

極域の海氷にすむ生物たちの話 —北極と南極の海氷下の観測から

原田 尚美*

1. 二酸化炭素問題と極域

ハワイのマウナロア観測所で1979年1月に観測が始まった大気中の二酸化炭素の濃度は、当時336 ppm (parts per million の略で100万分の1)。人間活動の活発化によるその後の濃度増加は、皆さんが良く知るところであり現在430 ppm を超す勢いである。430 ppm という濃度に着目すると、地球46億年の歴史の中で何度か経験しており、海洋や陸域に残された古環境の記録から、最も新しい時代にこの濃度を経験したのは約300万年前であることがわかっている¹⁾。ところが問題なのはその増加スピードである。1979年から2024年までのたった45年間に90 ppm を超す増加スピードは、46億年の歴史の中でおそらく一度も経験したことはない。IPCC1.5度特別報告書²⁾によると、地球温暖化の影響は場所や季節によって異なり、北極圏(北緯60度以北のエリア)でその影響は特に強く出ており、北半球平均の2.7倍の強さと見積もられている(図1)。季節では特に冬季の温暖化が深刻となっている。現在、極域の海洋が直面する3つの課題がある。1つは先にも述べた温度の上昇である。北極圏の8月の海面水温の変遷を見ると1982年から2017年までに北極海の平均水温は2.7℃上昇した³⁾。2つ目は海水の減少である。1981年~2010年の平均値からの偏差を見ると北極海の海氷分布は1979年以降右肩下がりに減少し、多年氷の分布は10年で13%も減少している⁴⁾。一方で南極は5~6年程度の周期性を持って増減し、長期的には特に目立った減少トレンドを示していなかったが、2014年を境に海

工業化より前と比較した2006-2015年の温度上昇の年平均

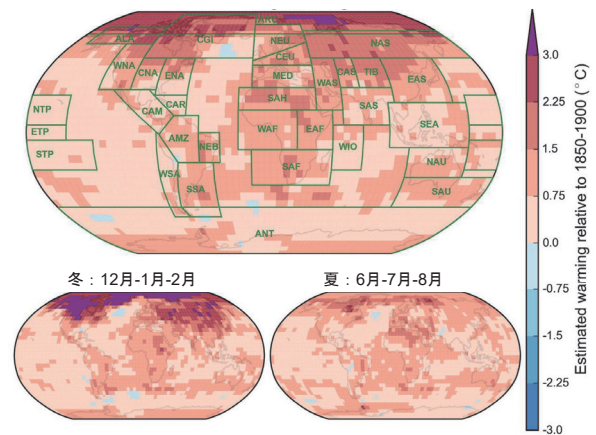


図1. 場所や季節によって異なる温暖化の影響 (IPCC 1.5℃特別報告書第一章 p60 図1.3)

水分分布が大きく減少し⁴⁾、2023年は衛星観測開始以来、最小の海水分布面積を記録した。3つ目は海洋酸性化である。従って、この速度での二酸化炭素の増加によって、特に地球温暖化に敏感にตอบสนองし、かつ脆弱な北極海を含む極域で、この3つのストレスによって何が起きているのか?を喫緊に明らかにする必要がある上、極域にこの先何をもたらすのか?という観点でも研究の加速は待たなしである。

海洋特有の問題である海洋酸性化は、もう1つの二酸化炭素問題と呼ばれる。海水に存在する二酸化炭素の形態は、ガス状の二酸化炭素、炭酸水素イオン (HCO_3^-)、炭酸イオン (CO_3^{2-}) の3種類である。海水に二酸化炭素が溶解すると、この3つのうちのどの形態を取るかは海水の水素イオン濃度指数 (pH) によって規定される(図2)。海洋表層の平均的な pH は8.1と弱アルカリ性で、この時、ガス状の二酸化炭素が0.6%、炭酸水素

*東京大学大気海洋研究所附属国際・地域連携研究センター教授)

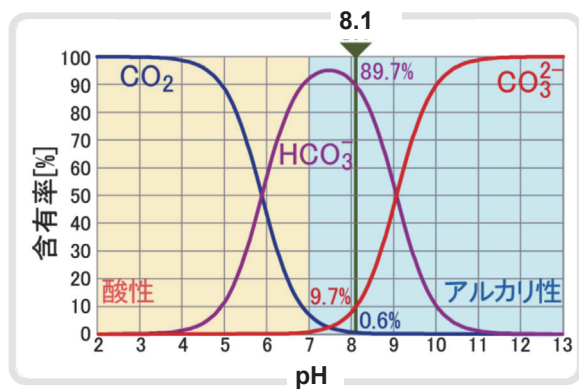


図2. 海水中の二酸化炭素の形態別の含有量とpHとの関係

イオン (HCO_3^-) が 89.7%, 炭酸イオン (CO_3^{2-}) が 9.7% と大部分が炭酸水素イオンとして存在する (図2). ここでイオンとは, 電荷を帯びた状態の原子や分子のことである. このように, 現在の弱アルカリ性の海水に二酸化炭素が溶解すると, 主に炭酸水素イオンが形成される反応が進み, この時, 同時に水素イオンを発生する. やがて海水中の二酸化炭素の溶解が進行することで, どんどん水素イオンが増加すると pH はアルカリ性から中性, 酸性の方向へと傾く. これを海洋酸性化と呼ぶ. 気体は低温下でよく溶解するため, 水温が低い極域は水温が高い海域に比べてよく二酸化炭素を溶解する. 海洋酸性化によって懸念されているのが生物への影響である. 二酸化炭素の溶解によって水素イオン濃度が増加すると, 海水中の炭酸系の形態が pH によって支配されることから海水中の炭酸系は増えた濃度を元の数値に戻そうとする緩衝作用が働き, 炭酸イオンと反応して, 弱アルカリ性の海水中で最も安定な炭酸水素イオンを形成する. そうすると, 次に炭酸イオン濃度が減少してしまうため, その減少を補おうと炭酸カルシウムが溶解することで, 炭酸イオン濃度を元の濃度に戻そうという働きが生じる. 海水中の炭酸カルシウムはほぼ 100% 生物が合成することから, 炭酸カルシウムの溶解は, 骨格に炭酸カルシウムを持つ生物の生存が危ぶまれるということになる. 浮遊性有孔虫, 貝形虫, 浮遊性二枚貝, 翼足類など体積に対して表面積の割合が大きくなる

小さいサイズのプランクトン性の生物の炭酸カルシウム骨格が溶解しやすくなる, 形成されにくくなるなどの問題が生じると考えられる. 翼足類のように秋刀魚や鮭などの重要な餌となっている生物も含まれるため, 食物網の上位生物への影響も懸念される. 北極海では海洋酸性化の進行が深刻であることから⁵⁾, このような炭酸カルシウム骨格を有する海洋生物を主体とした, 海洋酸性化の定量的な影響評価も監視観測の項目として行なっていく必要がある.

2. 西部北極海での観測

北極海に生息する生物にとって, 温暖化はどのような影響があるのだろうか? 北極海における植物プランクTONの生産量を有機炭素合成量として示したのが図3である⁶⁾. 丸の大きさが大きいほど有機炭素量が多いことを意味し, カラ海, バフィン湾, ボーフォート海南東部など沿岸域での生産が大きく, 最大で $13.8 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ と推定されている. 北極海は沿岸から中央部に向かって, 合成される有機炭素量は小さい値となり, 生物生産が少なくなることを表している. 私たちは, 北極海の中でも生物生産が比較的低い西部北極海のノースウインド深海平原 (St. NAP: 北緯 75 度, 西経 162 度, 水深 1950 m) に観測点を設け, 2010 年 10 月から翌年の 9 月まで時系列で大型有機物粒子を採取し有機炭素フラックスを求めた. その値 $0.4 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ (図3の Northwind Abyssal Plain の値) は, 北極海中央部の他の観測点での値とほぼ変わらない値であった. この結果を用いて, 環北極海海水—海洋物理—海洋生態系モデルによって北極海全域で, 海氷減少が植物プランクTONの有機物合成量にどう影響を及ぼしてきたかシミュレーションを行った⁷⁾. まず, このモデルが St. NAP の有機炭素フラックス量の季節増減の時系列変化を追跡できるかどうかを確認し, しっかりトレースできるよう調整を行った. 調整後, モデルで比較したのは, 1990 年代と 2005 年以降の結果である. 両年代の海氷面積が最も小さ

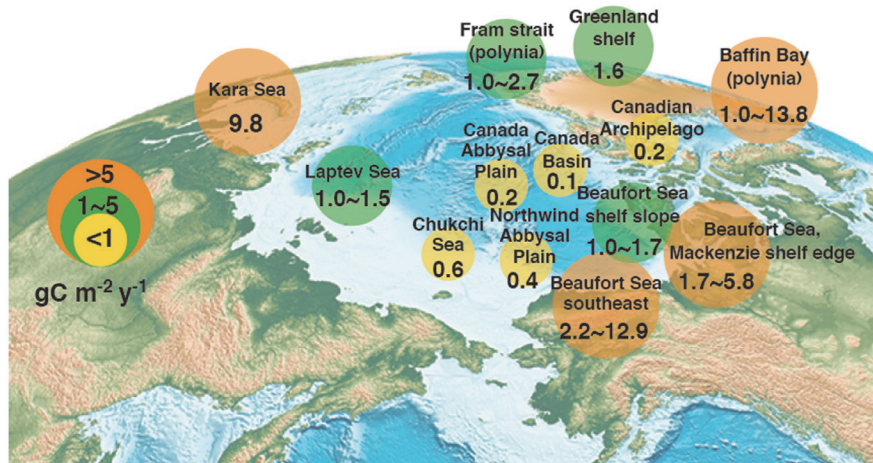


図 3. 北極海における有機炭素合成量 ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$) Harada, 2016 を改訂

くなる9月で比較した結果、北極海全域で2005年以降の方がメソスケール（直径約100 km）渦の発生ボリュームが約84%増加していることがわかった。メソスケール渦増加の原因は、沿岸域の海水面積が減少したことで、海面と大気が直接接触する面積を増やした結果であると推測された。渦の発生量の増加によって北極海全体の深層に輸送される有機物（窒素ベースで計算）が、1990年代に比べて2005年以降で、約2倍に増加していた⁷⁾。沿岸域に十分に海水が張り出していた1990年代、St. NAPなどの北極海中央部の深層に輸送される有機物は、主に沿岸の大陸棚から水

平的に輸送されてくる物質が主体であったと考えられる。2005年以降、特に沿岸域で顕著に海水が減少し海面が現れてくると、冷水渦や暖水渦など渦が発生しやすくなり、渦の中で生産される有機物も北極海中央部へ輸送されるようになってきたと推測される。特に低気圧性の渦では、渦の縁辺部で鉛直輸送が活発に生じ、栄養塩濃度の高い亜表層の海水が、光が十分に注ぐ表層に持ち込まれ、渦の中でのプランクトンによる光合成・生産が増加した結果、合成される有機物量が増え、北極海中央部の深層に沈降していく有機物フラックスを増加させたと推測される⁷⁾ (図4)。

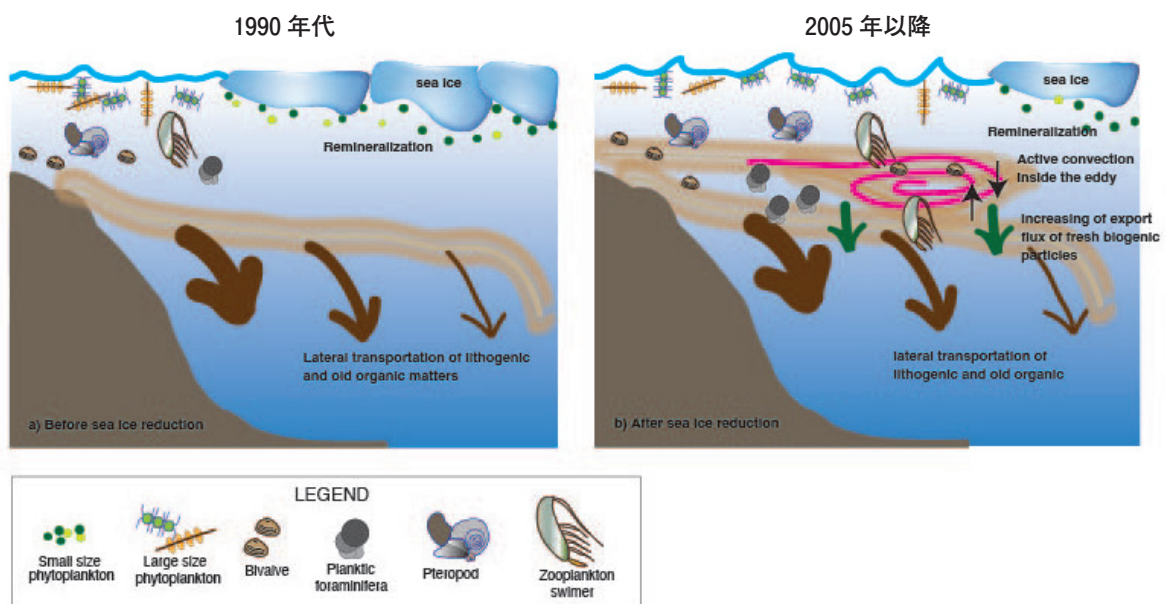


図 4. 1990年代に比べて2005年以降でメソスケール渦が増加したことで北極海中央部に物質の輸送量を増加させる推定メカニズム (Harada, 2016)

3. 北極海の生物分布の変化

北極海およびその周辺海域の温暖化は、生息する海洋生物の分布に影響を与え極方向への移動を促す状況になっている。生物の極方向への移動は、亜寒帯化 (Borealization) あるいは大西洋化 (Atlantification)・太平洋化 (Pacification) とも呼ばれている。実際にどのくらい生物移動が生じているのか？西部北極海チュクチ海において、2015年と2017年に細菌、微小動物プランクトン、底生生物、魚類、海鳥の分布調査が実施された⁸⁾ (図5, 6 Mueter et al., 2021)。

その結果、微小動物プランクトン、魚類など遊泳性や海鳥のような移動性の生物については、2017年の分布量の方がリッチであり、亜寒帯種の導入・北極海での生産が進行しているものと推察される。一方、底生生物は堆積物に埋没して生息するタイプ、海底上に生息するタイプいずれも2017年の分布量は減少していた。また、海流に乗って移動してくると考えられる細菌等も2017年の分布量が減少していた。底生生物に関しては、暖かい水温の底層水によって餌となる生物の量に変化が生じたためか、あるいは海水が融解する時期が通常より早く生じ同時に海水由来のアイスアルジーが大増殖して直接海底に落下して

底生生物の餌となる時期も早まったことにより、底生生物の成長季節に適量の餌が表層から輸送されず、バイオマスが減ったと考察されている⁹⁾。

海洋生物の極方向への移動については、かねてより海洋生態系シミュレーションでも二酸化炭素排出シナリオに沿って予測研究が行われてきた¹⁰⁾。例えば、IPCC第4次報告書で公表された Special Report on Emission Scenarios (SRES) のA2と呼ばれるシナリオ (地球温暖化軽減のための政策を含まず、一般的に豊かな将来像を描く。具体的には、世界の各地域が固有の文化を重んじ、多様な社会構造や政治構造を構築し、世界の経済や政治のブロック化を仮定。国や地域間に常に緊張関係が生じ、国際的な貿易や人の移動や技術の移転の制限を想定する。経済発展は遅れ、途上国の出生率は下がらず、来世紀末の人口予測は150億人。地域間の自然資源や資産の格差、地域間の所得格差を拡大。環境への関心は相対的に低く、地域的な環境問題の深刻化のみが環境対策の動機づけとなることを想定する) の場合のシロザケの生息可能な水温範囲を予測した¹⁰⁾。シロザケは、生息する水温に敏感で、12℃以上の高い水温を嫌う傾向がある。シミュレーションの結果、2050年には、8月、9月に日本周辺にシロザケが好む水

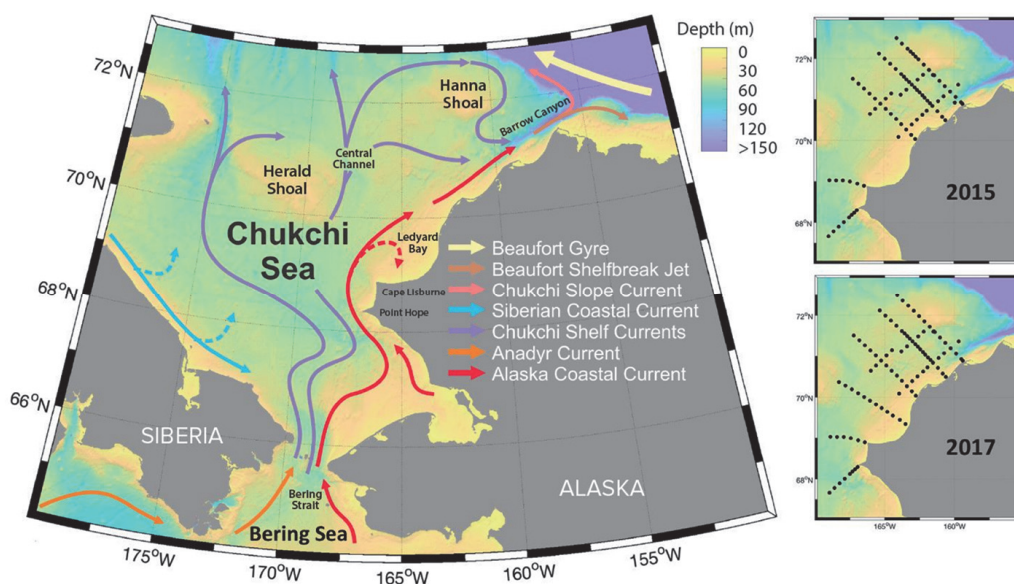


図5. 西部北極海チュクチ海を流れる主要な海流と2015年と2017年の生物分布量の観測点。(Mueter et al., 2021を改訂)

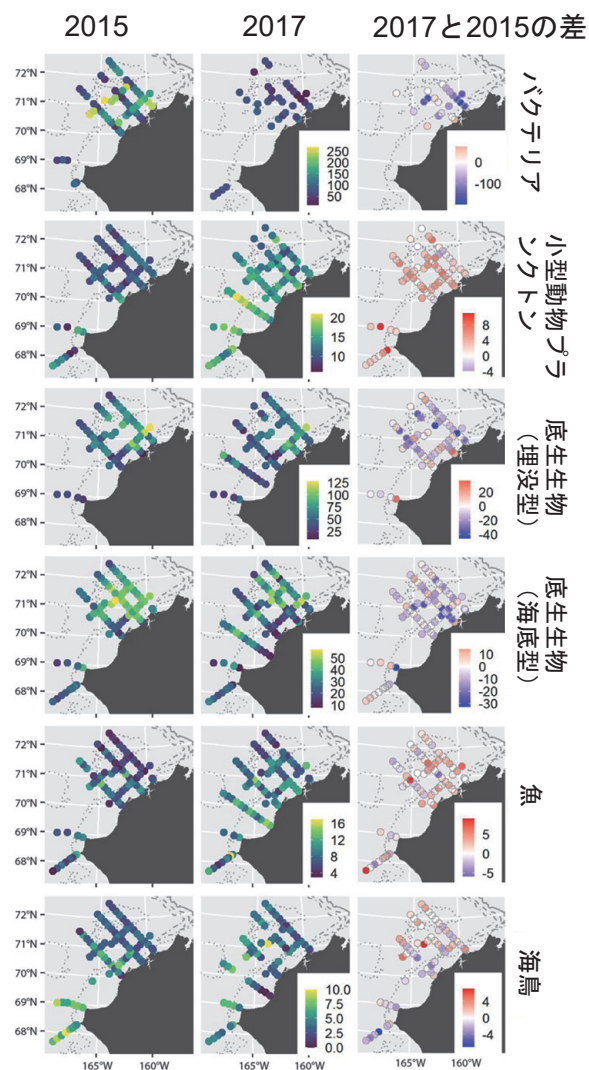


図6. バクテリア, 小型動物プランクトン, 底生生物, 魚, 海鳥の分布の2015年と2017年比較の結果. 右図は2017年と2015年の偏差を示しており, 色が赤いほど2017年の生物量がリッチ, 色が紫色であるほど2015年の生物量がリッチであることを示している. (Mueter et al., 2021 を改訂)

温環境はなくなり, 2095年には年間を通じて日本周辺にシロサケが好む水温環境が残っているのはかろうじて北海道の北部だけという状況になりそうなことがわかってきた. サケは単なる水産資源の位置付けを超え, 塩で処理した新巻鮭や塩引鮭など, 日本北方エリアの重要な食文化である. このように, 将来, 日本の食文化の1つを失うかもしれないことは大きな損失である.

4. 終わりに

北極海やその周辺海域における水温上昇, 海水

の減少, 海洋酸性化などマルチストレスによる海洋生物への影響は多様である. 水温上昇の場合, バイオマスや群集組成などの増減は不明であるが, 海域の亜寒帯化 (Borealization) を起こし生物の極方向への移動を促すものであると言える. 海水減少の場合, 大気が直接海洋表面に触れる機会が増えることから, 冷水渦・暖水渦などメソスケール渦 (直径 100 km 程度) のボリュームが増加することがわかった. 渦内部では光環境の良い表層へ栄養塩などの物質輸送が活発化し, 植物プランクトンの生産・バイオマスが増加し, 陸棚域からの水平輸送に渦の発生に伴う有機物が加わって北極海の外洋域へ輸送される有機物量全体が増加することを示した. 一方で, 世界的にも特に進行が早い極域における海洋酸性化は, 炭酸塩骨格の溶解や不完全な骨格形成によって海洋生物にとっては負の影響を促進すると言える. 以上のマルチストレスによる生物への影響は, 単にバイオマスの減少・水産資源の減少と片付けられるものではなく, 種によっては日本の食文化を失う可能性がある. 地震や台風など自然災害の多い国である日本は, 我が身に降りかかる優先すべき環境課題が目白押しである. しかし, 地震・台風に比べて, じわじわと進行し, 世代を超えて引き継がれる地球温暖化の影響を止める行動を, 今取らなければ, 将来の子や孫世代に禍根を残すことになる. このことを私たちは肝に命じるべきではないだろうか.

参考文献

- 1) Seki, O., G.L. Foster, D.N. Schmidt, A. Mackensen, K. Kawamura, and R.D. Pancost (2010) Alkenone and boron-based Pliocene pCO₂ records. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **292**, 201-211.
- 2) 1.5°Cの地球温暖化: 気候変動の脅威への世界的な対応の強化, 持続可能な開発及び貧困撲滅への努力の文脈における, 工業化以前の水準から1.5°Cの地球温暖化による影響及び

- 関連する地球全体での温室効果ガス (GHG) 排出経路に関する IPCC 特別報告書 (2018) Oct., 8, 2018 気候変動による政府間パネルによる報告 <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- 3) Arctic Report Card 2017, NOAA, <https://arctic.noaa.gov/report-card/report-card-2017/>
 - 4) Turner, J., and J. Comiso (2017) Solve Antarctica's sea-ice puzzle. *Nature* **547**, 275–277, <https://doi.org/10.1038/547275a>
 - 5) Yamamoto-Kawai, M., F.A. McLaughlin, E. C. Carmack, S. Nishino, and K. Shimada (2009) Aragonite Undersaturation in the Arctic Ocean: Effects of Ocean Acidification and Sea Ice Melt, *Science*, **326** (5956), 1098–1100.
 - 6) Harada, N. (2016) Review: Potential catastrophic reduction of sea ice in the western Arctic Ocean: its impact on biogeochemical cycles and marine ecosystems. *Global and Planetary Change*, **136**, 1–17.
 - 7) Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M.C. Honda, K. Kimoto, T. Kikuchi, S. Nishino, K. Matsuno A. Yamaguchi, A. Ishida, and M.J. Kishi (2014) Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump. *Nature Comm.*, **5** (3950), <https://doi.org/10.1038/ncomms4950>.
 - 8) Mueter, F., K. Iken, L.W. Cooper, J.M. Grebmeier, K.J. Kuletz, R.R. Hopcroft, S.L. Danielson, R.E. Collins, and D.A. Cushing (2021) Changes in diversity and species composition across multiple assemblages in the eastern Chukchi Sea during two contrasting years are consistent with borealization. *Oceanography* **34** (2), 38–51, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab122>.
 - 9) Grebmeier, J.M., K.E. Frey, L.W. Cooper, and M. Kedra (2018) Trends in benthic macrofaunal populations, seasonal sea ice persistence, and bottom water temperatures in the Bering Strait region. *Oceanography* **31** (2), 136–151, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.224>.
 - 10) Kishi M.J., M. Kaeriyama, H. Ueno, and Y. Kamezawa (2010) The effect of climate change on the growth of Japanese chum salmon (*Oncorhynchus keta*) using a bioenergetics model coupled with three-dimensional lower trophic ecosystem model (NEMURO). *Deep-Sea Res. II* **57**, 1257–1265.