

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2017

課題番号：25800265

研究課題名(和文) 大気重力波の自発的な放射過程の解明

研究課題名(英文) Study on the spontaneous emission of atmospheric gravity waves

研究代表者

杉本 憲彦 (SUGIMOTO, Norihiko)

慶應義塾大学・法学部(日吉)・准教授

研究者番号：10402538

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：大気重力波の自発的な放射過程について、理論的および数値的に研究を行い、一定の成果を得た。f平面浅水系においては、様々な渦的流れを用いて、重力波の定量的調査を行い、高低気圧の非対称な重力波放射を世界で初めて報告した。また、3次元系では、新たな自発的放射理論の構築と、数値実験による自発的放射の反作用の定量化に成功した。これまでのこの研究領域の成果により、「地球流体における渦からの自発的な重力波放射の研究」として、日本流体力学会の2016年度学会賞(竜門賞)を受賞した。

研究成果の概要(英文)：Spontaneous emission of atmospheric gravity waves is investigated by analytically and numerically. In f-plane shallow water system, asymmetry of cyclone-anticyclone has been reported for the first time. In 3-dimensional system, new radiation theory has been constructed. Furthermore, back reaction of gravity wave radiation is quantitatively estimated by numerical simulation. Those achievements have been prized by the Japan society of fluid mechanics.

研究分野：地球流体力学

キーワード：気象学 地球流体力学 大気重力波 自発的放射

1. 研究開始当初の背景

大気重力波は、日々の気象に影響を与える大規模な渦の流れに比べて、小規模な波である。観測や計算技術の精度向上により、大気重力波の研究が可能になり、その働きが次第に認識されつつあった。重力波は遠方まで運動量を輸送し、中層大気の大循環を駆動する重要な役割を果たす。この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や混合を通して、気候変動に大きなインパクトを与える。このため、より信頼性の高い気候変動の予測を行うためには、高解像度モデルでの重力波の諸過程の取り扱いが重要な課題となっていた。しかしながら、重力波の放射過程の理解は、地形性のものを除いて十分とは言えない状況であった。

特に、観測研究で、強い渦の流れ(極夜ジェット、亜熱帯ジェット、台風など)からの重力波放射が報告されており、その放射過程の解明が急務となっていた。この重力波の放射過程は、初期に非平衡状態を仮定した従来の地衡流調節理論では説明できない。なぜならこの過程では、ほぼ平衡状態にある渦の流れの非定常運動に伴って、自発的に重力波が放射されるためである(引用文献)。研究開始当初は、この自発的な放射過程が世界的に注目されている状況であった。

一方、自発的な放射過程は理論的にも興味深い状況であった。地球自転と密度成層の影響を受ける地球流体の大規模運動では、精度の良い近似として地衡流などの平衡関係が維持されている。この平衡関係を用いて簡略化した近似モデル(バランスモデル)中では、位相速度の速い重力波は除去され、ポテンシャル渦度のみで時間発展を記述できる。このため、地球流体の渦運動に関する理論的知識のほとんどは、バランスモデルを基礎に形成され、現業的にも、数値モデルの初期値データの作成(イニシャリゼーション)にバランスモデルが用いられてきた。しかしながら、平衡関係の成立や維持については自明でない。これまでに、厳密なバランスモデルは数学的に存在しない一方、その近似の精度は高いことが示され、適用限界の見極めが重要な課題となっていた。ほぼ平衡状態にある渦の流れからの自発的な重力波放射は、バランスモデルの適用限界に直結し、この問題に新たな切り口を提供すると考えられていた。

そのような中、代表者は簡略化モデルである回転浅水系を用いて、広範なパラメータ空間でジェットからの自発的な重力波の放射過程を調べ(引用文献)、バランスモデルの適用限界の見極めに取り組んでいた(引用文献)。また、重力波の放射強度に、ロスビー数の中間領域での極大を発見し、重力波ソースの解析から、定性的な説明を与えることに成功していたが、その要因について、理論的な解釈を与えるまでには至っていなかった。

2. 研究の目的

このような状況の中で、ジェットのみならず、ほぼバランスした渦的な流れから放射される重力波を理論的に記述する、自発的放射理論の構築および、その重力波の定量的な見積もりを与えることを目的とした。

具体的には、以下の3つの目的の達成を目指した。

- (1) 簡略化モデルから順次拡張した系を用いて、数値実験および理論研究を並行して推進し、観測研究の成果も援用した総合的な解析を行い、自発的放射過程の本質を解明する。
- (2) 特に、放射・伝播・散逸の諸過程を、解像度依存性や背景場へのインパクトを含めて定量的に評価し、気候モデルでこの放射過程を取り扱う必要性和その実現方法を示す。
- (3) 同時に、各系で広範なパラメータ領域かつ様々な基本場を用いた数値実験により、重力波の放射量を調べ、その系におけるバランスモデルの適用限界を明らかにする。

3. 研究の方法

数値モデルを用いた重力波の自発的な放射過程の研究と、渦音理論を援用した重力波の自発的な放射過程の理論的研究の2つの方向を並行して進める。まず、簡略化モデルである浅水系で数値的、理論的に研究を進め、その後、現実大気への拡張を行っていく。簡略化モデルで得られた結果と理論的考察を順次、より複雑な系へと拡張していくことにより、その知見の適用範囲の見極めが可能である。

また、簡略化モデルでは渦音理論を援用し、重力波の励起源の特定や遠方の放射場の理論解析が可能である。数値モデルの開発とともに、解析的に遠方の重力波を導出することで、数値モデルの検証にもつなげる。

一方、より複雑な現実大気への拡張は困難を伴う。連続的に成層が可能な3次元モデルへの拡張においても、導出した自発的放射の理論を数値モデルによって検証するとともに、数値実験でのみ評価が可能な重力波放射の反作用の定量化などを行う。

4. 研究成果

(1) 「 f 平面浅水系における回転渦系対からの重力波放射の理論的研究および数値実験」

f 平面浅水系において、回転渦系対からの自発的な重力波放射を調べた。数値実験では、無限領域の高速スペクトル法(ISPACK)を用い、重力波の定量的調査を可能にした。この手法は、円盤座標の浅水方程式系を球面に射影し、球面のスペクトル展開を用いるもので、中心の渦領域にグリッドを密に配置し、遠方の重力波伝播領域で効率的に重力波を散逸させ、境界の影響を取り去ることができる。理論的研究では、グリーン関数を用いた数理解析手法により、自発的な重力波放射の遠方場を解析的に導出した。解析解の導出及び数値モデル結果との比較を行い、良好な結果が

得られた。特に、数値実験で得られた自発的
重力波放射の高低気圧渦の非対称性につい
て、渦からの音波放射理論（渦音理論）を援
用した拡張を行うことで、解析解からも説明
が可能になった。高低気圧渦の非対称性の原
因はコリオリ力に起因するソース項であり、
高気圧渦では地球の回転効果が重力波放射
を強めるパラメータ領域があることが示さ
れた。得られた成果は雑誌論文 として、出
版済みである。

(2)「3次元領域モデルにおける渦的流れから
の重力波放射の数値実験および理論的研究」
3次元での自発的重力波放射について、繰り
込み群を用いた理論的枠組みを新たに構築
し、ダイポール渦を用いた数値実験による検
証を行った。新たな理論的枠組みでは、遅い
バランスした流れとの準共鳴により自発的
放射が起こることを明らかにした。放射過程
はさらに二つに分けられ、いずれも大気の大
気非線形効果により鉛直運動が生成され、そ
れが重力波源となることを示した。今後、本
理論を基にした非地形性重力波パラメタリ
ゼーションの開発を行うことで、気候モデルの
改良および気候予測精度の向上に貢献でき
るものと考えられる。得られた成果は雑誌論
文 として、出版済みである。

(3)「 f 平面浅水系における渦の併合過程から
の重力波放射の理論的研究および数値実験」
上記(1)の成果により、数値モデルの妥当性
が示されたため、解析解を導出できない渦の
併合過程などの様々な渦的流れを用いた、数
値実験が可能になった。本研究では、同符号、
同強度の、同軸回転する渦の併合過程につ
いて、同軸回転、併合、章動の各過程での重
力波放射を定量的に調べた。その結果、渦の
併合過程でも高低気圧渦の非対称性が存在
することを示した。数値実験で得られた結果
を用いて、重力波ソースの解析を行うことで、
コリオリ力に起因するソース項が高気圧渦
で重力波放射を強める原因であることを示
した。得られた成果は雑誌論文 として、出
版済みである。

(4)「3次元領域モデルにおける渦的流れから
の重力波放射の数値実験および理論的研究」
3次元プリミティブ方程式系におけるダイポ
ール渦からの自発的重力波放射について、領
域モデルを用いた数値実験を行い、ダイポ
ール渦へもたらす長期的な影響について調べ
た。その結果、重力波の放射強度は解像度
に依存する一方、ある解像度以上の数値実
験では、渦にもたらす影響が収束することが
わかった。これは重力波の放射過程がある解
像度以上の数値計算で収束し、渦への影響も
収束していることを示唆している。得られた
成果は雑誌論文 として、出版済みである。

(5)「 f 平面浅水系における楕円渦からの重力

波放射の理論的研究および数値実験」
解析解の導出できる基本場として、キルヒホ
ッフの楕円渦を用いた自発的放射の研究を
行った。理論的研究では、グリーン関数を用
いた数理解析手法により、重力波の遠方場を
解析的に導出し、数値実験では、解析解の導
出のないパラメータ領域での重力波放射を
調べた。その結果、高低気圧渦の非対称な重
力波放射が数値実験、解析解の両方で確認さ
れた。高低気圧渦の非対称性の原因はコリオ
リ力に起因するソース項であり、高気圧渦で
は地球の回転効果が重力波放射を強める場
合があることが示された。得られた成果は雑
誌論文 として、出版済みである。

上記のこれまでの自発的放射の研究成果に
よって、「地球流体における渦からの自発的
な重力波放射の研究」として、日本流体力学
会 2016 年度学会賞（竜門賞）を受賞した。
受賞記念解説[雑誌論文]および、浅水系で
の成果をまとめたものを invited chapter[図
書]として、出版済みである。

<引用文献>

McIntyre, M. E., Spontaneous imbalance and
hybrid vortex-gravity structures. *Journal of
the Atmospheric Sciences*, Vol. 66, (2009),
p1315-1326.

Sugimoto, N., Ishioka, K. and Yoden, S.,
Gravity wave radiation from unsteady
rotational flow in an f -plane shallow water
system, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 39,
(2007), p731-754.

Sugimoto, N., Ishioka, K. and Ishii, K.,
Parameter sweep experiments on
spontaneous gravity wave radiation from
unsteady rotational flow in an f -plane
shallow water system, *Journal of the
Atmospheric Sciences*, Vol. 65, (2008),
p234-249.

Sugimoto, N. and Ishii, K., Spontaneous
gravity wave radiation in a shallow water
system on a rotating sphere, *Journal of the
Meteorological Society of Japan*, Vol. 90,
(2012), p101-125.

Sugimoto, N., Ishioka, K. and Yoden, S.,
Balance regimes for the stability of a jet in
an f -plane shallow water system, *Fluid
Dynamics Research*, Vol. 39, (2007),
p353-377.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 24 件)

杉本憲彦, 竜門賞受賞記念解説「地球流
体における渦からの自発的な重力波放射

の研究」, ながれ(日本流体力学会学会誌), 査読無, Vol.36, (2017), p181-185.
http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?dd=assets/files/download/noauth/nagare/36-3/36-3_ryumon2.pdf

Norihiko Sugimoto, Inertia-gravity wave radiation from the elliptical vortex in the f-plane shallow water system, Fluid Dynamics Research, 査読有, Vol. 49, (2017), 025508, 17pp.
doi:10.1088/1873-7005/aa529e

杉本憲彦, Riwal Plougonven, 渦からの自発的な重力波放射とその反作用 –海洋のエネルギー収支の再考–, 月間海洋 総特集「海洋循環に果たすスケール間相互作用の理解 / 南北・上下から見た日本の気象と気候」, 海洋出版, 査読無, Vol.49, (2017), p295-302.
<http://www.kaiyo-chikyu.com/K559.htm>

Norihiko Sugimoto and Riwal Plougonven, Generation and backreaction of spontaneously emitted inertia-gravity waves, Geophysical Research Letters, 査読有, Vol. 43, (2016), p3519-3525.
doi:10.1002/2016GL068219

Norihiko Sugimoto, Inertia-gravity wave radiation from the merging of two co-rotating vortices in the f-plane shallow water system, Physics of Fluids, 査読有, Vol. 27, (2015), 121701, p1-6.
doi:10.1063/1.4936869

Yuki Yasuda, Kaoru Sato, and Norihiko Sugimoto, A theoretical study on the spontaneous radiation of inertia-gravity waves using the renormalization group method. Part II: Verification of the theoretical equations by numerical simulation, Journal of the Atmospheric Sciences, 査読有, Vol. 72, No. 3, (2015), p984-1009.
doi:10.1175/JAS-D-13-0371.1

Yuki Yasuda, Kaoru Sato, and Norihiko Sugimoto, A theoretical study on the spontaneous radiation of inertia-gravity waves using the renormalization group method. Part I: Derivation of the renormalization group equations, Journal of the Atmospheric Sciences, 査読有, Vol. 72, No. 3, (2015), p957-983.
doi:10.1175/JAS-D-13-0370.1

Norihiko Sugimoto, Keiichi Ishioka, Hiromichi Kobayashi, and Yutaka Shimomura, Cyclone-anticyclone asymmetry

in gravity wave radiation from a co-rotating vortex pair in rotating shallow water, Journal of Fluid Mechanics, 査読有, Vol. 772, (2015), p80-106.
doi:10.1017/jfm.2015.209

[学会発表](計 35 件)

Norihiko Sugimoto and Riwal Plougonven, Generation and backreaction of spontaneously emitted inertia-gravity waves, IASPO-IAMAS-IAGA Joint Assembly, Cape Town, 2017.

杉本憲彦, 地球流体における渦からの自発的な重力波放射の研究, 日本流体力学会年会 2017 竜門賞受賞記念講演, 東京理科大学, 2017.

杉本憲彦, 大気と海洋の流れと渦, 流れと澁みを語る会, 名古屋大学, 2017.

Norihiko Sugimoto and Riwal Plougonven, Generation and impact of gravity waves from the dipole, 2016 SPARC Gravity Wave Symposium, The Pennsylvania State University, 2016.

Norihiko Sugimoto, Cyclone anticyclone asymmetry in gravity waves radiated from geophysical flows, Invited seminar at the University of Paris Diderot, Paris, 2016.

Norihiko Sugimoto, Cyclone anticyclone asymmetry in gravity wave radiation from vortical flows in f-plane shallow water, Invited seminar at the Goethe-Universität, Frankfurt, 2016.

Norihiko Sugimoto, Keiichi Ishioka, Hiromichi Kobayashi, and Yutaka Shimomura, Spontaneous gravity wave radiation in an f-plane shallow water system, Invited seminar at The Earth Simulator Center, Yokohama, 2014.

Norihiko Sugimoto, Keiichi Ishioka, Hiromichi Kobayashi, and Yutaka Shimomura, Spontaneous gravity wave radiation from vortices in an unbounded f-plane shallow water system, Mathematical Aspects of Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, Cargèse, 2013.

[図書](計 3 件)

青木淳一, 秋山豊子, 大平哲, 金谷信宏, 小林宏充, 杉本憲彦, 六車明, 法学・経済学・自然科学から考える環境問題, 慶應義塾大学出版会, (2017), 164pp.

Norihiko Sugimoto, Chapter 3, Nonlinear

interaction between vortex and wave in rotating shallow water, Vortex Structures in Fluid Dynamic Problems, Hector Pérez-de-Tejada (Ed.), Intech, (2017), p33-52. (Invited chapter)

杉本憲彦, 風はなぜ吹くのか、どこからやってくるのか, ベレ出版, (2015), 392pp.

〔その他〕

ホームページ等

<http://user.keio.ac.jp/~nori/>

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・准教授

研究者番号：10402538