

21 世紀気候変動予測革新プログラム 平成 23 年度研究成果報告書

チーム 5 海洋微物理過程

「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」

代表：日比谷 紀之

(東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 教授)

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東京大学が実施した平成23年度「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」の成果を取りまとめたものです。

V. 海洋微物理過程 :

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

実施機関名： 東京大学

研究代表者： 日比谷紀之

(大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 教授)

1. 研究目的

本課題の目的は、海洋の表層混合層と深層対流域における乱流モデルをバージョンアップし、海洋大循環モデルや大気海洋結合気候モデルに組み込むことで、表層混合層の力学的応答や深層水の形成過程の数値的な再現を試みることである。そして最終的に、この海洋表層から深層に至る乱流モデルのバージョンアップを通じて、大気海洋相互作用の再現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することを目標とする。

そのために、まず、Large Eddy Simulation (LES) の手法を用いた乱流シミュレーションを実施し、その結果に基づいて既存の乱流スキームを検証・改良して、高精度な乱流モデルを開発する。次に、このバージョンアップした乱流モデルを、海洋大循環モデルや大気海洋結合気候モデルに組み込み、亜表層の水塊形成メカニズムや、深層の熱塩大循環、表層混合層の経年変動の予報を行う。最後に、この計算結果の妥当性を、観測との比較から検証し、海洋物理学において長年、未解決のまま残されてきた表層混合層および深層対流の不確定性を解消することで、地球温暖化をはじめとする長期気候変動予測の格段の高精度化を実現させる。

2. 年次計画 (5 力年分)

一研究 1 年目 : 【LES による海洋表層混合層での乱流シミュレーション】

表層混合層では海表面での風による運動量注入、冷却・蒸発による密度対流、風波の砕波などによって活発な乱流運動が起きている。この乱流運動に伴う大気と海洋内部との運動量や熱の交換によって、大気と海洋の大循環の変動、さらに、それらの相互作用を通じて長期の気候変動がコントロールされることになる。表層混合層における乱流運動を担うのは、直径数 cm から数百 m の渦であるが、これらの様々な空間スケールの乱流渦が非線型相互作用することによって、運動量や熱が混合層内で輸送されている。これらの乱流渦をすべて解像するには非常に多くの格子点数を必要とするため、表層混合層の変動を直接にシミュレートすることは最新のスーパーコンピュータを駆使してもほとんど不可能に近い。

このような困難を緩和する方法の一つに Large Eddy Simulation (LES) とよばれる手法がある。LES では計算格子の幅 (グリッドスケール) より小さいスケールの乱流運動の影響を LES 乱流モデルで記述し、計算格子より大きいスケールの運動のみを直接計算する。こうすることで、乱流の全スケールを直接計算する場合よりも粗い計算格子で、乱流のシミュレーションを可能とする手法である。本研究では、まずこの LES の手法により、表層海洋混合層の応答のシミュレーションを行う。密度成層が強安定から強不安定へと大きく変動する海洋混合層内では、乱流の等方性を保証するため、数 10 cm の非常に細かい格子間隔が必要と考えられる。信頼できる LES を行うには、この格子間隔で海洋混合層全体を覆った計算を行う必要があるが、このような計算は地球シミュレータを用いることにより初めて可能となる。具体的には、Ocean Mixed Layer Experiment (OMLET) など、時間的に高分解能な長期観測データの存在する海域を対象とし、観測に基づく日平均の海面熱フラックスと運動量などを用いて、様々な条件設定のもとに表層混合層の変動を再現し、計算結果の有効性を確認する。必要に応じて、研究参加者 (東京大学大学院理学系研究科) が所有するマイクロスケール・プロファイラー (VMP-5500) を用いた観測データも利用し、計算結果の詳細な検証を行う。

–研究2年目：【LESによる海洋深層対流の乱流シミュレーション】

海洋深層には熱塩大循環と呼ばれる、全世界の大洋を巡って膨大な量の水や熱、各種の化学物質を輸送するシステムが存在する。この熱塩大循環は、長期的な気候変動をコントロールする最も重要な要素の一つであり、その実態を正確に把握することは地球温暖化をはじめとする気候変動を理解する大きな鍵となることがよく知られている。この熱塩大循環には様々な物理過程が複雑に作用しているが、深層対流は特にその根源となる重要なものである。深層対流は高緯度域での海面冷却に起因する重力不安定を解消するために生じる運動で、海底もしくは1000m程度以深の深層に達するものである。この深層対流は水平スケールがO(10km)と小さく、発生箇所も北大西洋のラブラドル海や南極近くのウェッデル海など数カ所に限られているが、それが熱塩大循環を強くコントロールしている。また深層対流は、極域の熱収支に大きく係わり、全地球の海水の量にも大きな影響を及ぼすことが知られている。

そこで本研究では、前項で説明したLESの手法を用いて深層対流の乱流シミュレーションを行う。深層対流を適切に表現するためには鉛直スケールが5m~5km、水平スケールが10m~10kmをカバーする数値シミュレーションが必要であるが、このような計算は地球シミュレータを用いることにより初めて可能となる。本研究では実際に深層対流が生じている海域を対象として数値シミュレーションを実施し、海水が表層から深層に沈降する途中で周囲の海水を取り込む過程も正確に再現することにより、水塊特性ごとに深層水の形成量を定量的に詳しく調べる。この結果を、過去の様々な観測データベースと比較することにより、計算結果の有効性を確認する。また、地球温暖化シミュレーションから予測される海面冷却や密度成層の状況下でも同様の数値シミュレーションを行い、温暖化が深層水形成に具体的にどのような影響を与えるのかについて定量的な考察を行う。

–研究3年目：【海洋表層混合層および深層対流の高精度乱流スキームの開発】

LESモデルは、乱流を直接計算する困難を緩和するための有力な方法ではあるが、計算機容量の制約により、海洋大循環モデルや大気海洋結合モデルにそのまま組み込むことは不可能である。このため、適切な乱流スキームによりパラメータ化しておく必要がある。ところが、従来の海洋大循環モデルで使用されてきた表層混合層の乱流スキームの多くは、大気境界層モデルをそのまま適用しているため、海洋固有の現象である砕波、ラングミュア循環などが全く考慮されていない。そのため、対流混合層の発達や、安定成層時の乱流混合の再現精度に多くの問題が残されている。また、深層対流に関しても、従来の海洋大循環モデルでは、力学的過程は考慮せず、密度の不安定のみを強制的に除く対流調節によって表現されてきた。一般に乱流混合は乱流のエネルギーと乱流渦の長さスケールに強く依存するが、長さスケールに関しては、これまでのところ信頼できる定式化がほとんど存在していないのが現状である。そこで、本研究では、LESモデルによる様々な条件下での数値実験を実施し、得られた計算結果をリファレンスとして、従来の乱流モデル(Mellor and Yamada, 1982; Noh and Kim, 1999)の改善を図る。具体的には、これらのパラメタリゼーションスキームで用いられている普遍定数や乱流長さスケールなどの新しい定式化を試みるとともに、必要であれば、新しいパラメタリゼーションスキームを開発し、その妥当性を検証する。

–研究4年目：【開発された鉛直混合層モデルを日本海循環モデルに組み込み、そのパフォーマンスの評価】

研究3年目までに開発された、新しい海洋表層混合層および深層対流の高精度乱流パラメタリゼーションを海洋大循環モデルに組み込み、そのパフォーマンスの評価を行う。そのために、研究4年目は特に日本海をそのテスト海域に設定して数値シミュレーションを行う。日本海の面積は太平洋などの大洋に比べ著しく小さいにもかかわらず、亜熱帯循環や亜寒帯循環に相当する海流、独立した深層循環など、大洋で見られる循環現象が多く存在する海域であるのがその理由である。また研究参加者(九州大学応用力学研究所)は、独自に開発した海洋大循環モデル(RIAMOM)を用いて日本海の海洋循環を研究してきた豊富な経験を有している。さらに、日本海国際共同観測CREAMSで得られた豊富な観測データベースを利用することも可能である。そこで、RIAMOMに本研究で新たに開発され

た高精度の乱流パラメタリゼーションを組み込み、その計算結果を CREAMS の観測データや従来型のパラメタリゼーションを組み込んだ計算結果と比較することによって、本研究で開発された高精度パラメタリゼーションのパフォーマンスの評価を行う。また、このシミュレーションの結果に基づいて、開発した乱流パラメタリゼーションのさらなる改良を行う。

研究5年目：【開発された鉛直混合層モデルを大気海洋結合モデルに組み込み、そのパフォーマンスの評価】

研究5年目は、本研究で開発した新たな乱流パラメタリゼーションを大気海洋結合モデルに組み込む。地球シミュレータを用いて長期気候変動の数値計算を行い、得られた結果を従来型のパラメタリゼーションを組み込んだ計算結果と比較することによって、本研究の成果を確認する。特に、エルニーニョやインド洋ダイポール現象の予測シミュレーションの結果が、大気大循環モデルと海洋大循環モデルの結合部分である海洋表層混合層の表現方法に鋭敏に依存してしまうことが知られているので、本研究での海洋表層混合層パラメタリゼーションの改善に伴う結合モデルの感度の変化を中心的に検証する。

3. 平成 23 年度の研究計画

【プロジェクトの総合推進】

構成されている2つのサブテーマの研究成果を常に有機的にフィードバックさせることにより、本プロジェクトの究極的な目的達成に向けた効率的な推進をはかっていく。

【運営委員会／研究連絡会】

業務参加者および業務協力者が密に情報交換すること、さらに、それをプロジェクトの円滑な運営に反映させていくことを目的として、運営委員会および研究連絡会(同日に開催)を年度内に3回行う。この運営委員会および研究連絡会においてプロジェクト統括および外部委員から得られた意見・助言をプロジェクトの推進に役立てていく。

【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の開発】

平成23年度は、平成22年度までにその有効性を検証したLESモデルを用いて、断片的な観測データではカバーできない様々な外力の条件下で数値実験を実施し、得られた計算結果をリファレンスとして、開発した乱流スキームの検証とその改良を行っていく。特に、海洋固有の現象である砕波やラングミュア循環などの影響を考慮した新しいパラメタリゼーションを開発し、その妥当性を検証する。

【海洋大循環モデルによる高精度パラメタリゼーションのパフォーマンス・チェック】

このようにして開発された乱流パラメタリゼーションスキームを海洋大循環モデル MITgcm や RIAMOM に組み込み、北太平洋上を通過する台風に対する上層海洋の応答や、冬季の季節風に対する日本海の応答などの数値シミュレーションを行うことで、そのパフォーマンス・チェックを行う。

区分	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
① プロジェクトの総合推進	←											→
② 運営委員会／研究連絡会				△				△			△	
③ 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の開発												
LES 計算に基づく海洋混合層モデルの乱流スキームの検証／改良 (東京大学情報基盤センター所有 スパコン HITACH SR11000 及び、 地球シミュレータを使用)	←											→
④ 海洋大循環モデルによる高精度パラメタリゼーションのパフォーマンス・チェック												
海洋大循環モデル MITgcm や RIAMOM への海洋混合層モデルの組み込み (九州大学情報基盤センター所有 スパコン FUJITSU PRIMEQUEST 580 及び、地球シミュレータを使用)	←											→

4. 平成 23 年度の研究成果

成果の要約

我々は、海洋表層における既存の乱流パラメタリゼーションの検証・改良を目的として、海洋表層混合層の形成・発達過程を直接に再現できる Large Eddy Simulation (LES) モデルの開発を行った。開発した LES モデルの有効性をチェックするため、2009 年 12 月および 2010 年 6 月に父島近海の海域およびグアム近海の海域で表層混合層の乱流強度の直接観測を行った。直接観測による乱流エネルギー消散率 (ϵ)、温度擾乱消散率 (χ) と比較した結果、開発された LES の信頼性を確認することができた。この LES を用いることにより、乱流消散スケールまで踏みこんだ海洋混合層モデルの有効性の検証が初めて可能になると期待される。

さらに、台風等の大気擾乱によって励起された「近慣性振動」や、海面冷却によって励起される「対流混合過程」等に関する LES 数値実験を行うとともに、その結果に基づいて Mellor-Yamada (Mellor and Yamada, 1982; Mellor, 2001) および Nakanishi and Niino (2009) の Level 2.5 の混合層モデルの有効性を検証した。その結果、Mellor-Yamada モデルで計算された混合層の発達は、LES の実験結果に比べ著しく抑制されてしまう一方で、Nakanishi-Niino モデルで計算された混合層の発達は、混合層モデル内の乱流運動エネルギーや乱流長さスケールなどの見積もりの改善により、LES の結果に匹敵する良好な結果となった。

最後に、以上の2種類の海洋混合層モデルを海洋大循環モデルに組み込み、北太平洋や日本海におけるパフォーマンスのチェックを行った。その結果、Nakanishi-Niinoモデルを組み込んだ場合に、海洋大循環モデルによって再現された海洋表層の温度構造が、現実の観測結果により近づくことが確認された。

4.1. 乱流強度の直接観測に基づく LES モデルの有効性の検証

我々は、既存の乱流パラメタリゼーションの検証・改良に使用するリファレンスデータの作成を目的として、海洋表層混合層の形成・発達過程を直接に再現できる Large Eddy Simulation (LES) モデルの開発を行ってきた。開発した LES モデルの有効性をチェックするため、2009年12月15日から16日および2010年6月9日に父島近海の海域で、2010年6月17日にグアム近海の海域で表層混合層の乱流強度の直接観測を行った。本節では、2009年12月の観測結果との比較を通じて、LES モデルの有効性について議論する。

4.1.1. 乱流観測および LES 数値計算

乱流観測は北海道大学水産学部附属練習船「おしよろ丸」の航海中、142.5°E、27.5°N 付近で超深海乱流計 VMP-5500 を用いて行われた。特に日没後および日出後の時間帯に重点をおきながら、深度約200mまでの乱流観測を断続的に合計21回実施した(図1の白矢印部分)。

LES モデルの基礎方程式は f 面上のブシネスク近似を施した Navier-Stokes 方程式であり、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。モデル海洋は東西240m、南北240m、水深144mの矩形領域で、解像度は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.5\text{m}$ とした。境界条件として水平方向に周期的境界を、鉛直方向には上面を固定壁とし、下面の境界付近にはスポンジ層を導入した。慣性周波数 f は 27.5°N での値とした。海面付近では、背景流としてストークス水平流も考慮した。

LES 計算の初期条件として静止状態を仮定し、水温場は CTD 観測の結果に基づいて与えた。塩分は一定とした (35.0 psu)。本研究では、現場で取得された気象データに基づいて求めた風応力および海面熱フラックスを LES モデルの境界条件として与え(図1a)、計算を12月13日から4日間行った。

4.1.2. 結果

図1bにLESで計算された12月15-16日の期間における乱流エネルギー消散率の水平平均値の時間変化を示す。乱流運動は海面での冷却や風応力を起源として発達し、15日の午前6時頃には乱流エネルギー消散率が混合層全体で概ね $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ を上回っている。

LES と乱流観測の比較の一例として、図1cに、乱流観測が最も重点的に行われた期間となる12月16日5-9時(図1bの☆印)での乱流直接観測(赤点)とLES計算(黒点)による乱流エネルギー消散率(ϵ)の鉛直分布の比較を、図1dに乱流直接観測(緑点)とLES計算(黒点)による温度擾乱消散率(χ)の鉛直分布の比較を示す。 ϵ が混合層内(100m以浅)ではほぼ一様に分布している点、 χ が混合層底部で急激に増加する点を含め、LES結果と観測結果は概ね同オーダーでよく一致している。

以上の結果から、本研究で開発されたLESの信頼性を確認することができた。このLESを用いることにより、乱流消散スケールまで踏みこんだ海洋混合層モデルの有効性の検証が可能になると期待される。

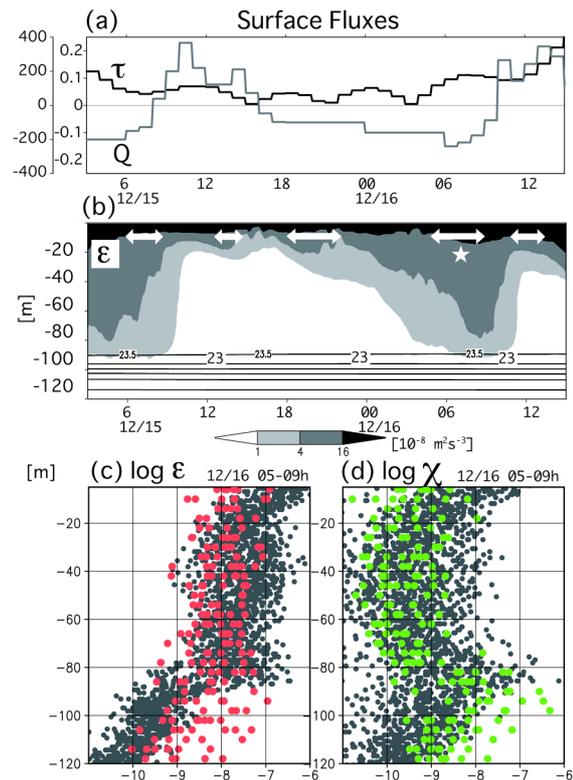


図1. (a) 海面フラックスデータ。 τ : 風応力、 Q : 熱フラックス。(b) LES 計算により得られた乱流エネルギー消散率の深度-時間分布図。等値線は水温 (0.5°C毎)。図中の白矢印は乱流観測が行われた時間帯を示す。(c)-(d) 12月16日5時-9時(bの☆印)での乱流直接観測(赤点・緑点)とLES計算(黒点)による、乱流エネルギー消散率(ϵ)の鉛直分布の比較(c)および温度擾乱消散率(χ)の鉛直分布の比較(d)。LESの結果はある点における12分毎の鉛直分布を重ねて示した。

4.2. LESに基づく海洋混合層モデルの有効性の検証

本節では、前節で有効性を確認できたLESモデルを用いて風によって励起された「近慣性振動」や海面冷却によって励起された「対流混合過程」、海洋表層に固有の現象である「ラングミュア循環」などのLES実験を行い、その結果に基づいて海洋混合層モデルの有効性を検証する。

4.2.1. 近慣性振動

台風等の大気擾乱によって励起される「近慣性振動」は海洋表層において活発な乱流混合を引き起こし、海面水温の変動に大きな影響を及ぼすことが知られている。本研究では、まず、風起源の近慣性振動に伴う海洋混合層の発達過程を再現するとともに、その結果に基づいて海洋混合層モデルの有効性を検証する。

LESモデルは東西200m、南北200m、水深105mの矩形領域で、解像度は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.8$ mとした。塩分は一定とし(32.8 psu)、慣性周波数 f は 45°N における値とした。初期条件として流速場は静止状態を考え、水温場は35mの一樣層を表層にもつように定めた。本研究では、回転する風応力場 $(\tau_x, \tau_y) = A_0 \sin^2(\pi t/t_d) \cdot (\cos \omega t, -\sin \omega t)$ を加えることで表層混合層内に近慣性振動を励起させた。ここで、 $A_0 = 1.4 \text{ N/m}^2$ 、 $t_d = 24 \text{ h}$ で、 $\omega = f_{45}$ は慣性周波数である。

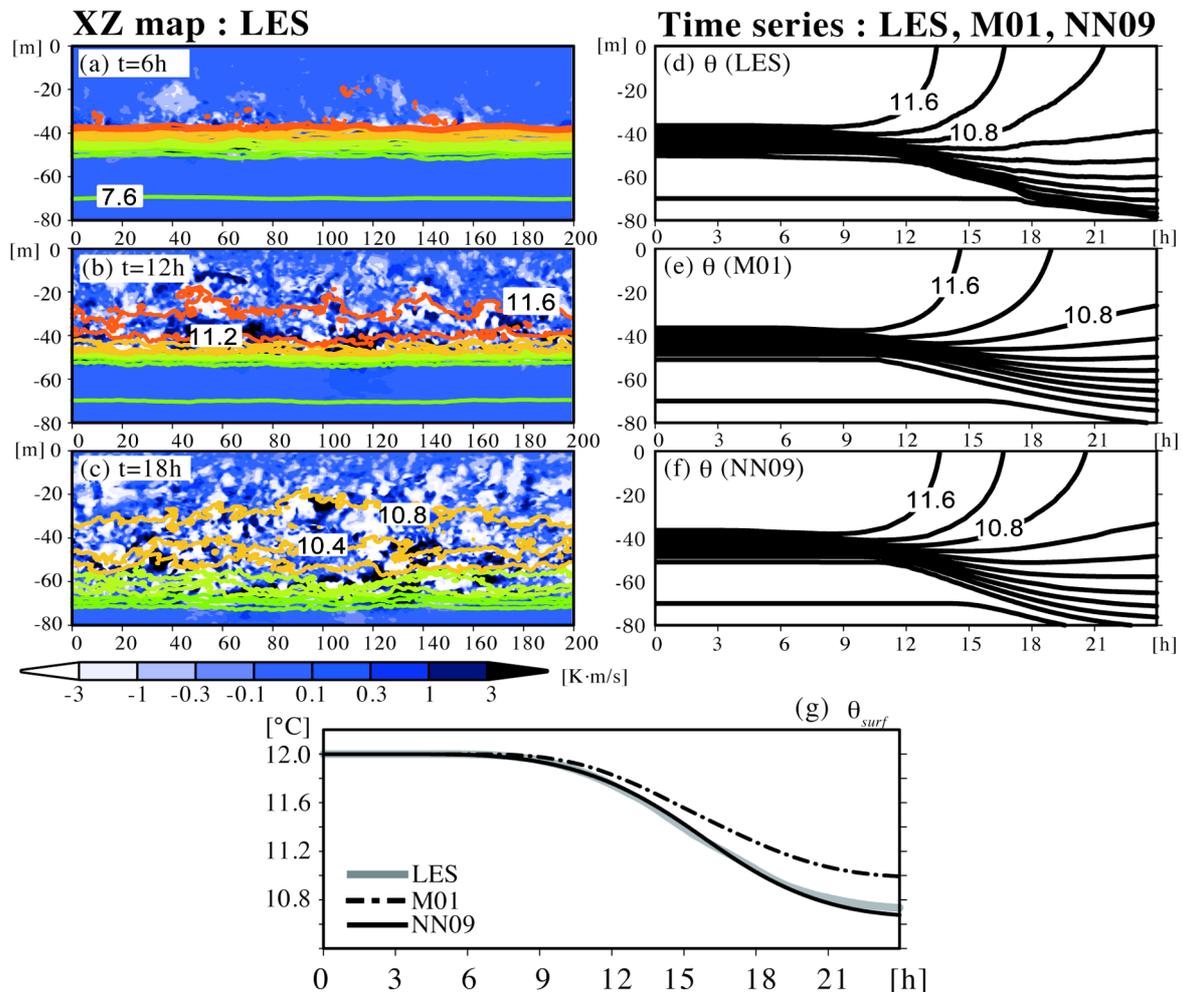


図2. (a)-(c) LESによって計算された水温(等値線)および乱流熱フラックス(陰影)の鉛直断面図の時間変化。(d)-(f) LESおよび各混合層モデルによって計算された水温場の時間変化。(g) LESおよび各混合層モデルによって計算された海面水温の時間変化。等値線の間隔は 0.4°C 。

図 2 a-c は x - z 断面内における水温および乱流熱フラックスの時間変化を示す。ここで、負の乱流熱フラックスは冷たい（暖かい）海水が上方（下方）に輸送されることを示す。混合層下部における乱流運動が活発になるにしたがって負の乱流熱フラックスが大きくなり、その結果、混合層が次第に厚くなるとともに、表層付近の水温が低下してくる様子が確認できる。

次に、この近慣性振動に伴う表層混合層の消長を、Mellor-Yamada (Mellor and Yamada, 1982; Mellor, 2001, 以後 M01) および Nakanishi and Niino (2009, 以後 NN09) の Level 2.5 の混合層モデルを用いて計算し、その結果を LES の実験結果と比較した。ただし、NN09 内の乱流長さスケール L に関しては、Nakanishi and Niino (2009) から少しだけ修正し

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_T} + \frac{1}{L_B}, \quad L_S = \kappa z, \quad L_T = 0.24 \frac{\int_0^\infty qz dz}{\int_0^\infty q dz}, \quad L_B = 0.5 \frac{q}{N}$$

で与えた。ここで $\kappa=0.4$ は von Karman 定数、 z は深度、 q^2 は乱流エネルギー、 N は浮力周波数である。

図 2 d-g に、LES, M01, および NN09 のそれぞれから計算された水温場の時間変化を示す。M01 で計算された混合層の発達には、LES の実験結果に比べ著しく抑制されてしまうが、NN09 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った。この NN09 の良好なパフォーマンスは、乱流長さスケールなどの見積もりが LES の結果とよく一致していることに起因することも確認された。

4.2.2. 対流混合過程およびラングミュア循環

「近慣性振動」に関する LES 実験は、外力場として、風応力がきわめて強い状況を想定していたが、風応力場が弱い状況下では、海面冷却によって励起される「対流混合過程」や海洋表層に固有の現象である「ラングミュア循環」が、海洋混合層の発達過程において重要な役割を担うと考えられている。

これらのプロセスに関する海洋混合層モデルの有効性を検証するために、3 種類の LES 実験を行った (表 1)。モデル海洋は水平方向が約 300m、水深が 80m の矩形領域で、解像度は $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.5\text{--}1\text{m}$ とした。初期条件として流速場は静止状態を考え、塩分は一定とした (35.0 psu)。風応力場は一定の強さで、一定方向にのみ作用すると仮定した。

本研究では、対流混合過程を励起させるため、海面で負の熱フラックスを与えた (数値実験 C1)。また、ラングミュア循環を励起させるため、風応力と同じ方向に背景ストークス水平流 $U_S = U_0 \exp(4\pi z/L)$ を仮定した (数値実験 L2) (U_0 はストークス流速の大きさを示す定数であり、 $L=40\text{m}$ とした)。比較のため、ラングミュア循環の影響を考慮しない実験も行った (数値実験 L1)。さらに、LES と同一条件下での表層混合層の消長を、M01 および NN09 の乱流クロージャーモデルを組み込んだ鉛直 1 次元モデルを用いて計算し、その結果を LES の実験結果と比較した。

	初期水温場	海面熱フラックス Wm^{-2}	U_0 ms^{-1}	τ_x Nm^{-2}
C1	A	-160	0	0.15
L1	B	+160	0	0.15
L2	B	+160	0.12	0.15

表 1. 数値実験のリスト。初期水温場 A : 深さ 50m まで 18°C で一定、以深は 0.2°Cm^{-1} の勾配で低下、初期水温場 B : 19°C の一様層。負の熱フラックス値は海面冷却を示す。

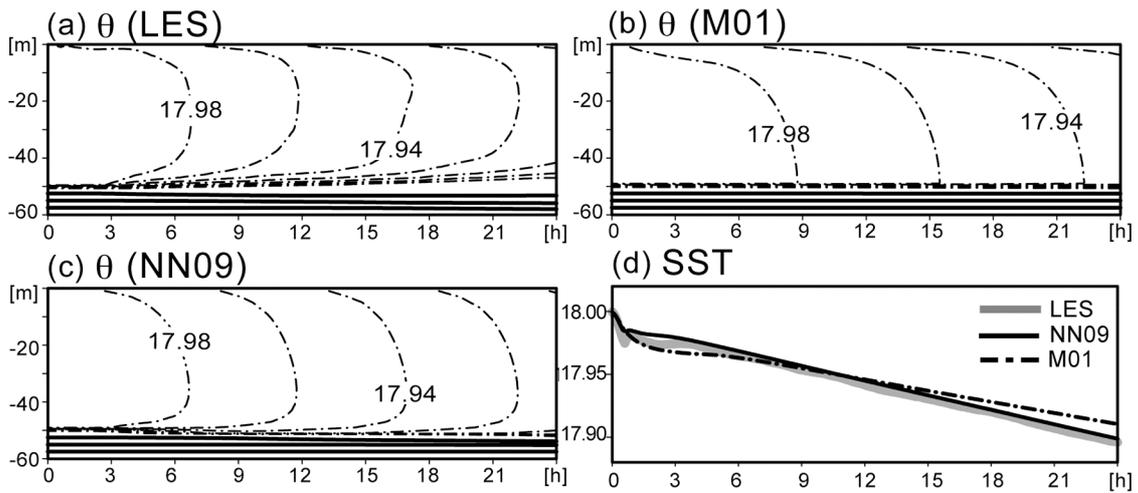


図3. 数値実験C1での水温場の時間変化。(a)-(c) 水温場の時間-深度断面図。ただし、LESの結果は水平平均値。(d) 海面水温。

図3に、海面冷却によって励起された対流混合過程に伴う水温場の時間変化を示す(数値実験C1)。M01と比べてNN09の実験結果は、LESで得られた混合層内の水温の低下の様子をよく再現している。一方、図4に、海面加熱を与えた場合の水温場の時間変化を示す(数値実験L1)。M01およびNN09の実験結果は、LESで得られた海面付近の水温上昇の様子をよく再現している(図4a-c 実線、図4d 灰色実線、黒色太実線、黒色太破線)。図4a(破線)は、ラングミュア循環の影響も考慮したLESによる実験結果を示す(数値実験L2)。ラングミュア循環の存在によって、海面付近の水温上昇が著しく抑制されてしまう様子がわかる。この実験結果を再現するために、M01やNN09にラングミュア循環を励起するストークス流のシアに伴う乱流生成項を組み込んで数値実験を行った(図4b,c 破線)。その結果、ラングミュア循環による海面水温の上昇の抑制の効果をLESの半分程度まで再現することができた(図4d 灰色破線、黒色細実線、黒色細破線)。

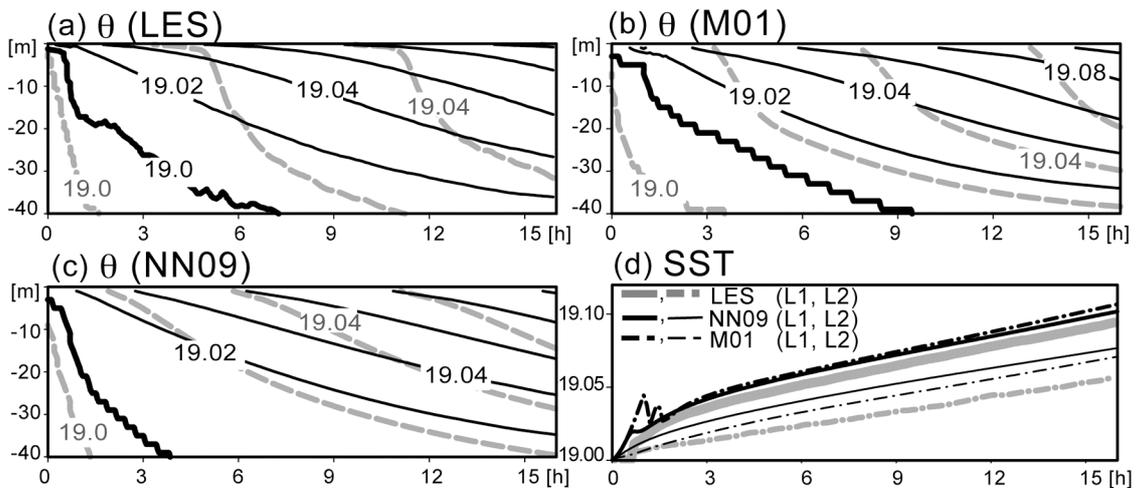


図4. 数値実験L1, L2での水温場の時間変化。(a)-(c) 水温場の時間-深度断面図。ただし、LESの結果は水平平均値で、実線がL1、破線がL2の結果を示す。(d) 海面水温。

4.3. 海洋大循環モデルに組み込んだ海洋混合層モデルのパフォーマンス・チェック

続いて、M01およびNN09を海洋大循環モデルに組み込み、北太平洋および日本海におけるパフォーマンスのチェックを行った。ここでは、北太平洋を対象とした数値実験の結果を紹介する。

4.3.1. 数値実験

モデル領域は太平洋で、球面座標を用いた。グリッド間隔は 120°E から 160°E 、赤道から 40°N で 0.1° 間隔とし、その外側でなだらかに間隔が大きくなる。鉛直には 45 層とし、鉛直解像度は海面付近で 5m、深海で 250m とした。地形は ETOPO2 を用いた。水平粘性には Smagorinsky 型の Biharmonic 粘性を適用した。今回は北半球に着目するため、 40°S から 10°S までで温度・塩分を World Ocean Atlas (2001) の月平均気候値に緩和させた。南端で Open boundary を適用する。海面の境界条件として、気象庁長期再解析プロジェクト JRA-25 の海上風速、海上気温、降水、比湿、下向き短波・長波フラックスを与えた。これは 1.25° 間隔、6 時間ごとのデータのため、時間・空間方向に線形補間を行った。まず 2002 年 8 月

Typhoon-tracks 2003 Nos.09-16

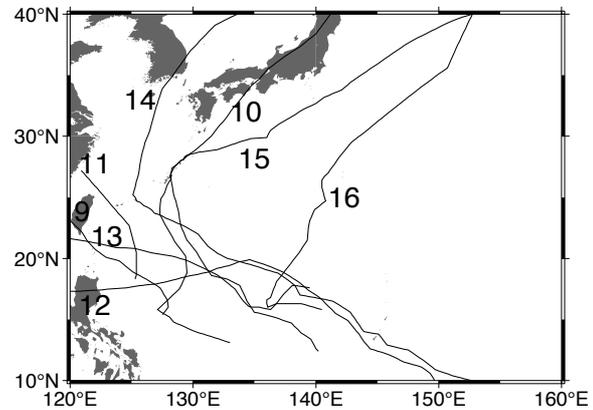


図5. 2003年8月1日から60日間に発生した台風の経路。台風9号から16号。

から1年間M01およびNN09を用いて積分を行い、特に冬季の混合層の発達過程とそれに伴う海面水温の変化について両者の比較を行った。続いてM01を用いて得られた2003年8月1日より、M01およびNN09モデルを用いて60日間積分し、台風に伴う海面水温の違いを調べた。この期間に台風9号から16号まで8個の台風が日本の南方海上で発生した(図5)。特に9月6日に発生した14号は最低気圧910hPa、最大瞬間風速74.1 m/sを観測した猛烈な台風であった。

4.3.2. 結果

M01を用いて得られた2003年2月の混合層深度の月平均値を図6aに示す。ただし、混合層深は海面から温位が 0.5°C 下がる深さとした。冬季の冷却や、大気擾乱により引き起こされる近慣性振動によって乱流混合が活発になり、 30°N 以北で200mを超える混合層の発達が見られる。一方、NN09モデルの結果を見ると(図6b)混合層の発達はさらに顕著となり300mに達する。このとき 30°N - 35°N 、 140°E - 155°E (図6枠内)で空間平均した2003年2月の平均水温プロファイルは図6cとなる。NN09(赤線)の方がM01(青線)に比べて混合層が発達し、海面水温が低下していることがわかる。同時期・海域のARGOデータによる実際の水温分布(図6c、十字; Hosoda et al., 2008)を見ると、NN09を用いたモデルの結果が実際の海洋の様子をよく再現していることがわかる。

続いて、2003年8月1日の海面水温分布を図7aに示す。 15°N から 25°N に海面水温が 30°C を超える海域が見られる。これは、 15°N - 25°N 、 125°E 以東で海面水温が 30°C を超えているという衛星観測から得られた海面水温分布の特徴(Reynolds et al., 2007)をよく再現している。M01を用いて1年間積分した場合とNN09を用いた場合とで、このときの海面水温は同様の空間分布を示したため、図7aの状態からM01、NN09それぞれを用いて2カ月間時間積分し両者の結果を比較した。

M01を用いて得た2003年8月1日から60日間の海面水温の変化量を図7bに示す。台風の進路にあたる 20°N から 30°N 、 125°E から 135°E で海面水温の低下がみられる。一方で、同期間にNN09を用いてモデルを駆動したところ、同海域の海面水温の低下はさらに顕著となり(図7c)、衛星観測による結果(図7d)とより整合的な結果が得られた。

以上の結果は、海洋表層の変動過程のみならず、大気海洋相互作用の再現においても、NN09がM01より優れたパフォーマンスを発揮し得ることを強く示唆している。

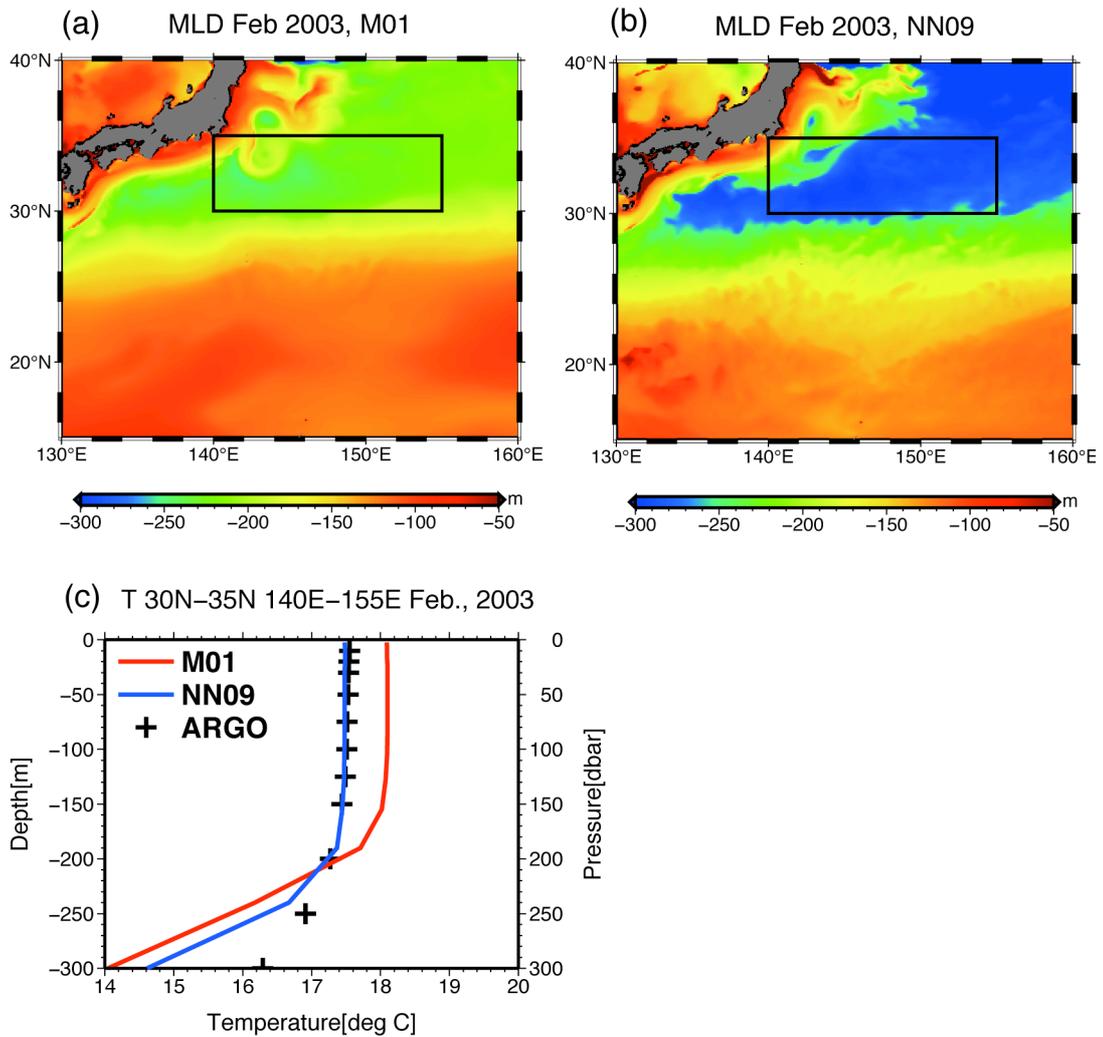


図 6。(a) M01 と(b) NN09 モデルを用いて得られた 2003 年 2 月の混合層深度の月平均値。混合層深は、海面から温位が 0.5°C 下がる深さとした。(c) 30°N - 35°N , 140°E - 155°E (図 6ab、黒枠内) で空間平均した 2003 年 2 月の平均水温プロファイル。青線が M01, 赤線が NN09 (z 座標、左軸), 十字が ARGO による観測 (圧力座標、右軸) (Hosoda et al., 2008)。

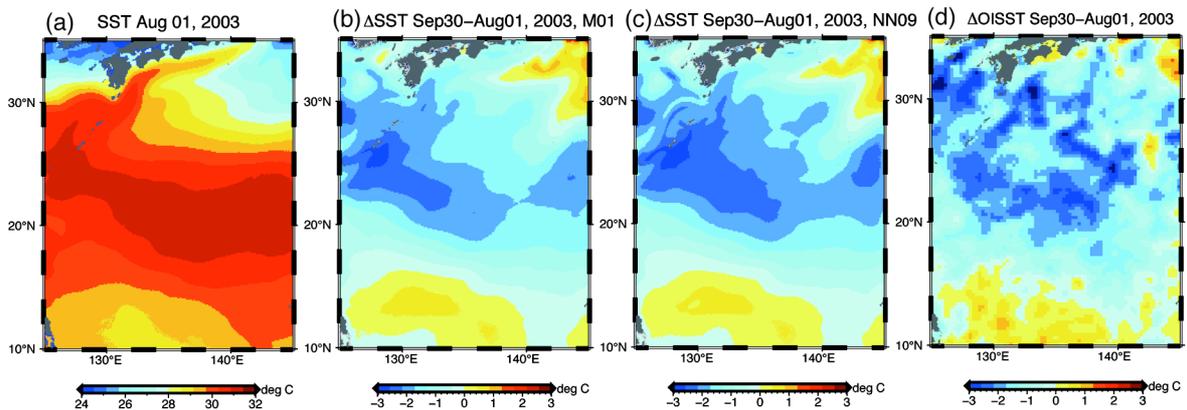


図 7。(a) 2003 年 8 月 1 日の海面水温分布。M01 を用いて 1 年間積分した結果。(b) M01 を用いて得られた 2003 年 8 月 1 日から 9 月 30 日の海面水温の変化。(c) NN09 を用いて得られた 2003 年 8 月 1 日から 9 月 30 日の海面水温の変化。(d) 衛星観測によって得られた 2003 年 8 月 1 日から 9 月 30 日の海面水温の変化。

5. 平成 23 年度の成果発表

<論文 (受理・印刷済み) >

- Endoh, T., H. Tsujino, and T. Hibiya (2011): The effect of Koshu Seamount on the formation of the Kuroshio large meander south of Japan, *Journal of Physical Oceanography*, 41, 9, 1624-1629, doi:10.1175/JPO-D-11-074.1.
- Niwa, Y., and T. Hibiya (2011): Estimation of internal tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations, *Journal of Oceanography*, 67, 493-502, doi: 10.1007/s10872-011-0052-1.
- Nagai, T., and T. Hibiya (2011): The Processes of semi-enclosed basin-ocean water exchange across a tidal mixing zone, *Journal of Oceanography*, 67, 533-539, doi:10.1007/s10872-011-0045-0.
- Iwamae, N., and T. Hibiya (2011): Numerical study of tide-induced mixing over rough bathymetry in the abyssal ocean, *Journal of Oceanography* 68:195-203, DOI 10.1007/s10872-001-0088-2, 2011
- Furuichi, N., T. Hibiya, and Y. Niwa (2011): Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using a large eddy simulation model, *Journal of Oceanography*, 68 285-294, DOI.10.1007/s10872-011-0095-3, 2011

<論文 (投稿中) >

特になし

<学会発表等>

- 日比谷 紀之 (2011): 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 22 年度成果発表会, 一橋記念講堂, 千代田区, 東京, 平成 23 年 2 月 21 日.
- 永井 平, 日比谷 紀之(2011):潮汐混合域をはさむ閉鎖性海域と外海との海水交換過程に関する数値的研究, 102, 2011 年度日本海洋学会春季大会, 東京大学柏キャンパス, 柏, 千葉, 平成 23 年 3 月 23 日.
- 横田 華奈子, 日比谷 紀之: ファインスケールのシア/ストレインの同時観測から求めた乱流ホットスポット周辺海域での内部波構造の空間依存性, 105, 2011 年度日本海洋学会春季大会, 東京大学柏キャンパス, 柏, 千葉, 平成 23 年 3 月 23 日.
- 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する内部潮汐波エネルギーの見積もり, 106, 2011 年度日本海洋学会春季大会, 東京大学柏キャンパス, 柏, 千葉, 平成 23 年 3 月 23 日
- 古市 尚基, 丹羽 淑博, 日比谷 紀之 (2011): 風起源の近慣性振動に関する LES とその結果に基づく海洋混合層モデルの有効性の検証, 108, 2011 年度日本海洋学会春季大会, 東京大学, 柏, 東京, 2011 年 3 月 24 日.
- 渡辺 路生, 日比谷 紀之 (2011): 海洋大循環モデルに組み込んだ海洋混合層モデルのパフォーマンスチェック, 109, 2011 年度日本海洋学会春季大会, 東京大学, 柏, 東京, 2011 年 3 月 24 日.
- 古市 尚基, 日比谷 紀之, 丹羽 淑博(2011): 風起源の近慣性振動に関する LES とその結果に基づく海洋混合層モデルの有効性の検証, AAS022-13, 日本地球惑星科学連合 2011 年度大会, 幕張メッセ, 千葉市, 千葉, 2011 年 5 月 25 日.
- Tanaka, Y., T. Hibiya, and Y. Niwa (2011): Assessment of the effect of tidal mixing in the Kuril straits on the formation of the North Pacific Intermediate Water, #2608, 2011 International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia., June 29, 2011.
- Furuichi, N., T. Hibiya, and Y. Niwa (2011): Model-predicted distribution of wind-induced internal wave energy in the world's oceans, #5441, 2011 International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia, June 28, 2011.

- Furuichi, N., T. Hibiya, and Y. Niwa (2011): Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using large eddy simulations, #5442, 2011 International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia, June 28, 2011.
- Hibiya, T., Y. Sugiyama, Y. Niwa (2011): Numerically reproduced internal wave spectra in the deep ocean, #5575, 2011 International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia, June 28, 2011.
- Hibiya, T. (2011): Assessment of fine-scale parameterization of diapycnal diffusivity near mixing hotspots, #5576, 2011 International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia, June 29, 2011.
- Hibiya, T. (2011): Theoretical and observational studies of the distribution of diapycnal diffusivity in the world's deep oceans, Distinguished Lecture in the Ocean Sciences Section at the 8th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan, August 10, 2011.
- 丹羽 淑博, 日比谷 紀之 (2011): 全球数値シミュレーションに基づく内部潮汐波エネルギー転嫁率の見積もりとその水平格子間隔依存性について, 101, 2011年度日本海洋学会秋季大会, 九州大学, 春日, 福岡, 2011年9月27日.
- 古市 尚基, 日比谷 紀之, 丹羽 淑博(2011): Large Eddy Simulationに基づく海洋混合層モデルの有効性の検証, 153, 2011年度日本海洋学会秋季大会, 九州大学, 春日, 福岡, 2011年9月29日.
- 渡辺 路生, 日比谷 紀之 (2011): 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, 154, 2011年度日本海洋学会秋季大会, 九州大学, 春日, 福岡, 2011年9月29日.
- 星野 陽介, 日比谷 紀之 (2011): 海峡を通じた二層交換流の調節過程に関する数値的考察, 163, 2011年度日本海洋学会秋季大会, 九州大学, 春日, 福岡, 2011年9月29日.
- 西村 誠次, 松野 健, 千手 智晴, 堤 英輔, 日比谷 紀之, 長澤 真樹, 佐々木 俊次 (2011): 日本海底層における一様層の形成・維持過程, 246, 2011年度日本海洋学会秋季大会, 九州大学, 春日, 福岡, 2011年9月29日.
- 日比谷 紀之 (2011): Assessment of fine-scale parameterization of diapycnal diffusivity near mixing hotspots, 研究会「海洋乱流の観測およびモデリング研究」, 九州大学応用力学研究所, 春日, 福岡, 2011年11月22日.
- 古市 尚基 (2011): Large Eddy Simulationに基づく海洋混合層モデルの有効性の検証, 研究会「海洋乱流の観測およびモデリング研究」, 九州大学応用力学研究所, 春日, 福岡, 2011年11月22日.
- Niwa, Y., and T. Hibiya (2012): Estimation of baroclinic tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations, 10173, 2012 Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City, Utah, U.S.A., February 20, 2012.

<アウトリーチ活動>

- 日比谷 紀之 (2011): 理学の匠: 超深海乱流計 VMP-5500, 東京大学理学系研究科・理学部ニュース, 42巻, 10, 2011.