

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400474

研究課題名(和文) 双補完的アプローチによる海洋の中規模渦と海面波浪の消散過程の研究

研究課題名(英文) Study for the dissipation process of oceanic surface waves and mesoscale eddies based on a complementary approach

研究代表者

相木 秀則 (Hidenori, Aiki)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：60358752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：従来の大気海洋力学の理論では、中緯度と赤道域の力学を連続的に接続できないという問題があった。このため、波動エネルギーのライフサイクルを熱帯から中緯度まで追跡することができなかった。本研究では、モデル解析による群速度ベクトルの同定方法について、緯度帯に関するシームレス機能と波動の種類(Rossby波、慣性重力波、Kelvin波など)に関するオートフォーカス機能を共に有する診断式の導出に成功した。これによって気候変動メカニズムに關与する波動エネルギーの生成・循環・消散過程を、群速度ベクトルという意味づけを持って、どの種類の波動にも共通の尺度で世界地図上で追跡できるようになった。

研究成果の概要(英文)：In previous theories for the atmosphere and ocean, frameworks for the dynamics of midlatitude and equatorial regions have been separated. Thus it has been impossible to continuously trace the life-cycle of wave energy from tropical to extratropical regions. This study has developed a scheme for calculating group velocity that is seamlessly diagnosable for waves at all latitudes and automatically applicable to various types of waves (Rossby, inertia-gravity, and Kelvin waves). The new scheme enables to trace the generation, circulation, and dissipation of wave energy with referring to the direction of group velocity.

研究分野：大気海洋力学

キーワード：群速度ベクトル 熱帯-亜熱帯相互作用 波動エネルギー循環 気候変動

1. 研究開始当初の背景

1-1 【中規模渦】

2000~2010年代にかけての内外の研究で、風による表層流への運動エネルギーの入力から、Ekman流による位置エネルギーへの変換、渦成横転循環による位置エネルギーの開放と、渦形状応力と Reynolds 応力による中規模渦へのエネルギーカスケードに至るまでの一連のエネルギー変換率が全球で見積もられるようになった。ところが渦エネルギーがその後(物理空間とスペクトル空間のそれぞれにおいて)どこに移動していくのかについては、研究されてこなかった。例えば Rossby 波によるエネルギーの水平フラックスの全球分布を示した論文は存在しなかった。

1-2 【海面波浪】

海上100mから水深10mにかけての高さ(波浪境界層)では、大気と海洋の混合層内の乱流や循環が、波浪の影響を受けている。ところが従来の波浪の理論は、水深積分したエネルギー方程式を用いている為に、波浪境界層における運動量伝達や乱流の鉛直構造を議論するには不向きであった。また多くの海洋モデルで使われている風応力のバルク式は海上10mの風速だけに依存している。実際には、海面の粗度、波齢(風速と波の位相速度の比)、風向と波向のずれに依存しているはずである。従来のような巨視的な理解像を進化させるには、波浪境界層における動態についての微視的な考察が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では海洋の【中規模渦】と【海面波浪】それぞれについて波と平均流の相互作用に関する考察を行う。これらは物理過程としては異なるがこれまで研究代表者が培った数式的に統一した手法(重み付け平均理論)を用いて解析する。双補完的アプローチをとることにより、これまで個々の分野で滞っていた課題について、新しい視点を導入して解決の方向性を見いだすのが本研究のねらいである。【中規模渦】に関しては、渦エネルギーの行方が黒潮、メキシコ湾流、南極環海流の維持機構に与える影響の理解を目的とする。【海面波浪】に関しては、砕波が大気海洋間フラックスに与える影響の理解とバルク式の高度化を目指す。

3. 研究の方法

3-1 【海面波浪】の定式化手法を【中規模渦】のデータ解析へ

海面波浪の分野ではエネルギーの収支や海面の砕波にともなう消散過程をスペクトル空間で記述するのが一般的である。この定式化手法を、傾圧渦やロスビー渦の考察に応用して、エネルギーの行方のデータ解析を行う。南極環海流の渦活動域や黒潮続流の「上流」ではエネルギーカスケード(基本流が減速)していることが過去10年間の世界中の研

究で明らかになった。ところが「下流」ではエネルギーが逆カスケード(基本流が強化)していることが代表者による最近の予備研究によって示されている。このパターンについての見地を論文としてまとめることから開始して、渦エネルギーの行方に関わる諸物理量(水平フラックス、消散領域)の分布の理解や解析手法の開発をする。

3-2 【中規模渦】の定式化手法を【海面波浪】の理論開発へ

重み付け平均理論は、海面の境界条件と粘性項の残差的な効果の記述に優れている。この手法を用いて波浪境界層(海上100mから水深10mにかけて)の流体運動と大気海洋間フラックスの理論を発展させる。Aiki and Greatbatch (2014)は、風から海洋の表層流への運動量伝達が、風波浪表層流という2段階になっていることを理論的に示した。この理論では波浪のエネルギーが砕波によって消散する時に、波浪の運動量が表層流に渡される。そこで「波浪のエネルギー方程式の消散項」と「表層への運動量入力」がどのような風速においても整合するように理論開発を進める。大気海洋間の運動量・熱フラックスのバルク式の高度化を試みながら、波浪境界層における物質循環像を明らかにする基盤を整える。

4. 研究成果

4-1 【中規模渦】

密度座標系に基づく重み付け平均理論を用いた代表者による過去の研究では、どの海域で中規模渦が発達しているのかを明らかにした。渦エネルギーの行方を調べるには、平均流(南極還流、黒潮、メキシコ湾流、アギユラス海流等)による移流や、Rossby波によるエネルギーフラックスを定量化し、相互比較する必要があった。しかし惑星効果だけではなく、平均流によるシア効果や層厚効果も加味する必要があるため、解析手法が未だ確立されていなかった。さらに赤道域においては準地衡流近似を使えないこともエネルギーフラックスの全球マッピングを阻む要因であった。一方で、中規模渦やRossby波による「波の活動度」や各種「擬運動量」の定式化においては、過去の研究によって、赤道域の特異点問題を乗り越えられることが示唆されていた。そこで、この「波の運動量」の定式化手法に隠された妙薬の詳細を明らかにし、「波のエネルギー」に応用すべく理論的な考察を行った。一連の結果をまとめた論文を Journal of the Atmospheric Sciences 誌に出版した(ドイツの共同研究者と連名)。この論文では特に、なぜ「擬運動量」については、Rossby波・慣性重力波・赤道波の違いを気にせずに、数値モデルの結果から直接、群速度の向きを診断することが出来るのかを説明した。

上記の成果を応用し、渦や波の「エネルギー」について(擬運動量と同様の)統一診断手

法の開発に取り組んだ。その理論基盤を丹念に整理してみると、従来の研究では、海洋の赤道導波管と東岸導波管を經由した中緯度ロスビー波の生成機構を説明できていないことがわかった。この問題に的を絞り、エネルギーフラックスの観点から、Rossby 波・慣性重力波・赤道波の違いを気にせず、数値モデルの結果から直接、群速度の向きを診断する事を可能とする統一診断手法を開発する事に、代表者らは世界で初めて成功し、その理論体系を示した論文を Progress in Earth and Planetary Science 誌に出版した（日本地球惑星科学連合セッションコンピュータ推薦論文）。

この新しい診断手法により、赤道域のベイスンモード波についてエネルギー伝達経路を計算したところ、エネルギーの消散が(境界層ではなく)海盆中央のレイの交差点に集中するという極めて珍しい状態であることがわかった。また理論設計の狙いどおり海洋の赤道導波管と東岸導波管を經由した中緯度ロスビー波の生成機構を連続的に説明することが可能であることが実証された(図1)。今後エルニーニョ現象が日本や北アメリカといった中緯度域に与える影響(テレコネクション)など、A/OGCM 結果を用いた熱帯-亜熱帯相互作用の診断にこのエネルギー伝達経路計算手法が利用され、大気と海洋の両方で気候地理学的な理解が深まる事が予想される。

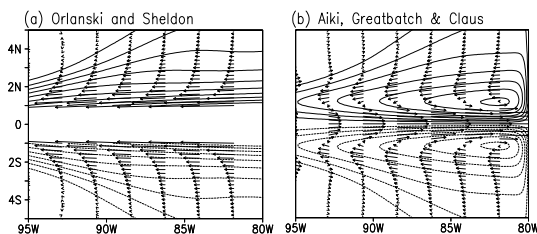


図 1: (a) 従来の研究と (b) 本研究のスキームによって見積もった赤道東岸の群速度ベクトル(エネルギーフラックス)の分布。

4-2 【海面波浪】

海面から海上 100m までの高さでは、風の鉛直シアによる相対渦度を使って鉛直断面にコンターを描くことができる。これを利用して鉛直 semi-Lagrange 座標系を構築し、砕波と乱流渦粘性がある状況で擾乱に関する各種統計量(Lagrange 擬運動量, Lagrange 擬エネルギー, 波の活動度, Euler 擬エネルギー)の収支式を導いた。その結果、風から波浪への運動量やエネルギーの伝達過程を詳しく定式化することができた。これは代表者がこれまでに培った重み付け平均理論と Lagrange 平均理論の融合手法を応用したものである。

本研究の主要な成果として、総合解説書(単著:全 173 頁)を日本気象学会の気象研究ノート誌に出版したことが挙げられる。この

解説書では、Lagrange 擾乱量(理論寄り)と Euler 擾乱量(観測寄り)という表式を互いに交換することによって、既存の理論を整理することができることを一貫して示した。例えば、風波の生成と砕波問題について、Lagrange 擬運動量・Lagrange 擬エネルギー・波の活動度・Euler 擬エネルギーそれぞれの収支を理論的に(気側から水側にかけての鉛直構造も含めて連続的に)考察した。特に、気側から水側への運動量伝達について、Reynolds 応力による表現(超音波測器と相性が良い)と形状応力による表現(理論・数値的研究と相性が良い)を互いに交換する式を、砕波と乱流粘性がある状況で詳しく説明することができた。

一方で、砕波問題について理論・モデルだけでなく観測・水槽実験からも包括的にアプローチできるようにすることが有効であると判断し、海上波しぶき光学粒子計の開発を国内のメーカーと共同で進めた。この光学粒子計は3つの特徴がある。1つ目は0.1秒毎の高頻度測定が可能であること、2つ目は3軸加速度計を搭載していること、3つ目は海上の係留ブイに搭載できるように耐水性能の省電力性能を有していることである。この設計によって従来の研究では未解明であった水面から海上 1m の高さにおける砕波と水しぶきの位相関係や、超音波風速計と同期させてのフラックス測定が初めて可能になる。完成した波しぶき計の動作試験は東京大学大気海洋研究所(岩手県大槌湾係留ブイ)と京都大学防災研究所(和歌山県白浜海上塔)の施設を利用して行った。H29 年度には実際の台風襲来条件下で測定することに成功した。この新しい測器を開発したことによって、従来の研究のような大気海洋間フラックスや海面砕波の物理的側面の理解だけでなく、海洋性エアロゾルの生成過程など大気化学的・環境学的側面を含めた包括的理解を目指す研究が可能となった。

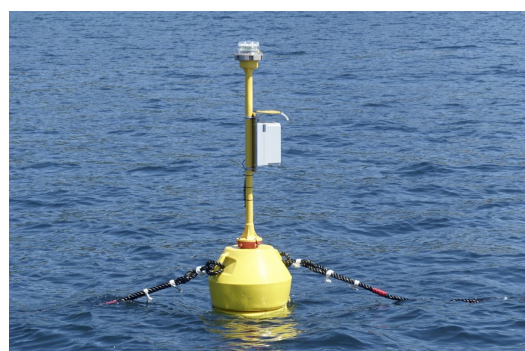


図 2: 本研究によって開発された海上波しぶき光学粒子計を係留ブイに取り付けた様子(協力:東京大学大気海洋研究所)。

【総括】

海洋波動を介した熱帯・中緯度相互作用の典型例としてエルニーニョ/南方振動の時間発展を挙げると、赤道太平洋を東進する海洋

Kelvin 波が南北アメリカ大陸に達したのち沿岸を極側に伝搬することで中緯度の海洋 Rossby 波を励起すると説明される。これを準地衡近似に基づく従来のエネルギーフラックスの診断表式を用いて定量的に説明しようにも、赤道が特異点となってしまう、海岸線における境界条件が満たされないなどが障害となる。この障害の克服のため、本研究では波浪力学に関する Lagrange 平均理論の基礎研究で培った各種波動エネルギー/擬運動量の相互関係に着目して赤道導波管と沿岸導波管に対する二種の診断表式の接続に挑み、緯度帯に関するシームレス機能と波動の種類に関するオートフォーカス機能を共に有するエネルギーフラックス診断式の導出に成功した(Aiki et al. 2017 PEPS)。この式は海岸線での境界条件を満たすよう設計されており、西岸と東岸で海洋波動が反射・回折する海盆モードの過程を群速度ベクトルに沿って追跡し、波動エネルギーの伝達経路を消散領域まで定量的に特定することが初めて可能となった。この新しい診断式により、Rossby 波・慣性重力波・Kelvin 波など、どの種類の波動にも共通の尺度で、波動エネルギーのライフサイクルを中緯度から熱帯まで連続的に追跡することが初めて可能になった。これは 大気海洋波動力学の今後の発展へのブレークスルーとなり得る画期的なものである。

海面の砕波については、理論の総合解説書を出版する一方で、海洋物理の枠を超えた融合発展を目指すことが効率的であると判断した。H29 年 8 月には台風 5 号襲来時における波しぶき(シースプレー)観測を京都大学防災研究所の協力のもと和歌山県白浜海上観測塔にて成功した。独自開発した海上測定システムの堅牢性が示され、海洋性エアロゾルの生成源として波浪境界層研究の新しい展開が可能になった。

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 4 件)

Aiki, H., K. Takaya, and R. J. Greatbatch, 2015: A divergence-form wave-induced pressure inherent in the extension of the Eliassen-Palm theory to a three dimensional framework for all waves at all latitudes, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72, 2822-2849, DOI:10.1175/JAS-D-14-0172.1

Aiki, H., X. Zhai, and R. J. Greatbatch, 2016: Energetics of the global ocean: the role of mesoscale eddies, *The Indo-Pacific Climate Variability and Predictability (edited by S. K. Behera and T. Yamagata)*, World Scientific Publisher, Chapter 4, 109-134, DOI:10.1142/9789814696623_0004

Aiki, H., R. J. Greatbatch, and M. Claus, 2017: Towards a seamlessly diagnosable expression for

the energy flux associated with both equatorial and mid-latitude waves, *Progress in Earth and Planetary Science*, 4, 1-18,

DOI:10.1186/s40645-017-0121-1

Ardhuin, F., N. Suzuki, J. C. McWilliams, and H. Aiki, 2017: Comments on "A combined derivation of the integrated and vertically resolved, coupled wave-current equations." *J. Phys. Oceanogr.*, 47, 2377-2385, DOI:10.1175/JPO-D-17-0065.1

[学会発表](計 17 件)

H. Aiki, Energetics of the global ocean: the role of mesoscale eddies, Atmosphere and Ocean Dynamics: A Scientific Workshop, Foresight Centre, Liverpool, UK, April 10, 2014

H. Aiki, Reduction of sampling errors using a phase-independent expression for energy flux associated with inertia-gravity wave, Ocean Scale Interactions, IFREMER, Brest, France, June 24, 2014

H. Aiki, A new expression for the form stress term in the vertically Lagrangian mean framework for the effect of surface waves on the upper-ocean circulation, Ocean Scale Interactions (POSTER), IFREMER, Brest, France, June 23-25, 2014

H. Aiki, Energy transfer from mesoscale eddies to basic currents in the downstream regions of the Gulf Stream and the Kuroshio, Asia Oceania Geosciences Society 2014 (INVITED), Royton Hotel, Sapporo, Japan, July 30, 2014

H. Aiki, How to diagnose the horizontal flux of mesoscale / Rossby eddy energy in the extension regions of western boundary currents?, The 7th OFES International Workshop, Aizu Univ., Fukushima, Japan, October 3, 2014

H. Aiki, How to diagnose the horizontal flux of mesoscale / Rossby eddy energy in the extension regions of western boundary current?, AGU Fall Meeting 2014 (POSTER), Moscone Convention Center, San Francisco, USA, December 15-19, 2014

H. Aiki, Why the bolus velocity deserved to survive and how we use it: a 3D EP theory for all waves at all latitudes as given by the impulse-bolus pseudomomentum, American Meteorological Society: 20th conference on atmospheric and oceanic fluid dynamics, Minneapolis, USA, June 16, 2015

H. Aiki, Waves and eddies and the global ocean: advances in the understanding of energy cycle, Founding symposium for Institute for Space-Earth Environmental research, Nagoya, Japan, November 5, 2015

H. Aiki, Momentum fluxes to ocean circulation as given by the dissipation rate of surface waves, CLIVAR/JAMSTEC-Kuroshio workshop, Yokohama, Japan, January 13, 2016

Aiki, H., R. J. Greatbatch, and M. Claus, A seamlessly diagnosable expression for the energy flux of all waves at all latitudes with equatorial and

coastal waveguides, JpGU 2016, Makuhari, Chiba, Japan, May 23, 2016

Aiki, H., R. J. Greatbatch, and M. Claus, A seamlessly diagnosable expression for the energy flux of all waves at all latitudes with equatorial and coastal waveguides, International Workshop: Dynamics and Interactions of the Ocean and the Atmosphere, Tohoku Univ., Sendai, Japan, July 15, 2016

Aiki, H., R. J. Greatbatch, and M. Claus, Towards a seamlessly diagnosable expression for the energy flux associated with both equatorial and midlatitude waves, International Workshop: Application of Ocean and Climate Predictions, JAMSTEC, Yokohama, Japan, January 25, 2017

Aiki, H., R. J. Greatbatch, and M. Claus, Towards a seamlessly diagnosable expression for the energy flux associated with both equatorial and midlatitude waves, Meeting on Perspectives in Computational Atmosphere and Ocean Science and 8th OFES International Workshop (POSTER), Nagoya Univ., Nagoya, Japan, March 13, 2017

相木秀則, 赤道域と中緯度域の相互作用解析に適したエネルギー診断式, JpGU-AGU 合同大会 2017 (招待講演), 2017年5月

H. Aiki, Towards a seamlessly diagnosable expression for the energy flux associated with both equatorial and mid-latitude waves, American Meteorological Society: 21st Conference on Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics, Portland, Oregon, USA, June 2017

H. Aiki, A new equation for the inversion of Ertel's potential vorticity to be used for the model diagnosis of group-velocity-based energy flux associated with waves at all latitudes, American Meteorological Society: 21st Conference on Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics, Portland, Oregon, USA, June 2017

H. Aiki, Towards a seamlessly diagnosable expression for the energy flux associated with both equatorial and mid-latitude waves, 2nd Asia-Pacific conference on Plasma Physics (INVITED), Kanazawa, Japan, November, 2018

〔図書〕(計1件)

相木秀則, 2018: 海の波と渦と平均流-相互作用理論の背景と展望-, 日本気象学会: 気象研究ノート, 235, 単著全175頁

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://co2.hyarc.nagoya-u.ac.jp/labhp/member/aiki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

相木 秀則 (AIKI, Hidenori)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号: 60358752