

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340140

研究課題名(和文) LES乱流計算と微細構造観測による海洋乱流過程の解明

研究課題名(英文) Research on ocean turbulence process from LES simulation and turbulence microstructure observation

研究代表者

和方 吉信(WAKATA, YOSHINOBU)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：90201871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円、(間接経費) 4,470,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、新しい乱流観測手法を開発し、東シナ海に於いて乱流観測を実施し、並行して乱流の並列数値計算からその再現と解析を行ったものである。2011年度の観測では、乱流微細構造プロファイラーを用いエネルギー散逸率と、5ビーム超音波ドップラー式多層流向流速計を用い潮汐流を観測した。また、2013年の観測では、高周波数での計測が可能となる装置を新たに導入し、レイノルズ応力を計測し潮汐の半日周潮に伴うレイノルズ応力の周期的変動を見いだした。LESを用いた乱流の数値計算では、2011年の観測結果から初期値と潮汐の外力を推定し乱流計算を行い、潮汐振動流とそれに伴う乱流の主な特性の再現に成功した。

研究成果の概要(英文)：The present study developed a new observation method of turbulence and carried out the observation in the East China Sea, and concurrently those observational results were simulated and analyzed by using the parallel large eddy simulation model (LES). The energy dissipation rates were obtained from the turbulence microstructure profiler and tidal currents were from 5 beam acoustic Doppler current profiler (ADCP) in 2011. Furthermore, the Reynolds stresses were observed using the improved ADCP with high frequency beam in 2013, and the semi-diurnal change of Reynolds stress owing to the tidally oscillated flow was found. LES simulation succeeded to reproduce the main properties of tidal flows and the turbulence from the initial condition and the external forcing estimated from the observational data in 2011.

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学

キーワード：海洋乱流 潮汐 ADCP 乱流微細構造プロファイラー LES レイノルズ応力 エネルギー散逸率 東シナ海

### 1. 研究開始当初の背景

海洋の乱流混合過程は、海洋物理学においてまだ良く理解されていない分野である。海洋大循環モデルを用いた海洋循環や気候変動の研究では、この過程をパラメータとして取り入れ、モデルのチューニングとして用いられているが、その物理過程自体よく分かってはいない。そこで、最新の乱流微細構造プロファイラーと超音波ドップラー式多層流向流速計(ADCP)による観測と、乱流渦を直接解くことができる Large Eddy Simulation (LES)モデルを併用することにより、海底近傍の乱流混合過程を解明しようというものである。

### 2. 研究の目的

本研究は、海底近くにおいて潮流により生じた乱流を、最先端の5ビーム ADCP や乱流微細構造プロファイラーを用い現場観測を実施し、併せて、LES による乱流数値計算を行い、乱流境界層の時間変動、鉛直混合過程、境界層内物質輸送過程を解明することを目的とする。更に、種々の成層や海底粗度の状況を想定した LES 計算結果を擬似観測データとして利用し、気候変動のモデル予測に不確定要素を与えている乱流混合のパラメタリゼーションを改善することにより、気候変動解明への貢献を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究は、次の三つの方法により遂行する。  
 (1) 海底設置5ビーム ADCP と乱流微細構造プロファイラーによる乱流の直接観測を東シナ海に於いて実施する。  
 (2) 観測条件に対応した LES 乱流計算の実施と、海底粗度、成層などに関する感度実験を行う。  
 (3) これらの結果を踏まえて乱流パラメタリゼーションの再検討と新スキームを開発し、海洋大循環モデルに組み込みその効果を検証する。

### 4. 研究成果

東シナ海に於いて、海底に設置した5ビーム ADCP流速計と乱流微細構造プロファイラーによる海底近傍乱流観測を行い、また LES による乱流計算や海洋大循環モデル計算より、乱流に拘わる幾つかの新しい知見を得ることができた。以下、具体的にそれらを記述する。

#### (1) 潮流とそれに拘わる乱流構造の観測と解析

東シナ海において、2010年、2011年、2013年の夏季に通算3回、潮流と乱流場の観測を実施した。2011年の観測結果を図1に示す。半日周期の潮流振動流(a, b)を観測できた。海底近くで流速が急に小さくなっており海底境界層の鉛直構造をよく捉えている。これは、LES乱流計算結果の評価に良い指標にも

なる。(c)は鉛直成層を(d)はエネルギー散逸率を示す。潮流流が半日周期で振動しているのに対し、これらは不思議なことに1日周期で変動していた。これらの観測結果は、後述する境界層の乱流構造解析や境界層の時間変動のメカニズムを考えるのに貴重なデータとなった。

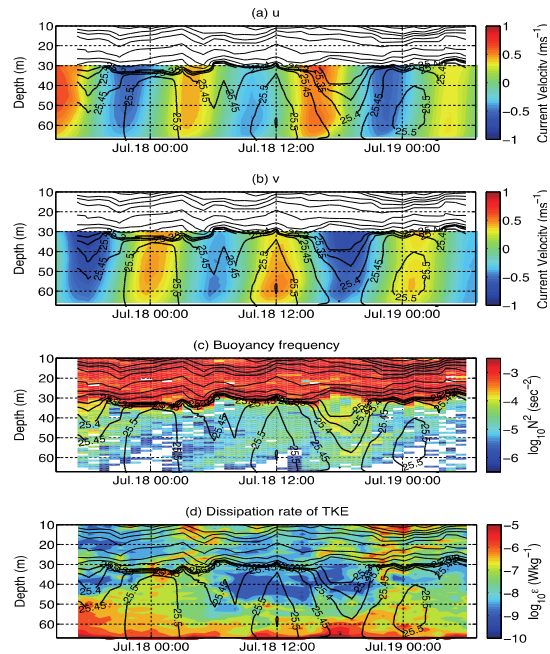


図1 乱流観測データ、潮流流 (a:東西、b 南北)、(b)浮力振動数、(d)乱流エネルギー消散率

#### (2) エクマン螺旋構造から渦粘性係数を推定

図1の流速のホドグラフを描くと、海底に向かって流向が変化し螺旋構造を描く。これは鉛直渦粘性による影響の結果である。乱流の直接観測によらず、この流速鉛直プロファイルから、鉛直渦粘性係数の最適値を最小2乗法から推定する手法を開発し、渦粘性係数の鉛直分布を求める事に成功した。

#### (3) 乱流クロージャモデルの海洋大循環モデルへの適用 (大循環モデル研究)

海洋大循環モデルなどの場合、直接乱流を直接解く事は出来ず、パラメータ化して入れる事になる。最近、気象学の分野で開発されたNakanishi and Niinoモデルを海洋に適用して、そのモデルの有効性を評価した。台風通過に伴う海面水温低下の再現性の改善に有効であることが確かめられた。

#### (4) レイノルズ応力の推定

2010年と2011年の東シナ海の観測では、5ビームADCPを用いてレイノルズ応力の推定を試みたが、幾つかの技術的問題点が明らかになった。2013年の観測では、これまでの結果を踏まえ、3倍の高周波数での計測が可能となるハードウェアオプションを導入することにより単位時間あたりのピン発信数を

増やした。その結果ノイズが激減し、5ピームオプションの特性をフルに活かす事ができ、レイノルズ応力や乱流運動エネルギー収支の見積もりが可能となることを示した。

#### (5) 海底境界層への非慣用コリオリカの影響 (LESによる研究)

地球は球体であるため、地球の自転ベクトルは鉛直上方を向いていない。しかし、多くの海洋モデルでは、この鉛直上方ベクトルのみしか考慮していない(慣用コリオリカ)。しかし、海底近くの乱流は3次元的な構造をしており、自転ベクトルの水平成分も重要となる(非慣用コリオリカ)。この効果は、乱流発達に異方性をもたらすので、海底近傍の流れの向きにより乱流境界層の厚さが変わる可能性がある。そこで、LESモデルを用い、8方位の海底近傍の流れに対して、海底境界層の厚さを求めた(図2)。その結果、西向きに流れる海流の境界層は、東向きに流れる流れより、2倍の厚さになる事が示された。

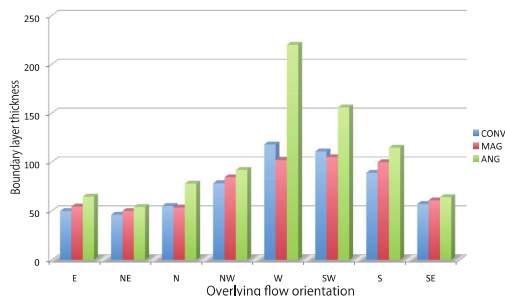


図2 各方位に対する海底混合層の厚さ

#### (6) 潮汐振動流の非慣用コリオリカの影響 (LESによる研究)

東シナ海のように、平坦な海底で浅海の海域に見られる潮汐流の海底近傍の特性について考察した。海底近傍における潮汐流のホドグラフの楕円形状特性を、理論とLES数値モデルの計算から調べた。潮汐振動解の海底近傍極限解を求め、地球の自転速度と潮流の回転速度から、潮流楕円の長軸方向と扁平率の鉛直方向の変化特性を普遍的に説明できた。そしてLES数値計算からその妥当性も検証した。また、LES数値計算結果の解析から、非慣用コリオリカの影響により東シナ海では、日周潮は潮流が西を向くとき、半日周潮は潮流が北を向くとき、海底近傍で乱流が活発に発達することがわかった。

#### (7) SIPSメカニズムの解明

東シナ海において潮流は半日で変動しているのに対して、乱流エネルギー散逸率は1日周期で変動している(図1)。この流速には、振幅は小さいが1日周期の潮汐成分が含まれている。長江から流出する低塩分水を一日に一度運び込み、海洋の成層変化をもたらす乱流の1日周期変動を誘導していることが

分かった(SIPSメカニズム)。このメカニズムは、一般に河口域でよく観測されるが、東シナ海のような広域な陸棚上でも有効に働くことを示した。

#### (8) LESによるSIPSメカニズムの再現

2011年に観測した流速や温度、塩分を初期値として、半日周潮と日周潮の潮汐駆動力でLESモデルを駆動した(図3)。潮汐流や温度、塩分、乱流散逸率のモデル計算結果と観測結果を比較することにより、LESの有効性を確認した。また、塩分の水平移流を考慮すると乱流の1日変動が出現したが、考慮しなければ再現できなかった。つまり、モデル計算からSIPSメカニズムの妥当性を検証できた。

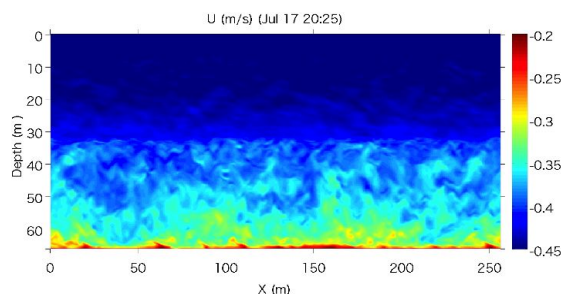


図3 2011年7月17日20:25 東西流速の東西断面図

#### まとめ

本研究の主目的であったレイノルズ応力の観測法の開発は、東シナ海での3度の観測からその問題点に分かり改良を行った結果、一往の方法を確立することができた。LESの研究から、このレイノルズ応力は非慣用コリオリカの影響を受け、鉛直渦粘性係数にも方向依存性があらわれることが分かった。またLESの数値計算と観測の比較から、LESは乱流研究に非常に有効な技術であることが示された。今後は、SIPSメカニズム解明で成功したように、観測とLESを併用することにより、乱流に拘わる諸現象の解明に役立てて行きたいと考える。

#### 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11件)

Wakata, Y: Some properties of tidal currents estimated analytical and LES simulation studies, Journal of Oceanography, 査読あり, 69, 2013, 237-751.  
DOI:10.1007/s10872-013-0204-6

Yoshikawa, Y: Tidal and low-frequency currents along the CL line (31 deg 45 min N) over the East China Sea Shelf.

Continental Shelf Research, 査読あり,  
2012, 41-53.

DOI: 10.1016/j.csr.2012.10.007

Wakata, Y.: Dependence of seafloor boundary layer thickness on the overlying flow direction: a large eddy simulation study. Journal of Oceanography, 査読あり, 2011, 67, 667-673.

DOI:10.1007/s10872-011-0068-6

Yoshikawa, Y., T. Endoh, T. Matsuno, T. Wagawa, E. Tsutsumi, H. Yoshimura and Y. Morii: Turbulent bottom Ekman boundary layer measured over a continental shelf, Geophysical Research Letters, 査読あり, 2010, DOI:10.1029/2010GL044156

[学会発表](計 28 件)

Endoh, T., Y. Yoshikawa, T. Matsuno, K. Yufu and Y. Wakata, Estimating Reynolds stress from ADCP measurements in the bottom boundary layer over the continental shelf of the East China Sea. 2014 Ocean Sciences Meeting, 2014.2.26, Hawaii, USA.

Wakata, Y., T. Endoh, Y. Yoshikawa, Tidal oscillations in the east China Sea simulated by LES. 2014 Ocean Sciences Meeting, 2014.2.27, Hawaii, USA.

Endoh, T., T. Matsuno, Y. Yoshikawa, and J. Ishizaka, Measurements of vertical turbulent fluxes of nitrate and chlorophyll-a into the surface mixed layer, The 5th international symposium on the East Asian environmental problems, 2011.11.14, Fukuoka, Japan.

Wakata, Y. Large eddy simulation of benthic boundary layer under a tidally oscillating flow, International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly, 2011,6,30, Melbourne, Australia.

Endoh, T., T. Matsuno, and Y. Yoshikawa, Fine-scale vertical shear of horizontal velocity estimated using an accelerometer mounted on the TurboMAP. Workshop on the vertical processes in the shelf region of the East China Sea, 2011.02.22, Fukuoka, Japan.

[図書](計 1 件)

和方吉信: ENSO の理論, 日本気象学会, エルニーニョ・南方振動(ENSO)研究の現在, 2013, 21-34.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和方 吉信 (WAKATA Yoshinobu)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号: 90201871

(2) 研究分担者

尹 宗煥 (YOON Jong-hwan)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号: 80111459  
(定年のため平成 22 年から平成 24 年まで)

吉川 裕 (YOSHIKAWA Yutaka)  
京都大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 40346854

遠藤 貴洋 (ENDHO Takahiro)  
九州大学・応用力学研究所・学術研究員  
研究者番号: 10422362

吉村 浩 (YOSHIMURA Hiroshi)  
長崎大学・水産学部・教授  
研究者番号: 40108353  
(定年のため平成 22 年から平成 24 年まで)

(3) 連携研究者

青島 隆 (AOSHOMA Takashi)  
長崎大学・水産学部・准教授  
研究者番号: 40244040

山脇 信博 (YAMAWAKI Nobuhiro)  
長崎大学・水産学部・准教授  
研究者番号: 50295101

木下 宰 (KINOSHITA Tsukasa)  
長崎大学・水産学部・助教  
研究者番号: 40452859

内田 淳 (UCHIDA Jun)  
長崎大学・水産学部・助教  
研究者番号: 30548342

増田 章 (MASUDA Akira)  
九州大学・応用力学研究所・学術研究員  
研究者番号: 60091401

松野 健 (MATSUNO Takeshi)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号: 10209588

市川 香 (ICHIKAWA Kaoru)

九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号： 40263959