

令和 3 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03736

研究課題名(和文) 北太平洋における塩分躍層の時空間変動とその生物生産への影響

研究課題名(英文) Spatiotemporal variation of the halocline and its impact on biological production in the North Pacific

研究代表者

上野 洋路 (Ueno, Hiromichi)

北海道大学・水産科学研究院・准教授

研究者番号：90421875

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：海洋の塩分躍層は、塩分が深さとともに急激に増加する層のことであり、北太平洋亜寒帯域では、成層構造や混合層深度の決定に重要な役割を果たしている。本研究では、北太平洋亜寒帯海域における塩分躍層の分布と季節変動を明らかにし、1年を通じて存在する永年塩分躍層は冬季混合層の発達に伴って形成されることを示した。また、ベーリング海北部では、冬季の海氷面積が過去最小だった2018年に初夏の成層強度が顕著に弱いことが示された。全球においても塩分躍層の分布と経年変動を調べ、大部分の海域では海面塩分が低い年に塩分躍層が強いことが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋は、大まかに「暖かくて密度の低い表層」と「冷たくて密度の高い中深層」の2層に分かれています。その2層を分ける層として水温が急激に下がる層(水温躍層)が存在しており、水温躍層の深さや強さは大気海洋相互作用や生物生産に重要な役割を果たしていることが知られています。しかし、海洋の密度は塩分の影響も受けており、特に高緯度域では塩分が深さとともに大きく増加する塩分躍層が存在しています。本研究では、広範囲にわたる塩分躍層の分布と形成メカニズムを初めて調べ、海域による違いを明らかにしました。

研究成果の概要(英文)：A halocline is a layer containing a strong vertical salinity gradient. In the subarctic North Pacific, the permanent halocline depth and intensity distributions corresponded to those of winter mixed layer depth and sea surface salinity, respectively, implying that the permanent halocline forms in association with winter mixing throughout the subarctic North Pacific. We also found that stratification in early summer in the northern Bering Sea was significantly weaker in 2018 than in 2017. This result is consistent with the extremely low sea-ice extent present in the winter of 2017/2018. We further investigated the distribution and interannual variation in the winter halocline in the upper layers of the world ocean. A halocline was observed in the tropics, equatorward portions of subtropical regions, the subarctic North Pacific and Southern Ocean, but was absent in the central subtropics.

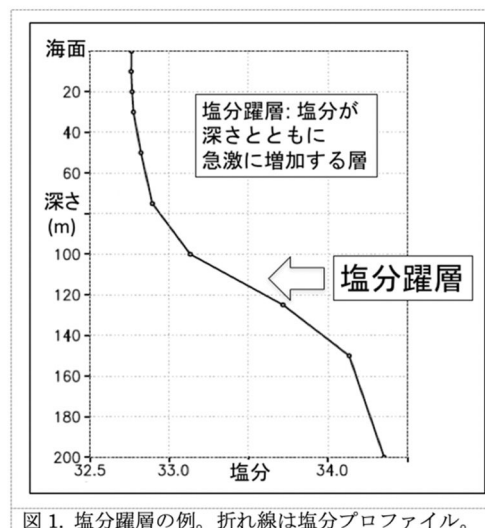
研究分野：海洋物理学

キーワード：塩分躍層 成層構造

1. 研究開始当初の背景

海洋の塩分躍層は、塩分が深さとともに急激に増加する層のことであり(図1)北太平洋亜寒帯域では、成層構造や混合層深度の決定に重要な役割を果たしている。塩分躍層は、混合層深度変化を通じて生物生産の大きさやタイミングにも大きな影響を及ぼすと考えられるが、その強さや深度など基本的情報に関しても定量的な議論はなされてこなかった。

全球海洋の表層塩分は過去数十年に大きく変動したと指摘されている(Hosoda et al., 2009)。この変動は、2000年に始まったArgoフロートと呼ばれる自動観測ロボットによる全球の表～中層観測データと過去の船舶観測データを併せて解析することによって示された。これらの塩分変動からは、全球の水循環の強化が示唆されており、数値モデルにより水循環は将来さらに強化されることが予測されている(Durack et al., 2012)。また、北太平洋では、西部亜寒帯海域で表層塩分が低下することによりオーバーターニング循環が弱体化、中層水温が上昇したことが指摘されている(Nakanowatari et al., 2015)。



塩分躍層を含む塩分成層の時空間変動に関しては、個々の海域、観測ラインにおける研究として数多く実施されてきた。例えばOka et al. (2017)は、過去50年間で北太平洋西部熱帯域の塩分成層が強化されていることを指摘しており、Nagano et al. (2016)は、1990年代後半から2000年代中頃にかけて北太平洋西部亜寒帯海域の塩分躍層底部深度が大きくなったことを指摘している。さらに、縁辺海陸棚域の研究ではあるが、Ladd and Stabeno (2012)は、ベーリング海南東部陸棚域における水温、塩分の成層状態を成層インデックスにより定量化し、成層における塩分の役割を定量化、さらに9月のクロロフィル濃度が8月の成層強度と相関があることを指摘した。このように、北太平洋の多くの海域で塩分躍層の強さ、深度の変化、さらにはその生物生産への影響が議論されているが、北太平洋全体を対象とした定量的な研究はなされていなかった。このため、各研究で指摘された変化やそのメカニズムが、どの程度の空間スケールを持つのかは不明であり、大部分の海域では塩分躍層の特徴や変動そのものも明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、北太平洋を中心に塩分躍層の水平・深度分布、季節・経年変動の実態とその時空間変動メカニズムの把握を目的として研究を実施した。具体的海域としては、(1)北太平洋亜寒帯海域全域、(2)北太平洋の縁辺海の一つであるベーリング海北部、さらに(3)全球を対象として研究をおこなった。

- (1) 北太平洋亜寒帯海域においては、塩分躍層の平均的空間分布と季節変動の理解を主なターゲットとして研究を実施した。具体的には、浅い季節塩分躍層と深い永年塩分躍層の分離、さらにそれらの時空間分布と冬季混合層との関係にターゲットを絞って解析を行った。
- (2) ベーリング海北部に関しては、2017/2018年冬季に海氷面積が過去最少であったことが知られている。本研究では、2018年初夏の海洋観測データにプラスして、2017年・2013年のデータも解析することにより、冬季海氷分布が初夏の成層強度に与える影響の理解を試みた。
- (3) 塩分躍層は限られた海域や観測ラインのみで議論されていたことから、大部分の海域では塩分躍層の特徴や変動そのものも明らかになっていなかった。そこで、全球のどの海域のどの深度にどれくらいの強さの塩分躍層が存在するのか、さらにその変動とメカニズムを明らかにするために、全球の海洋データの解析を実施した。

3. 研究の方法

(1) 北太平洋亜寒帯海域、(2) ベーリング海北部、(3) 全球を対象とした研究は、主に海洋観測データ(塩分・水温・圧力データ)解析を中心に実施した。(1)では2003~2017年のアルゴフロートデータを、(2)では北海道大学水産学部附属練習船おしよる丸によって2013・2017・2018年初夏に取得されたデータを、(3)全球を対象とした研究ではWorld Ocean Database 2013に掲載されているデータを主に使用した。

塩分躍層や成層強度に関しては複数の定義を用いて研究を実施した。(1)ではある閾値を超える鉛直勾配を持つ塩分極大を塩分躍層と定義、(2)では、Ladd and Stabeno (2012)の成層強度インデックスを元に新たな成層強度指標を作成した。(3)では、全30層10m間隔の塩分標準層データを作製し、塩分鉛直勾配を全29層で計算した。そのうち最も勾配が大きい層を塩分躍層と定義し、その強さを塩分躍層強度と定義した。

4. 研究成果

(1) 北太平洋亜寒帯海域における塩分躍層の分布と季節変動

2003~2017年のアルゴフロートデータ、海面フラックスデータ等を用いて、塩分躍層の分布と季節変動に関する研究を実施した結果、永年塩分躍層は、北太平洋亜寒帯域東部において浅く強く、西部において深く弱いことが示された。永年塩分躍層の平均深度と強さは、それぞれ冬季混合層深度と海面塩分に対応しており、冬季混合層の発達に伴って永年塩分躍層が形成されていることが示された。比較的強い永年塩分躍層が形成される西部亜寒帯循環とアラスカ循環においては、永年塩分躍層の強さと深度は顕著な季節変動を示し、海面冷却期における混合層の発達がその下の永年塩分躍層を圧縮、晩冬にむけて永年塩分躍層が強化発達されることが示された。西部亜寒帯循環とアラスカ循環では、高塩分水の湧昇も永年塩分躍層の強化に関係していた。また、永年塩分躍層とは異なり、夏季の季節塩分躍層はその頻度と強さにおいて顕著な東西差を示した。季節塩分躍層は西部・中央・沿岸域では形成されたが、東部海域ではほとんど存在していなかった。この季節塩分躍層の東西差は海面加熱期の混合層の低塩化、特に淡水フラックスに対応していた。また、地衡流とエクマン流は季節塩分躍層の強さと深さの空間分布に重要な役割を果たしていた。季節塩分躍層の発達は、エントレインメントを通じて永年塩分躍層上部の塩分を低下させることにより、冬季永年塩分躍層の強化に影響を与えていることが示された。

本研究により、北太平洋亜寒帯海域における塩分躍層の空間分布と季節変動が初めて明らかになった。この塩分躍層は、水温の鉛直構造、特に水温逆転構造に影響を与えていることから、熱の鉛直輸送にも影響を与えていると考えられる。また、塩分躍層の存在は生物化学的なパラメータの鉛直分布にも影響を与えることから、本研究によって塩分躍層の時空間変動が明らかになったことにより、北太平洋亜寒帯海域の水温や生物化学的な構造の理解が進むことが期待される。本研究成果はKatsura et al., JPO (2020)にて印刷公表済みである。

(2) 2017・2018年北部ベーリング海における成層強度の時空間変動とその要因

2013、2017、2018年で成層強度を比較したところ、海氷面積が過去最小を記録した2018年の初夏は、全体的に2013、2017年より成層強度が小さいことが示された。しかし、ベーリング海峡を含む北部はどの年も成層強度が小さく経年変動が小さい一方、セントローレンス島南西部では2018年の成層強度が他の2年より小さいなど、海域による違いが見られた。また2018年の64.5°Nの東西ラインの成層強度は東部と西部に明確な差が見られた。168.5°W以東は2017年と同程度の成層強度の大きさを示す一方、168.5°W以西は成層強度がとても小さい。これらの特徴から、北部ベーリング海を北部(ベーリング海峡周辺)、64.5°N東部、64.5°N西部、セントローレンス島南西部の4海域に分割した。

セントローレンス島南西部と64.5°N東部では2018年の成層強度がほかの年に比べて小さかった一方で、北部と北緯64.5°N西部では成層強度が2013、2017年と同程度の大きさだった(図2)。このように海域による変動が異なっているのは、アラスカ沿岸を北上する高水温・低塩分のアラスカ沿岸水が、アラスカ沿岸域の成層に大きな影響を与えているからと考えられる(図3)。また、2018年の観測後半の低気圧通過の前後で南北ラインの海洋構造を比較したところ、成層強度が通過前と比べて1桁大きくなっていることが示された。これは、北風の卓越による西向きエクマン流が生じ、表層にアラスカ沿岸水が流入したためと示唆された。

以上のように、海氷面積の経年変動は、初夏の成層強度に大きな影響を与えるが、海域によって

その程度は異なり、また、低気圧通過などによる短期的変動も無視できないことが示された。本海域における成層状態は、生物生産に大きな影響を与えることから、今後、生物化学パラメータと関連づけた研究を実施する必要がある。本研究成果は Ueno et al., DSR II (2020) にて印刷公表済みである。

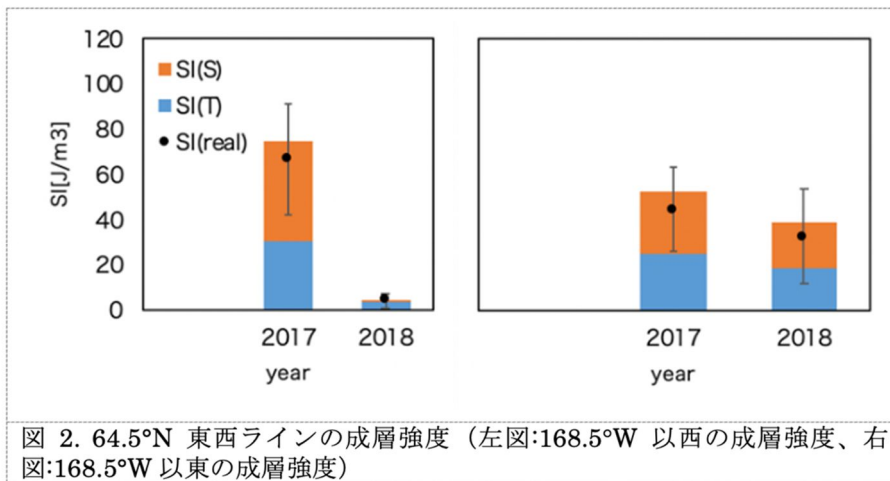


図 2. 64.5°N 東西ラインの成層強度 (左図:168.5°W 以西の成層強度、右図:168.5°W 以東の成層強度)

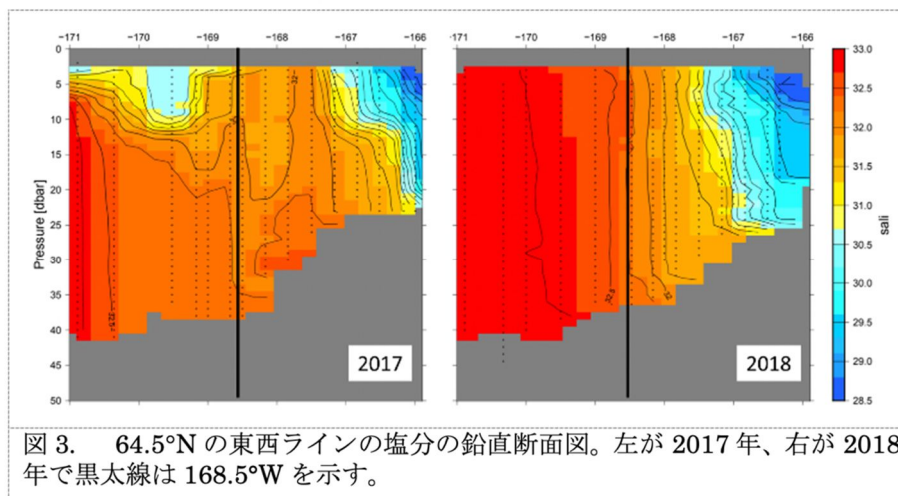


図 3. 64.5°N の東西ラインの塩分の鉛直断面図。左が 2017 年、右が 2018 年で黒太線は 168.5°W を示す。

(3) 全球における冬季塩分躍層の分布と年々変動

冬季混合層を通じて植物プランクトンの春季ブルームに影響を与えると考えられる冬季塩分躍層に注目してデータ解析を実施した。その結果、冬季塩分躍層は全球の熱帯域、亜熱帯域赤道側、北太平洋亜寒帯海域、南大洋で顕著であることが示された。また、塩分躍層の強さと海面塩分の分布相関解析から、冬季塩分躍層強度の空間分布は、海面塩分によって規定されていること、すなわち海面塩分が低い海域で強い塩分躍層が観測されることが示された。また、全球各海域における塩分躍層の経年変動を調べたところ、その変動の大きさは海域によって異なるものの、概ね海面塩分の低い年に塩分躍層が強いことが示された。しかし、北太平洋亜寒帯東部のアラスカ湾では、海面塩分が高い年に塩分躍層が強くなること示され、その原因は風によるアラスカ循環の変動であることが示唆された。本研究成果は Journal of Physical Oceanography 誌に投稿中である。

< 引用文献 >

- Durack, P. J., S. E. Wijffels, R. J. Matear, 2012: Ocean Salinities Reveal Strong Global Water Cycle Intensification During 1950 to 2000. *Science*, 336:6080, 455–458.
- Hosoda, S., T. Suga, N. Shikama, and K. Mizuno, 2009: Global surface layer salinity change detected by Argo and its implication for hydrological cycle intensification. *J. Oceanogr.*, 65, 579–586.
- Katsura, S., H. Ueno, H. Mitsudera, S. Kouketsu, 2020: Spatial Distribution and Seasonality of Halocline Structures in the Subarctic North Pacific, *Journal of Physical Oceanography*, 50(1), 95–109.
- Ladd, C., P.J. Stabeno, 2012: Stratification on the Eastern Bering Sea shelf revisited. *Deep Sea Res. Part II*, 65, 72–83.

- Nagano, A., M. Wakita and S. Watanabe, 2016: Dichothermal layer deepening in relation with halocline depth change associated with northward shrinkage of North Pacific western subarctic gyre in early 2000s. *Ocean Dynamics* 66, 163–172,
- Nakanowatari, T., H. Mitsudera, T. Motoi, I. Ishikawa, K.I. Ohshima, M. Wakatsuchi, 2015: Multidecadal-scale freshening at the salinity minimum in the western part of North Pacific: importance of the wind-driven cross-gyre transport of the subarctic waters to the subtropical gyre, *J. Phys. Oceanogr.*, 45, 988–1008
- Oka, E., S. Katsura, H. Inoue, A. Kojima, M. Kitamoto, T. Nakano, and T. Suga, 2017: Long-term change and variation of salinity in the western North Pacific subtropical gyre revealed by 50-year long observations along 137°E, *J. Oceanogr.*, 73, 479–490.
- Ueno, H., M. Komatsu, Z. Ji, R. Dobashi, M. Muramatsu, H. Abe, K. Imai, A. Ooki, T. Hirawake, 2020: Stratification in the northern Bering Sea in early summer of 2017 and 2018, *Deep-Sea Research Part II*, 181–182, 104820.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Katsura, S., H. Ueno, H. Mitsudera, S. Kouketsu	4. 巻 50
2. 論文標題 Spatial Distribution and Seasonality of Halocline Structures in the Subarctic North Pacific	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physical Oceanography	6. 最初と最後の頁 95-109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JPO-D-19-0133.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ueno, H., M. Komatsu, Z. Ji, R. Dobashi, M. Muramatsu, H. Abe, K. Imai, A. Ooki, T. Hirawake	4. 巻 181-182
2. 論文標題 Stratification in the northern Bering Sea in early summer of 2017 and 2018	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Deep-Sea Research Part II	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.dsr2.2020.104820	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yasunaka, S., H. Mitsudera, F. Whitney, S. Nakaoka	4. 巻 77
2. 論文標題 Nutrients and dissolved inorganic carbon variability in the North Pacific	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 3-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-020-00561-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 3件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Oda, M., H. Ueno, K. Yasui, H. Mitsudera
2. 発表標題 Global distribution and interannual variation of winter halocline
3. 学会等名 PICES 2019 Annual Meeting（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田正人, 上野洋路, 安井桂, 三寺史夫
2. 発表標題 全球における冬季塩分躍層の分布と年々変動
3. 学会等名 2018年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Humio Mitsudera
2. 発表標題 Dynamical frontogenesis in the transitional regions between the subtropical and the subpolar gyres
3. 学会等名 JpGU 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Humio Mitsudera, Toru Miyama, Hajime Nishigaki, Takuya Nakanowatari, Hatsumi Nishikawa, Tomohiro Nakamura, Taku Wagawa, Ryo Furue, Yosuke Fujii, and Shin-Ichi Ito
2. 発表標題 Formation and interannual variations of baroclinic quasi-stationary jets in the transitional domain between the subtropical and subarctic gyres in the western North Pacific
3. 学会等名 PICES-2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上野洋路, 小松瑞紀, 吉兆千一, 土橋稜, 村松美幌, 阿部泰人, 今井圭理, 大木淳之, 平譚享
2. 発表標題 2017・2018年北部ベーリング海における成層強度の時空間変動とその要因
3. 学会等名 2020年度日本海洋学会秋季大会 (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Mitsudera, T. Miyama, H. Nishikawa
2. 発表標題 Impacts of riverine discharges on the overturning circulation and material circulation in the Sea of Okhotsk and the North Pacific Ocean
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三寺史夫、美山透、白岩孝行、史穆清、小松謙介、立花 義裕、中田聡史、西川はつみ
2. 発表標題 カムチャツカ半島からの淡水供給が制御するオホーツク海と北太平洋の子午面循環
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mitsudera, H., T. Miyama, T. Shiraiwa, Y. Tachibana, K. Komatsu, H. Nishikawa
2. 発表標題 Surface water pathways and land-ocean freshwater linkages associated with the meridional overturn that ventilates the intermediate layer of the Sea of Okhotsk and North Pacific Ocean
3. 学会等名 The 35th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	三寺 史夫 (Mitsudera Humio) (20360943)	北海道大学・低温科学研究所・教授 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------