

## [27]全国共同利用研究成果報告

<https://hdl.handle.net/2324/7431319>

---

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 27, pp.1-, 2024-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



## 対馬暖流の中・長期変動とその要因

東京大学大気海洋研究所 矢部いつか

## 1. 背景

亜熱帯循環由来の温暖な黒潮を起源とする対馬暖流は、マイワシなどの水産有用種の成長・生残な好適な環境を日本海南部にもたらす。また、対馬海峡から流入する黒潮水は日本海における最大の栄養塩供給源であり、日本海内部の基礎生産を支える (Onitsuka and Yanagi, 2005; Kodama et al., 2015)。一方で、栄養塩濃度は水深とともに増加するため、日本海内部の中深層にも大量の栄養塩が存在する。近年の物理モデルと生態系モデルを組み合わせた数値実験によると、沖合ほど、日本海内部の鉛直的な栄養塩供給の割合が高いことが示唆された (Shibano et al., 2019)。冬季には、海面冷却と強い季節風による深い鉛直対流が中層の栄養塩を有光層に供給するものの、とくに栄養塩が乏しい夏季～秋季の混合プロセスは明らかとなっていない。

沖合域で中深層の栄養塩を有光層にもたらす水塊混合プロセスとして、①フロント域に発生する湧昇流、②渦やフロントの影響を受けた近慣性内部波の碎波、③海流と海底地形の相互作用による鉛直混合・湧昇が考えられる。いずれのプロセスにも対馬暖流および対馬暖流が日本海内部に作り出すフロント構造が重要となる。本研究の最終的なゴールは、日本海南部における極前線・対馬暖流や関連する渦構造を介した水塊混合を明らかにすることである。日本海内部の物質循環や生態系変化の理解には対馬暖流と関連する日本海内部での混合に関する理解が欠かせない。半閉鎖的な日本海では、すでに温暖化の影響による水温上昇や深層水形成量の減少などが観測データから示されている (Gamo et al., 2014; Senju, 2022)。また、対馬海峡からの流入量は増加トレンドにある (Kida et al., 2020)。そこで本研究では、長期的な海洋観測データに基づき日本海内部の栄養塩分布の海域間の違いと栄養塩の供給源を明らかにすること、対馬暖流のフロント域に着目した海洋観測データに基づき乱流強度を調べることを目的とする。

## 2. データ

気象庁が公開している海洋気象観測船による海洋・海上気象観測資料を使用した ([https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/vessel\\_obs/data-report/html/ship/ship.php?year=2020&season=fall#kisetsu](https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/vessel_obs/data-report/html/ship/ship.php?year=2020&season=fall#kisetsu))。日本海では毎年 9～11 月に海洋観測が実施されており、若狭湾口の越前岬から大和堆を結ぶ PM ラインと呼ばれる定線も存在する。解析には 9 年間 (2012 年から 2020 年) の CTD データ (水温、塩分、水深) および採水サンプルを用いた栄養塩分析の結果を使用した。さらに、対馬暖流周辺の乱流強度を調べるため、2019 年から 2021 年に実施した対馬暖流のフロントを横断する複数回の CTD・乱流観測のデータを使用した。

## 3. 結果

## (1) 日本海内部の栄養塩プロファイル

日本海を南西部 (40°N 以南、136°E 以西)、南東部 (40°N 以南、136°E 以西)、北部 (40°N 以北) の 3 海域に分けて平均した硝酸塩の鉛直プロファイルを図 1 に示す。23.6–27.2  $\sigma_\theta$  の全密度帯で南部の硝酸塩濃度は北部よりも高い (図 1a)。極前線周辺では、等密度面混合により北部の低塩分・高 DO の表層水が南部の中層に潜り込むことが知られているが、等密度面混合では、北部から南部に栄養塩を供給しない。なお、水深を基準とした栄養塩分布はいずれの海域においても水深とともに増加し、南部よりも北部で濃度が高い (図 1b)。つまり、日本海南部の有光層に栄養塩を供給するには、密度面を横切る水平・鉛直混合が必要となる。

日本海内部の基礎生産を支える栄養塩の供給源が黒潮である根拠の一つが硝酸塩極大を持つ水深 (密度) が対馬海峡の水深と概ね一致するという点である (Kodama et al., 2015)。対馬暖流の入口に近い日本海南西部では 25.0  $\sigma_\theta$  付近に硝酸塩濃度の極大値を持つのにに対し、日本海北部および南東部では、密度の増加に伴い硝酸塩濃度は上昇する (図 1a)。黒潮由来の栄養塩の大半が南西部で消費され、南東部

ではその影響が小さくなっていることが示唆された。

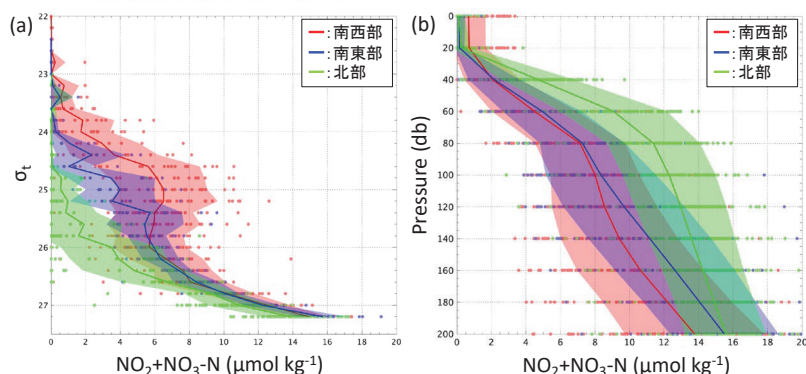


図 1: 硝酸塩と亜硝酸塩の海域別の平均プロファイル。縦軸はそれぞれ(a)密度と(b)圧力であり、平均値を太線、1 標準偏差の範囲をハッチで示す。

### (2) 気象擾乱通過後の栄養塩分布と水塊混合

2008 年 10 月の PM ラインに沿った水温、塩分、硝酸塩の鉛直断面図を図 2 に示す。水深 50–150 m 付近には黒潮由来の高温・高塩分の水塊が、水深 50 m 以浅には高塩・低塩分の長江希积水が分布する (図 2a, b)。硝酸塩濃度は 38.5°N の水深 50 m 付近で局所的に高い ( $\sim 10 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 、図 2c)。観測直前には低気圧が日本海を縦断しており、人工衛星で観測した海洋観測後の海面クロロフィル分布でも、パッチ状にクロロフィル濃度が高くなっていた。対馬暖流が形成するフロント域や高気圧性渦の縁辺では、相対的に強い乱流混合が観測されており、近慣性内部波の混合に寄与することが示されている (Kawaguchi et al., 2021)。2008 年以外にも同様の事例を複数捉えられた。これらの結果は、近慣性内部波が水塊混合のみならず基礎生産に影響を与え得る下層からの栄養塩供給にも寄与することを示唆する。

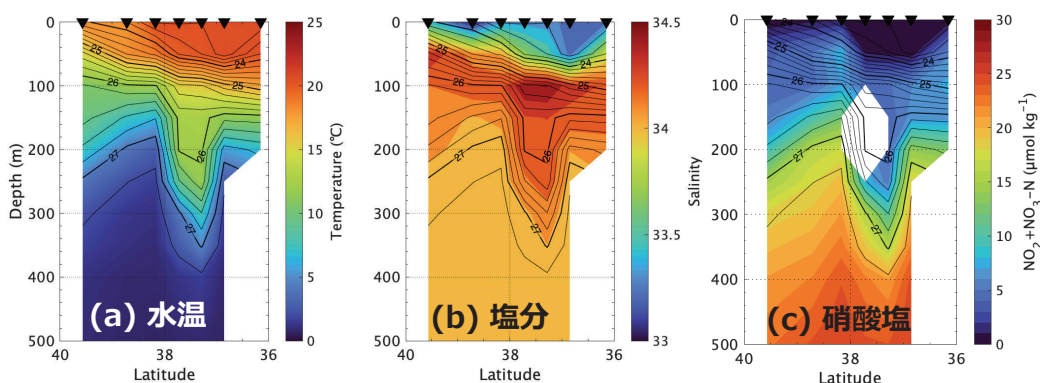


図 2: 2008 年 10 月の PM ラインに沿った(a)水温、(b)塩分、(c)硝酸塩の鉛直断面図。いずれの図も等値線は密度を示す。

### (3) 対馬暖流のフロント域の乱流強度と拡散係数

次に、能登半島の西側から大和堆を結ぶ観測ラインで 2020 年 8 月に実施した乱流観測の結果を図 3 に示す。観測時には 36.7°N 付近に対馬暖流の沿岸分枝が、37.6°N 付近に沖合分枝が流れていた。パッチ状ではあるものの、乱流逸散率が周囲よりも 2–3 桁大きい領域  $\sim O(10^{-7} \text{ W kg}^{-1})$  が 37.5°N 付近の水深 200–300 m に存在した。対馬暖流由来の高塩分水の底部に位置する。乱流逸散率から算出した鉛直拡散係数は  $O(10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$  程度であり、沖合域としては比較的大きな値を示した。2019 年、2021 年に実施し

た観測でも同様に対馬暖流水もしくはその下部の密度帯で乱流逸散率が周囲よりも高くなっており、局所的ではあるものの、継続的な強い鉛直混合と下層からの栄養塩供給が示唆される。今後は算出した拡散係数と同航海で実施した栄養塩サンプルの分析結果を組み合わせることで栄養塩フラックスを見積もる予定である。

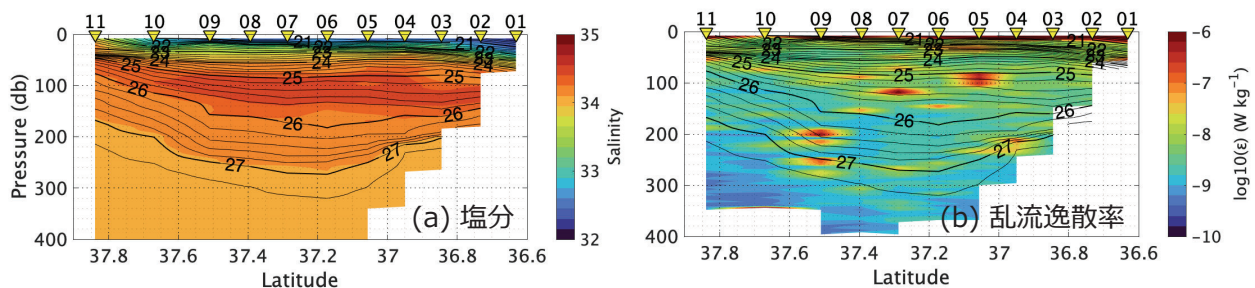


図 3: 2020 年 8 月の YR ラインの塩分と乱流逸散率。いずれの図も等値線は密度を示す。

#### 4. まとめと今後の課題

日本海内部での水塊混合・物質循環を理解するための第一歩として、日本海南部の栄養塩循環を調べた。対馬海峡に近い日本海南西部では黒潮由来と言われる栄養塩極大が明瞭であるものの、日本海南東部および北部ではその影響が小さくなることで密度平均した栄養塩分布から明らかとなった。また、密度平均した栄養塩濃度は日本海北部よりも南部で高いため、等密度面混合では北部から南部への栄養塩供給は起こり得ない。そのため、密度面を横切る水平・鉛直混合が栄養塩の有光層への供給に必要となる。対馬暖流水およびその底部では局所的に強い乱流が観測されており、下層からの栄養塩供給の重要性が示唆される。今後は、硝酸塩センサーを用いた鉛直解像度の細かい観測と乱流観測を組み合わせることで硝酸塩フラックスを見積もり、対馬海峡からの栄養塩流入量との比較することで、下層からの栄養塩供給の重要性を評価する。

#### 5. 研究組織

東京大学大気海洋研究所 矢部いつか (研究代表者)  
 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 和川拓 (研究協力者)  
 九州大学応用力学研究所 木田新一郎 (所内世話人)

#### 参考文献

- [1] Onitsuka, G., and T., Yanagi (2005), Differences in Ecosystem Dynamics between the Northern and Southern Parts of the Japan Sea: Analyses with Two Ecosystem Models. *J. Oceanogr.*, Vol. 61, pp. 415 to 433.
- [2] Kodama, T., H. Morimoto, Y. Igeta, and T. Ichikawa (2015), Macroscale-wide nutrient inversions in the subsurface layer of the Japan Sea during summer, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 7476–7492, doi:10.1002/2015JC010845.
- [3] Shibanoa, R., A., Morimoto, K., Takayama, T., Takikawa, M. Ito (2019), Response of lower trophic ecosystem in the Japan Sea to horizontal nutrient flux change through the Tsushima Strait. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 229, 106386, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106386>.
- [4] Kawaguchi, Y., T. Wagawa, I., Yabe, D., Ito, T. Senju, S. Itoh, and Y. Igeta (2021), Mesoscale-dependent near-inertial internal waves and microscale turbulence in the Tsushima Warm Current. *J. Oceanogr.* 77, 155–171.
- [5] Gamo, T., et al. *Monogr. Environ. Earth Planets* 2, 1 (2014)
- [6] Senju, T. (2022), Changes in Mid-Depth Water Mass Ventilation in the Japan Sea Deduced From Long-Term Spatiotemporal Variations of Warming Trends. *Front. Mar. Sci.* 8:766042. doi: 10.3389/fmars.2021.766042.
- [7] Kida, S., K., Takayama, Y. N., Sasaki, H. Matsuura, N. Hirose (2020), Increasing trend in Japan Sea Throughflow transport. *J. Oceanogr.*, doi:10.1007/s10872-020-00563-5.