

令和 6 年 4 月 26 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03655

研究課題名（和文）自走する渦対の力学と輸送混合：古典的渦対から乱流的渦対への発展と河川水への応用

研究課題名（英文）Dynamics of self-propelling vortex pairs

研究代表者

中村 知裕（Nakamura, Tomohiro）

北海道大学・低温科学研究所・講師

研究者番号：60400008

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：沿岸は陸や人と外洋のインターフェースであり、多くの陸・人為起源物質が沿岸を介して外洋へ広がる。しかし、沿岸から外洋への輸送過程は未解明のものが多く、効果的な輸送を引き起こす「渦対」もその一つである。本課題では、(1)渦対の形成・発展に与える密度成層と地形の効果、渦潮（小渦）を伴う渦対の振舞、河川水流出に伴い渦対が形成されうることを明らかにした。得られた結果は、河川・沿岸から外洋への海水・物質輸送の解明・モデリングの向上につながる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題は、沿岸から外洋へ水・物質を効果的に輸送する「渦対」について研究し、河川水流出により渦対が形成されることを明らかにした。得られた知見は、海洋物理学・流体力学の発展に加えて、河川・沿岸から外洋への海水・物質輸送の解明・モデリングの向上に資する。河川から供給された淡水や物質が外洋でどこまで広がるかは、海洋の子午面循環や栄養物質循環・基礎生産を左右することから、海洋内炭素貯留への寄与を介して気候変動に影響する。さらに、近海の栄養物質循環や基礎生産は水産業や沿岸域の水質維持にも影響する。

研究成果の概要（英文）：Coasts serve as the interface between land and open oceans, with many terrestrial and anthropogenic substances spreading from coasts to open oceans. However, the processes of transport from coasts to open oceans are largely unknown, and one of such processes is 'vortex pairs,' which effectively induce transport. In this study, we showed (1) effects of density stratification and topography on the formation and evolution of vortex pairs, the behavior of vortex pairs accompanied by small vortices, and the formation of vortex pairs accompanying river water discharge. The results obtained would contribute to the better understanding and improvement of modeling of water and substance transport from rivers and coasts to the open ocean.

研究分野：海洋物理

キーワード：海洋物理 海洋 渦 渦対 物質輸送 河川水 潮流

1. 研究開始当初の背景

本研究は、沿岸から外洋へ河川水・物質を効果的に輸送する「渦対」について調べた。沿岸は陸や人と外洋のインターフェースであり、多くの陸・人為起源物質が沿岸を介して外洋へ広がる。渦対とは、右の模式図 1 a のように逆回転の渦がペアとなった渦で、各渦に伴う誘導速度で互いに相手と同じ方向に動かし「自走」する。渦対は、その中に海水や溶存・懸濁物質を閉じ込めたまま自走することで、海水や物質を効果的に輸送できる。

これまで渦対の研究は、密度成層や海底・沿岸地形などを無視した理想的状況に限られ、低レイノルズ数で層流的な状態のみにほぼ限られ、しかも海洋では潮流により形成されるものしか考えられていない。しかし、現実の海洋では密度成層や急激な地形変化がある状況で渦対が形成されている(図 1 b)。また、海洋の渦対はレイノルズ数が極めて高く、渦対の背後のジェット(図 1 a キノコ状の渦対の「軸」)などで空間スケールの小さい渦「渦潮」が発達する。加えて、河川水流出の場合について渦対が形成される可能性は、これまで検討されていない。

2. 研究の目的

渦対は、潮流だけでなく河川水流出も合わせると、実は普遍的で、陸から外洋への水・物質輸送に重要な役割を果たしていると考えられる。特に河川による物質輸送は、その大部分が大雨などの激しいイベント時に生じる。そして大規模流出時は渦対が形成されやすく、ひとたび形成されると自走して沖へ進み続ける。つまり二重の意味で、渦対は河川水とそこに含まれる懸濁・溶存物質を効率よく外洋へ輸送すると期待される。こうした渦対の役割を明らかにすることを目指し、本研究では、現実的な状況における渦対の形成・発達、乱流的な渦潮を伴う渦対、そして河川水流出による渦対の形成・発達について調べる。

3. 研究の方法

上記目的のため、(1)渦対の形成・発展に与える密度成層と地形の効果について、鳴門海峡の渦対を対象に数値シミュレーションと感度実験および衛星画像解析、渦潮(小渦)を伴う渦対および河川水流出に伴い形成される渦対について(2)厚岸湾で現場観測と衛星画像解析ならびに(3)理想的状況設定での数値実験、(4)渦対等による過程により沿岸に広がった水の外洋への広がりを調べるためのデータ解析、を行った。

用いた数値モデルは(1)の数値シミュレーションと(3)の数値実験の一部は 3次元非静水圧海洋モデル kinaco (Matsumura and Hasumi, 2008) で、(3)の一部では 1.5層モデルである。衛星画像解析では、太陽同期軌道のセンチネル 2 搭載のマルチスペクトルイメジャー(MSI)で捉えた画像を目視で解析した。(1)や(3)の数値シミュレーション・実験のための現実的な密度成層の見積もりおよび(4)のデータ解析に用いたデータは、厚岸湾での現場観測データ、日本海洋データセンター(JODC)と World Ocean Database にアーカイブされたデータ、オホーツク海北海道周辺の現場観測データ、および気象研究所の海洋大循環モデル出力などである。

4. 研究成果

(a) 渦対とジェットの模式図



(b) 衛星画像



図 1 : (a) 渦対とジェットの模式図。矢印は水の流れ、黒い四角は陸を表す。(b) 鳴門海峡の渦対の衛星画像。渦対は、海峡から北西(左上)に模式図のようなキノコ状の形で伸びている、周囲より白っぽい海水として見える。Nakamura et al. (2023) より転載。

(1)従来、渦対の研究は、密度一様かつ海底またはそれに相当するものが平坦な場合に事実上限られていた。しかし、鳴門海峡で形成される渦対や河川水流出により形成される流出では、密度成層の効果が大きいと予想される。さらに、水深の変化も著しく、無視できるとは考えにくい。そこで、鳴門海峡を対象に衛星画像解析と数値シミュレーションを行った。鳴門海峡は潮流が速く、過去の研究から渦対の形成が示されている。また、本研究の衛星画像解析でも渦対が検出されたので(図1b)、現実の渦対の形成・時間発展を確認できる鳴門海峡を対象とした。

まず数値シミュレーションで衛星観測と整合的な渦対を再現した(右の図2)。さらに感度実験から、密度成層、水深変化、海岸線の形状が、渦対の発達・進行に重要なことを示した。この結果は、現実海洋における渦対の形成・発達を理解・予測するうえで、定性的な進展である。以上の結果は論文にまとめられ査読付国際学術誌に掲載された。

(2)厚岸湾では、引き潮時に河川水・湖水が厚岸湾に流れ出し、物質を輸送するとともに厚岸湖の水を入れ替える。現場観測と衛星画像から、引き潮に伴う流出時に、ジェットと渦対そして鳴門の「渦潮」と似た小さい渦の列が形成されることを明らかにした。渦潮は潮流が最大 5 m/s と極めて速い鳴門海峡が有名だが、厚岸湾の流速は 0.7 m/s 程度にすぎなかった。したがって、渦潮は実は珍しい現象ではないことが判明したと言える。また、厚岸湾の渦対は河川水を多く含む海水で形成されており、河川水流出も渦対を形成しうることも示唆された。以上の結果の一部は査読付国際学術誌に掲載された。

(3)衛星画像から厚岸湾以外でも河川水流出で渦対が形成されることを示した。この河川水流出による渦対形成の条件、ならびに渦潮(小渦)が渦対に与える影響を明らかにするため、理想化したモデルを作成して数値実験を行い、これまでの分類以外の力学レジームを見つけた。現在論文投稿に向けて追加実験を計画している。

(4)渦対等により運ばれた河川水は、さらに海流など様々な過程で外洋へ輸送される。こうした河川・沿岸から外洋への海水や物質の輸送について、観測データ・海洋大循環モデル出力のデータ解析を行った。現在論文投稿に向けて追加解析を計画している。

今後、渦対の力学はさらに多くの応用または発展が見込まれる。そして、渦対を含む沿岸の海洋現象の力学解明は、沿岸から外洋の海水・物質輸送過程の解明とそのモデリングの向上へと貢献が期待される。また本研究で得られた知見は、海洋物理学・流体力学の理論の発展に加えて、河川・沿岸から外洋への海水・物質輸送の解明・モデリングの向上に資する。河川から供給された淡水や物質が外洋でどこまで広がるかは、海洋の子午面循環や栄養物質循環・生物基礎生産を左右することから、海洋内炭素貯留への寄与を介して気候変動に影響する。さらに、近海の栄養物質循環や基礎生産は水産業や沿岸域の水質維持にも影響する。

引用文献：

Nakamura, T., T. Yamaguchi, S. Nakada, Y. Matsumura (2023) Vortex pairs formed by tidal currents in the Naruto Strait: Effects of bottom topography, density stratification, and coastline geometry. *Journal of Oceanography*, **80**, 85-97, <https://doi.org/10.1007/s10872-023-00709-1>

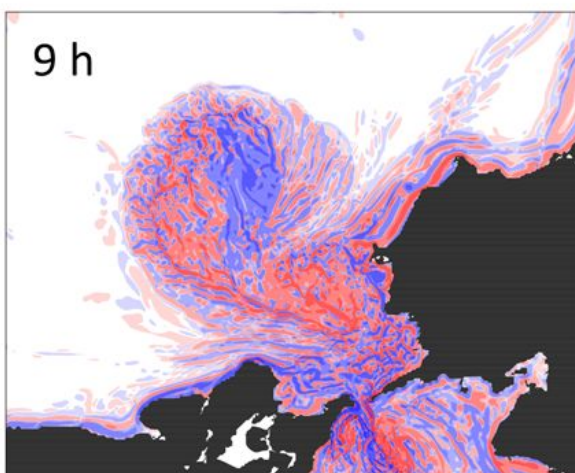
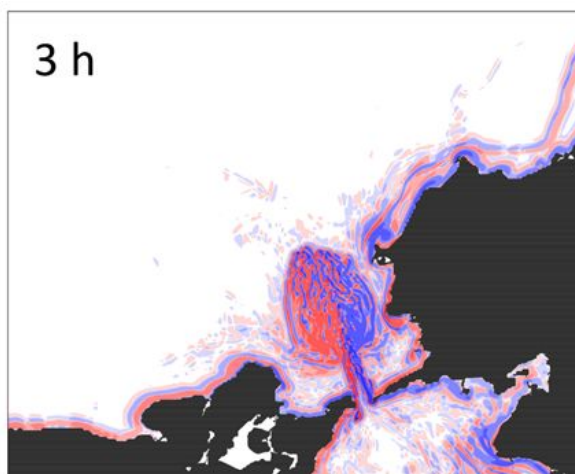


図2：鳴門海峡の渦対の数値シミュレーション。潮流が北向きに流れ始めて(上)3時間後(最強流時)と(下)9時間後(逆流時)の渦度の水平分布。ここで渦度は鉛直成分で、赤が反時計回り、青が時計回りを表す。Nakamura et al. (2023) より転載。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Nakamura Tomohiro, Yamaguchi Takuya, Nakada Satoshi, Matsumura Yoshimasa	4. 巻 80
2. 論文標題 Vortex pairs formed by tidal currents in the Naruto Strait: effects of bottom topography, density stratification, and coastline geometry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 85 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-023-00709-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Tomohiro, Takahashi Yusuke, Nakanowatari Takuya, Mitsudera Humio	4. 巻 37
2. 論文標題 Far-Reaching Effects of Okhotsk Sea Ice Area on Sea Surface Heat Flux, Lower Atmosphere, and Ocean Mixed Layer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 569 ~ 583
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-23-0239.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kida Shinichiro, Tanaka Kiyoshi, Isada Tomonori, Nakamura Tomohiro	4. 巻 129
2. 論文標題 Impact of a Large Shallow Semi Enclosed Lagoon on Freshwater Exchange Across an Inlet Channel	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 e2023JC019755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023JC019755	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 中村知裕, 野別貴博, 嶋田宏, 美坂正, 西岡純, 藤尾伸三, 柳本大吾, 三谷曜子, 山村織生, 三寺史夫	4. 巻 82
2. 論文標題 知床周辺海域の沿岸モニタリングおよび船舶観測と係留系観測	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 低温科学	6. 最初と最後の頁 153 ~ 160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14943/lowtemsci.82.153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ito Kaoru, Nakamura Tomohiro	4. 巻 53
2. 論文標題 Three Regimes of Internal Gravity Wave-Stable Vortex Interaction Classified by a Nondimensional Parameter : Scattering, Wheel-Trapping, and Spiral-Trapping with Vortex Deformation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physical Oceanography	6. 最初と最後の頁 1087 ~ 1106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JPO-D-21-0309.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakanowatari Takuya, Nakamura Tomohiro, Mitsudera Humio, Nishioka Jun, Kuroda Hiroshi, Uchimoto Keisuke	4. 巻 197
2. 論文標題 Interannual to decadal variability of phosphate in the Oyashio region: Roles of wind-driven ocean current and tidally induced vertical mixing in the Sea of Okhotsk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 102615 ~ 102615
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2021.102615	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shu Hung-Wei, Mitsudera Humio, Yamazaki Kaihe, Nakamura Tomohiro, Kawasaki Takao, Nakanowatari Takuya, Nishikawa Hatsumi, Sasaki Hideharu	4. 巻 11
2. 論文標題 Tidally modified western boundary current drives interbasin exchange between the Sea of Okhotsk and the North Pacific	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-91412-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nishizawa Bungo, Okado Jumpei, Mitani Yoko, Nakamura Tomohiro, Yamaguchi Atsushi, Mukai Tohru, Watanuki Yutaka	4. 巻 88
2. 論文標題 Two species of seabirds foraged in contrasting marine habitats across the cold-water belt along the coast of northern Hokkaido in the southwestern Okhotsk Sea	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fisheries Science	6. 最初と最後の頁 109 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12562-021-01576-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nishioka Jun, Yasuda Ichiro, Hirawake Toru, Nakamura Tomohiro, Kondo Yoshiko, Volkov Yuri N.	4. 巻 203
2. 論文標題 Biogeochemical and physical linkages between the Arctic Ocean and Sub-Arctic Pacific through marginal seas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 102768 ~ 102768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2022.102768	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 中村知裕
2. 発表標題 知床の海をモニターする
3. 学会等名 低温科学研究所公開シンポジウム「世界自然遺産知床周辺海域の海洋・海水変動予測と海洋生態系への影響」
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Nakamura, T. Nobetsu, H. Shimada, T. Misaka, J. Nishioka, Y Mitani, O. Yamamura and H. Mitsudera
2. 発表標題 Ocean monitoring and ship observations around Shiretoko: 2
3. 学会等名 The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Ito, T. Nakamura, T. Misaka
2. 発表標題 Long-term variations of water masses in the southern part of the Okhotsk Sea using public and unpublished data
3. 学会等名 The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 植田純生、中村知裕、河野時廣、伊藤薫
2. 発表標題 北海道オホーツク海陸棚の海底混合層・高濁度水とその行方
3. 学会等名 日本海洋学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張振龍、中村知裕、西岡純
2. 発表標題 アイオン・ストリームと親潮域における鉄の季節変化
3. 学会等名 日本海洋学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張 振龍、中村 知裕、西岡 純
2. 発表標題 Seasonal mixed-layer dissolved Iron variation in the Oyashio region
3. 学会等名 JpGU2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉原 光都、木田 新一郎、中村 知裕、横松 和
2. 発表標題 広範囲に捉えた河川フロントの流速場の推定
3. 学会等名 JpGU2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kida, S., K. Tanaka, T. Isada, T. Nakamura
2. 発表標題 Impact of a Semi-enclosed Estuary on Freshwater Outflow and Biogeochemical Response for a Small-scale River
3. 学会等名 AOGS2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村知裕・山口卓也・中田聡史・松村義正
2. 発表標題 渦対の数値シミュレーション：鳴門海峡の渦対への地形と密度成層の効果
3. 学会等名 2022年度海洋乱流の観測およびモデリングに関する研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木田新一郎, 田中潔, 伊佐田智規, 中村知裕
2. 発表標題 河川水の流出過程に汽水湖が与える影響
3. 学会等名 日本海洋学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村知裕、植田純生、野別貴博、美坂正、三谷曜子、西岡純、三寺史夫
2. 発表標題 夏季オホーツク北海道沿岸の水塊：タートル海峡水・海底混合層・北部根室海峡に注目して
3. 学会等名 令和5年度日本水産学会春季大会シンポジウム「知床周辺海域のホットスポット形成：海洋環境から高次捕食者まで」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Nakamura, T. Nobetsu, T. Misaka, J. Nishioka, Y. Mitani, O. Yamamura and H. Mitsudera
2. 発表標題 Ocean monitoring and ship observations around Shiretoko
3. 学会等名 The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中野渡拓也, 中村知裕, 三寺史夫, 西岡純, 西川はつみ, 内本圭亮, 黒田寛
2. 発表標題 北太平洋亜寒帯域における基礎生産量の長期変化に対する熱塩・風成循環の影響
3. 学会等名 日本海洋学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Mitsudera, H. Ueda, T. Nakamura, J. Nishioka, O. Yamamura, R. Saiki, T. Usui, and T. Nakanowatari
2. 発表標題 Shiretoko marine project on prediction of sea ice variations due to climate change, and its impacts on biogeochemical processes and marine ecosystems
3. 学会等名 The 36th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 三寺史夫, 中村知裕, 田口文明, 浮田甚郎, 星一平	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日本気象学会	5. 総ページ数 374
3. 書名 気候系のhot spot : 中緯度大気海洋相互作用の最前線 (第8章)	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------