

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：23401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14389

研究課題名(和文) 太平洋の熱帯不安定波から放射される内部波による乱流混合の素過程解明とその影響評価

研究課題名(英文) Generation mechanism of tropical instability waves in the equatorial Pacific Ocean and their dissipation mechanism due to internal wave radiation

研究代表者

田中 祐希 (Tanaka, Yuki)

福井県立大学・海洋生物資源学部・准教授

研究者番号：80632380

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)：赤道太平洋には、熱帯不安定波と呼ばれる、約0.5 m/sの速度で西進する波長約100 kmの顕著な擾乱が存在する。熱帯不安定波のフロント部から海洋内部に向けて放射される内部波は、水温躍層における乱流混合を引き起こすことで表層から中深層への熱輸送をコントロールし、赤道太平洋の海面水温にも影響を及ぼす重要な物理過程である。本研究では、赤道太平洋における熱帯不安定波の発生メカニズムを、赤道すぐ北の狭い緯度帯に存在する局所的な渦位勾配に捕捉され、逆向きに伝播する二つのロスビー波の結合という観点から明らかにした。さらに、熱帯不安定波のフロント部からの内部波の放射過程についても詳細な検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

赤道太平洋の熱帯不安定波は、鉛直乱流混合や熱輸送を通じて熱帯域の海面水温分布に大きな影響を与える重要な現象である。本研究では、熱帯不安定波の発生メカニズムを明らかにしただけでなく、赤道のすぐ北に存在する局所的な負の渦位勾配の強度が熱帯不安定波の活動度を表す良い指標になっていることを指摘した。この渦位勾配は低解像度の海洋大循環モデルでも比較的容易に再現可能であることから、今後、熱帯不安定波に伴う熱輸送や乱流混合強度のパラメータ化を進めていく上で非常に有効であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In the equatorial Pacific Ocean, there exists a prominent disturbance propagating westward at a speed of ~0.5 m/s with a wavelength of ~1000 km, called tropical instability waves. It is pointed out that a front of tropical instability waves radiates internal waves downward to the ocean interior, which induce turbulent mixing in the thermocline and control the heat transport from the surface to the deep layers, thereby affecting the sea surface temperature and air-sea interaction in the equatorial Pacific Ocean. In this study, the generation mechanism of tropical instability waves in the equatorial Pacific Ocean is clarified in terms of the coupling of two Rossby waves that are trapped in a local potential vorticity gradient in a narrow latitudinal band just north of the equator and are propagating in the opposite directions with each other. Furthermore, the radiation mechanism of internal waves from tropical instability waves is examined in detail.

研究分野：海洋物理学

キーワード：赤道太平洋 熱帯不安定波 ロスビー波 内部波 鉛直乱流混合 線形安定性解析 数値シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

赤道太平洋の水温躍層における鉛直乱流混合は、運動量の鉛直輸送を通じて赤道域の海流構造に影響するだけでなく、表層から中深層への熱の鉛直輸送を通じて海面水温をコントロールすることで、熱帯域の大気海洋相互作用や全球の気候変動にも影響を及ぼす重要な物理過程の一つである。

赤道太平洋の乱流混合に重要な役割を果たす現象の一つが、熱帯不安定波 (Tropical Instability Waves, TIWs) と呼ばれる顕著な中規模擾乱である。TIW は、熱帯太平洋の東部から中央部までをほぼ赤道に沿って約 0.5 m/s の速度で西向きに伝播する、波長約 1000 km, 周期約 25 日の波動であり、海面水温フロントの蛇行をはじめ、表層から密度躍層までの水温・塩分/流速など様々な物理量の変動として観測される。TIW はまた、顕著な季節/経年変動を示し、ENSO のような大規模な気候変動現象とも密接に関連することが知られている。このように熱帯太平洋を特徴づける TIW であるが、その励起機構については、赤道域の複雑な海流系の不安定に起因することは推察されてきたものの、その詳細は十分に明らかにされていなかった。

TIW は西方に伝播するにつれて、そのフロント部から小規模の内部波を下向きに放射することで減衰していく。この内部波は、赤道太平洋の密度躍層以深の鉛直乱流混合やそれに伴う表層から中深層への熱輸送に重要な役割を果たしている可能性が指摘されている (Tanaka et al. 2015 など)。しかしながら、TIW から内部波が放射されるメカニズムの詳細についても明らかにされていなかった。

### 2. 研究の目的

以上のような背景を踏まえ、本研究では、赤道太平洋における TIW の励起過程、および TIW のフロント部からの内部波の放射過程を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

上記の目的のために、まず、赤道ベータ面上における 1.5 層の浅水モデルを用いた線形安定性解析を実施した。線形安定性解析で与える背景場には、現実的な TIW を再現できている渦像海洋大循環モデル OFES (OGCM for the Earth Simulator) の結果に基づいて、東西一様な東西流および密度躍層の構造 (南赤道海流、赤道潜流、北赤道反流に伴うもの) を仮定した。得られた不安定モードを OFES で再現された TIW と詳細に比較することで、結果の妥当性を検証した。

次に、TIW フロント部からの内部波放射を、「周期的に時間変動する背景場中における不安定波の成長」の問題として固有値問題へと帰着させ、線形安定性解析を実施した。

### 4. 研究成果

赤道ベータ面上における 1.5 層の浅水モデルを用いた線形安定性解析の結果、波長・位相速度・成長率・南北構造などがすべて OFES で再現された TIW と整合的であるような不安定モードが得られた (図 1)。不安定モードの分散関係および空間構造の詳細な解析や、背景場の渦位分布を変えた感度実験の結果、この不安定モードは、赤道のすぐ北 (およそ  $1^{\circ}\text{N}$  から  $3.5^{\circ}\text{N}$ ) の局所的な負の渦位勾配に捕捉されて東向きに伝播するロスビー波と、そのさらに北 (およそ  $3.5^{\circ}\text{N}$  から  $8^{\circ}\text{N}$ ) の正の渦位勾配に捕捉されて西向きに伝播するロスビー波とが結合したものであることがわかった。これら二つの逆向きに伝播するロスビー波は、それぞれ西向きの南赤道海流と東向きの北赤道反流による移流効果を受けて相対的に位相が固定されることで、互いを増幅し合う形での相互作用が可能となり、その結果、不安定モードとして発達できることが示された (図 2)。

次に、この励起メカニズムの妥当性を、OFES の解析を通じて検証した。 $3.5^{\circ}\text{N}$  から  $8^{\circ}\text{N}$  の正の渦位勾配は季節や年によらず常にほぼ一定の強さで存在するのに対し、 $1^{\circ}\text{N}$  から  $3.5^{\circ}\text{N}$  の負

の渦位勾配は、TIW が発達する夏から秋にかけておよびラ・ニーニャ年に大きくなるという顕著な季節・経年変動を示した。さらに、負の渦位勾配の強さと TIW のエネルギーとの時系列を比較したところ、前者が後者に 1~2 か月先行して非常に高い相関を持っていた。これらの結果は、TIW の発生・増幅には  $1^{\circ}\text{N}$  から  $3.5^{\circ}\text{N}$  の局所的な負の渦位勾配が不可欠であることを意味し、線形安定性解析によって提示された励起メカニズムを強く支持するとともに、低解像度の海洋大循環モデルでも比較的容易に再現可能な  $1^{\circ}\text{N}$  から  $3.5^{\circ}\text{N}$  の負の渦位勾配の強度によって TIW の活動をパラメータ化できる可能性を示すものである。

最後に、TIW のフロント部からの内部波の放射過程を明らかにするために実施した、周期的に変動する背景場中での安定性解析の結果、TIW とともに西方へ伝播する不安定擾乱が得られた。この不安定擾乱は、TIW のフロント部で大きな振幅を持ち、また、下層へ向かって位相が逆転するという空間構造を持っていた。これらの特徴は OFES によって再現された TIW から放射される内部波とよく類似したものである。さらに、TIW の振幅が大きいほど不安定擾乱の振幅も大きくなることや、TIW の伝播速度が背景場パラメータから計算される内部波の伝播速度に近くなるときに不安定擾乱の振幅が特に大きくなることなどが示された。これらの結果は、TIW からの内部波の放射が不安定現象として理解できる可能性を示唆するものである。

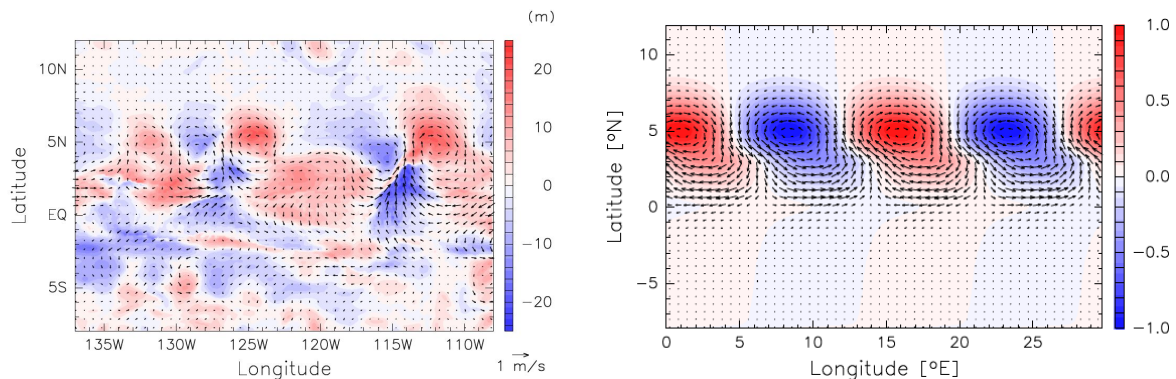


図 1: (左) 海洋大循環モデル OFES で再現された熱帯不安定波。(右) 線形安定性解析で得られた不安定モード。カラーが上層（密度躍層以浅）の層厚の偏差、矢印が上層の流速偏差を表す。

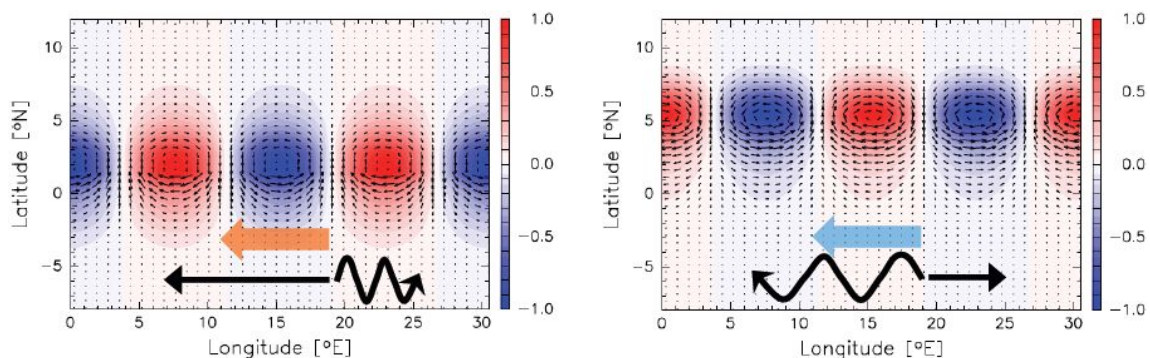


図 2: 不安定モードを構成する二つのロスビー波。(左)  $1^{\circ}\sim 3.5^{\circ}\text{N}$  の負の渦位勾配に捕捉され、東向きに伝播しながら西向きに移流されるロスビー波。(右)  $3.5^{\circ}\sim 8^{\circ}\text{N}$  の正の渦位勾配に捕捉され、西向きに伝播しながら東向きに移流されるロスビー波。カラーが上層厚の偏差、矢印が上層の流速偏差を表す。各パネルの下部に示した矢印は、波矢印が各ロスビー波の固有位相速度、直矢印が背景流による移流、色付き矢印が両者の和を、それぞれ模式的に表す。

#### < 引用文献 >

Tanaka, Y., T. Hibiya, and H. Sasaki, 2015: Downward lee wave radiation from tropical instability waves in the central equatorial Pacific Ocean: A possible energy pathway to turbulent mixing, *J. Geophys. Res.*, 120, 7137–7149, doi:10.1002/2015JC011017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tanaka Yuki	4. 巻 126
2. 論文標題 Stability of a Flow Over Bottom Topography: A General Condition and a Linear Analysis in a Two Layer Quasi Geostrophic Model With a Possible Application to a Kuroshio Meander	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 e2021JC017849
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JC017849	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 Kawasaki Takao, Hasumi H., Tanaka Y.	4. 巻 77
2. 論文標題 Role of tide-induced vertical mixing in the deep Pacific Ocean circulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 173 ~ 184
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-020-00584-0	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 Onuki Y., Tanaka Y.	4. 巻 46
2. 論文標題 Instabilities of Finite Amplitude Internal Wave Beams	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 7527 ~ 7535
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019GL082570	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 Yang Wei, Hibiya Toshiyuki, Tanaka Yuki, Zhao Liang, Wei Hao	4. 巻 75
2. 論文標題 Diagnostics and energetics of the topographic Rossby waves generated by a typhoon propagating over the ocean with a continental shelf slope	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 503 ~ 512
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-019-00518-5	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 Tanaka Yuki, Hibiya Toshiyuki	4. 巻 49
2. 論文標題 Generation Mechanism of Tropical Instability Waves in the Equatorial Pacific Ocean	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physical Oceanography	6. 最初と最後の頁 2901 ~ 2915
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JPO-D-19-0094.1	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 Tatebe Hiroaki, Tanaka Yuki, Komuro Yoshiki, Hasumi Hiroyasu	4. 巻 8
2. 論文標題 Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-32768-6	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 Yang Wei, Hibiya Toshiyuki, Tanaka Yuki, Zhao Liang, Wei Hao	4. 巻 45
2. 論文標題 Modification of Parametric Subharmonic Instability in the Presence of Background Geostrophic Currents	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 12,957 ~ 12,962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL080183	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 Tanaka, Y. and T. Hibiya	4. 巻 47
2. 論文標題 Effects of Kosu Seamount on the development of baroclinic instability leading to the Kuroshio large meander	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physical Oceanography	6. 最初と最後の頁 2563-2576
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JPO-D-17-0050.1	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 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Tanaka, Y.
2. 発表標題 Stability of a flow over bottom topography: a general condition and a linear analysis in a two-layer quasi-geostrophic model with a possible application to a Kuroshio meander
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中祐希
2. 発表標題 海底地形上の流れの安定性：二層準地衡系における一般的条件と線形解析
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 Tanaka, Y.
2. 発表標題 Symmetric and Mixed Layer Instability at a Sharp Ocean Front
3. 学会等名 Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中祐希
2. 発表標題 海底地形上を流れる地衡流の安定性
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中祐希
2. 発表標題 海底地形上の流れの安定性：二層準地衡系における一般的条件と線形解析
3. 学会等名 地球流体力学研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Onuki, Y., and Y. Tanaka
2. 発表標題 Instabilities of finite-amplitude internal wave beams
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka, Y., and T. Hibiya
2. 発表標題 Generation mechanism of tropical instability waves in the equatorial Pacific Ocean
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 Tanaka, Y., and T. Hibiya
2. 発表標題 Effects of Kosu Seamount on the development of baroclinic instability leading to the Kuroshio large meander
3. 学会等名 First International Conference on Ocean Fronts and Eddies (ICOFE-1) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tanaka, Y., and T. Hibiya
2. 発表標題 Generation mechanism of tropical instability waves in the equatorial Pacific Ocean
3. 学会等名 First International Conference on Ocean Fronts and Eddies (ICOFE-1) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatebe, H., T. Kawasaki, Y. Tanaka, I. Yasuda, and H. Hasumi
2. 発表標題 Numerical reevaluation of the tide-induced 18.6-year climate variability over the Pacific using a climate model with an eddy-permitting OGCM
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Onuki, Y., and Y. Tanaka
2. 発表標題 Instabilities of finite-amplitude internal wave beams
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中祐希, 日比谷紀之
2. 発表標題 赤道太平洋における熱帯不安定波の発生機構
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 大貫陽平, 田中祐希
2. 発表標題 有限振幅内部波ビームの不安定解析
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zhang, A., Y. Tanaka, and T. Hibiya
2. 発表標題 Estimates of wind-induced near-inertial energy penetrating down into the deep ocean
3. 学会等名 日本海洋学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中祐希, 日比谷紀之
2. 発表標題 黒潮大蛇行を引き起こす膠州海山における傾圧不安定の発達過程
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中祐希, 日比谷紀之
2. 発表標題 黒潮大蛇行を引き起こす膠州海山上における傾圧不安定の非線形的な発達過程
3. 学会等名 日本海洋学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 建部洋晶, 田中祐希, 川崎高雄, 小室芳樹, 羽角博康
2. 発表標題 気候モデルの典型系統的誤差と海洋微細過程との関連及びその含意
3. 学会等名 日本海洋学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tanaka, Y., and T. Hibiya
2. 発表標題 Baroclinic Instability over Koshu Seamount Leading to the Kuroshio Large Meander
3. 学会等名 2018 Ocean Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fukuzawa, K., Y. Tanaka, and T. Hibiya
2. 発表標題 The amplification mechanism of a meteo-tsunami originating off the western coast of Kyushu Island of Japan in the winter of 2004
3. 学会等名 2018 Ocean Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tanaka, Y., and T. Hibiya
2. 発表標題 Effects of Koshu Seamount on the development of baroclinic instability leading to the Kuroshio large meander
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中祐希, 日比谷紀之
2. 発表標題 黒潮大蛇行を引き起こす傾圧不安定の発達に膠州海山が果たす役割
3. 学会等名 Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----

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