2018 年度　温暖化・海洋酸性化の研究と対策

報告書

公益財団法人 笹川平和財団

海 洋 政 策 研 究 所

はじめに

国連海洋法条約等の国際約束や海洋の持続可能な開発および利用を実現するための国際的取組を受けて、地球表面の 7 割を占める海洋の総合的管理と持続可能な開発に向けた各国の取組が進んでいます。

笹川平和財団海洋政策研究所は、その前身である海洋政策研究財団の時代より、「人類と海洋の共生」を目指し、海洋の総合的な管理や、海洋教育・人材育成、海洋環境・生物多様性の保全などに関する調査研究を実施してきました。その成果は、国際社会による海洋の持続可能な発展の実現に資する提言として取りまとめております。そして、この調査研究の一環として、当研究所では、2012 年 6 月の「リオ+20」で国際的行動計画に初めて取り上げられた地球的な課題である「海洋酸性化」の問題についても、その重要性にかんがみ、2015 年の合併による新財団スタートを飾る海洋の重点研究のひとつとして取り上げ、「温暖化と海洋酸性化の研究と対応策」事業を立ち上げました。

地球規模での二酸化炭素の排出増加がもたらす問題としては、温室効果による地球温暖化が広く知られています。しかし、大気中の二酸化炭素増加がもたらす深刻な問題は、それだけではありません。大気中の二酸化炭素が増加すれば、海に吸収される二酸化炭素量もまた増加し、それによって海水の酸性化が進みます。この「海洋酸性化」は、科学者の間では前から認識されていましたが、国連持続可能な開発会議など地球的課題を議論する場では、ようやく最近になって採り上げられて国際的に注目されるようになった問題です。

2015 年 9 月の「国連持続可能な開発サミット 2015」で採択された「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」が掲げる「持続可能な開発目標（SDGs）」においも、「海洋酸性化」はその「目標 14 海洋及び海洋資源の保全と持続的利用」の行動ターゲットのひとつとして取り上げられ、「あらゆるレベルでの科学的協力の促進などを通じて、海洋酸性化の影響を最小限化し、対処する」とされています。このように、国際的には、目標 14 全体および「海洋酸性化」の問題への対応が始まっていますが、わが国では、この問題の重要性に対する認識はまだ低く、その対応は十分とは言えません。

そこで、海洋政策研究所では、2015 年度に行った予察的な調査結果を踏まえ、わが国周辺に広がる北西太平洋に焦点を当てて、2016 年度から、この問題に対する情報の発信・共有、その基盤となる「海洋危機ウォッチ」の構築に向けた取組を本格化させました。その 3 年目として 2018 年度には、前年度の成果である海洋酸性化に関する政策提言を踏まえた対外的な発表や、その実施に向けた国際シンポジウムを開催し、国際的なネットワークのもとでの提言内容の実現に向けた議論を行いました。また、情報基盤である「海洋危機ウォッチ」（プロトタイプ版）を完成させ、公表しました。

本事業の実施にあたりましてご支援を頂きました多くの協力者の皆さまに厚く御礼を申し上げます。

2019 年 3 月

公益財団法人笹川平和財団
海洋政策研究所長　角南　篤

目　　次

第１章　事業の概要.....3
１　背景と目的.....3
２　実施内容.....4
第２章　実施事項.....5
１　海洋の温暖化・酸性化に係る調査研究の推進.....5
２．１　海洋の貧酸素化.....7
２．１　海洋酸性化.....18
２．３　海洋教育に係る取組.....28
３　情報基盤の整備・構築.....29
３．１　科学データの収集・整理・解析と予測システムの構築.....30
３．２　情報基盤となる「海洋危機ウォッチ」の試作.....33
４　まとめと今後の課題.....60
別紙.....64

第１章　事業の概要

１　背景と目的

人間社会が排出する二酸化炭素は、温室効果により地球温暖化をもたらすとともに、海水中に溶け込むことで海洋酸性化を進行させる。近年、海洋酸性化は「もう一つの CO2 問題」として、海洋生態系等に大きな影響を与える要因とされ、影響把握が必要な世界共通の課題となっている。

すなわち、2012 年の国連持続可能な開発会議 RIO+20 の合意文書「The Future We Want」にて「海洋酸性化と気候変動が海洋・沿岸の生態系と資源に与える影響について取り組むイニシアチブへの支援を求める」ことが示されるなど新たな課題として取り上げられて以降、2013 年から 2014 年にかけて公表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第 5 次評価報告書にて、海洋酸性化について極域生態系やサンゴ礁といった海洋生態系に相当のリスクをもたらすと記されるなど、早急な対応が必要となっている。また、2015 年の国連持続可能な開発目標（SDGs）やその目標 14「海洋・海洋資源の保全、持続可能な利用」の実施に向けて開催された 2017 年の国連海洋会議などでも懸念が共有されている重要課題であり、欧米を中心に関係者のネットワーク構築が進められている。

海洋における地球温暖化と海洋酸性化の具体的影響については、例えば、日本周辺海域の造礁サンゴは、南からの海水温上昇により生息域が北上しつつあるが、低水温海域から進行する海洋酸性化が次第に南下するため、海水温上昇と海洋酸性化の挟み撃ちにあって 30～40 年後には生息適地がなくなるとも言われている。また、2018 年には 1 月に科学誌『Science』に海洋の温暖化と貧酸素化の課題を包括的に示した論文 [1]が掲載されるなど、新たな課題も提起されている。海洋の温暖化と酸性化による環境変化は、社会経済面で海洋に大きく依存している我が国にとって、また地球規模でも人間社会に大きな影響を及ぼすと予想される。しかしながら、これら課題について、我が国では十分な研究や対応策が検討されていない。

このような背景を踏まえ、海洋における温暖化や海洋酸性化の課題について、2015 年度の予察的な調査研究で得られた知見を踏まえ、2016 年度より 4 年間の計画で実施する「温暖化・海洋酸性化の研究と対策」では、日本のリードが期待される北西太平洋海域を研究対象とし、海洋における温暖化や酸性化について国内外の状況を共有・発信し、現状と課題に係る理解を深めること、また、我が国において取り組むべき事項を具体的に検討・推進するとともに、今後必要となる対応策（適応策と緩和策）について提言することを目的として、調査研究を行ってきた。

---

[1] Breitburg, D., L. A. Levin, A. Oschlies, M. Gregoire, F. P. Chavez, D. J. Conley, V. Garçon, D. Gilbert, D. Gutiérrez, K. Isensee, G. S. Jacinto, K. E. Limburg, I. Montes, S. W. A. Naqvi, G. C. Pitcher, N. N. Rabalais, M. R. Roman, K. A. Rose, B. A. Seibel, M. Telszewski, M. Yasuhara and J. Zhang (2018) Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. Science, 359 (6371)

２　実施内容

初年度の 2016 年度には、先進的な取組を進める海外研究機関への訪問調査や国際会議の開催を通じて、西太平洋域において連携可能なネットワークの構築に向けた検討を行うとともに、情報基盤である「海洋危機ウォッチ」の試作を行った。特に海外からの 6 名を含む 16 名の専門家を招聘し､140 名の参加のもとで 2017 年 1 月に開催した国際会議では、西太平洋の現状や課題を踏まえた対策やネットワーク構築の必要性について議論し、モニタリングや普及啓発の必要性を確認した。

初年度の取組を受けて 2 年目の 2017 年度には、「海洋危機ウォッチ」の構築を進めるとともに、国際貢献やモニタリング等の必要な取組を示した政策提言「次期海洋基本計画に向けた海洋酸性化に関する提言」を作成した。また、2017 年 6 月に開催された「国連海洋会議」などの新たな国際動向を踏まえた整理を「科学と政策」の観点から行った。

これらの検討を受けて、3 年目の 2018 年度には以下を行った。

（１）海洋の温暖化・酸性化に係る研究の推進

2018 年 1 月に科学誌『Science』に包括的な論文が掲載され、また、9 月にドイツのキールで 33 カ国・300 名超の科学者の参加のもとで開催された国際会議において「海洋貧酸素化に関するキール宣言」が取りまとめられるなど、科学界から新たな課題として提起されている貧酸素化の課題に着目し、その経緯や課題を調査した。また、海洋酸性化の課題については、前年度の成果である政策提言を踏まえた対外的な発表や、その実施に向けた国際シンポジウムを開催し、国際的なネットワークのもとで提言内容の実現に向けた議論を行った。

（２）情報基盤の整備・構築

日本周辺を含む北西太平洋海域に主眼を置き、海洋における温暖化や酸性化の影響に係る情報を集約し、その進行予測や社会・経済面での影響を検討するとともに、そうした情報を共有し、対応策（適応策/緩和策）について国際社会を含めた議論を行うことを目指す。

2018 年度は、情報基盤である「海洋危機ウォッチ」（プロトタイプ版）を完成させ、公表した。Capstick et al. (2016)が 18-80 歳の英国の一般市民約 2500 人を対象に行った調査では、その 8 割近くが「海洋酸性化」という言葉自体を知らないと答え、石灰殻を持つ生物への影響などについても、誤った認識を持っているという結果が示されている。日本においても経験的に同様の認知度が想定されるなか、分かりやすさと同時に正確性の担保にも留意する必要があり、どのような情報発信が適切か試行しつつ、検討を進めた。

第 2 章　実施事項

1　海洋の温暖化・酸性化に係る調査研究の推進

2018 年 10 月に、国連の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の総会が韓国・仁川で開催され、IPCC 特別報告書「1.5℃の地球温暖化 (Global Warming of 1.5℃)」に関する議論等が行われた。そして、政策決定者向け要約 (Summary for Policy Makers, SPM) が承認されるとともに、報告書本編が受諾された。同特別報告書は、2016 年 11 月発効のパリ協定において設定された長期目標の一つ「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もに、1.5℃に抑える努力を追求すること」に関して、2℃と 1.5℃で生じる差異を科学的に評価したものである。

SPM は、(A)1.5℃の地球温暖化の理解、(B)予測される気候変動、潜在的な影響及び関連するリスク、(C)1.5℃の地球温暖化に整合する排出経路とシステムの移行、(D)持続可能な開発及び貧困撲滅への努力の文脈における世界全体による対応の強化、の 4 つのセクションで構成されている。セクション B の 4 番目の海洋に関する記述では、2℃から 1.5℃に抑えることで、海洋の温暖化と同様に海洋酸性化の強化や海洋の貧酸素化が抑えられることが、高い確信度とともに述べられている。また、報告書本編では、これまでの研究成果をもとに、海洋生態系や水産養殖・漁業に海洋酸性化・貧酸素化がおよぼす影響についてまとめられている。特に貧酸素化については、海洋温暖化・酸性化と合わさることでより広範な影響が予想されるとして、1.5℃および 2℃の地球温暖化におけるリスクに対する理解は不十分としながらも、1.5℃の温暖化に伴う影響は 2℃の場合よりも減少することが予測されている。しかしながら、このままだと 2040 年頃には 1.5℃の上昇が予測されるため（図 1）、人間社会全体に、これまでにない対応が求められている。

ここでは、以上のように、最新の特別報告書でも影響が指摘されている海洋の酸性化と貧酸素化の課題について実施した調査研究について示す。特に、2018 年 1 月に科学誌『Science』に包括的な論文が掲載されるなど、新たな課題として提起されている貧酸素化の課題に着目し、後述の海洋危機ウォッチの新着記事（小熊幸子氏作成）をもとに、その経緯や課題の調査結果を示す。また、海洋酸性化の課題については、前年度の成果である政策提言を踏まえた対外的な発表や、その実施に向けて開催した国際シンポジウムなど、国際的なネットワークのもとでの提言内容の実現に向けた議論について示す。

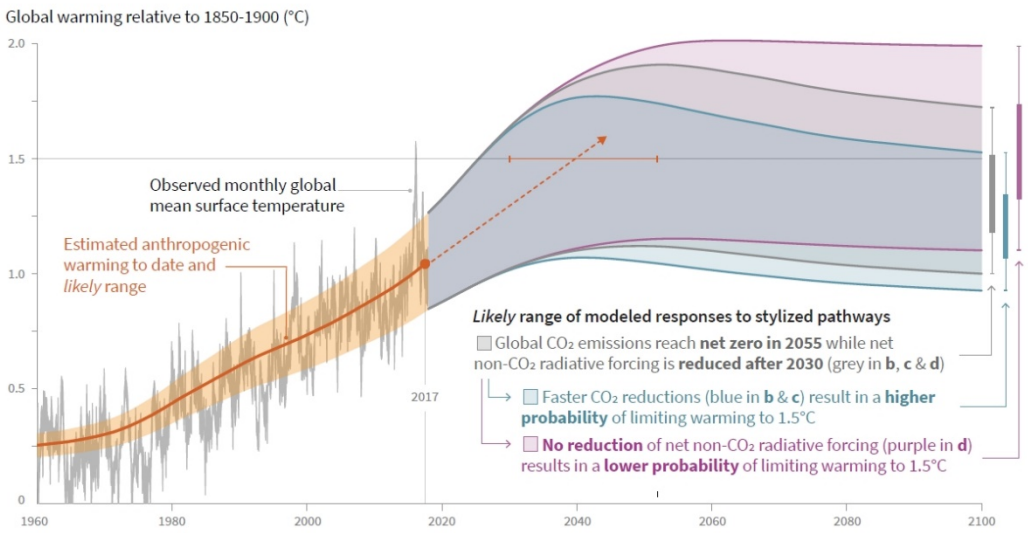


図 1　産業革命後からこれまでの全球平均温度と、1.5℃の地球温暖化の予想変動幅。
灰色は CO2 排出量が 2055 年までに正味ゼロ・CO2 以外の放射強制力が 2030 年以降減少した場合、水色は 2040 年までに正味ゼロの場合、紫色は CO2 以外の放射強制力を全く減らさなかった場合。

(IPCC 特別報告書「1.5℃の地球温暖化」, Summary for Policy Makers)

２．１　海洋の貧酸素化

日本において海洋の貧酸素は、主に沿岸域における海洋環境に関する課題であり、海底近くの溶存酸素がほとんど無くなってしまう現象をいう。その一因として、陸上からの有機物の分解や赤潮（プランクトンの沈降）に伴って、海中の酸素が消費されることがあげられ、海洋汚染の問題として認識されてきている。貧酸素化が生じると、移動が難しいアサリなどの貝は死に至り、生物資源や漁業に影響する。

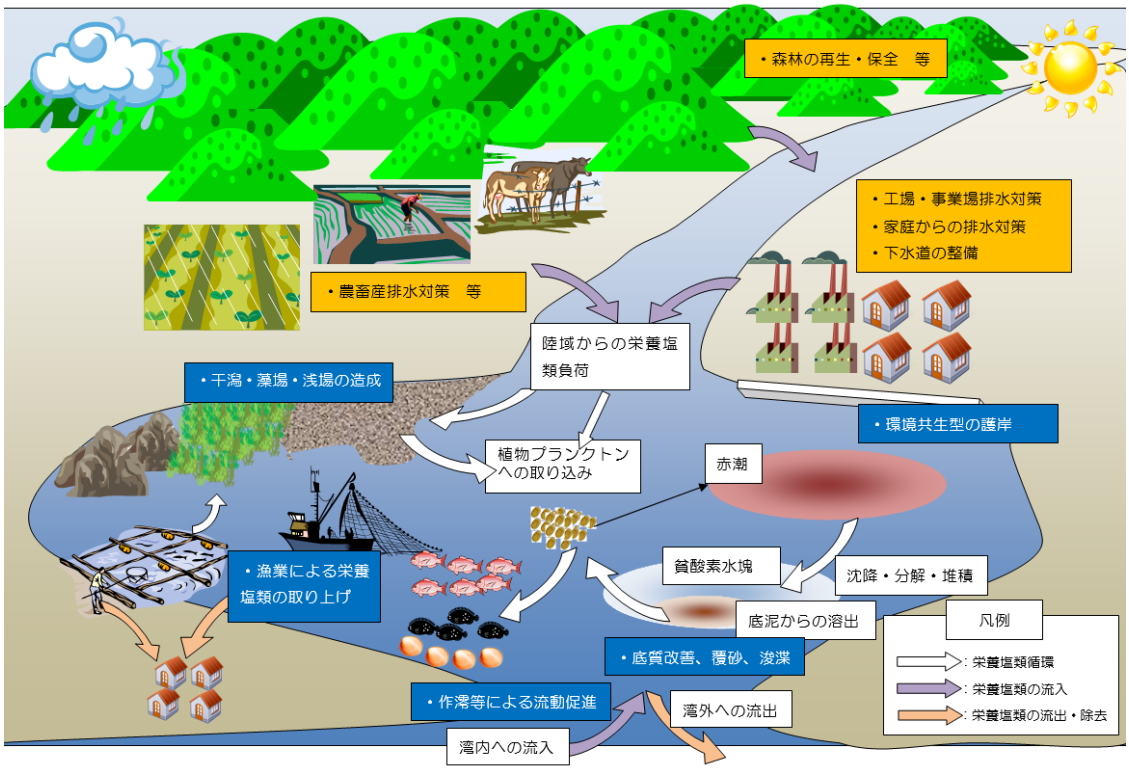


図 2　閉鎖性海域における海洋環境の模式（貧酸素水塊を含む）

（出典：環境省資料「地域が主体となる閉鎖性海域の環境改善の手引き」）

一方で、『Science』誌に掲載された Breitburg et al.(2018)の特徴は、これら海洋汚染の問題に加えて、海洋の温暖化の観点から外洋域の貧酸素化の課題も取り上げた点である。ここでは、その概要などを整理するとともに、この課題について議論するために開催した第 156 回海洋フォーラム「地球温暖化と海洋の貧酸素化―研究の最前線」について示す。

（1）外洋域の貧酸素化

酸素は、地球上の生命にとって必須の存在である。生物のそれぞれが生きるために必要なだけでなく、地球上の主な栄養塩や炭素の循環を調整している。しかしながら、過去50年間に、外洋における全量の2%に相当する酸素が消失したという見積もりがなされている (e.g. Schmidtko et al., 2017[2])。外洋の水深200mで70 μmol/kg 未満の溶存酸素極小域と無酸素層が増加しており (Schmidtko et al., 2017; Stramma et al., 2010[3])、下図のように酸素の少ない水塊の湧昇が一部の沿岸域で生物に深刻な影響を及ぼしている 。

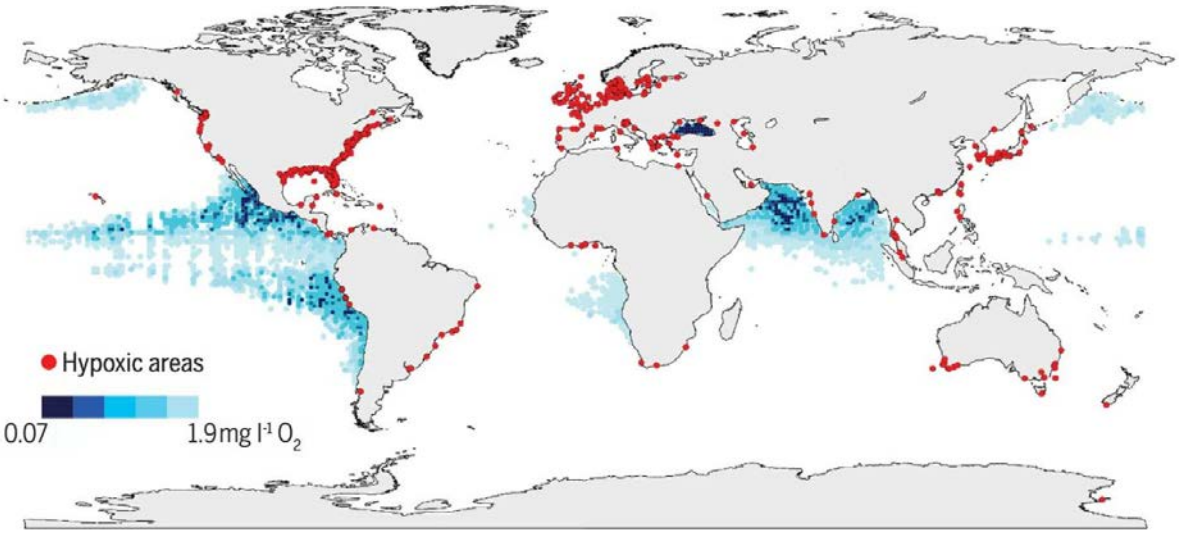


図 3　外洋および沿岸域の海水中の酸素濃度の低下。赤丸は沿岸の貧酸素域（＜2 mg/L ≒ 63μmol/L)、青い箇所は水深約 300m の酸素極小域（ocean oxygen-minimum zones)、(Breitburg et al., 2018)

貧酸素化の要因として、1) 外洋の酸素散逸を引き起こす地球温暖化、2) 沿岸域の富栄養化、3) 気候変化が挙げられる (Breitburg et al., 2018)。地球温暖化は、まず海洋表層の水温上昇で酸素の溶解度を下げる効果がある。そして、表層と中深層の水温差で鉛直混合が弱まる成層強化により、さらに酸素が中深層へ運ばれなくなる。沿岸域でも、外洋と同様の溶解度低下・成層強化に加え、地球温暖化に伴い局所的に降水量・風向といった気候要素が変化して表層への栄養塩供給量が変わり、植物プランクトンがより多く繁茂し呼吸量が増加するなど、結果的に酸素減少を悪化させると考えられている。

---

[2] Schmidtko, S., L. Stramma, M. Visbeck (2017) Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature*, 542, 335-339. doi: 10.1038/nature21399

[3] Stramma, L., S. Schmidtko, L. A. Levin, and G. C. Johnson (2010) Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts. *Deep-Sea Research I*, 57, 587-595. doi: 10.1016/j.dsr.2010.01.005

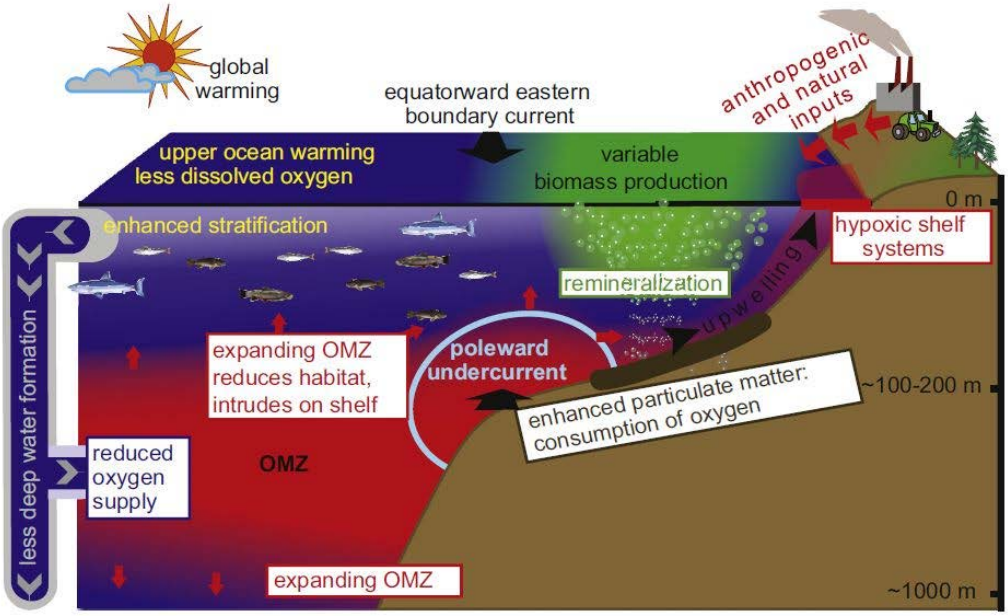


Fig. 6. Schematic of interactions of open ocean oxygen minimum zones (OMZ, red) with hypoxic shelf systems and dead zones (Diaz and Rosenberg, 2008) on continental shelves of eastern ocean boundaries.

図 4　酸素極小層（oxygen minimum zone, OMZ)と貧酸素の陸棚の概念図

このようにして起こる海洋の貧酸素化がもたらす影響として、1) 生物学的反応、2) 複合的なストレス、3) 地球生物化学的影響、に大きく分けられる (Breitburg et al., 2018)。まず貧酸素環境下では再生産力[4]が低下し、最終的には個体群、そして水産業に影響を及ぼすと考えられている。さらには、その貧酸素環境に常時ではなく間欠的に露出した場合でも、後天的な変化のきっかけになりうるとの指摘もある (Wang et al., 2016[5])。貧酸素化に海洋温暖化・酸性化が重なることで、魚類や無脊椎動物が極域方向に年々移動し、酸素が充分に分布する海域が狭まることが予測されている(e.g. Deutsch et al., 2015[6]; Cheung et al., 2011[7])。

---

[4] 海面での光合成による有機物の生成を基礎生産、そのうち元は表層で作られた有機物が沈降し、中深層で分解・生成された窒素・リン等を栄養塩として再生したものを再生産という。成層により鉛直混合が弱まると中深層からの栄養分の供給が少なくなることから、再生産力も弱くなる。

[5] Wang, S. Y., K. Lau, K.-P. Lai, J.-W. Zhang, A. C.-K. Tse, J.-W. Li, Y. Tong, T.-F. Chan, C. K.-C. Wong, J. M.-Y. Chiu, D. W.-T. Au, A. S.-T. Wong, R. Y.-C. Kong, and R. S.-S. Wu (2016) Hypoxia causes transgenerational impairments in reproduction of fish. Nature Communications, 7: 12114. doi: 10.1038/ncomms12114

[6] Deutsch, C., A. Ferrel, B. Seibel, H.-O. Pörtner, and R. B. Huey (2015) Climate change tightens a metabolic constraint on marine habitats. *Science*, 348 (6239), 1132-1135. doi: 10.1126/science.aaa1605

[7] Cheung, W. W. L., J. Dunne, J. L. Sarmiento, and D. Pauly (2011) Integrating ecophysiology and plankton dynamics into projected maximum fisheries catch potential under climate change in the Northeast Atlantic. *ICES Jounal of Marine Science*, 68 (6), 1008-1018. doi: 10.1093/icesjms/fsr012

（２）沿岸域の貧酸素化

更に沿岸域の貧酸素化の課題について、Breitburg et al.（2018)をもとに示す。人為起源の二酸化炭素に起因する地球温暖化は、海表面の水温上昇に伴う成層強化により底層との混合を弱め、大気からの酸素供給を減らすため、海洋貧酸素化の原因の一つと考えられている。その貧酸素化を更に促進する要素として、沿岸域の富栄養化が挙げられる。

富栄養化とは、人間の排出物や農業による窒素・リンをはじめとする栄養塩などが藻類の成長を促進し、その量 (バイオマス) を増加させる状態を指す。沿岸域の表層で活発化した一次生産により生成された有機物は、やがて好気性の微生物が分解活動をする底層に送り込まれる。このとき、分解活動によって酸素が消費されて底層の酸素濃度が下がると、生物地球化学的なフィードバックにより、元の高酸素濃度環境には戻らなくなる場合がある (Steckbauer et al., 2011[8])。

水中での鉛直混合の低下は酸素の再供給率を下げ、滞留時間が長くなると植物プランクトンの現存量が蓄積されやすくなり、結果的に底層の分解活動を促す。例えば米国のチェサピーク湾は、湾口から湾奥の方向に細長い地形で滞留時間が長いため、貧酸素層と無酸素層が発達しやすく、湾の広範囲で数か月間維持されるが、隣のデラウェア湾は、成層が弱く滞留時間が短いため、栄養塩はチェサピーク湾と同様に負荷されるにも関わらず、貧酸素層が発達しない(Testa et al., 2017[9])。一方、フィリピンのマニラ湾は大都会が面しており、通年で栄養塩が負荷されるが、南西モンスーン期は雨により表層の淡水化で成層が強化され、河川増水で栄養塩供給量が増加するため、特に貧酸素状態になる (Sotto et al., 2014[10])。

沿岸域や半閉鎖海域の貧酸素域は、様々な時空間スケールで存在する。風による表層の混合や雲による光合成阻害は、浅い海域での酸素消費量に影響を及ぼす。より大きな空間スケールでは、温暖化に伴う海表面水温上昇による成層強化に加え、風向や風速、降水と栄養塩負荷、そして成層した沿岸域の底層へ運ばれる水塊の栄養塩成分が、貧酸素水の量や持続時間、酸素量の減少率の経年変化やより長期の変動に寄与する。

地球温暖化は風や降水量にも変化を及ぼし、それにより貧酸素水の分布が変化したと指摘する研究もある。例えばカリフォルニア湾では、上空で沿岸湧昇を促す向きの風が吹き続けたことで、陸棚に分布する貧酸素水の湧昇量が増加したのではないかと考えられてい

---

[8] Steckbauer, A., C.M.Duarte, J. Carstensen, R. Vaquer-Sunyer, and D.J. Conley (2011) Ecosystem impacts of hypoxia: thresholds of hypoxia and pathways to recovery. *Environmental Research Letters*, 6, 025003, doi:10.1088/1748-9326/6/2/025003

[9] Testa, J.M., J.B. Clark, W.C. Dennison, E.C. Donovan, A.W. Fisher, W. Ni, M. Parker, D. Scavia, S.E. Spitzer, A.M. Waldrop, V.M.D. Vargas, and G. Ziegler (2017) Ecological forecasting and the science of hypoxia in Chesapeake Bay. *BioScience*, 67, 7, doi:10.1093/biosci/bix04

[10] Sotto, L.P.A., G.S.Jacinto, and C.L.Villanoy (2014) Spatiotemporal variability of hypoxia and eutrophication in Manila Bay, Philippines during the northeast and southwest monsoons. *Marine Pollution Bulletin*, 85, 446-454, doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.02.028; pmid: 24655947

る（Chan et al., 2012[11]）。これらの影響には地域差があり、酸素量の変化の向きや割合も、個々の沿岸域によって差が生じると予想される（Rabalais et al., 2014[12]; Altieri et al, 2015[13]）。降水量が増えれば、成層化と栄養塩供給量は共に強化されるが、降水量の少なくなる地域では逆のことが起こる。降水の季節パターンと蒸発量の変化もまた重要となる。外海の手前で余分な窒素分を吸収する沿岸湿地帯は、温暖化に伴う海面上昇によって失われると予想されているが、湿地帯での氾濫の割合や、湿地帯の内陸移動の可能性などは地域間で異なると考えられている。

このように沿岸域の貧酸素化問題においては、地球温暖化の影響の地域差等を踏まえた状況の把握や研究が求められている。

図 5　沿岸の貧酸素域（Rabalais et al., 2014）。赤点は人間活動と関連性が指摘されていた海域

[11] Chan, F., J.A. Barth, J. Lubchenco, A. Kirincich, H. Weeks, W.T. Peterson, and B.A. Menge (2012) Emergence of Anoxia in the California Current Large Marine Ecosystem. Science, 319 (5865), 920. doi:10.1126/science.1149016

[12] Rabalais, N.N., W.-J. Cai, J. Carstensen, D.J. Conley, B. Fry, X. Hu, Z. Quinones-Rivera, R. Rosenburg, C.P. Slomp, R.E. Turner, M. Voss, B. Wissel, and J. Zhang (2014) Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean. Oceanography, 27(1), 172-183, doi:10.5670/oceanog.2014.21

[13] Altieri, A.H., and K.B. Gedan (2015) Climate change and dead zones. Global Change Biology, 21, 1395-1406, doi:10.1111/gcb.12754

（３）予測に向けた取組

今後、海洋生態系の健全な管理のために、ある程度幅のある不確実性を含んだシナリオで、酸素利用に対する気候変動や富栄養化の影響を予測できる数値モデルが求められる。しかし、従来の数値モデルでは、貧酸素海域の空間分布や数十年先の酸素量変動の空間分布について一致した結果が殆ど得られていない。

確実な根拠のある海洋生態系管理は、IPCC の RCP シナリオのように幅のある将来シナリオと、それに関わる不確実性の理解の下で実行された信頼できる予測に基づいている。外洋および沿岸域の貧酸素化の問題に対しても、気候変動および富栄養化の効果の予測が求められている。今日の最先端の数値モデルによる将来予測の間では、今世紀末までに海水中の総酸素量は数パーセント減少し、生物地球化学的にも環境学的にも実質的な影響が生じる、という点で概ね一致している。しかしながら、100 μmol/kg 未満の低酸素域の将来分布や、過去数十年間の酸素変動の空間パターンについては、ほとんど一致していない。 （e.g. Stramma et al., 2012[14]）。こうした不確実性は、外洋の酸素極小層や窒素収支も含めた酸素依存の生物地球化学的プロセスに対する、地球温暖化の局所的なインパクトの予測の信頼性に限界を生じている。

個々の沿岸域における酸素濃度を予測するには、小さな時空間スケールにおける陸域や大気、底質、そして沖合の海水との相互作用によって支配された変動をモデリングする必要がある。しかし、河川の流量や大気状態といった入力データが時空間的に十分な分解能を持たないために、再現性の向上が妨げられている。外洋および沿岸系の両方における予測精度を改善するには、現場観測や実験でデータを増補する必要があると考えられ、さらに外洋では、小規模の混合プロセス、渦混合、メソスケール構造による輸送といった、酸素分布に影響するような海洋内部の輸送メカニズムに関する情報も求められる。

（４）観測ネットワークの必要性

局所的でも全球スケールでも、影響予測の改善に必要となるのは、観測や実験といった現場での取組である。世界的な枠組みとして設立された Global Ocean Oxygen Network (GO_2NE)[15]をはじめ、分野・地域毎に様々な研究者のネットワークが形成され、観測の技術

---

[14] Stramma, L., A. Oschlies, and S. Schmidtko (2012) Mismatch between observed and modeled trends in dissolved upper-ocean oxygen over the last 50 yr. *Biogeosciences*, 9, 4045-4057. doi: 10.5194/bg-9-4045-2012

[15] IOC-UNESCO (ユネスコ政府間海洋学委員会) 傘下に 2016 年に設立。複合的な視点と影響力をもって、全球的かつ学際的に脱酸素化(deoxygenation)問題に貢献することを目的とする。脱酸素化の進む中で海洋資源を保護し、関心を持って取組むため、政策決定者に科学的な提言を示していく。2018 年 12 月時点で 11 か国 21 機関の研究者がコアワーキンググループのメンバーとなっている
Global Ocean Oxygen Network (GO_2NE)
www.unesco.org/new/en/natural-sciences/ioc-oceans/sections-and-programmes/ocean-sciences/global-ocean-oxygen-network/

向上や訓練の支援が開始されている。

また、自動観測プラットホーム (アルゴフロート、グライダー等) をはじめとする観測ネットワークの発達により、数値モデルの洗練化やメカニズム理解の向上を支えるリアルタイムデータが提供されはじめている。また、アルゴフロートやグライダーに搭載した光学酸素センサーは、寿命に達するまで海中の現場で稼働するため、大気中の酸素による濃度校正も試みられている （Bushinsky et al., 2016[16]）。

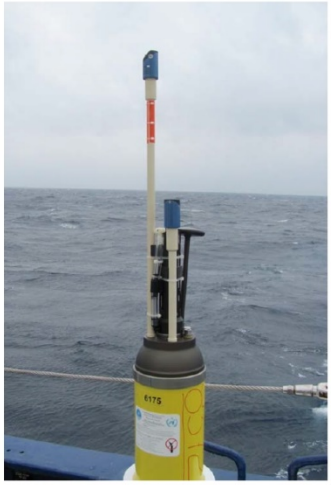


図 6　黒潮続流域に投下される酸素センサー搭載の Argo フロート（Special-Oxygen-Sensor Argo, SOS-Argo）

頭頂部から延びる 2 本のセンサーの高さは 61cm および 25cm。いずれも大気中酸素の観測中に極力波浪の影響を受けないようにしている（Bushinsky et al., 2016）

（５）政策の取組

2018 年 7 月に、UNESCO-IOC (ユネスコ政府間海洋学委員会) は、世界の外洋および沿岸域の酸素濃度レベルの低下に関する科学的データとそのまとめを共有するため、政策概要 ‘The Ocean is Losing its Breath: Declining Oxygen in the World’s Ocean and Coastal Waters’を刊行した。政策立案者が、海洋貧酸素化問題に際して政策を決定・実行できるよう、最新の情報を提供することを目的としている。政策概要を作成した Global Ocean Oxygen Network (GO_2NE) は、2016 年に UNESCO-IOC 傘下に設置されたワーキンググループであり、海洋貧酸素化の動向に対応し海洋資源を保護するため、政策立案者へ科学的助言を提供している。

[16] Bushinsky, S., S. R. Emerson, S. C. Riser, and D. D. Swift (2016) Accurate oxygen measurements on modified Argo floats using in situ air calibrations. *Limnol. Oceanogr. Methods*, 14, 491–505. doi: 10.1002/lom3.10107

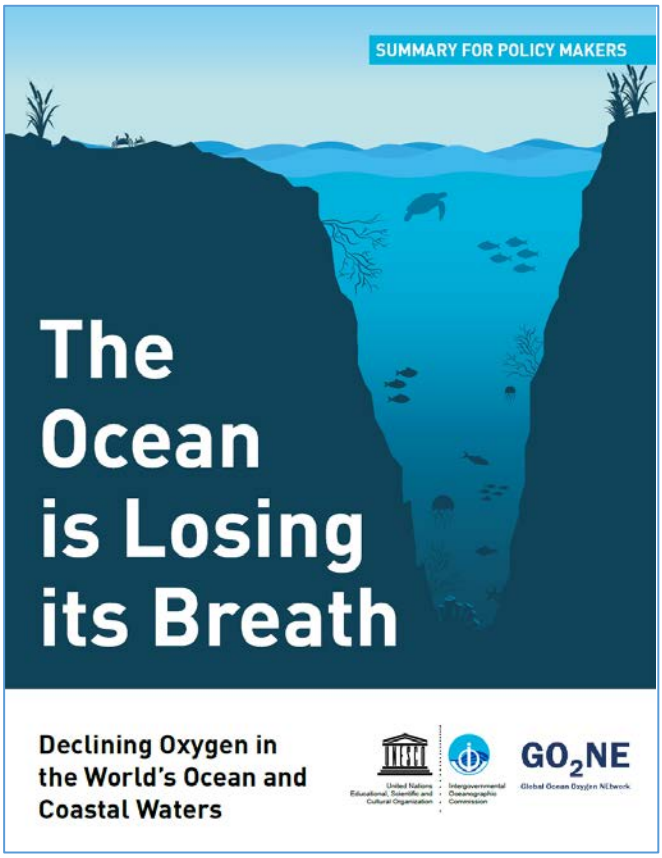


図 7　'The Ocean is Losing its Breath'表紙

（https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265196）

'The Ocean is Losing its Breath' は、冒頭で海洋貧酸素化に関する 15 の事実を提示しており、第一に酸素は海洋の健康にとって不可欠であり、海中の生態系を構築し海生生物にとって基本要件となると述べている。その一方で、1960 年代から低酸素水の領域が 4.5×10^6 km^2 増加し、低酸素化した河口域・沿岸域が 500 点以上に及ぶと指摘している。外洋と沿岸域の双方において、化石燃料の燃焼や、農業や(人間による)廃棄物からの排出、といった人間活動が貧酸素化の一次的な原因であるとしている。さらに、貧酸素化の別の要因として、富栄養化と温暖化で促進される微生物の分解活動による酸素消費、成層化による海水中の酸素溶解量の減少も挙げられている。15 の事実に続いて、海洋貧酸素化の何が問題か、海洋生態系に将来どのように影響するのかを、観測と数値モデル予測の双方の観点から述べている。最終節では、海洋の酸素分布を回復し貧酸素化の影響を最小限に抑えるための戦略として、大気および海洋の温暖化を引き起こす温室効果ガスの排出抑制や、沿岸域や半閉鎖海域の酸素消失を悪化させる栄養塩付加量の減少等を挙げ、これまで別々に進められてきた地球温暖化や海洋酸性化、貧酸素化の諸問題に対し、学際的にも政策的にも統合して進められるべきとしている。そして、身近な海の短周期の変動から、全海洋規模の漁

業資源や酸素分布の将来予測まで、不確実性は多く残されていることを指摘し、貧酸素化問題の検出と把握に限らず、それに潜むプロセスの理解と、適応・緩和への戦略の必要性を強調している。

更に、2018 年 9 月 3 日から同年 9 月 7 日にかけて、ドイツのキールで海洋貧酸素化に関する国際会議 "Ocean Deoxygenation: Drivers and Consequences - Past - Present - Future" が開催され、33 か国から 300 名超の研究者が参加した。そして、期間中に発表された研究内容を受けて、温室効果ガスによる地球温暖化や、栄養塩・有機排出物による沿岸域を中心とした海洋汚染等により、全海洋の酸素が失われつつあることの警鐘を鳴らすべく、"Kiel Declaration on Ocean Deoxygenation" (海洋貧酸素化に関するキール宣言) が出された。

同年 7 月にユネスコ政府間海洋学委員会 (IOC-UNESCO) から出された政策概要 "The Ocean is Losing its Breath" のタイトルを付して発表された宣言では、(a) 全球規模で海洋貧酸素化に対する関心を喚起するには領域横断的な研究・革新的なアウトリーチ・海洋教育を含む努力が必要であり、(b) 栄養塩の過剰な付加を制限するための早急で決定的な行動をすべきであり、(c) 気候変動を緩和するための決定的な行動で温暖化を限定的にする、と冒頭部に述べている。そして、パリ協定や持続的開発のための 2030 アジェンダが、海洋酸性化によって深刻に脅かされていると指摘している。続いて、会議参加者の総意として過去 50 年内に貧酸素海域が 4 倍に拡大したこと、地球温暖化と栄養塩や有機排出物による海洋汚染が貧酸素化を促進していること、貧酸素化は低酸素濃度環境下の (メタン等の) 温室効果ガス生産によって地球温暖化を加速しうる等、8 つの見解を挙げている。

ドイツの Collaborative Research Centre 754 (SFB 754) と IOC-UNESCO 傘下の GO_2NE による海洋貧酸素化に関する情報サイト「ocean oxygen」内のキール宣言のページでは、宣言に同意する研究者の署名を掲載しており、2019 年 3 月現在で 500 名以上の研究者が名を連ねている。

Ocean Deoxygenation:
Drivers and Consequences
· Past · Present · Future ·

INTERNATIONAL
CONFERENCE KIEL
GERMANY
3 – 7 September 2018

SFB 754

Kiel Declaration on Ocean Deoxygenation

Participants of the international conference
"Ocean Deoxygenation: Drivers and Consequences – Past – Present – Future",
3 – 7 September 2018 in Kiel, Germany organized by:
Kiel Collaborative Research Center SFB 754 and Global Ocean Oxygen Network (GO_2NE – IOC-UNESCO)

The ocean is losing its breath

Oxygen in the ocean supports the largest ecosystems on the planet. It is alarming that the ocean is losing oxygen, termed ocean deoxygenation, primarily due to global warming by greenhouse gas emissions, and pollution by nutrients and organic wastes particularly in coastal waters. We call on all nations, societal actors, scientists and the United Nations to:

(a) Raise global awareness about ocean deoxygenation through local, regional and global efforts, including interdisciplinary research, innovative outreach, and ocean education.

(b) Take immediate and decisive action to limit pollution and in particular excessive nutrient input to the ocean.

(c) Limit global warming by decisive climate change mitigation actions.

Both the Paris Agreement addressing Climate Change and the United Nations' 2030 Agenda for Sustainable Development demand conservation and sustainable use of the ocean, seas and marine resources in order to safeguard ocean ecosystems and their current and future societal benefits. These are severely threatened by ocean deoxygenation.

Scientists assembled at the conference and from around the world agree that:

1. During the past 50 years oxygen-depleted waters have expanded four-fold. Some areas of the ocean have lost up to 40% of their oxygen.
2. The ongoing loss of oxygen from the ocean is a rapidly increasing threat to marine life, the ocean's ecosystems and coastal communities.
3. Global warming impacts ocean oxygen in two ways: the capacity to hold oxygen decreases in warming waters, whilst warming reduces ocean mixing and circulation limiting the supply of oxygen from the atmosphere. Pollution by nutrients and organic waste enhances oxygen demand by increasing biological production and oxygen consumption during decomposition.
4. Deoxygenation disrupts marine ecosystems, affects fish stocks and aquaculture and leads to loss of habitat and biodiversity. It can, in extreme cases, lead to the production of toxic gases when all oxygen in the water has been lost.
5. Deoxygenation can accelerate global warming via enhanced marine production of greenhouse gases under low oxygen conditions.
6. The problem of deoxygenation is predicted to worsen in the coming years under continued global warming and increasing nutrient input to coastal regions as human populations and economies grow.
7. Expanded observation is immediately required for accurate documentation and prediction of ocean oxygen changes, and for improved understanding of its causes and consequences.
8. Strategies to slow and eventually reverse deoxygenation and its ecological impacts need to be co-developed between science and societal actors. This will contribute to the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development.

Conference Chair, Executive Board & Conveners

Prof. Andreas Oschlies, GEOMAR & Kiel University, Kiel, Germany
Prof. Eric Achterberg, GEOMAR & Kiel University, Kiel, Germany
Dr. Patricia Ayon, Marine Institute of Peru, Lima, Peru
Prof. Hermann Bange, GEOMAR, Kiel, Germany
Dr. Denise Breitburg, Smithsonian Environmental Research Centre, Edgewater, MD USA
Dr. Laura Bristow, University of Southern Denmark, Odense, Denmark
Dr. Xavier Capet, CNRS, Paris France
Prof. Minhan Dai, Xiamen University, Xiamen, China
Prof. Anja Engel, GEOMAR & Kiel University, Kiel, Germany
Prof. Katja Fennel, Dalhousie University, Halifax, Canada
Prof. Martin Frank, GEOMAR & Kiel University, Kiel, Germany
Dr. Veronique Garcon, LEGOS, CNRS, Toulouse, France
Prof. Marilaure Grégoire, University of Liège, Liège, Belgium
Dr. Helena Hauss, GEOMAR, Kiel, Germany
Dr. Babette Hoogakker, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK
Dr. Kirsten Isensee, IOC-UNESCO, Paris, France
Prof. Samuel Jaccard, University of Bern, Bern, Switzerland
Prof. Klaus Jürgens, Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde, Rostock, Germany
Dr. Rainer Kiko, GEOMAR, Kiel, Germany
Prof. Arne Körtzinger, GEOMAR & Kiel University, Kiel, Germany
Prof. Mojib Latif, GEOMAR & Kiel University, Kiel, Germany
Prof. Lisa Levin, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, CA USA
Prof. Karin Limburg, SUNY, College of Environmental Science & Forestry, Syracuse, NY USA
Dr. S. Wajih A. Naqvi, *Kuwait* Institute for *Scientific Research, Salmiya, Kuwait*
Dr. Oscar Pizarro, University of Concepción, Chile
Prof. Martin Quaas, Kiel University, Kiel, Germany
Dr. Renato Quinones, University of Concepción, Concepción, Chile
Prof. Birgit Schneider, Kiel University, Kiel, Germany
Prof. Caroline Slomp, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands
Dr. Lothar Stramma, GEOMAR, Kiel, Germany
Dr. Sören Thomsen, LOCEAN-IPSL, Sorbonne University, Paris, France
Prof. Tina Treude, University of California, Los Angeles, CA USA
Prof. Osvaldo Ulloa, University of Concepción, Concepción, Chile
Prof. Martin Visbeck, GEOMAR & Kiel University, Kiel, Germany

@DeoxyOcean

CAU GEOMAR future ocean GO_2NE DFG

図 8　Kiel Declaration on Ocean Deoxygenation　全文
（ocean oxygen 公式サイトより）

（６）海洋フォーラムの開催

以上のように新たな海洋の温暖化に関する課題として科学者から提起されている貧酸素化の課題について議論を行うため、第 156 回海洋フォーラム「地球温暖化と海洋の貧酸素化―研究の最前線」を、2018 年 10 月 26 日に開催した。フランス国立科学研究センター上級科学者 Véronique Garçon 氏[17]と、気象庁地球環境・海洋部海洋気象課海洋環境解析センター所長 中野俊也氏の講演に、約 90 名が参加した。

中野氏からは、気象庁の 50 年以上にわたる定線観測データを元に、海域間で差異はあるにしても日本周辺で貧酸素化が進みつつあることが示された。日本周辺の北西太平洋は、アメリカ側の北東太平洋に比べて酸素極小層の厚みは薄いものの、黒潮の南側では厚さが拡大傾向にあること、また親潮域では約 20 年周期の増減を伴いながら長期的に酸素濃度が低下しており、日本海盆でも深さ方向の濃度分布全体で低くなっている様子が示された。

Garçon 氏からは、外洋および沿岸・内海の貧酸素水域が全球規模で拡大しつつあること、中でも熱帯以北の北太平洋、南大洋、南大西洋、北極海で特に酸素量が減少していることが示された。外洋について、地球温暖化による海洋の酸素溶解度の低下は、貧酸素傾向の 15%ほどしか説明できず、残りの 85%は生物による消費や海洋の鉛直循環の弱化、海洋内部の数十年スケールの変動が要因であると指摘した。それらの要因を構造的に理解するためには数値モデルが必要であるが、数値モデルでも酸素極小層の再現にはまだ課題があり、複数のモデル間で貧酸素層の体積に差があること等を示した。また沿岸域について、陸域からの窒素・リンの供給を発端とした貧酸素化プロセスを示し、貧酸素化で既に魚介類が斃死している海域があること、そして今後沿岸域に酸素を戻すために社会全体の協力が求められることを強調した。

図 9　第 156 回海洋フォーラムの様子

[17] 前述の『Science』誌（Breitburg et al..,2018）や、政策概要 "The Ocean is Losing its Breath"の共同執筆者

２．２　海洋酸性化

2017 年度の調査研究では、国際的な海洋酸性化の議論の経緯を整理し、「科学と政策」の観点から整理した。すなわち、海洋酸性化の課題が、2000 年代前半の、米国西海岸における養殖カキ幼生の大量死という明確な課題が起点となって、米国における検討が大きく進展したこと。また、欧州での科学者からの積極的な発信や、アルバート 2 世モナコ大公の関与などが、海洋酸性化の国際的な議論と並行して行われたこと。この流れの中で、科学的知見の充実をはかるための観測ネットワークの構築が進められたことは、科学と政策の連携の好事例と考えられることを示した。

一方で、海洋酸性化の影響に係る科学評価ついては、Gattuso et al.(2015)[18]が指摘しているように、従来の個別生物種の影響評価を高度化した、複合要素の検討が求められるようになってきている。海水温上昇なども含めた複合的なストレスの影響や、生態系全体での影響評価が求められるなど、より丁寧な議論が必要となっている。養殖カキ幼生の大量死に代表されるような明確な課題のもとで検討が進んだ初期段階から、成熟段階に至りつつあると考えられる。

このようななか、SDGs の目標 14 の推進のため 2017 年 6 月に開催された「United Nations Ocean Conference（国連海洋会議）」の成果文書「call for action」[19]において海洋酸性化は、海水温上昇・貧酸素化・海水面上昇・海氷減少などの気候変動に係る諸課題と並列されるようになっている。目標 14 の単独項目となり注目された海洋酸性化が他の課題と並列して示されている訳であるが、同様傾向は、“Our Ocean”という 2014 年にジョン・ケリー国務長官（当時）のホストのもとで開始された各国閣僚級が参加する国際会議などにおいても見られる（2014 年の第 1 回会議では 3 つの主要テーマのひとつであった海洋酸性化は、2017 年の第 4 回会議以降では気候変動のなかの一つの課題として扱われている）。海洋酸性化の課題は、引き続き海洋環境に係る重要な課題であるが、科学検討が成熟するにしたがって、海洋貧酸素化などの他の海洋環境の課題ともバランスのとれた形で位置づけられるようになってきている。

2017 年度には、政府による第 3 期海洋基本計画の検討において、海洋酸性化の課題に係る議論を促すため、次の 4 項目から構成される「次期海洋基本計画に向けた海洋酸性化に関する提言」を 2017 年 8 月に作成した。

(1)科学的知見に基づく把握の推進と対応策の検討
(2)国際貢献の推進
(3)二酸化炭素の排出抑制対策の推進（緩和策の推進）
(4)国民への啓発の推進

---

[18] Gattuso J.-P. et al. (2015). Contrasting Futures for Ocean and Society from Different Anthropogenic CO2 Emissions Scenarios. Science, 349 (6243).
[19] https://oceanconference.un.org/callforaction

提言書では、啓発の一環として政策提言に 4 頁のファクトシートを添付し、端的で分かりやすい内容になるように努めた。2018 年 5 月に閣議決定された第 3 期海洋基本計画には、これら提言の内容が含まれており、同計画の期間における、これら取組の進展が期待される。

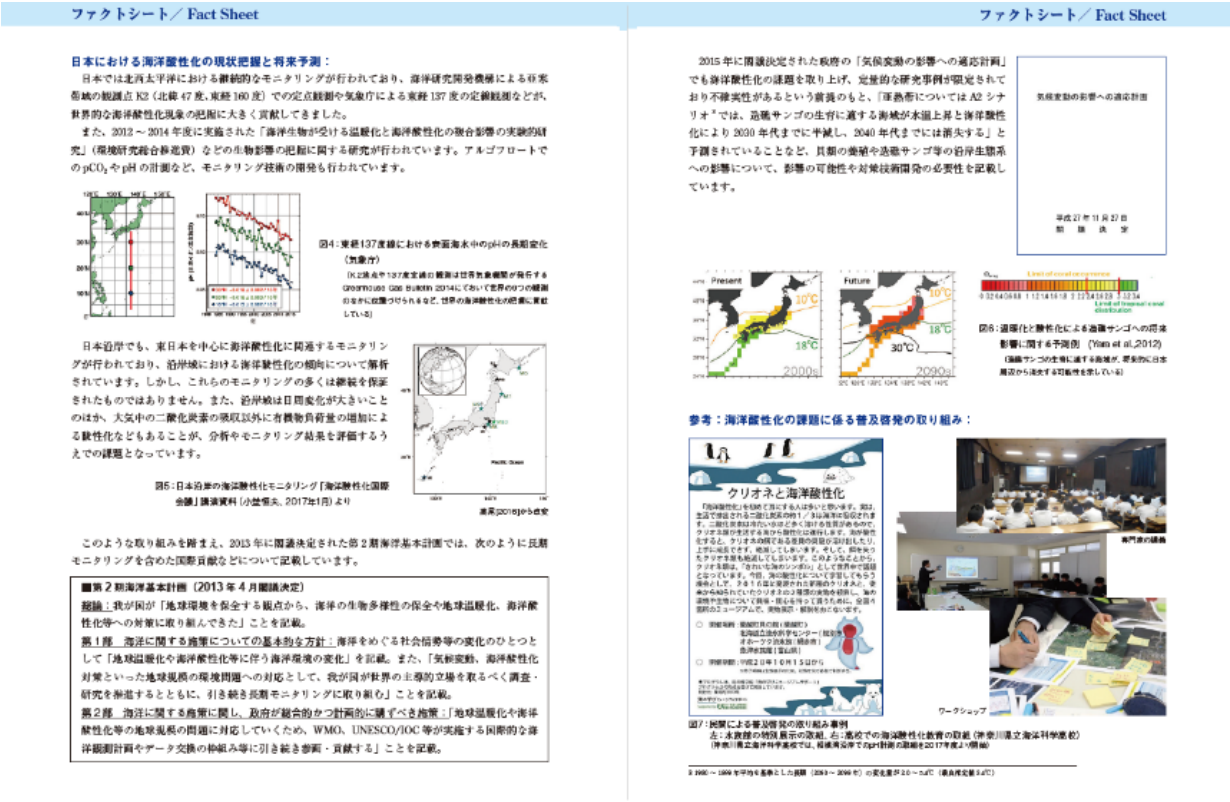


図 10「次期海洋基本計画に向けた海洋酸性化に関する提言」（2017 年 8 月）に付属して公表したファクトシート（抜粋イメージ）

ここでは、海洋酸性化の影響が顕在化しつつある北極海の動向について示すとともに、これら前年度の成果である政策提言などを踏まえた対外的な発表や、その実施に向けて開催した国際シンポジウム「温暖化・海洋酸性化の研究と対策に関する国際シンポジウム－科学と政策の接点」など、国際的なネットワークのもとでの提言内容の実現に向けた議論について示す。

（1）北極での取組

北極圏監視評価プログラム作業部会 (Arctic Monitoring and Assessment Programme, AMAP) は、北極評議会 (Arctic Council)[20] の 6 つのワーキンググループの中の一つで、1991 年に設置された。北極圏の汚染問題や気候変動問題の重点的な監視・評価、それらのレベルと傾向、経路と過程、生態系および人類への影響の報告、参加国政府の施策によって係る脅威を減じるための行動の提案、そして具体的で科学的見地に基づいた政策に関与する評価書や、決議過程と政策を周知する一般向けの文書の作成、等の任務に取組んでいる。

「北極の海洋酸性化に関する評価書」 (Arctic Ocean Acidification (AOA) Assessment) は、2013 年に初めて出されている。そこでは、大気中の CO_2 を吸収することによって北極海全体の海洋酸性化が急速に進行しており、不均一ながらも脆弱性が指摘されている。すなわち、北極域の海洋生物への直接的・間接的な影響を伴って海洋生態系が深刻な変化をしつつあり、一部の生物は適応の傾向が見られるものの多くは不利な状況にあることが示されている。そして、CO_2 排出量の緊急な削減、海洋酸性化のプロセスや北極の海洋生態系やそれに依存する社会共同体への影響に対する理解を拡げるための研究・監視の強化、全ての社会的なニーズに見合った北極域の変化に関する適応努力の実行に向けた参加国への提言を、北極評議会に要求している。

それから 5 年後となる 2018 年の評価では、新たに拡張された時系列データによって、北極海の酸性化がより顕著になっており、生物学的に重要なミネラルであるアラゴナイトとカルサイトの飽和度が pH の低下と共に減少していることが示されている。さらに、それぞれに海域差はあるものの、現状の CO_2 排出量のままでは次世紀に跨いで酸性化が進行し、温暖化と共に海洋生態系に深刻な影響を与えること、北極海から流出する炭酸カルシウム未飽和の海水によって、数十年のうちに海洋の化学的性質に重要な変化が起こることを示唆している。生物学的な応答については、これまでの研究成果に基づき、北極海の海洋化学的な変化に対し生物・生態系の順応は種間で差があり、捕食関係や栄養状況によって食物連鎖や共生関係に変化を生じうること、そして最終的には人間の社会経済活動に変化をもたらすに充分なほどの影響力を持つ可能性があることを示している。また、社会経済活動に対する影響については、北極海の水産業（図 10）が関係する主要な生物種に海洋酸性化がどれだけ直接影響するかに依存するかが明らかになる一方で、海洋酸性化に対する生態系の応答の複雑さ・不確実性の慎重な評価、漁獲量や生態系に予想外の影響を及ぼさないような漁業管理の必要性を強調している。

[20] 1996 年 9 月、オタワ宣言(Declaration on the Establishment of the Arctic Council)に基づき設立された、カナダ、デンマーク（グリーンランド、フェロー諸島を含む）、フィンランド、アイスランド、ノルウェー、ロシア、スウェーデン及びアメリカ合衆国の北極圏 8 カ国が参加する国際協議体。日本は 2013 年にオブザーバー国として参加承認され、北極圏監視評価プログラム作業部会（AMAP）および北極圏植物相・動物相保存作業部会（CAFF）に出席している。

今後の研究には、海洋酸性化だけでなく温暖化等の他の要因について、各要因の内部関係や要因間の相互作用を考慮した複合的なアプローチが必要であり、それらの個々の効果もしくは潜在的な相乗効果に留意しながら生態系を監視することも必要であるとされている。

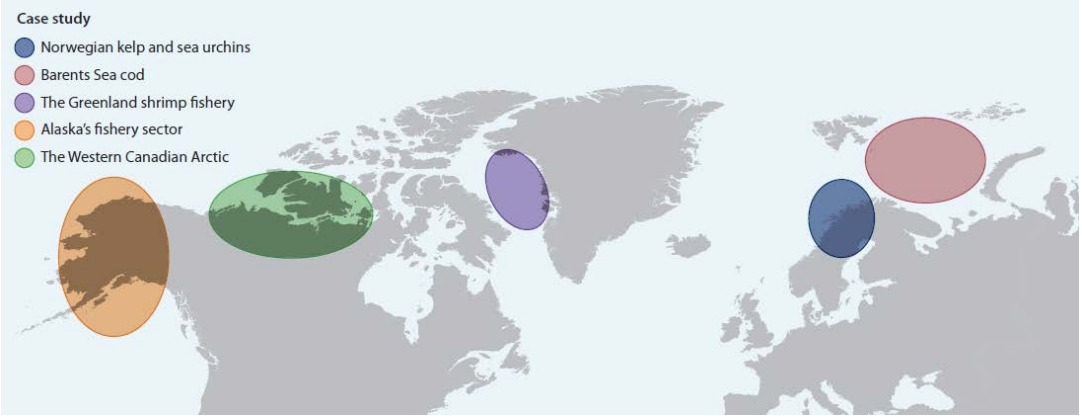


図 11　北極海の 5 つの代表的な漁業の操業エリア
(Arctic Ocean Acidification (AOA) Assessment)

（2）国際シンポジウム

海洋の温暖化や酸性化の課題については近年の科学研究の進展を受けて、政策面においても国際的に大きく着目されている。特に 2030 アジェンダで掲げられた「持続可能な開発目標 (SDGs)」では、その 14.3 項目において「あらゆるレベルでの科学的協力の促進などを通じて、海洋酸性化の影響を最小限化し、対処する」と記載されるなど、対策が必要な重要課題の一つとなっており、対応策の具体化が求められている。これらの課題に対して、海洋における温暖化と酸性化の状況を有し、今後必要となるモニタリングの高度化・ネットワーク化などの対応策や、海洋科学分野における政策対話についての議論を行うため、2018 年 10 月 28 日に「温暖化・海洋酸性化の研究と対策に関する国際シンポジウム－科学と政策の接点」を約 80 名の参加のもとで開催した（主催：笹川平和財団海洋政策研究所、協力：全球海洋観測システム国際海洋炭素観測連携計画（IOCCP-GOOS）、北太平洋海洋科学機関（PICES））。

第 1 部では、最新の科学と観測ネットワークをテーマとした議論が行われた。Richard A. Feely 氏（米国海洋大気庁）及び石井雅男氏（気象庁気象研究所）からの全球や日本周辺海域における海洋酸性化の現状に関する基調講演後、小埜恒夫氏 (水産研究・教育機構)をモデレータとするパネル討議を行った。パネル討議では、原田尚美氏 (海洋研究開発機構)から北太平洋・極域のモニタリングや酸性化の現状について、また、 Kim Currie 氏 (NZ 国立水・大気圏研究所) から沿岸域でのモニタリングの現状について紹介が行われた。さら

に、Jim Christian 氏 (カナダ環境・気候変動省)や Macjej Telzewski 氏（IOCCP-GOOS）からのモニタリングネットワークや情報発信について紹介が行われた。これらを踏まえて、外洋域の生物応答評価のためのモニタリングや沿岸域の時空間密度の高いモニタリングなどの、今後必要となる取組について、例えば、NZ による社会全体として沿岸モニタリングのネットワークを作っていく事例が参考になることなどについて議論を行った。

昼休み時間中に行ったクレーアニメーション「もう一つの CO2 問題」（日本語吹替版：神奈川県立海洋科学高校の協力で制作、後述）の試写会に続く第 2 部は、科学と政策をテーマに第 1 部での議論を更に深めた。Jason Hall-Spencer 氏（英国プリマス大学）及び熊谷徹氏（内閣府総合海洋政策推進事務局）からの式根島 CO2 シープや第 3 期海洋基本計画に関する基調講演後、藤井賢彦氏 (北海道大学)をモデレータとするパネル討議を行った。パネル討議では、Silvana Birchenough 氏 (英国漁業水産養殖学センター)による水産資源等への影響や角田智彦氏（OPRI-SPF）による第 3 期海洋基本計画に向けた政策提言の紹介とともに、信時正人氏 （エックス都市研究所）から自治体（横浜）における取組ついて紹介が行われた。

また、小埜氏からの第 1 部の概要紹介などを踏まえて、不確実性があるなかでの適切な情報発信や科学に基づく政策決定の重要性について議論した。また、パネル討議においては「里海」などを通じた沿岸域での取組との連携によるステークホルダーとのコミュニケーションや海洋教育の必要性が示された。

図 12　第 1 部のパネル討議の様子

図 13　第 2 部のパネル討議の様子

「温暖化・海洋酸性化の研究と対策に関する国際シンポジウム
ー科学と政策の接点ー」（2018.10.28）

海洋の温暖化や酸性化の課題については近年の科学研究の進展を受けて、政策面においても国際的に大きく着目されています。特に 2030 アジェンダで掲げられた「持続可能な開発目標(SDGs)」では、その 14.3 項目において「あらゆるレベルでの科学的協力の促進などを通じて、海洋酸性化の影響を最小限化し、対処する」と記載されるなど、対策が必要な重要課題の一つとなっており、対応策の具体化が求められています。これらの課題に対して、海洋における温暖化と酸性化の状況を有し、今後必要となるモニタリングの高度化・ネットワーク化などの対応策や、海洋科学分野における政策対話についての議論を行うため、「温暖化・海洋酸性化の研究と対策に関する国際シンポジウム」を開催いたします。

■日時：2018 年 10 月 28 日（日）10：00～17：00　(09:30 受付開始)

■場所：笹川平和財団ビル（東京都港区虎ノ門 1-15-16）

■主催：笹川平和財団海洋政策研究所

■協力：PICES、IOCCP/GOOS

■申込サイト：https://www.spf.org/opri-j/news/article_25090.html

■プログラム：（日英同時通訳／無料）

第 1 部：海洋酸性化　―最新の科学と観測ネットワーク―（10:00-13:00）
10:00-11:00　基調講演 Richard A. Feely 氏（米国海洋大気庁太平洋海洋環境研究所）：海洋酸性化の現状 石井 雅男氏（気象庁気象研究所海洋・地球化学研究部）　：日本周辺の海洋酸性化 11:00-13:00 パネルディスカッション モデレータ：小埜 恒夫氏（水産研究・教育機構国際水産資源研究所） パネラー：Jim Christian 氏（カナダ環境・気候変動省） Kim Currie 氏（ニュージーランド国立水・大気圏研究所） 原田 尚美氏（海洋研究開発機構地球環境観測研究開発センター） Maciej Telzewski 氏(全球海洋観測システム(GOOS) 国際海洋炭素観測連携計画（IOCCP）)
昼休憩：ケータリング　／　「もう一つの CO2 問題」試写会（13:45-14:00）
第 2 部：気候変動と海洋　―科学と政策―
14:00-15:00 基調講演 Jason Hall-Spencer 氏（英国プリマス大学海洋科学・生物学科）：式根島 CO2 シープ 熊谷 徹氏（内閣府総合海洋政策推進事務局）：第 3 期海洋基本計画と海洋酸性化 15:00-17:00 パネルディスカッション モデレータ：藤井 賢彦氏（北海道大学大学院地球環境科学研究院） パネラー：Silvana Birchenough 氏（英国漁業水産養殖学センター） 角田 智彦氏　（笹川平和財団海洋政策研究所） 信時 正人氏　（エックス都市研究所） 小埜 恒夫氏

問合せ先：03－5157－5237（担当：笹川平和財団海洋政策研究所　角田）

（３）国際会議等への参加①

―第 4 回国際シンポジウム“The Effects of Climate Change on the World’s Ocean”

6 月 4 日～6 月 8 日にワシントン DC で開催された、温暖化と海洋に関する第 4 回国際シンポジウム“The Effects of Climate Change on the World’s Ocean”（主催：ICES、PICES ほか）に角田主任研究員が参加し、6 月 5 日の海洋酸性化セッション（S3）において「温暖化・海洋酸性化の研究と対策事業」の成果を発表した。また、6 月 6 日にポスター発表（共著）を行った。更に、6 月 6 日の貧酸素化セッションへ（S4）の参加を通じて新たな海洋の温暖化の課題について情報収集を行うとともに、海洋の温暖化・海洋酸性化に係る専門家などとの意見交換を行った。

■6 月 5 日：

冒頭にプレナリーセッションがあり、IOC-UNESCO の Vladimir Ryabinin 事務局長からの 2017 年 12 月に国連で宣言された“UN Decade of Ocean Science for Sustainable”についての講演に続いて、3 つのセッション（S13：エコシステムマネジメント、S12：人間・自然システム、S3：海洋酸性化）の招待講演が行われた。Vladimir Ryabinin 事務局長からは、IOC での UN Decade of Ocean の検討経緯や概要紹介が行われ、2021 年の開始に向けたデザイン作成への協力が呼びかけられた。

S3 では、海洋酸性化の科学的な研究発表に加えて、政策的な内容が多かったことが特徴的であった。“Requirement”を強く意識したモニタリング計画の必要性を示した IOCCP-GOOS の Telszewski 氏や、閾値とともに分かりやすくデータを示すシステムやインフォグラフィックスについて紹介した NOAA の Jewett 氏、太平洋島嶼国でのモニタリング支援に関する Ocean Foundation の Valauri-Orton 氏の発表、ポリシーブリーフ作成を目指したワークショップの開催報告をしたモナコの Hilmi 氏の発表などでは、モニタリングやデータポータル、科学対話の重要性が強調された。そのなかで、角田が本事業による政策提言（2017 年 8 月）や日本の海洋基本計画改定（2018 年 5 月）、普及啓発の取組など、海洋酸性化に関する口頭発表を行った。

■6 月 6 日：

前日と同様、冒頭にプレナリーセッションがあり、その後、各セッションでの議論が行われた。また、夜にポスター発表が行われた。

冒頭のプレナリーでは種の移動（S10）や貧酸素（S4）など、4 つのセッショの招待講演が行われ、ローカルにボトムアップで生物が適応（移動）していること（S10）や、大陸西海岸で生じる湧昇メカニズムと海洋の貧酸素化（S4）についてなどの講演が行われた。

S4 は、海洋酸性化（S3）とは異なり科学的な研究発表が多いという特徴があり、海域別に異なる貧酸素化のメカニズムやその影響について各地域から紹介が行われた。温暖化に

伴う外洋の表層での溶存酸素の減少などが、(等密度面拡散を通じて）中層での貧酸素水塊（OMZ：Oxygen Minimum Zone）の拡大につながり、沿岸での湧昇を通じた貧酸素水塊の水産業への影響が懸念されることや、有機物の分解による酸素消費と栄養塩分布の関係など、科学プロセスに関する紹介が多く行われた。数値モデルによる将来予測の不確実性も高く、今後も科学研究が盛んに行われることが期待される。

夜のポスターセッションでは、海洋研究開発機構の石津研究員との共著での、日本周辺の海洋酸性化の予測モデルに関する研究発表を行った。同様の予測モデルが米国西海岸などでも構築されており、政策判断や普及啓発における将来予測の重要性について意見交換を行った

（４）国際会議等への参加②

―国連気候変動枠組条約第 24 回締約国会議(UNFCC-COP24)

2018 年 12 月 8 日（土)、笹川平和財団海洋政策研究所は、ポーランド・カトヴィツェにて開催された国連気候変動枠組条約第 24 回締約国会議（COP24）の会期中に、政策提言イベント「Oceans Action Day」を約 400 名の参加のもと開催した。当イベントは、海洋と気候変動の課題について議論する特別イベントとして、グローバル・オーシャン・フォーラム（GOF)、オセアノ・アズール財団、ユネスコ政府間海洋学委員会（IOC）等とともに 2015 年より毎年開催している。「海洋と気候変動の連鎖」を主要テーマとした今回は、気候変動と海洋に関わる国際機関、政府、研究者、NGO などから約 60 名が登壇し、海洋の観点から気候変動に関する緩和策および適応策、科学的知見、資金、移転・移住の課題などについて有意義な議論が展開された（「Oceans Action Day」の詳細については、「【開催結果】国連気候変動枠組条約第 24 回締約国会議（UNFCCC-COP24）における「Oceans Action Day」について」、https://www.spf.org/_opri/news/20181213.html など参照)。

この COP24 に際して、12 月 6 日（木）に、パシフィックパビリオンで開催された海洋酸性化をテーマとしたサイドイベント“The challenge of a changing Pacific Ocean: understanding impacts, observing networks and building capacity to inform policy”に角田主任研究員が参加した。モデレータの Carol Turley 氏（プリマス海洋研究所）からの IPCC1.5℃特別報告書を踏まえた海洋酸性化の課題について概要説明後、全球ネットワークである GOA-ON の Steve Widdicombe 氏から、国際連携について発表が行われた。続いて、北太平洋（角田）や南太平洋（Cliff Law 氏）などの地域レベルの取組や、国連海洋科学の 10 年に関する Sophie Seeyave 氏の発表などを通して、海洋酸性化の課題への更なる取組を促した。

角田からは日本での専門家ネットワークの構築や北太平洋での取組など、本事業を中心とした紹介を行い、国レベル・地域レベル・国際レベルでの各モニタリングネットワークの特徴を整理するとともに、特にモニタリングのクオリティ向上や能力構築の観点から、

国レベルと地域レベルの連携の必要性を強調した。このことは Turley 氏からのイベントの総括にもなり、各レベルのモニタリングの連携の必要性が訴えられた。

図 14　海洋酸性化に係るサイドイベントの登壇者

＜COP24 での海洋酸性化に係るサイドイベントのプログラム＞

Pacific and Koronivia Pavilion side event,　6th December 10:45-11:45
Title: The challenge of a changing Pacific Ocean: understanding impacts, observing networks and building capacity to inform policy

Ocean acidification, combined with other climate-related ocean stressors, can have widespread & significant effects on marine ecosystems + food webs subsequently impacting society, especially ocean dependent nations. There is an urgent need for international collaboration promoting mitigation of, and adaptation to these stressors in policy, regulations and funding streams. To address & adapt to OA society needs to measure it & project its future progress in the global ocean and coastal seas, but there is a scarcity of long-term observations. Panellists discuss latest observations, Pacific case studies, projections, upcoming initiatives & recommendations for sustainable development. Challenges & opportunities in designing ocean observing networks needed to monitor impacts & inform adaptation will be explored.

Chair: Carol Turley (PML, UK)
1. Steve Widdicombe, Global OA Observing Network & PML - Introduction to ocean acidification and international collaboration in observing ocean acidification
2. Yassir Eddebbar, Scripps, USA: Ocean deoxygenation and warming with implications for small island nations
3. Sylvia Goyet, Director, Climate Change and Environmental Sustainability, Pacific Community: Pacific Community initiatives on ocean monitoring
4. Tomohiko Tsunoda, Ocean Policy Research Institute–SPF, Japan: Establishing a west Pacific region expert network
5. Cliff Law, National Institute of Water and Atmospheric Research, NZ: New Zealand action on ocean acidification in the Pacific
6. Sophie Seeyave, Partnership for Observation of the Global Oceans: Ocean observations & the UN Decade of Ocean Science

２．３　海洋教育に係る取組

2016 年度より海洋教育パイオニアスクール事業に参加する神奈川県立海洋科学高等学校では、気候変動・海洋酸性化の沿岸環境への影響を学び調べようとする新しいカリキュラム構築を目指している。2016 年春より教員との打ち合わせを開始し、10 月にはプログラム参加を希望する生徒に向けた 2 回の外部講師による出張講義を行った。2017 年度からは、2016 年度の高校生による検討を受けて沿岸域での pH 等のモニタリングが開始された。生徒自らが pH メータで海水の pH を測り、場所、潮時の違いにより pH が変動することを実感するとともに、pH の校正方法及び室内での測定方法を学ぶことを目的として実施したモニタリング調査を行った。

そして 2018 年度には、英国のプリマス海洋研究所(Plymouth Marine Laboratory）の監修で制作されたクレイアニメーション「もう一つの CO2 問題」の日本語吹替版を、同校の協力により作成した（詳細は、「クレイアニメーション「もう一つの CO2 問題」日本語吹替版の公開」、https://www.spf.org/spfnews/pressrelease/20181025_co2.html 参照）。

日本語吹替版動画の作成は、神奈川県立海洋科学高校の生徒 7 名を中心に、同校の先生などが加わって 2018 年 8 月に 2 日間かけて行われた。この動画を通して、日本国内でも海洋酸性化問題について学ぶきっかけとなることが期待される。

図 15　クレイアニメーション「もう一つの CO2 問題」の日本語吹替版作成の参加者

3　情報基盤の整備・構築

日本周辺を含む北西太平洋海域に主眼を置き、海洋における温暖化や酸性化の影響に係る情報を集約し、その進行予測や社会・経済面での影響を検討するとともに、そうした情報を共有し、対応策（適応策/緩和策）について国際社会を含めた議論を行う「海洋危機ウォッチ」の構築を目指して、2016～2017 年度の実施内容を踏まえ、情報の充実化を行うとともに、プロトタイプ版の公開を発表した。以下にその概要を示す。

なお、本情報基盤の整備・構築にあたっては業務の一部を海洋研究開発機構及びいであ株式会社への業務委託として実施した。

図 16　公開を発表したウェブページ

３．１　科学データの収集・整理・解析と予測システムの構築

（１）背景および目的

笹川平和財団海洋政策研究所では、海洋における地球温暖化や海洋酸性化について国内外の状況を共有・発信し、現状と課題に係る理解を深めるため、また、我が国において取り組むべき事項（研究基盤構築、国内外の研究連携、社会・経済面の影響把握等）を検討するとともに、今後必要となる対応策等について提案することを目指して、温暖化・海洋酸性化の研究と対策に係る事業を実施している。

本事業においては、日本周辺を含む北西太平洋海域に主眼を置き、温暖化・海洋酸性化の影響に係る監視情報を集約し、その進行予測や社会影響を検討するとともに、そうした情報を共有し、同時に対応策（適応策と緩和策）について国際社会を含めた議論を行うことができる情報基盤「海洋危機ウォッチ」の構築を目指している。また、今後これら情報基盤を、研究活動及び研究の連携の推進や国内外の政策を牽引する提言に活用することを目指している。地球温暖化や海洋酸性化に係る情報には、海洋科学分野に特化した数値データ等も多く、それら情報の特性を踏まえて、政策決定者などに向けて分かりやすく伝える必要がある。

本業務では、必要となる情報基盤のコンテンツのうち、主に海洋科学分野の専門的知見を必要とする科学データについて収集・整理・解析を行うこと、そうした科学データを一般社会に向けて分かりやすく伝える方法（科学データの加工）を検討すること、その一環として利用する海洋酸性化に係る予測モデルの開発を行うことを目的とする。

外洋における海流予測については数値モデルに観測データ等を同化することで気候値を作成し、1-2 か月先までの海流変動予測を更新する枠組みが、現在国内外のいくつかの研究機関において確立し一般に公開されている（例：海洋研究開発機構：JCOPE2）。これらの数値モデルを活用して生物化学モデル（JCOPE_EC）を導入し、海洋環境（全炭酸、アルカリ度、pH、pCO2 を含む）の現況予測を実現することは、きわめて有意義である。

今後の海洋酸性化の状況について、Climate Model Intercomparison Project（CMIP）などの国際的な取組を通じ、海流や渦を解像しない粗い格子のモデルで 100 年程度先までの見通しが示されている。例えば Yara et al. (2012) は、これらのシミュレーション結果を使い日本周辺で大まかな酸性化の見通しを示している。ただし、見通しの結果は海流や渦の影響を十分に取り入れたものではなく、海洋学的に不明な点が多い。予測の取組により、現在の日本周辺海域での酸性化状況がこうした見通しと比べてどのような状況であるかを詳しく把握することは、見通しの検証や、直近の対策の検討に資するものである。また、現況予測モデルを用いて過去数十年の再解析データを作成し、これまで海洋酸性化がどのように進行してきたかについてより詳しく理解することも重要である。

（２）実施内容

本事業では、概ね 4 年間の期間において、次のことを実施し、情報基盤のコンテンツに資する観測データおよびモデルデータを整備するとともに、その成果を発信していく。今年度（2018 年度）は、2017 年度に実施した海洋環境現況予測システムの運用体制構築および観測データの収集と加工を受けて、次の 2 つの項目について実施した。

(a)予測モデルの運用

海洋環境現況予測システムの予測更新を月 1 回毎、計 12 回実施した。予測精度の検証等を踏まえて、予測モデルの改良を継続し、精度向上に努めた。現況予測モデルで出力される変数の再現性について、2015 年の気象庁観測データ（過去データ）を利用して、季節変動も含め観測値との比較から精度について評価し、結果をまとめ英文科学誌に投稿した。

日本近海における炭酸系の平均状態と季節変動を再現できる予測システムを構築した。現況システムに使用する JCOPE_EC について、観測値との比較から予測精度の評価を行い、海洋酸性化に関するパラメータは現況予測として利用しても問題ない程度の精度であることを示した。炭酸系への寄与（生物ポンプ）の評価は検討の余地が残されている。

(b)科学データを用いた解析

予測モデルの検証に利用する科学データを整理し、現況予測モデルの検証に用いた。現況予測だけではなく、100 年程度先までの酸性化傾向の長期予測モデル結果(CMIP5 等)を入手し、コンテンツとして活用できるよう加工を行った。長期モデル結果の現況再現値と(a)で開発した現況予測モデルの予測値や気候値と比較検討を行った。日本沿岸域で初めて確認した数十年での酸性化傾向についての論文改訂を進めた。

以上の結果について、成果の対外発表を行った。

・4th International Symposium ECCWO (2018/06/4-8, Washington DC, USA)
・日本海洋学会秋季大会 (2018/09/25-29, 東京)
・PICES－2018　Annual Meeting (2018/10/25-11/4, Yokohama, Japan)

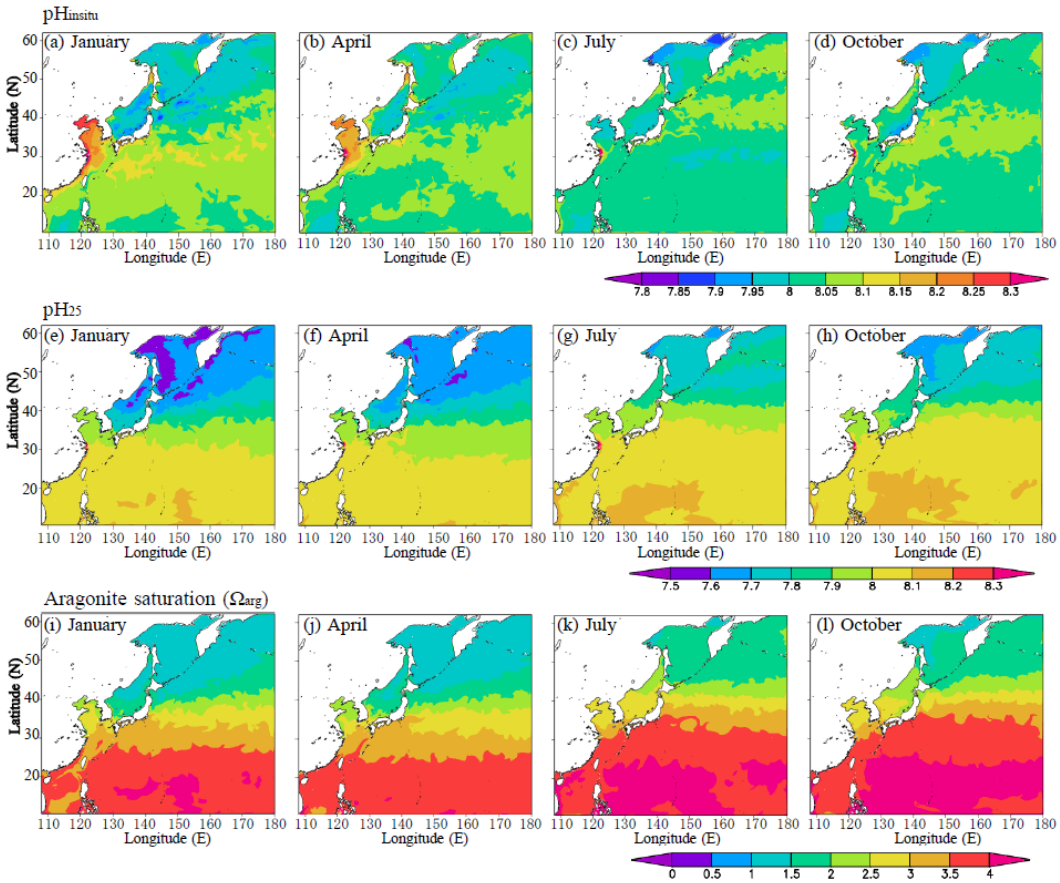


図 17　予測計算結果の一例

モデル出力の水温、塩分、DIC およびアルカリ度の値から計算された現場 pH（a－d），pH25 (e－h), アラゴナイト飽和度(i－l)の表層水平分布図。図は、1 月、4 月、7 月、10 月の月平均値を示す。

３．２　情報基盤となる「海洋危機ウォッチ」の試作

温暖化・海洋酸性化について一般向けに分かりやすく、かつ専門家にも活用可能な情報基盤（ホームページ）の作成を目指す計画の第２ステップとして、昨年度検討し試作版として構築したウェブページの更新を実施し、以下の５つのコーナーを設けコンテンツをインターネットに配信するための環境整備を行い、「海洋危機ウォッチ」のプロトタイプを作成し公開を行った。

- ✓ 「海の予測情報」ページへの JCOPE_EC のアラゴナイト飽和度(Ω)追加
- ✓ 「海の予測情報」ページへの CMIP（Coupled Model Intercomparison Project）の予測情報の表示
- ✓ 「観測の情報」ページへの情報追加
- ✓ HP の一部英語化
- ✓ 温暖化・海洋酸性化に関する最新情報提供

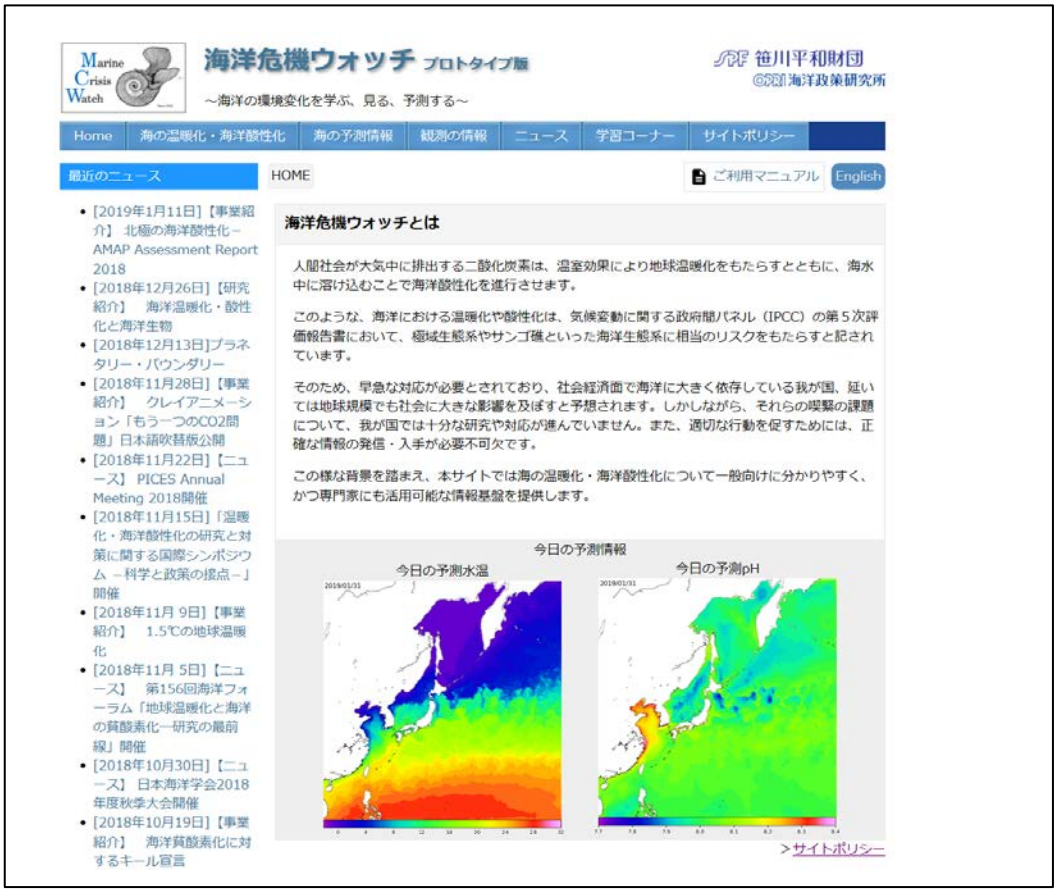


図 18 海洋危機ウォッチ サイトイメージ

（１）温暖化・酸性化予測データ表示

水温や pH といった「温暖化・酸性化予想データ表示」を行う機能として、別途予測された結果のデータ加工処理から取込、保存、データ表示までを一連のシステムとして、過年度から構築してきた。

以下にその詳細を示す。

1) システム製品構成

システム製品構成は、運用段階において高額なライセンス料金が発生せず、ユーザ側にウェブブラウザ以外のインストールを必要としないソフトウェア構成とした。

2) 数値データ加工処理の構築

数値データを加工しシステムへ取込む機能の実装方法を検討し構築した。なお、数値データは JCOPE_EC とした。

数値データの情報を以下に示す。

- データ：JCOPE_EC(NetCDF 形式)
- データ種類：水温(℃)、塩分、pH、アラゴナイト飽和度(Ω)

数値データ加工処理は、JCOPE_EC から、面的表示用の画像、アニメーション用の画像、月平均データの生成を行い、JCOPE_EC データと共に所定のフォルダへ格納している。

なお、2016 年度までは JCOPE2 の数値データが FORTRAN バイナリ形式であったが、2017 年度からは NetCDF 形式の JCOPE_EC に変更している。2018 年度には、データ種類にアラゴナイト飽和度(Ω)を加える作業を行った。

数値データ加工処理の出力データを表 1 に示す。

表 1　数値データ加工処理の出力データ

出力データ	出力データ詳細情報
面的表示用画像	● 水温(0,10,25,50,100,150,200,300,400,500m) ● 塩分(0,10,25,50,100,150,200,300,400,500m) ● pH(0,10,25,50,100,150,200,300,400,500m) ● アラゴナイト飽和度 (0,10,25,50,100,150,200,300,400,500m) 上記画像を日次、月次で作成 ファイルフォーマット PNG、サイズ(1000px×1000px)
アニメーション用画像	● 水温(0,10,25,50,100,150,200,300,400,500m) ● 塩分(0,10,25,50,100,150,200,300,400,500m) ● pH(0,10,25,50,100,150,200,300,400,500m) ● アラゴナイト飽和度 (0,10,25,50,100,150,200,300,400,500m) 上記画像を日次、月次で作成 ファイルフォーマット PNG、サイズ(625px×600px)
月平均データ	水温、塩分、pH の月平均値データ NETCDF4 データモデル、ファイルフォーマット HDF5

別途予測が行われた結果が保存されているサーバの JCOPE_EC ファイルが追加・更新された場合は、翌朝までにはウェブページへ反映されるように、数値データ加工処理の自動化を行っている。

この自動化を行うにあたって、数値データの提供元と取り交わしたインタフェース仕様を表 2 に示す。

なお、数値データの自動反映は、毎日深夜 1 時に行っている。

表 2　数値データインタフェース仕様

項目	内容
プロトコル	HTTP
認証	BASIC 認証
URL	http://www.jamstec.go.jp/jcope/distribution/ncw_data/
更新情報ファイル	ファイル名：Readme.yyyymmdd.txt ※yyyymmdd は更新日付 更新及び追加のあった予測プロダクトのファイル名リスト
予測プロダクトファイル名	ファイル名：net80.nc2.yyyymmdd.nc ※yyyymmdd は対象日付

3) 数値データ表示機能の構築（JCOPE_EC）

“数値データ表示機能の構築”作業は、平成 28 年度にウェブページを試作し、それを基に検討を進めてきた。ウェブサイトのメニューとしては、“海の予測情報” - “JCOPE”として構築している。

- 画面デザイン・レイアウト

  プロトタイプの作成に先立ち、分かりやすさと統一レイアウトを考慮した画面デザインとするために、画面デザイン・レイアウトを設計し、パーツの配置や配色、フォントサイズ等を検討してきた。

  なお、画面デザイン・レイアウトの設計は、他の情報発信機能を含めて行っている。

- 面的表示機能

  面的表示機能を実現するための、ソフトウェア構成、前処理等を検討し、プロトタイプを作成したうえで機能を実装している。面的表示機能は、主にウェブ GIS サーバソフトウェアの“MapServer”と、ウェブ GIS ライブラリの“OpenLayers”で実装している。また、地図上に重ね表示する数値データ画像は、リアルタイム生成ではなく事前に作成することとした。

  これらによって、一般的にインターネットで利用できる地図サイトと同様の操作方法で、地図上に面的表示した数値データを表示することを可能としている（図 18）。

  なお、背景地図は、GEBCO(http://www.gebco.net)を利用した。

  平成 30 年度では、アラゴナイト飽和度（Ω）の表示機能を作成している。なお、アラゴナイト飽和度（Ω）の表示機能はシステム上の機能作成は完了したが、JCOPE_EC のデータ精度について妥当性を検討する必要があると判断したため、今年度は機能の公開を見送ることとした。

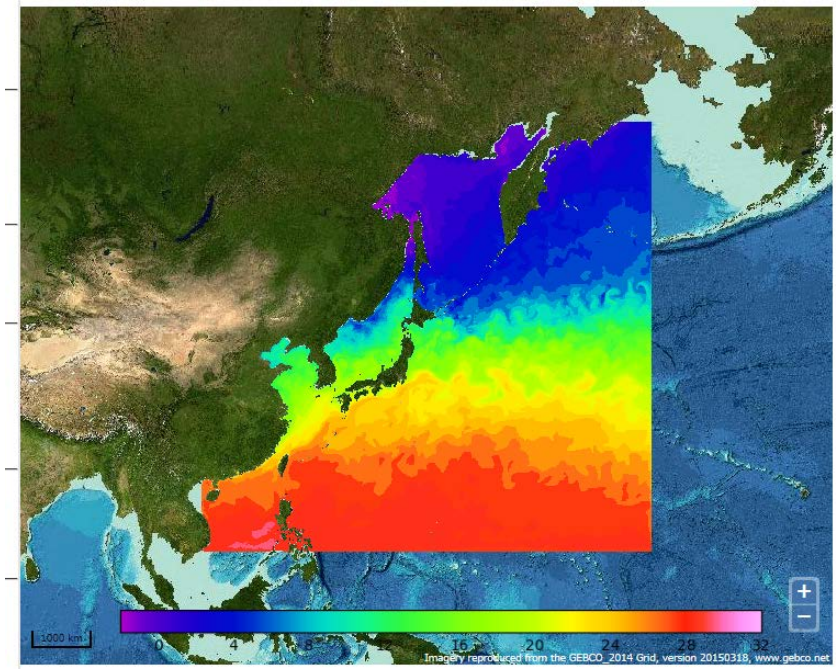


図 19 面的表示機能イメージ

- 拡大縮小機能

　面的表示機能の実現と同様に、“MapServer”および “OpenLayers”を使用し、地図および数値データ画像の、拡大／縮小機能を実装している。拡大／縮小の操作は、地図上に配置された拡大縮小用のパーツで操作するか、マウスのホイール操作で行える。また、現在の拡大／縮小情報を地図上のスケールバーで確認できるようにした（図 19）。

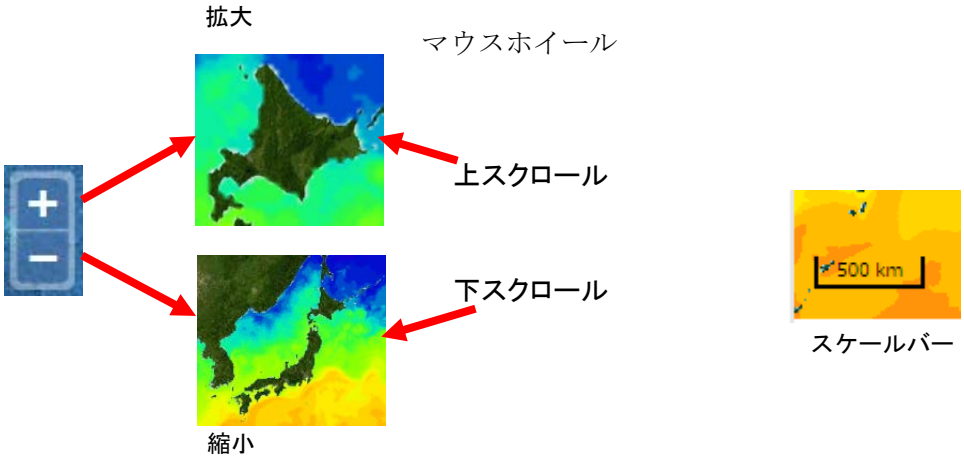


図 20 拡大縮小機能イメージ

- データ選択・表示機能

　データ種類などの選択はサイドバーから行うことができ、表 3 の任意の条件で表示できるようにした。表 3 に示したデータの選択条件が変更された際は、地図上の数値データ画像を即座に該当するデータへ切替えることができる。

表 3　データの選択条件

データの選択条件			画面初期表示時
データ種類	水温(℃)	いずれかを選択	デフォルト選択
	塩分		
	pH		
	アラゴナイト飽和度(Ω)※		
断面方向	水平断面	水平断面を選択することで、水深を選択することが可能になる。 水深は以下から選択可能 0m,10m,25m,50m,100m,150m,200m,300m,400,500m	デフォルト選択
	水深		0m
データ範囲	日平均	いずれかを選択	デフォルト選択
	月平均		
表示日	日付	データ範囲の日平均が選ばれた場合に入力可能	本日の日付 本日までのデータが取り込まれていない場合は、最終日の日付
	年月	データ範囲の月平均が選ばれた場合に選択可能	

※アラゴナイト飽和度は平成 30 年度に追加したデータである。しかし公開サイトでは非表示としている。

- 鉛直断面コンター図表示機能

面的表示された数値データ画像上の２点を指定し、鉛直断面コンター図を表示する機能を作成した。２点の指定は緯線または経線に平行とし、数値データ画像（JCOPE_EC）のエリア内でのみ指定できるようにしている。

鉛直断面コンター図に付随する情報として、“緯度または経度”、“2 点間の距離”、“選択した月日” 及び “データ種別” を表示する領域も設けた（図 20）。

平成 30 年度では、データ種類としてアラゴナイト飽和度(Ω)の追加を行った。DO についても追加も計画していたが、JCOPE_EC に DO 要素が含まれないこととなったため、対象外としている。また、アラゴナイト飽和度(Ω)は 2019 年 2 月 1 日以降のデータのみが存在するため、それ以前の表示日は選択不可にしている。ただし、面的表示機能と同じ理由で機能の公開は見送っている。

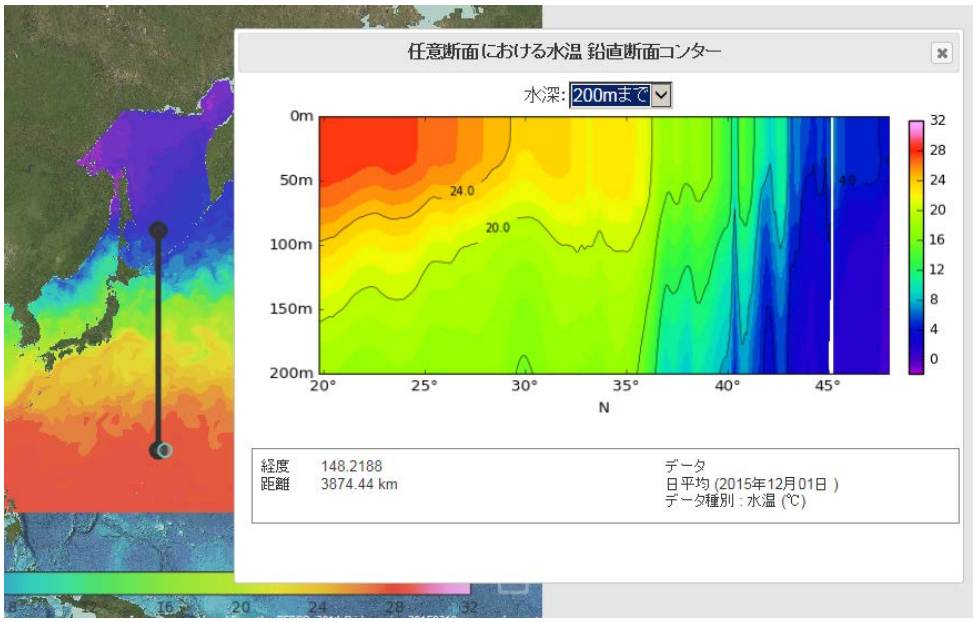


図 21　鉛直断面コンター図表示機能イメージ

- 動画機能

　数値データから動画を生成する処理は比較的時間を必要となるため、リアルタイム性が損なわれる。そのため事前に動画生成用の画像を作成し保存しておくことで、高速化を図っている。

　動画は、データ範囲が日平均の場合は表示日から３０日間を再生することを基本とし、数値データの取り込みがこの期間に満たない場合は、最新の取込日から３０日遡った範囲を再生する。データ範囲が月次範囲の場合は年月から１２か月間を再生することを基本とし、数値データの取り込みがこの期間に満たない場合は、最新の取込月から１２か月遡った範囲を再生する。

　動画再生画面は、ポップアップ表示とし、再生、逆再生、一時停止がボタン操作で行える（図 21）。

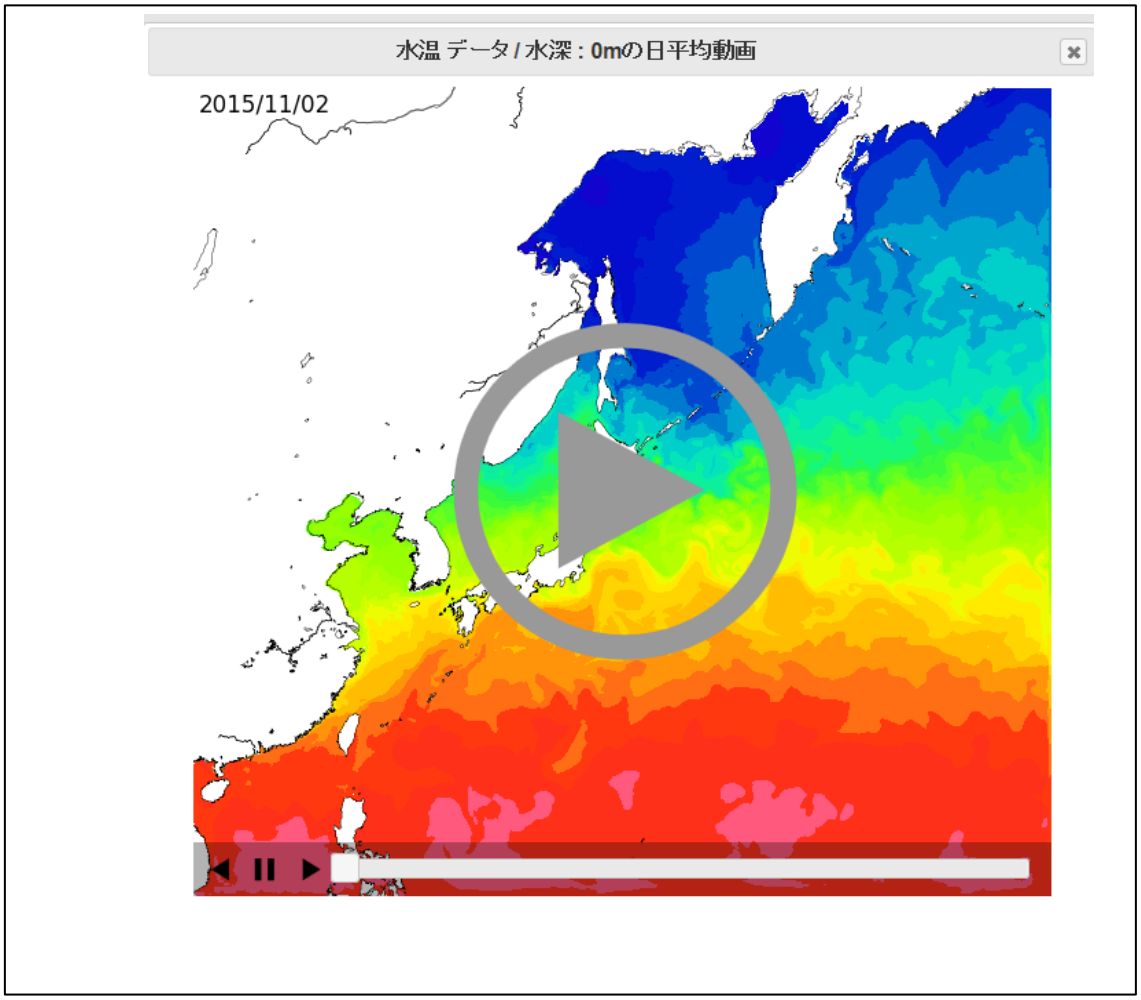


図 22 動画機能イメージ

4)　数値データ表示機能の構築（CMIP）

平成 30 年度では、数値データ表示の新機能として“CMIP（Coupled Model Intercomparison Project）の情報表示”を行う機能を追加した。ウェブサイトのメニューとしては、“海の予測情報” - “CMIP”として構築している。

本機能は、昨年度までに構築した“JCOPE_EC 情報の表示”機能の操作性を踏襲し、初めて使用する利用者でも直感的に操作が行えるようにしている。CMIP データは定期更新ではなく、月別で約 100 年分のデータ 4 シナリオ分を初期整備時に作成、ウェブサイトに登録し 2018 年 12 月から公開を開始した。

登録した 4 つのシナリオは、代表濃度経路シナリオ（Representative Concentration Pathways）に基づくものであり、RPC2.6（低位安定シナリオ；排出量が最も低いシナリオ）、RCP4.5（中位安定化シナリオ）、RCP6.0（高位安定シナリオ）及び RPC8.5（高位参照シナリオ；最大排出量に相当するシナリオ）である。図 22 に RPC2.6 と RPC8.5 における 2100 年のアラゴナイト飽和度の例を示す。

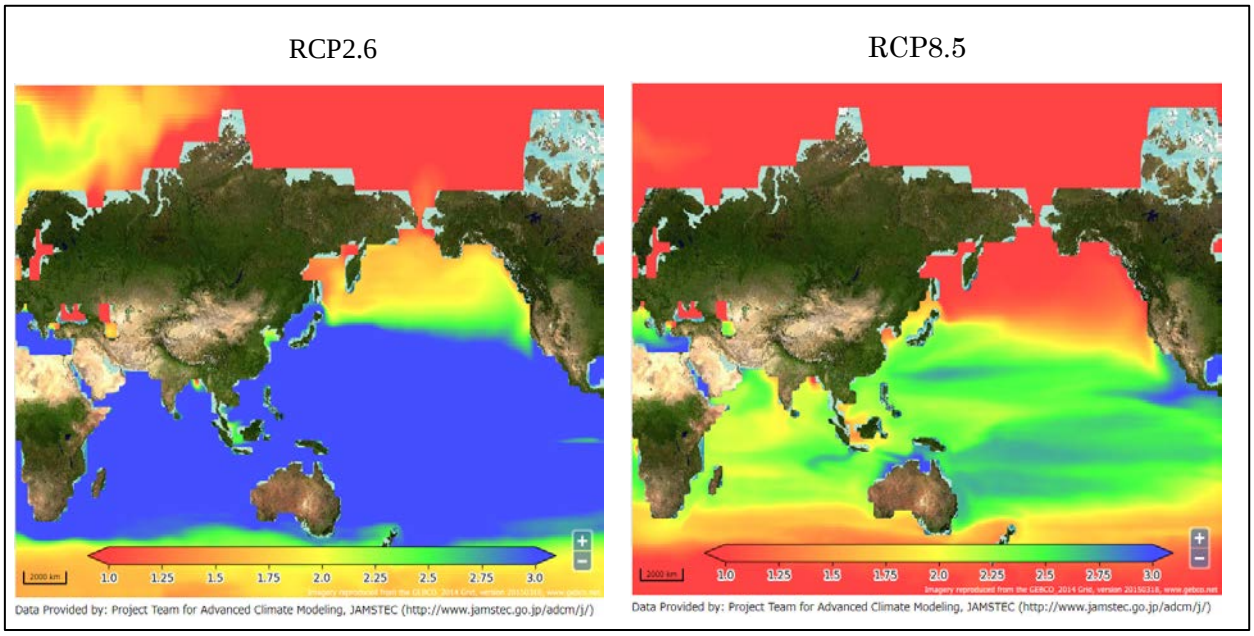


図 23　2100 年 12 月の RCP2.6 と RCP8.5 のアラゴナイト飽和度

- 基本機能

  画面デザイン・レイアウト、面的表示機能、拡大縮小機能といった基本機能は、JCOPE_EC 版の“数値データ表示機能”を踏襲し、同一技術を用いて同様の操作性を実現している。

- データ選択・表示機能

  データの選択は、サイドバーから行えるようにし、表 4 に示す任意の条件で表示できるようにしている。データの選択条件が変更された際は、地図上の数値データ画像が即座に該当するデータへ切り替わるようにした。

表 4　データの選択条件

データの選択条件			画面初期表示時
データ種類	水温(℃)	いずれかを選択	デフォルト選択
	塩分		
	pH		
	アラゴナイト飽和度(Ω)		
断面方向	水平断面	水平断面を選択することで、水深を選択することが可能になる。 水深は以下から選択可能 0m,50m,100m,200m,500m,1000m,2000m,3000m※	デフォルト選択 0m
RCP シナリオ	RCP2.6	いずれかを選択	デフォルト選択
	RCP4.5		
	RCP6.0		
	RCP8.5		
表示年月	年月	2006/01～2100/12 の範囲内で選択	本日の年月

※水深は、わかりやすさのため、区切りの良い数字としているが、正確な水深はそれぞれ 2.5m、50m、110m、185m、550m、975m、2025m、 3025m である。

- 動画機能

  動画再生は、サイドバーの“表示年月”で指定した年月から再生が行われる。また、再生時に年月を順次切り替えるモードの他に、月を固定し再生するモードも用意した。JCOPE_EC 版と同様に一時停止、逆再生も行えるようにしている。

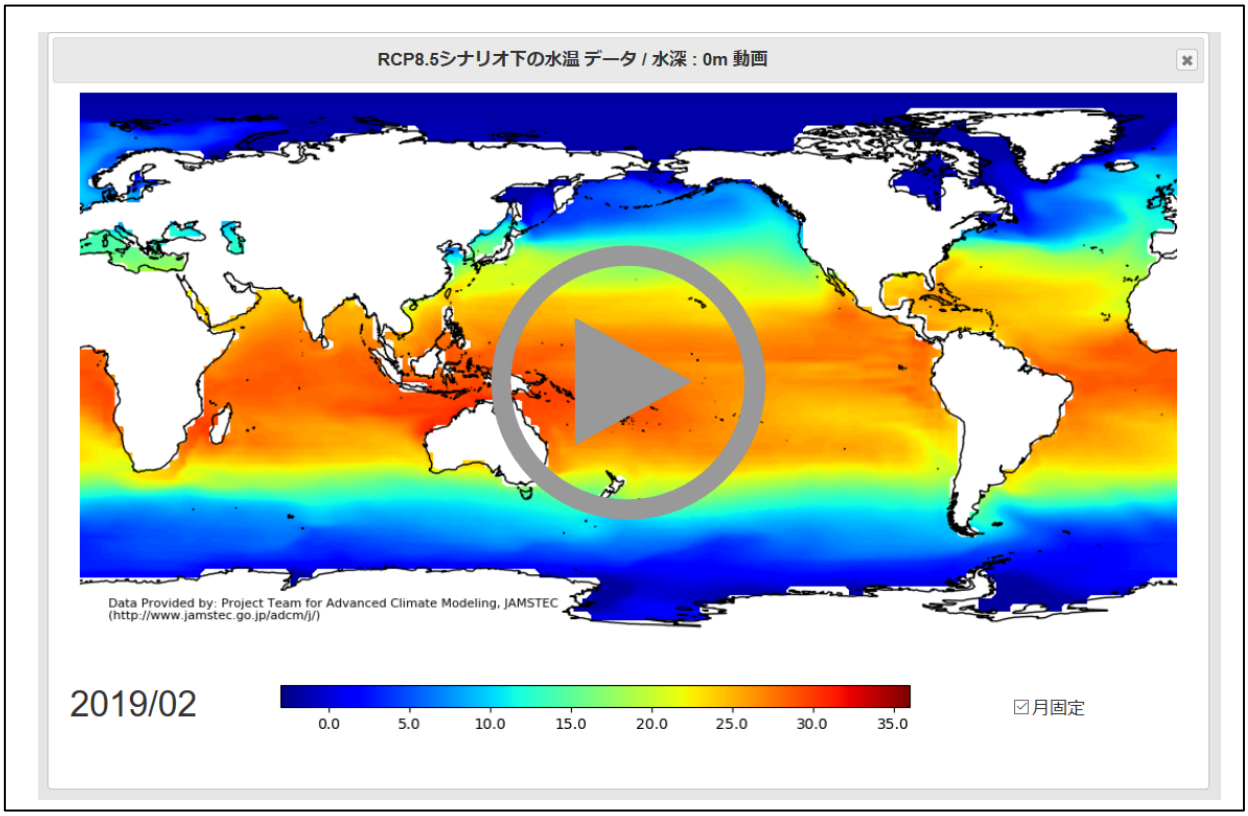


図 24 CMIP 情報表示の動画機能イメージ

5)　HP の一部英語化

平成 30 年度、数値データ表示機能（JCOPE_EC 及び CMIP のコンテンツ）及び Home、サイトポリシーの英語化を行った。日本語、英語への切り替えは各サイトの“切り替えボタン”を押下することで行う。英語へ切り替えた場合は、英語化されていないコンテンツへの移動が出来ないようにメニューの制御を行っている。

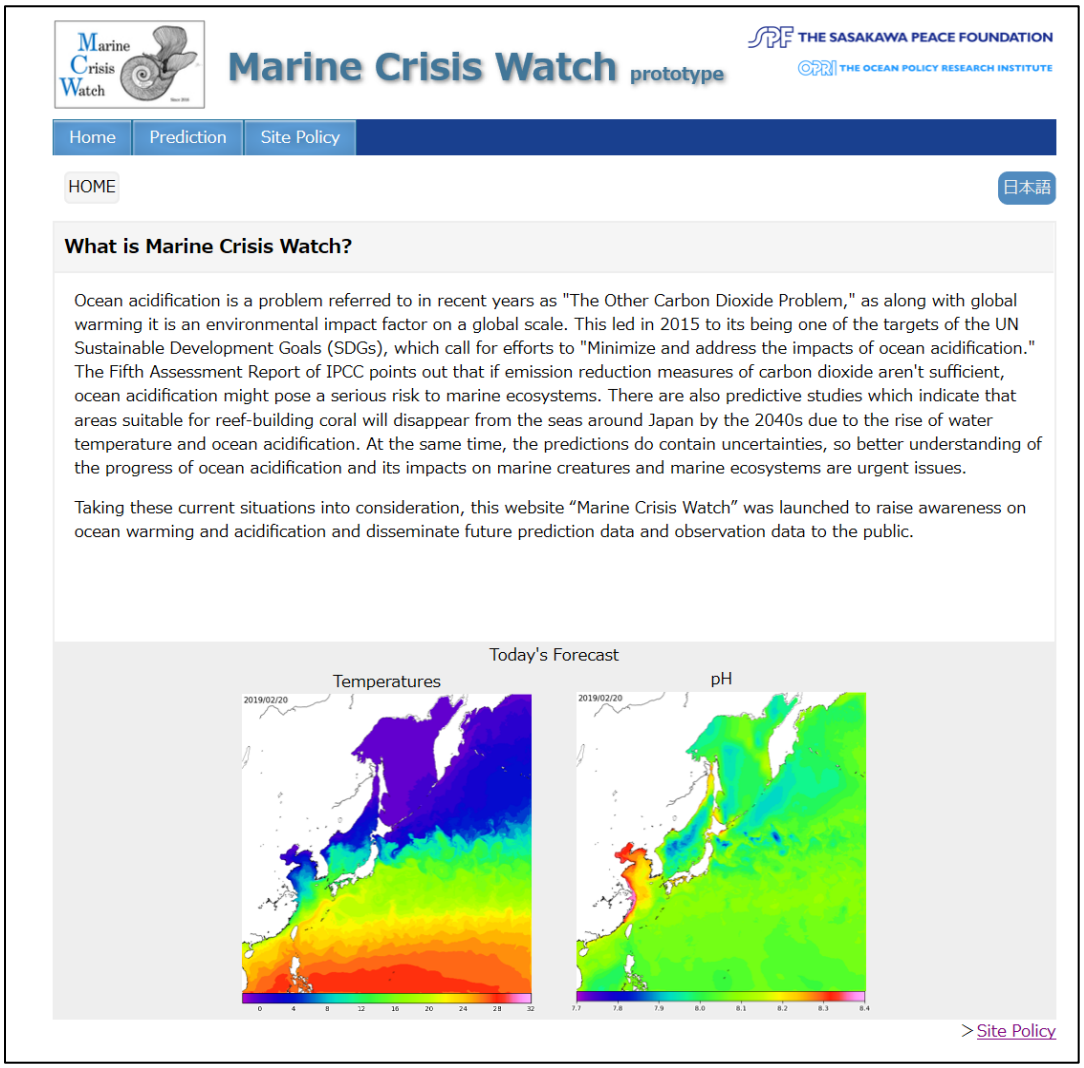


図 25 英語版トップサイトイメージ

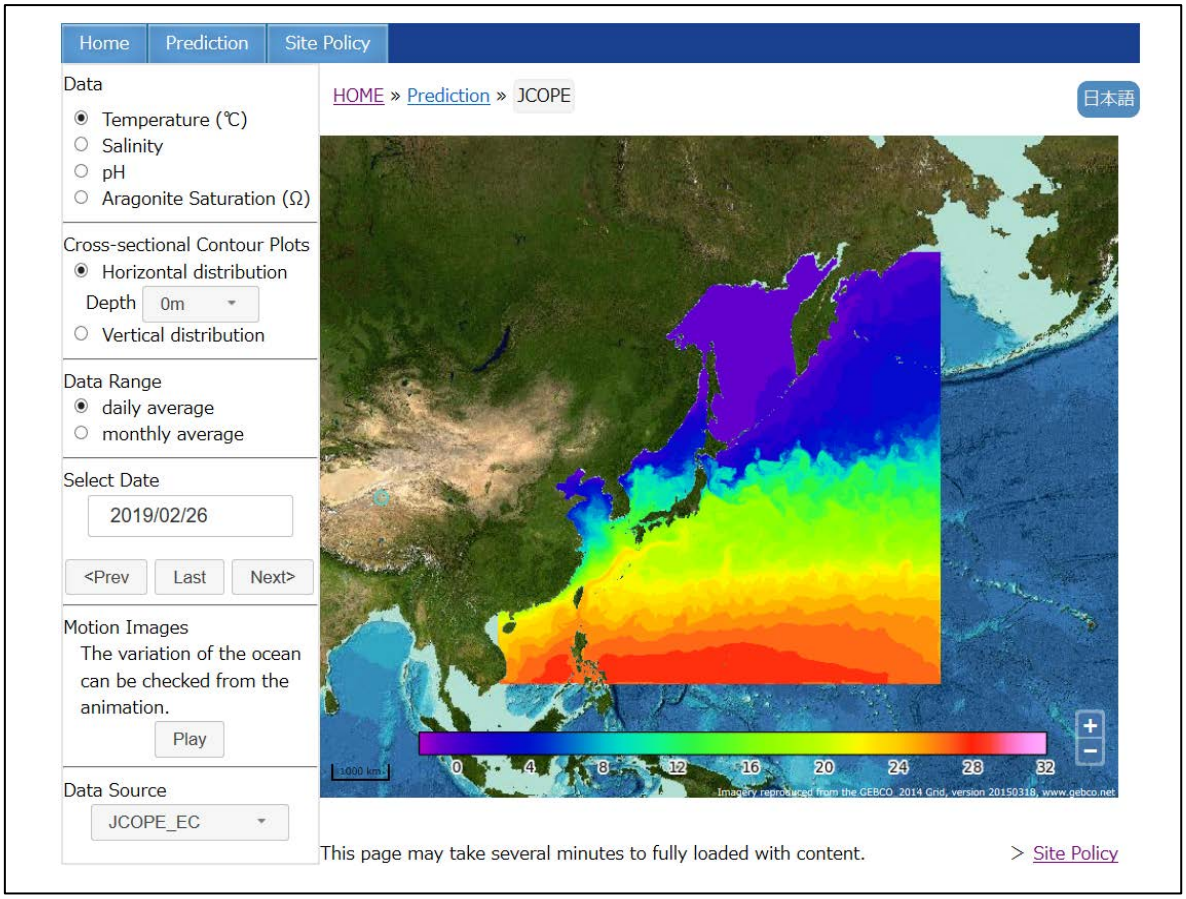


図 26　英語版海の予測イメージ

（２）温暖化・海洋酸性化についての情報表示

“温暖化・海洋酸性化についての情報表示”は、統一レイアウトのもとでコンテンツ部分のみを容易に追加できることが重要であると考え、コンテンツマネージメントシステム(以下、CMS)を利用した。

一般的な CMS を利用する場合には、製品自体にセキュリティホール問題が多々発生することがあり、CMS 製品自体が提供元によって今後もメンテナンスされることと、常に最新化作業を行うことが重要になる。CMS の多くはサイト利用者が操作する都度 HTML を動的に生成しており、そこにセキュリティホールが入り込む隙がある。

さらに、CMS を使ったサイト運用では、サイトへの攻撃を受けて改ざんが行われるなどの被害が発生した場合に備え、改ざんの早期に検知し、サイト停止などの処置を施して影響を最小限にとどめる必要がある。そのためには、定期的なシ

ステム監視などの多くの労力が必要となる。

上記の様なセキュリティ等の問題に対応するため、CMS 製品の中から“Movable Type Open Source（以下、MTOS）”を採用した。“MTOS”の持つ機能の中で、高性能な HTML エディター、およびコンテンツ管理リポジトリとしてのみ利用している。この方法では CMS エンジン部分をウェブサーバで稼働させる必要がなく、セキュリティホールの危険性を回避できる。

また、“MTOS”は利用者が操作する都度、動的に HTML を生成するのではなく、予め HTML を生成しておくことができる。生成した HTML 等をウェブサーバへ複製することでサイトが構築できるため、前述のセキュリティホールが入り込む隙を低減することが可能である。

配信機能の構築では、既存の原稿をもとにコンテンツを作成し、ウェブサイトに登録している。

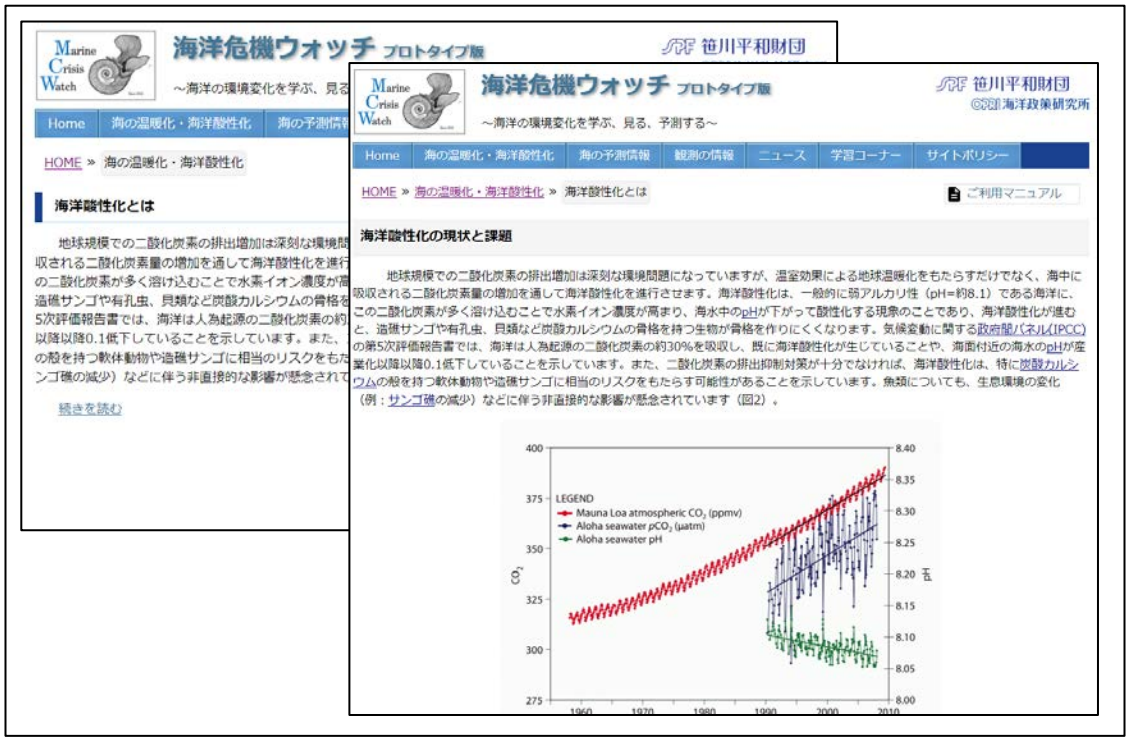


図 27 温暖化・海洋酸性化についての情報表示イメージ

また、“温暖化・海洋酸性化についての情報表示”では、“専門用語についての解説”の用語とクロスリファレンスを行っている。

（３）モニタリング（観測の情報）の表示

A) コンテンツ随時配信機能の構築

“コンテンツ随時配信機能の構築”では「温暖化・海洋酸性化についての情報表示」と同じく、MTOS を使用してコンテンツの管理およびコンテンツの登録を行う事とした。

MTOS の利用方法も「温暖化・海洋酸性化についての情報表示」で説明した考え方や公開までのフローを踏襲する。

モニタリングの情報提供機能として必要な、データのダウンロード機能、他サイトへのリンク、画像の表示は全て MTOS の機能で簡単に作成できる。

配信機能の構築では、過年度は以下の既存の原稿をもとにコンテンツを作成し、ウェブサイトへ登録した。

- ✓ 気象庁：表面海水中の pH の長期変化傾向(北西太平洋)（図 27）
- ✓ JAMSTEC：西部北太平洋亜寒帯域における pH の定点観測（図 28）

平成 30 年度では、以下のコンテンツを追加している。

- ✓ 筑波大学：【研究紹介】 日本国内の海洋酸性化研究（その 1） ―式根島の CO2 シープ―（図 29）
- ✓ JAMSTEC：【研究紹介】 日本国内の海洋酸性化研究（その 2） ―津軽海峡にみる海洋酸性化―（図 30）

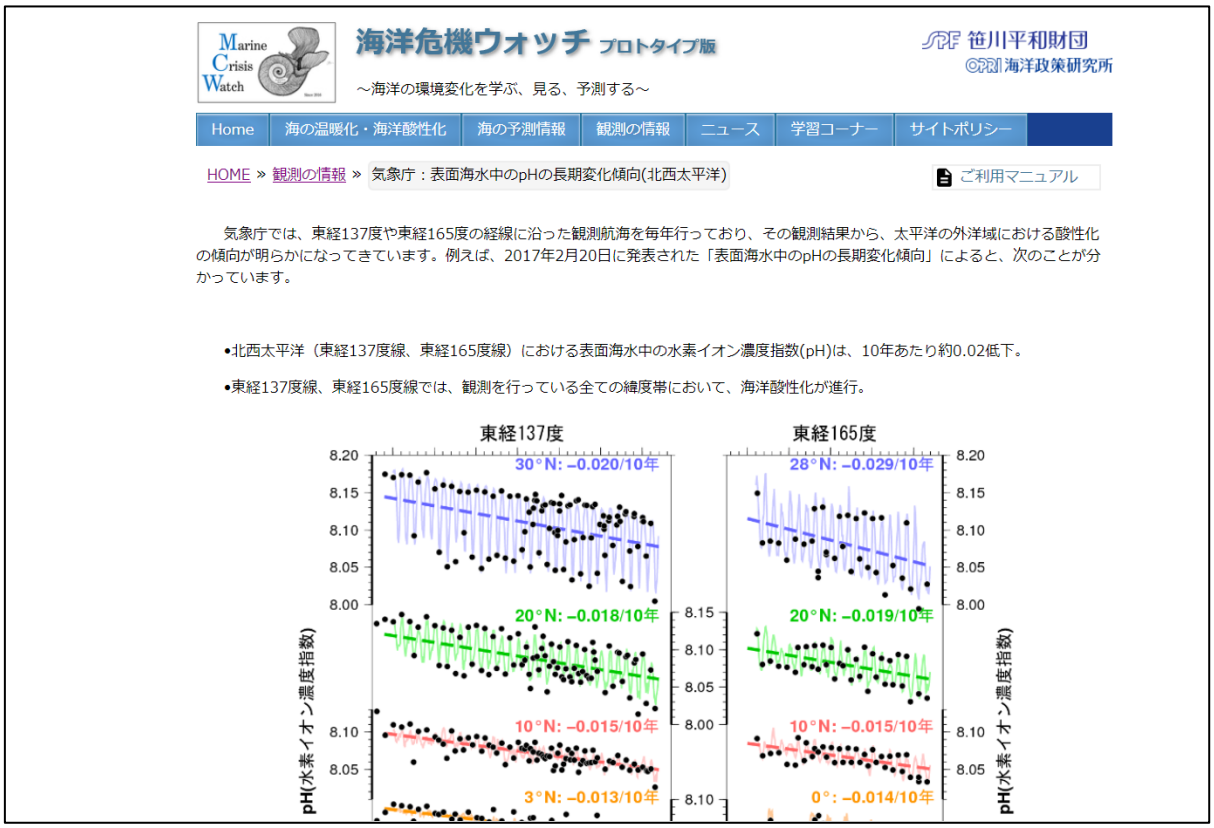


図 28 気象庁：表面海水中の pH の長期変化傾向(北西太平洋)

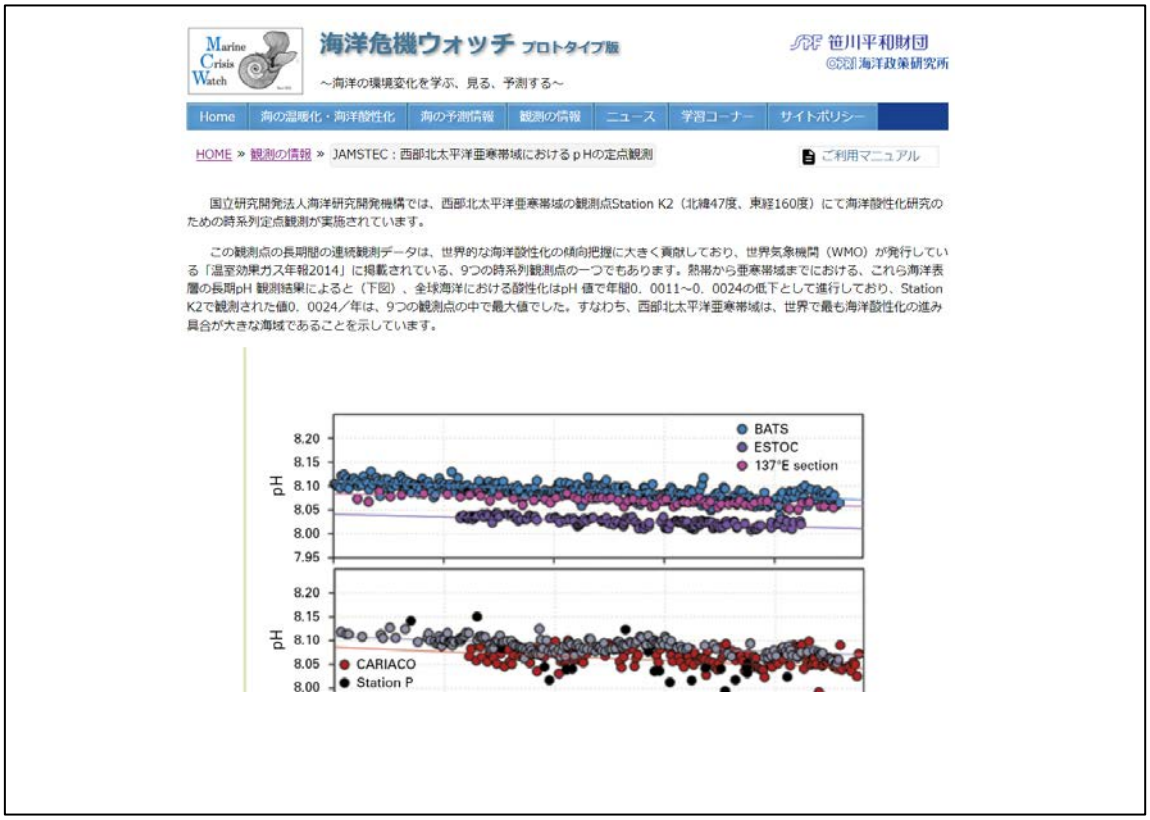


図 29 JAMSTEC：西部北太平洋亜寒帯域における pH の定点観測

図 30　筑波大学：【研究紹介】　日本国内の海洋酸性化研究（その 1）　―式根島の CO2 シープ―

海洋危機ウォッチ プロトタイプ版

～海洋の環境変化を学ぶ、見る、予測する～

笹川平和財団 海洋政策研究所

Home | 海の温暖化・海洋酸性化 | 海の予測情報 | 観測の情報 | ニュース | 学習コーナー | サイトポリシー

最近のニュース

- [2019年3月 4日]【事業紹介】 プラネタリー・バウンダリーの中でSDGs達成を
- [2019年2月 8日]【研究紹介】 人新世の温暖化の『閾値』
- [2019年1月11日]【事業紹介】 北極の海洋酸性化－AMAP Assessment Report 2018
- [2018年12月26日]【研究紹介】 海洋温暖化・酸性化と海洋生物
- [2018年12月13日]プラネタリー・バウンダリー
- [2018年11月28日]【事業紹介】 クレイアニメーション「もう一つのCO2問題」日本語吹替版公開
- [2018年11月22日]【ニュース】 PICES Annual Meeting 2018開催
- [2018年11月15日]「温暖化・海洋酸性化の研究と対策に関する国際シンポジウム －科学と政策の接点－」開催
- [2018年11月 9日]【事業紹介】 1.5℃の地球温暖化
- [2018年11月 5日]【ニュース】 第156回海洋フォーラム「地球温暖化と海洋の貧酸素化―研究の最前線」開催

アーカイブ

HOME » ニュース　　ご利用マニュアル

【研究紹介】 日本国内の海洋酸性化研究（その2） ―津軽海峡にみる海洋酸性化―

2018年6月18日

国際酸性化観測ネットワーク (GOA-ON*) のゴールの一つである「全球の海洋酸性化の状況に対する理解の向上」のため、沿岸域の生態系と酸性化進行の把握を目的として、世界各地で観測モニタリングが展開されています。日本でも、身近な「里海」をはじめとする沿岸域から海洋全体に至るまで、様々な時空間スケールの海洋環境の保全と維持のため国際的な枠組みの中で研究が進められています。

青森県の下北半島の北側にある、国立研究開発法人海洋研究開発機構むつ研究所は、日本海と太平洋を結ぶ津軽海峡に面しています。所内の関根浜港では、東防波堤の突堤と港内の2か所で、週1回の高頻度でCTDとバケツによる表面採水観測を行い、津軽暖流域の環境変動および海洋酸性化の進行とその要因を調べています。

2014年2月開始から約2年間の観測の結果、津軽海峡に流入する津軽暖流や親潮水の入れ替わりの影響が、栄養塩濃度や (溶存無機炭素 (DIC) やアルカリ度 (TAlk) 等の分析値から算出された) pH値の季節変化に現れていました (図1)。さらにpH値やアラゴナイト飽和度 Ωは、観測の行われた数年間で有意な低下を示し（pH: -0.0034 ± 0.0009 /yr, p<0.001; Ω: -0.048 ± 0.006 /yr, p<0.001）、酸性化傾向が示されました。この関根浜の酸性化は、他の日本周辺海域に比べてやや早く進行しており、人為起源二酸化炭素の吸収に加え、生物生産変化や陸域・海浜域・海底などから流入した有機物の分解によるDIC増加の影響の可能性があることから、海浜域特有の短周期現象（日周変動等）を捉えるため、2018年から関根浜港内でpH・CTDセンサー係留による連続観測を開始しました。

なお、むつ研究所の関浜港の観測活動はGOA-ONに登録されており (Asset ID: FOTS_588)、GOA-ONホームページ内のData Explorerで観測項目等の詳細を確認することができます。

*: Global Ocean Acidification Observing Network

図1：関根浜港における (左) 栄養塩(硝酸塩、NO3) と(右) pHの季節変化。

(出典：http://www.jamstec.go.jp/mutsu/j/hendou/)

図 31　JAMSTEC：【研究紹介】　日本国内の海洋酸性化研究（その 2）
―津軽海峡にみる海洋酸性化―

また、上記のコンテンツは“観測の情報”サイトの“観測データマップ機能”との連携を行っている。

観測データマップ機能は、観測地点を地図上にポイントまたはラインで表し、マウスクリックで観測地点と連携した記事のリンクをポップアップ表示する。

観測データマップ機能への観測地点の追加は、サーバ側のデータファイルに追加するだけで簡単に行える仕組みとしている。

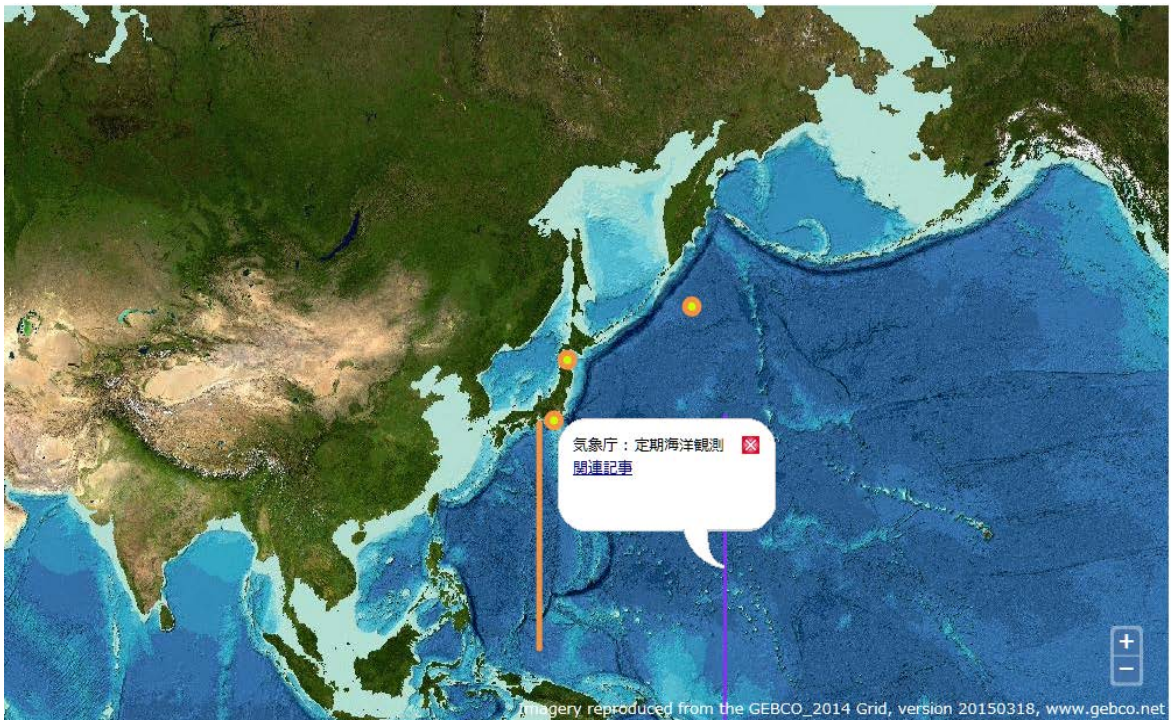


図 32 観測データマップイメージ

（4）温暖化・海洋酸性化に関する最新情報提供

A) コンテンツ随時配信機能の構築

「温暖化・海洋酸性化についての情報表示」と同じく MTOS を使用して、コンテンツの管理およびコンテンツの登録を行う事とした。

MTOS の利用方法も「温暖化・海洋酸性化についての情報表示」で説明した考え方や公開までのフローを踏襲する。

温暖化・海洋酸性化に関する最新情報提供として必要な“公開日の表示”は、MTOS の機能で実現できる。

温暖化・海洋酸性化に関する最新情報提供イメージは図 32 のとおりである。

図 33 温暖化・海洋酸性化に関する最新情報提供イメージ

平成 29 年度では、海洋酸性化に関する情報を配信するため、海外論文（Nature 等）から温暖化・酸性化に係るコンテンツ（表 5）を翻訳し、論文の概要原稿を作成した。また平成 29 年度から平成 30 年度にかけてトピック的なニュース記事（表 6）のコンテンツ配信を行ってきた。

表 5　海外論文

	タイトル	出典
1	Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification	O. Hoegh-Guldberg et al. Science 14 Dec 2007: Vol. 318, Issue 5857, pp. 1737-1742 DOI: 10.1126/science.1152509
2	Projecting Coral Reef Futures Under Global Warming and Ocean Acidification	John M. Pandolfi et al. Science 22 Jul 2011: Vol. 333, Issue 6041, pp. 418-422 DOI: 10.1126/science.1204794
3	Coral reefs in the Anthropocene	Terry P. Hughes et al. Nature 1 June 2017: Vol. 546, pp. 82-90 DOI:10.1038
4	Benthic coral reef calcium carbonate dissolution in an acidifying ocean	Bradley D. Eyre et al. Nature Climate Cange 29 Oct 2014: Vol. 4, pp.969-976 DOI: 10.1038
5	Integrating the Effects of Ocean Acidification across Functional Scales on Tropical Coral Reefs	Peter J. Edmunds et al. BioScience May 2016: Vol. 66 No. 5, pp.350-362 DOI:10.1093/biosci/biw023
6	Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification	Jason M. Hall-Spencer et al. Nature 3 July 2008: Vol.454, pp.96-99 DOI: 10.1038/nature07051

表 6 キュレーター原稿

	タイトル	提出日	掲載日
1	【ニュース】国際シンポジウム「海洋における温暖化と酸性化～現状と今後の対応策～」開催	2017.08.09	2016.02.18
2	【ニュース】国連海洋会議開催		2017.06.12
3	【ニュース】国連海洋会議詳報—海洋酸性化に関連して	2017.08.25	2017.06.13
4	【研究紹介】地球の日傘が薄れる…？		2015.10.01
5	【ニュース】日本地球惑星科学連合大会	2017.09.08	2017.05.26
6	【イベント紹介】蘭越町貝の館　企画展『クリオネと海洋酸性化』開催		2017.04.21
7	【ニュース】日本海洋学会秋季大会	2017.09.22	2016.09.16
8	【イベント紹介】蘭越町貝の館　特別企画展示『もし海がなかったら』 および 特別講演会『海の温暖化と酸性化』		2017.09.08
9	【研究紹介】欧米の海洋酸性化教育事情	2017.10.06	2016.06.03
10	【イベント紹介】神奈川県立海洋科学高等学校　出張講義		2016.10.20
11	【イベント紹介】Our Ocean 2016 『Our Ocean, One Future』	2017.10.24	2016.09.23
12	【ニュース】 日本海洋学会 2017 年度秋季大会開催		2017.10.20
13	【イベント紹介】 第３回 JAMBIO 国際シンポジウム開催	2017.11.08	2016.09.26
14	【研究紹介】 海洋酸性化の過去と現在を知る		2016.10.17
15	【イベント紹介】 PICES-2017 Annual Meeting 開催	2017.11.22	2017.10.06
16	【研究紹介】 極域に顕在化する海洋酸性化		2017.04.10
17	【イベント紹介】 第３回 GOA-ON Science Workshop 開催	2017.12.08	2016.05.13
18	【研究紹介】 海生生物への海洋酸性化の影響		2017.12.01
19	【事業紹介】 海洋白書 2016	2017.12.22	2016.04.19
20	【イベント紹介】 サイエンスカフェで海洋酸性化を知る		2016.04.06
21	【コラム】 海洋酸性化を教える	2018.01.12	2017.06.02
22	【イベント紹介】 海洋酸性化の観測モニタリング・トレーニングワークショップ		2017.12.22
23	【開催報告】 「温暖化・海洋酸性化の影響と対策に関する国際会議～西太平洋におけるネットワーク構築に向けて～」 開催	2018.01.24	2017.01.31
24	【イベント紹介】 PICES-2016 Annual Meeting 開催		2016.12.09
25	【事業紹介】 IPCC 評価報告書と海洋酸性化	2018.02.09	2018.02.08
26	【研究紹介】 海洋酸性化と人工的海洋アルカリ化		2018.01.06
27	【事業紹介】 モナコの海洋酸性化への取組み	-	2017.11.10

	タイトル	提出日	掲載日
28	【イベント紹介】　サンゴ礁生態系への海洋酸性化の影響に関する研究およびモニタリングに関する WESTPAC トレーニングワークショップ	2018.05.23	2018.02.08
29	【研究紹介】　水産有用種に対する海洋酸性化の影響		2018.02.22
30	【事業紹介】　第 3 期海洋基本計画が決定	-	2018.05.17
31	【研究紹介】　外洋と沿岸域の海洋の貧酸素化	2018.06.19	2018.03.15
32	【研究紹介】　日本国内の海洋酸性化研究（その 2）　―津軽海峡にみる海洋酸性化―		2018.06.18
33	【事業紹介】　IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書		2018.06.04
34	【研究紹介】　世界の貧酸素化問題 (1) 沿岸域の富栄養化	2018.07.23	2018.04.05
35	【研究紹介】　日本海の貧酸素化		2018.05.28
36	【イベント紹介】　第 4 回国際シンポジウム「The Effects of Climate Change on the World's Oceans」開催		2018.07.06
37	【研究紹介】　世界の貧酸素化問題 (2) 沿岸域の温暖化と貧酸素化	2018.08.20	2018.06.28
38	【研究紹介】　今世紀における海洋酸性化の季節周期の変化		2018.07.13
39	【研究紹介】　南大洋の海洋酸性化		2018.07.25
40	【研究紹介】　身近な海に見る海洋酸性化の将来	-	2018.08.31
41	【研究紹介】　海中の音と海洋酸性化	<9 月分>	2018.08.10
42	【研究紹介】　世界の貧酸素化問題 (3) 数値モデルと観測モニタリング		2018.08.20
43	【事業紹介】　海洋貧酸素化に向けた新たな政策のために	-	2018.09.07
44	【事業紹介】　波乗りで海洋モニタリング	<10 月分>	2018.10.10
45	【研究紹介】　海洋酸性化のナチュラルアナログ		2018.09.21
46	【事業紹介】　1.5℃の地球温暖化	2018.11.26	2018.11.09
47	【事業紹介】　海洋貧酸素化に対するキール宣言		2018.10.19
48	【ニュース】　日本海洋学会 2018 年度秋季大会開催		2018.10.30
49	【ニュース】　第 156 回海洋フォーラム「地球温暖化と海洋の貧酸素化―研究の最前線」開催	2018.12.21	2018.11.05
50	【事業紹介】　クレイアニメーション「もう一つの CO2 問題」日本語吹替版公開		2018.11.28
51	【ニュース】　PICES Annual Meeting 2018 開催		2018.11.22
52	「温暖化・海洋酸性化の研究と対策に関する国際シンポジウム　ー科学と政策の接点ー」開催	2018.12.21	2018.11.15
53	【研究紹介】　プラネタリー・バウンダリー	2018.01.25	2018.12.13

	タイトル	提出日	掲載日
54	【研究紹介】　海洋温暖化・酸性化と海洋生物		2018.12.26
55	【事業紹介】　北極の海洋酸性化－AMAP Assessment Report 2018		2019.01.11

（５）教育コンテンツ提供

A）　コンテンツ提供機能

「温暖化・海洋酸性化についての情報表示」と同じく MTOS を使用して、コンテンツの管理およびコンテンツの登録を行う事とした。

MTOS の利用方法も「温暖化・海洋酸性化についての情報表示」で説明した考え方や公開までのフローを踏襲する。

配信機能の構築では、”キャロル・ターレー博士 インタビュー動画”と“もうひとつの CO2 問題”を登録している。平成 30 年度では新たに日本語吹き替え版を配信開始した。

図 34 教育コンテンツ提供イメージ

B) 専門用語についての解説サイト作成

海洋温暖化・酸性化に関する専門用語をピックアップし、解説サイトを作成している（図 34）。

図 35 専門用語解説イメージ

以上を踏まえた、WEB ページ構成と WEB ページイメージを図 35、図 36 に示す。

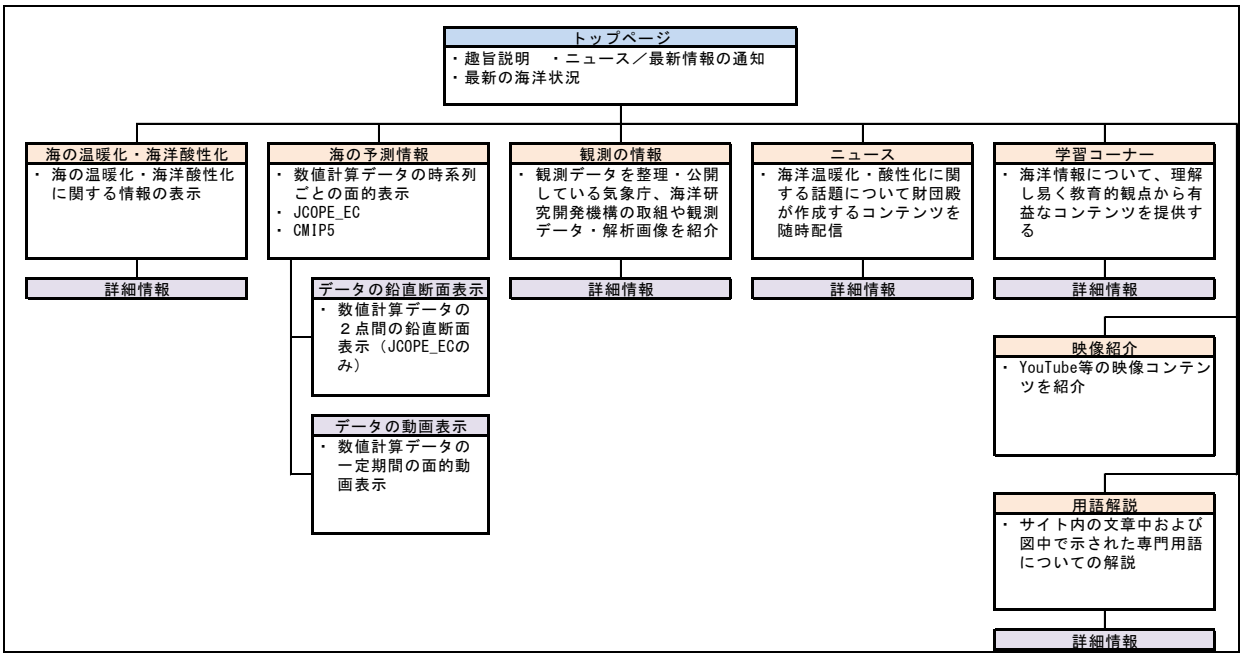


図 36　海洋危機ウォッチ HP のツリー構成

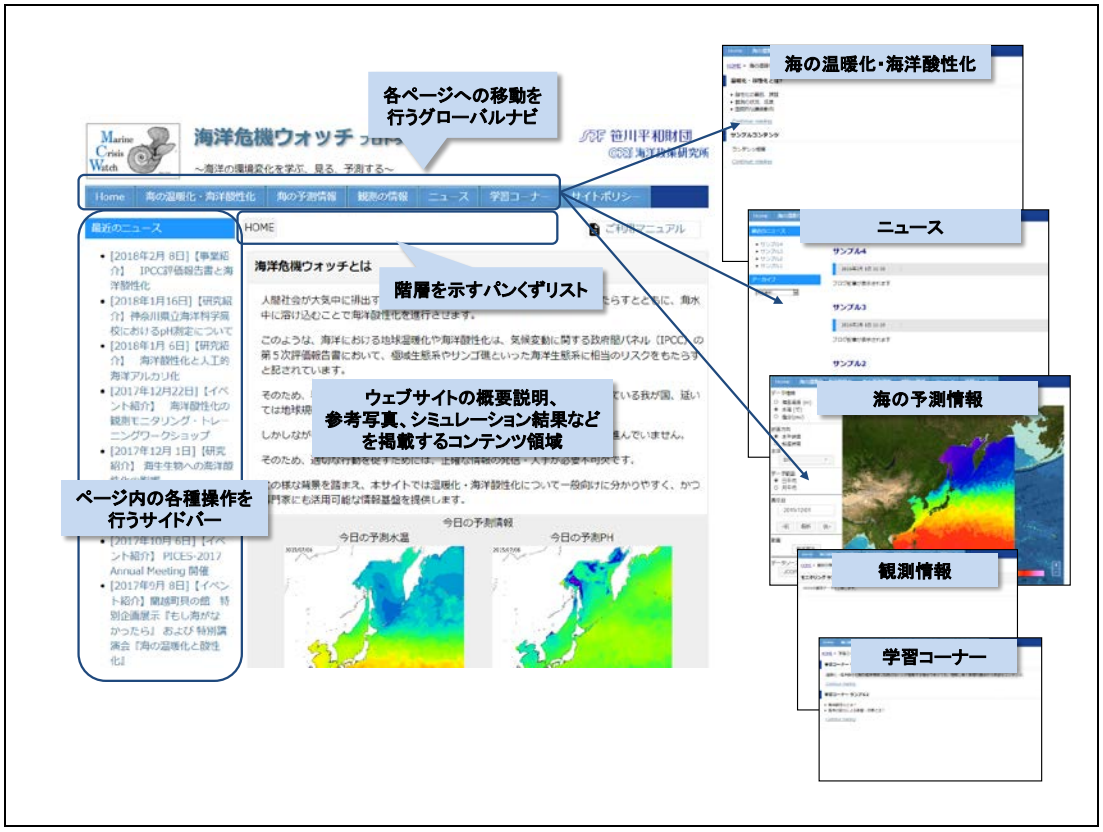


図 37 海洋危機ウォッチ HP のデザインイメージ

４　まとめと今後の課題

人間社会が排出する二酸化炭素は、温室効果により地球温暖化をもたらすとともに、海水中に溶け込むことで海洋酸性化を進行させる。近年、海洋酸性化は「もう一つの CO2 問題」として、海洋生態系等に大きな影響を与える要因とされ、影響把握が必要な世界共通の課題となっている。

2012 年の国連持続可能な開発会議 RIO+20 の合意文書「The Future We Want」にて取り上げられて以降、海洋酸性化の課題は 2015 年の国連持続可能な開発目標（SDGs）やその目標 14「海洋・海洋資源の保全、持続可能な利用」の実施に向けて開催された 2017 年の国連海洋会議などでも懸念が共有されている重要課題であり、欧米を中心に関係者のネットワーク構築が進められている。

このような背景を踏まえ、2016 年度より 4 年間の計画で実施する「温暖化・海洋酸性化の研究と対策」では、日本のリードが期待される北西太平洋海域を研究対象とし、海洋における温暖化や酸性化について国内外の状況を共有・発信し、現状と課題に係る理解を深めること、また、我が国において取り組むべき事項を具体的に検討・推進するとともに、今後必要となる対応策（適応策と緩和策）について提言することを目的として、調査研究を実施してきた。そして、3 年目の 2018 年度には以下を行った。

（1）海洋の温暖化・酸性化に係る研究の推進

2018 年 1 月に科学誌『Science』に包括的な論文が掲載され、また、9 月にドイツのキールで 33 カ国・300 名超の科学者の参加のもとで開催された国際会議において「海洋貧酸素化に関するキール宣言」が取りまとめられるなど、科学界から新たな課題として政策決定者に向けて提起されている海洋の温暖化と貧酸素化の課題に着目し、その経緯を整理するとともに外洋域及び沿岸域の課題を特定した。

また、海洋酸性化の課題については、前年度の成果である政策提言を踏まえた対外的な発表や、その実施に向けた国際シンポジウムを開催し、国際的なネットワークのもとでの提言内容の実現に向けた議論を行った（シンポジウム等は以下のとおり）。

- ✓ 第 4 回国際シンポジウム“The Effects of Climate Change on the World’s Ocean”での成果発表（2018 年 6 月 5 日）
- ✓ 第 156 回海洋フォーラム「地球温暖化と海洋の貧酸素化―研究の最前線」の開催（2018 年 10 月 26 日）
- ✓ 「温暖化・海洋酸性化の研究と対策に関する国際シンポジウムー科学と政策の接点」の主催（2018 年 10 月 28 日）
- ✓ 国連気候変動枠組条約第 24 回締約国会議(UNFCC-COP24)のサイドイベントでの成果発表（2018 年 12 月 6 日）

（２）情報基盤の整備・構築

日本周辺を含む北西太平洋海域に主眼を置き、海洋における温暖化や酸性化の影響に係る情報を集約し、その進行予測や社会・経済面での影響を検討するとともに、そうした情報を共有し、対応策（適応策/緩和策）について国際社会を含めた議論を行うことを目指す。

2018 年度は、情報基盤である「海洋危機ウォッチ」（プロトタイプ版）を完成させ、公表した。Capstick et al. (2016)が 18-80 歳の英国の一般市民約 2500 人を対象に行った調査では、その 8 割近くが「海洋酸性化」という言葉自体を知らないと答え、石灰殻を持つ生物への影響などについても、誤った認識を持っているという結果が示されている。日本においても経験的に同様の認知度が想定されるなか、分かりやすさと同時に正確性の担保にも留意する必要があり、どのような情報発信が適切か試行しつつ、検討を進めた。

海洋酸性化は、2000 年頃から関連する研究論文が増え始めた、比較的に新しい課題であるが、科学的知見の蓄積に従って政策議論が進み国連の会議などで大きく取り上げられ、モニタリングの推進などの取組が行われた。一方で、科学検討が成熟するにしたがって、その位置づけの整理が行われつつある。そのようななか、2018 年 1 月に科学誌『Science』に包括的な論文が掲載されるなど、海洋の貧酸素化が新たな課題として提起されている。

気候変動と海洋に関する様々な課題が提起されるなか、今後は、2019 年 9 月に予定されている IPCC の「海洋と雪氷圏に関する特別報告書」(Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, SROCC)の議論などを通じて、更に科学と政策の対話が行われることにより、国際社会において適切な対策検討などの議論が促進することが期待される。

海洋・雪氷圏特別報告書は、IPCC 第 6 次評価報告書 (Sixth Assessment Report, AR6)のサイクルで作成する 3 つの特別報告書のうちの 1 つで、2019 年 9 月に公表が予定されていいる。

2021－2022 年に予定されている IPCC AR6 の作成期間に入り、2016 年 4 月にケニアで開催された IPCC 第 43 回総会において、気温上昇 1.5℃の影響、陸上生態系に並んで、海洋・雪氷圏に関する特別報告書として SROCC を作成することが決定した。2016 年 12 月には、専門家が報告書に記載可能な科学的知見を検討し章構造と概要を作成するため、スコーピング会合がモナコで開催された。3 つの IPCC ワーキンググループ [21*]にわたる内容で、適応策を視野に入れると共に、SROCC の理解を充分なものとするための専門事項も組込むことになった。

2017 年 3 月にメキシコで開催された IPCC 第 45 回総会では、SROCC のアウトラインが

[21] IPCC 評価報告書の知見に分野毎の評価を行う作業部会。I：気候システムおよび気候変動に係る科学的根拠、II：気候変動の自然および社会経済への影響および適応策、III：気候変化の緩和策ならびに温室効果ガス排出シナリオの 3 つの分野に分かれている。

決定した。全体の流れとしては、第 1 章「報告書の構成と背景」、第 2 章「高山地域」、第 3 章「極域」、第 4 章「海面水位上昇ならびに低海抜の島嶼、沿岸域及びコミュニティへの影響」、第 5 章「海洋、海洋生態系及び依存するコミュニティの変化」、第 6 章「極端現象、急激な変化及びリスク管理」の章立てからなり、事例研究やよくある質問が全章に、また総合的な章横断型の囲み記事として「低海抜の島嶼及び沿岸域」についてまとめることになった。

アウトライン決定後、2017 年 10 月(フィジー)と 2018 年 2 月(エクアドル)にて執筆者会合が開かれた。2018 年 5 月から 6 月にかけて 1 次ドラフトの専門家査読が行われた後、引き続き執筆者会合を挟んで、各国政府および専門家の意見を収集・反映するための政府査読・専門家査読、政策決定者向け要約の最終ドラフトの政府査読が行われている。そして 2019 年 9 月にモナコで開催が予定されている IPCC 第 51 回総会で承認・受諾を経て、SROCC が公表される見込みである。海洋酸性化や貧酸素化などの海洋に係る課題が、どのように記載されるのかが注目される。

また、これらに続く国際的な取組として注目されるのが、2020 年にポルトガルでの開催が予定されている国連海洋会議である。この会議は 2017 年の会議に続く第 2 回目で、「持続可能な開発目標（SDGs）」の目標 14（SDG14）の実施を推進するために行われる注目される会議となる。海洋酸性化は、この SDG14 の項目 3 にて「あらゆるレベルでの科学的協力の促進などを通じて、海洋酸性化の影響を最小限化し、対処する」ことが示されている課題でもある。表 7 に示す 10 項目からなる SDG14 の一つに、海洋汚染や違法漁業などとともに位置づけられている。

一方で、SDGs の目標 14 の他の項目が目標年次（ターゲット年次）とともに示されているのに対して、海洋酸性化は目標年次が示されておらず、また、指標に対するガイドラインなどが未策定の状況になっている。海洋の貧酸素化などの新たな課題が提起されるなかにおいても、引き続き海洋酸性化は海洋環境に係る重要な課題であり、2020 年の第 2 回国連海洋会議を見据えて、ガイドライン策定など、政策面から後押しするような取組も求められる。

表 7　SDG14 の各ターゲット及び指標 [22]

ターゲット	指標
14.1　2025 年までに、海洋ごみや富栄養化を含む、特に陸上活動による汚染など、あらゆる種類の海洋汚染を防止し、大幅に削減する。	14.1.1　沿岸富栄養化指数（ICEP）及び浮遊プラスチックごみの密度
14.2　2020 年までに、海洋及び沿岸の生態系に関する重大な悪影響を回避するため、強靭性（レジリエンス）の強化などによる持続的な管理と保護を行い、健全で生産的な海洋を実現するため、海洋及び沿岸の生態系の回復のための取組を行う。	14.2.1 生態系ベースにアプローチを用いた管理が行われている国内の排他的経済水域の割合
14.3　あらゆるレベルでの科学的協力の促進などを通じて、海洋酸性化の影響を最小限化し、対処する。	14.3.1　承認された代表標本抽出地点で測定された海洋酸性度(PH の平均値
14.4　水産資源を、実現可能な最短期間で少なくとも各資源の生物学的特性によって定められる最大持続生産量のレベルまで回復させるため、2020 年までに、漁獲を効果的に規制し、過剰漁業や違法・無報告・無規制（IUU）漁業及び破壊的な漁業慣行を終了し、科学的な管理計画を実施する。	14.4.1　生物学的に持続可能なレベルの水産資源の割合
14.5　2020 年までに、国内法及び国際法に則り、最大限入手可能な科学情報に基づいて、少なくとも沿岸域及び海域の 10%を保護する。	14.5.1　海域に関する保護領域の範囲
14.6　開発途上国及び後発開発途上国に対する適切かつ効果的な、特別かつ異なる待遇が、世界貿易機関（WTO）漁業補助金交渉の不可分の要素であるべきことを認識した上で、2020 年までに、過剰漁獲能力や過剰漁獲につながる漁業補助金を禁止し、違法・無報告・無規制（IUU）漁業につながる補助金を撤廃し、同様の新たな補助金の導入を抑制する。	14.6.1　IUU 漁業と対峙することを目的としている国際的な手段を実施する中における各国の進捗状況
14.7　2030 年までに、漁業、水産養殖及び観光の持続可能な管理などを通じ、小島嶼開発途上国及び後発開発途上国の海洋資源の持続可能な利用による便益を増大させる。	14.7.1　小島嶼開発途上国、後発開発途上国及びすべての国々の GDP に占める持続可能な漁業の割合
14.a　海洋の健全性の改善と、開発途上国、特に小島嶼開発途上国および後発開発途上国の開発における海洋生物多様性の寄与向上のために、海洋技術の移転に関するユネスコ政府間海洋学委員会の基準・ガイドラインを勘案しつつ、科学的知識の増進、研究能力の向上、及び海洋技術の移転を行う。	14.a.1　総研究予算額に占める、海洋技術分野に割り当てられた研究予算の割合
14.b　小規模・沿岸零細漁業者に対し、海洋資源及び市場へのアクセスを提供する。	14.b.1　小規模・零細漁業のためのアクセス権を認識して保護する法的/規制/政策/期間の枠組みの適用についての各国の進捗
14.c　「我々の求める未来」のパラ 158 において想起されるとおり、海洋及び海洋資源の保全及び持続可能な利用のための法的枠組みを規定する海洋法に関する国際連合条約（UNCLOS）に反映されている国際法を実施することにより、海洋及び海洋資源の保全及び持続可能な利用を強化する。	14.c.1　海洋及び海洋資源の保全と持続可能な利用のために UNCLOS に反映されているとおり、国際法を実施する海洋関係の手段を、法、政策、機関的枠組みを通して、批准、導入、実施を推進している国の数

[22] 総務省政策統括官ウェブサイト「指標仮訳（最終更新日：2017 年 8 月 8 日）」http://www.soumu.go.jp/main_content/000470374.pdf>を加工（SDG14 日本語訳部分のみ抜粋）

別紙

別紙 1： 予測システムの構築に関する報告

別紙 2：海洋危機ウォッチシステム利用マニュアル

別紙１　予測システムの構築に関する報告

（海洋研究開発機構アプリケーションラボ）

目次

別紙１　予測システムの構築に関する報告 65
要約 66
1. 背景および目的 66
2. 実施内容 67
3. 海洋環境予測システムの構築 69
4. 科学データの収集・整理・解析・加工 88
5. まとめと今後の課題 95
会議等への参加・発表の報告 96
参考文献 98
CMIP5 に関する記事 100

要約

海洋酸性化予測システムの運用と検証を目的として、情報基盤「海洋危機ウォッチ」の一環として海洋環境現況予測モデルの予測更新を実施した。予測精度の検証等を踏まえ、モデル改良を引き続き行い、検証に利用する科学データを新たに入手した。モデル結果と観測データとの比較からモデルの不具合修正や全炭酸の初期値の改善、低次生態系モデルのパラメータチューニングを進め、現況予測システムに使用しているモデル（JCOPE_EC）が酸性化の現況予測として利用しても問題ない程度の精度を伴っていることを示した。 過去にさかのぼった実験では、2014 年から 2016 年にわたる 3 年間の実験を行い、表層での二酸化炭素の溶け込みの影響が冬季のサブダクションと循環により深層に及んでいる可能性を示した。

現況予測モデルの改良に加え、100 年スケールの長期気候予測モデル（JAMSTEC 開発の MIROC_ESM）のデータをもとに、海洋酸性化を表す pH およびアルゴナイト飽和度の見通し値を計算した。結果の一部を「海洋危機ウォッチ」のコンテンツ記事で取り上げた。観測値と MIROC_ESM、JCOPE_EC の出力値を比較し、JCOPE_EC は MIROC_ESM に比べ、よりよい精度をもって酸性化予測できていることを示した。

公共用水で計測された pH の解析については、データの信頼性についての検討を新たに行い、信頼できるデータと判断された公共用水データを使って再解析を行った。それらの結果をまとめ、英文科学誌に再投稿し、査読者の意見を考慮し、さらに改訂作業を行っている。

1. 背景および目的

笹川平和財団海洋政策研究所では、海洋における地球温暖化や海洋酸性化について国内外の状況を共有・発信し、現状と課題に係る理解を深めるため、また、我が国において取り組むべき事項（研究基盤構築、国内外の研究連携、社会・経済面の影響把握等）を検討するとともに、今後必要となる対応策等について提案することを目指して、温暖化・海洋酸性化の研究と対策に係る事業を実施している。

本事業においては、日本周辺を含む北西太平洋海域に主眼を置き、温暖化・海洋酸性化の影響に係る監視情報を集約し、その進行予測や社会影響を検討するとともに、そうした情報を共有し、同時に対応策（適応策と緩和策）について国際社会を含めた議論を行うことができる情報基盤「海洋危機ウォッチ」の構築を目指している。また、今後これら情報基盤を、研究活動及び研究の連携の推進や国内外の政策を牽引する提言に活用することを目指している。地球温暖化や海洋酸性化に係る情報には、海洋科学分野に特化した数値データ等も多く、それら情報の特性を踏まえて、一般社会に向けて分かりやすく伝える必要がある。

本業務では、必要となる情報基盤のコンテンツのうち、主に海洋科学分野の専門的知見を必要とする科学データについて収集・整理・解析を行うこと、そうした科学データを一般社会に向けて分かりやすく伝える方法（科学データの加工）を検討すること、その一環として利用する海洋酸性化に係る予測モデルの開発を行うことを目的とする。

外洋における海流予測については数値モデルに観測データ等を同化することで気

候値を作成し、1-2 か月先までの海流変動予測を更新する枠組みが、現在国内外のいくつかの研究機関において確立し一般に公開されている（例：海洋研究開発機構：JCOPE2)。これらの数値モデルを活用して生物化学モデルを導入し、海洋環境（全炭酸、アルカリ度、pH、pCO2 を含む）の現況予測を実現することは、きわめて有意義であると考えられる。

今後の海洋酸性化の状況について、Climate Model Intercomparison Project (CMIP) などの国際的な取り組みを通じ、海流や渦を解像しない粗い格子のモデルで 100 年程度先までの見通しが示されている。例えば Yara et al. (2012) は、これらのシミュレーション結果を使い日本周辺で大まかな酸性化の見通しを示している。ただし、見通しの結果は海流や渦の影響を十分に取り入れたものではなく、海洋学的に不明な点が多い。今回の取り組みにより、現在の日本周辺海域での酸性化状況がこうした見通しと比べてどのような状況であるかを詳しく把握することは、見通しの検証や、直近の対策の検討に資するものである。また、現況予測モデルを用いて過去数十年の再解析データを作成し、これまで海洋酸性化がどのように進行してきたかについてより詳しく理解することも重要である。

2. 実施内容

本業務では、概ね 4 年間の期間において、次のことを実施し、情報基盤のコンテンツに資する観測データおよびモデルデータを整備するとともに、その成果を世界に発信していく計画である。4 年間で想定される検討事項は次の通りである。

〈2016 年度〉
海洋環境現況予測システムの開発
観測データの収集と加工

〈2017 年度〉
海洋環境現況予測システムの開発と検証
観測データの収集と解析
また、中間評価を行い、その後の活動内容について検討する。

〈2018 年度〉
海洋環境現況予測システムの仮運用と検証。再解析の実施。
科学データの収集と解析、コンテンツ化

〈2019 年度〉
海洋環境現況予測システムの運用と検証、再解析の検証。
科学データの収集と解析、コンテンツ化（継続）
また、最終評価を行う。

（２）2017 年度の業務実績

2017 年度は次のことを実施した。

(a)予測モデルの開発

2016 年度に開発した日本近海における概要的な炭酸系変動を表現する海洋環境現況予測システムの改良を行った。炭酸系化学量の初期値および pH の計算アルゴリズムを修正した結果、炭酸系の平均状態と季節的な変動を再現できることを確認した。低次生態系モデル部分については、パラメータチューニングを行ってモデルの全体的な精度向上に努めた。これらの結果（概要報告を「月刊海洋」にて出版）に基づき、JCOPE2M 予測モデルの予測値に基づいた炭酸系の予測システムの運用体制を構築し、１ヶ月に１回程度の予測更新を可能とした。

(b)科学データを用いた解析

日本沿岸域での観測データを収集し、過去数十年間における全体的な酸性化傾向を日本沿岸域で初めて確認し、論文にまとめ投稿した（改訂中）。その他、海洋環境現況予測システムの検証に必要な物理量（水温、塩分）、化学量（pH、DIC,アルカリ等）の現場観測データを収集した。

（３）2018 年度の実施内容

以上の 4 年間の計画と 2017 年度の実績を踏まえ、2018 年度において次のことを実施した。

(a) 予測モデルの運用

海洋環境現況予測システムの予測更新を月 1 回毎、計 12 回実施した。予測精度の検証等を踏まえて、予測モデルの改良を継続し、精度向上に努めた。現況予測モデルで出力される変数の再現性について、2015 年の気象庁観測データ（過去データ）を利用して、季節変動も含め観測値との比較から精度について評価し、結果をまとめ英文科学誌に投稿した。

日本近海における炭酸系の平均状態と季節変動を再現できる予測システムを構築できた。現況システムに使用する JCOPE_EC について、観測値との比較から予測精度の評価を行い、海洋酸性化に関するパラメータは現況予測として利用しても問題ない程度の精度であることを示した。炭酸系への寄与（生物ポンプ）の評価は検討の余地が残されている。

(b) 科学データを用いた解析

予測モデルの検証に利用する科学データを整理し、現況予測モデルの検証に用いた。現況予測だけではなく、100 年程度先までの酸性化傾向の長期予測モデル結果(CMIP5 等)を入手し、コンテンツとして活用できるよう加工を行った。長期モデル結果の現況再現値と(a)で開発した現況予測モデルの予測値や気候値と比較検討を行った。日本沿岸域で初めて確認した数十年での酸性化傾向についての論文改訂を進めた。

以上の結果について、成果の対外発表を行った。

・4th International Symposium ECCWO (2018/06/4-8, Washington DC, USA)
・日本海洋学会秋季大会 (2018/09/25-29, 東京)
・PICES－2018　Annual Meeting (2018/10/25-11/4, Yokohama, Japan)

（４）その他
「海洋危機ウォッチ」の構築について、サンプルデータやコンテンツ原稿提供等の支援を行った。

3. 海洋環境予測システムの構築

2016 年度は日本近海における概要的な炭酸系変動を表現する海洋環境現況予測システム (NPZDC モデル)を物理予測システム JCOPE2 (Miyazawa et al. 2009)を基盤として構築した。2017 年度は海洋環境現況予測システムの解析と検証を進めるとともに、観測データの収集と解析を行った。2018 年度は、海洋危機ウォッチ上で公開するため、海洋環境予測システムの予測更新を計 12 回 (表３－１　海洋環境現況予測システムの予測情報 更新日、予測対象期間、海洋危機ウォッチへの提供要素および備考実施し、2017 年度に収集した科学データと比較してモデル結果を検証した。モデルの不具合修正、低次生態系モデル部分のパラメータ調整を進めながら検証を行い、酸性化の現況予測システムとして利用しても問題ない程度の精度であることを示した。

表３－１　海洋環境現況予測システムの予測情報 更新日、予測対象期間、海洋危機ウォッチへの提供要素および備考

更新日	予測対象期間	提供要素	備考
2018 年 4 月 6 日	2018 年 4 月分	水温, 塩分, 現場 pH	
2018 年 5 月 2 日	2018 年 5 月分	水温, 塩分, 現場 pH	
2018 年 6 月 4 日	2018 年 6 月分	水温, 塩分, 現場 pH	
2018 年 7 月 2 日	2018 年 7 月分	水温, 塩分, 現場 pH	
2018 年 8 月 7 日	2018 年 8 月分	水温, 塩分, 現場 pH	
2018 年 9 月 4 日	2018 年 9 月分	水温, 塩分, 現場 pH	
2018 年 10 月 7 日	2018 年 10 月分	水温, 塩分, 現場 pH	
2018 年 11 月 14 日	2018 年 10,11 月分	水温, 塩分, 現場 pH	10 月分に不具合があったためその修正版も同時に更新
2018 年 12 月 10 日	2018 年 12 月分	水温, 塩分, 現場 pH	
2019 年 1 月 5 日	2019 年 1 月分	水温, 塩分, 現場 pH	
2019 年 2 月 6 日	2019 年 2 月分	水温, 塩分, 現場 pH, アラゴナイト飽和度	
2019 年 3 月 1 日	2019 年 3 月分	水温, 塩分, 現場 pH, アラゴナイト飽和度	

現況予測モデルの改良

モデル改良のため、主に 2015 年の MODIS 衛星クロロフィルデータ、気象庁観測データ（クロロフィル,栄養塩）および Yasunaka et al.(2014)で作成された栄養塩の気候値を用いてモデル結果を検証し、モデルの問題点を抽出した。どの部分を改良すべきかを把握するため、対象海域を５つの領域（図 3－1）に分けて検討を行った。

① 最適日射量（I_{opt}）の検討

図 3－1 の赤枠領域のうち、亜熱帯、黒潮続流域、亜寒帯、日本海におけるクロロフィルの 2015 年の観測データとモデルデータの比較を示す（図 3－2)。この比較から、亜熱帯域以外の領域では観測値とモデル値には相関関係が認められているが、亜熱帯域では相関関係がなく再現性が低いことが分かった。クロロフィルの南北緯度方向の断面図（図は省略）や鉛直プロファイル（図 3－3）から、モデルでは亜熱帯域での亜表層 100m 深に形成されるクロロフィル極大がうまく再現できていないことが明らかとなった。

亜熱帯域での亜表層に形成されるクロロフィル極大の再現性を向上させるために、最適日射量（I_{opt}）について再検討を行った。植物プランクトンと深度に関する光の影響係数 $I(P;z)$ 式のクロロフィル値の使用に問題があることがわかり、これまで使用していた式 1 のクロロフィル値を植物プランクトン値に変えて使用することで(式 2)、従来の研究（Guo and Yanagi, 1998; Onitsuka and Yanagi, 2005; Kishi et al. 2009; Sasai et al. 2016）において採用されている程度の I_{opt} 値（= 50−100 W/m^2）が利用できるようになった。また亜熱帯域のクロロフィル極大層も 100m以深に再現されるようになった。

改訂前

$$I(P;z) = I_s \exp\left(-\int_{z'=0}^{z'=z} \kappa(Chla(P))dz' \right)$$

$$\kappa(Chla(P)) = 0.04 + 0.054Chla(P)^{0.6667} + 0.088Chla(P) \qquad (1)$$

$$Chla(P) = P \times \frac{31}{14\times16} \times \frac{16}{21}$$

改定後

$$I(P;z) = I_s \exp\left(-\int_{z'=0}^{z'=z} (\kappa P)dz' \right)$$

$$\kappa P = \alpha_1 + 0.054P^{0.6667} + 0.088P \qquad (2)$$

(2) 式に示されるように、海水の光の消散係数（α_1）には緯度依存性を持たせている。現在のモデルの光の消散係数は、亜熱帯は 0.005 m^{-1}、亜寒帯は 0.0437 としている（緯度依存性のパラメータ例は 2017 年度の報告書に記載）。

Nelson and Sigel (2013) によりまとめられた有色溶存有機物（CDOM; Chromophoric Dissolved Organic Matter）の全球分布を見ると、熱帯域と亜寒帯域では値が大きく異なる。例えば北半球の亜熱帯では 0.01 m^{-1} 以下の値、亜寒帯は 0.1 m^{-1} より大きい値が示されている。したがって、我々が今回取り入れた、光の消散係数 α_1 への緯度依存性導入は現場の CDOM 分布から考えても妥当であると考えられる。このような光の消散係数の緯度変化は、北太平洋域を対象にしたこれまでのモデル研究（Guo and Yanagi, 1998, Onitsuka and Yanagi, 2005; Kishi et al. 2007; Sasai et al. 2016）では使われていない。その理由としては、先行研究の対象海域が狭い海盆スケールや同じ水塊特性をもつ海域であったため、α_1 の緯度依存性を考慮する必要がなかったことが考えられる。本モデルのように、亜熱帯も亜寒帯も含んだ広範な海域の亜表層クロロフィル極大を現実的に再現したい場合には、α_1 に緯度依存性を持たせることは必要な条件であると考えられた。

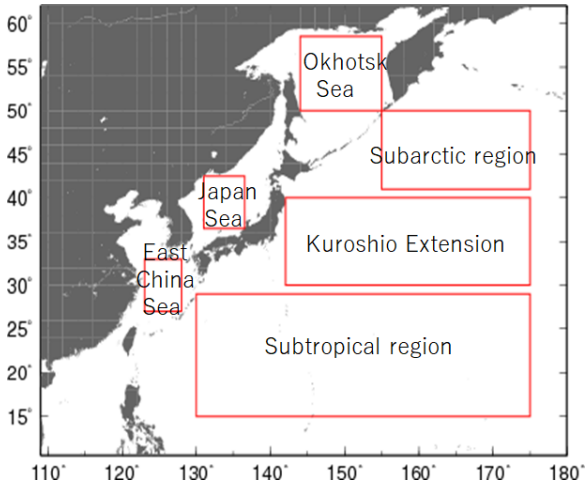


図 3－1　モデルの精度評価のため分けた領域（上からオホーツク海域、亜寒帯域、日本海域、黒潮続流域、東シナ海域、亜熱帯域を示す）。

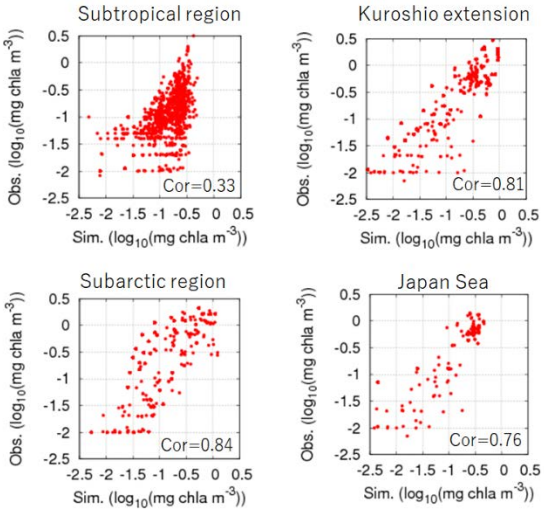


図 3－2　各領域におけるクロロフィルのモデル値と観測値の比較の例　（左上が亜熱帯域、左下が亜寒帯域、右上が黒潮続流域、右下が日本海域の関係を示す。）

改良後の現況予測モデルでは、クロロフィル極大の深度は南に向かって深くなる様子が再現されている（図 3－4）。しかしその一方で、観測ではみられない亜熱帯域のクロロフィルの鉛直的な広がりが生じている（図 3－4）など、依然として改善の余地が残された。再調整後、最適日射量（I_{opt}）と光消散係数（α_1）に図 3－5 のような緯度変化を持たせた。図 3－6 は、生態系パラメータを再調整した後の現況システムで再現されたクロロフィル鉛直断面図である。ややクロロフィル濃度は観測値と比べ高いが、亜熱帯域のクロロフィルの鉛直的な広がりは抑えられている。

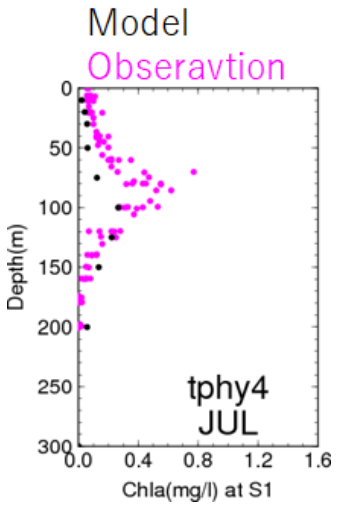


図 3－3　モデル改良前の亜熱帯域におけるクロロフィルの鉛直プロファイル例（黒：モデル、ピンク：観測値）

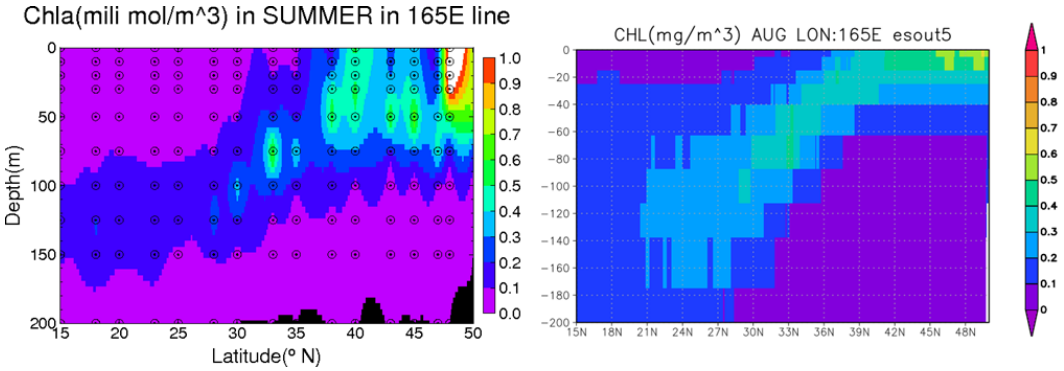


図 3－4　東経 165 度線における夏季のクロロフィル鉛直断面図の例（左：観測値、右：モデル値）

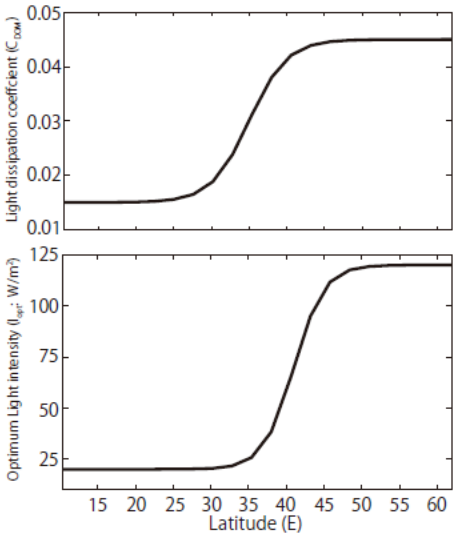


図 3－5　モデルで設定された最適日射量と光消散係数の緯度変化

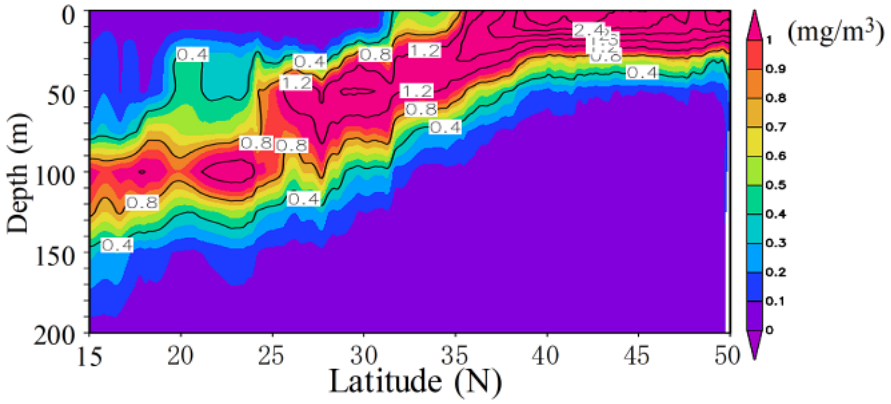


図 3－6　東経 165 度線における夏季のクロロフィル鉛直断面図（再調整後）

② デトリタスの沈降速度の検討

これまでの予測モデルの結果では、夏季のオホーツク海において著しく高い植物プランクトンの発生に伴い、著しく低いpHが生じてしまう問題点があった（図3－7）。モデルの改良を重ねる中で、表層でのデトリタスの沈降速度を考慮するトレーサーモデルの箇所に不具合があることがわかり、これを修正したところ、夏季オホーツク海において、植物プランクトン、pHともに正常値が得られるようになった。またこの改良に伴いその他の低次生態系パラメータの値にも改善が認められた（図は省略）。

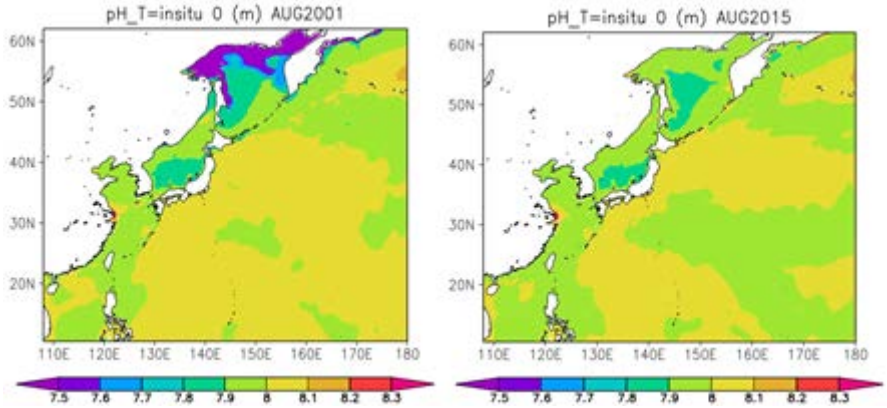


図3－7　現場水温における表層pHの水平分布（左：モデル改良前、右：改良後）

③　季節変動の再現性

Yasunaka et al (2013) は、月別の栄養塩と全炭酸（DIC）の気候値を作成するとともに、栄養塩とそれに関連して変動するDICの時系列変動（図3－8 c, e）を作成した。彼らはクラスター分析により領域を分け（図3－8 a)、領域平均値（図3－8 c, e）を時系列で示している。高緯度域ほど栄養塩の季節変動は大きく、例えば北緯50度の領域では、春先4月から秋口9月に向けて栄養塩は24 mmol/m^{3}から11 mmol/m^{3}程度に減少し、冬季混合により再び増加する様子が示されている（図3－8 c)。DICも同様に高緯度域に向かって変動が大きくなっており、冬と秋口の差は最も大きい箇所で125 mmol/m^{3}程度もある（図3－8 e)。亜熱帯域は栄養塩量がそもそも少なく、栄養塩の変動は、1 mmol/m^{3}以下であり、DICの減少幅も25 mmol/m^{3}程度となっている。

図3－9は、図3－8 aに相当する緯度帯における現況予測モデルの栄養塩とDICの月ごとの季節変動(次項で延べるDICの初期値の改訂前に得られた実験結果)を示す。現況モデルの再現では、明らかに季節変動幅が気候値よりも小さい。そのため、より現実的な季節変動を再現できるように低次生態系モデルのパラメータ調整を行った。（再調整後の結果は、⑤に記述）

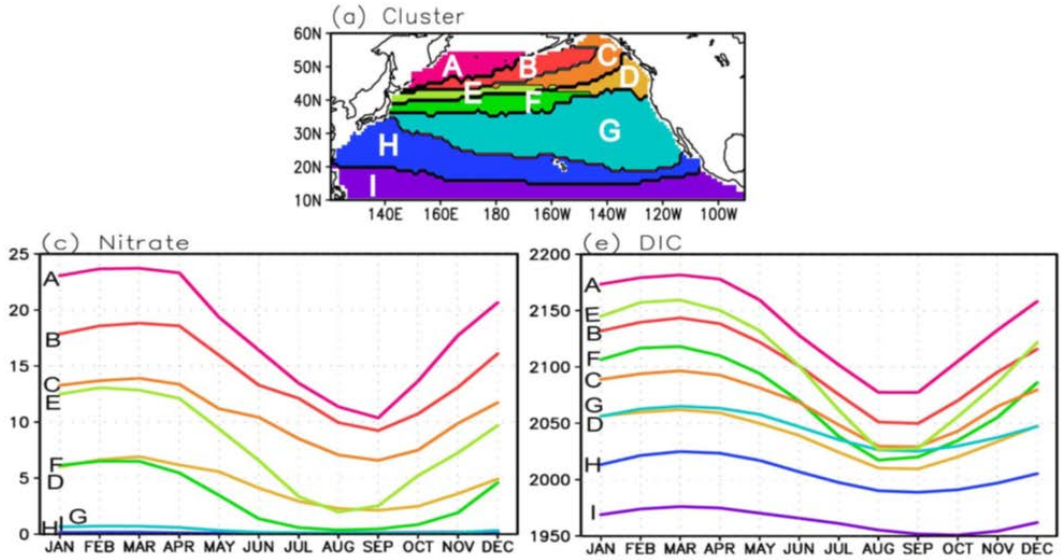


図 3－8　栄養塩（DIN （mmol/m³）； c）と全炭酸（DIC （mmol/m³）； e）の季節変動（Yasunaka et al. 2014 より引用）(a)クラスター分析により設定された領域を示す。領域の色は(c)(e)の時系列の色に対応する。

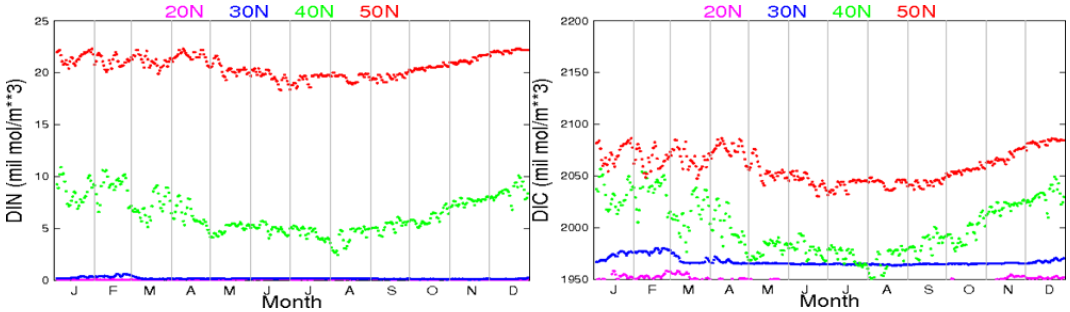


図 3－9　東経 165 度線における現況モデルにおける DIN と DIC の季節変動の例。（次節で記述する DIC 初期値データの改善前の実験結果）各線の色は緯度に対応し、北緯 20 度はピンク、30 度は青、40 度は黄緑、50 度は赤で示す。

④　DIC 初期値データの改善

植物プランクトンや栄養塩の季節変動を調べた際に、DIC の北緯 50 度以北の表層初期値は Yasunaka et al. (2013)で示される気候値に比べ 100 mmol/m³ほど低い値（図 3－9）であることが分かった。Yasunaka et al. (2013) は、我々が参考にした Goyet et al. (2000)と Key et al. (2004)に比べ、表層のみのデータではあるが、データ数が 7900 の観測地点データと極めて多く、月別の気候値を作成している (2002 年から 2008 年までの月ごとの気候値)。Goyet et al.(2000)と Key et al.(2004)が作成した年気候値は、年平均で計算されており月別の結果は無い。また、データ公開の時代背景から考えて、Goyet et al.(2000)と Key et al. (2004)の作成した気候値は夏季データの比重が大きかったことが推察される。Yasunaka et al. (2013) が作成した気候値データは、ウェブで公開されており (http://soop.jp/index.html)、入

手可能であった。そこで、2017 年度に作成した DIC の初期値表層データを、Yasunaka et al.(2013)で作成された 2002 年から 2008 年の月ごとの気候値の平均値に入れ替え、月ごとの DIC 初期値データを新たに作成し直した。図 3－10 は、改良前と後の 1 月の DIC モデル初期値を示す。明らかに亜寒帯域、日本海、オホーツク海で DIC 値が改良前と比べ、50 mmol/m^3 程度の大きい値を示すようになった。海洋危機ウォッチに示す pH 予報値は、再解析データ 1 か月と予報月 2 か月の計 3 か月分の予測モデルの計算から算出している。これまで、DIC は年気候値しか手に入らなかったため、どの月から計算を開始しても同じ初期値を使用する以外に計算手段がなかったが、今後の予測計算において、計算開始月の DIC 気候値を初期値として使うことも可能であり、予測精度の向上につながることになった（⑤以降で記述）。

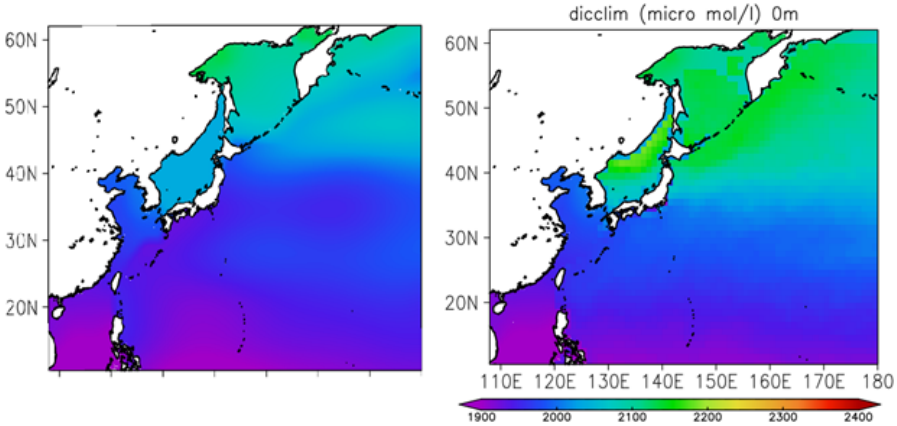


図 3－10　Yasunaka et al. (2014)の表層 DIC 気候値を考慮する前と後のモデル 1 月の初期値　（左：改訂前、右：改訂後）

⑤　気候値緩和項設定、初期値と生態系パラメータ再調整後の結果

気候値データの改良を進める際に、DIN、DIP、DIC、アルカリ度の移流拡散方程式に入れている気候値緩和の設定に問題があり、図 3－9 のような DIN、DIP、DIC、アルカリ度の季節変動が現実に比べ、小さくなってしまう結果を招いていたことがわかった。

DIN、DIP、DIC、アルカリ度の移流拡散方程式には、以下のような気候値緩和の項が入っている。

$$\frac{d(DIN)}{dt} = -Phtosynthesis(DIN, DIP, P) + Respiration(P) + Excertion(Z) + Decomposition(D) - Clim_Damp(DIN)$$

$$\frac{d(DIP)}{dt} = \frac{1}{R_{P:N}} \frac{d(DIN)}{dt} - Clim_Damp(DIP)$$

$$\frac{d(DIC)}{dt} = \frac{d(DIP)}{dt} \cdot R_{C:P} - \frac{d(CaCO_3)}{dt} - Clim_Damp(DIC)$$

$$\frac{d(ALK)}{dt} = -\frac{d(DIN)}{dt} \cdot R_{ALK:N} - 2 \cdot \frac{d(CaCO_3)}{dt} - Clim_Damp(ALK).$$

ここでの *Clim_damp*(*DIN, DIP, DIC, ALK*)は、

$$Clim_Damp(DIN) = \gamma(DIN - DIN_{c\lim}),$$

$$Clim_Damp(DIP) = \gamma(DIP - DIP_{c\lim}),$$

$$Clim_Damp(DIC) = \gamma(DIC - DIC_{c\lim}),$$

$$Clim_Damp(ALK) = \gamma(ALK - ALK_{c\lim}),$$

となり、DIN_{clim}, DIP_{clim}, DIC_{clim}, ALK_{clim}は、それぞれ対象となる気候値（例えば、図3－10右図）を示す。

これまでは、年平均気候値のみを緩和の対象とし、γ=1日という短い時間スケールで緩和していたため、季節変動が弱く出てしまっていた。このため、前述したとおりDICについては月平均気候値を月毎の計算の初期値、および緩和の対象とするとともに、緩和の時間スケールをγ = 30日に変更し、気候値緩和を緩めることとした。ただし、アルカリ度については、月別の気候の予測値は作成していないため、1月の気候値を通年に対し使用している。

⑥　クロロフィル、DIN、DIC、アルカリ度の評価

図3－11、図3－12、図3－14に、クロロフィル、DIN, DIC の衛星観測値または気候値と同じ時期を対象にしたモデル出力による表層水平分布図を示す。クロロフィル値に関しては、モデル値の再現性は比較的良くないが、値自体は現実的な範囲内となっている（図3－11)。DINとDICに関しては気候値とよく一致する値が再現されている様子がわかる（図3－12、図3－13、図3－14)。東経165度線における各緯度におけるそれぞれの値をみても、DIN、DIC（図3－13）について、緯度毎に季節変動の大きさが異なる様子や、月毎の値を補間できるような滑らかな時系列が再現されている様子が分かる。クロロフィル値に関しては（図3－13)、北緯40度、50度域での値が大きく、北緯 40 度では観測で示されているダブルピークが再現されているが、時期がずれている。北緯 50 度に関しては、ダブルピークが再現されておらず、夏季が最も大きいシングルピークになっていることがわかる。

アルカリ度に関しては、モデル値を比較できる月別の観測値から得られた気候値はないため（Goyet et al. 2000, Key et al. 2004, Takatani et al. 2014)、水平的な観測値（気候値）の分布と比較はできないが、どのような値や季節変動を伴っているか把握するためモデル値のみ図示した（図3－15)。北緯40度以北において、夏季にアルカリ度が減っていることが分かった。この夏季のアルカリ度の減少は、炭酸カルシウムの生成項(*$CaCO_3$*)が影響していることが明らかとなっている（図は省略)。

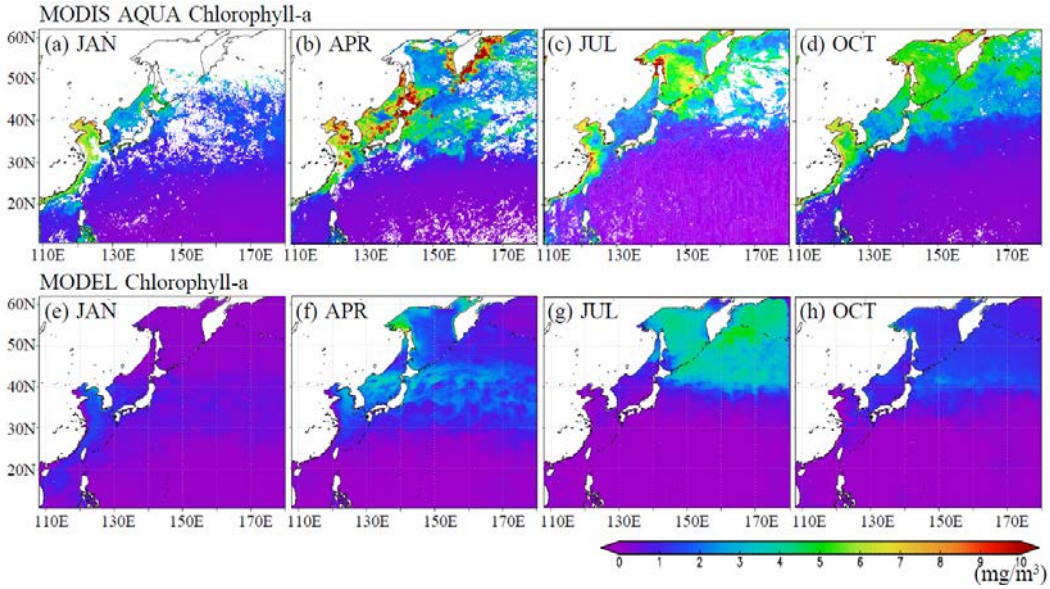


図 3－11　衛星データにより取得されたクロロフィル（上図）とモデル出力のクロロフィルの表層水平分布（下図）。 1 月、4 月、7 月、10 月の月平均値を示す。

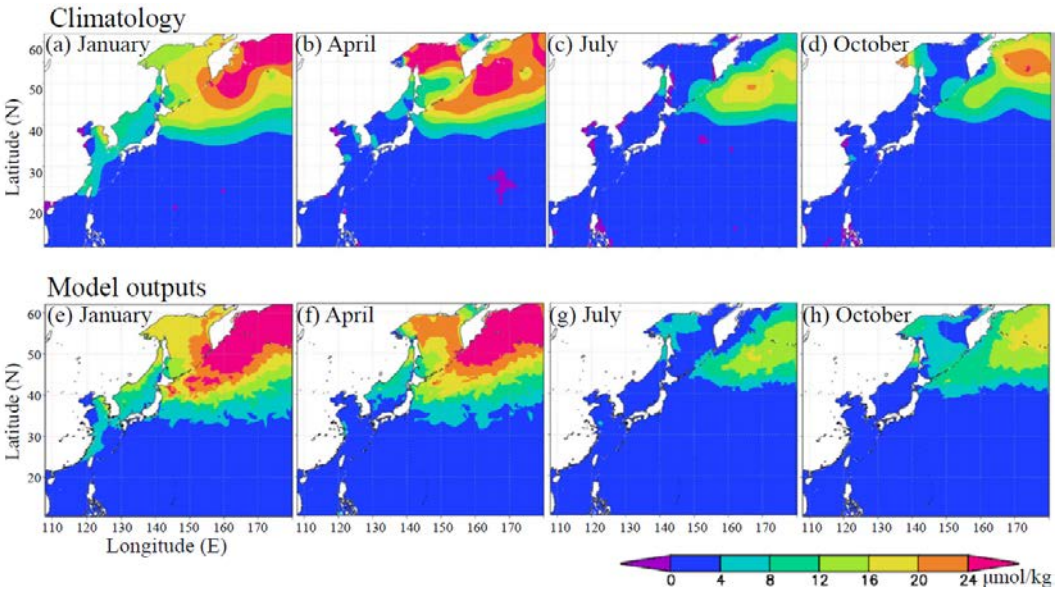


図 3－12　 DIN の気候値（上）とモデル出力の表層水平分布図（下図）。1 月、4 月、7 月、10 月の月平均値を示す。

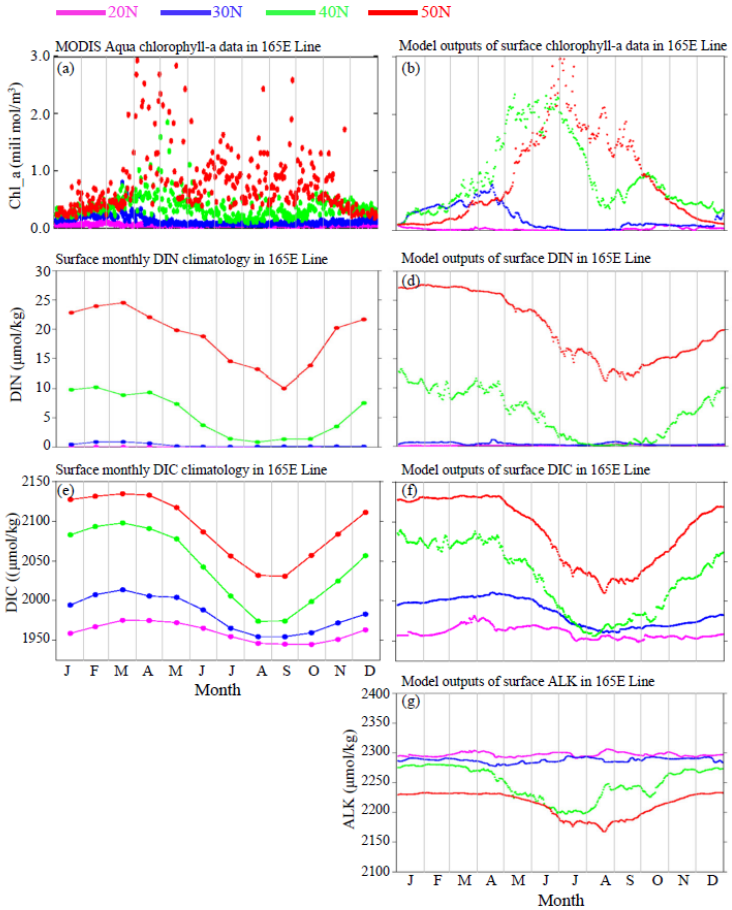


図 3－13　東経 165 度線におけるクロロフィル、DIN、DIC、DIN の各緯度帯の時系列を示す。図 3-11a は衛星クロロフィルデータ、図 3-11c，d は、気候値。図 3-11b，d，e，f は、モデル値。各線の色は緯度エラー！参照元が見つかりません。に対応し、北緯 20 度はピンク、30 度は青、40 度は黄緑、50 度は赤で示す。

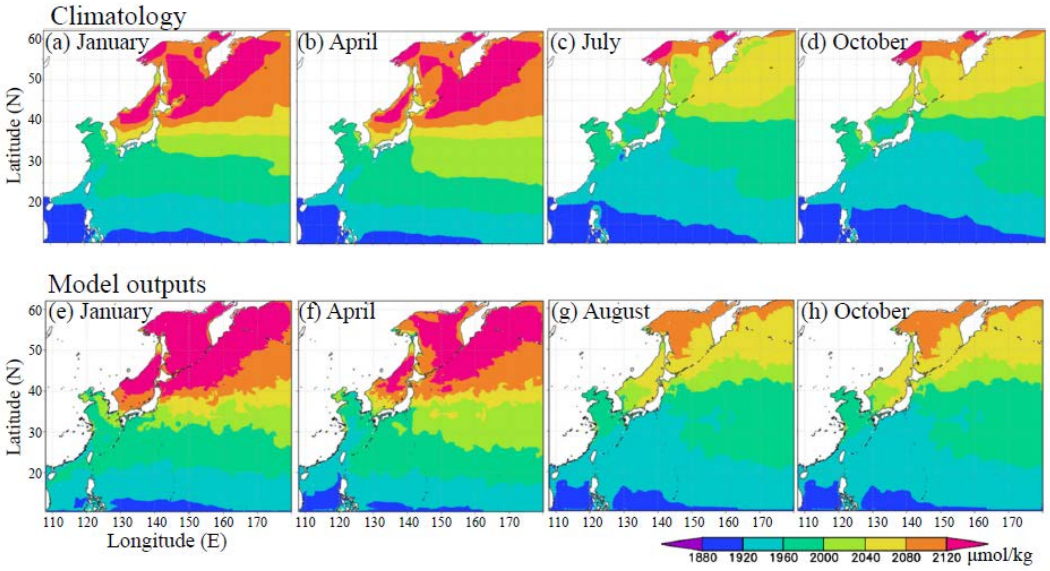


図 3－14　DIC の気候値（上）とモデル出力の表層水平分布図（下図）。1 月、4 月、7 月、10 月の月平均値を示す。

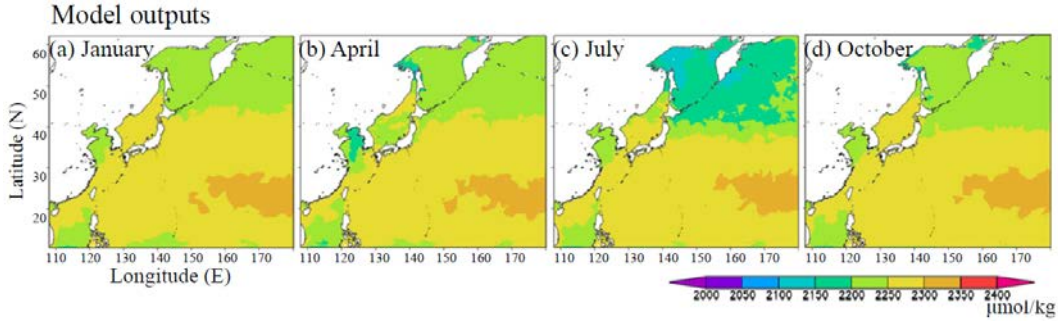


図 3－15　モデル出力によるアルカリ度の表層水平分布図（下図）。1 月、4 月、7 月、10 月の月平均値を示す。

⑦ pH（現場 pH, pH25）とアラゴナイト飽和度の評価

PH とアラゴナイト飽和度は、モデル出力値の水温、塩分、DIC とアルカリ度から計算される。図 3－16 は、それらの値を使って計算した現場 pH、pH_{25} とアラゴナイト飽和度の表層水平分布を示す。現場 pH（図 3－16　a－d）は、亜熱帯域では冬から春にかけて 8.1－8.15 程度であり、夏が最も低く 8.0－8.05 に下がり、秋になると上昇する傾向を示す。亜寒帯では、冬季が最も低く 7.9－7.95 の値が広がり、夏に向かって上昇し、8.0－8.1 の値が分布している。東シナ海では、長江河口域が最も高く、8.25－8.30 の値を示すところもある。

PH_{25} の分布（図 3－16 e－h）は、現場 pH とは異なり安定的に亜熱帯域が高く（8.0－8.2 の値）、亜寒帯域に向かって低くなる。オホーツク海域の冬季に最も低い値となり、7.5－7.7 を示した。

アラゴナイト飽和度（図 3－16　i－l）は、pH_{25} の分布と同様、通年にわたり、亜熱

帯域が最も高く、亜寒帯域が低い。亜熱帯域の値は 3.5－4.5 程度の値で夏が最も高くなり、亜熱帯域は 1.0－2.0 の値で亜熱帯域と同様、夏に最も高い値を示す。

図 3－17 に東経 165 度線における各緯度帯における現場 pH、pH_{25}、アラゴナイト飽和度の時系列図を示す。現場 pH は、緯度帯によって変動が異なり、一様な変動は見られない一方、pH_{25} やアラゴナイト飽和度では冬季が最も低く夏季に向かって値が増加するといった季節変動や亜寒帯域での季節変動が最も大きい様子等の共通点が見られた。

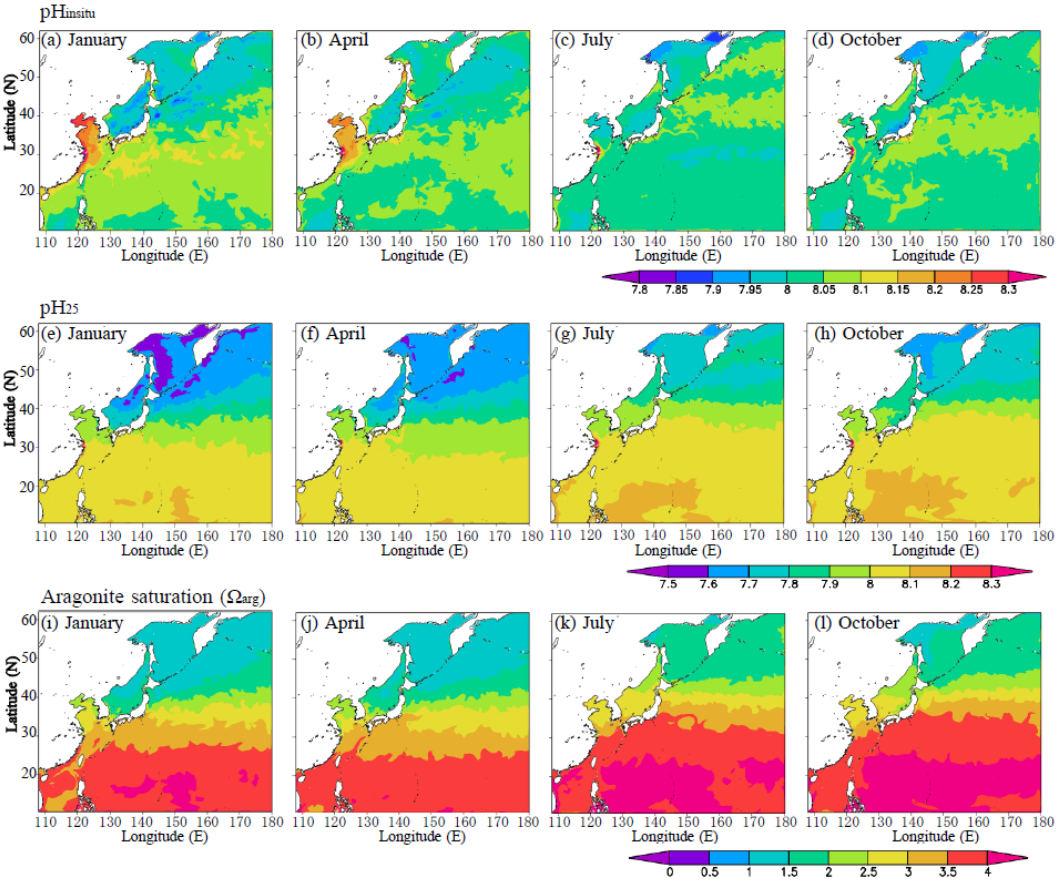


図 3－16　モデル出力の水温、塩分、DIC およびアルカリ度の値から計算された現場 pH（a－d），pH_{25}（e－h），アラゴナイト飽和度（i－l）の表層水平分布図。図は、1 月、4 月、7 月、10 月の月平均値を示す。

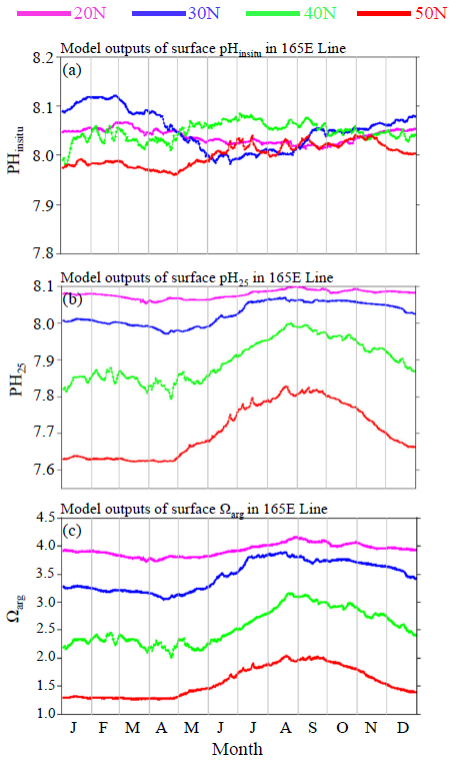


図 3－17　東経 165 度線における各緯度帯における現場 pH（a），pH_{25}（b），アラゴナイト飽和度(c)の時系列。各線の色は緯度に対応し、北緯 20 度はピンク、30 度は青、40 度は黄緑、50 度は赤で示す。

⑧ 各出力変数における観測値とモデル値の相関係数

各出力変数において、気象庁の観測データと相関をとったものを表１に示す。相関は、亜熱帯域、亜寒帯域、黒潮続流域、日本海とそれぞれ分けて算出していた（図３－1、表３－ 2）。これらをみると、クロロフィルとアルカリ度を除くほとんどの変数において、概ね 0.8 以上を超える高い相関を伴った値をモデルで算出していることが分かる。とくに、pH_{25} に関しては亜熱帯域以外では 0.8 以上、アラゴナイト飽和度（Ω_{arg}）に関しては全ての領域で 0.98 の値を示していることから、酸性化予測を目的としているモデルとしてはかなり信頼できる値を出していることが分かる。図 3－18、図 3－19 は、pH_{25} とアラゴナイト飽和度の相関分布図を示すが、200m 以浅において、線形性を保った相関であることを示している。

表３－２　各変数における気象庁の観測値とモデル値の相関係数。カッコ内の数字は有意水準 0.05 の相関係数検定値。

Parameter	Subtropical region	Subarctic region	Kuroshio extension	Japan Sea
Chlorophyll-a	0.57 (0.07)	0.88 (0.07)	0.86 (0.12)	0.87 (0.15)
DIN	0.72 (0.004)	0.88 (0.12)	0.87 (0.1)	0.95 (0.11)
DIC	0.74 (0.09)	0.87 (0.20)	0.78 (0.17)	0.92 (0.26)
Alkalinity	0.48 (0.09)	0.69 (0.20)	0.48 (0.17)	0.35 (0.26)
pH_{25}	0.78 (0.09)	0.86 (0.20)	0.81 (0.17)	0.90 (0.26)
Ω_{arg}	0.99 (0.09)	0.98 (0.20)	0.98 (0.17)	0.99 (0.26)

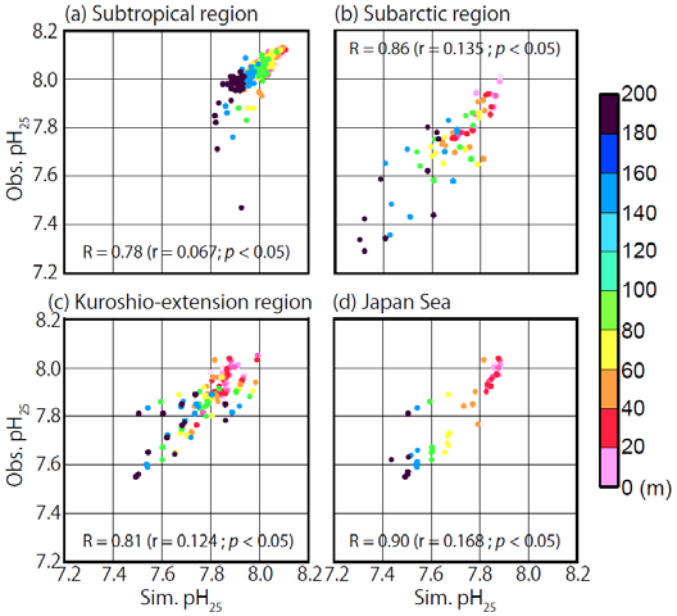


図 3－18　200m 以浅における pH25 の気象庁観測値とモデル値の相関分布図。各点の色がデータの取得深度。

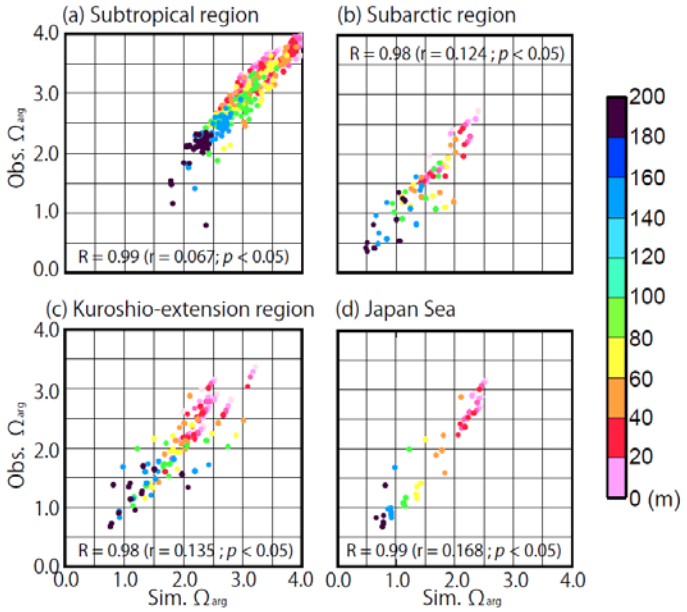


図 3－19　200m 以浅におけるアラゴナイト飽和度の気象庁観測値とモデル値の相関分布図。各点の色がデータの取得深度。

⑨ 感度実験　―現場 pH とアラゴナイト飽和度の値に影響する変数（水温、塩分、DIC、アルカリ度）の重要性についての検討―

現場 pH やアラゴナイト飽和度の東経 165 度線における時系列（図 3－17）が示す季節変動からわかるように、現場 pH（図 3－17 a）は緯度帯ごとに季節変化の一様性が見られなかった。またアラゴナイト飽和度や pH_{25} に関しては、現場 pH に比べ変化は変動の大きさは異なるが、傾向においては緯度方向に冬季が最も小さく夏季に大きいという変動の一様性が見られた。これらの変動の違いは、現場 pH や pH_{25}、アラゴナイト飽和度の値を決定する変数、水温、塩分、DIC、アルカリ度の重要度が季節や場所ごとに異なることが影響しているはずである。しかしながら、これら酸性化に係る変数の値に影響する変数（水温、塩分、DIC、アルカリ度）が、場所や季節においてどのように重要であるかについて明らかではない。そこで、関連ある４つの変数のうち、それぞれ１つの変数を固定することにより pH やアラゴナイト飽和度を計算し、変数の重要性を調べるという感度実験を行った。

図 3－20 は、モデルの出力値（現場 pH）から、それぞれ水温（図 3－20 a－d）、塩分（図 3－20 e－h）、DIC（図 3－20 i－l）、アルカリ度（図 3－20 m－p）のみを一定値とし、その他の変数（塩分、DIC, アルカリ度）は図 3－16 で使用したモデル出力に使用した変数にして計算した pH（感度実験の値）と元の pH（図 3－16）との差の水平分布を示す。これらの図から、通年で現場 pH の値に特に影響している変数は、水温と DIC であることが分かる。またアルカリ度については、春と夏では現場 pH に対して影響力は弱いが、夏季の亜寒帯域、特にオホーツク海とカムチャッカ半島周辺海域で影響力が増すことがわかる。塩分に関しては、通年にわたり他の変数に比べ、影響力が弱く、季節によっても影響力は変わっていない。

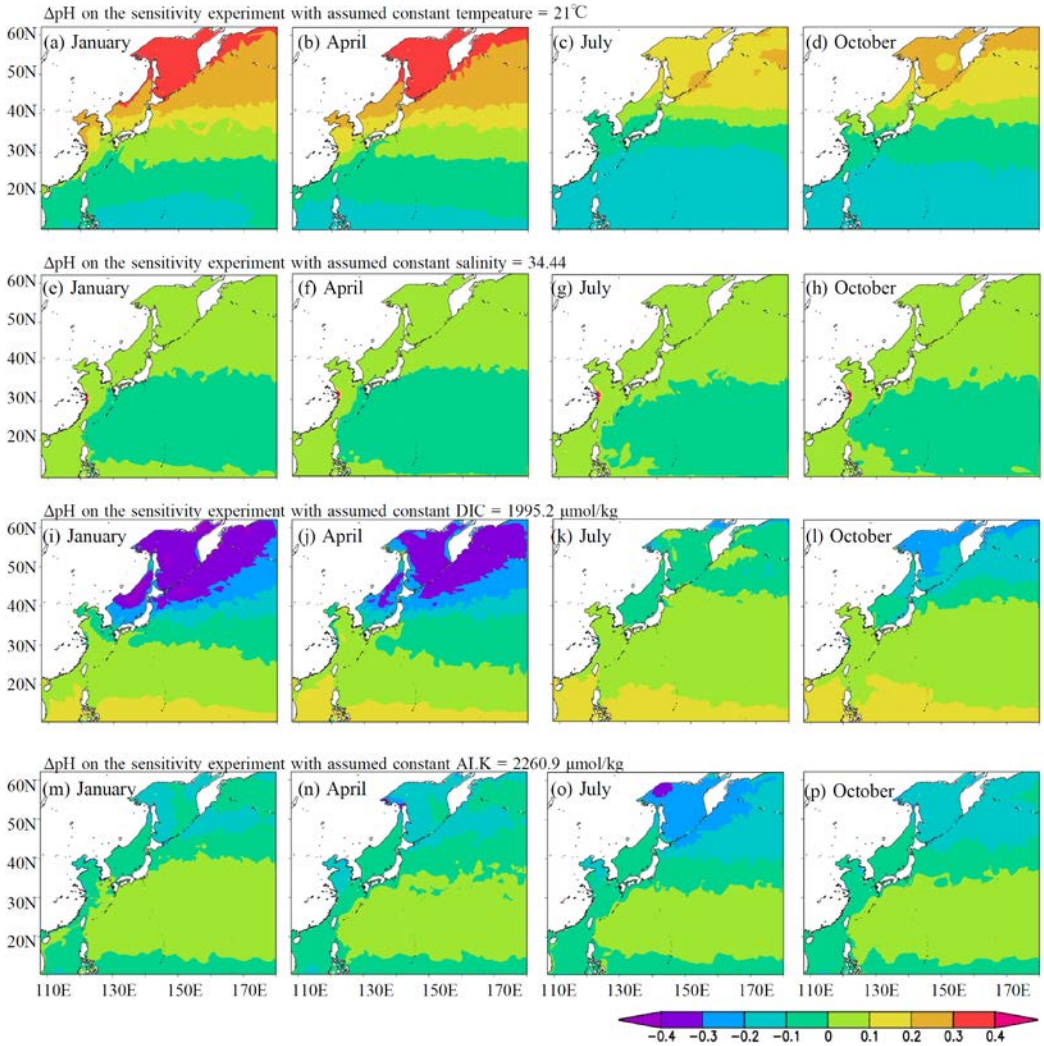


図 3－20　現場 pH に関するモデル値から感度実験で計算された pH の値を引いた差の表層水平分布。それぞれ感度実験は、水温（= 21 deg. C）（a－d）、塩分（= 34.44）（c－h）、DIC（= 1995.2　μmol/kg）（i－l）、アルカリ度（= 2260.9 μmol/kg）（m-p）を一定にした場合で行った。図は感度実験の pH からの差の 1 月、4 月、7 月、10 月の月平均値を示す。

図 3－ 21 は、アラゴナイト飽和度に影響する変数の重要度を調べたものである。図 3－ 21 から、アラゴナイト飽和度には水温がやや影響しているが、DIC とアルカリ度の影響が通年にわたり大きいことが分かる。塩分に関しては、長江河口域以外、差は通年にわたり小さいためほとんど影響していない。

これらの結果から、なぜ現場 pH の季節変動パターンが緯度毎に異なり、pH_{25} やアラゴナイト飽和度の季節変動パターンが緯度間で一様となっているかについての要因を考察することができる。現場 pH の季節変動が緯度ごとに異なるのは、冬から春にかけては基本的に水温と DIC の影響を大きく受けるが、夏には、亜寒帯域のみアルカリ度の影響を強く受けるようになるためである。一方、pH_{25} の季節変動が緯度間で一様なのは、水温を 25 度の場合に変換しているため、pH の値に対して水温の影響がな

くなり、夏季に亜寒帯域でアルカリ度の影響があるだけで、そのほかの領域はDICのみの影響を受けるためである。アラゴナイト飽和度に関しても、最も影響する変数がDICとアルカリ度であるが、通年にわたり緯度毎で変わらずDICの寄与がアルカリ度の寄与を上回っているため、季節変動パターンが緯度ごとに変化しないで一様な変動になっていると解釈できる。

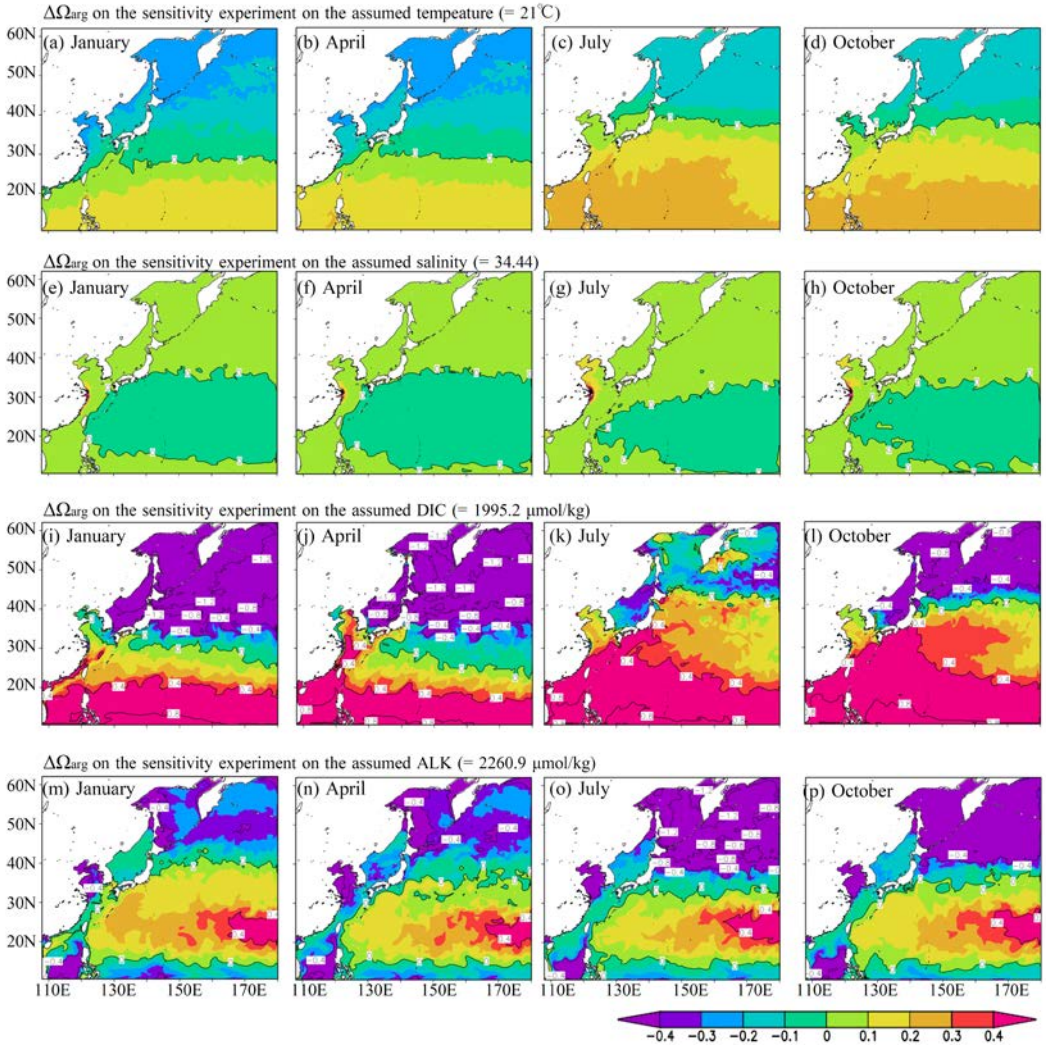


図3－ 21　アラゴナイト飽和度（Ω_{arg}）に関するモデル値から感度実験で計算されたアラゴナイト飽和度の値を引いた差の表層水平分布。それぞれ感度実験は、水温（= 21 deg. C）（a－d）、塩分（= 34.44）（c－h）、DIC（= 1995.2　μmol/kg）（i－l）、アルカリ度（= 2260.9 μmol/kg）（m－p）を一定にした場合で行った。図は感度実験のアラゴナイト飽和度からの差の1月、4月、7月、10月の月平均値を示す。

⑩　過去にさかのぼった再解析実験の実施

より長期にわたる酸性化の影響を把握するため、予備実験として2014年から2016年にかけての計算を実施した。図3－ 22、図3－ 23は、東経137度および165度におけるpH_{25}とアラゴナイト飽和度の2016年2月1日の値から2014年の同日の差、およびpH_{25}とアラゴナイト飽和度、それぞれの値の断面図を示している。これらをみる

と、東経 137 度および 165 度ともに、pH25 やアラゴナイト飽和度の値はほぼ同じ分布（図 3－ 22 b－c、図 3－ 23 e－f）示している。ただし実際には東経 137 度を詳しく見ると、北緯 30 度付近では 500m以深、北緯 20 度では 200m 以深で pH_{25}、アラゴナイト飽和度ともに 2014 年に比べ、2016 年の冬季は値が小さくなっていることが分かる（図 3－ 22 a, d、図 3－ 23 a, d)。東経 165 度でも pH_{25} に比べ、差の正負の振れ幅が大きいが、北緯 40 度から 30 度に向かって差の大きい箇所が目立ち、北緯 25 度では 500m 深よりも深い層に負の値がみられる（図 3－ 23 a, d)。これは、表層での酸性化の影響を受けた水塊が冬季のサブダクションと(亜熱帯）循環によって、表層での二酸化炭素の取り込みの影響が深い層に運ばれている様子を示している可能性がある。今後、より長期の過去にさかのぼった計算の実施を含め、どのような経路によってこのような差が生じているかについて検討を進め、明らかにする必要がある。

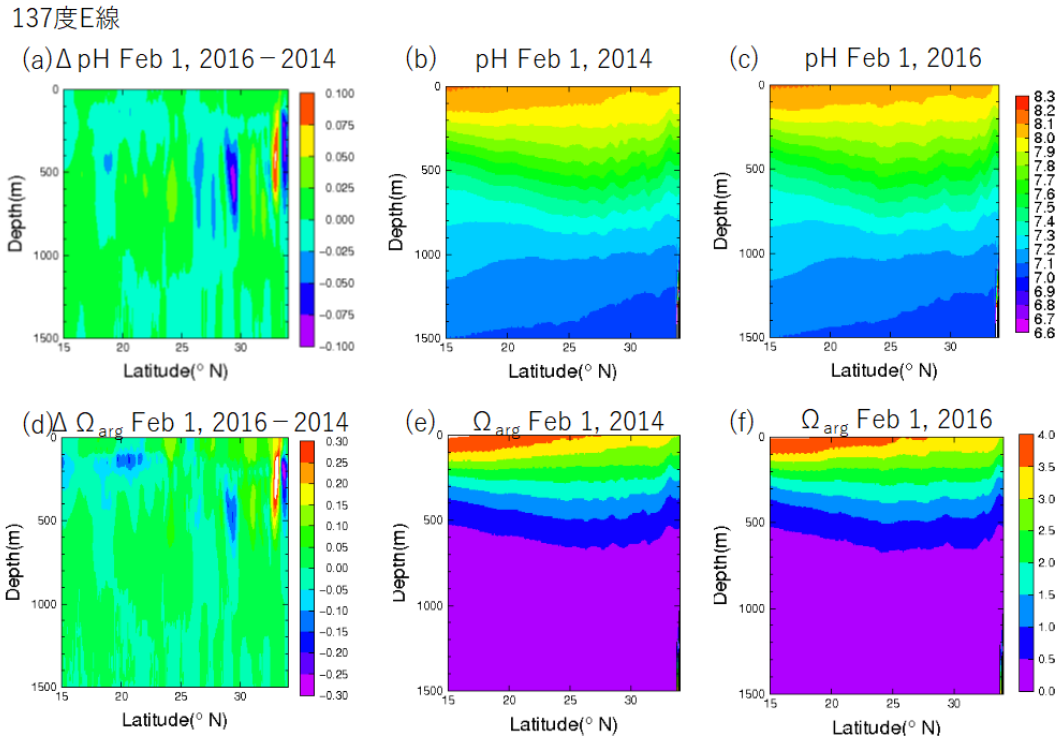


図 3－ 22 東経 137 度線における pH_{25} とアラゴナイト飽和度の 2014 年から 2016 年 2 月 1 日の差の断面図 (a, d)とそれぞれの値 (b－c, e－f)。(a, d）は 2016 年の値から 2014 年の値を引いた差を示す。

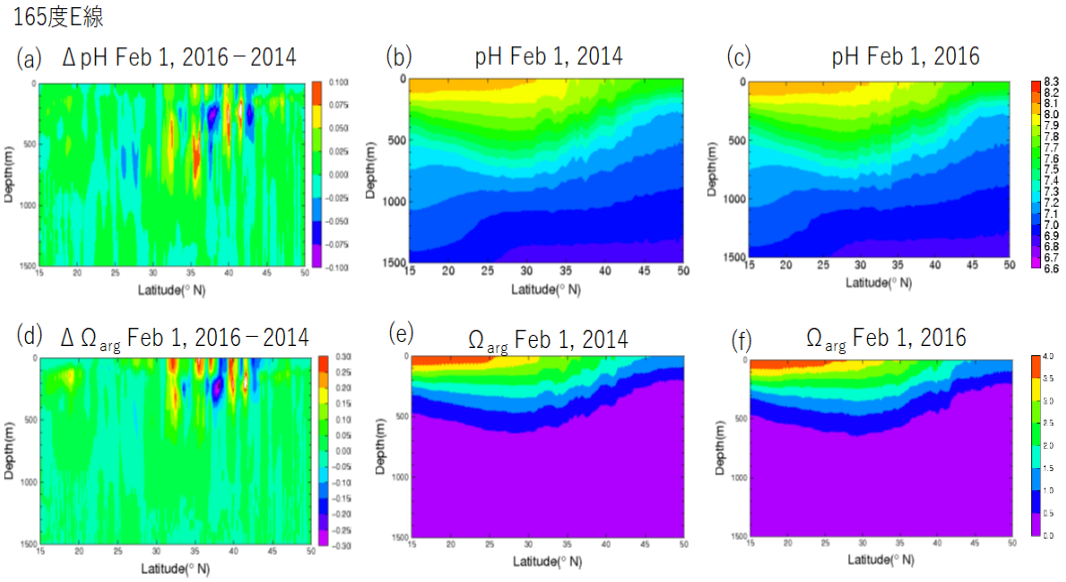


図 3－ 23 東経 165 度線における pH_{25} とアラゴナイト飽和度の 2014 年から 2016 年 2 月 1 日の差の断面図 (a, d)とそれぞれの値 (a－b, e－f)。(a, d)は 2016 年の値から 2014 年の値を引いた差を示す。

4. 科学データの収集・整理・解析・加工

4.1 第 5 期結合モデル相互比較計画（CMIP5）

現況予測モデルの結果に加え、100 年程度先までの海洋酸性化傾向を海洋危機ウォッチでコンテンツとして活用するために、第 5 期結合モデル相互比較計画（CMIP5)において、JAMSTEC が開発した長期気候モデル「MIROC_ESM」(Watanabe et al. 2011）が出力したデータを入手し加工した。DIC、アルカリ度、水温、塩分データから pH およびアラゴナイト飽和度（Ω_{arag}）を計算し、現在と 100 年後のグローバル分布の違いを調べ、コンテンツ記事（後述）に取り入れた。CMIP（結合モデル総合比較プロジェクト）の経緯、CMIP5 の概要、長期気候モデル MIROC_ESM の概要、MIROC_ESM の結果について記述した。CMIP5 のシナリオから計算された結果から、現在と 100 年後の海面 pH とアラゴナイト飽和度の分布（図 4－1）を比較した上で CO_2 排出抑制の重要性について言及している。MIROC_ESM における pH とアラゴナイト飽和度の再現性について把握するため、JCOPE_EC と同じ領域における MIROC_ESM の出力値を JCOPE_EC との比較で使用した観測値を利用して比較し、MIROC_ESM で出力される酸性化予測の値の精度検証を行った。

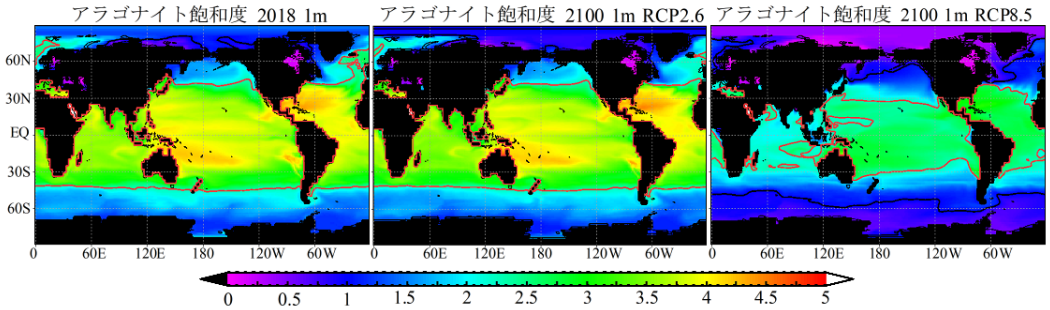


図 4－1　MIROC_ESM で再現された 2018 年現在と 2100 年の全球アラゴナイト飽和度（Ω_{arag}）の表層水平分布 黒および赤線は順にアラゴナイト飽和度が 1 と 2.3 の等値線を示す。（左：2018 年現在，中央：RCP2.6，右：RCP8.5）

① JCOPE_EC と同じ対象領域における MIROC_ESM の pH 予測値

図 4－2 は、JCOPE_EC と同じ対象領域における MIROC_ESM の現場 pH およびアラゴナイト飽和度の値を示す。図 3－16 の JCOPE_EC で出力された現場 pH を比較すると、JCOPE_EC に比べ、MIROC_ESM は亜寒帯域やオホーツク海ではやや高めの値が算出されていることが分かる。アラゴナイト飽和度に関してみても、オホーツク海やカムチャッカ半島沿いの領域では、0.5 程度の高い値が算出されていることが分かる。

現場 pH やアラゴナイト飽和度の値に関係する水温、塩分、DIC やアルカリ度をみると、JCOPE_EC で使われた値や気候値（図 3－14、図 3－15）に比べ、MIROC_ESM ではかなり異なる値であることが分かった。例えば、DIC は、気候値（図 3－14）は、亜熱帯では 1880-2000 μmol/kg、亜寒帯域では 2040-2120 μmol/kg で示しているが、MIROC_ESM では亜熱帯域、亜寒帯域の両方で、2080 μmol/kg 以上の値になっている（図 4－3）。アルカリ度に関しても、JCOPE_EC では基本的に本領域の値は 2200-2300 μmol/kg である（図 3－15）が、MIROC_ESM では、亜寒帯域では 2250-2300 μmol/kg、亜熱帯域では 2400 μmol/kg 以上とかなり高い値となっている（図 4－3）。水温に関しては、MIROC_ESM よりも JCOPE_EC の方が、オホーツク海域、亜寒帯域では 1－2 ℃低め、亜熱帯域では 1－2℃高めの値、塩分は、亜寒帯域では両者相応な値が使用されており、亜熱帯域では JOPE_EC の方が 1 程度低い値が広く分布している。

JCOPE_EC と MIROC_ESM で出力（使用）された水温、塩分、DIC、アルカリ度のこれらの違いは、現場 pH やアラゴナイト飽和度の値に大きく影響するため、これらが原因で図 3－16 と図 4－2 でみられたような両者モデルによる出力値の違いが生じてくるようである。MIROC_ESM が開発されたのは、2000 年代前半（Watanabe et al. 2009）であり、炭酸系パラメータに対して十分な情報公開ネットワークが構築されていなかったこともあり、使用された気候値も十分な精度がなかった時代背景が要因として考えられる。一方 JCOPE_EC は、現状最もよいと考えられる気候値を構築し計算しているため、より確からしい現場 pH やアラゴナイト飽和度を予測できていることがこの比較から明らかとなった。ただし、オホーツク海や日本海、東シナ海に関しては、十分な観測データから気候値が作成されているとは言い難いため、特にこの 3 つの領域についてより精度よく検証するためには、2015 年以外の過去の観測データを集め、検

討する必要がある。

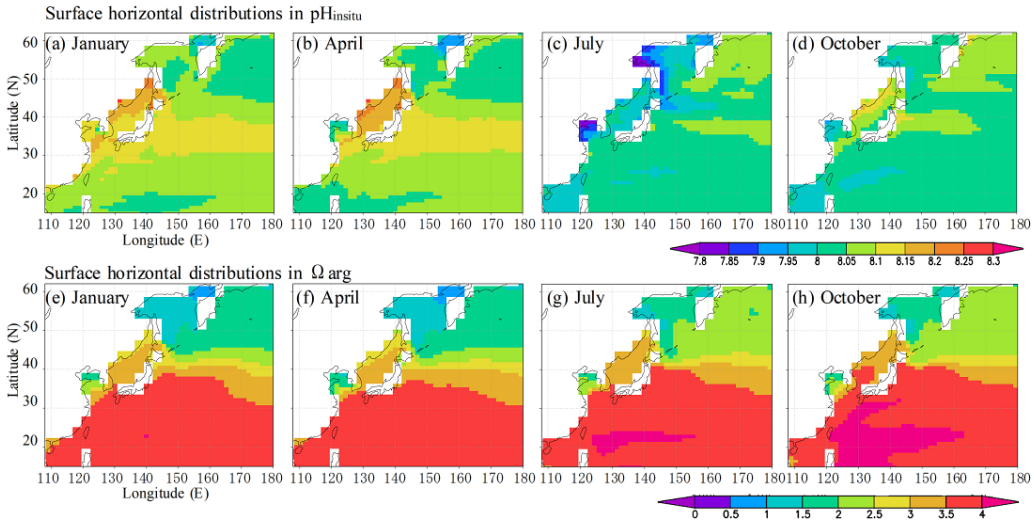


図 4－2　CMIP5 の RCP26 のシナリオで計算された MIROC_ESM の現場 pH とアラゴナイト飽和度。2015　年 1 月、4 月、7 月、10 月の月平均表層水平分布。これらの値は MIROC_ESM の出力値（水温、塩分、DIC、アルカリ度）により計算。

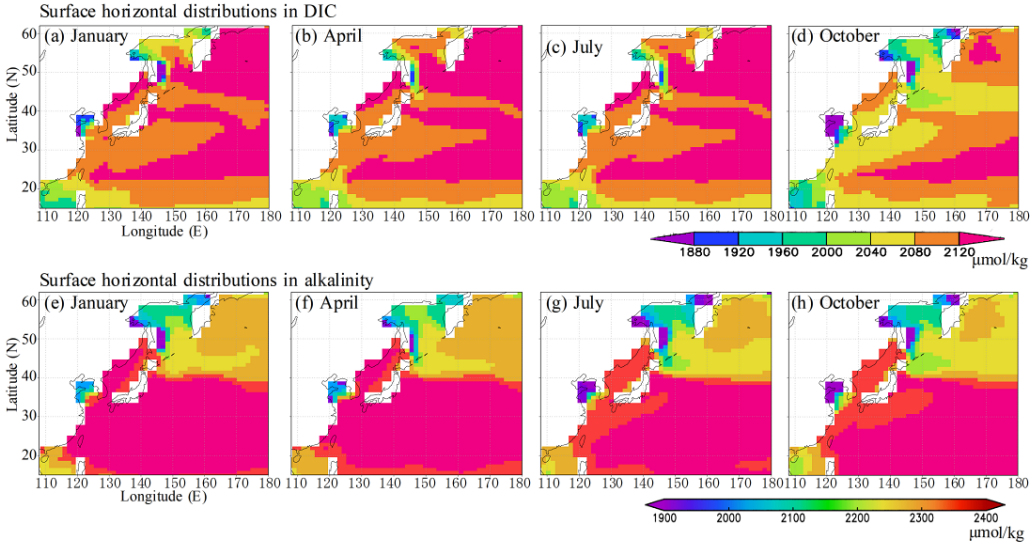


図 4－3　CMIP5 の RCP26 のシナリオで計算された MIROC_ESM の DIC、アルカリ度。2015 年 1 月、4 月、7 月、10 月の月平均表層水平分布。

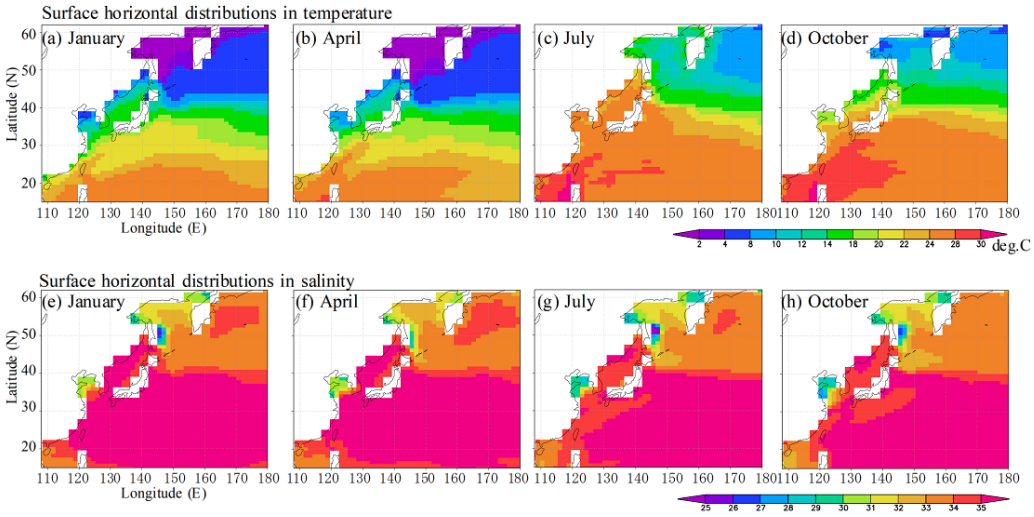


図 4－4　CMIP5 の RCP26 のシナリオで計算された MIROC_ESM の水温、塩分。2015 年 1 月、4 月、7 月、10 月の月平均表層水平分布。

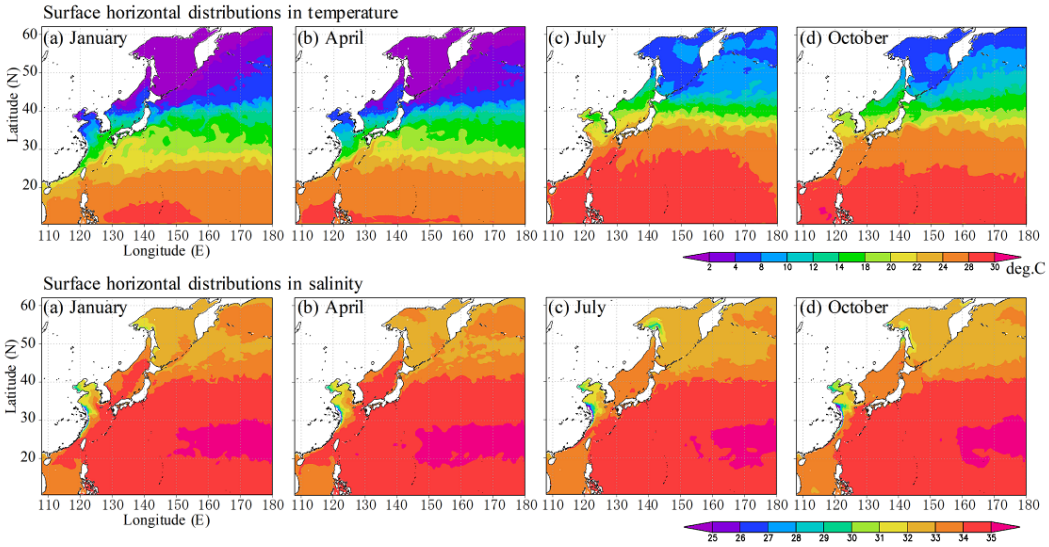


図 4－5　JCOPE_EC で出力された水温、塩分の表層水平分布図。図は、2015 年 1 月、4 月、7 月、10 月の月平均値を示す。

4.2　公共用水データ

2016、2017 年度では、公共用水域の水質汚濁に関わる調査の一環として収集された 1978 年から 2009 年までの pH データの年間平均値を解析し、把握が難しいとされていた日本沿岸域の海洋酸性化の状況を明らかにした。当研究内容を論文として英文科学誌に投稿した際、査読者から、データの信頼性について検証し、信頼できるデータを選別したうえで、結果を報告すべきという指摘を受けた。そこで、2018 年度は信頼性の高い時系列データを選別し、再解析を行った。再解析では、pH の最大値は基本的

には冬の値、pH の最小値は夏の値として別々にトレンドを評価した。以降では、信頼できるデータの選別方法ならびにそれらの信頼できる時系列データから明らかとなった公共用水における pH トレンドの結果を以下に示す。これらの改訂後、査読者から「公共用水のデータそのものが、pH トレンドを示すには精度に欠けるのではないか？」という指摘を受けたため、より厳しいデータ選択を再度行い、それらの残った測点データを利用して現在結果をまとめているところである。

① 公共用水のデータの信頼性についての検討

信頼できるデータを選別する（QC）ため、次の基準を設けた。①1978 年から 2009 年までの pH データがそろっていること。②各年のデータから得られた平均値をもとめ、その平均値から標準偏差以内のデータのみを保持していること。③全てのモニタリングポイントにおける pH の時系列から得られる標準偏差より大きい標準偏差の pH の値を所持する時系列をもつ点は除くこと。③は、各点の変動は日変動、月変動、年変動によるランダムエラーの影響を受けていると考えられるため、回帰直線から得られる pH トレンドにこれらのランダムエラーが与える影響をできるだけ抑えるため取り入れた。

これらの選定条件を満足する測点は 1481 個中 302 点となり、302 点に対して同じ測点で計測された水温と pH のある点と近傍点でのそれらの値を使用して、相関を計算することで、近傍点との距離から近傍データの相似性を調査した。その結果、近傍点の 5 km以内であれば、ほとんどの点で相関が有意である基準（r = 0.367; p < 0.05）を満たしていることが示された（図 4－6）。論文の改訂稿では、今回明らかになった事実とともに、本データは県ごとに観測を請け負っている事業所間での計測による人為的エラーについての検討も含めた（2017 年度報告書参照）。

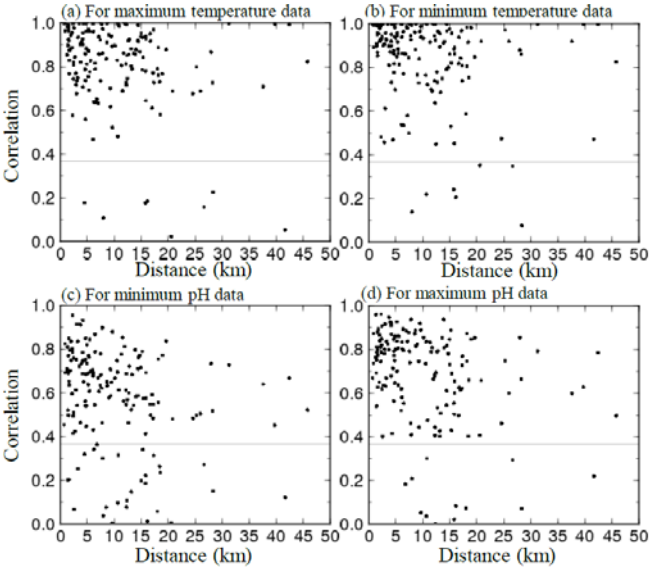


図 4－6　近傍点における水温および pH データの相関値と距離の関係　(a) 水温の最大値 (b) 水温の最小値　(c)　最大 pH　(d) 最小 pH に対しての関係

② 公共用水からみられる最小値と最大値における pH トレンド

信頼性ある時系列データのみを使用して、最小値と最大値データにおける pH トレンドの計算を行い、それらをヒストグラムに示した（図 4－7）。外洋で計測された pH トレンドは低下傾向しか報告されていない（Bates 2007; Midorikawa 2010）。しかし我々が調べた公共用水は、低下トレンドとともに上昇傾向もあることを示している。このような分布特性は、①で述べた QC の前後でデータ数以外に特徴ある変化は見られなかった。ヒストグラムでは低下傾向に偏りのある正規分布が示され、これらのトレンドの平均値を計算すると、pH 最小値として-0.0009±0.0026 yr^{-1}、pH 最大値として 0025±0.0033 yr^{-1} の値が得られた。これは冬季の方が夏季よりも pH が低下する傾向があることを示している。夏季と冬季での pH トレンドの違いは先行研究でも報告されている（例えば Midorikawa et al. 2010）。この差には、温暖化による影響から生じる季節間の差や生物活動の長期的な寄与が影響していると考えられている。

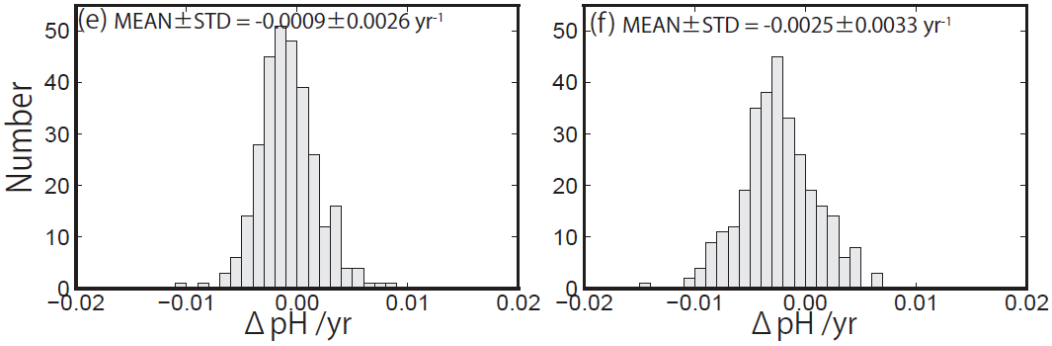


図 4－7　信頼性のあるデータのみを使用して計算した場合の pH トレンドのヒストグラム　（左：最小値 pH を使用した場合、右：最大値 pH を使用した場合）

pH トレンドの分布を調べると（図 4－8）、最小値データも最大値データの場合でも分布特性はあまり変わらなかった。一方、たとえそれらの地点が 50 km以内の比較的近距離にあったとしても同じ程度のトレンド値を示しているとは限らず、近傍点でもばらつきがあった。QC 後の測点はおもに瀬戸内海と九州西部域に残っており、瀬戸内海の pH の最小値データの場合には低下と上昇の両方が分布している一方、最大値はやや低下傾向が多い様子がみられた。九州西部域では低下傾向が顕著であるが、上昇傾向を示す地点は全国的に pH の最大値、最小値の場合ともに同じ地点の場合が多かった。

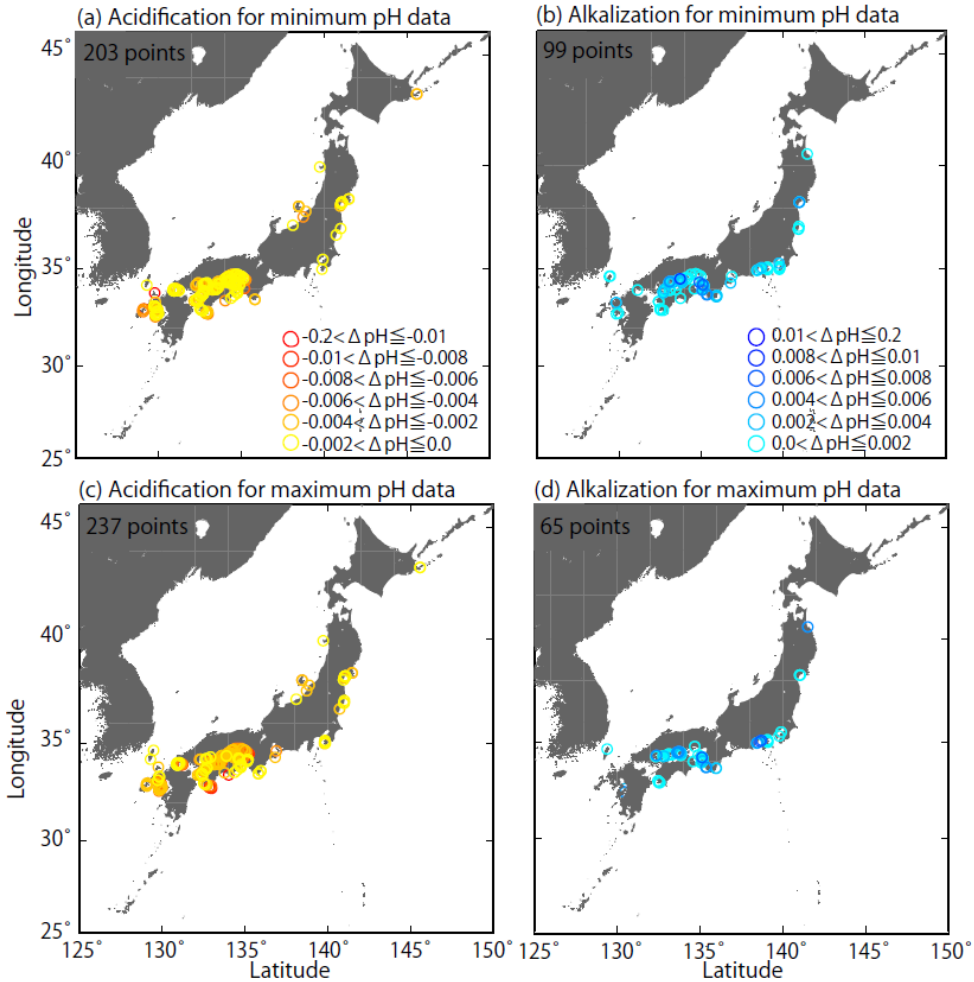


図 4－8　pH トレンドマップ（pH トレンドの値によって色分けをしている。図内に表示した観測地点の数を示す。）(a) 最小値 pH における酸性化を示した地点　(b) 最小値 pH におけるアルカリ化を示した地点（c）　最大値 pH における酸性化を示した地点（d）　最大値 pH におけるアルカリ化を示した地点

各県毎の pH トレンドの平均値（図 4－9）から、日本の西側の方が北東側に比べ、より顕著な低下傾向が認められた。気象庁は北側に比べ南側の方が、温暖化による水温の上昇率が大きいことを報告している。現場 pH は水温に左右されるため、水温が高くなると pH の値は見かけ上小さくなる。西側の pH の低下トレンドが大きく出ることは、気象庁による西日本の方が北東側に比べ水温上昇が大きいという長期的な水温変化の報告

(https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html) と整合している。我々が解析した公共用水の pH は現場値であり、大気中の CO_2 によるいわゆる「海洋酸性化」に加え、現場水温の影響による pH 変化も含んでいることに注意する必要がある。

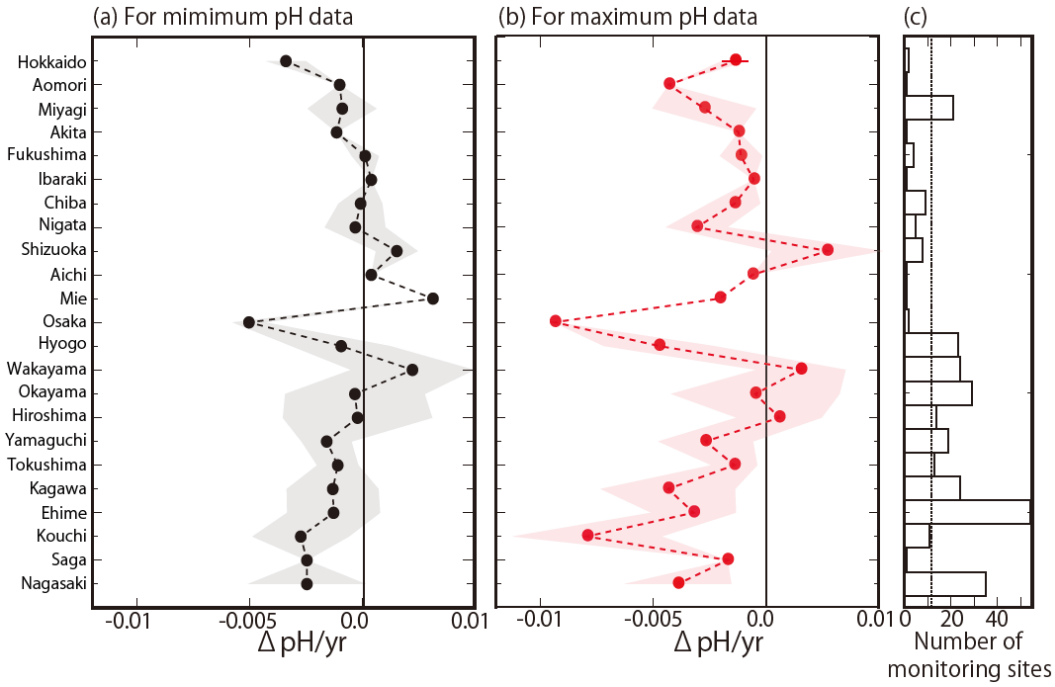


図 4－9　最小値 pH データ(a)、最大値 pH データ(b)を使用した場合の県別の pH トレンドの平均値を示す。(c) 県別の平均値を計算したときに使用した地点数

5. まとめと今後の課題

海洋環境現況予測モデルの予測更新を実施し、予測精度の検証等を踏まえて 2017 年度に引き続きモデルの改良を行った。予測精度向上のため、検証に利用する科学データを新たに入手し、モデル結果と比較した。モデルと観測結果の比較を行い、亜熱帯域のクロロフィル極大層の深度、および季節変動の定性的な再現性に問題があることが分かった。精度向上のため生態系パラメータの調整を引き続き進め、最適日射量（I_{opt}）、光の消散係数(α_1)に対し、緯度変化を考慮することで、夏季にできるクロロフィル極大層が亜熱帯から亜寒帯に向かって浅くなる様子が再現できるようになった。低次生態系の季節変動の再現性については、クロロフィルとアルカリ度に関しては改善の余地があるものの、DIN、DIC において、ほとんどの領域で観測値との相関が 0.8 以上を示し、それらの変数を使用した酸性化パラメータ（現場 pH、pH_{25}、アラゴナイト飽和度）の相関係数は 0.9 以上の結果を得た。これによって本モデルが、酸性化の現況予測のために利用しうる十分な精度を示すことがわかった。しかしながら、東シナ海、オホーツク海、日本海北部などにおいては、公開データが少ないため、観測値と比較できなかったためその精度は不明である。今後、これらの領域におけるデータの精度を確かめるため、World Ocean Database（https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html）や沿岸での炭酸系パラメータの観測網(小埜，私信)などからの追加情報により比較できる箇所があれば、そこでのモデル値の精度を検討する必要がある。とくに、オホーツク海や日本海の北側ではアラゴナイト飽和度が 1 に近い低めの値を示しているため、慎重に検討をしていく必要

がある。

本報告書にまとめた現況システムに利用されているモデルは、DIN、DIP、DIC、アルカリ度の拡散方程式に時間スケール30日で気候値緩和の項が入っている。そのため、本モデルの結果には、気候値緩和が大きく寄与している。炭素循環のメカニズムを調べるためには、今後、現況システムで使用する診断モデルに加え、気候値緩和項を除いたNPZDCモデルの開発を進める必要がある。

2015年だけでなく、2014年から2016年にかけて、予測モデルを通して動かし、酸性化パラメータの変化について調べた。計算期間は3年間であるが、500m以深での深層での酸性化の影響と考えられるパターンが見られ、二酸化炭素の表層での取り込みが冬季のサブダクションと循環にのってより深い層まで運ばれている可能性が示唆された。これらの表層での酸性化の影響をさらに検討するには、より長期間の計算を行うとともに、酸性化の影響の深層にまで運ばれるメカニズムを検討する必要がある。

現況予測モデルの改良を進めるのに並行し、長期予測気候モデル（JAMSTEC開発のMIROC_ESM）の結果を入手し、得られたデータから海洋酸性化の指標となるpHおよびアルゴナイト飽和度を計算した。計算データはデータ加工を行い、ウェブサイト「海洋危機ウォッチ」でコンテンツ利用されている。結果の一部をコンテンツ記事にも取り上げた。また我々の現況海洋予測モデル（JCOPE_EC）とそれに使用した気候値をMIROC_ESMの出力値から計算される現場pH、アラゴナイト飽和度と比較した。それらの比較により JCOPE_EC による酸性化パラメータは、MIROC_ESM に比べより確からしい値を再現していることが示唆された。

2016年度より解析を行っている公共用水で計測されたpHの解析については、データの信頼性についての検討を新たに行った。信頼できるデータと判断された公共用水データを使って再解析を行い、それらの結果は英文科学誌に投稿した。外洋の pH の観測では低下傾向のみが報告されているが、公共用水のデータは、pH低下とpH上昇の両方向のトレンドをとらえた。一方、全てのトレンドを平均すると外洋で報告されている程度のpH低下傾向が算出された。県別平均でみると、西側の方がpH低下傾向の方が大きく出ており、気象庁の長期的な水温変化の報告から推定される pH 変化の影響と整合していると考えられた。ただし、我々が解析した公共用水の pH は現場値であり、大気中のCO_2濃度上昇によるいわゆる「海洋酸性化」に加え、現場水温の影響による pH 変化も含んでいることに注意する必要がある。論文を再投稿した際、査読者に「公共用水の現場pHデータそのものが、pH トレンドを示すには精度にかけている」という指摘を受けた。より厳しいデータ選択を再度行い、それらの残った測点データを利用して、結果をまとめる必要があると考えている。

<u>会議等への参加・発表の報告</u>

1）ECCWO-2018 4th International Symposium
【日程】2018年6月2日から6月10日 8日間
【場所】アメリカ　ワシントンDC Hilton
【発表タイトル】

A marine carbon model coupled with an operational ocean model product for ocean acidification studies in the North Western Pacific

【発表者】Ishizu Miho, Miyazawa Yasumasa, Tsunoda Tomohiko, Xinyu Guo

【会議および発表の概要】

ECCWO-2018 第4回国際会議に参加し、研究発表および研究に関する情報収集を目的に2018年6月6日のS3セッション「Carbon uptake, ocean acidification, and ecosystems and human impacts」でポスター発表を行った。発表にあたり、現況予測モデルで再現されるpH他、栄養塩やDIC、クロロフィルの季節変動の再現性に関する内容をポスターにまとめた。Yasunaka et al. (2013; 2014) が示す栄養塩やDICの季節変化やMODIS衛星データがとらえた表層のクロロフィル分布の比較から、どの程度定性的に我々のモデルが現場海域の特徴を再現しているかということについて評価し、秋のクロロフィルの再現性に問題があるため、その他のパラメータにも影響が及んでいる可能性を示した。聴講者とのディスカッションから、現況モデルで使用する生物化学パラメータのうち、光合成に関するパラメータの設定に問題があることが分かった。また季節変動の改良のためには、水温に関するパラメータを調整することで秋のプルームが再現できるようになるのではないかと提案された。

聴講した研究発表のうち、フランスの研究者のLester Kwatkowski氏の発表が興味深かった。我々のモデルはおもに現況予測モデルであるが、Kwatkowski氏らは９つのEarth System Model(ESM)を取り扱い、21世紀中に現れると予想されるpH (H^+), Ωの季節変動と日変動を調べていた。発表内容はすでに論文化されているようなので、今後論文を作成するうえで、引用候補としたい。

その他、Erik Olsen氏による、大西洋を対象とした８つの生態系モデルを使用して、生態系に影響を与える人的要因、海洋酸性化、海洋汚染、漁業の影響を組み込みそれぞれの影響を評価するという試みについての報告や、JAMSTEC所属の原田氏による、近年行っている沿岸でのpH観測から、太平洋側では-0.0011yr-1、日本海側では-0.0007 yr-1のpHトレンドが計測されたというプレナリーセッションでの発表を聴講した。原田氏の観測結果は、我々のモデルによって再現される季節変動との比較材料になると考えられた。

2) 日本海洋学会2018年度秋季大会

【日程】2018年9月25日から9月29日 5日間

【場所】日本　東京海洋大学

【主要スポンサー】日本海洋学会

【発表タイトル】

海洋酸性化に係る現況予測モデルの開発II

【発表者】石津美穂, 宮澤泰正, 角田智彦, 郭新宇

【会議および発表の概要】

日本海洋学会 2018 年度秋季大会に参加し、研究発表および研究に関する情報収集を行った。発表は、2018年9月26日開催セッション18F-08「海洋生態系を理解する新たな試み」で“海洋酸性化に係る現況予測モデルの開発II”というタイトルでロ

頭発表を行った。

1) PICES-2018 Annual Meeting
【日程】2018年10月25日から11月04日 11日間
【場所】日本　横浜
【発表タイトル】
A marine carbon model coupled with an operational ocean model product for ocean acidification studies in the North Western Pacific
【発表者】Ishizu Miho, Miyazawa Yasumasa, Tsunoda Tomohiko, Xinyu Guo
【会議および発表の概要】
2018 年 11 月 1 日に開催されたポスターセッション「Ocean acidification and deoxygenation and their impact on ocean ecosystems: Synthesis and next stage」でポスター発表を行った。日本海洋学会秋季大会での発表に引き続き、主にモデルの季節変動に関する定性的な再現性について観測事実と比較する構成で発表した。課題のあったDIN,DIC,pHの現実に比べ小さい季節変動について、モデルの初期値に対し、年平均値を使用するのではなく月平均を使用することで定性的な季節変動が再現できる事を新たに加え、発表を行った。本発表の聴講者の意見では、pHだけでなく、酸素についても入れたらどうかという提案があった。
セッションでの発表を聴講し、最新の酸性化に関する発表及び過去の著名な研究に関する論文の情報が入手できた。発表内ででてきたBates et al. (2014) のΔpHの各海域における図は、我々の今後の研究結果と比較できるのではないかと考えられた。

参考文献

Bates N R 2007: Interannual variability of the ocean CO_2 sink in the subtropical gyre of the North Atlantic Ocean over the last 2 decades. J. Goephys. Res. 112, C09013, doi:10.1029/2006JC003759.

Guo X, Yanagi T 1998: The role of the Taiwan strait in an Ecological Model in the East China Sea, ACTA OCEANOGRAPHICA TAIWANICA, 37, No.2 pp. 139-164.

Goyet, C et al. 2000: Global distribution of total inorganic carbon and total alkalinity below the deepest winter mixed layer depths, ORNL/CDIAC-127, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 28pp. May 2000 NDP-062.

Key et al. 2004: A global ocean carbon climatology: Results from Global Data Analysis Project (GLODAP), Global Biogeochemical Cycle, 18, GB4031.

Kishi et al. 2007: NEMURO-a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem, ecological modeling 202, 12-245, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.08.021.1

Midorikawa T et al. 2010: Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific, Tellus, 62B, 649-659, doi: 10.111/j.1600-0889.2010.00474.x.

Miyazawa et al., 2009: Water mass variability in the western north Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, J. Oceanogr., 65, 737-756.

Nelson B N, Sigel A D 2013: The global distribution and dynamics of chromophoric dissolved organic matter. Annu. Rev. Mar. Sci. 2013.5:447-476, doi: 10.1146/annurev-marinc-120710-100751.

Onitsuka G, Yanagi T 2005: Differences in ecosystem dynamics between the northern and southern parts of the Japan Sea: Analyses with two ecosystem models, Journal of Oceanography, 61, 415-433.

Sasai Y et al. 2016: Coupled 1-D physical-biological model study of phytoplankton production at two contrasing time-series stations in the western North Pacific, J. Oceanogr., 72:509-526 doi:10.1007/s10872-015-0341-1.

Takatani Y et al. 2014: Relationships between total alkalinity in surface water and seas surface dynamic height in the Pacific Ocean. Journal of Geophysical Research Oceans, 119, 2806-2814, doi:10.1002/2013JC009739.

Watanabe S et al. 2011: MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, Geosci. Model Dev., 4, 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011.

Yara et al. 2012: Ocean acidification limits temperature-induced poleward expansion of coral habitats around Japan, Biogeosciences, 9, 4955-4968, doi:10.5194/bg-9-4955-2012

Yasunaka et al., 2013: Monthly maps of sea surface dissolved inorganic carbon in the North Pacific: Basin-wide distribution and seasonal variation, J. Geophys. Res. Oceans, 118, 3843-3850, doi: 10.1002/jgrc.20279.

Yasunaka S et al., 2014: Mapping of sea surface nutrients in the North Pacific: Basinwide distribution and seasonal to interannual variability, 7756-7771, doi: 10.1002/2014JC010318.

CMIP5 に関する記事

このまま二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出を続けると 2100 年の平均気温が 4℃～5℃上昇すると言われている。このような将来の見通しは、大気や海洋、生態系などの地球システムを結合してコンピュータ上に再現した数値モデルを用いて計算されている。世界各国の研究グループが、より精度の高い見通しを推定する努力を続けており、さらに、それらを相互に比較・評価するプロジェクト CMIP（結合モデル総合比較プロジェクト）が WCRP(世界気候研究計画)のもとで 1990 年代から行われている。

最近行われた第 5 期結合モデル相互比較計画(CMIP5)では、人為起源の二酸化炭素(CO_2)の排出などによる影響の見通しを得るため、共通の社会経済シナリオと放射強制力データのもとで、世界各国で開発された地球システムモデルを用いて実験が行われた。CMIP5 ではデータのオープン化によってモデリングを専門としない研究者でも容易に結果の比較検討ができるようにされており、このため、同プログラムのもとで、多くの研究者が人為起源の物質が排出されることによる影響について、さまざまな視点から公表することとなった。2013 年の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）では、CMIP5 から明らかとなった人為起源物質に対する全球規模の影響評価について、第 5 次評価報告書（IPCC, 2013）にまとめられている。

CMIP5 の一環として、海洋開発研究機構でも地球システムモデル「MIROC_ESM」を使用して、海洋酸性化の指標となる pH やアルゴナイト飽和度を算出するためのパラメータについても将来予測が行われた（Watanabe et al. 2011)。モデルでは、大気中の CO_2 濃度や土地利用変化についての４つのシナリオ(RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)が仮定され、放射強制力を 2100 年の時点でそれぞれ 2.6 Wm^{-2}、4.5 Wm^{-2}、6.0 Wm^{-2}、8.5 Wm^{-2} に抑える目標に対してのシナリオを利用して計算が実施された。このシナリオは、2100 年の時点で放射強制力が小さい方が積極的に温暖化対策を講じた場合で、放射強制力が大きい方が講じなかった場合の予測を表すことになる。これらのシナリオでは、産業革命以前比で 100 年後の平均気温上昇は、RCP2.6 では 0.3-1.7℃、RCP4.5 では 1.1-2.6℃、RCP6.0 では 1.4-3.1℃、RCP8.5 では 2.6-4.8℃以内と予測されている(IPCC, 2013)。

地球システムモデル「MIROC_ESM」は、対象とする現象毎に個別に開発されたモデルを組み合わせ、成り立っている（図１；Watanabe et al. 2011 を参考)。例えば、大気・海洋間の力学は MIROC の気候モデル、植生や土壌による影響は MATSIRO モデル、大気内のエアロゾル関係の物質粒子の移動は SPRINTARS モデルで計算され、それぞれの力学モデル間で計算されたパラメータが相互に利用される。

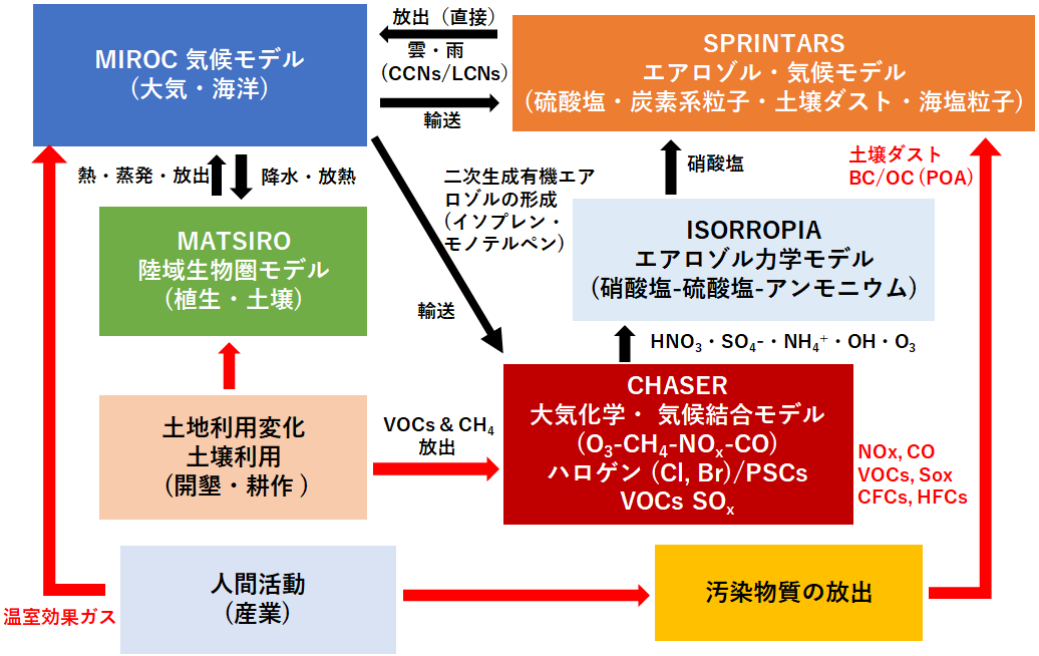


Figure 0-1 MIROC_ESM で採用された結合モデルの関係 (Watanabe et al. 2011) を参考にして作成。大気・海洋の循環を模した気候モデルに、陸域生物圏や人為起源の様々な要素を加えた地球システムの変動をコンピュータ上に表現する。)

MIROC_ESM で計算された 2018 年現在と約 100 年後の 2100 年における RCP2.6 と RCP8.5 のシナリオに対する海洋の全球表層 pH 分布を図 2 に示す。現在と 2100 年の未来を比較すると、今後、放射強制力を積極的に制御する対策を講じようが講じまいが、地球規模で pH の値は下がり続け、海洋の酸性化は避けられないことが分かる。またその影響は、積極的な対策を講じた場合には現在と比較して 0.1 までの減少(RCP2.6)で済むが、講じなければ 0.3 もの減少(RCP8.5)が予想される。

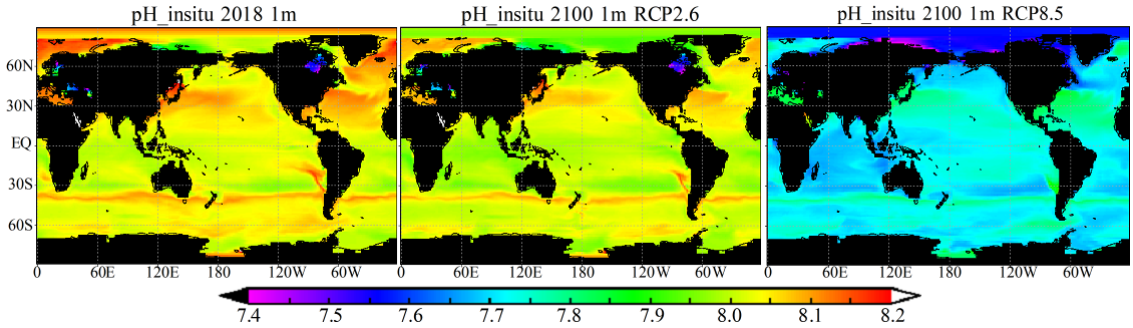


Figure 0-2　MIROC_ESM で再現された 2018 年現在と 2100 年の全球表層 pH 水平分布
(左：2018 年現在，中央：RCP2.6，右：RCP8.5)

この海洋酸性化は生態系に影響を与える。例えば、二枚貝の殻や円石藻という植物プランクトンの殻はカルサイトとよばれる炭酸カルシウム結晶からできており、これら

の飽和度は１より小さくなると、炭酸カルシウム結晶は維持しにくくなるといわれている（河野ら 2010）。サンゴのような石灰生物の骨格は、アラゴナイトと呼ばれる炭酸カルシウム結晶から構成されており、さらに生存条件が厳しい。生存に必要な理想条件は、温帯サンゴでは、アラゴナイト飽和度が 2.3 より大きく、10℃以上かつ 18℃よりも低い水温帯、熱帯サンゴではアラゴナイト飽和度は 3.5 以上かつ 18℃以上 30 度より小さい水温帯というように、海洋酸性化だけでなく、温暖化による水温上昇からも影響を受ける（Yara et al. 2012）。

図３に、2018 年現在と 2100 年の RCP2.6 と RCP8.0 のシナリオにおけるアラゴナイト飽和度の全球表層水平分布を示す。現在、アラゴナイト飽和度は極域ですでに１に近い値となっており、飽和度 2.3 の領域は北緯 40 度付近に位置している。放射強制力を制御する対策を積極的に講じた場合（RCP2.6）では、2100 年でもある程度、飽和度 2.3 の領域は現在の位置を保っていることが分かる。しかし、このまま積極的な対策を講じない場合（RCP8.0）、低い飽和度の領域は確実に南下し、アラゴナイト飽和度が 1 のラインは北太平洋ではベーリング海から北海道北東部まで広がり、アラゴナイト飽和度が 2.3 の領域は北緯 20 度から 30 度にまで及んでくることが分かる。日本近海でいえば、2018 年に東北沿岸沖の亜寒帯域にあったアラゴナイト飽和度が 2.3 の領域は、亜寒帯と亜熱帯の境界にあるが、約 100 年後には亜熱帯域にまでに広がり、温帯サンゴは壊滅的な被害を受けてしまうことを示している。

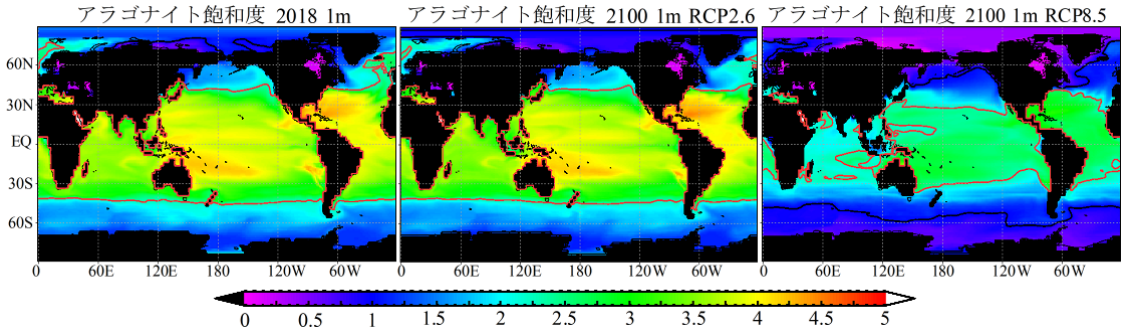


Figure 0-3　MIROC_ESM で再現された 2018 年現在と 2100 年の全球アラゴナイト飽和度（Ω_{arag}）の表層水平分布 黒および赤線は順にアラゴナイト飽和度が 1 と 2.3 の等値線を示す。（左：2018 年現在，中央：RCP2.6，右：RCP8.5）

二枚貝や植物プランクトンに影響すれば、それらを捕食している生物にも影響がでる。サンゴができにくくなると、サンゴ礁を棲み処にしている生物にも影響を与える。つまり、海洋酸性化による生物への影響は二次災害が避けられない。食物連鎖の観点から考えれば、最終的には我々人間社会にも影響してくることは容易に想像できる。温室効果ガスの影響範囲には、人間社会には存在する国境のような境界が存在しない。つまり、この問題は、温室効果ガスを多く排出している特定の国、地域だけの問題にはならない。我々は、海洋酸性化の影響をできるだけ少なくするために、温室効果ガス排出の抑制に対し、地球規模で取り組むべき課題に直面している。

参考文献

河宮未知生・石井正好・鬼頭昭雄・木本昌秀（2013）：「21 世紀気候変動予測革新プログラム」における， CMP5 実験仕様に基づいた温暖化予測実験， 天気， 60(4) 223-246, 2013 年 4 月.

鬼頭昭雄（2013）：モデル相互比較実験　天気　60(3) 197-198, 2013 年 3 月.

河野健（2010）：海洋酸性化研究の動向 海洋技術動向 2 月号, 20-28.

渡辺路生・野口（相田）真希・羽島知洋（2018）：地球システムモデルに組み込む海洋生態系モデルの開発　-全球窒素・炭素循環の理解に向けて-, 海の研究, 27(1), 31-41.

Taylor K E, Stouffer J R, and Meehl A G (2009): An overview of CMIP5 and the experiment design. PCDMI Rep., 33pp [Available online at http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/doc/Taylor_CMIP5_design.pdf.]

Watanabe S, Hajime T, Sudo K, Nagashima T, Takemura T, Okajima H, Nozawa T, Kawase H, Abe M, Yokohama T, Ise T, Sato H, Kato E, Takata K, Emori and Kawamiya M (2011): MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, Geosci. Model Dev., 4 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) : Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. Stocker T F, Qin D, Plattner Gian-Kasper, Tignor M M B, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Zia Yu, Bex, Midgley P M, 1-1535 pp. Cambridge, UK: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Yara Y, Vogt M, Fujii M, Yamano H, Hauri C, Steinacher M, Gruber N, Yamanaka Y (2012) : Ocean acidification limits temperature-induced poleward expansion of coral habitats around Japan, Biogeosciences, 9, 4955-4968, 2012, doi:10.5194/bg-9-4955-2012.

1.　はじめに

海洋危機ウォッチをご利用いただきまして、ありがとうございます。本サイトでは、温暖化・海洋酸性化について一般向けに分かりやすく、かつ専門家にも活用可能な情報発信を目指して構築しております。

2.　全体構成

本サイトの全体構成は、以下に分かれます。

- Home
- 海の温暖化・海洋酸性化
- 海の予測情報
- 観測の情報
- ニュース
- 学習コーナー

トップサイト URL（https://www.marinecrisiswatch.jp/）にアクセスすると“Home”ページが表示されます。

各ページには、グローバルナビから選ぶことで移動できます。

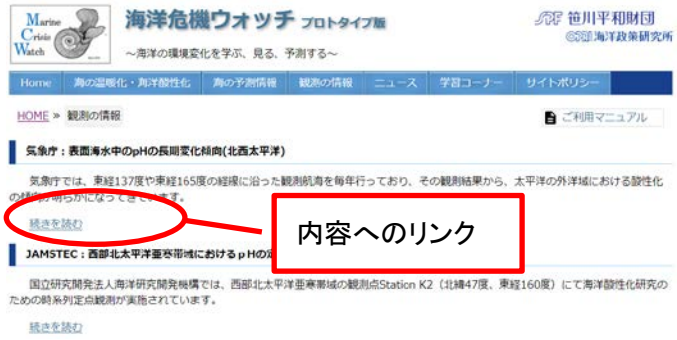
3.　Home

“Home”ページは、本サイトのトップページとなります。“サイト概要の説明”と、“最新のニュースタイトル一覧”、“今日の予想情報”を表示します。

4.　海の温暖化・海洋酸性化

海の温暖化・酸性化情報を随時発信するページです。最初にそれぞれの記事のタイトルと概要が表示されます。

記事の内容を表示するには、“続きを読む”から辿ります。



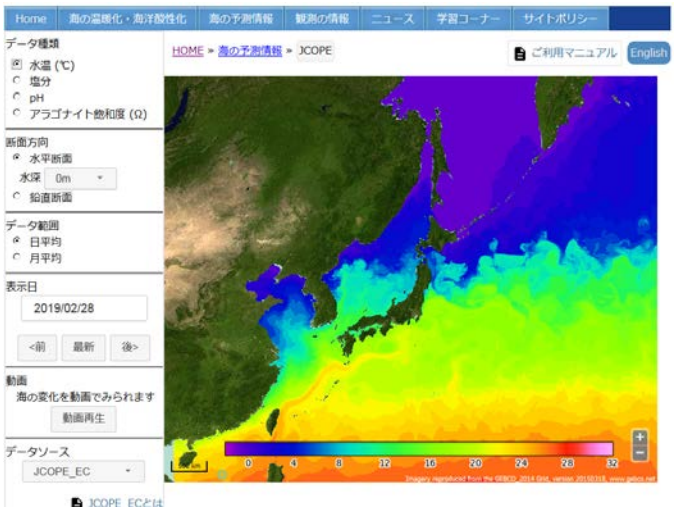
5.　海の予測情報

“海の予測情報”ページでは、予測情報の詳細を地図上で確認できます。

JCOPE_EC または、CMIP5 による予測情報をそれぞれのページで確認することが出来ます。

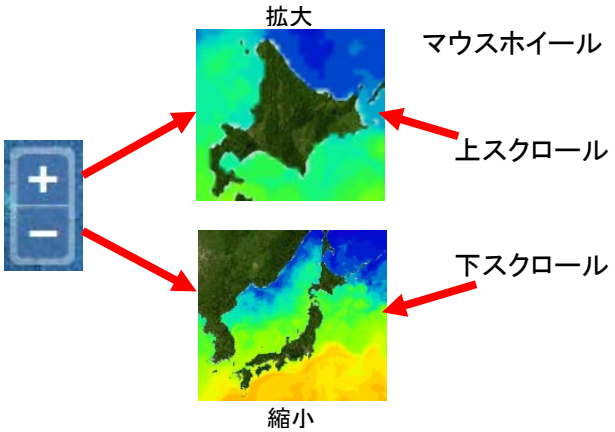
グローバルナビ または、 海の予測情報ページからそれぞれの予測情報ページへ移動できます。

5.1. JCOPE_EC･CMIP ページで共通の機能



予測情報は地図上にレベルごとに色分けされて表示されます。色がどのレベルになるかは、カラーバーで確認できます。

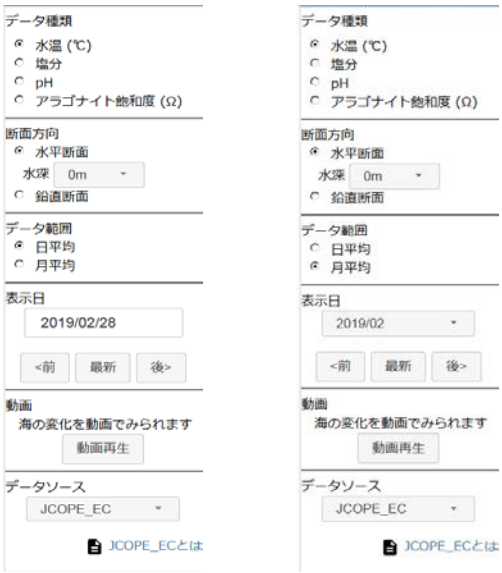
地図の拡大縮小は、画面上の“＋－”ボタンで操作するか、マウスホイールで行う事が出来ます。



地図のスケールは、スケールバーで確認できます。

5.2. JCOPE_EC ページの機能

予測情報の切り替えは、サイドバーを操作して行います。サイドバーの操作で即座に地図上のデータが切り替わります。



“データ種類”では、“水温(℃)”、“塩分”、“pH”、“アラゴナイト飽和度(Ω)”を切り替えることが出来ます。

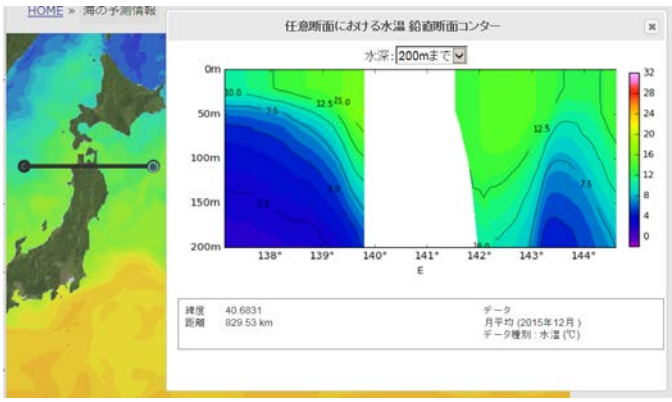
“断面方向”では、“水平断面”を選んだ場合に、“水深”を選択できます。

“データ範囲”では“日平均”と“月平均”が選べます。

“表示日”は“データ範囲”が“日平均”の場合は日付を、“月平均”の場合は、年月を選択できます。

“データソース”は“JCOPE_EC”のみとなります。

“断面方向”で“鉛直断面”を選んだ場合は、地図上の2点を選ぶことで、鉛直断面コンターを表示する事が出来ます。

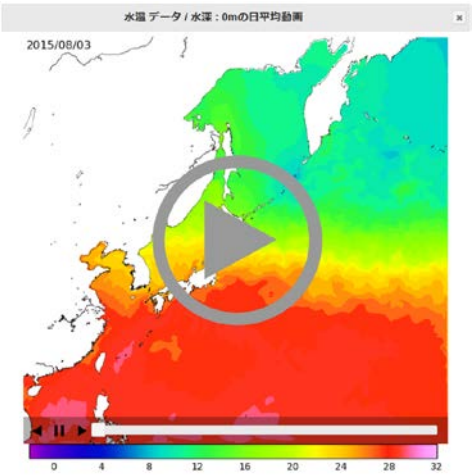


鉛直断面コンターはポップアップ画面で表示され、画面内で水深を切り替える事が出来ます。

ポップアップ画面は、右上の“×”ボタンを押すと、元の画面に戻れます。

“動画再生”ボタンを押すと、日平均や月平均の予測データの移り変りをアニメーションで見ることができます。

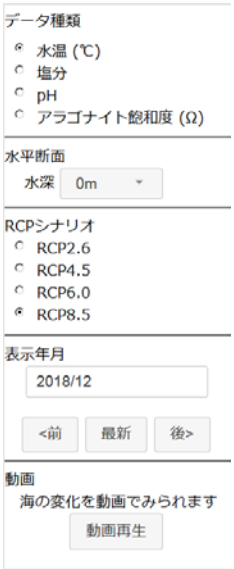
ポップアップ画面で表示され、画面下部のボタンを使い“再生”、“逆再生”、“停止”を行う事が出来ます。また、スクロールバーを操作して任意の日付、年月に移動する事ができます。



“動画再生”は日平均の場合は30日、月平均の場合は12か月のデータが再生されます。

5.3. CMIP ページの機能

予測情報の切り替えは、サイドバーを操作して行います。サイドバーの操作で即座に地図上のデータが切り替わります。



“データ種類”では、“水温(℃)”、“塩分”、“pH”、“アラゴナイト飽和度(Ω)”を切り替えることができます。

“水平断面”では、地図に水平断面で表示されているデータの水深を切り替えることができます。水深は、0m、50m、100m、200m、500m、1000m、2000m、3000m から選択できます。これらの水深はわかりやすさのため、区切りのよい数字としていますが、正確な水深はそれぞれ 2.5m 、50m 、110m 、185m 、550m 、975m 、2025m 、3025m となっています。

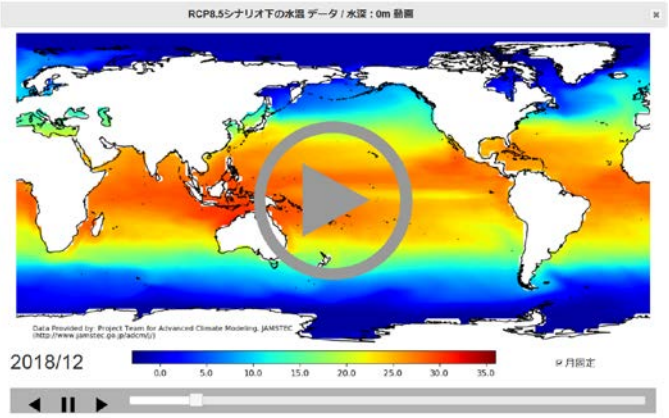
“RCP シナリオ”では、温室効果ガスの濃度変化の異なる 4 つのシナリオを選ぶことができます。

“表示日”は表示するデータの年月を選択できます。

“動画再生”ボタンを押すと、予測データの移り変りをアニメーションで見ることができます。

ポップアップ画面で表示され、画面下部のボタンを使い“再生”、“逆再生”、“停止”を行う事が出来ます。また、スクロールバーを操作して任意の日付、年月に移動する事ができます。

“月固定”のチェックボックスにチェックを入れると、季節を固定した状態で、年ごとの変化を確認できます。

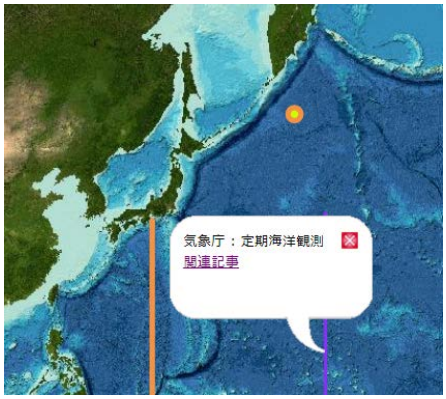


“動画再生”は 2006 年 1 月から 2100 年 12 月までのデータを全て再生します。

6. 観測の情報

観測データを整理・公開している気象庁および海洋研究開発機構の取組や観測データ・解析画像を紹介するページです。

地図上に表示した調査地点から、関連記事への移動が出来ます。



7. ニュース

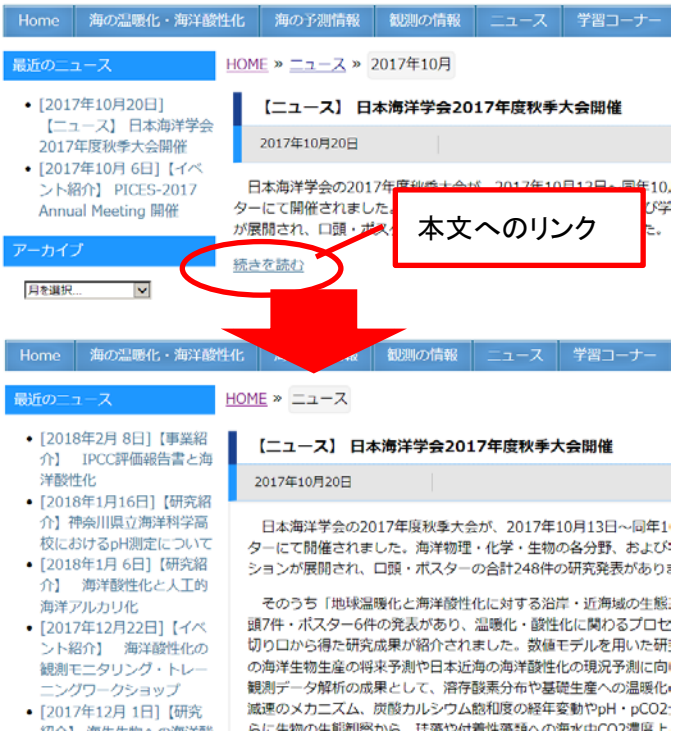
最新の主要雑誌の論文や UNFCCC/COP21 等の国際会議で挙げられた温暖化・海洋酸性化に関する話題について発信するページです。

直近のニュースは、サイドバー上部“最新のニュース”にタイトルが一覧表示されます。

それ以前のニュースには、サイドバーの“アーカイブ”から年月を選択することで辿れます。

“ニュース”ページを表示した直後は、ニュース記事のタイトルと、記事の先頭部分が一覧表示されます。

ニュース記事のタイトルから、記事本文へ辿ることが出来ます。



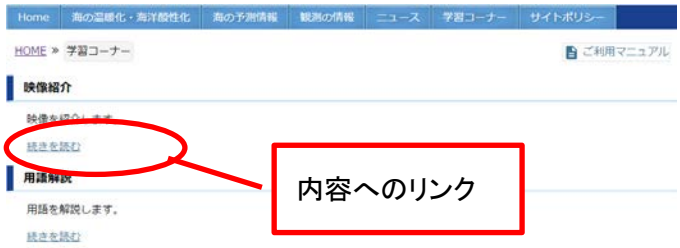
8. 学習コーナー

“学習コーナー”ページでは、温暖化・海洋酸性化等の海洋情報に知見のない人が閲覧する場合であっても、理解し易く教育的観点から有益なコンテンツを提供するページです。

“学習コーナー”ページの他に、サブカテゴリーとして“映像紹介”と“用語解説”を設けております。

“学習コーナー”ページでは、最初にそれぞれの記事のタイトルと概要が表示されます。

記事の内容を表示するには、“続きを読む”から辿ります。



“映像紹介”ページでは、笹川平和財団が作成した動画を紹介します。

“用語解説”ページでは、本サイト内の文章中および図中で示された専門用語について解説します。

9. サイトポリシー

サイトポリシーは以下のリンクからご覧いただけます。

https://www.marinecrisiswatch.jp/mcwatch/policy/index.html

2018 年度　温暖化・海洋酸性化の研究と対策　報告書

2019 年 3 月発行

発行　公益財団法人笹川平和財団　海洋政策研究所

〒105-8524　東京都港区虎ノ門 1-15-16　笹川平和財団ビル

TEL 03-5157-5210　　FAX 03-5157-5230

https://www.spf.org/_opri/

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。

海洋政策研究所は、日本財団の支援を受けて活動をしています