

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21540445

研究課題名（和文）西岸境界流による惑星波動の放射および海底斜面上の循環形成のメカニズム

研究課題名（英文）The mechanism of the radiation of the planetary waves by western boundary currents and the driving of the mean flow over a bottom slope.

研究代表者

水田 元太 (MIZUTA GENTA)

北海道大学・大学院地球環境科学研究院・助教

研究者番号：30301948

研究成果の概要(和文):黒潮続流に代表されるような海洋中のジェットから発生する惑星波が、大規模な循環や海底地形と相互作用する力学的なしくみについて、次のことが明らかとなった。すなわち、1点目に惑星波はジェットの幅を広げ、海洋内部の緩やかな流れにつなげる。2点目に海洋深層で赤道向きの渦位フラックスと再循環を発生させる。3点目に海山や海溝などの斜面上において、海底、海面の両方に捕捉された循環を駆動する。

研究成果の概要(英文): The dynamics of the interaction between the planetary waves, which are radiated from an ocean jet such as the Kuroshio Extension, the large-scale mean flow, and bottom topography is examined. It is shown that the planetary waves broadens the jet and matches it with weak flows in the ocean interior. The planetary waves also induce the equatorward potential-vorticity flux in the abyss, driving deep recirculations. After impinging over a bottom slope of seamounts, trenches, etc, the planetary waves induce the mean flow that is trapped near both the bottom and surface.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：地球流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

中緯度域の大規模な海洋循環は、熱や物質を輸送し、全球規模の気候の形成に寄与する。中緯度表層の海洋循環は流れの緩やかな内部領域と西岸境界層および続流ジェットから構成されており、このうち続流ジェットは、海上の風によってもたらされた循環のエネルギーや渦位が散逸される領域にあたり、循環全体を維持する上で重要な役割を果たす。

また、続流ジェットでは、流れの不安定によって渦が生じ、そのエネルギーはジェット内部では散逸し尽くされず、むしろ惑星波動（以下、単に波とよぶ）としてジェット外部へ放射される。この波は遠方にある海山や海溝など、数100km程度以上の大規模な海底地形上で散逸され時間平均的な流れを形成する。しかしながら、これらの一連の中緯度海洋循環の散逸と平均流形成過程は、非線形性

が強く、その仕組みはこれまで十分には理解されていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、前節で述べた中緯度表層循環の維持される力学的なしくみについて、続流でのジェットが発生から、海底地形上での波の散逸に至るまでの一連の過程について、特に力学的な仕組みに重点を置いて、包括的な理解を得ることを目的とする。特に以下の点に着目し研究を行った。

### (1) 続流ジェットにおける波と平均流の作用

続流ジェットの不安定によって生じた渦などの擾乱から波が発生するしくみを明らかにする。また、波が平均流の維持に果たす役割のうち次の2点について調べる。すなわち、第1点として、続流ジェットの南北にみられる再循環とよばれる循環の形成に対する波の役割、第2点として、続流ジェットの東端でジェットと緩やかな内部領域の流れが接続するとき波が果たす役割、について調べる。

### (2) 海底地形上における波と平均流の作用

続流ジェットから放射された波が、海山、海膨、海溝の様な地形の斜面上に入射した際に、屈折や反射を受けるしくみ、波が屈折を受けることによって群速度が減少し、海底地形上で散逸を受けるための条件を明らかにする。さらに、波が散逸された際に海底地形上に平均流を形成する仕組みについて調べる。

## 3. 研究の方法

続流ジェットと、波、海底地形の作用の力学的な仕組みを理解するために、これらを理想化した設定について、3次元プリミティブ方程式系モデルによる数値実験と理論的考察を行うことによって研究を進めた。ここでは大きく次の2つの設定について取り扱った。

(1) 実験領域の西側と東側それぞれの境界から、西岸境界流と内部領域流を理想化した流入と流出を与える実験。

(2) 上記の設定に加え、領域を広げ、遠方に海山、海溝などの理想化した海底地形を加える実験。

## 4. 研究成果

(1) 波の発生と大規模循環に対する影響

先行研究によって、続流ジェットから放射される波は再循環を強める働きがあることが指摘されているが (Waterman and Jayne 2011, Mizuta 2009 など)、詳細は明らかにされていない。本研究では、流入と流出の条件を変化させて詳細な数値実験を行うことによって、(幅が狭く強い流れである) 続流ジェットが広がり、(幅が広く緩やかな流れである) 内部領域流へ接続する際に必要となる渦位を、波が供給することを示した。すなわち、続流ジェット内にある渦位の大きな南北勾配はジェットの不安定擾乱によって、一旦弱められるが、それだけでは内部領域流との間で渦位の違いが生じてしまう (図1)。波は渦位を極向きに運ぶことによって、一旦弱まった渦位勾配を内部領域流と等しくなる様に強める。流入と流出のどちらの条件を変化させても、続流ジェットと内部領域流の間の渦位の違いに応じて、波の強さは変化し、ジェットと内部領域流を接続する際に必要な渦位を供給する。

一方、波の強さは表層再循環および再循環中に存在する渦の強さとよい対応が見られる。このことは、波が再循環によって西向きに移流される渦によって放射されるとした Mizuta (2009) の説を支持する。

以上から、ジェットと内部領域流の渦位の差、波、再循環が互いに連動して変化することによって循環が維持されていることが示された。

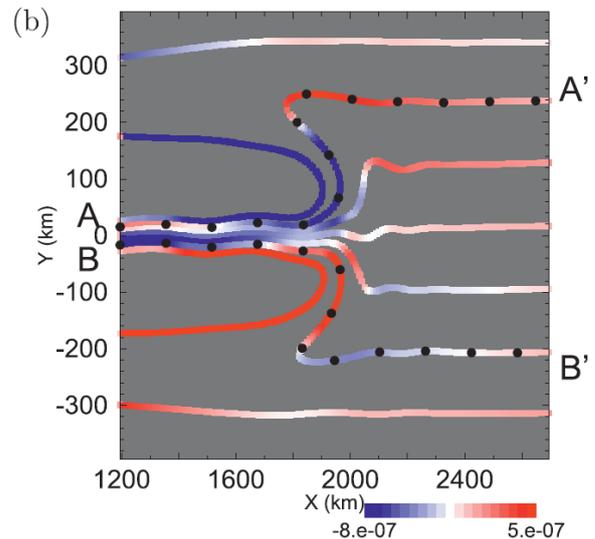


図1 表層の流線に沿った渦位の大きさを色で示したものの。赤、青はそれぞれ渦位が大きい値と小さい値をとることを表す。

## (2) 深層における渦位フラックス

前項で述べられた様に、表層では続流ジェットと内部領域流の境界において、波によって極向きの渦位フラックスが生じる。これに対し、深層では赤道向きの渦位フラックスが卓越することが知られている (Holland and Rhines 1980)。その仕組みを調べるために、続流ジェットの不安定によって生じる擾乱の代わりに、振動する外力を与えて波を発生させる数値実験を行った。続流ジェット内の擾乱は表層で強いので、表層に捕捉された外力を与えたところ、表層では外力によって直接起こされた波によって極向きの渦位フラックスが生じるのに対し、深層では外力の2倍の振動数を持つ harmonics の波によって赤道向きの渦位フラックスが生じることが示された。外力が十分小さい場合には、harmonics の波は三波共鳴によって生じることが、半解析的に示される。このとき、harmonics に対する非線形強制は傾圧性が強く、深層では波を打ち消す方向に働くために、赤道方向の渦位フラックスが生じることが分かった。さらに、赤道向きの渦位フラックスによって再循環と同じ方向の時間平均的な循環が形成されることが示された。harmonics と渦位フラックスの基本構造は外力が大きく、非線形性が強い場合でも定性的に変わらない。同様の赤道向き渦位フラックスは流入流出を与える数値実験でも見られ、比較的高周波数の波が見られる周波数帯からの寄与が卓越していた。これまで Rhines and Young (1982) で想定された様に、赤道方向の渦位フラックスは非線形性が強い場合にのみ生じる乱流混合とのアナロジーで理解されることがあったが、赤道向き渦位フラックスはむしろ波によることが強く示唆される。

## (3) 海底地形上の波と平均流

続流ジェットから放射された波が、陸棚斜面や海山、海溝などの海底地形に向かって入射したときの、波の屈折、反射のふるまいを等深線が東西南北に一般的な方向である場合について調べた。Rhine (1970) で示された様に、(北半球では) 入射波の位相速度の等深線に平行な成分が、斜面の浅い方を右手に見る方を向いているときに入射波は海底に捕捉される。等深線が東西方向を向いている場合は、理論的取り扱いが容易であり、海底捕捉波は海底勾配が大きな領域に進入するにつれて群速度が減り、散逸を受けることが知られている。これに対し、一般的には、波数ベクトルと等深線の方法によって、海底捕捉された波が散逸される場合と、等深線に垂

直方向の波数が小さくなり、反射が起きる場合の2通りが存在することが理論的に示された。

次に、海底地形上に形成される平均循環の特徴を、上に述べた波が海底斜面上で散逸される場合とそれ以外の場合について、数値実験によって調べた。波が散逸される場合には、等深線に沿い、海山や海溝の上を(北半球では)浅い方を右手に見る方向に循環する時間平均的な流れが生じる。平均循環は等深線が東西を向いている場合には、惑星ベータ効果の影響を受けず、比較的順圧的な鉛直構造を持つが、等深線が南北に傾くに従い、平均流は海底付近に強く捕捉される傾向がある。これに対し、海底捕捉波が生じない場合や、反射される場合には、海山や海溝の直上より手前で、平均流が形成される。この平均流れは浅い方を右手と左手に見る場合の両方あり、海底と海面に捕捉される場合がある (図2)。

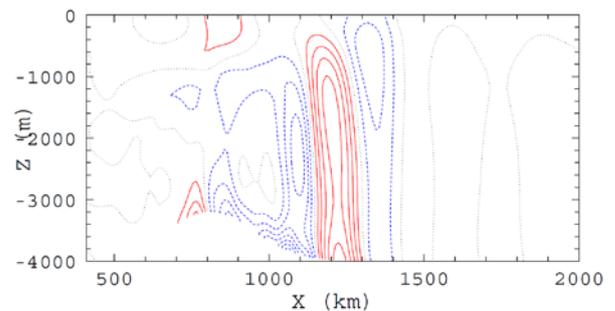


図2 波によって ( $x = 800$  km を中心とする) 海山上に形成される平均流の鉛直断面図。赤い実線と青い破線はそれぞれ浅い方を左手、右手に見る方向の流れを表す。

## (4) エネルギー収支

数値実験で得られた擾乱と平均流のエネルギー収支を調べた所、擾乱成分のエネルギーのうち、続流ジェット内部で散逸されるエネルギーと、波となり遠方で散逸されるエネルギーの比はほぼ1対1となり、波によるエネルギー放射が風成循環全体のエネルギー収支に対し重要であることが確認された。ただし、数値実験では、続流ジェット内部の典型的な渦に対する鉛直粘性による散逸の時間スケールが水平粘性の時間スケールより大きい場合を扱ったが、鉛直粘性係数を小さくしたときの渦の順圧化と波の放射に対する影響については確認を行う必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

Mizuta, G., Role of the Rossby waves in the Broadening of an Eastward Jet., Journal of Physical Oceanography, 査読有, Vol. 42, 2012, p476-494

[学会発表] (計1件)

水田 元太、増田 章、表層に振動を与えた場合の波による深層平均流形成、2013年度日本海洋学会春季大会、2013年3月24日、東京海洋大学品川キャンパス (東京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水田 元太 (MIZUTA GENTA)  
北海道大学・大学院地球環境科学研究所・  
助教  
研究者番号：30301948

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし