

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654165

研究課題名(和文) 地球温暖化予測の高精度化に向けた海洋混合層モデルの開発

研究課題名(英文) Improvement of ocean mixed layer model toward the accurate prediction of future global warming

研究代表者

日比谷 紀之(Hibiya, Toshiyuki)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80192714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：Large Eddy Simulationモデルを用いて海洋表層における乱流過程を数値的に再現し、その結果を現場観測と等価なものとする事で、従来の海洋混合層モデル(Mellor-Yamadaモデル)における乱流スキームを検証した。大気境界層における先行研究を参考に、モデル内の乱流長さスケールおよび安定関数の定式化を修正したところ、水温構造の再現性が著しく向上した。さらに、この改良されたモデルを組み込んだ広域数値シミュレーションにおいても、西部北太平洋における夏季の台風通過後の上層海洋の応答や冬季の海洋混合層発達とそれに伴う海面水温低下などの再現に著しい性能向上を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：Using the large eddy simulation model, we have carried out idealized numerical experiments for the oceanic mixed layer processes under several forcing scenarios consisting of wind stress, heating, and cooling; the obtained results were used to assess the most widely used Mellor-Yamada (MY) mixed layer model. We have modified its formulation on the turbulent length scale and the stability functions following the recent study of the atmospheric mixed layer to improve the performance in reproducing the upper ocean response under each forcing scenario.

We have next incorporated thus modified mixed layer model into an ocean general circulation model to assess its performance in the realistic situations in the ocean. Comparing the numerical results with the observed ones in the northwestern Pacific, it has been shown that this model performs much better than the original MY model under strong wind forcing after passage of typhoons in summer and under sea surface cooling in winter.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：気象・海洋物理・陸水学

キーワード：海洋混合層モデル 乱流クロージャーモデル 乱流パラメタリゼーション Large Eddy Simulation 風応力 海面熱フラックス 海面水温 台風

## 1. 研究開始当初の背景

海洋表層には大気からの加熱・冷却や風により引き起こされる活発な乱流運動に伴い、温度・塩分・密度等が鉛直方向に一様化されている混合層が存在する。この海洋混合層は、大気と海洋の間で行われる熱や運動量、酸素、二酸化炭素などの交換に支配的な役割を果たしており、様々なスケールの大気の運動、および、風成循環や熱塩循環など、海洋の運動に大きな影響を及ぼしている。例えば、台風の通過に伴う海洋混合層の温度の低下は顕熱・潜熱フラックスの減少を招き、その後の台風の強度変化に大きな影響を及ぼす。また、海洋混合層を介した大気擾乱と海洋との相互作用は、全海洋に吸収される二酸化炭素ガスの総量に大きな影響を及ぼすことが推察されている。さらに、冬季の海洋混合層からは、亜表層に取り込まれて海洋中層や深層を循環する水塊が形成される。この水塊は温度・塩分・酸素・栄養塩等の特性が空間的に広く一様であり、水塊が形成された時点での「情報」を数十年から数千年にわたって保持している。このため水塊は、再び海洋混合層に取り込まれ、その情報が大気にフィードバックされるというプロセスを通じて、長期の気候変動に重要な役割を果たすと考えられている。

しかしながら、既存の混合層パラメタリゼーションを組み込んだ大気海洋結合モデルによって再現された海表面温度は、特に大気海洋相互作用の鍵を握る赤道域や極域において、観測結果から著しく食い違ってしまふ。気象予報や、地球温暖化をはじめとする長期的な気候変動予測の信頼性を向上させていくためにも、海洋混合層内における物理過程を正確に表現することは必要不可欠な課題となってきた。

## 2. 研究の目的

本研究は「投棄式乱流計 (XMP) と投棄式流

速計 (XCP) を駆使した「荒天下における海洋混合層の発達過程の直接観測」と「Large Eddy Simulation による高解像度数値シミュレーション」とを組み合わせることで、海洋表層における既存の混合層乱流スキームを抜本的にバージョンアップするとともに、バージョンアップした海洋混合層モデルを大気海洋結合モデルに組み込み、地球温暖化など長期気候変動の予測精度を格段に高精度化することで、「ミクロのスケールから気候変動予測の精度向上に貢献していくこと」を究極的な目的とした。

## 3. 研究の方法

当初計画としては、カナダの測器会社が開発予定の投棄式乱流計を使用して、荒天時を含む様々な状況下で観測を行い、そのデータ解析から既存の海洋混合層モデルの改良を行う予定であった。ところが、この技術開発が大幅に遅れてしまった上に、完成した試作品が計画通りに作動しなかったため、様々な風応力や熱フラックスを海面に与えた時の乱流の発達過程を Large Eddy Simulation (LES) モデルを用いて数値的に再現し、それを観測結果と等価なものを見出すことで、従来の混合層乱流モデルの検証 / 改良を行うことにした。

## 4. 研究成果

台風通過に伴って励起される近慣性流シアの影響に加えて、風波の砕波による影響、ラングミュア循環の影響、海面を通じた熱フラックスの影響などを考慮したLES実験を行った結果、従来型の乱流パラメタリゼーション (Mellor-Yamadaモデル) を用いた場合には、乱流エネルギーや乱流長さスケールなどの時間的発達がLESの結果と著しく異なってしまうことが明らかになった。そこで、すでに大気境界層の時間的発達の再現に成功を収めた方法に従って、この乱流パラメタリゼーションを改良してみたところ (Mellor-Yamada-

Nakanishi-Niino モデル)、乱流エネルギーや乱流長さスケールなどの時間的発達、ひいては、海洋混合層内の水温構造がLESの結果と非常によく一致するなど、その有効性を確認することができた(図1)。

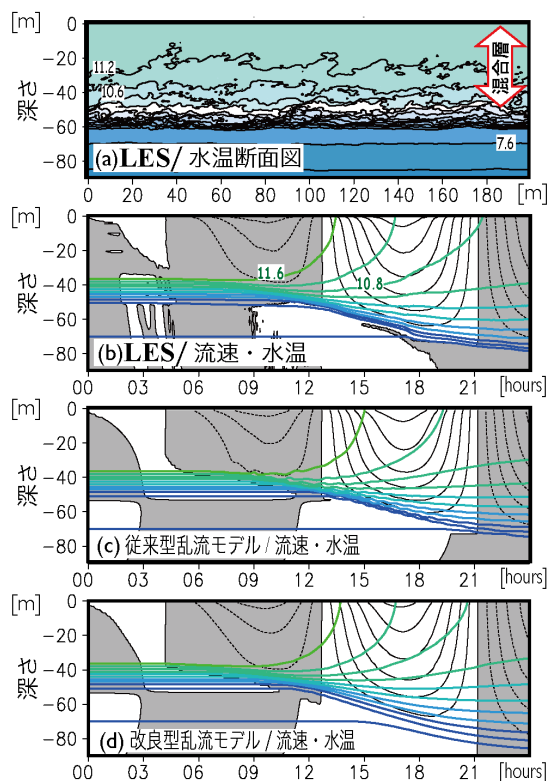


図1 (a) 台風に対する表層海洋応答を想定したLESの実験結果の瞬間図(水温場の瞬間断面図、等値線は0.3 間隔) (b)-(d) LESによる計算結果と各種の乱流パラメトリゼーションを組み込んだ表層混合層モデルによる計算結果との比較。陰影は東西流速(0.2 m/s 間隔) 青緑線は水温(0.4 間隔)を示す。

さらに、この乱流パラメトリゼーションを、海洋大循環モデル MITgcm に組み込み、現実的な風応力や熱フラックスの下でモデルを駆動することで、夏季、日本近海を通過していく台風に対する上層海洋の応答の再現、冬季、西部北太平洋における海洋混合層の発達とそれに伴う海面水温の低下の再現など、そのパフォーマンスが従来に比べて著しく向上することを確認した(図2)。

以上の結果により、気候変動に関わるグロ

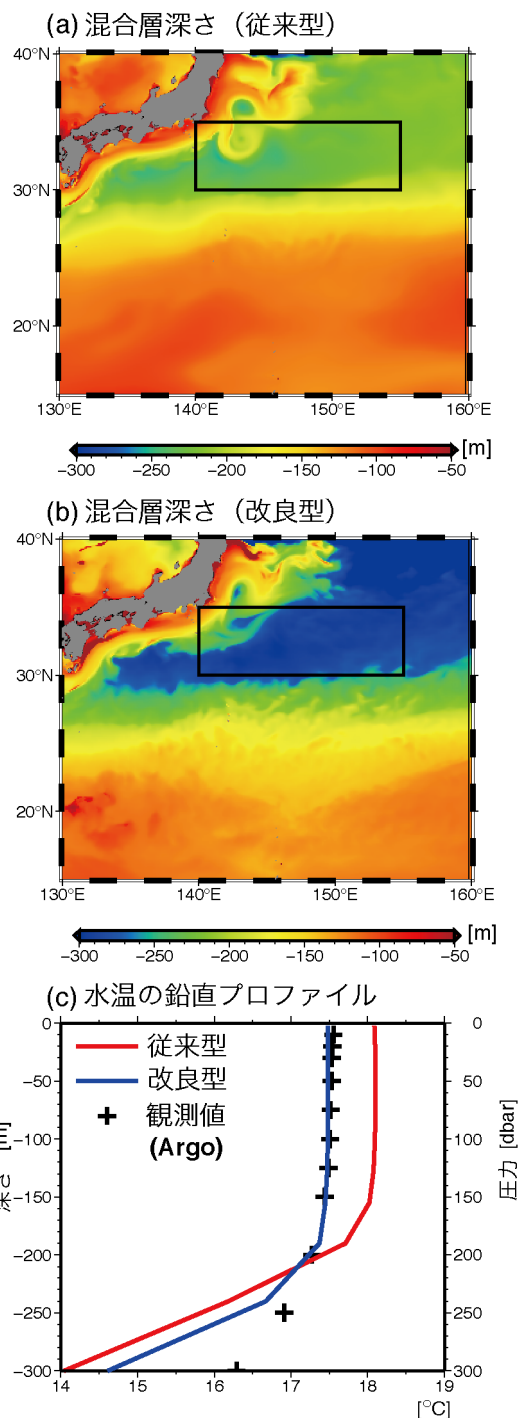


図2 (a) 従来の乱流モデルと(b) 改良型の乱流モデルを用いて得られた2003年2月の混合層深さの月平均値。混合層深さは、海面から水温が0.5°C下がる深さとした。(c) (a)と(b)の黒枠内(30°N-35°N、140°E-155°E)で空間平均した2003年2月の水温の鉛直プロファイル。赤線が従来の乱流モデル、青線が改良型乱流モデル(深さ座標、左軸)、十字がArgoフロートによる観測データの平均値(Hosoda et al., 2008) (圧力座標、右軸)。

ーバルな大気海洋結合現象の予測精度の向上のみならず、大気海洋相互作用の正確な再現が鍵となる台風発達とそれに伴う被害予測の向上など、実用的な課題に対しても「乱流の高精度パラメタリゼーション」というミクروسケールの研究成果からの貢献の道を切り拓くことができた。

## 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 6 件)

Watanabe, M, and T.Hibiya, Assessment of mixed layer models embedded in an ocean general circulation model, 査読有, Journal of Oceanography, 69, 2013, 329-338, DOI:10.1007/s10872-013-0176-6  
Nagai, T, and T.Hibiya, Effects of tidally induced eddies on sporadic Kuroshio-water intrusion (kyucho), 査読有, Journal of Oceanography, 69, 2013, 369-377, DOI:10.1007/s10872-013-0179-3

Hibiya, T., N. Furuichi and R. Robertson, Assessment of fine-scale parameterizations of turbulent dissipation rates near mixing hotspots in the deep ocean, 査読有, Geophysical Research Letters, 39, 2012, L24601, DOI:10.1029/2012GL054068

Nagai, T, and T.Hibiya, Numerical simulation of tidally induced eddies in the Bungo Channel: A possible role for sporadic Kuroshio-water intrusion (kyucho), 査読有, Journal of Oceanography, 68 (5), 2012, 797-806, DOI 10.1007/s10872-012-0141-9

Furuichi, N., T.Hibiya and Y. Niwa, Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the

oceanic mixed layer using a large eddy simulation model, 査読有, Journal of Oceanography, 68 (2), 2012, 285-294, DOI:10.1007/s10872-011-0095-3

Iwamae, N, and T.Hibiya, Numerical study of tide-induced mixing over rough bathymetry in the abyssal ocean, 査読有, Journal of Oceanography, 68, 2012, 195-203, DOI:10.1007/s10872-001-0088-2

[学会発表](計 19 件)

渡辺 路生, 日比谷 紀之, 日本海底層での近慣性流の形成メカニズムの解明とラドン-222 極大構造の再現, 2014 年度日本海洋学会春季大会, 2014 年 3 月 27 日, 東京海洋大学品川キャンパス(東京)

Hibiya T. and M. Watanabe, Performance Check of Mixed Layer Models Incorporated into an Ocean General Circulation Model, Asia Oceania Geosciences Society 2013, 2013 年 6 月 26 日, ブリスベーン(オーストラリア)

Ijichi, T. and T.Hibiya, Assessment of Fine-Scale Parameterizations of Turbulent Dissipation Rates in the Deep Ocean Using a Multi-Scale Profiler, Asia Oceania Geosciences Society 2013, 2013 年 6 月 26 日, ブリスベーン(オーストラリア)

大貫 陽平, 日比谷 紀之, 内部潮汐流から近慣性流へエネルギーを輸送する PSI の増幅機構に関する理論的研究, 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(東京)  
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(東京)

伊地知 敬, 日比谷 紀之, 内部波スペクトルの周波数方向の歪みを考慮した乱流パラメタリゼーションの有効性の検証, 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 (東京)

高木 智章, 日比谷 紀之, 海洋内部波場内での潮汐流と海底地形との相互作用による内部波励起とそれに伴うエネルギー散逸の数値実験, 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 (東京)

伊地知 敬, 日比谷 紀之, 我が国初のマルチスケールプロファイラーを利用した乱流パラメタリゼーションの有効性の検証, 2012 年度日本海洋学会秋季大会, 2012 年 9 月 16 日, 東海大学清水校舎 (静岡)

Wang, B., T.-K. Kim, J.-H. Yoon, N. Furuichi and T. Hibiya, Application of the improved vertical mixing scheme to the modeling of the Japan Sea under traveling typhoons, 2012 年度日本海洋学会秋季大会, 2012 年 9 月 15 日, 東海大学清水校舎 (静岡)

永井 平, 日比谷 紀之, 豊後水道における急潮現象に関する数値的研究, 2012 年度日本海洋学会秋季大会, 2012 年 9 月 14 日, 東海大学清水校舎 (静岡)

Niwa, Y. and T. Hibiya, Estimation of baroclinic tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations, Asia Oceania Geoscience Society (AOGS); American Geophysical Union (AGU) (Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM)) Joint Assembly 2012, 2012 年 08 月 16 日, SUNTEC (シンガポール)

Hibiya, T. and N. Iwamae, Numerical study of tide-induced mixing over rough

bathymetry, Asia Oceania Geoscience Society (AOGS); American Geophysical Union (AGU) (Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM)) Joint Assembly 2012, 2012 年 08 月 16 日, SUNTEC (シンガポール)

Watanabe, M. and T. Hibiya, Assessment of mixed layer models embedded in an ocean general circulation model, Asia Oceania Geoscience Society (AOGS); American Geophysical Union (AGU) (Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM)) Joint Assembly 2012, 2012 年 08 月 16 日, SUNTEC (シンガポール)

渡辺 路生, 日比谷 紀之, 海洋大循環モデルに組み込んだ海洋混合層モデルの有効性の検証-冬季における海洋混合層の発達過程に関する数値的シミュレーション, 2012 年度日本海洋学会春季大会, 2012 年 3 月 28 日, 筑波大学 (茨城)

古市 尚基, 丹羽 淑博, 日比谷 紀之, 様々な外力場に対する海洋混合層モデルの有効性の検証-LES 実験の結果から, 2012 年度日本海洋学会春季大会, 2012 年 3 月 28 日, 筑波大学 (茨城)

日比谷 紀之, LES による海洋微物理過程の高精度パラメタリゼーション, 21 世紀気候変動予測革新プログラム平成 23 年度成果発表会, 2012 年 2 月 28 日, 一橋記念講堂 (東京)

古市 尚基, 丹羽 淑博, 日比谷 紀之, Large Eddy Simulation に基づく海洋混合層モデルの有効性の検証, 2011 年度日本海洋学会秋季大会, 2011 年 9 月 29 日, 九州大学筑紫キャンパス (福岡)

渡辺 路生, 日比谷 紀之, 海洋大循環モデルに基づく海洋混合層モデルの有効性の検証, 2011 年度日本海洋学会秋季大会, 2011 年 9 月 29 日, 九州大学筑紫キャンパス (福岡)

Furuichi, N., T. Hibiya and Y. Niwa ,  
Assessment of Turbulence Closure Models  
for Resonant Inertial Response in the  
Oceanic Mixed Layer Using Large Eddy  
Simulations, International Union of  
Geodesy and Geophysics (IUGG) 2011,  
2011年6月29日, Melbourne (オースト  
ラリア)

〔図書〕(計 0 件)

〔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://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~hibiya-lab/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

日比谷 紀之 (HIBIYA, Toshiyuki)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 80192714

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

羽角 博康 (HASUMI, Hiroyasu)  
東京大学・大気海洋研究所・教授  
研究者番号: 40311641