

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25年5月31日現在

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22540447
 研究課題名（和文）VLESモデルを利用した海洋内部重力波の励起源近傍における乱流混合過程の解明
 研究課題名（英文）The numerical studies on the ocean turbulent mixing processes near the generation sites of internal gravity waves
 研究代表者 丹羽 淑博 (NIWA YOSHIHIRO)
 東京大学・大学院理学系研究科・特任准教授
 研究者番号：40345260

研究成果の概要（和文）：海洋中の活発な乱流混合は内部重力波の励起源となる大気擾乱下の表層海洋や卓越した海底地形の直上などに集中して発生している。本研究ではまず大気擾乱起源の乱流混合過程を Large Eddy Simulation (LES) を行い詳しく調べた。この LES の結果を利用して既存の乱流パラメタリゼーションの有効性を検証した。次に、バロトロピック潮汐流と海底地形の相互作用によって励起される内部潮汐波の三次元グローバル数値シミュレーションを行い、計算格子間隔がゼロの極限における内部潮汐波エネルギー転嫁率のグローバル分布の推定を行った。

研究成果の概要（英文）：The excitation of intense turbulent mixing in the ocean is concentrated near the generation sites of internal gravity waves such as within the surface layers under atmospheric disturbances or over prominent topographic features interacting with barotropic tidal currents. In this study, we first carry out Large Eddy Simulation (LES) to investigate turbulent mixing processes in the surface ocean caused by strong wind forcing. The results of LES are used to evaluate the performance of existing turbulence parameterization models. Next, we carry out three-dimensional global numerical simulations of internal tidal waves generated over prominent topographic features, and estimate the global distribution of internal tidal energy conversion rate in the limit of zero grid spacing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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：内部波，乱流混合，内部潮汐波，近慣性内部波，
 乱流パラメタリゼーション，海洋深層大循環

1. 研究開始当初の背景

高精度な海洋大循環モデルの構築には、大循環モデルで直接解像できないサブグリッドスケールの乱流混合過程のパラメタリゼーションが必要不可欠である。海洋中の乱流混合は主にスモールスケールの内部波が碎

波することで引き起こされている。海洋中の内部波は海洋上を通過する大気擾乱や潮流と海底地形の相互作用によって主に励起されているが、最近の乱流観測や数値実験によると、海洋中の乱流混合の大部分がこれら内部重力波の励起源の近傍において発生して

いることが指摘されている。しかしながら、個々の内部波の励起源近傍での乱流混合係数を定量的に評価するためには、深海乱流計などの特殊な測器を利用した直接観測に頼る他に手段がなく、内部波励起源近傍における乱流混合過程の詳細や乱流混合強度のグローバルな空間分布は定量的に明らかにされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、まず初めに海洋乱流混合の問題に適した乱流渦を直接解像できる3次元非静水圧 VLES (LES) モデルを開発し、大気擾乱フォーシングによる内部重力波の励起から、エネルギーカスケード、乱流混合へと至る一連の過程を現実的な状況下で再現した。その上で、その結果を既存の乱流混合パラメタリゼーションとの比較を行った。

引き続き、海底地形上を潮汐流が乗り越えることによって励起される内部潮汐波に起因する乱流混合過程の VLES を実施するための準備として、内部潮汐波エネルギーのグローバル分布を調べるために全球三次元数値シミュレーションを実施した。

3. 研究の方法

大気擾乱起源の乱流混合の LES では、基礎方程式を f 面上のブシネスク近似を施した Navier-Stokes 方程式とし、格子下スケールの乱流フラックスは Ducros et al. (1996) の手法に従って求めた。モデル海洋は水平方向が 200 m、水深が 105m の矩形領域で、解像度は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.8\text{m}$ とした。初期条件として流速場は静止状態、塩分は一定と仮定した。モデル内に近慣性内部重力波を効率的に励起させるために、慣性周波数で回転する風応力場を外力として加えた。

一方、内部潮汐波の全球数値シミュレーションの基礎方程式はブシネスク近似および静水圧近似を施した3次元 Navier-Stokes 方程式である。水平格子間隔 Δx を $1/20^\circ$ から $1/5^\circ$ まで $1/60^\circ$ 間隔で変えた合計 10 ケースの計算を行った。モデルの海底地形は ETOPO1 の全球水深データを計算グリッドの範囲内で平均したものを用いた。また基本密度成層は Levitus の年平均気候値データから求めた。主要四分潮のフォーシングを同時に与え、初期の静止状態からモデルを 60 日間にわたって駆動した。

4. 研究成果

(1) 大気擾乱起源の乱流混合過程の LES

図1は大気擾乱起源の乱流混合の LES で再現された水平-鉛直断面内における水温と乱流熱フラックスの時間変化を示す。近慣性振動が励起され混合層下部における乱流活動が活発になるにしたがって、混合層が厚くなるとともに、表層付近の水温が低下している様子が確認できる。

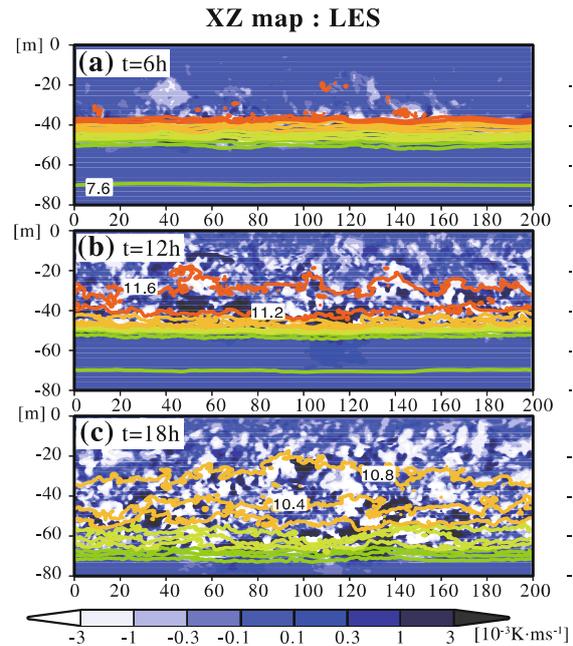


図1 : LES で計算された水温(カラーコンター)と乱流フラックス(カラーシェード)の水平-鉛直断面の時間変化。

この近慣性内部波に伴う表層混合層の消長を、Mellor and Yamada(1982) (以後 MY) および Nakanishi and Niino(2009) (以後 NN) の Level2.5 の乱流クロージャーモデルを用いて計算し、その結果を LES の結果と比較した。図2は LES, MY, NN のそれぞれから得られた水温場の時間変化を示す。MY で計算された混合層の発達、LES の実験結果に比べ著しく抑制されてしまうのに対し、NN で計算された混合層の発達は LES の結果に匹敵する良好な結果となり、大気擾乱起源の乱流混合を再現する上で NN が MY に比べてより良いパフォーマンスを示すことがわかった。

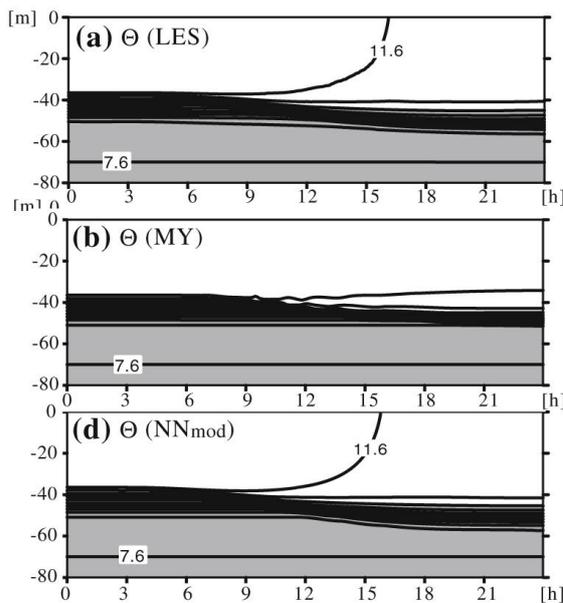


図2 : LES 計算、Mellor-Yamada(1982)乱流モデル、Nakanishi-Niino(2009)乱流モデルそれぞれから得られた水温場の時間変化。ただし、LESの結果は水平平均値。

(2) 内部潮汐波の全球分布の数値シミュレーション

図3は全球数値シミュレーションより求めたバロトロピックな潮汐流から内部潮汐波へのエネルギー転嫁率の空間分布を水平格子間隔が $\Delta x=1/20^\circ$ と $\Delta x=1/5^\circ$ の場合について比較したものである。これを見ると水平格子間隔 Δx が小さく(海底地形の解像度が高く)なるにつれてエネルギー転嫁率が増加し、その空間分布が大きく変化することがわかる。

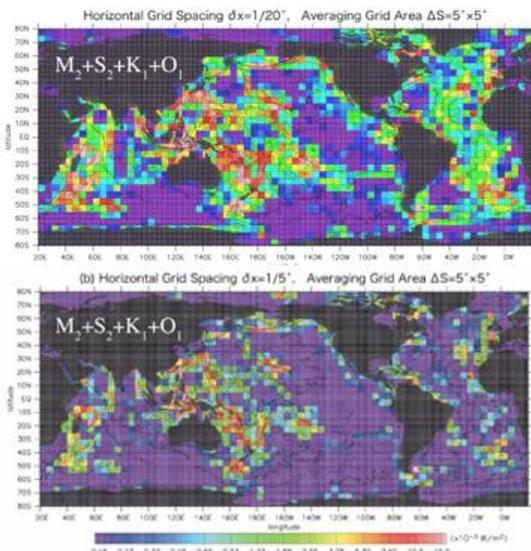


図3 主要四分潮(M_2, S_2, K_1, O_1)のバロトロピックな潮汐流から内部潮汐波へのエネルギー転嫁率のグローバル分布。数値シミュレー

ションの水平格子間隔が $\Delta x=1/20^\circ$ (上)と $\Delta x=1/5^\circ$ (下)の結果を示す。

図4は各地点における内部潮汐波エネルギー転嫁率の水平格子間隔 Δx に対する感度係数を示している。内部潮汐波エネルギー転嫁率の Δx 依存性が、大西洋中央海嶺、東太平洋海嶺、中央インド洋海嶺などプレート年代が若く空間スケールの小さな不規則な海底地形が卓越するような海域で特に高く、インドネシア多島海や西部太平洋などで小さくなっている様子がわかる。

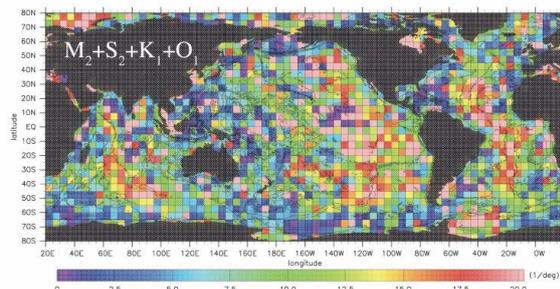


図4 主要四分潮(M_2, S_2, K_1, O_1)のバロトロピックな潮汐流から内部潮汐波へのエネルギー転嫁率の水平格子間隔 Δx に対する感度係数の全球分布。

本研究では上述した海域によって異なる内部潮汐波の水平格子間隔依存性をパラメータ化するために、詳細は省くがバロトロピックな潮汐流と海底地形と密度成層で提起されるフォーシング関数を定義した。このフォーシング関数に基づいて水平格子間隔が $\Delta x=0^\circ$ の極限に外挿した内部潮汐エネルギー転嫁率のグローバル分布を推定した(図5)。

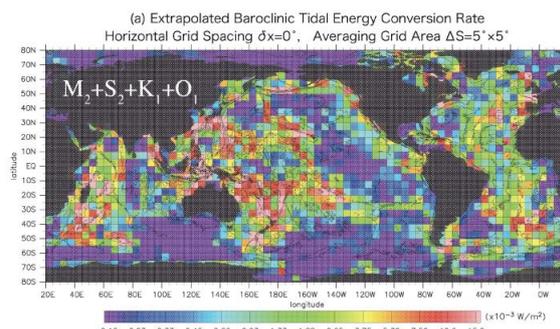


図5 フォーシング関数に基づいて推定した水平格子間隔 $\Delta x \rightarrow 0$ の極限に外挿した内部潮汐波エネルギー転嫁率の全球分布。

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)

- ①Naoki Furuichi, Toshiyuki Hibiya, Yoshihiro Niwa: Assessment of turbulent closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using a large eddy simulation model, Journal of Oceanography, 査読有, 68巻, 2012, doi: 10.1007/s10872-011-0095-3
- ②Yoshihiro Niwa, Toshiyuki Hibiya: Estimation of baroclinic tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations, Journal of Oceanography, 査読有, 67巻, 2011, doi:10.1007/s10872-011-0052-1
- ③Yuki Tanaka, Toshiyuki Hibiya, Yoshihiro Niwa : Numerical study of K-1 internal tides in the Kuril straits, Journal of Geophysical Research, 査読有, 115巻, 2010, doi:10.1029/2009JC005903
- ④Yuki Tanaka, Toshiyuki Hibiya, Yoshihiro Niwa : Assessment of the Effects of Tidal Mixing in the Kuril Straits on the Formation of the North Pacific Intermediate Water, Journal of Physical Oceanography, 査読有, 40巻, 2010, 2569-2574

[学会発表] (計7件)

- ①丹羽淑博, 日比谷紀之: 全球数値シミュレーションから求められた内部潮汐波エネルギー転嫁率のグローバル分布の水平格子間隔依存性について, 2013年度日本海洋学会春季大会, 2013年3月24日, 東京海洋大学品川キャンパス
- ②Yoshihiro Niwa, Toshiyuki Hibiya: Estimation of baroclinic tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, 2012年8月16日, Resorts World Convention Centre (シンガポール)
- ③Yoshihiro Niwa, Toshiyuki Hibiya: Estimation of baroclinic tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations, 2012 Ocean Science Meeting, 2012年2月20日, Salt Palace Convention Center (ソルトレイクシティ, アメリカ合衆国)
- ④丹羽淑博, 日比谷紀之: 全球数値シミュレーションに基づく深海の乱流混合過程に

供給しうる内部潮汐波エネルギーの見積もりとその水平格子間隔依存性について, 2011年度日本海洋学会秋季大会, 2011年9月27日, 九州大学筑紫キャンパス

- ⑤Yoshihiro Niwa, Toshiyuki Hibiya: Estimation of internal tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations, The 16th Pacific-Asian Marginal Seas Meeting, 2011年4月21日, 台北大学(台北市, 台湾)
- ⑥丹羽淑博, 日比谷紀之: 全球数値シミュレーションに基づく深海の乱流混合過程に供給しうる内部潮汐波エネルギーの見積もり, 第24回数値流体力学シンポジウム, 2010年12月23日, 慶応大学日吉キャンパス
- ⑦Yoshihiro Niwa, Toshiyuki Hibiya: Numerically Predicted Distribution of Internal Tide Energy in the Global Ocean, 2010 AGU (American Geophysical Union) Fall Meeting, 2010年12月13日, Moscone Convention Center (サンフランシスコ, アメリカ合衆国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丹羽 淑博 (Niwa Yoshihiro)
東京大学・大学院理学系研究科・特任准教授
研究者番号: 40345260

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし