

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800269

研究課題名(和文)四次元変分法データ同化手法を用いた海洋十年規模変動の実態解明に関する研究

研究課題名(英文) Study of decadal to multi-decadal variability in ocean by using 4-dimensional variational data assimilation method

研究代表者

長船 哲史 (OSAFUNE, Satoshi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・技術研究員

研究者番号：50638723

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：四次元変分法海洋データ同化システムおよびそのプロダクトである長期海洋環境再現データセットを活用し、北太平洋中高緯度における長周期海洋変動の実態解明および、そのメカニズムや気候への影響等の理解を進めた。気候変動研究におけるデータセットの有用性を検証し、太平洋十年規模振動(PDO)に伴う亜表層水温変動とモード水形成変動の関連を示唆したほか、同化システムを用いた数値実験を通じて、潮汐18.6年振動に伴う鉛直混合変動によるPDOへの寄与を明らかにした。これらは、気候形成における中高緯度海洋の重要性の理解につながる知見である。

研究成果の概要(英文)：By using a state-of-the-art four-dimensional variational data assimilation system, and a long-term ocean state estimation data set produced by the system, I investigated long-term ocean variability in the mid-to-high-latitude North Pacific, its underlying mechanisms, and its influence on climate. I evaluated the applicability of the data set for climate research, and suggested that the subsurface signal of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) is related to the variation in formation of mode waters. In addition, I conducted a comparative numerical experiment using the system, and showed that the 18.6-year modulation of the localized strong tidal mixing can significantly contribute to the sea surface temperature anomalies related to PDO. These results leads to better understanding of the importance of the mid-to-high-latitude ocean in climate system.

研究分野：海洋物理

キーワード：北太平洋 長期変動 データ同化 太平洋十年規模振動 潮汐18.6年振動

1. 研究開始当初の背景

(1) 気圧場・海面水温など、大気海洋の様々な現象に、十年から数十年の周期性を持った長期変動(以下、十年規模変動)が存在する(e.g. Mantua and Hare, 2002)。北太平洋の中高緯度域では、特に約 20 年周期の変動(以下、20 年変動)が顕著である(e.g. Minobe et al., 2002)。この周期帯の変動は、降水や気温のほか、水産資源量の変動等にも表れていることから、その変動メカニズムを理解することは、社会的にも非常に重要である。

(2) こうした十年規模変動のメカニズムについては、様々な仮説が提案されているが、大気海洋結合システムの振動現象であるという考え方は広く受け入れられており、現象の時間スケールを決めるうえで、海洋が重要な役割を果たすと考えられている(e.g. Latif and Barnett, 1994)。そうした仮説の多くが、海洋垂表層における変動の重要性を示唆しているが、垂表層における観測データは、時間的にも空間的にも限られている為、海洋垂表層変動の実態は十分には解明されていない。

(3) 気候の十年規模変動の原因として、大気海洋システムに対し、外から加わる外力の影響も考えられる。十年規模の周期的な外力の一つとして、月の軌道変化に伴う潮汐力の 18.6 年周期変動(以下潮汐 18.6 年振動)が挙げられる(Loder and Garrett, 1978)。Yasuda et al. (2006)は、千島列島周辺等に局在する非常に強い潮汐鉛直混合が、潮汐 18.6 年振動に伴って変動することで、海洋や気候の大規模な 20 年変動を引き起こしているとの仮説を提案した。この仮説を支持する結果は得られつつあるものの、実証には至っていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、近年実用化が進んだ海洋データ同化システムにより得られた長期海洋環境再現データセットを用いて、主に北太平洋における十年規模海洋変動の実態を把握するとともに、その変動メカニズム等の理解を目指す。

(2) データ同化システムを用いた数値実験等を通じて、潮汐 18.6 年振動に伴う鉛直混合変動が、現実に観測されている変動に対してどの程度の寄与を持ちうるのかを診断するとともに、大規模な海洋・気候変動との関連について考察する。

(3) これらを通じて、主に亜寒帯海洋の重要性に着目しつつ、北太平洋における十年規模海洋・気候変動に関する知見の増進および精緻化を目指す。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者は、所属機関における本務として、四次元変分法海洋データ同化システムを用いた長期海洋環境再現データセット(Estimated State of global Ocean for Climate research: ESTOC)の作成に従事している。四次元変分法は、観測と数値モデルの長所を統計学に基づき融合する高度なマッピング手法であり、数値モデルに用いられる力学方程式を満たしつつ、様々な観測データと整合性の高い四次元変動場が得られる。この手法を用いて、数十年に渡る長期の環境再現を行えるデータ同化システムは、世界的に見ても稀有であり、このシステムを用いた十年規模変動の研究は先駆的なものである。

(2) 上述のように、四次元変分法は非常に有効なツールであるが、ベースとなる数値モデルの表現力を超えた現象は適切に再現する事が出来ないなどの問題点もある。そこで、本研究では、データ同化を行う前のシミュレーション結果である初期推定場や、観測データとの比較を通じて、ESTOC による再現性を検証し、十年規模変動研究における ESTOC の有用性を確認するとともに、観測データのみからは推定が難しかった長期変動の空間構造や、その変動メカニズム等の推定も行った。

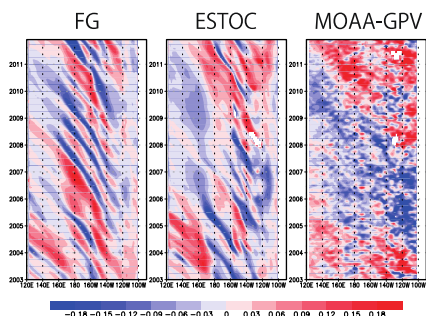
(3) ESTOC は、数値モデルに用いられる初期値および外力を修正(最適化)する事で得られた数値実験の結果である。本研究では、この数値モデルに対して潮汐 18.6 年振動に伴う潮汐鉛直混合変動の効果を組み込み、ESTOC と同じ初期値と外力を用いて駆動する数値実験を行った。さらに、潮汐 18.6 年振動を考慮した数値モデルを用いて対照同化実験を行った。

(4) 四次元変分法では、随伴モデルを用いて、観測と数値モデルの差の原因を、過去に遡って修正している。この随伴モデルを応用した感度実験により、海洋構造の形成・変動メカニズムを推定する事が出来る(e.g. Fukumori et al., 2004; Masuda et al., 2010)。本研究では、この先端的な数値実験を適用し、潮汐 18.6 年振動によって生じた表層貯熱量変動のメカニズムを探った。

4. 研究成果

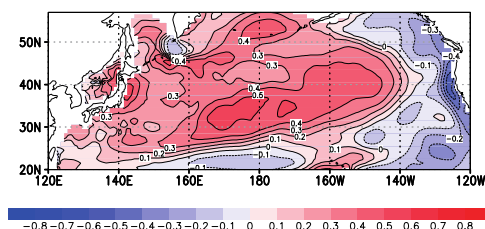
(1) 北太平洋を中心に、様々な深度における数年から数十年規模の水温・塩分の変動を例に、ESTOC における海洋環境変動の再現性を、多角的に検証した。これにより、ESTOC が、広範な海域における十年規模変動を含む海洋環境変動をよく再現しており(図 1)、気候変動研究にとって有用なデータセットである事を示した。この成果は、国内外にお

ける、ESTOC を活用した気候変動研究の促進につながるかと期待される。



(図1) 北緯17度に沿った24.0等密度面上の水温偏差。初期推定場(FG)では季節変動が卓越していたのに対し、ESTOCでは、観測データ(MOAA-GPV)で見られた十年規模の変動をよく再現している。

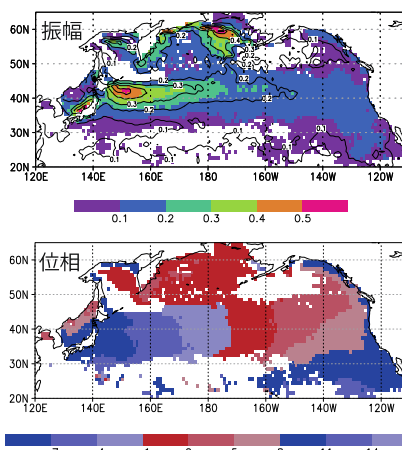
(2) さらに、北太平洋中高緯度域における支配的な気候変動モードの一つとして知られる太平洋十年規模振動(Pacific Decadal Oscillation: PDO)に着目してより詳細な解析を行った。ESTOCは、PDOに伴う亜表層における水温変動を適切に再現しており、その変動が北太平洋中央部において冬季の表層混合層過程を通じて形成されるモード水と呼ばれる水塊と関連している事を示した(図2)。これは、PDOに関連した表層貯熱量変動の実態解明につながる知見である。



(図2) ESTOCの200m深における月水温偏差の、PDO指標に対するの相関係数。モード水分布域に対応して、北東-南西方向に相関の高い帯状構造が存在している。

現在、大気変動との関連を含めて、海洋亜表層変動の形成・伝播メカニズムについても解析を進めている。モード水を介した亜表層への水温変動シグナルの伝播は、大気海洋結合システムの長周期変動を制御するメカニズムの一つとして注目されてきたが、その効果を通じた影響について、観測データに基づいた評価は十分になされていない。したがって、観測データを反映したデータ同化プロダクトを元にその影響を評価する事は、気候システムの理解を進めるうえで大きな意義がある。

(3) ESTOCをベースにした数値実験では、潮汐18.6年振動に伴う鉛直混合変動を考慮した結果、PDOの空間構造に改善が見られた。これは、18.6年周期の海面水温偏差が、亜熱帯・亜寒帯循環境界付近を日本沿岸から東方にゆっくりと伝播した結果であった(図3)。この水温偏差は、東部太平洋に位置するPDOの変動中心付近において観測されている海面水温の20年変動に有意に寄与していた。水温偏差の東方伝播を通じた遠隔的な影響自体は、先行研究により示唆されていたが(Osafune and Yasuda, 2013)、現実の20年変動への寄与が確かめられた事は大きな成果である。



(図3) 鉛直混合変動により生じた18.6年周期海面水温変動の振幅および位相。

鉛直混合変動を考慮したモデルを用いた対照同化実験からは、鉛直混合変動によって生じた東部太平洋における海面水温偏差が、偏西風の20年変動によって強化されていた事を示唆する結果が得られた。東方伝播したPDO変動中心付近における水温偏差が、大気変動に影響を与えているかどうかは現時点では不明であるが、これらの結果は、潮汐18.6年振動が、中緯度大気海洋結合変動モードを制御する事で、PDOに約20年の周期性を生じさせている可能性を示唆している。

海洋内部構造の変動に着目した解析も行った。水温変動は、密度・流速構造の変動を伴って東方伝播していた。さらに、随伴モデルを用いた感度実験等により、水温偏差の東方伝播は、単なる水温偏差の移流では説明出来ず、鉛直混合変動によって生じる密度構造変化に対する海洋の力学応答である海洋波動の伝播が重要な役割を果たしている事を示した。今後、この知見を活かすことで、観測データや気候モデルを用いて、海洋の力学応答の重要性を検証していきたい。

(5) 以上により、「北太平洋における十年規模海洋・気候変動に関する知見の増進および精緻化」という当課題の目的を達成するこ

とが出来たと考えている。潮汐 18.6 年振動に伴う波動伝播による密度構造の変動は、モード水形成にも影響を及ぼす可能性が考えられる。今後、(2) で示した研究を継続し、PDO に伴うモード水の変動と、それを通じた気候への影響の理解を進めることで、PDO に関わる水温変動の増幅メカニズムの理解が進めば、潮汐 18.6 年振動による PDO への影響の理解の深化にもつながる可能性がある。

(6) 本研究では、亜表層水塊の再現性向上に資する同化システムの新たなコンポーネントの開発も行った。本研究期間中には、これを用いた同化プロダクトの作成までは行えなかったが、予備同化実験を通じて、中層水の再現性向上等に対する有効性を確かめる事が出来た。その他にも、データセットの再現性検証の過程で得られたシステムの特長に関する知見等は、現行のデータ同化システムの改良や、次世代のデータ同化システムの開発にも活かされると考えられる。

参考文献：

- Fukumori, I., T. Leem, B. Cheng, and D. Menemenlis (2004), The origin, pathway, and destination of Niño-3 water estimated by a simulated passive tracer and its adjoint, *J. Phy. Oceanogr.*, 34, 582-604, doi: 10.1175/2515.1.
- Latif, M., and T. P. Barnett (1994), Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America, *Science*, 266, 634-637.
- Loder, J. W., and C. Garrett (1978), The 18.6 year cycle of sea surface temperature in shallow seas due to variations in tidal mixing, *J. Geophys. Res.*, 83(C4), 1967-1970.
- Mantua, N. J., and S. R. Hare (2002), The Pacific decadal oscillation, *J. Oceanogr.*, 58, 1, 35-44.
- Masuda, S., et al. (2010), Simulated rapid warming of abyssal North Pacific waters, *Science*, 329(5989), 319-322.
- Minobe, S., T. Manabe, and A. Shouji (2002), Maximal wavelet filter and its application to bi-decadal oscillation over the Northern Hemisphere through the twentieth century, *J. Clim.*, 15, 1064-1075.
- Osafune, S., and I. Yasuda (2013), Remote impacts of the 18.6 year period modulation of localized tidal mixing in the North Pacific, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 3128-3137, doi:10.1002/jgrc.20230.
- Yasuda, I., S. Osafune, and H. Tatebe (2006), Possible explanation linking 18.6-year period nodal tidal cycle with bi-decadal variations of ocean and climate in the North Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:10.1029/2006GL025237.

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2件)

- Satoshi Osafune, Shuhei Masuda, Nozomi Sugiura, and Toshimasa Doi, Evaluation of the applicability of the Estimated State of the Global Ocean for Climate Research (ESTOC) data set, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 42, 2015, 4903-4911, doi:10.1002/2015GL064538
- Satoshi Osafune, Shuhei Masuda, and Nozomi Sugiura, Role of the oceanic bridge in linking the 18.6-year modulation of tidal mixing and long-term SST change in the North Pacific, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 41, 2014, 7284-7290, doi:10.1002/2014GL061737

[学会発表](計5件)

- Satoshi Osafune, Shuhei Masuda, Nozomi Sugiura, and Toshimasa Doi, Subsurface structure of the Pacific Decadal Oscillation and its relation to the mode waters, Ocean Science Meeting 2016, 2016年2月23日, New Orleans, USA
- 長船 哲史, 増田 周平, 杉浦 望実, 四次元変分法海洋環境再現データセット ESTOC を用いた海洋表層中層研究, 東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター研究集会, 2014年8月26日, 城山中央公民館(岩手県上閉伊郡大槌町)
- 長船 哲史, 増田 周平, 杉浦 望実, 四次元変分法海洋環境再現データセット ESTOC を用いた海洋表層中層研究, 第18回データ同化夏の学校, 2014年8月21日, JAMSTEC むつ研究所(青森県むつ市)
- 長船 哲史, 増田 周平, 杉浦 望実, 四次元変分法海洋データ同化システムを用いた潮汐 18.6 年振動による北太平洋海面水温変動への影響評価 2, 日本海洋学会秋季大会, 2013年9月18日, 北海道大学(北海道札幌市)
- Satoshi Osafune, Shuhei Masuda, and Nozomi Sugiura, Assessing impact of the 18.6-year period nodal tidal cycle on PDO using a 4D-VAR data assimilation system, the IAHS-IAPSO-IASPEI Joint Assembly, 2013年7月23日, Gothenburg, Sweden

[その他]

ホームページ等

<http://ebcrpa.jamstec.go.jp/rcgc/j/rr/201506estoc.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

長船 哲史 (OSAFUNE, Satoshi)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球
環境観測研究開発センター・技術研究員
研究者番号：50638723

(2)協力研究者

増田 周平 (MASUDA, Shuhei)
杉浦 望実 (SUGIURA, Nozomi)
土居 知将 (DOI, Toshimasa)