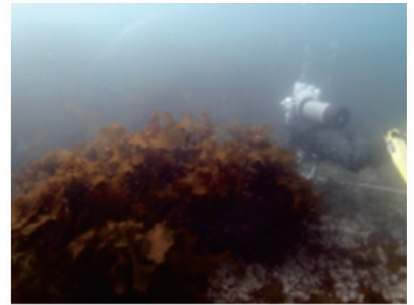
(c) 刺し網によるブダイ除去



(d) 海底に母藻の設置



(e) 回復したガラモ場 (2016年)



(f) 回復したクロメ場 (2016年)

写真5 漁業者主体で実施した藻場回復の取り組み事例 (大分県佐伯市名護屋地区)。

て実施している大分県佐伯市名護屋地区の取り組みを紹介する。当地区は大分県の一番南側に位置し、名護屋支店の正組合員数が70名余りである。リアス式地形を利用して、定置網、養殖、刺し網、一本釣りなど様々な漁業が行われている。豊かな藻場があった頃は県全体の約1/4のアワビやサザエの水揚げがあったが、1995年頃から磯焼けが発生し磯根資源の漁獲量は激減した。藻場を回復させるためにウニ除去等の対策を漁業者自らが自主的に実施したが磯焼けからの回復は見られなかった。こうした状況を打開するため、2007年に「名護屋地区磯焼け対策部会」が発足され、市、県、国からの協力を得た対策を開始した。この部会では、取り組みの基本方針として、①自分達(漁業者)ができる対策から始める、②磯焼けを継続させる要因を1つでも少なくする、③徐々に規模を拡大させるなどを決めている。当海域ではウニが高密度に分布することからウニによる被害が、藻場回復を阻害している主要因と考えられた(写真5(a))。SCUBA潜水によるウニ除去を徹底して実施し(写真5(b))、開始当初の2007年は5ha程度の除去面積であったが、2016年には100haに達している。また、海藻を移植すると、多数のブダイの蛸集や採食がインターバルカメラにより確認された。そこで2012年頃から刺し網によるブダイの除去(写真5(c))を実施し10日間で645尾(418kg)を除去したこともある。しかし、除去尾数が非常

に少ない場合もあり、より効率的で安定した除去手法の開発が必要である。海藻の種まきは、生分解性の布に成熟した雌雄の海藻を取り付け小石を重しにして海底に設置する手法(オープンスポアバックと言う)を用いた(写真5(d))。海藻の種の到達距離は数メートルと小さいため数多くのスポアバックが必要となる。この製作には地元の小学生に環境教育の一環としてお手伝いいただいている。この取り組みは小学生や父兄、学校関係者に好評で、現在も継続されケーブルテレビ等で放送されている。対策実施直前(2007年)は、ほとんど藻場が見られなかったが、上記の対策を繰り返し実施することにより2013年頃から成果が急激に現れ、2016年にはガラモ場(写真5(e))やクロメ場(写真5(f))等の回復面積は100ha程度に達した。このように大規模な藻場の回復事例は全国的にまだ少なく、先進的な成功事例と言える。現在、当海域では漁場を約30地区に分割し定期的なモニタリングと回復藻場の維持管理が行われている。

#### 4. むすび

現在、我が国の藻場の減少は、高水温が海藻の生育水温の上限を超えるまでには至っておらず、水温上昇などの環境変化を背景にした植食動物の被害が主要因となっている。このため植食動物の除去対策を徹底して実施すれば名護屋地区と同様

に藻場が回復した事例は全国で確認されている。しかし、植食動物の対策は時間と労力がかかり、計画通りに成果が得られていない地区も数多い。藻場回復に向けて行政と研究の担当者が一丸となり、これまで以上に効果的で確実な技術開発が早急に求められている。

なお、本稿は、「地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価及び対策技術の開発」（農林水産技術会議）と「磯焼け対策ガイドライン」（水産庁）の成果の一部であることを付記する。

## 引用文献

- 農林水産省農林水産技術会議事務局（2008）. 地球温暖化が農林水産業に与える影響の評価及び対策技術の開発, 農林水産省農林水産技術会議事務局, 東京, 1-119.
- 全国漁港漁場協会（2007）. 磯焼け対策ガイドライン, 全国漁港漁場協会, 東京, 1-208.

## II. 気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響

### II-2. 海洋酸性化の環境・資源への影響

原田尚美

#### 1. はじめに

海洋酸性化は、温室効果ガスの二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) が引き起こすもう1つの問題として、近年、温暖化に加えて深刻な全球規模の環境ストレスとされ、その進行の把握や海洋生物並びに海洋生態系への影響把握が喫緊の課題となっている。海洋表層に  $\text{CO}_2$  が溶け込むと水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) と反応し、炭酸水素イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) を形成する。その際、水素イオン ( $\text{H}^+$ ) が放出されるために海水の水素イオン濃度が増加し、その結果、水素イオン濃度を表す水素イオン濃度指数 (pH: potential hydrogen) が低下する。全海洋表層水pHの平均値は約8.1とアルカリ性であるが、徐々に酸性方向にpH値が変化していくさまを海洋酸性化と称する。2012年に開催された国連の持続可能な開発会議 (リオ+20) の合意文書「The Future We Want」に於いて、各国が取り組まねばならない世界共通の課題として特に海洋酸性化がクローズアップされ、現在では2015年9月国連サミットで採択された「持続可能な開発のための国際目標 (SDGs)」No.14の海洋生物多様性やバイオマスの維持への影響を明らかにするために、引き続き海洋酸性化への取り組み強化が喫緊の課題とされている。ここでは海洋研究開発機構での海洋酸性化の取り組みについて紹介する。

#### 2. 二酸化炭素の吸収域としての海

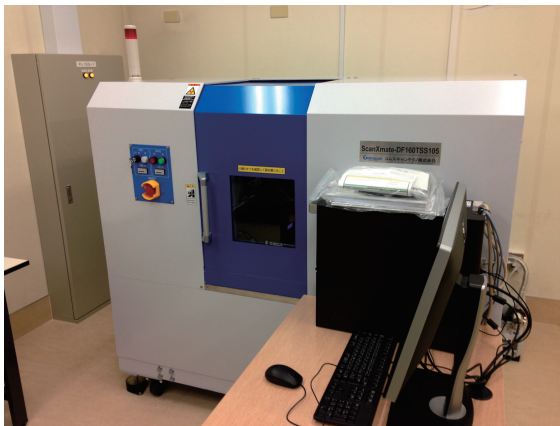
IPCC第5次評価報告書によると、現在、大気中に毎年6.4ギガトンの炭素が放出され、その内、海洋には2.4ギガトン吸収されていると見積もられており海洋は地球上で最大の炭素の貯蔵庫となっている。では一体、海洋のどこで吸収されているのだろうか？海洋表面での大気-海洋間の二酸化炭素収支の現場観測や逆解法モデルを駆使して地域別の温室効果ガスの収支を見積もった結果、全海洋の中でも北太平洋、南太平洋、南インド洋で主に吸収されていることがわかった (Patra *et al.*, 2014)。このように日本の前浜である北太平洋における温室効果ガス吸収は、海洋酸性化の深刻な進行を懸念させる。外洋域の酸性化に関して、太平洋、大西洋、インド洋など熱帯から亜寒帯域までの全海域にて継続実施されている世界の9つの時系列観測点における海洋表層の長期にわたるpHの観測結果が2014年に報告された (Green-

house Gas Bulletin 2014 世界気象機関発行)。それによると、全球海洋における酸性化はpH値で年間0.0011~0.0024の低下として進行しており、わが国の近傍である北西部北太平洋St. KNOT/K2 (北緯47度, 東経160度) で観測された年平均のpH低下速度0.0024 (Wakita *et al.*, 2013) は9つの観測点の中でも大きな数値であり、酸性化の進行が深刻であることがデータからも示された。

#### 3. 海洋生物への影響

現在、地球を脅かす10大ストレスが提唱されている (Steffen *et al.*, 2015)。海洋酸性化についてはまだ安全レベルの範囲内とされているが、生物については種や機能の多様性がすでに危機的領域にあるとされており、酸性化の進行がわずかであっても昇温など他の要素と複合的に飛躍的に影響を及ぼす可能性がある。生物への影響を考える上で重要な指標が炭酸塩飽和度 ( $\Omega$ ) である。1以上が過飽和, 1未満が未飽和の状態であることを示す。 $\Omega$ が未飽和になると貝やサンゴなど炭酸カルシウムの骨格を持つ生物が骨格を作りにくくなる上、溶解の恐れがある。では、具体的にはどのような反応が起きているのだろうか？先にも述べたように海洋に  $\text{CO}_2$  が溶解すると、 $\text{HCO}_3^-$  と、 $\text{H}^+$  に変化し、 $\text{H}^+$  濃度が増加していく。海洋には変化するとその変化を元に戻そうとする緩衝作用があり、 $\text{H}^+$  濃度が増えると減らそうと、海洋中の  $\text{CO}_3^{2-}$  と結びつく反応が進み、 $\text{HCO}_3^-$  を作り出す。次に量が減った  $\text{CO}_3^{2-}$  濃度を増やす反応が起きる。それが炭酸カルシウムの溶解で、海洋中に生息する生物の炭酸カルシウム殻の溶解や、海底に化石となって堆積した炭酸カルシウムが溶解するなど、 $\text{H}^+$  濃度を減らす緩衝作用が起きる。以上が、酸性化によって殻が溶解するという一連の反応になる。真っ先に影響を被るとされる生物は微小炭酸塩有殻プランクトン、ホタテ、カキ等の貝類、エビやカニなどの甲殻類などである。微小サイズの炭酸塩有殻プランクトンは、全海洋の80%もの炭酸塩沈降量を占める世界最大の炭酸塩生産生物である。にもかかわらず、海洋酸性化に対する応答を定量的に評価する世界標準的な手法がないため、海洋酸性化に対する影響評価が全く行われてきていない。そこで海洋研究開発機構では東北大学と共同で、炭酸塩有殻プランクトンの海洋酸性化に対する応答を定量的に評価するためにマイクロX線コンピュータトモグラフィーによる炭酸塩殻の骨格密度を計測する手法 (MXCT) を新たに開発してきた (第1図)。この手法は、対象とする生物にX線を照射し、2次元で骨格の空隙率 (CT

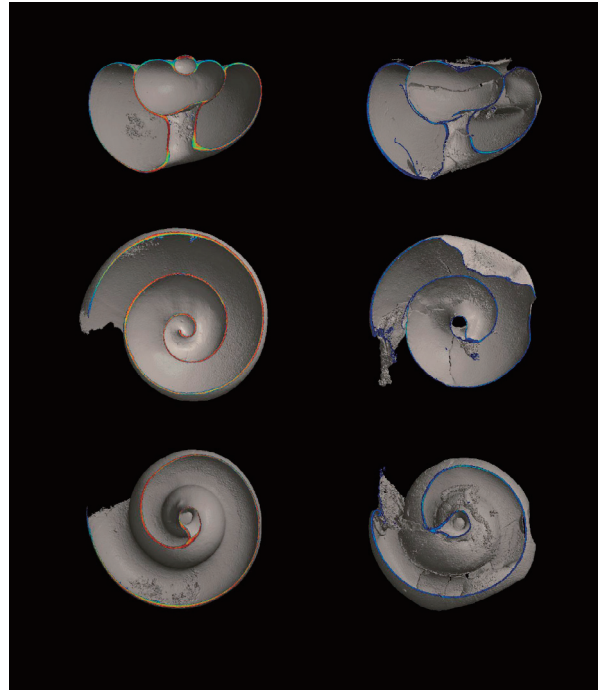
値)を測定し、最終的に1個体全ての2次元データを3次元データにコンパイルして容積を求める。1個体の炭酸カルシウムの含有量をICP質量分析計で求め、CT値と標準物質とから求められた経験式を用いて骨格密度を計算する。この手法により求められたプランクトン生物の炭酸塩骨格密度が現場のpHや炭酸塩飽和度と相関関係があり(木元私信)、海洋酸性化による生物の応答を定量的に評価する手法として確立しつつある(第2図)。我々が研究対象としているプランクトンサイズの炭酸塩生物は、高次の生物の餌となり、食物網を通じて生態系全体に酸性化の影響が及ぶ。水産資源となる魚類など高次生物への影響評価が重要になってくる。



第1図 マイクロX線コンピュータトモグラフィー(MXCT)装置(海洋研究開発機構 木元克典)。

#### 4. 経済的インパクト

南北極や亜寒帯域など冷水塊海域では、海水に二酸化炭素が良く溶け込むことから海洋酸性化の進行が深刻で、2100年にはこの海域の海洋表層が炭酸カルシウム(アラゴナイト)の未飽和海域になると予測される。一方で、熱帯や亜熱帯域では未飽和にはならないまでも酸性化の進行は確実に生じ、その「変化」そのものが生息する生物にとって脅威となろう。世界各地で海洋酸性化のモニタリング観測が始まっており、どこの海域でどの程度酸性化が進行しているのか、その情報を共有し交換するための国際観測ネットワークが構築され(Global Ocean Acidification Observing Network, <http://goa-on.org/>), 4年に一度、国際ワークショップが開催されている。この国際ワークショップでも紹介された海洋酸性化の経済的影響



第2図 西部北極海にて採取された翼足類の骨格の平面図(MXCTで測定)。色が赤いほど密度が高く、青いほど低い。左は健康な個体の骨格。右は溶解が進み、殻がスカスカの個体の骨格(海洋研究開発機構 木元克典)。

は甚大である。ユネスコ政府間海洋学委員会の試算によると、多様な水産資源に加えて観光産業を支えるサンゴ礁海域は3~37.5兆円、魚類は6.5兆円、甲殻類で3.7兆円、貝類では2.4兆円の経済価値を失うとされている。

一方、日本の国内漁業への影響評価はまだ行われていないものの、沿岸域では、海洋生物環境研究所、北海道大学、東京海洋大学、筑波大学、琉球大学、水産研究・教育機構、海洋研究開発機構などが忍路(北海道)、厚岸(北海道)、大間(青森)、宮古(岩手)、館山・御宿(千葉)、下田(静岡)、柏崎(新潟)、瀬底(沖縄)など全国で水中のCO<sub>2</sub>分圧やpH値の定点観測を実施している。沿岸域の大きな特徴は、1日の間でpHやCO<sub>2</sub><sup>2-</sup>濃度が大きく変化することであり、pHの日周変動幅は場所や季節、大雨等の気象イベントや付近の富栄養化など様々な要因によって変わる。現時点で西日本には観測定点がないことから、各沿岸域における定点観測網の充実と、日周変動を含めたpH動態の把握が急務となっている。加えて、貝や魚類などの水産資源に海洋酸性化の影響が及ぶことも一般には知れ渡っていない。国内観測ネットワークの構築と生物への影響評価、養殖漁業を担

う漁業者などへの周知や、海洋酸性化の現状を知りたい人々が知りたいときに直ぐにアクセス可能な情報環境づくりが大切である。

#### 引用文献

- Patra, P.K., Krol, M.C., Montzka, S.A., Arnold, T., Atlas, E.L., Lintner, B.R., Stephens, B.B., Xiang, B., Elkins, J.W., Fraser, P.J., Ghosh, A., Hints, E.J., Hurst, D.F., Ishijima, K., Krümmel, P.B., Miller, B.R., Miyazaki, K., Moore, F.L., Mühle, J., O’Doherty, S., Prinn, R.G., Steele, L.P., Takigawa, M., Wang, H.J., Weiss, R.F., Wofsy, S.C. and Young, D. (2014). Observational evidence for interhemispheric hydroxyl-radical parity. *Nature*, **513**, 219–223.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Rayner, B. and Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, **347**, 1259855.
- Wakita, M., Watanabe, S., Honda, M., Nagano, A., Kimoto, K., Matsumoto, K., Kitamura, M., Sasaki, K., Kawakami, H., Fujiki, T., Sasaoka, K., Nakano, Y. and Murata, A. (2013). Ocean acidification from 1997 to 2011 in the subarctic western North Pacific Ocean. *Biogeosciences*, **10**, 7817–7827.



## II. 気候変動による沿岸域の環境と生態系への影響

### II-3. 海生研における海洋酸性化研究

林 正裕

#### 1. はじめに

近年の気候変動に伴い、海生研では従来の温排水研究や海洋環境放射能調査などに加え、気候変動関連の研究に着手している。ここでは、海生研がこれまでに実施してきた海洋酸性化の研究概要を紹介する。海生研では、大きく分けて沿岸海域の実態調査と生物影響調査を実施している。

#### 2. 沿岸海域の実態調査

外洋海域においては、海洋酸性化の観測を世界各国で実施しており、日本でも気象庁が30年以上に渡って北西太平洋の表面海水中のpHを長期観測している(気象庁, 2018)。それによると、観測点の表面海水中のpHは、10年あたり約0.02低下しており、海洋酸性化の進行が明確に観測されている。

一方、沿岸海域においては、pHの長期観測例が乏しく、海洋酸性化の実態が把握されていない。海生研では、取水している海水のモニタリングを毎日実施しており(中央研究所では1982年から、実証試験場では1992年から継続している)、沿岸海域の長期の水質データが記録されている。そこで、これらのデータが沿岸海域における海洋酸性化の実態把握に適用できるのではないかと考えて、データを解析した。その結果、解析途中ではあるが、沿岸海域でも海洋酸性化が進行している可能性が示された。

#### 3. 生物影響調査

海洋酸性化は、海洋生物や海洋生態系に対して様々な影響を及ぼすことが懸念される。海洋酸性化がもたらす生物影響については、大きく分けて石灰化への影響と代謝への影響の二つが考えられる。石灰化への影響については、前項で原田氏が詳しく説明しているので、ここでは割愛し、生物の代謝への影響について説明する。

水生動物(水呼吸をする動物)では、環境と体内のCO<sub>2</sub>分圧差が、陸上動物(空気呼吸をする動物)と比べて小さくなっている(水や空気のCO<sub>2</sub>分圧は約380 μ atm, 水生動物の体液のCO<sub>2</sub>分圧は1,300–5,300 μ atm, 陸上動物の体液のCO<sub>2</sub>分圧は20,000–53,000 μ atm)。このため、水生動物では、環境のCO<sub>2</sub>分圧の上昇により環境水と体液間におけるCO<sub>2</sub>分圧勾配が、陸上動物に比べて逆転し易

く、環境水中からCO<sub>2</sub>が体内に拡散するようになる。生物の体内では、代謝によってCO<sub>2</sub>は絶えず産生されているため、体内でのCO<sub>2</sub>産生と環境水へのCO<sub>2</sub>排出が新たな平衡に達するまで体液のCO<sub>2</sub>分圧は上昇を続ける。体内でのCO<sub>2</sub>分圧の上昇は、海水と同様に体液を酸性化させ、アシドーシス(acidosis)と呼ばれる体内環境異常を引き起こす。

海洋酸性化の生物影響について、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の報告書(AR5: IPCC, 2014)で既往知見がまとめられ、生物群別の影響について分析された(Wittmann and Pörtner, 2013)。その分析によると、海洋酸性化に対して石灰化生物が一般的に脆弱であり、中でも軟体動物、棘皮動物および造礁サンゴ類は酸性化に対して比較的感受性が高く、甲殻類の感受性は低いとされている。また、初期生活期における脆弱性が高い例がある。

海生研においても海洋酸性化の生物影響調査に着手したが、既往知見を調べると水産有用種の知見が乏しいことから、日本で重要な水産有用種への影響を中心に調査を開始した。

#### 1) 魚類に対する調査

現在、海洋酸性化の魚類への影響評価は、熱帯性小型魚類の行動を対象とした研究に偏っており、実験例不足で中長期的な影響が不明とされている(Wittmann and Pörtner, 2013)。また、繁殖や成長への影響といった慢性的影響については未だ知見が乏しく、その充実が望まれている。そこで、我々は魚類の繁殖に対する海洋酸性化影響を明らかにすることを目的として、シロギス*Sillago japonica*及びマダイ*Pagrus major*を用いた繁殖試験を行った。

シロギスを、対照海水(CO<sub>2</sub>分圧が約530 μ atm)から最高でCO<sub>2</sub>分圧を4,100 μ atm(≒pH 7.1)まで上昇させた試験海水中で繁殖させた結果、最高の4,100 μ atmでも産卵が確認され、産卵回数や産卵数に対してCO<sub>2</sub>分圧の変化による有意な違いは認められなかった。また、産卵で得られた受精卵の正常発生率及び孵化率は、ともに90%以上と高く、CO<sub>2</sub>分圧の変化による有意な差は確認されなかった。一方、マダイでも同様の繁殖試験を行った結果、2,000 μ atm(≒pH 7.5)で孵化率の有意な低下が認められたことから、酸性化に対する感受性はシロギスに比べてマダイの方が高いことが推察された。このことから、種によって酸性化に対する感受性が変わることが示唆された。

次に、魚種の繁殖に及ぼす酸性化と温暖化の複

合影響を調べた。酸性化単一影響の試験と同様に試験海水のCO<sub>2</sub>分圧を上昇させるとともに、それぞれのCO<sub>2</sub>分圧に対し水温26℃と28℃の試験区を設けた。その結果、2,000 μ atmの28℃試験区において、シロギスの産卵は影響を受けなかったが、受精卵の正常発生率は有意に低下した。このことから、シロギスの繁殖は、酸性化単一では影響が出ないレベルであっても、水温上昇が加わると影響を受けることが分かった。現在、マダイの繁殖についても同様の複合影響試験を実施しているが、マダイでも複合影響を被る傾向が示されている。

## 2) 石灰化生物に対する調査

海洋酸性化の貝類への影響に関する既往知見は充実しているが、卵期や幼生期といった初期生活史段階への影響を扱った研究例が大部分を占める。また、地球規模で考えた場合に酸性化によって石灰化生物に与える影響がより早い時期に生じると考えられているのが高緯度海域であるが(Orr *et al.*, 2005), 貝類に限らず、冷水域に生息する生物に対しての知見はまだ不足している。そこで、我々は冷水域にも生息する水産有用種であるウバガイ *Pseudocardium sachalinense* (別名:ホッキガイ) 稚貝とバイ *Babylonia japonica* 成体の成長に対する酸性化影響を調査した。

ウバガイ稚貝(当歳貝)の試験では、試験海水を対照海水(CO<sub>2</sub>分圧が約400 μ atm)から最高でCO<sub>2</sub>分圧を1,200 μ atm (≒pH 7.7)まで上昇させ、20週間の成長を調査した。その結果、ウバガイ稚貝の重量、殻長、殻高、殻幅、殻重量及び軟体部重量に有意な変化は認められなかった。しかし、CO<sub>2</sub>分圧800 μ atm以上において、試験期間中に成長した殻の厚さが薄くなった。また、バイの80日間の試験の結果、CO<sub>2</sub>分圧が5,700 μ atm以上で殻皮の維持に影響を及ぼすことが確認された(Kita *et al.*, 2013)。

貝類において、殻の形成が不完全になると、物理的な衝撃や捕食に対する耐性が低下するため、自然界では生存が危ぶまれ、資源量の減少に繋がる可能性がある。また、海生研では国立研究開発法人産業技術総合研究所と共同で、海洋酸性化のサンゴ類への影響に関する研究を進めており、酸性化はサンゴ類の成長に対して負の影響を及ぼしていることが確認されている。

## 4. 種苗生産現場での対策例

海生研では、供試生物の健全性を担保するため、多くの生物を独自に種苗生産して試験に供してい

るが、近年、シロギスの種苗生産において仔魚の生残率が低下する事例がしばしば生じた。その原因については、現在調査中ではあるが、生残率が低かった時において、仔魚養成水槽への供給水のpHが通常よりも低い場合があった。そこで、低pH緩和水槽(泡沫分離による有機物除去や強曝気によるCO<sub>2</sub>除去を用いてpHを上昇させる)を設けて、そこから仔魚養成水槽へ海水を供給したところ、仔魚の生残率の低下を防ぐことができた。このことは、海洋酸性化が種苗生産に影響を及ぼす可能性を示唆しており、早急な実態解明を行い、海洋酸性化が原因であるならば更なる対策の検討が必要である。

## 5. おわりに

日本の沿岸海域における海洋酸性化の実態を正確に把握するためには、海生研の調査だけでは当然不十分である。今後は、全国規模で高精度の観測が必要である。また、海洋酸性化の生物影響に関しては、我々の調査でもその必要性が示されたように、今後は複合影響や慢性影響の調査が重要になってくる。しかし、これらの調査は、技術的に困難な部分も多く、まずは調査手法の確立が急務である。

## 引用文献

- IPCC (2014). Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds. Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Meyer, L.A.). IPCC, Geneva, Switzerland, 1-151.
- 気象庁 (2018). 表面海水中のpHの長期変化傾向(北西太平洋). <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a.3/pHtrend/pH-trend.html> (2018年7月2日アクセス)
- Kita, J., Kikkawa, T., Asai, T. and Ishimatsu, A. (2013). Effects of elevated pCO<sub>2</sub> on reproductive properties of the benthic copepod *Tigriopus japonicus* and gastropod *Babylonia japonica*. *Mar. Pollut. Bull.*, **73**, 402-408.
- Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R.M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R.G., Plattner, G.-K., Rodgers, K.B., Sabine, C.L.,

Sarmiento, J.L., Schlitzer, R., Slater, R.D., Totterdell, I.J., Weirig, M.-F., Yamanaka, Y. and Yool, A. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, **437**,

681-686.

Wittmann, A.C. and Pörtner H.O. (2013). Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nat. Clim. Change*, **3**, 995-1001.

### Ⅲ. 気候変動緩和策としての海洋利用とその課題

#### Ⅲ-1. CCSと環境影響評価

吉川貴志

##### 1. はじめに

気候変動の対策には、「緩和策」と「適応策」がある。緩和策とは、気候変動の直接の原因である温室効果ガスそのものを削減するような、根本的な対策を指す。例えば、省エネルギーや再生可能エネルギーの導入といった化石燃料を使わない対策や、大気中に放出してしまった二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を植林等の手段によって吸収する対策、そして、CO<sub>2</sub>を大気へ放出することなく回収し、地中深くに貯留するCO<sub>2</sub>の分離・回収・貯留(Carbon dioxide Capture and Storage ; CCS)等が、この緩和策として挙げられる。他方、適応策とは、すでに生じている影響に適応していくものであり、渇水や洪水への対応、熱中症の予防や、高温に強い農作物を作出することなどを指す。こうした気候変動対策は、持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals ; SDGs)の一つとして、193の国連加盟国が全会一致で採択しており、注力すべき優先課題となっている。なお、我が国の対策については、「気候変動の影響への適応計画(2015年11月27日閣議決定)」や「地球温暖化対策計画(2016年5月13日閣議決定)」として公表されている。本稿では、気候変動緩和策として海洋を利用するCCSと、その環境影響評価について現状を報告する。

##### 2. 日本のCCSプロジェクト

CCSとは、製油所や発電所など大規模なCO<sub>2</sub>排出源からCO<sub>2</sub>を分離・回収し、地中深くに貯留する技術である。日本においては、CO<sub>2</sub>を海底下1,000m以深の地層に圧入する、「海底下CCS」の実証試験が進んでいる(経済産業省, 2016)。パリ協定のいわゆる「2°C目標」を達成するためには、2040年には2,500のCCS設備が稼働している必要があるとも言われている(Global CCS Institute, 2017)。そしてCCSによるCO<sub>2</sub>排出量削減は、電力業界では再生可能エネルギーと同様に、主要なオプションであると位置づけられている(OECD/IEA, 2017)。

CCSのプロジェクトは世界中に存在しており、17の大規模な商用CCS設備が稼働している(Global CCS Institute, 2017)。日本においては、2003年から2005年にかけて新潟県長岡市において、総量1万トンのCO<sub>2</sub>を陸域で圧入した実証プロジェクト

が実施された。次いで、2016年からは、北海道苫小牧市において、10万トン規模(実用規模の10分の1規模)の海底下へのCO<sub>2</sub>圧入が、実証試験として行われている(以下、「実証試験」という)。実証試験は、経済産業省が事業主体であり、2015年に設備建設、2016年から2018年にかけて監視を行いながら海底下へCO<sub>2</sub>を圧入し、圧入終了後も継続して監視を行うものである。この圧入試験と同時並行で、安全性評価等の研究開発や、CO<sub>2</sub>貯留ポテンシャル調査も実施されており、国は2020年頃の技術実用化を目指している(経済産業省, 2016)。

##### 3. 海底下CCSの環境影響評価

大規模な事業を実施する際には、「環境影響評価法」に基づいて、事業実施前に環境への影響を評価する、環境アセスメント制度がある。同法では道路、ダム、鉄道、空港、発電所など13種類の事業を評価の対象としており、事業者は、事業の実施、工事中・供用中の影響を事前に予測評価しなければならない。これに対して、海底下CCSは、「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」(海洋汚染防止法)に基づいて、環境影響評価を行う。

海底下CCSは、圧入したCO<sub>2</sub>が海底下から漏れ出てこない場所を選定して実施することが前提となる。しかし、海洋汚染防止法に基づく海底下CCSの環境影響評価では、「CO<sub>2</sub>が海底下から海洋へ漏出する」という仮説を立て、海洋環境への影響を評価する必要がある。ただし、海水中へのCO<sub>2</sub>漏出があった場合においても、海洋環境の保全に障害を及ぼすおそれがないこと、すなわち、万が一漏出しても、影響の範囲が限定的で、二次的な影響を引き起こさない、あるいは生じる変化が軽微と推定されることが求められる。影響が大きいと予測される場合は、環境に配慮するよう計画の見直しが求められることになる。つまり、環境影響評価法と同様の「環境保全」の考え方が、海底下CCSの環境影響評価においても適用されているといえる。

事業実施前の環境影響評価を中心に、CCS事業着手までの手順を以下に述べる。大まかな手順としては、①事前調査、②潜在的影響評価、③申請書作成、④許可申請、⑤CO<sub>2</sub>圧入と監視実施(事業着手)、と整理できる。

まず、事前の現地調査で、監視のベースラインとなるデータを取得する(前述の手順①)。そして、机上でのシミュレーション等を経て、「万が一の漏出」という潜在的な影響評価を行う(②)。

これらの結果をもって、環境大臣に対する事業の許可申請書を作成する。許可申請にあたっては、指針（環境省，2008）を参照しつつ準備を進めていく。実証試験では、この指針が例示する事前評価項目例（第1表）を参考に、水質、底質および海洋生物の一部について四季調査を実施し、その他文献調査を行って、ベースラインデータを整備した。②の潜在的影響評価を実施した後は、申請書を作成して許可申請を行うこととなる（③および④）。

第1表 事前評価項目の例\*

環境要素等の区分	調査項目
水環境（水質）	二酸化炭素濃度（関連指標；全炭酸，アルカリ度等），水素イオン濃度（pH），有害物質の濃度等
海底環境（底質）	二酸化炭素濃度（技術的に困難），有害物質の濃度
海洋生物	浮遊生物，魚類等遊泳動物，海藻・草類，さんご類，および底生生物の生息状況
生態系	藻場，干潟，さんご群集，脆弱な生態系，産卵・生育場，熱水生態系等特殊な生態系
海洋の利用等	レクリエーション，海中公園等の保全区域，漁場，航路，海底ケーブル，資源探査・掘削

\*環境省（2008）

申請書には、事前評価結果に関する書類、その他、省令で定める書類を添付しなければならない。これらの許可申請書等の記載要領は、告示で示されている（環境省，2007a，2007b）。なお、許可申請では、環境影響評価法に見られる「配慮書」、「方法書」、「準備書」、および「評価書」に相当するステップがなく、今のところ必要な書類を整備すれば、申請が可能である。ただし、実証試験では、必要書類の内容を事前に環境省と協議する必要があった。

実証試験においてこれら一連の手順に要した期間は、①と②が約1年間、③と④で約1.5年間、公告縦覧が1ヶ月であった。

#### 4. 海洋環境の監視計画

監視計画全体は、圧入ガスに関する監視、地層内に関する監視、そして海洋の監視から成る。また、監視段階は、監視結果等の状況により次のよ

うに移行するシステムである。

通常は「通常時監視」を実施し、CO<sub>2</sub>漏出のおそれが生じていることを類推させる異常を検出した場合、確認の調査を行う。それでもなお同様の結果を得た時は、CO<sub>2</sub>の圧入を停止して「懸念時監視」を実施する。懸念時監視の、状況を的確に把握する調査により、漏出のおそれがあると判断された場合、「異常時監視」に移行する。異常時監視では、具体的な漏出防止措置（あるいは影響緩和措置）を検討する観点からの詳細な監視を実施することになる。いずれのケースにおいても、漏出のおそれが解消されていけば、すなわち、漏出していないことが確認されれば、通常時監視に戻る。

#### 5. 監視の実態

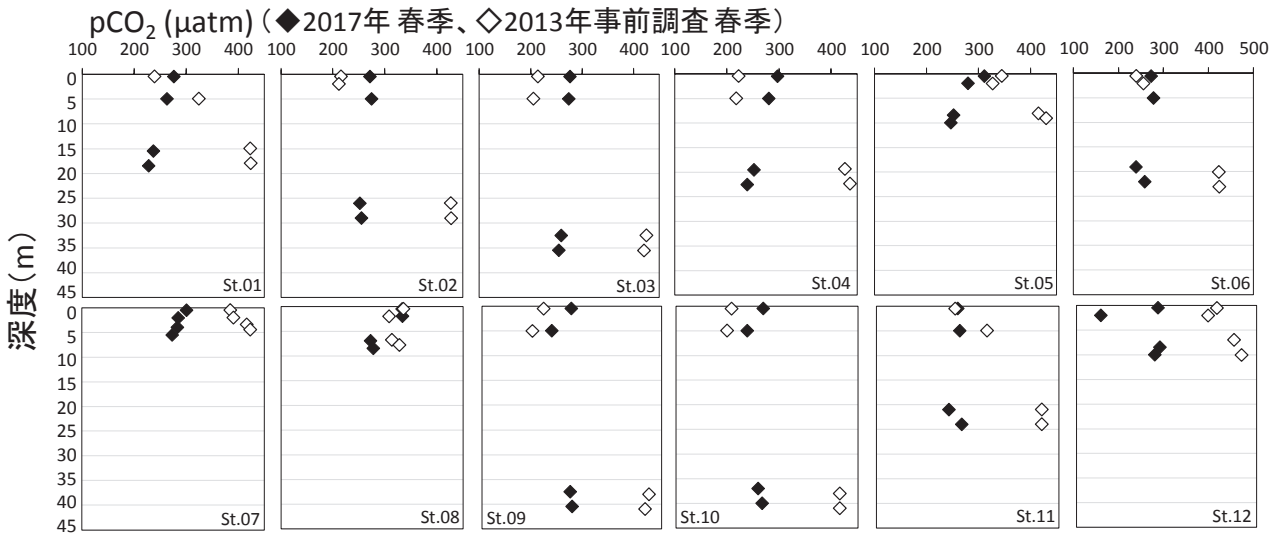
監視は、海洋環境調査によって、CO<sub>2</sub>貯留海域における環境影響が事前の予測・評価の範囲に収まっていることを確認するものである。この業務は経済産業省が日本CCS調査株式会社に委託しており、海生研では、海洋環境調査と監視報告（監視計画に従って、事業者である経済産業省が環境大臣へ報告するまで）の一部を、平成28年度より担当している。

監視では、北海道苫小牧西港沖、約5km四方のエリアに設定してある12調査測点を対象に調査を行っている。調査測点の最大水深は約40mである。

監視結果の例を幾つか紹介する。2017年春季の二酸化炭素分圧（pCO<sub>2</sub>）を第1図に示す。事前調査と比較すると、底層のpCO<sub>2</sub>は低いことがわかる。しかしながら、2016年の春季、2017年の夏季、および2018年冬季では、事前調査よりも高いpCO<sub>2</sub>を観測しており、確認のための調査を実施した。

生物監視の例として、メガロベントスの監視について述べる。ここでは、遠隔操作無人探査機を使った観察と、苫小牧特産の水産物であるウバガイを対象とした貝けた網調査を組み合わせ、メガロベントスの分布状況を調べている。事前調査では、ウバガイ、カシパン類、キヒトデ、キンコ、クモヒトデ類、ゴカイ類、ニッポンヒトデ、ヒダベリイソギンチャク、およびホタテガイを主要種としており、2017年夏季の調査では、すべての主要種を確認した。

実証試験では、事前調査を各季節1回ずつ実施したのみであるが、監視によってデータを蓄積していくことにより、ベースとなるデータの年変動や日変動などがより明らかになると期待される。



第1図 二酸化炭素分圧の観測結果例。

前述のとおり、通常時監視で漏出のおそれが生じていることを類推させる異常を検出した場合には、確認調査を行う。この確認調査の第1段階である「現地概況調査」の内容を以下に述べる。

この調査では、漏出懸念範囲の絞り込み、特定を試みる。まず、pCO<sub>2</sub>が高かった調査測点で、採水の再調査を実施する。そして、気泡確認調査とセンサー調査を実施する。気泡確認調査は、pCO<sub>2</sub>が高かった調査測点を中心とした1km四方のエリアについて、サイドスキャンソナーを曳航し、海底下からCO<sub>2</sub>が気泡となって漏出してないかを調べるものである。また、センサー調査は、気泡確認調査と同じエリアについて、底層のpH分布状況を確認するものである。このような調査データに、地層内データ等をあわせて、漏出懸念点の絞り込みや特定ができるかについて環境省が総合的に判断する。なお、これまで実施した現地概況調査では、いずれも「漏出のおそれなし」と環境省が判断し、通常時監視を継続する結果となった。

## 6. おわりに

これまで実証試験の海洋監視を実施した実績から言えることをいくつか述べる。まず、ベースラインデータの不足が挙げられる。監視結果を正しく評価し事業を進めるためには、事前調査データの拡充が必要である。CO<sub>2</sub>の圧入前に、ベースとなる水質の変動幅等が十分に把握できるようなデータを保有することが望ましい。ベースデータの拡充に関して言えば、事業者以外の調査・監視データも共有できれば、非常に効率的である。海洋環境調査は費用も時間もかかり、個々のデータ

はいずれも大変貴重なものと言える。このことから事業者の調査以外で使えるデータがあるならば、それらを集約して活用することで、当該海域の性状の理解を深めることができる。現行の許可申請指針は、知見の集積や技術の発展によって改訂していくものとされている。改訂にあたっては、実証試験のプロセスから、例えば影響評価項目の選定、実施頻度、監視段階の移行基準の設定方法等について、蓄積した監視データ等をもとに、科学的な検討が加えられるものと思われる。

## 引用文献

- Global CCS Institute (2017). The global status of CCS: 2017, Australia. 1-82.
- 環境省 (2007a). 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可等に関する省令 (平成19年環境省令第23号).
- 環境省 (2007b). 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可の申請に関し必要な事項を定める件 (平成19年環境省告示第8号).
- 環境省 (2008). 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可の申請に係る指針 (平成20年1月).
- 経済産業省 (2016). 我が国のCCS政策について. [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso\\_nenryodenchi/co2free/pdf/006\\_02\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/co2free/pdf/006_02_00.pdf) (2018年8月31日アクセス)
- OECD/IEA (2017). Energy technology perspectives 2017.

### Ⅲ. 気候変動緩和策としての海洋利用とその課題

#### Ⅲ-2. 洋上風力発電と環境影響評価

三浦雅大

##### 1. はじめに

最後の演題として、CCSとともに温暖化ガス削減のための対策の一つである風力発電のうち、近年建設が増加している洋上風力について、その現状と環境影響評価について概説する。

##### 2. 風力発電とその世界的動向

2015年のパリ協定で「産業革命前からの世界の平均気温上昇を2℃未満に抑える」と言う目標が示された。その目標を達成するためにIEA(国際エネルギー機関)が提示したシナリオ(IEA, 2017)における今後の電源構成の変化を見ると、世界の全電源発電量の3%程度を風力発電に転換し、2060年には全体の約20%にする必要があるとされている。

これまでの風力発電の動向を見ると、風力発電はまずヨーロッパで発展したが、2000年代から次第にアメリカ、中国の導入量が増大し、近年は特に中国の伸びが著しい。世界全体の累積導入量は継続的に増加し、2017年には500GWを突破した(GWEC, 2018)。一方、年間導入量は近年鈍り始めており、その理由の一つとして、風力発電所を建設する陸上の適地が残り少なくなってきたことが挙げられる。なお、日本の風力発電導入量は、世界の風力先進国に比べて非常に少なく、2017年における電力容量(3,400MW)は世界で19番目の値である。

##### 3. 洋上風力発電の世界的動向と日本の現状

洋上風力は、まだ多くの建設スペースが残されているとともに、陸上に比べて風が安定して吹く、風車の大型化が可能等のメリットがある。着床式と浮体式に分けられ、水深50mまではタワーを海底に固定する着床式が一般的で、これが現在の主流である。一方、浮体式の方は、現在洋上風力全体の導入量に対して0.1%程度に過ぎないが、2017年世界初の商用浮体式洋上風力発電所であるイギリスのHywind Scotlandが稼働したように、浮体式の導入も始まっており、沖合への設置が可能となれば、ますます建設スペースが広がることになる。

世界の洋上風力発電累積導入量は継続して伸び続けており、年間導入量は2016年に一旦減ったが、

2017年には持ち直してこれまでで最大の導入量となった。大規模な洋上風力の導入は、風力発電の先進地域であるヨーロッパが中心となっており、発電量の多い洋上風力発電所の上位10事業はヨーロッパ諸国のもので占められている。

日本では、ごく沿岸に位置する小規模のもの、あるいは経済産業省、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、環境省主導の実証事業があるのみで、ヨーロッパのような大規模な洋上風力発電所はまだ建設されていない。しかし、数万~100万kW級の建設計画が、東北地方の北部を中心に各地で進行中である。日本政府も海洋基本計画やエネルギー基本計画において洋上風力の導入を促進する意向を示しており、そのため、日本における洋上風力導入の障害の一つとなっている「海域の利用のルールがしっかりと法制化されていない」と言う問題を解消するため、港湾法の改正等による海域占有許可制度の創設や、審査の合理化等が進められている。このような法整備等にも後押しされ、今後、我が国でも洋上風力の導入が進むと考えられる。

##### 4. 洋上風力発電に係る環境影響評価調査

以上のように、地球温暖化対策の一つとして洋上風力は今後さらに発展して行くと考えられるが、その一方で、洋上風力発電が海域環境や海生生物に与える影響が懸念される。わが国の環境影響評価法では、出力1万kW以上の風力発電所を第一種事業として、環境影響評価の手続きを行うよう定めている(出力0.75~1万kWの第二種事業については、知事意見を勘案して環境影響評価を実施すべきか否かを主務大臣が個別に判定する)。また、風力発電に係る環境影響評価の項目については、経産省の「発電所の設置又は変更の工事の事業に係る環境影響評価の項目並びに当該項目に係る調査、予測及び評価を合理的に行うための手法を選定するための指針、環境の保全のための措置に関する指針等を定める省令」の別表第五に参考項目が示されている(ただし、陸上と洋上の区別はしていない)。風力発電については、火力発電所のような稼働に伴う排ガスや排水がないので、これらに関わる参考項目が省かれている一方、風力発電に特有な項目として超低周波音、風車の影が挙げられている。ただし、これらは人間の生活に係る項目であり、洋上風力の場合のごく沿岸に立地するケースを除けば人の居住区から離れているため、このような近隣住民への影響は、陸上風力と比べて少ないと考えられる。

野生生物への影響を考えた場合、まず懸念されるのは、風車への鳥類やコウモリ類の衝突、いわゆるバードストライクであろう。これは、陸上・洋上共通の問題であるが、洋上の場合、海鳥類の生態やコウモリ類の海上の利用状況等に関する知見が不足していること、実際の影響を見るための死骸調査が難しいこと等が、影響の予測・評価や実態把握を困難にしている。

海中に生息する生物への影響としては、工事や施設の存在・稼働による水中騒音や濁りの発生、海底地形の改変、流れの変化等による生息環境の悪化や行動阻害等が想定される。ただし、洋上風力では、風車等の施設が広い間隔で離散的に配置されるため、事業実施区域は広大であるが、その内の施設の占める面積は非常に小さく1%未満に過ぎない。そのため、濁りや海底地形の改変、流れの変化等は、風車のタワー等の近傍に局所的には発生するが、事業実施海域全体で見ればそれほど大きな変化はないものと思われる。

これらに対して、水中音は発生源から広く伝播するため、工事や風車の稼働により発生する水中騒音が、海生哺乳類・爬虫類、魚類等の聴覚の発達した生物群に与える影響は留意されるべきものであろう。実際に、NEDOの銚子沖洋上風力発電実証事業において、イルカ的一种であるスナメリの出現個体数が、工事による水中騒音発生期間中に減少し、工事終了後に回復したことが報告されている(NEDO, 2015)。一方、風車の稼働により発生する水中音は、建設工事によって発生する騒音に比べれば微弱なものであるが、建設後の長い期間にわたって発生するため、慢性的な影響を及ぼす可能性がある。

水中音の影響については、現在行われている環境影響評価では、発生する水中騒音の音圧レベルと音源からの距離の関係、海域における背景雑音の大きさ、対象生物の聴覚閾値のデータに基づき、対象生物に聴こえる音圧レベルの騒音が発生源からどのくらいの範囲まで伝わるかを求めることによって、影響の大きさを評価するという方法例がある。ただし、この方法にはいくつか検討の余地があり、その一つは、音圧レベルによっては、水中騒音が対象生物に聴こえてはいても特に影響は生じないケースも考えられることから、影響を過大評価してしまう可能性があることである。

海生研では、現在、水中音の魚類への影響予測・評価のためのデータとして、どの程度の音圧レベルで魚類の行動への影響が現れるかについて実験を行っている。マダイ稚魚を100Hzの水中音(風

力発電が稼働した場合の水中音は100 Hz 前後にピークがあると言われている)に暴露したところ、140 dB re 1  $\mu$  Paの音圧レベルで曝露開始時に摂餌行動が一時的に抑制されることが確認された(島ら, 未発表)。このような行動に影響する音圧レベルに関する知見が集積されれば、より精度の高い影響予測・評価が可能になると思われる。

## 5. おわりに

環境省が立ち上げた「洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会」の報告書(環境省, 2017)では、洋上風力の環境影響評価項目を整理しているが、その選定理由が「現時点では環境影響の程度が不明確であるが、当面は評価項目として選定する」となっているものが多い。このことから、まだ大規模な洋上風力発電所の建設事例のないわが国では、まずは今後建設される洋上風力発電所についてモニタリング調査、事後調査を実施し、各評価項目の影響の有無・程度に関するデータを集積することが肝要と言えよう。これにより、必要な評価項目を絞り込むことによって、環境影響評価の精度も高まるものと期待される。

また、影響予測・評価のための基礎的な知見として、どの程度の環境変化で生物への影響が認められるかに関するデータを実験等により集積することも大事である。ただし、有用なデータの取得の前段階として、有効な実験・調査手法の開発も必要であり、水中音影響を例にとれば、音は水槽壁面や水面に反射して強め合ったり、打ち消し合ったりするので、試験水槽内に均一の条件を作り出すことが難しく、試行錯誤で実験を進めているのが実態である。このように、洋上風力の環境影響評価に関しては、必要な知見が極めて不足している状況であるため、海生研も引き続き洋上風力発電の環境影響評価に資する調査研究に取り組んで行く所存である。

## 引用文献

- International Energy Agency (IEA) (2017). Energy Technology Perspective 2017, IEA Publications, Paris, France, 1-438.
- Global Wind Energy Council (GWEC) (2018). Global Wind Report-Annual Market Update 2017, GWEC, Brussels, Belgium, 1-69.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2015). 着床式洋上風力発電の環境影響評価



手法に関する基礎資料 (第一版). <http://www.nedo.go.jp/content/100758586.pdf> (2017年7月1日アクセス)

環境省 (2017). 洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会報告書. <https://www.env.go.jp/press/files/jp/105434.pdf> (2017年7月9日アクセス)

#### IV. 総合討論：海洋における気候変動緩和策実施とその課題

座長：三浦正治

パネリスト：喜田 潤・桑原久実・原田尚美  
林 正裕・吉川貴志・三浦雅大

##### 座長

総合討論のテーマは「海洋における気候変動緩和策実施とその課題」です。工学的な課題や政策的な課題もありますが、今日は、海洋生物や海洋環境について議論したいと思います。

まず、最大漁獲可能性が赤道域と南極海のあたりで減少するという予測でした。赤道域だと海洋生物は中緯度に移動すれば何とか生き残れると思いますが、南極海だと、もう逃げる場所がないのではと思いますがどうですか。

##### 喜田

おそらく逃げる場所はないと思います。特に南極海では、大きな漁業資源ではないですけれども、オキアミの資源が生態系を支えています。漁獲量がどれだけ減少するかを、絶対量ではなく率で示しましたが、温暖化の影響を受けやすい漁業資源の減少率が大きいという結果になっています。

また、島嶼国で一番大きな問題は、海面上昇による国土の消失です。それにプラスして多獲性魚種の漁獲が減少する。気候変動による影響というのは、複合的にさまざまなものが重なって起こるということになると思います。

##### 座長

藻場の現状、磯焼け対策について、海水温上昇でウニや南方系の魚が増加して、海藻の温度耐性より低い温度でも藻場に影響が出ると理解してよいですか。

##### 桑原

高水温が直接藻場の消失原因になる事例はありますが、現在の水温の上昇では生息水温の上限値を毎年超えて消失することはありません。それよりも、南方性のアイゴやブダイなどの植食性魚類の北上やウニ等の植食動物の食圧が高くなり海藻が食べられ、全国各地で磯焼けが発生しています。

これまで、藻場が消失する要因として、種々の意見がありましたが、海洋の酸性化が磯焼けに影響していると言うものは、今のところありません

ん。我々の水研機構では、藻場回復を行う場合、海藻の生えない制限要因を特定して、その要因の除去・緩和に努めることが重要と考えています。海藻を実海域に移植して、植食動物の食害にあわないようにケージで囲う区と囲わない区を設けて実験を行いました。ケージで囲った区では海藻が生育しましたので、栄養塩、水温、塩分等の水質は制限要因とは考えられず、囲わなかった区で海藻は消失しましたので植食動物の食害が考えられました。このような現地試験は全国的に実施され、藻場が回復しない主要因は植食動物の食害であることがわかりました。

##### 座長

地球温暖化というと南から進むという印象があるのですが、海洋酸性化は北から進むということでしたが、その理由は何ですか。

##### 原田

端的には海水温が低いということがあります。気体は水温が低い方が溶け込みやすいということが、第1の理由です。また、極域の場合は、海水が融け出して淡水が増加しているということも、もう1つの大きな要因になっておりまして、希釈の効果といえますか、よけい酸性度を高める二重の効果になっています。

##### 座長

飼育海水のpHを上げると種苗生産が上手くいくという話がありましたが、プロテインスキマーを使うということはpHを下げている要因はCO<sub>2</sub>だけではないということですか。

##### 林

そうです。pH低下には有機物の影響とか富栄養化の影響などもあり、そういうのを除去するためにプロテインスキマーを使用しています。CO<sub>2</sub>自体を飛ばしているのは強曝気ですが、このまま大気中のCO<sub>2</sub>がどんどん上昇していけば、当然曝気では追いつかなくなるので、将来的にはアルカリを添加するなど、根本的に海水を作るというようなことも必要かと思っています。特に、仔魚の時期は環境の変化に弱いので、その弱い時期に注意する必要があります。

##### 座長

CCSの監視調査で、通常時監視から確認調査な

どに移行する状況というのは、事前のベースライン調査で把握されたCO<sub>2</sub>濃度を通常時監視で超えた場合ということですか。

### 吉川

大まかに言うとそういうことになります。実際には事前に調べたCO<sub>2</sub>濃度、酸素濃度のデータセットから基準線を引いて、それを超えた場合に確認調査等へ移行するわけですが、事前に得られているデータは限られたものですので、判断が難しくなります。

現段階では実証的な事業という位置づけで調査項目も多岐にわたって実施されているように思います。この実証事業の中でCO<sub>2</sub>漏洩を判断する基準の見直しなども提案したいと思っています。

### 座長

洋上風力の環境影響評価について、経産省の手引きと環境省の基本的な考え方から見て、今後、水中音の影響評価の開発が必要という話でしたが、洋上風力で懸念されるのは水中音だけですか。

### 三浦

他にはバードストライクという大きな問題があります。それから工事に伴う水質や底質変化、施設の存在による流れの変化があります。流れの変化があれば、それに伴って底質や水質も変化する可能性があります。

洋上風力の場合は、これから予定されている大規模なものと、海上に100本位のタワーを建てたりします。このタワーをローター径の3倍位になるような間隔で作りますので、事業実施区域は非常に広がります。ただ、そのうち発電施設が占有する面積は事業実施面積に比べると非常に小さく1%未満だと思います。それがさらに分散的に配置されるということ考えると、流れや底質の変化が発生しても、局所的なものになるのではないかと思います。ただ局所的とは言っても、全く影響がないわけではないので、そこはしっかり調査をして、影響が少ないなら少ないなりのデータを取って、事例が積み重なってきたら、これはやっぱり影響がないから調査項目から外しても良いといった検討ができればよいと感じています。

### 座長

バードストライクあるいはバットストライクで

は衝突して死ぬので、影響があるかもしれませんが、クジラや魚はそれほど心配しなくてはならないのでしょうか。

### 三浦

鳥では実際に衝突して死ぬ個体があります。魚やクジラでは、そこまでの影響はないと思いますが、なぜ調査されているかという点、海生生物の中でも聴覚が発達している生物群であるので、水中音の影響を受ける可能性があるためです。発表の中でご紹介しましたように、スナメリに対して工事の際の水中音が影響したという実例があります。また洋上風力の稼働後に発生する低周波音の影響については、これまではそれによって大きな影響が報告された例はないと思います。ただ日本の場合、洋上風力が先行しているヨーロッパとは海域特性が違いますし、生息している生物も違う。そういう意味では、その影響についても注視する必要があると思います。

### 座長

ヨーロッパで先行しているという話がありましたが、CCSも世界的に色々な場所で行われていますが、事前のベースライン調査やモニタリング調査は、世界的にはすでに実施されているのではありませんか。

### 吉川

実施されているようです。ノルウェーではセンサーを製作して調査が実施されているようです。我々も装置を海中に設置して連続的なデータを得れば、CO<sub>2</sub>の日変動や季節変動が分かるようになると思います。

### 座長

皆さんにお聞きしますが、今日の話提供では水平的な話が多かったと思いますが、鉛直的な方向、海の深い方向への気候変動の影響というのはどうでしょうか。

### 喜田

二酸化炭素による海洋酸性化はなぜ起こるかという点、大気中の二酸化炭素濃度が上昇して、それが海の表面から吸収されるということで、海の表層から伝わってくるということです。ただし、徐々に深い方向に海洋酸性化が進んでいるという現状が、知られてきているところです。その他、

酸素濃度等がありますけれども、それについては原田さんの方が詳しいと思います。

#### 原田

鉛直的な方向というのは、まさに海洋酸性化にとっては実は非常に深刻な状況になっています。今日20分の説明の中で紹介しきれないなと思いましたが、なぜ私たちが北太平洋に観測計を設けているかの理由として、北太平洋というのは全球規模の海洋大循環の最終地点だからです。非常に古い海水が全体的に湧昇してきて、どこで湧昇してきているかというのはまだまだ研究の余地がありますが、そういった古い水塊、水というのは、途中でいろんな有機物を溶け込ませて、最終地点にたどり着いた頃には非常に酸性度の高い水質となります。それが200mとか15mといった亜表層まで上がってきています。カルサイトという、アラゴナイトよりも溶解し難い結晶系の炭酸カルシウムでさえ未飽和な水質状態になっています。それが、場所によっては、もはや200m、150mの水深なのです。

ある種の動物プランクトンは、その水深で生活史を回しているわけですから、非常に深刻です。そういった亜表層の酸性化も、表層からさらにCO<sub>2</sub>を取り込むことによって加速されていきます。酸性化の問題というのは、鉛直的にもかなり深刻な状況になっているのが現状だと思います。

また、温暖化、酸性化で、3つ目のストレスとして貧酸素という問題があります。これも海の深い方からやってくる課題ですけれども、今日の林さんの講演でよくお分かりになったかと思いますが、1つ1つのストレスに対しては、生物はあまり大きく影響を受けない可能性があるのですが、これが2つ3つと重なってくると単にプラスではなくて、掛け算式にドラスティックに影響を受ける可能性があると思います。3つ目の要素として貧酸素というのが、特に日本海の場合ですと、比較的深いところにいい水産資源の漁場とかがあったりしますので、日本の周辺でそういった複数のマルチストレスの影響評価というのは、今後大きな課題になってくるのではないかと個人的には思います。

#### 座長

貧酸素というのは、内湾の海水の汚いところで起こる現象ではないかと素人的には思うのですが、日本海でも深いところから貧酸素が上がって

くるのですか。

#### 原田

有機物の分解によって海水中の酸素が使われてしまっていて、酸素の供給源は表層にしかないのです。深ければ深いほど酸素濃度が低いということになります。日本海の詳しい状況はわかりませんが、身近な海域として、太平洋側よりは日本海側のほうが貧酸素の影響を受けているのではないかと、海洋循環の仕組みからして、そういうふうに思います。

成層化という点も、おそらく規模的にはグローバルな規模での話に結び付くかなと思います。ローカルというよりはグローバルにじわじわということだと思います。ただ貧酸素に関しては、まだ非常に深い方での影響ですので、私たちもとっさに生物への影響をどう監視していったらいいのかなというのは、まだ手探りの状況ですけれども、次の計画では確実に、キーワードの一つに貧酸素化というのは入ってくると思っています。1,000mから、500m、200m、表層ぐらいまでのところの水深を考えています。

#### 座長

日本海の1,000mだとベニズワイの生息水深と重なりますね。今後の課題というところですか。

#### 原田

動物プランクトンも結構深くまで潜ります。1,000m近くまで潜っているという種もいるので、我々が対象にしている生物は、そういった水深から亜表層までの200mぐらいまでを生息水深にしている低次生物を対象に考えています。そういった水産資源の餌になるような重要な種も心配です。

#### 座長

今後、温暖化対策を進める上でも海のモニタリングが必要だと思います。モニタリングとして何をすれば良いのでしょうか。

#### 喜田

例えば酸性化の問題であれば一番測りやすいのはpHですが、一般的なpHセンサーの精度では、CO<sub>2</sub>濃度の数~数十μatmという差がなかなか検出できません。そういった精度まで求めるには、全炭酸を調べる必要があります。ただし全炭酸を

測定するには、海水をサンプリングしなければなりません。連続観測が必要であれば、pHやpCO<sub>2</sub>による精度の良いセンサーを求めているかなければなりません。また温度については、高精度のセンサーがありますので、そういったものを使えばよいと思います。海洋酸性化の観測方法については世界的に、こういう方法で、こういうことをしたらいいというマニュアル本が出ていますので、それに従えばよいでしょう。

もう一方で大事になってくるのは、海洋の物理、化学変化に呼応するかたちで、日本の沿岸であれば生物の分布や資源が如何に変化しているかをどのようにとらえていくか。例えば本日、桑原さんがご発表になりましたけれども、生物分布変化を気候変動と合わせて、どのようにモニタリングしていくのか、ストラテジーの構築が必要だと思います。

#### 桑原

海藻や貝等のあまり移動しない生物は、その場所の環境をモニターしており、定点等を設定して、モニタリングしておくべきと考えます。また、漁獲統計データは、漁業を通じて重要なモニタリングデータが得られていると考えられます。しかし、カレイにはいろいろな種がありますが「カレイ類」と1つにまとめられていたり、南方の魚類が北上しても「その他雑魚」に含められたり、水温上昇による魚種変化を把握しにくい状況にあります。漁獲統計データは、温暖化影響のモニタリングといった重要な側面を加えて、今後データの充実が必要と考えます。

#### 原田

酸性化以外のストレスが関与してくるとなると、甲殻類等も比較的深いところでは新たな問題となるかもしれません。JAMSTEC（海洋研究開発機構）としては、どうしても研究対象海域は外洋域が主になってきます。その中でも食物網を支える重要生物である低次生態系、プランクトン類が中心になっていくというのは今後も変わらないと思います。

#### 座長

次にCCSなどの緩和策の影響について議論したいと思います。CCSや洋上風力はCO<sub>2</sub>削減には効果的だと思いますが、それらにはそれ独特の環境影響もあり、懸念の声もあります。あまり懸念ばか

りしていてもなかなか温暖化対策は進まないと思いますが、これはどのようなスタンスで研究を進めればいいでしょうか。

#### 吉川

CCSに関してはとにかく実証事業段階であり、許可申請の中で、CO<sub>2</sub>が漏洩した場合を想定して、どのくらいのCO<sub>2</sub>が出てくるのかといったことをシミュレーションしています。

シミュレーション等で明らかに心配ないと言えればよいと思いますが、現状ではデータがやっぱり少ないという事情があるので、調査を重ねていく必要があると思っています。

#### 三浦

今後のエネルギーミックスの一つのピースとして、洋上風力も増やしていかなければいけないだろうと思います。ただやはり、日本に建てた場合、どういう影響があるかということは未知数だと思うので、そこはしっかりと調査して結果を蓄積していけば、実際はこんな影響があったとか、心配したけれど実はそのような影響はなかったというようなことも分かってくると思います。現段階では、影響把握のための調査をしっかりとやることが必要な状況にあると思います。

#### 喜田

温暖化緩和策は、ヨーロッパ、アメリカでは実用化されており、CCSはアメリカではすでに電力からのCO<sub>2</sub>隔離が陸域で実施されています。三浦さんの発表にありましたように、洋上風力もヨーロッパですでに発展してきています。その中で彼らがどのようにやってきているかというのをいろいろ聞いてみると、一番大事なのは learning by doing, やりながら学ぶということでした。やはりそういう姿勢が最初に必要で、やるかやらないかを最初に決めて、また環境影響評価だけやって事前に懸念を払拭しようとするのではなく、やってみて、ああしよう、こうしようとか、そこから学んでいってやっていく。そういった姿勢も日本でも必要ではないかと思います。

ヨーロッパはすでに洋上風力の経験が長いので、稼働を始めてから7年後に周辺の魚類資源増減への影響がどれくらいあったのかを調べて、減少しているところかむしろ増えているという結果を示した例があります。このような事後モニタリングは重要だと思います。

### 座長

地球温暖化影響に関して、複合影響の話も出ましたが、実験的にはどうですか。

### 林

複合影響になると、やはり実験のレベルが数段上がります。私の研究事例でも、酸性化だけでは影響が出なかったけれども、そこに高水温が加わると影響が出るということもありますし、先ほど言ったような酸性化に貧酸素が加わった場合に、どのような影響が出るのか分かりません。沿岸の場合だと富栄養化が問題になっていますが、富栄養化と酸性化、さらにはそこに温暖化が加わるということになると、その影響は全く分からないので、今後はそういった調査が重要になるだろうと思います。ただ、やはり手法が難しいので、実験手法の検討から始まると思います。また、さらに長期になると影響が出てくるという事例もあります。当然、温暖化や酸性化は短期で終わるものではなくて、今後ずっと続くものなので、やはり長期的な実験というのは必要ではないかと思えます。5年とか10年スパンの予算で研究できれば、非常にありがたいと思えます。

### 座長

今後、海藻のモニタリングも必要という話がありました。モニタリングするとしたら何が重要ですか。

### 桑原

鹿児島の水産技術開発センターでは、南方種の海藻がどのように増加しているか調べています。頻繁に見かけない海藻が多く、本州の研究者も加わり勉強会を開いています。このような藻場を監視するネットワークが全国的に広がることはすばらしいと思います。

### 原田

最近よく言われているオープンサイエンス、オープンデータという流れもあり、外洋域では、海洋酸性化のグローバルネットワークができています。実は地域ごとにも、例えばラテンアメリカとかウエストパシフィックとか、海洋酸性化研究について連携した地域ごとのコミュニケーションを取るグループというのは一応できてはいます。まだ積極的にオープンにはなっていないのかもしれませんが、グローバルとローカルを結びつけたよう

な形のオープン化というのは、非常に重要になってくるのではないかと思います。

### 喜田

桑原さんと原田さんのお話に加えて、もう1つ大事な視点として、例えば、漁業という経済、産業に対する影響を考えると、地域ごとに影響の度合いも違ってきます。温暖化なり酸性化の影響は、例えば温暖化による海水温上昇は太平洋側と日本海側で違って、酸性化の程度も違います。またおそらくそれらの影響は、藻場、干潟、開放沿岸域、内湾、そういうところでも全く違ってきます。そういった個々の地域の経済、それから個々の地域の特徴的な生態系を勘案して、どこを拠点にしてモニタリングしていくのかといったような視点も必要ではないかと思えます。

### 三浦

洋上風力のところでご説明しましたように、環境影響を評価するためのデータが現状では乏しいので、実験等でデータを積み重ねる必要があると思えます。ただ、例えば水中音の実験というのは非常に難しいです。水槽の中に様な音の条件を作り出すのが困難だからです。従って、実験手法の開発も必要です。また、現場調査の手法についても同様です。A-tagというクジラの鳴音を受信する機械をご紹介しましたが、海中に吊り下げておけば、勝手に調査してくれるという便利な機器ですから、現在スタンダードな手法となっています。ただし、問題は種の特定ができないことです。マイルカ科とネズマイルカ科という科レベルの区別はできるのですが、何の種かというのは分かりません。ただ文献情報によると、水中で録音した鳴音を分析することにより、種まで特定することが可能になりつつあるそうです。このような現場調査についても、手法や機器の開発が必要だと思います。

### 座長

会場からもご意見を頂きたいと思えます。

### 会場

大変感動する素晴らしいお話を伺えまして、発電産業の方々も勇気をもらえたような気がいたします。ただそういう中で、我々なりに気をつけなくてはいけないのは、前だけを向いているということではいけないような気がいたします。風力発

電という美名の中で、世界に冠たる美しい森、山の稜線、スカイライン、それを持ったわが国の非常に美しい風景が損なわれるとしたら、ちょっと耐えられません。

そういう中で、洋上発電というところに活路を見出したような気がしていたのですけれども、海に沈む夕日が見えるという日本でも有数の景観を誇る町にも洋上の風車が海岸近くに林立するというような話を聞いたときは残念な思いがいたしました。私はやはり産業にかかわる者としては、今、目に見えないものでも、何か忘れちゃいけないものというのはきっとあるはずだと。ふと今日の会の中で感じました。そういう気持ちだけは忘れないようにしたいと思います。

特に洋上風力で大変心配なのは、海鳥、渡り鳥です。陸地に接近したときに干潟等があれば、必ずそこでお休みをするわけです。そういうように、今見えていないものにまで気を使うというのが、これから必要なことなのかなという気がいたしました。無責任な話ですが、誰かが発信していただければと思います。

#### 座長

ありがとうございます。今回のシンポジウムの総合討論は、取りまとめて、海生研研究報告に掲載する予定です。見えないものへ配慮ということも含めて、今のご意見を文章に残しておきたいと思います。

#### 会場

大変興味深いお話を、幅広いトピックの中から伺わせていただきました。ありがとうございます。私がちょっと気になった言葉の一つとして、桑原さんから指摘があった、例えば海で何が起きているかということモニタリングしていくときに、漁獲統計とかそういったものが、もう少し種レベルとかになっていくといいというお話がありました。しかしながら、日本の最近の行政を見ていると、統計とかそういうところにかかる労力、お金といったものを、むしろ削っている状況にあるのではないかと思います。一方で漁業のためというよりは、こういった世界的な問題に使うべきレーダーみたいなものというような視点であれば、もっと大きな視点から、魚種別なりにデータが取れるような仕組みを再構築するようなことができるのではないかと。それは水産行政というよりは、例えば内閣府にある海洋政策本部のような

ところで、海洋の政策として、大きな視点から組み立て直せないのかとか、あるいは行政だけではなくて、いろんな力を集めて、そういったデータを集めていくといったことができないのか、そういう視点で、モニタリングの力の強化というものを今後考えていく必要があるのではないかと気がいたしました。

#### 会場

水産改革の中で資源管理が最大の使命となっています。資源管理・資源評価からすると水産改革の中で、予算を大幅に増やすとかいう話を聞いていますから、必要な調査のレベルは確保されるように期待したいと思います。漁獲データについては、確かに農林水産統計事務所を通じて行くと予算削減や時間が掛かるという問題があると思いますが、市場や漁協からデータを取ることで、シンプルで迅速にできるのではないかと思います。最近、外国もそうやっているようです。

別件ですが、海藻といえばCO<sub>2</sub>を吸収すると思いますが、これについてどのようにお考えかお聞きしたい。最近、カリブ海では海藻が増え過ぎて困っていて、日本から何とか協力してくれないかという話がありました。CO<sub>2</sub>の吸収に関しては、カリブ海での海藻繁茂について何が起きているかという知見があれば、教えて頂きたい。

#### 桑原

カリブ海の藻場について知見は持っていませんが、海藻のCO<sub>2</sub>固定については、海藻の成長と枯死、沖への流失や岸への打ち上げ、分解過程等を各生活史段階で考慮する必要があり、また、他動物への摂食による取り込みなどを考慮すると非常に難しい課題だと考えます。また、海藻のCO<sub>2</sub>固定だけでなく、藻場には付着性の動・植物が数多くいますので、これらの生物を含めた藻場のCO<sub>2</sub>固定についても検討する必要があると考えます。

#### 座長

それでは今日の総合討論をまとめます。まず1つは気候変動の現状を把握するためにも、あるいは対策の効果を検証するためにも、モニタリングが必要であるということが挙げられたと思います。ただモニタリングの水域、項目、水深等で工夫する必要はあります。またモニタリングについては、世界的な海洋ネットワークはありますが、日本沿岸はまだネットワーク化されていないとい

うことで、今後の課題でしょうか。沿岸は富栄養化があったり淡水の流入があったり、複雑なので今後留意する必要があると思います。

温暖化に対して、他に有効な手がないのでCCSや洋上風力が必要ということですが、日本は経験が浅いので、環境影響評価や事後調査、CCSの監視調査等については、注意深く進めて、経験を増やすという段階にあります。ただし、CCS実証事

業の中で合理化の考えも必要だし、洋上風力も経験を積む中で評価項目の見直しも考えたいということでした。更に今後の課題として調査機器の開発や予測手法、調査手法の開発も必要ということでした。

発表者の皆さん、会場の皆さん、ご協力どうもありがとうございました。これで総合討論を終了します。