

機関番号：3 2 6 1 2

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2010

課題番号：19740290

研究課題名（和文） ジェットから放射される大気重力波の研究

研究課題名（英文） Research on atmospheric gravity wave radiation from jet flows

研究代表者

杉本 憲彦（SUGIMOTO NORIHIKO）

慶應義塾大学・法学部・専任講師

研究者番号：10402538

研究成果の概要（和文）: ジェット等から放射される大気重力波について、数値実験及び理論解析による研究を行った。その結果、この過程は自発的な放射過程として、以下の特徴をもつことがわかった。(1)流れの非定常性が本質的な役割を果たす。(2)流れ(波のソース)の振動数が、コリオリ振動数(地球回転の効果)を上回った時に初めて、重力波は放射・伝播する。(3)基本的な実験設定では、重力波の遠方場の解析解が導出でき、数値実験の結果とも整合する。さらに、大規模な気候モデルデータの解析手法を提案し、その有用性も示した。

研究成果の概要（英文）: Numerical simulation and theoretical study of atmospheric gravity wave radiation from jet flows are done. The process is called as “spontaneous gravity wave radiation” and fundamentally different from the classical “geostrophic adjustment”. Three features are revealed. (1)Gravity waves are spontaneously radiated from nearly balanced but unsteady rotational flows. (2)Only when the frequency of dominant source of unsteady rotational flows is higher than the inertial frequency (the effect of the Earth’s rotation), gravity wave radiation and propagation occurs. (3)It is possible to derive analytical estimation for gravity waves at the far field in the simple situation, and theoretical results are well validated by the numerical simulation. In addition, several new methods to analyze huge climate model data are proposed and the effectiveness of those is shown.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,300,000	660,000	3,960,000

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・大気重力波

## 1. 研究開始当初の背景

大気重力波は大気や海洋中の浮力を復元

力とする波で、運動量を遠方まで輸送するため、中層大気の大循環を駆動する重要な働き

を担う。中層大気の大循環はオゾンや二酸化炭素などの物質輸送を通じて、気候変動に大きな影響を与える。このため、将来気候の予測において、重力波の励起問題は重要な研究課題として認識されていた。

しかしながら、大気重力波の放射過程についての研究は、主に山岳などの地形性のものに限定されていた。この種の放射過程は地衡流調節と呼ばれ、初期に仮定した非平衡状態から平衡状態への遷移過程での重力波放射を扱う。一方で近年の観測的研究により、ジェット気流や台風等の強い渦的な流れからの重力波放射が報告されていた。そこでは重力波はほぼ平衡状態にある流れから放射されるため、従来の理論では説明ができず、その放射メカニズムの解明が急務になっていた。

我々のグループ等による f 平面浅水系を用いた研究により、これらの放射過程が、流れの非定常運動からの自発的な放射であり、地衡流調節とは本質的に異なる過程であることが明らかにされるようになってきた。そして、渦からの音波放射理論を援用することによって、その理論的側面の解釈も可能であることが示されていた。しかしながら、これら簡略化モデルを用いた成果が、より一般的な系にどの程度まで適用できるかについては、未だ明らかになっていなかった。

## 2. 研究の目的

上記背景より、本研究では自発的な重力波放射過程について、これまでの研究を進展させ、より詳細な特徴を調べる。特に、簡略化モデルから順次拡張した数値実験及び理論解析を行い、ジェット等の強い渦的な流れから放射される重力波放射の本質を解明することを目指す。また、流体分野での渦からの音波放射理論に着目し、地球回転の効果が重力波放射に与える影響を調べることで、この理論の適用限界を見極め、現実大気への応用面での知見を得ることも目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 球面浅水系を用いた数値研究

これまでの f 平面の知見の適用限界を見極めるために、地球回転の効果が緯度変化する球面上で、ジェットからの重力波放射を非線形数値実験により調べる。浅水系では、密度差が水面の境界で大きく変化するため、位相の速い外部重力波しか存在できない。このため、渦から放射される重力波の振幅は非常に小さくなり、高精度の数値実験が必要になる。しかしながら、これまで用いてきた高速なフーリエ変換によるスペクトルモデルは、球面上では使用できないため、高精度高解像度な

数値解法として、結合コンパクト差分を用いた数値モデルを開発して、使用する必要がある。自発的な重力波放射を継続的に持続させるため、初期にバランスしたジェットの流れと高度場を設定し、それを維持する強制項を加えた。これにより、ジェット流の不安定により渦の流れの非定常運動を再現し、そこからの継続的な自発的な重力波放射を調べることができる。特に基本場ジェットの配置緯度と地球回転効果を変化させた系統的なパラメータ走査実験を行い、重力波の放射・伝播特性を網羅的に調べる。

### (2) f 平面浅水系を用いた理論的研究

より基本的な実験設定として、f 平面浅水系において同軸回転する渦系対から自発的に放射される重力波を調べる。この設定では放射された重力波の遠方場について、解析的な導出が可能である。まず、地球回転のない系において、流体分野での渦対からの音波放射理論を援用し、渦対から放射される重力波の遠方場を、グリーン関数を用いて導出する。地球回転の効果が含まれると、重力波は分散性を持つため、渦対の時間発展について過去の履歴の積分が必要になるが、同様の形式での遠方場の導出が可能である。さらに同様の枠組みにおける数値実験を行い、解析解の検証と数値モデルの性能評価を行う。その後、解析解では表現できない、実験設定への拡張を行い、地球回転の効果や有限の渦の大きさが自発的な重力波放射に与える影響を調べる。

当初の研究計画では、3次元モデルや全球モデルへの拡張を行う予定であったが、いくつかの研究報告が本研究推進中にされたことと、より基本的な設定における解析的な研究の重要性が増したことから、研究計画を変更して行った。

### (3) 気候モデルの大規模データの新解析手法

本研究推進中に、大規模な気候モデルデータの解析手法に関する議論が発展したため、二つの新解析手法、高速な球面自己組織化マップ、および非経験的な高速渦抽出、を提案し、それを用いたデータ解析で有用性の評価を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 球面浅水系を用いた数値研究

地球回転の効果が自発的な重力波放射に与える影響に着目するため、特に基本場ジェットの配置緯度と地球回転効果を変化させたパラメータ走査実験により、重力波の放射・伝播特性を系統的に調べた。その結果、比較的遅いジェット流では、高緯度ジェットから重力波がほとんど放射されず、低緯度ジ

ェットから放射された重力波も高緯度に伝播しないことがわかった。また、得られた結果を、 $f$  平面浅水系の知見を援用し、重力波ソースの導出及び解析を行うことで解釈を試みた。重力波のソースの各項の大きさや振動数の特性は過去の結果と整合的であったが、地球回転の効果が緯度変化するため、高緯度では地球回転の効果が重力波放射を抑制し、低緯度で重力波が放射されても高緯度に伝播できない、ことが明らかになった。これらは観測的研究の知見とも整合的で、渦流からの重力波放射に関して、重要な知見を与えるものである。

## (2) $f$ 平面浅水系を用いた理論的研究

渦からの音波放射理論で導出される、地球回転の効果が無い場合の渦対からの重力波放射の遠方場を、地球回転の効果を含まない場合に拡張した。地球回転の効果を含まない系では、重力波は分散性を持つため、渦対の時間発展について過去の履歴の積分が必要であり、このことが遠方場の予測を困難にしていた。一方で過去の履歴を正確に知ることができれば、将来に伝播する重力波を先験的に知ることが可能である。

また、同じ枠組みにおける数値実験を行った。まず、数値モデルには、重力波の伝播方向に無限に広い円盤領域を持つ  $f$  平面浅水系を用いた。最初に、得られた解析解と数値計算結果の比較を行い、数値モデルと解析解の整合性の評価を行った。そして、様々なパラメータにおける数値実験を行うことで、解析解の適用限界も明らかにした。また、高・低気圧渦からの重力波放射が、地球回転の効果により非対称性を持つことを示した。今後は、より一般的な渦的な流れについて、そこからの重力波放射を評価していくことが課題になる。

これらの成果は、より複雑な 3 次元気候モデルにおいても、ジェット等の渦流からの重力波放射を、定量評価できる可能性を示唆するものとして重要である。現在の気候モデルでは解像度や自発的重力波放射に関する知見の不足から、この種の重力波放射は扱われていない。本研究の成果を拡張できれば、自発的な重力波放射を与えられた渦的な流れから先験的に予測可能である。そのためには、簡略化した実験設定による解析解の導出と、数値モデルによる検証、その拡張による様々な流れ場での自発的重力波放射の定量的評価が必要である。解析的研究と数値実験を組み合わせることで、自発的な重力波放射過程を段階的に理解し、より複雑な現実大気においても先験的な定量評価が可能になると考えられる。

## (3) 気候モデルの大規模データの解析手法

まず、ニューラルネットの一種で、非線形な可視化抽出手法である、自己組織化マップを用いて、気候の主要変動パターンの抽出を行った。大規模な気候モデルデータへの適用を念頭に、学習に応じてニューロンの数を増殖させ、境界の偏りを回避するために球面の配置を用いる手法を使用した。その結果、従来の線形な EOF の主要モード分類では、類似度の高いデータであっても、実際には空間構造の大きく異なるものが、本手法では正しく分類できることが示された。

また、大規模な気候モデルデータから、経験的な条件を探索せずに高速に渦を抽出する手法を提案した。この手法では全格子点を探索することなく、流線を逐次的に追うことで台風の中心を高速に探索する。観測データを用いた台風抽出精度の評価では、従来手法と同等の精度で、かつ高速に抽出できることが示された。

## 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 9 件)

Norihiko Sugimoto, Tuan Minh Pham, Kanta Tachibana, Tomohiro Yoshikawa, and Takeshi Furuhashi, High speed method of detecting vortex without empirical conditions Application to risk assessment of tropical cyclone -, Theoretical and Applied Mechanics Japan, refereed, Vol.57, (2009), p297-307.

Norihiko Sugimoto and Katsuya Ishii, Spontaneous Gravity Wave Radiation from Unsteady Flows in Shallow Water System on a Rotating Sphere, "Frontiers of Computational Science II", refereed, (2008), p181-188.

Norihiko Sugimoto and Kanta Tachibana, A First Attempt to Apply High Speed Spherical Self-organizing Map to Huge Climate Datasets, SOLA, refereed, Vol. 4, (2008), p41-44.

Norihiko Sugimoto, Keiichi Ishioka, and, Katsuya Ishii, Parameter Sweep Experiments on Spontaneous Gravity Wave Radiation From Unsteady Rotational Flow in an F plane Shallow Water System, Journal of the Atmospheric Sciences, refereed, Vol. 65, No. 1, (2008), p234-249.

Norihiko Sugimoto, Keiichi Ishioka,

and Shigeo Yoden, Gravity wave radiation from unsteady rotational flow in an f plane shallow water system, Fluid Dynamics Research, refereed, Vol. 39, No. 11-12, (2007), p731-754.

Norihiko Sugimoto, Keiichi Ishioka, and Shigeo Yoden, Balance regimes for the stability of a jet in an f plane shallow water system, Fluid Dynamics Research, refereed, Vol. 39, No. 5, (2007), p353-377.

〔学会発表〕(計17件)

Norihiko Sugimoto, Spontaneous gravity wave radiation from unsteady rotational flows in a rotating shallow water system, AGU Chapman Conference on "Atmospheric Gravity Waves and Their Effects on General Circulation and Climate", 4 Mar 2011, Hawaii, USA.

Norihiko Sugimoto, Spontaneous gravity wave radiation from vortex pair in an f plane shallow water, 10th EMS Annual Meeting, 15 Sep 2010, Zürich, Switzerland.

Norihiko Sugimoto, Spontaneous Imbalance and Gravity Wave Radiation from Vortical Flow in a Rotating Shallow Water System, Workshop / Summer School on "Waves and Instabilities in Geophysical and Astrophysical Flows", 29 May 2009, Island of Porquerolles, France.

Norihiko Sugimoto, Spontaneous gravity wave radiation from nearly balanced rotational flows in a shallow water system, IUTAM/INI Workshop on The Nature of High Reynolds Number Turbulence, "Rotating Stratified Turbulence and Turbulence in the Atmosphere and Oceans", 11 Dec 2008, Cambridge, UK.

Norihiko Sugimoto, Spontaneous inertial gravity wave radiation from a jet stream in a shallow water system on a rotating sphere, The 24th General Assembly of International Union of Geodesy and Geophysics, 12 Jul 2007, Perugia, Italy.

〔図書〕(計1件)

杉本憲彦, 他, シュプリンガー・ジャパン, 「自己組織化マップとそのツール」, 第8章, 高速球面 SOM とその地球温暖化問題への適用, 2008, p147-160.

〔その他〕

ホームページ等

<http://web.hc.keio.ac.jp/~nori/index.html>

<http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/0040/017018/profile.html>

<http://www.sci.keio.ac.jp/member/detail.php?eid=00014>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 憲彦 (SUGIMOTO NORIHIKO)

慶應義塾大学・法学部・専任講師

研究者番号: 10402538

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし