

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740361

研究課題名(和文)四次元変分法海洋全層データ同化システムを用いた深層昇温の力学に関する研究

研究課題名(英文) Dynamics of bottom-water warming by using a full-depth four-dimensional variational ocean data assimilation system

研究代表者

増田 周平 (MASUDA, Shuhei)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・チームリーダー

研究者番号：30358767

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：大西洋、インド洋での深層昇温が数十年の時間スケールでは主に南極周極流海域の中層の海況変動に起源をもっていることが示唆され、太平洋よりもより長期の気候変動現象、大気との熱・淡水交換に深いかわりを持つ、あるいは運動量の交換がより本質的である可能性が高いことを示した。これは海洋の熱バランス(熱の再配分)と海洋深層の海洋環境変動との関係のみならず、循環場変動と熱バランスの変化との関係を理解する上でも重要な知見となりうる。

また、貯熱量変化のモニタリングに関する新たな知見を得たことも海洋観測研究の推進にとって大きな意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：I here focus on the bottom-water warming revealed in abyssal ocean over the world. I use a supercomputer simulation to show that the bottom-water warming in the South Atlantic and South Indian Oceans can be traced back to the changes in subsurface temperature and velocity around the Antarctic Circumpolar Circulation region within the period of 50 years. This implies that the bottom-water warming possibly related to changes in the surface heat and freshwater fluxes occurred more than 50 years or changes in the surface momentum fluxes. This finding may be a key factor to reveal the mechanism of changes in the ocean heat budget, the changes in the abyssal water properties. Further, optimal observing system design for monitoring variations of the ocean heat content is another achievement.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：海洋物理 データ同化 気候変動

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽から地球に供給される熱は赤道域から極域に向けて南北方向に輸送されることで地球の温暖な気候を形成している。海洋による熱輸送量は大気によるそれと拮抗しており、南北熱輸送総量の約半分を担う重要な要素である。IPCC 報告などでも言及されているように海洋の貯熱量の変化を正確に把握し、そのメカニズムを解明することで将来の予測精度を向上させることは気候変動研究にとって喫緊の課題である (IPCC 4th assessment report, 2007)。

(2) そのような背景から各海盆で高精度の海洋観測が実施されてきた。その成果として 1985 年と 1999 年に北太平洋の北緯 47 度に沿った海盆横断観測では北太平洋の底層水が 15 年間でおよそ 0.005°C 昇温していたという事実が 2004 年に明らかになった (Fukasawa et al., 2004; 図 1)。その後、大西洋・インド洋でも北太平洋と同規模の底層や深層における昇温が続々と確認されている (Johnson and Doney, 2006; Meredith et al., 2008)。海洋は大気に比べおよそ 1,000 倍の熱容量があり、例えば非常に小さい水温の変化といえども地球全体の熱の配分、さらには気候の変化に大きく影響することが知られている。したがって、地球環境変動を正しく理解する上でこれらの水温上昇は無視できない新たな要素として世界中の研究者から注目されている。しかしながら、海洋最深部では高精度観測が困難であるゆえにデータが少なく、このような昇温の原因、また、気候変動との関係については推測の域をでていなかった。

(3) 海洋には時空間スケールの異なる多くの変動があり、スナップショットの観測結果を単純に集めただけでは、気候学的に意味のある正しい論理を展開することは難しいが、Masuda et al. (2010) は北太平洋における底層

昇温に焦点をあて、あらたな解析手法として注目されはじめてきたデータ同化手法を応用した四次元変分法全層海洋データ統合システムを用いて実際の海洋観測データから海洋環境再現データを作成し、その気候学的力学場を用いた感度解析実験を行うことで、変動の起源となる海域・気候変動現象をはじめ定量的に同定するとともにその時間スケール・メカニズムを明らかにした。これまで、百年程度の気候変動の研究では、海洋深層での貯熱量変化にほとんど注意が払われていなかったが、Masuda et al. (2010) では北太平洋底層の昇温が短時間 (約 40 年) で起源海域である南極アデリー海岸沖での大気海洋間の熱交換の変化にリンクしていることを示唆しており、海洋深層に対する十分な考慮が必要であることを示している。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は底層の昇温が確認されている他海盆 (大西洋、インド洋) で四次元変分法同化システムを用いた感度解析実験を行い各々の海盆における変動の起源海域・時間スケール・引き金となる変動現象を解明するとともに、最近 50 年の全球海洋貯熱量変化に対する深層昇温の影響を定量的に評価することである。

(2) 本研究の独創的な点は (独) 海洋研究開発機構において世界に先駆けて開発された四次元変分法海洋全層同化システムを用いることで観測データを反映したより現実的な力学場を活用して研究を進めることであり、手法としては世界最速レベルを維持する超並列大型計算機 (アースシミュレーター) を用いた感度解析シミュレーション実験を行うところが特色である。また、このシステムを用いた感度解析シミュレーションは多岐にわたる物理量 (水温・塩分・流速および海面フラックス) の底層昇温に対する感度

を包括的に調べることができるため、これを活用して昇温現象の原因をモデル方程式に則って力学的解析し、観測された昇温のメカニズムを解明することができる。

(3) さらに、インド洋・大西洋海盆での底層昇温現象のメカニズムを解明することで海洋全層の貯熱量変化のうち、これまでほとんど考慮されることのなかった深層の寄与についての知見を得ることも本研究の目的の一つである。これにより長期の気候変動現象に深いかわりを持つことが知られている海洋全層の熱バランスに対する海洋深層の役割を明らかにすることができる。

3. 研究の方法

(1) 本研究では大西洋・インド洋で観測された海洋底層の水温上昇がどのようにして引き起こされたのかを調べるために、四次元変分法全層海洋データ同化システムを用いた感度解析シミュレーション実験を超並列大型計算機(アースシミュレータ)上で行う。各海盆で得られた底層昇温のメカニズムおよび、その原因となる海面条件の変化などに関する知見を得、北太平洋での変動の結果と比較しつつ、データ解析によって全球全層の貯熱量変化に対する各海盆深層が担う寄与について定量的に評価する。

(2) 感度実験は四次元変分法海洋データ同化システムのアジョイント計算コンポーネントを用いて気候変動現象の感度解析シミュレーションを行う(例えばMasuda et al., 2006)。感度解析シミュレーションとは数値モデル計算で再現される海洋(あるいは大気)の状態がどの物理場(例えば、水温場、塩分場、海面熱交換場)の変化にどの程度依存しているかを求める数値シミュレーションで、四次元変分法全層海洋データ同化システムでは数値モデルの物理過程に従いながら時間軸を遡っ

て数値積分を実行するという追跡機能を活かすことでその依存性を包括的に評価することができる。具体的にはインド洋、大西洋で観測された底層昇温地点に水温上昇のシグナルを与え、50年間の感度解析シミュレーションをアースシミュレータ上で行う。

(3) 感度解析シミュレーションから得られた各物理変数に対するアジョイント変数を定量的に評価することで、インド洋、大西洋での底層昇温がどのような時間スケールでいかなる大気場の変動によってどのような力学過程を経て生じたものかを調べる。

(4) さらに本研究で用いる四次元変分法全層海洋データ同化システムからすでに得られている海洋環境統合データセット(Masuda et al., 2009; 2010)を併用し、各海盆における底層昇温が全球的な貯熱量変化にどのような寄与を持っているかを、過去50年間にわたって評価し、その変動と底層昇温のメカニズムの関係、特に各海盆での昇温を引き起こす海面での気候変動現象(熱交換)との関係を定量的に調べる。これにより、全地球的な熱フローの解明に大きく貢献することができる。

4. 研究成果

(1) 図1は南大西洋の深層昇温が観測された18°S、30°Wの海域の水温上昇に対する感度の分布である。水温感度は30年間の積分でドレーク海況を通過して南大洋の太平洋セクターに貫入する。これは南極周極流(以下ACC)の移流効果で感度のある海域が広がっているためである。その後50年間の積分で感度のある海域はACCの移流効果でインド洋セクターにまで広がる一方、波動の働きにより赤道太平洋中層に広がっていく。北太平洋のケース(Masuda et al., 2010)と異なり、局地的な海域の海面まで到達するシグナルは見られず、ここでの昇温が主に循環

場の変動により引き起こされている可能性を示唆している。

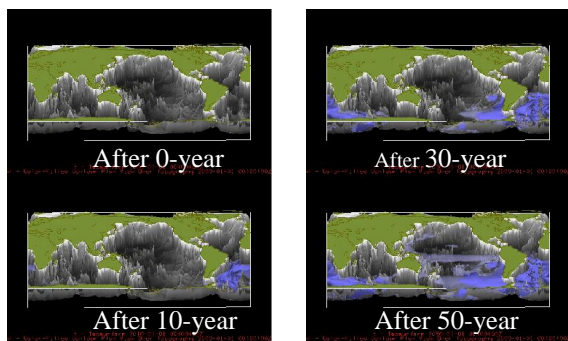


図1：南大西洋の深層昇温に対するアジョイント感度実験の結果。3次元コンターは0、10、30、および50年積分の水温感度を示す。

(2) 図2は南インド洋の深層昇温が観測された40°S、130°Eの海域の水温上昇に対する感度の分布である。水温感度は50年間の積分でインド洋中層全域に広がっており、一部は北太平洋のケースと同様の経路でアデリー海岸沖の海面にまで達している。また、ACC中層にシグナルがみられる点は南大西洋のケースと類似しているが、定量的には低い感度を示している。

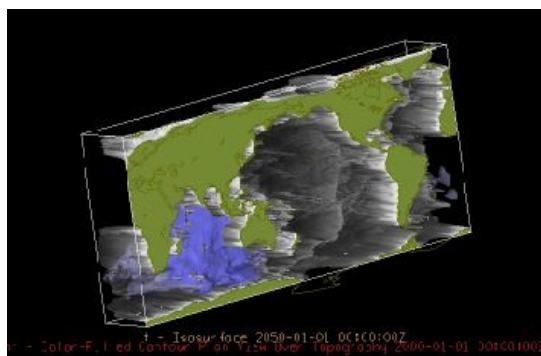


図2：南インド洋の深層昇温に対するアジョイント感度実験の結果。50年積分の水温感度を示す。

(3) これらの結果から、海面での熱・淡水フラックス変化との比較的早い時間スケールでのリンクは北太平洋が最も顕著で、南大西洋では直接的な影響は50年以上の時間ス

ケールを擁することが示唆された。また、運動量フラックスとの比較的早いリンクの可能性は残されており、大西洋の循環場の再現性の検証や、観測データに基づいたACC変動との関連の詳細な解析とともに今後の課題である。

(4) これらの感度解析実験結果を踏まえ、海洋環境再現データセットを用いて3次元的な海洋昇温の貯熱量変化に対する寄与を新たな感度解析実験で評価した(図3)。海盆スケールの貯熱量の変動に関しては、数十年の時間スケールでみると中深層は表層に比べ変動の振幅が小さいが、その時間スケールは長い。ここでは水温の変化に対する貯熱量の感度が中深層でどの程度の値を持つかを定量的に示した(Masuda and Hosoda, 2014)。

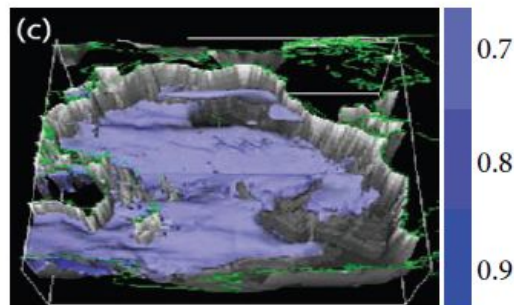


図3：太平洋海盆の貯熱量変化に対するアジョイント感度実験の結果。50年積分の水温感度を示す(Masuda and Hosoda, 2014)。

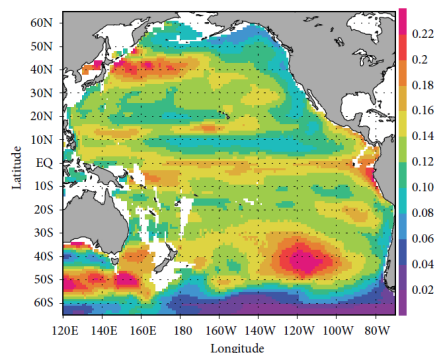


図4：太平洋海盆の貯熱量変化に対する2000m以浅、10年間の感度から見積もった効率的なモニタリング海域の分布(Masuda and Hosoda, 2014)。

(5) さらに、海盆スケールの貯熱量変化に対する各層の水温変化の寄与を感度解析結果から評価した結果、中長期の貯熱量モニタリングにどのような海洋表層観測システムが効率的かについても提言することができた(図4; Masuda and Hosoda, 2014)。

(6) 本研究の結果は、大西洋、インド洋の深層昇温は数十年の時間スケールでは南極周極流海域の中層の海況変動により引き起こされる可能性を示しており、北太平洋に比べより時間スケールの長い大気との熱・淡水交換とかかわりを持つ可能性があることを示唆している。これは海洋の熱バランス(熱の再配分)と海洋深層の海洋環境変動との関係のみならず、循環場変動と熱バランスの変化との関係を理解する上でも重要な知見となりうる。

(7) 参考文献:

- M. Fukasawa et al., *Nature*, **427**, 825, (2004).
G. C. Johnson and S. C. Doney, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, 14, (2006)
S. Masuda and S. Hosoda, *TSWJ*, **2014**, 340518, (2014)
S. Masuda et al., *Geophys. Res. Lett.*, **33**, 24, (2006).
S. Masuda et al., *J. Geophys. Res.*, **114**, C03015, (2009).
S. Masuda et al., *Science*, **329**, 319, (2010).
M. P. Meredith et al., *J. Clim.*, **21**, 2237, (2008)

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3件)

Masuda, Shuhei, Shigeki Hosoda, Effective Design of Profiling Float Network for Oceanic Heat-content Monitoring, *The Scientific World Journal*, 査読有, vol. 2014, 2014, Article ID 340518, 1-6,

doi:10.1155/2014/340518.

Sugiura, Nozomi., Shuhei Masuda, Yosuke Fujii, Masafumi Kamachi, Yoichi Ishikawa, Toshiyuki Awaji, A Framework for Interpreting Regularized State Estimation, *Mon. Wea. Rev.*, 査読有, 142, 2014, 386-400, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-12-00231.1>

Sciller, Andreas, Lee Tong, Shuhei Masuda, *Methods and Applications of Ocean Synthesis in Climate Research, Ocean Circulation & Climate -A 21st century perspective*, *International Geophysics*, 査読有, **103**, 2013, 581-601, ed. Gerold Siedler, Stephen M. Griffies, John Gould, John A. Church, Elsevier, Academic Press, doi:10.1016/B978-0-12-391851-2.00022-2 (書籍)

[学会発表](計4件)

増田周平, 杉浦望実, 土居知将, 長船哲史, 石川洋一, 福田和代, 四次元変分法データ統合システムを用いた海洋環境再現, 日本海洋学会 2014 年春季大会, 2014 年 3 月 29 日, 東京海洋大学、東京都(口頭発表)

Masuda, Shuhei, Toshimasa Doi, Satoshi Osafune, and Nozomi Sugiura, IMPROVED OCEAN STATE ESTIMATION BY USING A 4 DIMENSIONAL VARIATIONAL APPROACH, The 2014 Ocean Sciences Meeting, 2014 年 2 月 24 日, Hawaii Convention Center, Honolulu, Hawaii, U.S.A. (口頭発表)
増田周平, 石川洋一, 杉浦望実, 若

松 剛, 気候変動研究のための変分法を用いた高解像度海洋環境再現の展望, 2013 年度日本海洋学会春季大会, 2013 年 3 月 25 日, 東京海洋大学, 東京都 (口頭発表)

Masuda, Shuhei, Toshiyuki Awaji, Nozomi Sugiura, Yoichi Ishikawa, Takeshi Kawano, Oceanic teleconnection between the Southern Ocean and other basins, The 10th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 2012 年 4 月 23 日, Numea, New Caledonia, (口頭発表)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.godac.jamstec.go.jp/estoc/j/top/>

本研究で実施した感度解析実験の背景場に必要なためにも作成したデータセットであり、研究内容と深い関連性がある。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 周平 (MASUDA, Shuhei)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
変動領域・チームリーダー

研究者番号：30358767