

機関番号：12601
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2007～2010
課題番号：19740286
研究課題名（和文）海洋深層の乱流混合パラメタリゼーションに向けた 内部波平衡スペクトル形成過程の解明
研究課題名（英文）The numerical studies of the formation processes of the universal internal wave spectrum in the deep ocean
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）：

海洋深層の乱流混合パラメタリゼーションの基礎研究として、現実的な海底地形を組み入れた高解像度の数値モデルに潮汐と風応力フォーシングを与え続けることによって、より現実に近い状況下での GM スペクトルの再現を試みた。その結果、潮汐フォーシングと風応力フォーシングとを同時に与えた場合に限り、両フォーシングの強度の比によらず GM スペクトルが形成されることが明らかになった。特に緯度 30 度付近において、内部波間の三波共鳴相互作用の一つである PSI を通じて効率的に内部波エネルギーがカスケードされる様子が再現された。また、鉛直低次モードの内部波が外洋中を 10000km 以上も伝播することにより、GM スペクトルの普遍的エネルギーレベルが維持されていることが示された。

研究成果の概要（英文）：

As a basic study for an accurate parameterization of turbulent diffusivity in the deep ocean, the formation processes of the universal ocean internal wave spectrum are investigated using a fine-grid numerical model forced with both the tidal- and wind- forcings. It is found that, only when both the tidal- and wind- forcings are applied, the universal Garrett-Munk (GM) spectrum as observed in the real ocean can be successfully reproduced independent of the ratio of each forcing. Especially, it is shown that the cascade of internal wave energy is enhanced around the latitude of 30° through nonlinear resonant triad interaction mechanism called parametric subharmonic instability. It is also indicated that low-vertical mode internal tides can propagate a long distance more than 10000km across the open ocean, suggesting that they play important roles in maintaining the universal energy level of the GM spectrum.

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	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,100,000	600,000	3,700,000

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：乱流混合，内部波，非線形相互作用，内部潮汐波，近慣性内部波，
海洋内部波平衡スペクトル，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。特に、海洋深層の等密度線を横切る方向の乱流混合はその強度の時空間分布どころかそのオーダーさえも完全には解明されていない。海洋深層の乱流混合は、スモールスケールの内部波が砕波することで引き起こされており、そのエネルギーは海洋内部波の普遍平衡スペクトルである Garrett-Munk スペクトル（以後 GM スペクトル）中をカスケードダウンすることによって供給されている。このことから、海洋深層の乱流混合係数のグローバル分布のパラメタリゼーションを実現するには GM スペクトルの形成・維持過程を解明することが必要不可欠である。事実、GM スペクトルのエネルギーレベルと乱流混合係数との間には強い相関のあることが知られている。しかしながら、GM スペクトルはあくまで様々な観測事実に基づいて定式化された経験的スペクトルモデルであり、現実の海洋において GM スペクトルが具体的にどの様なプロセスを経て形成・維持されているのか、そのエネルギーレベルがどの様なファクターによって規定されているのか解明されてこなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、海洋深層の乱流混合係数のグローバル分布のパラメタリゼーションを実現するための基礎研究として、海洋内部波の普遍平衡スペクトルである GM スペクトルの形成・維持過程を解明することである。そのために、数値モデルに潮汐・風応力フォーシングを長時間与え続け、数値モデル内に GM スペクトルを内生的に再現することを試みた。なお過去の数値実験では全て GM スペクトルを初期状態として与えており、本研究のように GM スペクトルを第一原理から内生的に再現する数値実験は初めての試みである。

3. 研究の方法

まず内部波普遍スペクトルの維持・形成機構を解明する第一歩として、そのエネルギー

供給源として重要な役割を担っている内部潮汐波のグローバルな空間分布を調べた。そのために、全球をカバーする三次元静水圧数値モデル（水平解像度 1/15 度・鉛直 40 層）に現実的な海底地形と密度成層を組み込み、主要四分潮 M2, S2, K1, O1 の潮汐フォーシングを与えた。さらに現実的な潮汐流を再現する為に、Matsumoto et al (2000) の潮汐の海表面変位データをモデル内に同化させた。

その次に高解像度の鉛直二次元非静水圧数値モデル（水平解像度約 1000m, 鉛直解像度約 5m）に潮汐・風応力フォーシングを長時間与え続け、内部波の励起、伝播、エネルギーカスケード、消散の各物理過程を同時に再現することにより、最終的に数値モデル内に GM スペクトルを内生的に再現することを試みた。さらに数値モデルの各地点での内部波エネルギーバランスを詳細に調べることにより、GM スペクトルを維持・形成する力学過程を調べた。

4. 研究成果

まず内部潮汐波の全球数値シミュレーションの結果から、①振幅の大きな内部潮汐波の励起は密度躍層の深度において急峻な地形変化を有し且つ潮汐流がほぼ直交して入射するような海底地形に限定されること、②顕著な海底地形の分布を反映して西部・中部太平洋や西部インド洋の内部潮汐波のエネルギーレベルが特に高くなることなどが示された（図 1）。このことは、西部・中部太平洋や西部インド洋において乱流混合が特に活発に発生していることを強く示唆している。さらに、この数値シミュレーションの結果を、過去に様々な海域で行われた長期係留系観測で得られた流速データと比較することによって、励起された鉛直低次モードの内部潮汐波が約 1000km 以上も伝播しうることを明らかにした。このことから、全世界の海洋でスペクトルレベル・構造がほぼ一定となる内部波普遍平衡スペクトルが、限定された海域で励起された内部潮汐波がカスケードしながら長い距離を伝播して大洋全域にエ

エネルギーを再配分することによって維持・形成されていることが示唆された。

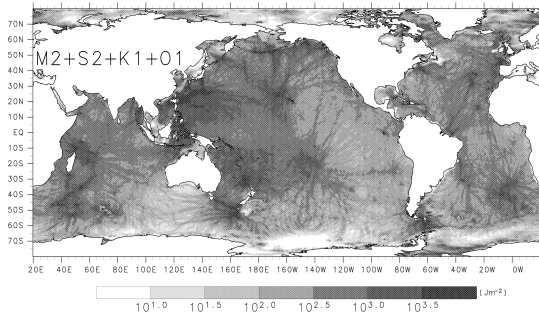


図1: 主要四分潮M2, S2, K1, O1を合計した単位体積辺りの内部潮汐波エネルギーの空間分布

次にGMスペクトルの形成・維持機構を調べるための数値実験を行った。非静水圧・鉛直2次元の数値モデルに、鉛直第1モード・半日周期の潮汐フォーシングと鉛直第1モード・近慣性周期の風応力フォーシングを長時間与え続け、最終的に達成される準平衡状態での内部波場のスペクトル構造を調べた。その結果、潮汐フォーシングと風応力フォーシングとを同時に与えた場合、両フォーシングの強度の比によらず、GMスペクトルが形成維持されることが明らかになった(図2,3)。なお、GMスペクトルを数値モデル内に内生的に再現したのは、本研究が初めてである。それに対して、潮汐フォーシングあるいは風応力フォーシングのどちらか一方だけを与えた場合には、GMスペクトルが再現されないことが分かった(図3)。このことは、地中海など潮汐流が極端に弱い縁海ではGMスペクトルが存在しないという観測結果と整合的である。このことから、内部波普遍平衡スペクトルの形成維持、ひいては内部波エネルギーのカスケードおよび海洋深層の乱流混合の生成には、潮汐フォーシングと風応力フォーシングの両方が不可欠であることが明らかになった。また緯度30度付近において、内部波間の三波共鳴相互作用の一つであるPSIを通じて効率的に内部波エネルギーがカスケードされる様子が再現された。さら

に新たに開発した Very Large Eddy Simulation(VLES)モデルを用いて、内部波の砕波に伴う乱流混合過程を再現し、GMスペクトルのエネルギーレベルと乱流混合強度との関係を調べた。

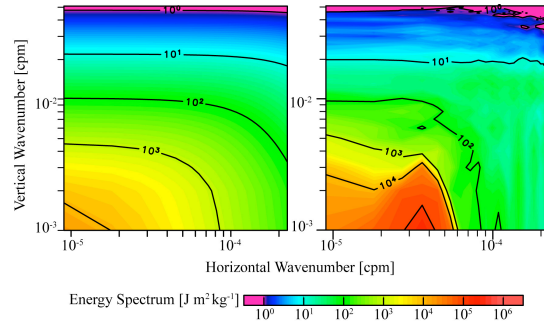


図2: GMスペクトル(左)と数値実験によって再現された内部波平衡スペクトル(右)

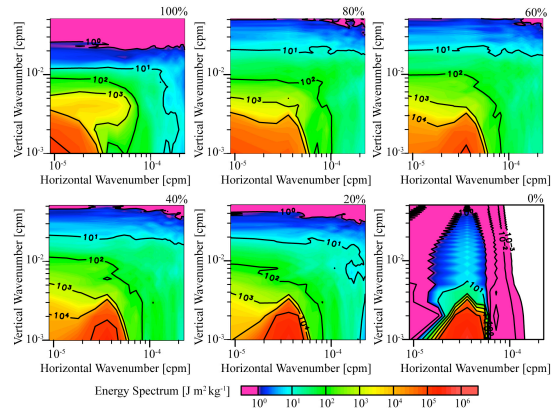


図3: 風応力フォーシングと潮汐フォーシングの強度の比率を変えて実施した数値実験によって再現された内部波平衡スペクトル。風応力の比率が100%, 80%, 60%, 40%, 20%, 0%の結果を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① Yoshifumi Sugiyama, Yoshihiro Niwa and Toshiyuki Hibiya, Numerically reproduced internal wave spectra in the deep ocean, Geophysical Research Letters, 査読有, 36巻, 2009, doi:10.1029/2008GL036825
- ② 丹羽淑博, 日比谷紀之, 内部潮汐波のグローバル分布に関する数値シミュレーション, 第23回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 査読無, 2009, D5-3

- ③ Naoki Furuichi, Toshiyuki Hibiya and Yoshihiro Niwa: Model-predicted distribution of wind-induced internal wave energy in the world's oceans, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 113巻, 2008, doi:10.1029/2008JC004768
- ④ Toshiyuki Hibiya, Maki Nagasawa, and Yoshihiro Niwa: Latitudinal dependence of diapycnal diffusivity in the thermocline observed using a microstructure profiler, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 34 巻, 2007, doi: 10.1029 /2007GL032323

[学会発表] (計 5 件)

- ① 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22日
- ② Yoshihiro Niwa and Toshiyuki Hibiya: Numerically predicted distribution of internal tide energy in the global ocean, 2010 Americal Geophysical Union Fall Meeting, 2010年12月13日
- ③ 丹羽淑博, 日比谷紀之: 内部潮汐波のグローバル分布に関する数値シミュレーション, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009年12月17日
- ④ 丹羽淑博, 日比谷紀之: 内部潮汐波のグローバル分布に関する数値シミュレーション, 2008年度日本海洋学会秋季大会, 2008年9月26日
- ⑤ 古市尚基, 丹羽淑博, 日比谷紀之: 風応力擾乱によって励起された内部重力波に関する全球的エネルギー論, 2008年度日本海洋学会春季大会, 2008年3月29日

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