

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05649

研究課題名(和文) 西岸境界流続流における組織的流れの形成メカニズムに関する研究

研究課題名(英文) Study on the driving mechanism of the large-scale circulation in the eastward extension of western boundary currents

研究代表者

水田 元太 (Genta, Mizuta)

北海道大学・地球環境科学研究所・助教

研究者番号：30301948

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)：黒潮続流やメキシコ湾流など西岸境界流の続流ジェットからは中規模擾乱が発生し、それらの非線型性によって再循環や東西縞状ジェットといった大規模循環が形成される。本研究では再循環の形成にロスビー波の整流作用が寄与することや、ロスビー波の発生のおくみを明らかにした。また東西縞状ジェットは現実海洋の黒潮続流が分岐して生じるフロントに対応し、風によって生じるスベルドラップ流によって数年から十年規模で南下することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再循環の形成にはRhine and Young (1982)によって従来から提唱されていた渦位一様化よりもロスビー波の整流作用によるものであることが強く示唆された。また黒潮続流域での東西縞状ジェットの発生には従来の観測的研究で指摘されていたシャツキー海膨などの海底地形は本質的でないことが示された。本研究で得られた結果は再循環と東西縞状ジェットのしくみの理解を深めるとともに、黒潮続流域の時間平均的循環や長期変動を理解することにも寄与すると期待される。

研究成果の概要(英文)：The eastward extension of western boundary currents (eastward jet) such as the Kuroshio Extension and Gulf Stream is accompanied by the recirculation and multiple zonal jets, which are driven by mesoscale eddies generated by instability of the eastward jet. We showed that the rectification of Rossby waves contributes to the driving of the recirculation. The generating mechanism of Rossby waves was also investigated. We also demonstrated that multiple zonal jets correspond to multiple fronts in the Kuroshio Extension region. The multiple zonal jets shift southward in the speed comparable to the Sverdrup interior flow of the wind-driven circulation on the interannual time scale.

研究分野：海洋物理学

キーワード：西岸境界流 再循環 東西縞状ジェット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

黒潮続流やメキシコ湾流に代表される西岸境界流の続流ジェットは中緯度で最も強い流れであり、流れの不安定によって中規模擾乱を発生させることで弱まる。その際、中規模擾乱の非線型性によって再循環や東西縞状ジェットの様の中規模擾乱よりもはるかに大規模な循環が形成されるという興味深い現象が見られる。しかしそのしくみについてはこれまで十分には調べられていない。

(1) 続流ジェットの再循環

Rhines and Young (1982)は中規模擾乱が平均場の渦位勾配を下る南向きに渦位を輸送することで、再循環が形成されるという渦位一様化理論を提唱したが、実際には表層では渦位は逆に平均場の渦位勾配を上る北向きに輸送されるので矛盾が生じるという問題点がある。一方でジェットから放射されるロスビー波の整流作用によって再循環が形成されるという説も存在するが(Hogg 1985, Waterman and Jayne 2011 等)、実際の再循環形成を説明し得るかについては不明な点も多い。

(2) 東西縞状ジェット

海洋循環の様な大規模スケールの運動では擾乱の非線型発展によって乱流的状態から東西縞状のジェットが生じることが古くから知られている(Rhines 1975)。近年、全球海洋中層にはこの様な東西縞状ジェットに似た流れが存在することが知られるようになった(Maximenko 2006, Nakano and Hasumi 2005 など)。特に続流ジェット付近では顕著な東西縞状ジェットが見られる。この様な東西縞状ジェットの形成要因については、これまで理論的観点から多くの研究がなされているものの、現実の海洋に即した研究は限られている。このため現実海洋の東西縞状ジェットの理解は十分には進んでいない。

2. 研究の目的

本研究では続流ジェット付近で形成される再循環と東西縞状ジェットのしくみを理解することを目的とする。

(1) 続流ジェットの再循環

再循環がロスビー波によって形成されるのか、あるいは渦位一様化が寄与するのか、またジェットからどの様なしくみでロスビー波が発生するのかについて力学的に明らかにする。再循環は表層から深層まで及ぶ深い構造を持つが、表層では北向き渦位輸送、深層では逆に南向き渦位輸送によって駆動される。この様な表層、深層双方の再循環の力学について統一的な理解を得ることを目的とする。

(2) 東西縞状ジェット

続流ジェットによって生じる東西縞状ジェットの構造、年々変動、それらの背景にある風成循環流などに対する依存性などの詳しい性質を数値実験によって明らかにする。またその様な東西縞状ジェットと現実の黒潮続流域で見られる流れの関係性を調べる。

3. 研究の方法

主に理想化された条件の下で続流ジェットから再循環と東西縞状ジェットを発生させる数値実験を行い、その結果を解析することによって循環の詳細なしくみを明らかにする。現実の海洋は海底地形など複雑な要因が循環に影響を与えるので、なるべく単純化した設定で数値実験を行うことで循環の本質を理解する。

4. 研究成果

(1) 外部強制によって励起されたロスビー波による循環形成

表層での中規模擾乱どうしの非線型作用を理想化した形で表現した外力によってロスビー波を励起させ、それによって時間的に一定な循環が形成されるしくみを調べた。Haidvogel and Rhines (1983)などの先行研究では順圧(1層)モデルが用いられたが、本研究では連続成層モデルを用いることで表層、深層両方の循環を調べた。その結果、表層では先行研究と同様、ロスビー波によって北向き渦位輸送が生じ、それによって再循環と同じ向きの循環が形成されるが、深層では外力の振幅が大きい場合のみ、南向き渦位輸送が生じ、やはり再循環と同じ向きの循環が形成された。表層の北向き渦位輸送が生じるしくみはロスビー波の線形理論によって説明されるが、一方で深層の南向き渦位輸送のしくみは、ロスビー波どうしの非線型相互作用によって生じる高次のロスビー波を考慮することによって理論的に説明できる。これらの渦位輸送の向きは実際の再循環付近のものと定性的に一致し、表層、深層ともに再循環がロスビー波によ

て駆動されることを示唆する。

(2)表層再循環のしくみ

次に実際の続流ジェットから生じる中規模擾乱が再循環を駆動するしくみを調べるために、モデル領域内に続流ジェットに対応する強い流れを与える数値実験を行った。先行研究では擾乱のエンストロフィーを用いた診断式から再循環付近(ジェットの downstream)ではジェットによるエンストロフィー移流によって北向き渦位輸送が生じると指摘されていた(Holland and Rhines 1980)。この様な渦位輸送は非発散のため再循環の駆動には寄与しない。しかし中規模擾乱を周波数帯に分けて解析を行った結果、ジェット上流域で傾圧不安定によって生じた高周波数擾乱のエンストロフィーが downstream に輸送され、中規模擾乱どうしの非線型相互作用によって低周波数擾乱のエンストロフィーに変換されること、それに伴って低周波数のロスビー波が発生し、北向きで収束発散を伴う渦位輸送が発生し再循環を駆動する方向に働くことが示された。以上の結果は表層の再循環は Rhines and Young (1982) の渦位一様化よりもむしろロスビー波による渦位輸送によって駆動されるという解釈と整合する。

(3)深層再循環のしくみ

深層では表層とは逆に中規模擾乱によって南向き渦位輸送が生じることで再循環が駆動される。中規模擾乱を周波数帯に分けて解析を行った結果、南向き渦位輸送には前項の表層の場合よりも高周波数のロスビー波が寄与することが示された。またこの様な高周波数のロスビー波は再循環から発生していることも分かった。

数値実験結果によると、続流ジェットの傾圧不安定によって発生した中規模擾乱(蛇行)が渦となって切離し、再循環によって西向きに移流される現象がしばしば起きる。この現象をより単純化した設定で再現した数値実験の結果から、この様な再循環を西向きに移流される渦によってロスビー波が発生することが示された。これは通常の傾圧/順圧不安定の様なノーマルモードの形で表される不安定ではなく、Farrel and Ioannou (1996)によって示された非ノーマルモード型の不安定に対応する。通常、ロスビー波によって南向き渦位輸送は生じることは線形理論では考えづらいが、上記の様なロスビー波は非正弦波動的な波(複数の正弦波動的波が一定の位相関係を保って重ね合わされた波)であることから、非線型性によって南向き渦位輸送を生じさせることが解析によって示された。この過程は非線型ではあるが、数値モデルによって直接表現出来ないサブグリッドスケールへの渦位のカスケードは本質的でなく、Rhine and Young (1982) の渦位一様化説で想定されている不可逆過程は再循環の形成に重要でない。

(4)黒潮続流付近に見られるフロント構造の解析

現実海洋の黒潮続流域では続流は downstream で分岐し Kuroshio Extension Northern Branch など様々なジェットが生じることが古くから指摘されている(Mizuno and White 1983 など)。本研究では衛星海面高度計データの解析から、黒潮続流域には 4 つのジェット(Kuroshio Extension, Kuroshio Extension Northern Branch, Subarctic Boundary Current, Subarctic Current)が存在し、ほぼ東西にまっすぐ伸びていることが示された。またこれらのジェットのうち 2 つは数年から十年の時間規模でゆっくりと南下することが示された。

(5)東西縞状ジェットに対する背景流、海底地形の影響

上で述べられた続流域のジェットは大循環モデルを用いた数値実験によっても再現され、それらは東西縞状ジェットの一部に対応することが示された。現実のジェットはシャツキー海膨付近で黒潮続流から分岐している様に見えることから、先行研究では海底地形が形成に関与する可能性が指摘されていたが、数値実験の結果、海底を完全に平坦にした場合でも形成されることが示された。このことから海底地形は東西縞状ジェットに影響を与える可能性はあるものの、本質的な形成要因ではないことが分かった。

大循環モデルで得られた東西縞状ジェットは現実の続流域ジェットと同様ゆっくりと南下した。モデル内の循環を駆動する風応力分布の形を理想化して振幅等を変化させた実験から、東西縞状ジェットの南下速度は風成循環のスベルドラップ流の平均流速とよく一致することが示された。すなわち、東西縞状ジェットの南下速度は、スベルドラップ流が存在する海面から水深約 1000 m の範囲で鉛直平均された南北流速とよく一致する。

一方 2 層準地衡流モデルを用いた同様の数値実験では東西縞状ジェットの南下速度はスベルドラップ流に対応する上層の南北流速の 0.4 倍程度にしか達していなかった。層の数を 3 層に増やした実験では、東西縞状ジェットは不明瞭になる傾向があるものの、南下速度は大循環モデルの場合に近づいた。これらの結果から東西縞状ジェットの南下は層数が 3 以上の成層流体中でのみ存在するモードである advective mode (Liu 1999) が関与したものであることが示唆される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 G. Mizuta	4. 巻 48
2. 論文標題 Upgradient and Downgradient Potential Vorticity Fluxes Produced by Forced Rossby Waves. Part I: Basic Experiments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physical Oceanography	6. 最初と最後の頁 1191-1209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JPO-D-17-0197.1	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 G. Mizuta	4. 巻 48
2. 論文標題 Upgradient and Downgradient Potential Vorticity Fluxes Produced by Forced Rossby Waves. Part II: Parameter Sensitivity and Physical Interpretation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physical Oceanography	6. 最初と最後の頁 1211-1230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JPO-D-17-0198.1	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 Nakano Hideyuki, Tsujino Hiroyuki, Sakamoto Kei, Urakawa Shogo, Toyoda Takahiro, Yamanaka Goro	4. 巻 74
2. 論文標題 Identification of the fronts from the Kuroshio Extension to the Subarctic Current using absolute dynamic topographies in satellite altimetry products	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 393 ~ 420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-018-0470-4	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 Nakano Hideyuki, Matsumura Yoshimasa, Tsujino Hiroyuki, Urakawa Shogo, Sakamoto Kei, Toyoda Takahiro, Yamanaka Goro	4. 巻 77
2. 論文標題 Effects of eddies on the subduction and movement of water masses reaching the 137°E section using Lagrangian particles in an eddy-resolving OGCM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 283 ~ 305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-020-00573-3	査読の有無 無
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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 水田元太
2. 発表標題 ジェットと再循環中の渦間相互作用と渦位輸送
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究「微細構造から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究」研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野英之
2. 発表標題 二層順地衡流モデルにおける東西jetの南北遷移
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究「微細構造から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究」研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水田元太
2. 発表標題 深層再循環のしくみの解明に向けて
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究「微細構造から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究」研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野英之
2. 発表標題 Jet ドリフトに関する、傾圧平均流がある場合のロスビー波伝播の考察
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究「微細構造から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究」研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野英之, 松村義正, 辻野博之, 坂本圭, 浦川昇吾, 豊田隆寛, 山中吾郎
2. 発表標題 粒子追跡法と渦解像モデルを用いた、東経137度に到達する水塊に対する中規模渦の働き
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 水田元太
2. 発表標題 再循環から生じるロスビー波
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究「微細構造から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究」研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野英之
2. 発表標題 理想化実験における東西ジェットの南北遷移
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究「微細構造から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究」研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水田元太
2. 発表標題 続流ジェットの再循環 数値実験と概念モデルの比較
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究「微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究」研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野英之、辻野博之、坂本圭、浦川昇吾、豊田隆寛、山中吾郎
2. 発表標題 渦解像 OGCM を用いた北太平洋亜寒帯の中暖中冷構造再考
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 水田元太
2. 発表標題 東向ジェットの終端と中規模擾乱
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究「海洋大循環の力学 ---エクマン層から中深層循環まで」 研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中野英之
2. 発表標題 海面高度計を用いた北西太平洋の前線変動の同定
3. 学会等名 九州大学応用力学研究所共同利用研究「海洋大循環の力学 ---エクマン層から中深層循環まで」 研究会
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
研究 分担 者	中野 英之 (Nakano Hideyuki) (60370334)	気象庁気象研究所・全球大気海洋研究部・室長 (82109)	

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