

令和元年6月18日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13879

研究課題名(和文) 海洋大循環における非線形性とノイズ外力のカップリング

研究課題名(英文) Nonlinear coupling of ocean circulation and forced noise

研究代表者

松浦 知徳 (Matsuura, Tomonori)

富山大学・大学院理工学研究部(都市デザイン学)・教授

研究者番号：10414400

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：海洋大循環において、非線形効果の重要性が、流れのパターンの分岐や長期変動の発生の観点から指摘されている。我々は、単純な海洋モデル(準地衡流の矩形の海)において風応力としてノイズを付加した場合、同期や確率共鳴が発生する可能性のあることを指摘した。非線形秩序形成が、北太平洋亜熱帯循環系において黒潮の大蛇行と非蛇行、また黒潮続流の安定と不安定な流れの長期変動や遷移の要因と成りえることを現実の海洋大循環数値実験によって明らかにした。さらに、黒潮-黒潮続流の強流が海底地形と相互作用をしたとき流れの不安定性が強まり、中規模擾乱の形成に大きな影響を与えていることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋における非線形系の秩序形成現象の役割を系統的に検討した研究は、我々のこれまでの一連の研究(Shimokawa and Matsuura, 2010; Shimokawa et al., 2014; Shimokawa and Matsuura, 2015)を除いてない。今回さらに、これを現実的な海洋大循環数値実験、観測データあるいは観測に準ずる同化データと比較し、非線形系の秩序形成現象の現実の海洋における存在と役割を明らかにした。この結果は、黒潮変動のメカニズムの解明に大きなブレークスルーを与えることができ、さらには、その将来予測にも資することができると思われる。

研究成果の概要(英文)：In the ocean general circulation, the importance of non-linear effects is pointed out from the viewpoint of branching of flow patterns and the occurrence of long-term fluctuations. We revealed that synchronization and stochastic resonance may occur when noise is added as wind stress in a simple ocean model (rectangular ocean with quasi-geostrophic flow). It has been clarified by real ocean general circulation numerical experiments that it can be a factor of long-term variation and transition of stable and unstable flow, and large-scale and non-meander of the Kuroshio and Kuroshio extension flows in the North Pacific subtropical circulation. Furthermore, it was shown that the baroclinic instability is enhanced by the influence of topography when the strong current of the Kuroshio-Kuroshio extension interacts with the bottom topography, and has a great influence on the formation of meso-scale disturbances.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海洋大循環シミュレーション 北太平洋亜熱帯循環 黒潮-黒潮続流反流 長周期変動 ダブルジャイヤ 引き込み現象 確率共鳴現象 惑星波

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 黒潮変動の研究は、日本近海域の気候変動や水産資源など人間活動に密接に関連した重要なテーマである。また学術的に、黒潮の大蛇行と非蛇行および黒潮続流域の長期変動は、海洋における非線形力学現象として、古くから強い興味を持たれてきた。前者は非線形力学の多重解として捉えられ、理論、室内実験、数値実験によって1980年代に活発に研究された。さらに、2000年代に入ると、高解像度海洋大循環モデル開発やそれを使ったデータ同化による予測手法の発展に伴って、両者は、大気海洋の数十年変動や海流の主流と渦の相互作用とも関連して研究が進展してきている。しかしながら、最新の Double Gyre（亜熱帯と亜寒帯の二つの循環）の非線形理論の進展に関わらず、現実の黒潮-黒潮続流の変動のメカニズムについて十分な理解は得られていない。そのため、予測精度向上への理論と現実との橋渡しをするアイデアが強く求められている。

(2) 理論的な進展として、強流域の非線形効果に伴う流れの分岐と長周期変動の発生が提案されている (Dijkstra, 2000; Matsuura and Fujita, 2007)。また、黒潮続流域には安定な流れと不安定な流れが長期で変動していることが分かっている (Qiu and Chen, 2010)。ところで、その遷移と長期変動を生み出す一つの要因として、非線形系における秩序形成現象がある。非線形性は、その初期値鋭敏性から、予測不可能性を導くものと捉えられがちであるが、一方で、ある種の秩序形成現象を導く。代表的なものとしては、複数の非線形振動子とその相互作用のために同期する引き込み現象や適度なノイズにより潜在的なシグナルが増幅され顕在化するという確率共鳴現象がある。これらの非線形系における秩序形成現象は、黒潮-黒潮続流変動（遷移と長周期変動の発生）の重要な要因になっている可能性がある (Shimokawa and Matsuura, 2010; Shimokawa et al., 2014)。しかし、これまでの研究においては、理論あるいは比較的単純なモデル（準地衡流モデル等）において、その可能性が指摘されているのみで、現実的な観測やデータ同化（客観解析データ）との比較などは十分ではない。

2. 研究の目的

海洋大循環において、非線形の効果の重要性が、流れのパターンの分岐や長期変動の発生の観点から指摘されている。実際の黒潮-黒潮続流の観測で大蛇行と非蛇行、また安定と不安定な流れの長期変動や遷移が捉えられており、それらのメカニズムの解明が予測にとって重要な課題である。我々は、単純な海洋モデル（準地衡流の矩形の海）において風応力としてノイズを付加した場合、同期や確率共鳴が発生する可能性のあることを指摘する。また、本研究では、風応力の強さ、海底地形の影響やノイズによる非線形秩序形成が、北太平洋亜熱帯循環系において黒潮-黒潮続流大蛇行と非蛇行、また安定と不安定な流れの長期変動や遷移の要因と成りえることを現実の海洋大循環数値実験と同化データや観測データの統計解析によって明らかにすることを研究目的とする。

3. 研究の方法

本研究では日本周辺の黒潮、黒潮続流を研究対象とし、①単純海洋モデルによる外力応答の数値実験と現象のメカニズムに対する解釈、②北太平洋海洋大循環モデルによる外力応答の数値実験と現象のメカニズムに対する解釈、③海洋大循環モデルにおける非線形効果から見た海底地形の影響、④現実の海洋における非線形系特有の秩序形成モデルの構築の4つのサブテーマの構成で研究を実施した。数値実験結果の解析には主成分分析（EOF解析）やエネルギーの収支解析を取り入れて推進した。研究の流れに示すように研究代表者（松浦）、研究分担者（下川）、及び大学院生（数値実験実行）で研究体制を組み、互いに得意とする研究手法や解析手法に従って、有機的に連携しながら本研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 単純海洋モデルによる外力応答の数値実験と現象のメカニズムの解明

北太平洋の海洋循環には、西岸境界流の安定した状態と不安定な状態、すなわち黒潮大蛇行と非蛇行の間の遷移などの様々な振動現象が存在する。これらの現象は、非線形海洋系でよく見られる同期や確率的共鳴などの非線形リズム現象に関連していると考えられている。同期化は、それらの非線形相互作用のために異なる周期を有する2つ以上の自律発振システムのリズムの調整

（例えば、周波数および、または位相ロック）である。確率的共鳴は、非線形システムに十分なノイズが加えられると、潜在的な信号の一部が閾値を超えることがある現象である。これらを実際の信号として検出することができる。第一の成果として、海洋ダブルジャイアの応答を、1.5層の準地衡流モデルを用いた風応力時間変動の違いに応じた風の影響を調べ、一般的な海洋循環におけるこれらの非線形現象の発生の可能性を検討した。

(2) 北太平洋亜熱帯循環系の海洋独自に発生する7~8年周期変動（図1参照）

海洋大循環モデルを用いて、風応力時間一定の下で82年間の長期シミュレーションを行ない、北太平洋亜熱帯の海洋独自に発生する長周期変動メカニズムの解明を試みた。その結果、亜熱帯循環域でのEOF解析から、空間モード1は黒潮続流の流軸の南北移動のモードで、空間モード2と3は亜熱帯循環域内を7~8年の長周期をもって西方へ伝播する傾圧第1ロスビー波のモードであることが示された。後者のモードの周期現象について相関関係を調べたところ、北太平洋亜熱帯循

環および黒潮再循環と黒潮続流再循環の強さはすべて7~8年のスペクトルピークを持ち、互いにラグ相関関係のあることがわかった。この長周期変動は、北太平洋亜熱帯循環における海洋独自に発生する自律的な現象であり、その周期現象が現実にも起こっていることが示唆された。

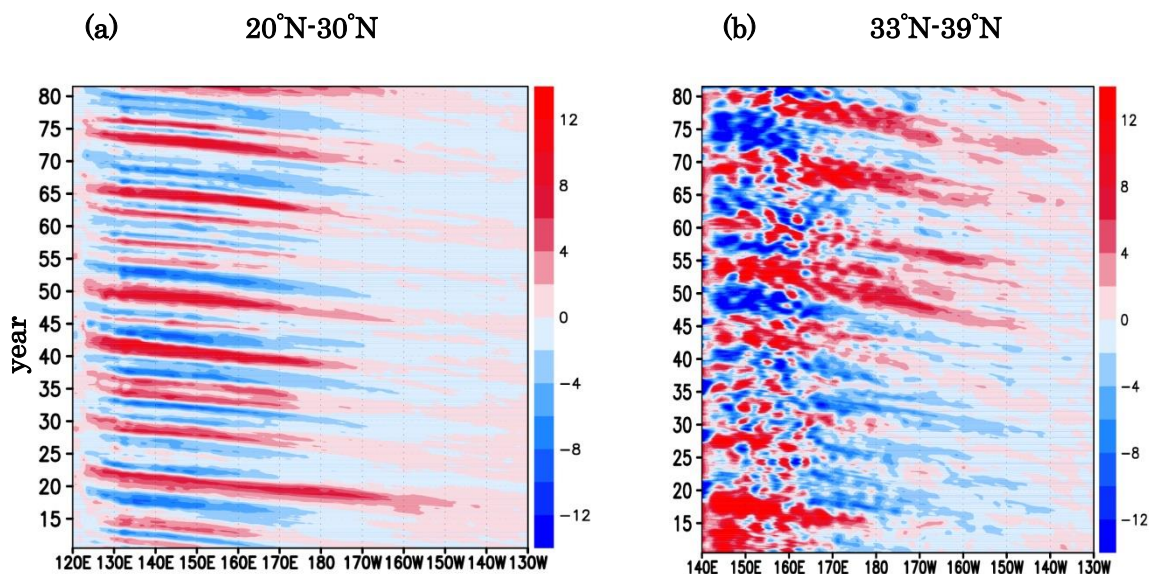


図1. 海面高度偏差の x-t 図。図 a は 33°N-39°N で平均した海面高度偏差を示し、図 b は 20°N-30°N で平均した海面高度偏差を示す。カラーマップは海面高度偏差 (cm) を示す。横軸は経度であり、縦軸は時間 (year) である。月平均海面高度場から 10.08 年 (121 ヶ月) から 82.00 年 (984 ヶ月) の平均海面高度引いた値を 1 年移動平均したものが海面高度偏差である。

(3) 北太平洋海洋大循環モデルによる外力応答の数値実験と現象メカニズムの解明

高解像度北太平洋大循環数値シミュレーションを風応力の強さを① 現実の気候値の強さ、② 0.8倍の強さ、③ 1.2倍の強さの3種類の実験を実施した。その結果、1980年代に集中して行われた流入・流出モデルの結果と同様に、現実に近い設定のモデルでも流量と黒潮蛇行の関係が非線形力学系における解の分岐理論で説明可能なことが示された。

(4) 二層海洋における強流域の非線形的挙動

現実の海洋における非線形系特有の秩序形成現象との関係の解明として、2層浅水近似方程式の数値実験結果を参考に、海盆全域で積分した上層と下層の運動エネルギー、および有効ポテンシャルエネルギーの3変数に対する3つの非線形常微分方程式からなるエネルギー収支モデルを作成した。この方程式系は、カタストロフィ理論で知られている楔形カタストロフィーの挙動を示し、黒潮の大蛇行と非蛇行の二様性の理論モデルとして利用できる可能性が示された。

(5) 強流域に与える海底地形 (海山・海嶺) の影響と中規模擾乱の発生 (図2参照)

海底地形の存在による主流の変動やそれに伴う中規模擾乱の発生を調べるための3層準地衡流渦位方程式に基づく渦解像 QG モデル (Hogg et al., 2010) を用い、海底地形を変えた4ケースのシミュレーションを行った。ケース1には地形を与えず、ケース2には円錐型の地形 (円形海山; 以下 cone)、ケース3には半円筒型の地形 (南北海嶺; 以下 kamaboko)、ケース4にはその両方の地形 (円形海山+南北海嶺; 以下 Kamacone) を与えた。各ケースに共通して、北太平洋域に対応するダブルジャイヤの海域 (東西 10,000 km, 南北 5,000 km) に、現実を模擬した東西風応力を与え、数値シミュレーションを行った。得られた結果 (瞬間の圧力等) からは、平均場 (時間平均) に見られる流れ (平均流) と長寿命の渦 (定在的な渦) を差し引き、擾乱場 (瞬間) にしか見られない短寿命の乱れ (中規模擾乱) を分離して解析した。更に、中規模擾乱の量の時系列変動に関しては、東西強流域と地形周辺の2種類の領域に絞って調べた。その結果、地形の影響で流れが乱され、層間の界面高度の変化が増して位置エネルギーが大きくなった。すなわち、傾圧不安定が強化されている可能性が示唆された。このことは、大きくなった位置エネルギーは運動エネルギーとして解放され (傾圧不安定の解消)、中規模擾乱が発達するというメカニズムが考えられる。この地形による流れの変化の仕方や傾圧不安定の強化の程度は、地形の形状や配置、組み合わせで変わり、海底地形が中規模擾乱の発生に重要な役割を果たしていることが分かった。

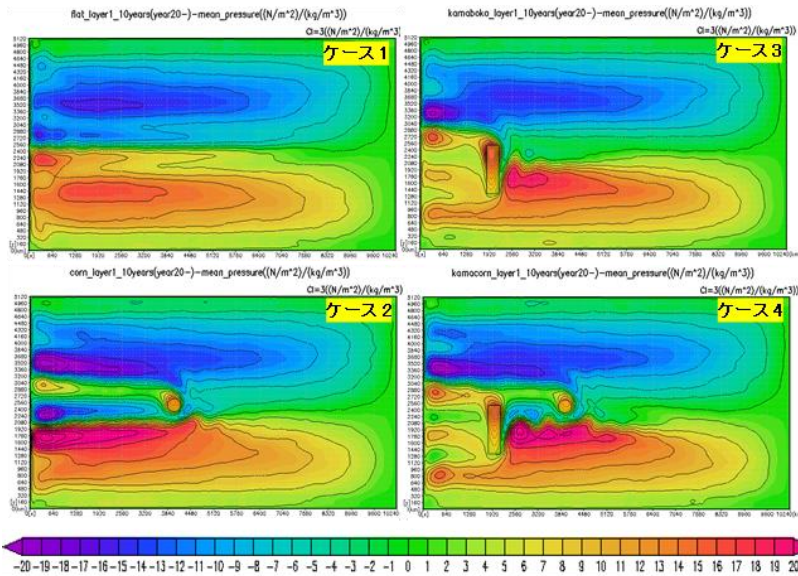


図2：4ケースに対する1層目の圧力の10年平均値 $\bar{p}_1(10)$ (地形の図を重ねた)

<引用文献>

- ① Dijkstra, D. H., 2000, Nonlinear Physical Oceanography: A Dynamical Systems Approach to the Large Scale Ocean Circulation and El Nino. Kluwer Academic Publishers, 480pp.
- ② Matsuura, T. and Fujita, T., 2006, Two different aperiodic phase of wind-driven ocean circulation in a double gyre, two-layer shallow water model. J. Phys. Oceanogr. 36, 1268-1291.
- ③ Shimokawa, S. and Matsuura, T., 2010, Chaotic Behaviors in the Response of Q-G Oceanic Double-Gyre to Seasonal External Forcing, J. Phys. Oceanogr., 40, 1458-1472.
- ④ Shimokawa, S., Shiratori, K. and Matsuura, T., 2014, Responses of Oceanic Double-Gyre to External Wind Forcing with Noise, Theor. Appl. Mech. Jpn., 62, 49-57.
- ⑤ Shimokawa, S and T. Matsuura, 2015, Stochastic synchronization in an oceanic double gyre, Theor. Appl. Mech. Jpn., 63, 99-107.
- ⑥ Hogg, A., Dewar, W. K., Killworth, P. D., and Bulundell, J. R. 2003, A quasi-geostrophic coupled model: Q-GCM. Mon. Wea. Rev., 131(10), 2261-2278.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8件)

- ① Shimokawa, S., and Matsuura, T. Stochastic chaos excitation and stochastic synchronization in an ocean double gyre, Theoretical and Applied Mathematics Japan, 査読有、Vol. 64, 2018, pp. 15-22
- ② 松浦 知徳, 長谷 美波, 村上 智一, 下川 信也, 川崎 浩司, 寄り回り波の海底地形変化に伴う波浪変形特性、土木学会論文集B3 (海洋開発)、査読有、74(2)巻、2018, pp. 1-6
- ③ 白鳥健太, 山田優貴, 松浦知徳, 北太平洋亜熱帯循環系の海洋独自に発生する7~8年周期変動、海の研究、27(2), 査読有、2018, pp. 97-123
- ④ Shimokawa, S. Murakami, T. Kohno, H. and Mizutani, A. Transport properties of soil particles in Sakiyamawan-Amitoriwan nature conservation area. Irinoomote Island, Japan, Geoscience Letters, 査読有、2017, pp1-11
DOI: 10.1186/s40562-017-0084-5
- ⑤ 太田俊紀, 松浦知徳, 村上智一, 下川信也, 地形効果による寄り回り波の波浪特性、土木学会 土木学会論文集 B3(海洋開発), 特集号、査読有、72(2)巻、2016、pp. 43-1-6
- ⑥ 大橋充佳, 松浦知徳, 黒田雄斗, 千葉元、乱流混合過程を含む生態系モデルによる富山湾クロロフィルaの鉛直分布の変動解明、土木学会論文集B2 (海岸工学)、査読有、72(2)巻、2016、pp. 1393-1398
- ⑦ 西村悠希, 松浦知徳, ALOS-2/PALSAR-2衛星画像を用いた波浪の空間挙動の推定、土木学会論文集B2(海岸工学)、査読有、72(2)巻、2016、pp. 169-174
- ⑧ Shimokawa, S., and Matsuura, T. Oceanic Oscillation Phenomena: Relationship with Synchronization and Stochastic Resonance, NOVA science publishers Geophysics: Principles, Applications and Emerging Technologies, 査読有, Vol. 1, 2016, pp.123-135.

[学会発表] (計 16件)

- ① 加瀬有里, 松浦知徳, 海底地形による海洋大循環の制御と中規模擾乱の発生、日本地球惑星科学連合2019年大会(JpGU2019)、2019、幕張
- ② 下川信也, 松浦知徳, 非線形系特有のリズム現象と海洋大循環、日本地球惑星科学連合2019年大会(JpGU2019)、2019、幕張

- ③ 加瀬有里、松浦知徳、強流域に与える海底地形（海山・海嶺）の影響と中規模渦の発生、地球流体力学研究集会、2019
- ④ 松浦知徳、下川信也、二層海洋における強流域の非線形的挙動、第64回理論応用力学会、2017
- ⑤ 下川信也、松浦知徳、海洋ダブルジャイヤにおけるカオス励起と確率同期現象、第64回理論応用力学会、2017
- ⑥ 松浦知徳、山口昴、回転成層乱流としての日本海中規模渦分布の特徴、第1回富山湾研究会、2017、富山市
- ⑦ 黒田雄斗、松浦知徳、中田聡史、富山湾クロロフィルa濃度分布の水平パターン、第1回富山湾研究会、2017、富山市
- ⑧ 黒田雄斗、松浦知徳、生態系を対象とした移流反応拡散方程式系のパターン形成、地球流体力学研究集会、2017、柏市
- ⑨ Kuroda, Y and Matsuura, T, Two dimensional pattern formation of phytoplankton using ecosystem model, Japan Geoscience Union MEETING 2016 (国際学会), 2016, Makuhari
- ⑩ 太田俊紀、松浦知徳、村上智一、下川信也、地形効果による寄り回り波の波浪特性、第41回海洋開発シンポジウム、2016、浜松市
- ⑪ 西村悠希、松浦知徳、ALOS-2/PALSAR-2衛星画像を用いた波浪の空間挙動の推定 - 日本海側海域の比較解析をもとに、2016、鹿児島市
- ⑫ 黒田雄斗、松浦知徳、河川からの栄養塩流入を仮定した生態系モデルによる2次元パターンの形成、2016年度日本海洋学会秋季大会、2016、鹿児島市
- ⑬ 大橋充佳、松浦知徳、黒田雄斗、千葉元、乱流混合過程を含む生態系モデルによる富山湾クロロフィルaの鉛直分布の変動解明、第63回海岸工学講演会、2016、大阪市
- ⑭ 西村悠希、松浦知徳、ALOS-2/PALSAR-2衛星画像を用いた波浪の空間挙動の推定、第63回海岸工学講演会、2016、大阪市
- ⑮ Shimokawa, S. and Matsuura, T, Oceanic oscillation phenomena related synchronization and stochastic resonance, 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (国際学会), 2016, Montreal
- ⑯ 山田優貴、白鳥健太、松浦知徳、高海面高度の伝播に伴う黒潮流路変動の原因解明 II - 風応力場強さの依存性 -、2016年度日本海洋学会秋季大会、2016、鹿児島市

[図書] (計 1 件)

- ① Murakami, T, Shimokawa, S., and Ogasawara, T, Numerical analysis of changes in ocean currents and density structures in Miyako Bay, Japan, Before and after the Great East Japan Earthquake, Coastal Management: Global Challenges & Innovations (edited by R.R. Krishnamurthy, M.P. Jonathan, S. Srinivasalu, and B. Glaeser eds. Elsevier, pp. 14, 2018

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年：
 国内外の別：

[その他]

ホームページ等
 なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：下川 信也

ローマ字氏名：(SHIMOKAWA, sinya)

所属研究機関名：国立研究開発法人防災科学研究所

部局名：観測・予測研究領域 水・土砂防災ユニット

職名：総括主任研究員

研究者番号 (8桁)：40360367

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。