

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24年 4月 13日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2012

課題番号：20740066

研究課題名（和文） 回転球面上の two-gyre flow の不安定性発生形態の解明

研究課題名（英文） A study of stability of two-gyre flow pattern on a rotating sphere

研究代表者

谷口 由紀 (TANIGUCHI YUKI)

首都大学東京・理工学研究科・特任助教

研究者番号：50468831

研究成果の概要（和文）：

回転球面上の境界付き領域内において東風一様風を与えた場合の順圧流体の流れパターンについて調べた。ここでは、two-gyre flow（2つの旋回流体）に着目している。強制風が強いと、定常で安定な西岸強化流はホップ分岐により不安定化する。さらに強い強制風では、gyre 内に渦列が生じ、流体領域が広がると南北にも分裂して東西帯数が増える。また、流体領域の境界上に流入口と流出口を与えた場合についても西岸強化流の形成が確認された。

研究成果の概要（英文）：

We study the barotropic flows in a domain on a rotating sphere with the rigid boundary under a uniform easterly wind, and observe two-gyre flow patterns. As wind-forcing increases, an oscillating instability arises from the steady flow of westward intensification by Hopf bifurcation. As wind-forcing is strong, a vortex street occurs from each gyre. As the size of the fluid field is larger, the number of the north and the south vortex streets increases. The westward intensification is observed for steady flow with inflow and outflow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：応用数学

科研費の分科・細目：数学・数学一般（含確率論・統計数学）

キーワード：回転球面、2次元流体、境界条件

1. 研究開始当初の背景

地球上には様々な流体現象が存在する。グローバルに見ると、地表面は大気で覆われて

いるし、海洋は水で満たされている。これらの流体は、

1. 地球の回転効果（コリオリ力）

2. 地球大気密度の変化
3. 放射や水分の相変化

などを受けて多様に変化する。詳細な観測データを用いた海洋や大気の大規模な数値モデルは、計算機能力の向上と共に発展し、研究の歴史が長い。しかし、現象を忠実に再現しようとするため、多くのパラメータが混在し、本質がわかりにくくなっている。そこで、ここでは、複雑な要素を取り除き、地球を「回転球面上を2次元流体が覆っている」ものとみなす。このように自転効果だけを与え「回転球面上」を2次元流体が覆うような状況で、基本性質を見出すことはできるだろうか？

近年、回転球面上の流体運動について研究がおこなわれている。私は、回転球面上に境界で区切られた領域があるときの、流体運動の振る舞いについて研究を進めてきている。つまり、2次元流体の、力学的構造に対する境界の影響について追究している。特に、海洋の風成循環を念頭においた強制流体運動を回転球面上で詳細に調べ、流体領域の場所、大きさ、強制風形が変わったとき、安定な流体が不安定化へ移行する形態を調べることを目的とする研究を進めている。

海洋には、海面を吹く風の応力だけによって生じる海洋中の大規模な循環がある（風成循環）。それは、西岸で局地的に強い流れ（西岸強化流）を伴う。このような力学的構造を調べるために、特定緯度の局所直交直線座標系を用いてコリオリ力を近似する β 平面が古くから用いられていて、多くの研究が行われている。1990年代から、 β 平面上で2つの旋回運動（two-gyre flow）が形成されるような強制風に対し、流体運動の力学的構造について詳細に調べられている。Simonnet and Dijkstra (2002) や Dijkstra (2005) は、レイノルズ数が増加するにつれて、two-gyre flow は初めピッチフォーク分岐で不安定化し、次にホップ分岐で不安定化することを示している。これに対し、私は、回転球面上で2次元強制流体運動を調べている。 β 平面上では固定緯度における線形近似でコリオリ力が与えられるのに対し、流体領域を球面上にすると、緯度の影響を考慮できる。今までに、3つの旋回運動（three-gyre flow）や4つの旋回運動（four-gyre flow）が形成されるような強制風で、強制風の形や強さを変えたときの流れの安定性について調べている。強制風が強くなるにつれて、安定な西岸強化流はホップ分岐で不安定化し、その発生域と強制関数形との関係を見出している。

2. 研究の目的

本研究では、海洋の風成循環を念頭においた流体運動を回転球面上で詳細に調べ、流体

領域の場所、大きさ、強制風形が変わったとき、安定な流体が不安定化へ移行する形態について調べることを目的としている。 β 平面上においては、2つの旋回運動（two-gyre flow）が形成されるような強制風に対して流体運動の力学的構造について調べた研究がいくつか報告されているが、球面上についての研究は知られていない。そこで本研究では、球面上で強制流体運動について調べ、先行研究の β 平面の結果と比較・検討を行う。

今までに、回転球面上においても β 平面上で見られるような安定な西岸強化流の存在を確認している。強制風が強くなると西岸強化流は不安定化するが、その時の発生形態は β 平面上の場合とは異なる。球面上では南北の対称性は保たれるが、 β 平面上では崩壊する。そこで、two-gyre flow を形成する強制風について、流れ場の力学的構造や分岐構造を詳細に調べ、得られたデータを基に球面上における2次元強制流体運動の力学的構造について検討することを目的とする。

3. 研究の方法

東風応力を強制風としてtwo-gyre flow の安定性について調べる。領域の中心を赤道上に固定し、サイズと強制風の強さを変えて流れパターンを観測する。弱い強制風を与えると、安定な西岸強化流が形成され、強制風の強さの変化に伴い、南北対称性を保ったままホップ分岐で不安定化する。さらに強制風が強くなると、それぞれのgyreの旋回運動は分裂を始める。

研究では、不安定化後の力学的構造を解析しgyre内における旋回運動の分裂メカニズムについて考察する。線形安定性解析から得られた固有関数を詳細に調べ、不安定化の構造について考える。また、東風応力に、赤道上で逆向きの強制風を加えた場合や、流体領域が南北対称な位置にない場合等、様々な視点からの数値実験を行い解析することで、球面上での2次元強制流体の安定性を考察する。

領域サイズや強制風の強さは

1. 流体領域のサイズ：
流体の半径 = $\pi/4$ 、 $\pi/3$ 、 $5\pi/12$ 、 $\pi/2$ （半球）
2. 強制風の強さ（ C ）：
 $10 < C < 600$

として数値実験を行う。弱い強制風の場合は、いずれの流体領域においても、安定な西岸強化流が形成される。また、強制力の増加に伴い、two-gyre flow はホップ分岐で不安定化する。不安定化の発生域を調べるために、線形安定性解析で導かれる固有関数を調べてみると、南北にほぼ等しく分割する東西帯内で不安定化が起こることを既に見出してい

る。また、流体領域が広がるにつれて、南北に分割する東西帯の数は増える傾向にある。そこで、領域の大きさが連続的に変化するような状況において固有関数の変化を調べ、不安定化の発生形態について追究することを計画する。また β 平面上の結果との比較検討を行うことも計画する。

4. 研究成果

流体領域の半径が $\pi/4$ で、一様東風応力を強制風とした場合、2つの旋回流体が分裂して、それぞれの gyre 内にいくつかの渦列が生じるようになることについて詳しく調べた。強制関数形を一様東風応力から four-gyre flow となるように変形していくと、しだいに旋回流体の分裂は起こらなくなる。一様風と異なり four-gyre flow となる強制風は、高緯度において西風が流体を東へ運ぶため、それぞれの gyre が完全に分裂した渦列になることはなく、gyre 内にロスビー波的な渦列が形成されると考えられる。また、この分裂した渦の大きさには規則性があり、そのため、流体領域を広げたときの南北に分割する東西帯の数も決まると考察する。一様風から強制関数の変化を曲率の変化で述べた内容を論文にまとめた。この結果は、簡単なモデルでの計算のため現実現象と直接比較はできないが、黒潮の蛇行に風向きが関係することを示唆していると考えられる。

流体領域の中心を中緯度に移動した場合について強制風の変化に伴う流体運動についても調べた。これは β 平面上における two-gyre flow を調べた Dijkstra (2005) の研究と球面上の場合とを比較するためである。彼らの研究では、最初にピッチフォーク分岐が生じ、次にホップ分岐を経てから不安定化に移行すると示されている。回転球面上で行った研究で、流体領域を中緯度に移動した場合についても赤道中の場合と同じように、ピッチフォーク分岐を生じることなくホップ分岐で不安定化することを確認した。また、中緯度中心の円形 β 平面上においても同様な結果が得られた。従って、この不安定化の移行の違いは、流体領域の形状が影響している可能性が考えられる。

また、流体領域の境界上に流入口・流出口を与え、外洋との間に繋がりが生じるような流れを与えた場合について流体運動を調べた。流入口と流出口を赤道上の対称な位置に配置し、一定量の定常流を与え続けた場合、赤道の南北対称な位置に西岸強化流が形成される。これは、一様強制風による数値計算から生じる two-gyre flow と同様な結果である。また、流入口・流出口を南北対称な位置に配置すると、流体領域全体に西岸強化流が生じる。この西岸強化流は流体領域の大きさ

や位置によって変化することを、数値的に非線形解を求めることで見出した。また、流入口・流出口を南北対称な位置に配置し、流体領域の位置を赤道中心から北極中心まで移動したときの西岸強化流形成の変化について調べた。赤道中心では流体領域全体に西岸強化流が形成されるのに対し、北極中心では左壁に沿って流入口から流出口に向かう流れと中心付近に留まる渦が形成されることを見出した。また、中緯度に流体領域の中心が存在する場合は、流体は極域近傍に形成される渦に沿って流れ、渦の領域が終わると右壁に沿った西岸強化流に切り替わることを見出した。さらに、流量を増やし不安定化への移行について研究を進めていく。また、境界が生じる流体領域についての浅水波方程式については、境界条件の扱い等でさらに詳しく検討する必要がある。

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4件)

- ① Y. Taniguchi and M. Yamada, "The transition of the polar cap flow to the westward flow on a rotating sphere", *Theoretical and Applied Mechanics*, 60, 29-42, 2011, 有
- ② Y. Taniguchi, H. Kitauchi and M. Yamada, "Closed vortex in a rotating polar cap", *Theoretical and Applied Mechanics*, 58, 131-143, 2010, 有
- ③ Y. Taniguchi, H. Kitauchi and M. Yamada, "Stability of flow on a rotating on a polar cap", *Fluid Dynamics Research*, 41, 1-16, 2009, 有
- ④ Y. Taniguchi, "Flow Patterns in an Equatorial Basin with a Uniform Easterly Wind on a Rotating Sphere", *Theoretical and Applied Mechanics*, 57, 279-288, 2009, 有

[学会発表] (計14件)

- ① 谷口由紀、山田道夫、「回転球面上の極冠流と西岸強化流」、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 24 日、富山大学五福キャンパス
- ② 谷口由紀、山田道夫、「西岸強化流と極冠流の転移について」、日本応用数理学会 2011 年度年会、2011 年 9 月 16 日、同

志社大学今出川キャンパス

- ③ 谷口由紀、山田道夫、「回転球面上における極冠流から西岸強化流への転移」、日本流体力学会年会 2011、2011 年 9 月 9 日、首都大学東京南大沢キャンパス
- ④ 谷口由紀、「回転球面上の流体運動について」、第 5 回数電機連携セミナー、2011 年 7 月 13 日、首都大学東京南大沢キャンパス
- ⑤ 谷口由紀、山田道夫、「回転球面上の極冠流れの西岸強化流への転移について」、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月、新潟大学五十嵐キャンパス
- ⑥ 谷口由紀、山田道夫、「回転球面上の極冠流れの西岸強化流への転移について」、第 60 回理論応用力学講演会、2011 年 3 月 10 日、東京工業大学大岡山キャンパス
- ⑦ 谷口由紀、北内英章、山田道夫、「極冠領域内における孤立渦」、日本応用数理学会 2009 年度年会、2009 年 9 月 29 日、大阪大学豊中キャンパス
- ⑧ Yuki Taniguchi, “The stability of a flow on a rotating polar cap”, MAS seminar, 2009 年 7 月 15 日、明治大学理工学部
- ⑨ 谷口由紀、北内英章、山田道夫、「回転球面上の極冠領域内における流れの安定性について」、第 58 回理論応用力学講演会、2009 年 6 月 10 日、日本学術会議
- ⑩ 谷口由紀、「回転球面上の境界付き領域内における流体運動」、HMCセミナー、2008 年 10 月 8 日、金沢大学大学院自然科学研究科
- ⑪ 谷口由紀、山田道夫、「回転球面上の極冠領域内における流れの安定性について」、日本応用数理学会 2008 年度年会、2008 年 9 月 19 日、東京大学柏キャンパス
- ⑫ 谷口由紀、北内英章、山田道夫、「回転球面上の極冠領域内における流れの安定性について」、日本流体力学会年会 2008、2008 年 9 月 7 日、神戸大学六甲台キャンパス
- ⑬ 谷口由紀、山田道夫、「回転球面上の円

領域内の流れパターンとその安定性について」、第 57 回理論応用力学講演会、2008 年 6 月 11 日、日本学術会議

- ⑭ 谷口由紀、山田道夫、「回転球面上の流体運動」、日本地球惑星科学連合 2008 年大会、2008 年 5 月 27 日、幕張メッセ

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷口 由紀 (TANIGUCHI YUKI)
首都大学東京・理工学研究科・特任助教
研究者番号：50468831

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：