

黒潮が屋久島南方に生成する反時計回りの冷水渦周辺にて 栄養塩の舌状湧昇を捉えることに成功

黒潮が屋久島南方で生成した冷水渦が、黒潮に沿って列を成して下流へと伝播しながら、400km 下流域における基礎生産の約 1 割を支えている可能性を示唆

ポイント

- ✓ 自由落下曳航式プロファイラーによる高解像度断面観測によって、屋久島南方の冷水渦周辺で、栄養塩が舌状に湧昇する様子を初めて捉えました。
- ✓ 栄養に乏しい黒潮表層へ渦が供給した栄養塩は、それを消費する植物プランクトンが動物プランクトンに捕食されるため使われず残り、広範囲に及ぶ黒潮下流域の生物生産に寄与する可能性が示されました。

国立大学法人東京海洋大学（学長：井関 俊夫、以下「東京海洋大学」）大学院海洋科学技術研究科 博士後期課程 3 年 応用環境システム学専攻の Duran Gomez Gloria Silvana、東京海洋大学学術研究院海洋環境科学部門 長井健容准教授らの研究グループは、黒潮が九州南方のトカラ海峡に位置する屋久島に接近して流れる際に、直径 10km 程度の冷水渦を生成し、大量の栄養塩を下層から湧昇させることを明らかにしました。

北太平洋の西岸境界流である黒潮は、日本南岸を北上し大量の熱と物質を北向きに輸送しています。その表層には植物プランクトンの増殖に欠かせない栄養が乏しいにもかかわらず、上流域では多くの浮魚が産卵し、回遊魚は生育場、回遊経路として黒潮を利用しています。近年の研究では、貧栄養の表層とは対照的に、黒潮の亜表層は、大量の栄養塩を下流へ運ぶ栄養塩ストリームであることを報告されています。また、黒潮は頻繁に複雑な海底地形や島近傍を流れるため、著しい乱流混合や渦の生成に伴う下層からの栄養塩の供給が期待できますが、渦に伴う栄養塩の湧昇を示す観測結果はこれまで存在せず、詳細なメカニズムや影響は解っていませんでした。

本研究グループは、自由落下曳航式プロファイラー^{注1)}を用いて、複数年にわたって海山上を流れるトカラ海峡における黒潮の高解像度観測を実施し、黒潮が、トカラ海峡の屋久島南方で、直径 10km 程度の冷水渦を頻繁に生成し、その渦周辺で栄養塩が舌状に湧昇する様子を初めて捉えることに成功しました。また、数値シミュレーションを用いて詳しくそのメカニズムや影響を調査したところ、供給された栄養塩が、複雑な低次生態系応答^{注2)}を経て、広範におよぶ黒潮下流域の生物生産を支えている可能性が示されました。

本研究成果は、2025 年 7 月 2 日（英国時間）に科学誌「Scientific Reports」のオンライン版で公開されました。

<研究の背景と経緯>

北太平洋の西岸境界流である黒潮は、その表層で、植物プランクトンの増殖に欠かせない栄養に乏しく、高温高塩分の海水を北向きに運んでいます。一体何故、栄養が乏しい黒潮の上流域で多くの浮魚が産卵し、生育場、回遊経路として回遊魚が黒潮を利用するのか、どのように黒潮を利用する魚類の餌が維持されているのかは、海洋学において長らく未解明でした。一方、近年の研究は、黒潮の亜表層は、その表層とは対照的に、大量の栄養塩を下流へ運ぶ栄養塩ストリームであることを報告しています。加えて黒潮は頻繁に複雑な海底地形上を流れ、最近の本研究グループの現場観測から、トカラ海峡の海山上を黒潮が流れる際に、著しい乱流混合とそれに伴う下層からの栄養塩の供給が発生することが明らかになりつつあります。しかしながら、乱流だけでなく、黒潮が島に接近して流れる際には、島の背後に渦が生成されることも知られており、この渦がどの程度栄養塩を下層から吸い上げ栄養塩の湧昇が発生するのか、それに依存する植物プランクトンや動物プランクトンはどのように応答するのかは、よく解っていませんでした。また島の背後にできる渦に限らず、近年の数値シミュレーション結果は、渦の縁辺で栄養塩が舌状に湧昇することを示していますが、それを観測で捉えた例はこれまでありませんでした。

<研究の内容>

本研究グループは、複数年にわたってトカラ海峡における海山上の黒潮における乱流や、島背後の冷水渦の構造、栄養塩濃度、植物プランクトンの量を表す光合成色素(クロロフィル a)濃度に関する高解像度な観測を、自由落下曳航式プロファイラーを用いて実施してきました。観測の結果、黒潮が、トカラ海峡の屋久島に接近する際に、直径 10km 程度の冷水渦を生成し、その渦周辺で栄養塩を舌状に湧昇させる様子を観測によって初めて捉えることに成功しました。また、動植物プランクトンや栄養塩を考慮した物理生態系シミュレーションを用いて詳しくそのメカニズムや影響を調査したところ、屋久島南方で黒潮が生成した冷水渦の東側で発散流^{注 3)}が発生し、正味で数 $10\text{mmol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ 程度の非常に大きな栄養塩(硝酸塩)の湧昇が発生することが明らかとなりました。さらに、シミュレーションの結果は、表層に供給された栄養塩は、小型植物プランクトンが消費しつつ、これが小型動物プランクトンに迅速に捕食されることを示しました。つまり、栄養塩が湧昇によって供給されても、1-2 日程度は小型の植物プランクトンが増加できますが、その後は小型動物プランクトンに捕食されるため、植物プランクトンの増加はあまり明瞭に見られず、供給された栄養塩の多くが使われないまま黒潮によって下流へ運ばれることを意味します。シミュレーション内で動物プランクトンを考慮しない仮想的な追加実験を行ったところ、植物プランクトンは捕食されないため、動物プランクトンを考慮した場合の 3 倍程度まで増殖することがわかりました。これらの研究結果は、表層が貧栄養である黒潮海域における栄養塩供給が、複雑な低次生態系応答を引き起こし、供給された栄養塩が使われず、広範におよぶ黒潮下流域の生物生産を支えている可能性を示唆する非常に興味深い研究成果といえます。

<今後の展開>

本研究によって、これまでシミュレーションでしか示されていなかった渦縁辺の栄養塩の舌状湧昇を、観測から捉えることに成功しました。また、生態系モデルシミュレーションを用いて、動物プランクトンの迅速な捕食によって、植物プランクトンの増殖と黒潮表層に渦が供給した栄養塩の消費が抑制され、供給された栄養塩の影響がより下流まで及ぶ可能性が示唆されました。一方で、このような複雑な低次生態系応答を裏付ける現場観測結果は、未だ十分に得られていません。また、大気から海洋が吸収した二酸化炭素の深海

への隔離に重要な、有機炭素の沈降が、渦に伴う栄養塩供給によって、どこでどの程度発生するのかについても余り解っていません。今後は、捕食者である動物プランクトンや、マリンスノーなどの粒状有機炭素を、カメラによる連続撮影を断面的に実施して、どの程度の有機炭素の沈降が黒潮栄養塩ストリーム^{注 4)}に沿って発生しているのかを明らかにする必要があります。

また、屋久島南方において本観測で捉えた低気圧性渦は、秋から冬にかけて発生したものです。この渦の生成がどのような季節変動を持つのか、また地球温暖化に伴う黒潮のトカラ海峡における琉軸変化^{注 5)}や流量変化によって、今後どの様に変遷していくのかに関して、さらなる研究の展開が期待できます。

さらに、黒潮が島近傍で生成する渦は、今回観測された表層のものだけではなく、亜表層にも存在します。この亜表層の渦は、亜表層にのみに渦巻く流れがあり、表面にはその兆候を全く示しません。この亜表層の渦の生成メカニズムと物質輸送、栄養塩供給に果たす役割についても、今後の研究の進展が望まれます。

<参考図>

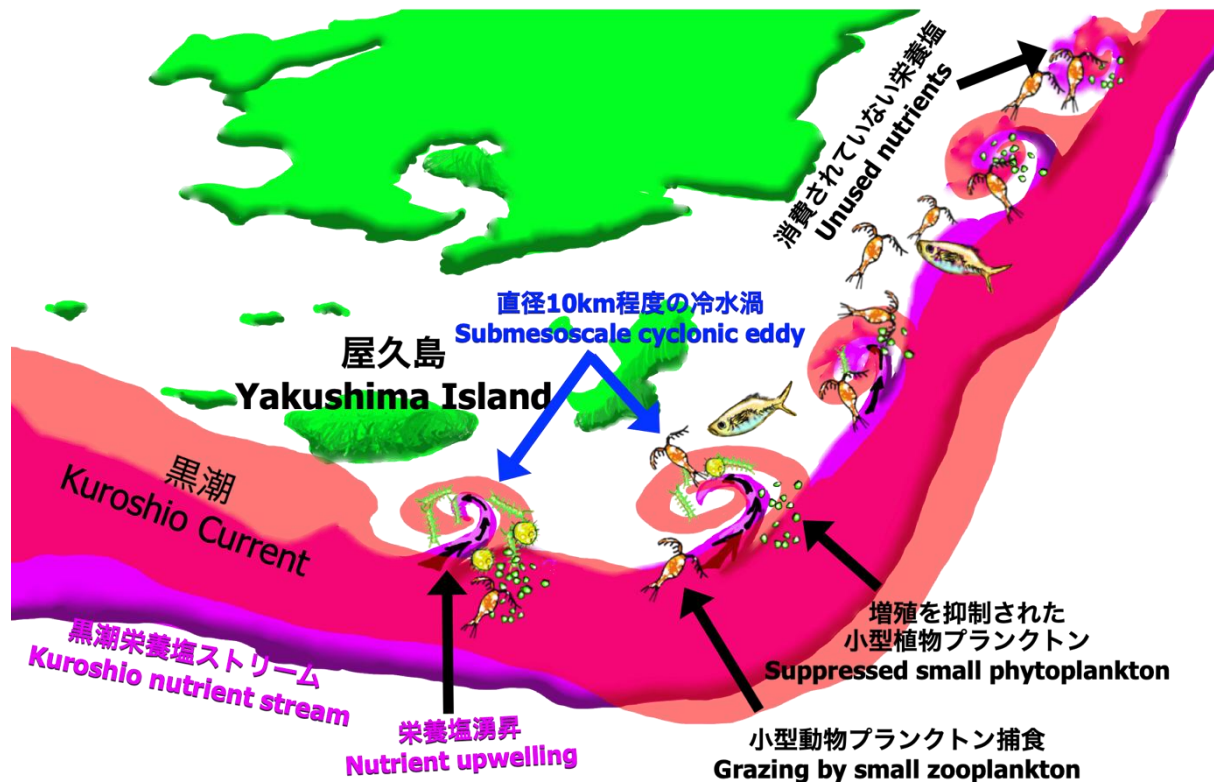


図 1：本研究の模式図

屋久島南方で黒潮が生成した直径 10km 程度の渦の東側から栄養塩が湧昇する。当初小型の植物プランクトンが増殖するが、小型の動物プランクトンに迅速に捕食され、消費されない栄養塩が下流まで運ばれる。

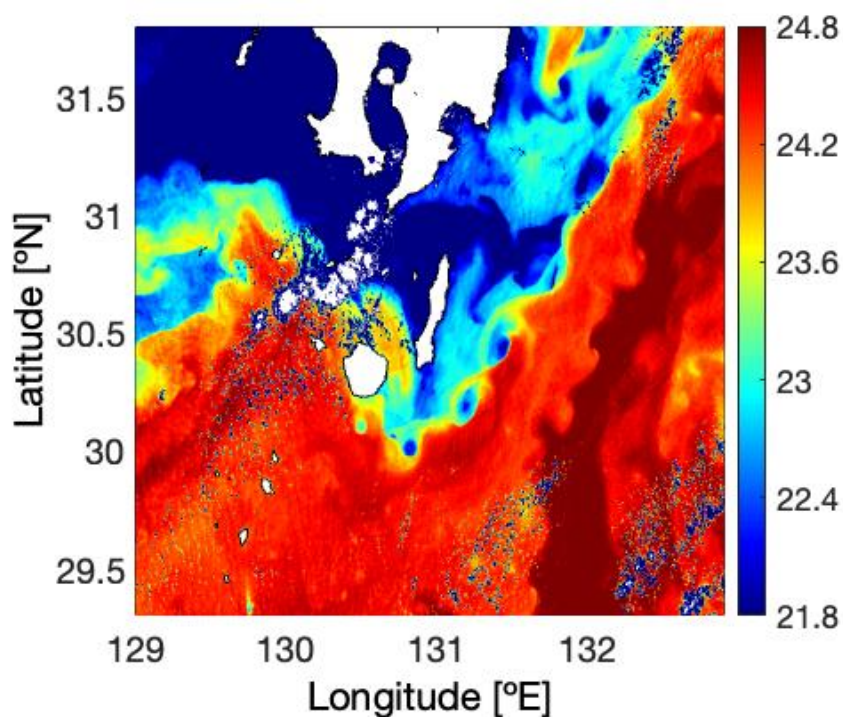


図 2: 人工衛星しきさいが捉えた、2024 年 12 月の海面水温画像が示す屋久島南方海域から黒潮に沿って続く冷水の渦列。本研究の数値実験から、秋から冬にかけて屋久島南方から 1 ヶ月に 6 つ程度の冷水渦が生成されることがわかった。

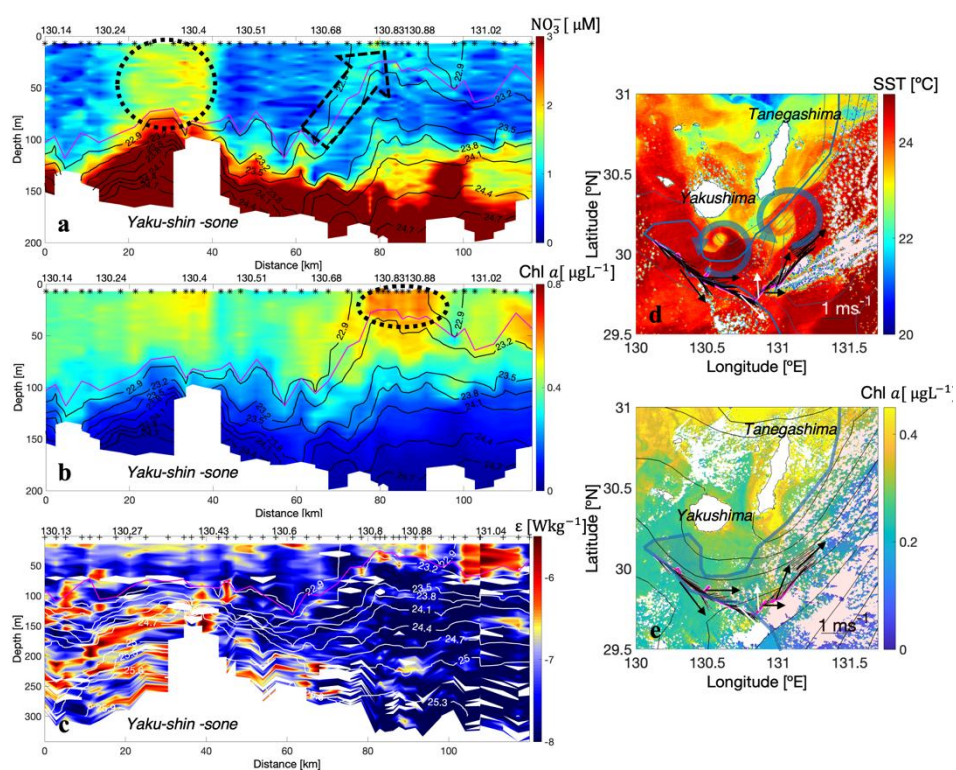


図 3: 2021 年 11 月 17 日に鹿児島大学水産学部練習船「かごしま丸」にて実施した断面観測結果を(a)硝酸塩濃度、(b)クロロフィル a 濃度、(c)乱流運動エネルギー散逸率について示す。断面観測は、(d-e)のマゼンタの線上で実施した。海面水温画像は、断面観測が行われる 3 日前の 11 月 14 日のもので、屋久島南に反時計回りの冷水渦が 2 つ確認できる。

この冷水渦周辺の硝酸塩濃度は、渦に伴った海水密度構造と見られる箇所で、上に凸状構造を示す（a 中の破線丸）とともに、傾斜した密度面に沿って下層から上向きに舌状に伸び（a 中の破線矢印）、栄養塩湧昇を示唆する。

<用語解説>

注1) 自由落下曳航式プロファイラー

船舶を進ませながら、ロープに繋がれた観測機器をロープを繰り出して自由落下させ、予定した観測深度に達した後に、ウインチを巻き上げ測器を海面まで浮上させ、これを何度も繰り返して、観測項目の鉛直的な分布を高解像度に断面観測することが可能な観測機器。

注2) 低次生態系応答

海洋の一次生産者である植物プランクトンの増殖に欠かせない栄養塩の供給に対する、植物プランクトンや動物プランクトンの応答。

注3) 発散流

表面付近で外側に流出するような流れを指し、下層の海水が湧き上がる。

注4) 黒潮栄養塩ストリーム

黒潮の黒潮の強い北向きの流れによって、亜表層で豊富な栄養塩が運ばれており、この亜表層の栄養塩の黒潮による輸送を指す。

注5) 琉軸変化

黒潮の最も流れの速い箇所を流軸と呼び、しばしば流軸は時間的に変化する。

<関連文献>

Nagai, T., Hasegawa, D., Tsutsumi, E. et al. The Kuroshio flowing over seamounts and associated submesoscale flows drive 100-km-wide 100-1000-fold enhancement of turbulence. **Commun Earth Environ** 2, 170 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00230-7>

<論文タイトル>

“Submesoscale eddy induced nitrate upwelling and effect on biological production in the upstream Kuroshio Current”, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05269-6>

<研究助成>

本研究は、科研費「屋久島、種子島周辺での黒潮北偏に伴うサブメソスケール混合現象とその生物化学的影響（課題番号：JP 23H01244, JP 23K25940）」、「接岸する黒潮が生成する低気圧性渦が栄養塩供給・低次生態系に及ぼす影響（課題番号：JP 23H04818）」、「日本南岸海底斜面上の乱流混合が駆動する黒潮亜表層の栄養塩湧昇とその低次生態系応答（課題番号：JP 25H01901）」の支援により実施されました。

機関の情報

国立大学法人東京海洋大学（東京都港区港南 4 丁目 5 番 7 号、学長 井関 俊夫）
2003 年に東京商船大学と東京水産大学が統合し設立された国内唯一の海洋系大学。海洋に特化した大学であるという特色を活かし、「海を知り、海を守り、海を利用する」をモットーに、海洋分野におけるグローバルな学術研究の強力な推進とその高度化に取り組んでいます。

<https://www.kaiyodai.ac.jp/>

お問い合わせ

<研究に関すること>

東京海洋大学 学術研究院 海洋環境科学部門 准教授 長井 健容（ナガイ タケヨシ）

Tel : 03-5463-0460 / E-mail : tnagai@kaiyodai.ac.jp

<取材に関すること>

東京海洋大学 総務部 総務課 広報室

Tel : 03-5463-1609 / E-mail : so-koho@o.kaiyodai.ac.jp