

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：82708

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14792

研究課題名（和文）駿河湾における「有効拡散」の定量化とその湾内深層循環に与える影響の評価

研究課題名（英文）Quantification of "effective diffusion" in Suruga Bay and evaluation of its impact on deep circulation of the bay.

研究代表者

永井 平（Nagai, Taira）

国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産資源研究所（横浜）・主任研究員

研究者番号：60834489

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では本来数値モデルに組み込むべき「有効拡散」の実態解明を、駿河湾を対象とした数値実験および現場観測を通じて行った。数値実験の結果、日周期の沿岸捕捉波が駿河湾に入射し、内部風下波を励起することで湾内の混合を強化することが示された。この結果の妥当性は2021年11月に駿河湾で実施した船舶観測から確認された。一方、海洋中の有効拡散の実態を調べるため、深海を模したLES実験を実施した結果、有効拡散はLESにより内生的に算出される拡散係数よりも10倍程度大きくなることが示された。この結果は、乱流直接観測から得られる拡散係数とOGCM等の数値モデルに組み込むべき拡散係数が異なり得ることを示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

OGCM等の数値モデルに加えるべき乱流情報と観測から得られる乱流情報との間のギャップを議論した本研究から得られた結果は、乱流観測から直接測定された乱流拡散係数をそのまま海洋循環モデルに組み込んだとしても深層海洋循環を現実的に再現できない「Missing mixing 問題」の解決、ひいては全球大循環モデルを使用した長期気候変動予測の高精度化を実現する糸口となるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, the character of "effective diffusion," which should be incorporated into numerical models, was discussed through numerical experiments and observations in Suruga Bay. The numerical experiments showed that diurnal coastal trapped waves propagating into Suruga Bay enhance turbulent mixing by exciting internal lee waves. The validity of this result was confirmed by shipboard observations conducted in Suruga Bay in November 2021. Furthermore, to investigate the character of the effective diffusion in the ocean, an LES experiment simulating the deep sea was conducted, which showed that the effective diffusion can be about 10 times larger than the vertical diffusivity parameterized by LES. This result suggests that the vertical diffusivity obtained from direct observation of turbulence and the vertical diffusivity that should be incorporated into numerical models such as OGCM might be different.

研究分野：海洋物理学

キーワード：乱流混合 有効拡散 数値モデル 海洋循環 駿河湾 沿岸捕捉波 風下波 LES

1. 研究開始当初の背景

地球の長期気候変動を強くコントロールする深層海洋循環は、その時空間スケールとは全く対極にあるミクروسケールの「乱流拡散」により駆動されると考えられてきた。これまで世界中の海域で数多くの乱流直接観測が実施され、深海における乱流混合強度の分布が少しずつ明らかにされてきた。同時に、この乱流観測から直接測定された混合係数を海洋循環モデルに組み込んだ実験もなされてきたが、どのモデルも深層海洋循環を現実的に再現できておらず、この問題は「Missing mixing 問題」として現在まで謎のまま残されてきた。

2. 研究の目的

このような状況を踏まえ、本研究では、従来の研究では見過ごされてきたものの、乱流拡散よりも大きな空間スケールで遥かに効率よく海水を混合する「有効拡散」に注目し、その実態解明/定式化、および深層循環への影響の評価を、比較的スケールが小さく、深層循環と潮汐混合が共存する「駿河湾」を対象とした詳細な数値実験/現場観測を通じて行う。本研究から得られる結果は、海洋物理学最大の謎として残されてきた Missing mixing 問題の解決、ひいては長期気候変動予測の高精度化を実現する糸口となるものである。

3. 研究の方法

- (1) 駿河湾を対象とした高解像度数値シミュレーションをスーパーコンピュータ (Oakforest-PACS) を利用して行い、同湾内における乱流混合発生に関わる物理プロセスの解明を行う。
- (2) 駿河湾における乱流直接観測を実施し、(1)で議論した物理プロセスが現実海洋で実際に発生しているのか検証を行う。
- (3) 深海で発生する有効拡散の実態を調べるため、深海の理想的な状況を想定した三次元 LES 実験を実施する。

4. 研究成果

(1) 「駿河湾を対象とした高解像度数値シミュレーション」を実施した結果、まず、駿河湾においては慣性周期の制約により自由波として伝播できない日周期 (K1 分潮) の内部擾乱が沿岸捕捉波として伊豆諸島北部から駿河湾を反時計回りに伝播することが明らかとなった (図 1)。また、地形性捕捉波に関する固有値解析から、この地形性捕捉波は内部ケルビン波ではなく、地形性ロスビー波としての性質を強く持つことが明らかとなった。さらに、この地形性ロスビー波により海底近傍で強化された流れが駿河湾内の幅数 km 程の小さな凹凸地形と相互作用することで準定常内部風下波が励起され、それらが散逸し同湾内の混合を著しく強化していることが明らかとなった (図 2)。駿河湾内においては、この日周潮に伴う乱流散逸率が半日周潮に伴うものより約 6 倍の大きさとなることが示された。また、駿河湾のような地形性ロスビー波が卓越する海域においては、一般的な順圧傾圧分解を用いた解析を行った場合、エネルギーフラックスが著しく過小評価されてしまうことが示された。これら一連の研究成果は、査読付き国際誌で発表された。

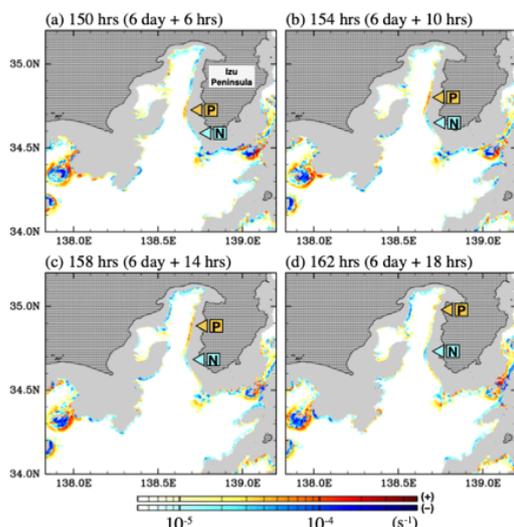


図 1 数値実験から得られた駿河湾内 500 m 深におけるポテンシャル渦度の伝播の様子。

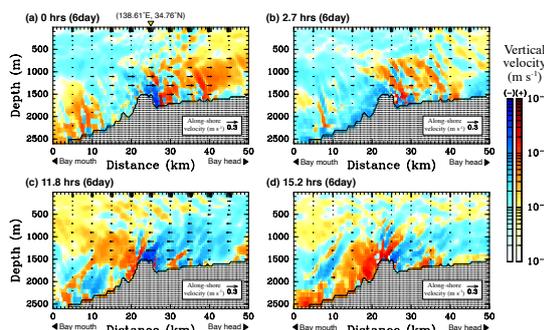


図 2 駿河湾内における鉛直流速 (カラー) と岸沿い方向の流速 (ベクトル) の鉛直断面図。湾内の小さな Sill に地形性ロスビー波により海底近傍で強化された流れがぶつかることで、Sill 後方に内部風下波が励起されている様子がわかる。

(2) 東京大学および東海大学の協力の下、2021年11月18日から21日に駿河湾中央部で船舶観測を実施した。XCTD 観測により得られた水温データに対して調和解析を実施した結果、日周期の水温変動の振幅が水深 1000m 以降、海底に向かって増幅する傾向が見られた (図 3)。これは、海底捕捉型の沿岸捕捉波と同様の傾向である。さらに(1)の数値実験からも同様のプロファイルが得られたことから、駿河湾において海底捕捉型の沿岸捕捉波が存在することが観測から初めて確認された。また、投下式深海乱流計 VMP-X により得られた乱流エネルギー散逸率の鉛直プロファイルより、駿河湾内の海底付近で 10^{-6} W/kg に達する非常に強い混合が発生していることが示された (図 4、黒線)。本結果は、(1)の数値実験の結果 (図 4、赤線) と定性的に一致するものであった。この研究成果は一件の国際会議で発表予定である (要旨受理済み)。

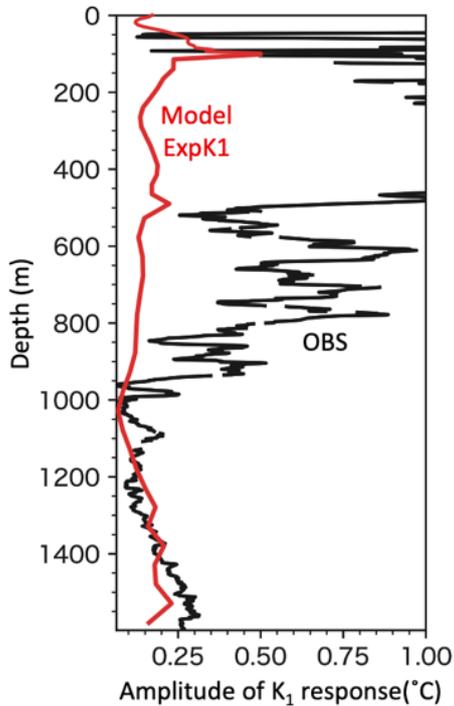


図 3 水温に対する調和解析から得られた日周期の水温変動の振幅 (黒：観測、赤：数値実験)。1000m 以深で海底にむかって振幅が増大する様子がわかる。

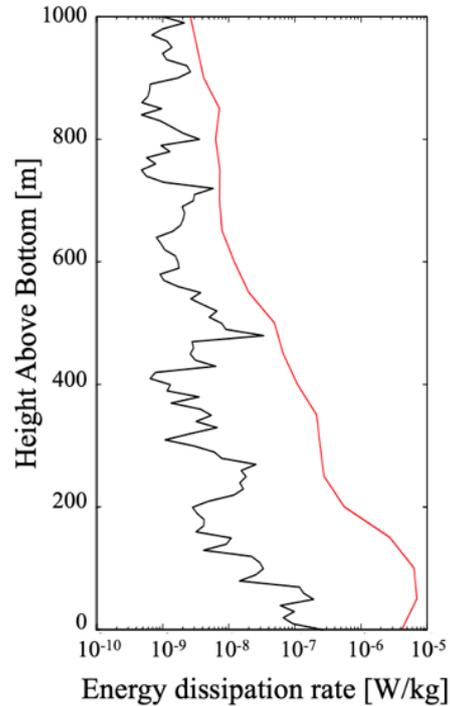


図 4 乱流エネルギー散逸率の鉛直プロファイル (黒：観測、赤：数値実験)。縦軸は海底からの高さを表す。

(3) 深海で発生する有効拡散の実態を調べるため、深海の内部波場 Garrett-MunkM 平衡スペクトルを初期値とした三次元の LES (Large Eddy Simulation) 実験 (GM 実験) を実施した。比較のため初期値のエネルギーを 10 倍にした GM10 実験も実施した。計算された密度場のポテンシャルエネルギーの増加分を説明するのに必要な拡散係数を「有効拡散」と定義し、その時間変化を計算した (図 5、実線)。また比較のため、乱流直接観測から得られる拡散に相当する量として、LES により内生的に算出される拡散係数の時間変化も合わせてプロットした (図 5、破線)。その結果、GM10 実験においては「有効拡散」の方が「LES により内生的に算出される拡散係数」よりも 10 倍近く大きくなることが示された。この結果は、乱流直接観測から得られた拡散係数と OGCM などの数値モデルに代入すべき拡散係数が異なることを示唆しており、有効拡散が Missing mixing 問題の解決に向けた一つの手がかりになり得ることを示している。

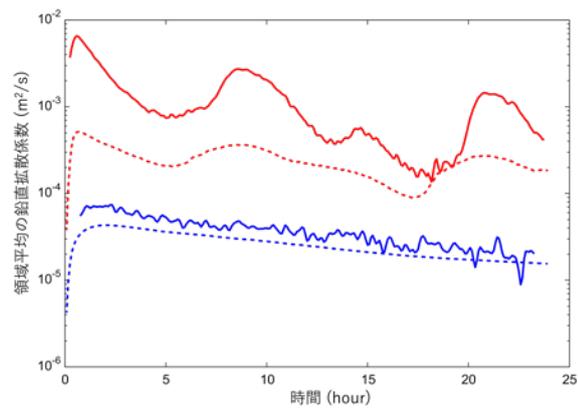


図 5 GM 実験 (青線)、および GM10 実験から得られた有効拡散 (実線) と LES により内生的に算出される拡散係数 (破線) の時系列 (モデル領域での平均値)。GM10 実験では有効拡散が LES の拡散よりも 10 倍程度の値になっていることがわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nagai Taira, Hibiya Toshiyuki, Syamsudin Fadli	4. 巻 48
2. 論文標題 Direct Estimates of Turbulent Mixing in the Indonesian Archipelago and Its Role in the Transformation of the Indonesian Throughflow Waters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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） 10.1029/2020GL091731	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 Sprintall Janet, Taira Nagai, 他26名	4. 巻 6
2. 論文標題 Detecting Change in the Indonesian Seas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 1~24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fmars.2019.00257	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 Purwandana Adi, Cuyperis Yannis, Bouruet-Aubertot Pascale, Nagai Taira, Hibiya Toshiyuki, Atmadipoera Agus S.	4. 巻 184
2. 論文標題 Spatial structure of turbulent mixing inferred from historical CTD datasets in the Indonesian seas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 102312 ~ 102312
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pocean.2020.102312	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 Nagai Taira, Hibiya Toshiyuki	4. 巻 127
2. 論文標題 Diurnal Coastal Trapped Waves and Associated Deep Ocean Mixing Near the Head of Suruga Trough	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022JC018457	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Taira Nagai, Toshiyuki Hibiya
2. 発表標題 Numerical study of tide-induced deep-ocean mixing near the head of Suruga Trough
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会（オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永井平、日比谷紀之
2. 発表標題 Numerical study of tide-induced deep-ocean mixing near the head of Suruga
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taira Nagai, Toshiyuki Hibiya
2. 発表標題 The combined effect of tidal mixing in narrow straits and the Ekman transport on the variability of SST in the southern Indonesian Seas
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taira Nagai, Toshiyuki Hibiya, Fadli Syamsudin
2. 発表標題 Direct estimates of turbulent mixing in the Indonesian Seas and its impact on the water-mass transformation
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taira Nagai, Toshiyuki Hibiya
2. 発表標題 The combined effect of the Ekman transport and tidal mixing on the variability of SST in the southern Indonesian Seas
3. 学会等名 27th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永井 平, 日比谷 紀之
2. 発表標題 エクマン輸送と海峡内での潮汐混合の複合効果に伴うインドネシア多島海南部の海面水温冷却
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合(JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019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 協力 者	紀之 日比谷	東京海洋大学・海洋環境科学部門・客員教授	
	(Toshiyuki Hibiya)		
	(80192714)	(12614)	

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