

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6月30日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740351

研究課題名（和文） 統一残差平均理論に基づく南極周回流および赤道流のエネルギーと鉛直構造の解析の研究

研究課題名（英文） The energetics and vertical structure of the Antarctic Circumpolar Currents and equatorial currents: a set of analyses based on a unified framework

研究代表者

相木 秀則 (AIKI HIDENORI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・主任研究員

研究者番号：60358752

研究成果の概要（和文）：海流と地形の作用および波と平均流との相互作用を対象とした統一的なエネルギー解析のフレームワークを開発した。このフレームワークを用いて各種海洋シミュレーションの結果の診断を行い、南極周回流がドレーク海峡で受ける地形の効果やインドネシアの潮汐流による非静力内部重力波の形成に関する素過程と類似性について考察した。また傾圧不安定渦のパラメタリゼーションで培った残差平均手法を海面波に応用するための理論基盤を構築した。

研究成果の概要（英文）：A unified framework for energy diagnosis has been developed to investigate the effect of bottom topography on currents as well as the interaction between currents and waves in the ocean. This framework has been applied to investigate the effect of the bottom topography of the Drake Passage on the Antarctic Circumpolar Current and also to the effect of the bottom topography of the Lombok Strait on the generation of tidal internal waves with their interaction with the Indonesian Throughflow. The thickness-weighted-mean framework in the studies of mesoscale eddy parameterization has been applied to describe the effect of surface waves on the upper ocean currents.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：海洋物理, 気候変動, 気象学, 数値シミュレーション, 地球流体

1. 研究開始当初の背景

海洋大循環の運動エネルギーの80%は南極

周回流に集中している。世界的な気候変動に影響を与える大西洋の子午面循環を駆動している

のは、北大西洋グリーンランド沖で冷やされた重い水の沈み込みではなく、南極周回流上空の強い西風に引き込まれた広範囲なエクマン輸送であるとする説も近年活発に研究されている。南大洋の鉛直循環(Deacon Cell など)の理解にはラグランジュ的な解析が欠かせない。海底地形、沿岸湧昇、渦活動、海洋混合層内の微細過程の役割には諸説があり未解明な部分が多い。また、低緯度の浅い密度躍層の鉛直構造の変化は海面水温を通して世界的な気候変動に寄与する。特に赤道域の鉛直シアの強い流れには、鉛直粘性が強く働いている事が古くから知られている。

2. 研究の目的

近年、大規模数値シミュレーションによって様々な時空間スケールの変動を含む実験データが提供されるようになった。これら潤沢なデータを生かすための厳密な理論および解析手法の確立が急がれている。本研究に先立って研究代表者は、Generalized Lagrangian Mean theory (Andrews & McIntyre, 1978)を鉛直一次元化した方程式を発展させエネルギー収支に関する理論基盤を構築した (Aiki & Yamagata, 2006; Jacobson & Aiki, 2006)。これが大気力学における最先端の理論 Iwasaki (2001)に対応する事が後に明らかになり、1980-90年代に大気と海洋で独立に発展した理論が統一した方程式系で記述されるに至った。この日本発の理論を用いて海洋の鉛直構造の理解を進める。将来的には気候モデルにおけるサブグリッドスケールの波動・渦のパラメタリゼーションの改善に応用する。

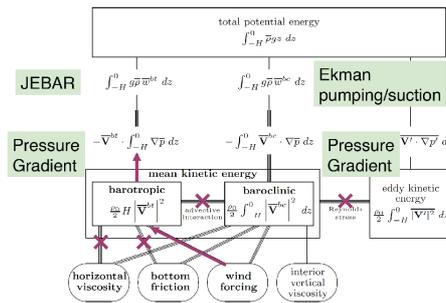
3. 研究の方法

Aiki & Richards (2008)は、超高解像度の海洋数値モデルを地球シミュレーター上で動かした結果を解析して、諸物理過程のエネルギー変換の水平マッピング・定量化をおこなった。この手法を南極周回流にあてはめ、より詳しい鉛直構造の解析を行う。同様の解析を太平洋・インド洋赤道域にも適用し、気候変動と沿岸湧昇、波動、赤道潜流の関係を調べる。

4. 研究成果

南極周回流、黒潮、メキシコ湾流を含む全球のエネルギー収支を解析した論文を Ocean Dynamics 誌にて発表した。特に南極周回流がドレーク海峡やニュージーランド沖の海嶺や大

ACC as an inviscid sloped-bottom model (Munk & Palmen, 1951)



ACC as a viscid flat-bottom model (Stommel, 1957)

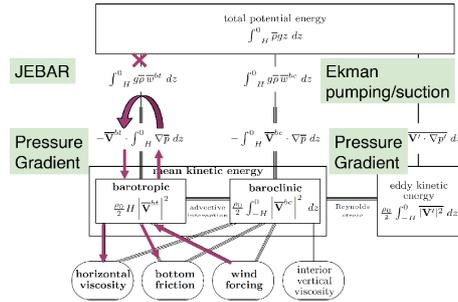


図1: Munk & Palmen (1951)に基づくエネルギー変換サイクル (上), Stommel (1957)に基づくエネルギー変換サイクル。

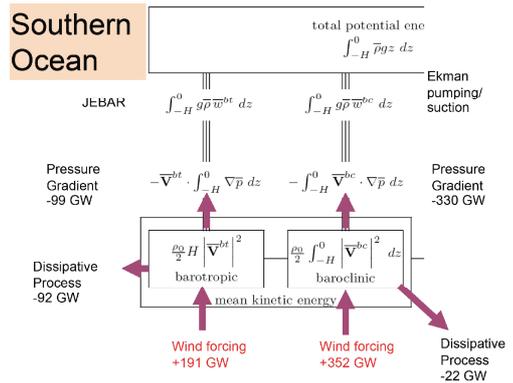
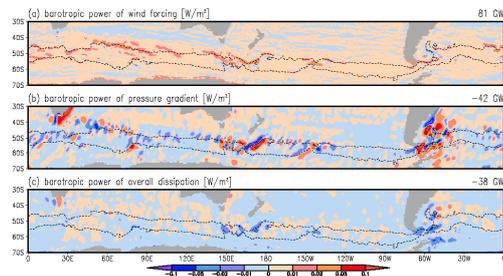


図2: 本研究による解析結果. 南大洋におけるエネルギー変換率の水平分布 (上) とその領域積分量 (下).

陸棚にぶつかって生じる海底圧力応力、メソスケール渦によるレイノルズ応力、そして海底に沿う流れが感じる摩擦応力の三者の効果を比較

したところ、従来の定説と比較して摩擦の効果が一桁大きいことがわかった。

具体的には Munk & Palmen (1951) は大陸棚による摩擦の効果は無視できるとして海面の風応力によって入力された順圧運動エネルギーは流れが（ドレーク海峡などのリッジ状の）海底斜面に乗り上がることによってすべて位置エネルギーに変換されると仮定した（図1上）. Stommel (1957) は海底斜面に乗り上がる効果は無視できるとして順圧運動エネルギーはすべて大陸棚の摩擦によって消散されるとした（図1下）. 従来の定説では Munk & Palmen (1951) のメカニズムだけで南極周回流の運動量やエネルギーの収支を説明できると考えられていたが、本研究による解析結果によると風による入力が 191 GW（ギガワット）に対して、位置エネルギーへの変換が 99 GW、大陸棚での摩擦による消散が 92 GW となっていた（図2）. これは Stommel (1957) のメカニズムと Munk & Palmen (1951) のメカニズムが同等に働いていることを示唆している。

この解析結果を発展させて、海洋モデルの相互比較に有用なメトリック（物理計測量）の提案、海底摩擦のパラメタリゼーション、海洋大循環の基礎力学の再検討等を中心に議論した。とりわけ南極周回流の力学に関しては本研究で得られた順圧場（地形作用）に関する理解は Aiki & Richards (2008) で得られた傾圧場（不安定渦）に関する理解と双補完的である。

この研究と平行して、インドネシア多島海の内部重力波と背景流との関係を解析した論文を JGR-Oceans 誌に発表した。このエネルギー解析は、非静力海洋モデルを用いてロンボク海峡周辺の潮汐流の数値実験を行い（図3）、支配方程式の全ての項を高精度に診断する事によって成し遂げられた。

外部潮汐によって注入されたエネルギーは 3.86 GW でありそのうちの7割程度（2.01 GW + 0.45 GW）が内部重力波によって海峡の南北に放射されることがわかった（図4）。インドネシア通過流の流量が多い夏期にはインド洋側、流量が少ない冬季にはジャワ海側により多くのエネルギーが放射されることがわかった（図5）。放射されたエネルギーが遠方で消散して密度成層の鉛直混合を引き起こし、その結果、その海域の海面水温が下がるとすれば、潮汐によるエネルギー放射の季節変動によって大気循環にも季節的なフィードバックが働くことが予想される。

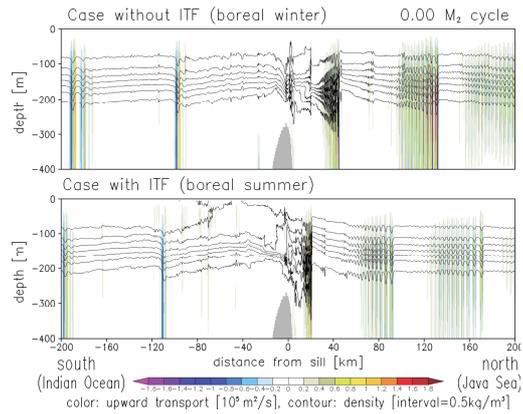


図3：インドネシア・ロンボク海峡の潮汐による内部重力波の鉛直断面図。

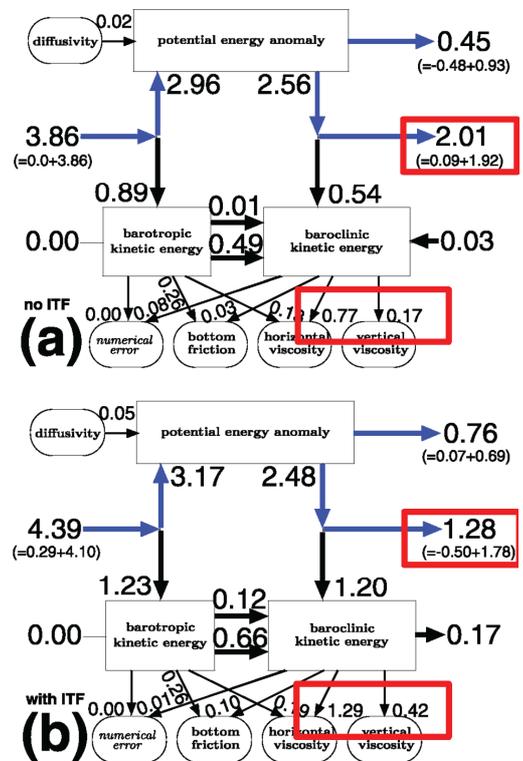


図4：エネルギー収支（GW），インドネシア通過流が（a）ない場合と（b）ある場合。

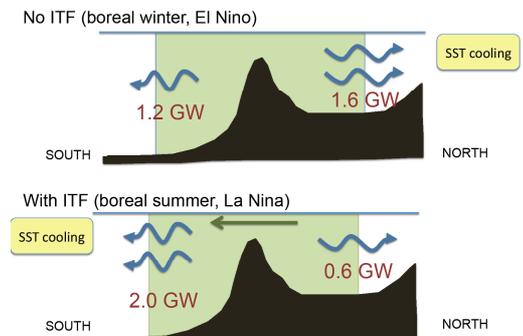


図5：海峡の南（インド洋）側と北（ジャワ海）側へのエネルギー放射の模式図。

Ocean Dynamics 誌と JGR-Oceans 誌の3つの論文を合わせもって、潮汐流が海峡の地形ぶつかつて内部重力波に変換される過程を記述するエネルギー方程式と、(上記の)南極周回流が海嶺にぶつかつて圧力応力を受ける過程を記述するエネルギー方程式が、(現象としては全く異なるが)統一した数式を用いて説明できることを示した。

以上の研究とは別に、統一残差理論の新たな適用課題として、海面波と海洋混合層の鉛直混合の定式化/パラメタリゼーション開発が極めて有望であることに気付き、その理論基盤の構築を進めた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① H. Aiki, K. J. Richards, H. Sakuma, Maintenance of the mean kinetic energy in the global ocean by the barotropic and baroclinic energy routes: the roles of JEBAR and Ekman dynamics, *Ocean Dynamics*, 査読有, 61, 2011, 675-700
DOI:10.1007/s10236-011-0382-y
- ② H. Aiki, J. P. Matthews, K. G. Lamb, Modeling and energetics of tidally generated wave trains in the Lombok Strait: impact of the Indonesian Throughflow, *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 査読有, 116, 2011, C03023
DOI:10.1029/2010JC006589
- ③ J. P. Matthews, H. Aiki, S. Masuda, T. Awaji, and Y. Ishikawa, Monsoon regulation of Lombok Strait internal waves, *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 査読有, 116, 2011, C05007
DOI:10.1029/2010JC006403

[学会発表] (計13件)

- ① H. Aiki, R. J. Greatbatch, Thickness-weighted-mean theory for the effect of surface gravity waves on mean flows in the upper ocean, *Ocean Sciences Meeting 2012*, 2012年2月20日, Salt Lake City (アメリカ)
- ② H. Aiki, Similarities in the energetics of the ACC, mesoscale eddies, tidal internal waves, and surface gravity waves, 18th AMS Conference on Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics, 2011年6月15日, Spokane (アメリカ)
- ③ H. Aiki, Modeling and energetics of tidally generated wave trains in the Lombok Strait: Impact of the Indonesian

Throughflow, 3rd International Workshop on Modeling the Ocean, 2011年6月6日, Qingdao (中国)

- ④ 相木秀則, 海洋の渦エネルギーフラックスの全球分布—高解像モデルの診断—, 東大 大気海洋研究所共同利用研究集会: 地球流体における流れの変動性と持続性の力学, 2010年12月9日, 東京大学大気海洋研究所 (千葉)
- ⑤ 相木秀則, The combined pressure and potential energy flux in the global ocean, 3rd OFES International Workshop, 2010年11月5日, 海洋研究開発機構 (神奈川)
- ⑥ H. Aiki, Tide- and typhoon-induced nonhydrostatic wave trains in deep seas, 1st international workshop on nonhydrostatic numerical models, 2010年10月1日, 京都大学 (京都)
- ⑦ H. Aiki, Maintenance of the mean kinetic energy in the global ocean by the barotropic and baroclinic energy routes, 2nd International Workshop on Modeling the Ocean, 2010年5月25日, Old Dominion Univ. (アメリカ)
- ⑧ 相木秀則, K. J. Richards, Maintenance of the mean kinetic energy in the global ocean by the barotropic and baroclinic energy routes, AGU Ocean Sciences Meeting 2010, 2010年2月24日, Oregon Convention Center, Portland, Oregon (アメリカ)
- ⑨ 相木秀則, K. G. Lamb, Tide-induced solitary-like wave train in Lombok Strait, 日本海洋学会 2009 年度秋季大会, 2009年9月28日, 京都大学 (京都)
- ⑩ 相木秀則, 海洋潮汐内部ソリトン波の数値的考察, 第11回非静力学モデルに関するワークショップ, 2009年9月26日, 弘前大学 (青森)
- ⑪ 相木秀則, 海洋循環における渦の形状抵抗と地形性形状抵抗に関する理論と解析のレビュー, 日本流体力学会 年会 2009, 2009年9月2日, 東洋大学 (東京)
- ⑫ 相木秀則, K. J. Richards, 佐久間弘文, Maintenance of the mean kinetic energy in the global ocean, CLIVAR-WGOMD Workshop on Ocean Mesoscale Eddies, 2009年4月26日, UK Metoffice, Exeter (イギリス)
- ⑬ 相木秀則, K. J. Richards, 佐久間弘文, The state of the global ocean circulation: the roles of barotropic and baroclinic Ekman transports, 日本海洋学会 2009 年度春季大会, 2009年4月8日, 東京大学本郷キャンパス (東京)

6. 研究組織

(1)研究代表者

相木秀則 (AIKI HIDENORI)
独立行政法人 海洋研究開発機構・地球環境変
動領域・主任研究員
研究者番号：60358752