
4次元海洋データ同化モデルによる全太平洋の
再解析データの作成と熱・物質輸送解析

(課題番号 14340141)

平成14年度～平成16年度 科学研究費補助金
(基盤研究(B)(2))
研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 淡路 敏之
(京都大学大学院理学研究科・教授)

4次元海洋データ同化モデルによる全太平洋の
再解析データの作成と熱・物質輸送解析

(課題番号 14340141)

平成14年度～平成16年度科学研究費補助金
(基盤研究(B)(2))
研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 淡路 敏之
(京都大学大学院理学研究科・教授)

目 次

研究成果の概要	1
研究組織	3
研究経費	3
研究発表	3
研究成果	
• State estimation of the North Pacific Ocean by a four-dimensional variational data assimilation experiment	7
• Improved estimates of the dynamical state of the North Pacific Ocean from a 4 dimensional variational data assimilation	21
• Preconditioning of winter mixed layer in the formation of North Pacific eastern subtropical mode water	25
• Tidal mixing in the Kuril straits and its impact on ventilation in the North Pacific Ocean	31
• Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A three-dimensional nonhydrostatic model experiment	45
• Enhanced ventilation in the Okhotsk Sea through tidal mixing at the Kuril Straits	67
• Effects of tidal mixing at the Kuril Straits on the North Pacific ventilation: Part 1. Freshening and dynamical adjustment of intermediate layers revealed from numerical experiments.	113
• Impact of tidal mixing at the Kuril Straits on the North Pacific ventilation: Part 2. An analytical model of ventilation due to diapycnal transport at western boundary.	161
• Application of sensitivity analysis using an adjoint model for short-range forecasts of the Kuroshio path south of Japan.	217
• Short-range forecast experiments of the Kuroshio path variabilities south of Japan using TOPEX/Poseidon altimetric data.	227

研究成果の概要

本研究の目的は、最適化理論を用いて観測データと数値モデルを統融合することにより、単独の手法の結果より高品質な時系列格子データを全物理量に対して作成できる先端的な四次元変分法データ同化システムを構築するとともに、1980年代後半以降の太平洋における状態推定が行える再解析データを作成して熱・物質循環の4次元定量解析と変動の力学を明らかにすることにある。具体的には、利用可能な現場観測データと衛星データを収集して品質検査を行った後アジョイント法を用いて海洋大循環モデルに同化し、時空間的に不均一な観測データから均質かつ力学・熱力学的に整合性のある統合再解析データセットを全球海洋で作成した。

まず初年度には、海洋大循環データ同化モデルの最適並列化と同化用入力データの収集・整備に関して、京都大学メディアセンターの大型計算機 VPP800 のリソースを最大限に活用した四次元変分法海洋大循環データ同化モデルの MPI 仕様最適並列化コードを開発して実験を行い、全球1度・鉛直34層の高分解能計算がCPU2時間で1年の実積分ができるまで演算性能を向上させた。これは従来の演算速度を2桁程度上回る。これにより全球四次元変分法による長期再解析が可能になった。同化用入力データについては、WOCE等の国際プロジェクトにより蓄積されたデータ等を米国等から入手し、購入したワークステーション等により品質管理等の整備を行って、入力ならびに検証用データセットの骨格部分を作成した。次に、気候学的季節変動場のデータ同化実験を全球海洋で行い、研究対象である太平洋に関して力学的推定を行った結果、従来の観測的知見と整合する黒潮や親潮等の主要海流の流量、亜熱帯や亜寒帯の内部循環構造、及びそれらの季節変化の再現に成功した。特に観測が困難な亜寒帯域の水塊構造を特徴付ける中冷・中暖構造の形成過程を再現しえたことは特筆できる。そして、再解析データを用いて海洋循環や気候システムの理解に重要な水・熱輸送量の試算を開始した。その際、ADCPデータの同化は外洋域では有効であるが沿岸域ではS/N比が大きいために、使用に耐えないことが判明した一方で、風応力等の海面フラックスデータ、内部領域の高度計データおよび水温・塩分データを複合同化すれば、シミュレーションモデルの精度を数倍高めることができることがわかった。これらの成果は、国内外の学会（SCOR国際会議（招待講演）、GODAE国際会議（仏）、神戸テクノオーシャン国際会議（日本））で発表し好評を得た。

研究開始2年目には、1990年代海洋再解析実験に必要な観測データセットの収集・整備を引き続き行うとともに、整備した時系列データセットを用いて90年代後半の再解析実験を先行的に実施し、97/98のエルニーニョ等に注目した熱・物質循環ルートの経年変動解析を行った。まず観測データの整備に関しては、歴史的海洋観測データに加えて、最新のARGO、TAO/TRITONデータ及びHydrobase2を収集・整備した。また、90年代再解析実験の駆動力として重要な大気フラックスデータに関しては、NCEP/BUFR及び東海大学OFURO等のデータベースを使用した。これにより入力データセットの収集・整備を完了して1996-2002年の海洋再解析実験を行った結果、例えば97/98のエルニーニョ変動に関して、ニーニョ3海域における海面水温の変動をrmsdにして0.69度以内で再現するなど、従来のシミュレー

ション結果の精度を2倍程度回る再解析実験に成功した。解析の結果、97/98のエルニーニョは recharge 及び advective mechanism のプロセスが複合して発生したことを突き止めた。さらに、北太平洋亜表層循環の指標である北太平洋中層水のバックワード解析（感度実験）を行い、亜表層の10年スケールの循環ルートと起源を特定した。

最終年度にあたる3年目には、(1)構築した1990年代全球海洋長期再解析データセットの品質調査、(2)四次元変分法再解析データセットによる太平洋の状態推定と熱・物質循環構造の評価、及び(3)逆解析による水塊起源の解析を行い、研究成果をまとめた。まず(1)に関しては、北太平洋表層構造を特徴づける亜寒帯域の中冷・中暖水、亜熱帯域を特徴づける各種の亜熱帯モード水、中層循環を特徴づける南北太平洋中層水の分布と季節・経年変動の現実的再現に成功するとともに、熱帯の経年変動を特徴づけるエルニーニョの詳細な時空間構造を、例えば1990年代 Nino3.4 海域での海面水温偏差を0.8以内で再現するなど、本データセットは現在国際的に流通しているどの再解析データセットよりも優れたものであることが分かった。これを用いて(2)に関する定量解析を行った結果、例えば推定した南北両太平洋におけるオーバーターンに伴う南北水・熱輸送量の時系列緯度別分布(18(40)度Nでの平均輸送量は約12(5)Sv)は観測的知見と概ね一致することを確認した。(3)に関しては、前年度に明らかにした中層水の起源とルートの詳細解析を行うとともに、亜寒帯域の代表的な水塊である中冷水の起源はアラスカ副循環と西部亜寒帯副循環の境界周辺で冬季にサブダクトとする混合水であり、一方その直下の中暖水は黒潮続流の季節的マイグレーションと連動した渦活動により切離した亜熱帯水が起源であることを突き止めた。また、亜熱帯表層の卓越水塊である3タイプのモード水の形成過程を明らかにした。中でもこれまで未解明であった東部亜熱帯モード水形成にかかわるプレコンディショニング機構をはじめとして解明することに成功した。さらに、北太平洋表層・中層循環理論に欠けていた西岸境界からの渦位供給効果を考慮した循環構造の統一的解釈に道を拓く新たな理論構築を行った。以上の再解析データセットを用いた経年変動研究のトピックとして、史上最大のエルニーニョであった97/98のエルニーニョ現象の力学メカニズムを調べた。具体的には、現状の最有力エルニーニョ理論である recharge-discharge 理論を対象に、赤道域(5N-5S)の南北流出入量による25度等温面以浅の暖水の変化と表層からの熱のインプットによる主温度躍層の変化の相関を見積もった結果、ENSO イベントが活発な時期(97-99年)には流出入による変化の1.2-1.7倍の振幅で暖水が変化していることがわかった。これは表層熱フラックスによる熱のインプットが主温度躍層の変化に影響を及ぼしうることを示しており、今後のエルニーニョ予測研究にとって重要な示唆を与えるものである。なお、エルニーニョ及びラニーニャ時のインドネシア通過流量を見積もったところ、約5Sv(1997年)から約20Sv(1995年)の範囲で変化するという結果を得た。

以上の成果は気候分野での重要な国際会議である CLIVAR 等にて招待講演を行うとともに、国際誌に発表・投稿した。従って、主に利用可能な計算機資源の問題から1980年代の再解析実験を実施できず一部積み残した課題はあるものの、当初に計画した研究目標は概ね良好に達成できたと考えられる。

研究組織

- 研究代表者：淡路 敏之（京都大学大学院理学研究科・教授）
研究分担者：根田 昌典（京都大学大学院理学研究科・助手）
研究分担者：石川 洋一（京都大学大学院理学研究科・助手）
研究分担者：深澤 理郎（海洋研究開発機構 地球観測フロンティア研究センター・プロジェクトリーダー）
研究協力者：中村 知裕（元京都大学大学院理学研究科・大学院生
現地球環境フロンティア研究センター・研究員）
研究協力者：豊田 隆寛（京都大学大学院理学研究科・大学院生）
研究協力者：四釜 康貴（京都大学大学院理学研究科・大学院生）
研究協力者：久保 怜子（京都大学大学院理学研究科・大学院生）

研究経費

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 14 年度	5,900	0	5,900
平成 15 年度	4,500	0	4,500
平成 16 年度	4,100	0	4,100
総計	14,500	0	14,500

研究発表

（1）学会誌等

- Nakamura T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji (2004): Effects of tidal mixing at the Kuril Straits on the North Pacific ventilation: Part 1. Freshening and dynamical adjustment of intermediate layers revealed from numerical experiments, submitted to J. Geophys. Res.
- Nakamura T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji (2004): Impact of tidal mixing at the Kuril Straits on the North Pacific ventilation: Part 2. An analytical model of ventilation due to diapycnal transport at western boundary, submitted to J. Geophys. Res.
- Toyoda, T., T. Awaji, Y. Ishikawa, and T. Nakamura : Preconditioning of winter mixed layer in the formation of North Pacific eastern subtropical mode water, Geophys. Res. Lett. 31, doi:10.1029/2004GL020677, 2004.
- Nakamura T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji: Enhanced ventilation in the Okhotsk Sea through tidal mixing at the Kuril Straits. submitted to Deep Sea Res., 2004.

- Nakamura, T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji: Tidal mixing in the Kuril Straits and its impact on the ventilation in the North Pacific Ocean. *J. Oceanogr.*, 60, 411-423, 2004.
- Nakamura, T. and T. Awaji: Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A three-dimensional nonhydrostatic model experiment, *J. Geophys. Res.*, 109, C9, C09S07 10. 1029/2003JC001850 01 July, 2004.
- Ishikawa, Y. T. Awaji, N. Komori, and T. Toyoda. Application of sensitivity analysis using an adjoint model for short-range forecast of the Kuroshio path south of Japan. *J. Oceanogr.*, 60, 293-301, 2004.
- 小守信正, 淡路敏之, 石川洋一, 増田周平, 杉浦望実: 日本南岸における黒潮変動予測のためのデータ同化手法の開発. *月刊海洋*(号外), No.37, 166-180, 2004.
- N. Sugiura, T. Awaji, K. Baba, S. Masuda, Q. Jiang, Y. Shen, J.D. Annan, S. Kitawaki: "Improving Computational Efficiency of 4D-VAR System for Global Ocean Circulation Study", *Parallel Computational Fluid Dynamics*, Elsevier, 87-92, 2003.
- N. Sugiura, S. Masuda, Y. Shen, J.D. Annan, T. Awaji, Y. Sasaki, Q. Jiang: "4D-Var Global Ocean Data Assimilation System on the Earth Simulator", *Realizing Teracomputing*, World Scientific Publishing, 66-73, 2003.
- Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, Y. Ishikawa, K. Baba, K. Horiuchi, and N. Komori: Improved estimates of the dynamical state of the North Pacific Ocean from a 4-dimensional variational data assimilation. *Geophys. Res. Lett.* 30, doi:10.1029/2003GRL017604, 2003.
- 中村知裕, 淡路敏之, 豊田隆寛, 石川洋一: 海洋大循環モデルに見られた沿岸親潮. *沿岸海洋研究*, 41, 13-22, 2003.
- 石川洋一, 淡路敏之, 豊田隆寛, 杉浦望実, 増田周平, 蔣勤, 小守信正: 海洋データ同化からみたバイデータの有効性, *海の研究*, 12, 321-322, 2003.
- Awaji, T., S. Masuda, Y. Ishikawa, N. Sugiura, T. Toyoda, and T. Nakamura: State estimation of the North Pacific Ocean by a four-dimensional variational data assimilation experiment, *J. Oceanogr.*, 59, 931-943, 2003.
- 淡路敏之, 石川洋一, 杉浦望実, 増田周平, 堀内一敏, 豊田隆寛, 小守信正, 中村知裕, 印貞治, 深澤理郎: 四次元変分法データ同化モデルによる北太平洋循環構造の推定, *月刊海洋*(号外), 32, 147-160, 2003.
- Komori, N., T. Awaji, Y. Ishikawa, and T. Kuragano (2003): Short-range forecast experiments of the Kuroshio path variabilities south of Japan using TOPEX/Poseidon altimetric data, *J. Geophys. Res.*, 108(C1), 3010, doi:10.1029/2001JC001282, 2003.
- 中村知裕, 豊田隆寛, 石川洋一, 根田昌典, 淡路敏之, 滝沢隆俊, 印貞治: クリル列島域における水塊形成/交換流のモデリング, *月刊海洋* 号外 No. 32, 168-182, 2003.

蒲地政文, 淡路敏之, 川村宏, 小守信正, 倉賀野連 : GODAE 計画概要と観測船の役割, 月刊海洋, 387, 624-636, 2002.

石川洋一, 淡路敏之, 豊田隆寛 : データ同化の最前線と生態系モデルへのインパクト, 水産海洋研究, 66, 1, 55-57, 2002.

(2) 口頭発表

豊田隆寛, 石川洋一, 淡路敏之 : 北太平洋東部亜熱帯モード水の形成過程, 2004 年度日本海洋学会春季大会, 2004.

淡路敏之, 石川洋一, 中村知裕, 豊田隆寛 : 数値モデリングによる海洋循環の状態推定, 京都大学学術情報メディアセンター研究開発部シンポジウム, 2003.

Annan James, T.Awaji, H.Igarashi, Q.Jiang, S.Masuda, Y.Y.Shen, and N.Sugiura : An ensemble Kalman filter for seasonal prediction, 2003 年度日本海洋学会春季大会, 2003.

増田周平, 淡路敏之, 杉浦望実, 石川洋一, 五十嵐弘道, 美山透, 堀内一敏, 佐々木祐二 : データ同化システムを用いた海洋循環についての研究 (2) —1990 年代を対象とした経年変動実験—, 2003 年度日本海洋学会秋季大会, 2003.

中村知裕, 淡路敏之 : 粗な海底での反射による、内部波の振動数空間における散乱, 2003 年度日本海洋学会春季大会, 2003.

淡路敏之, 小守信正, 石川洋一, 倉賀野連, 寄高博行 : 黒潮変動予測のためのデータ同化, 2003 年度日本海洋学会春季大会, 2003.

淡路敏之, 蔣勤 : フロンティアにおけるアルゴデータの同化, 2003 年度日本海洋学会春季大会 シンポジウム D, 2003.

Pierre De Mey, T.Awaji, M.J.Bell, A.F.Bennett, P.Brasseur, G.Evensen, K.Haines, I.Fukumori, O.M.Smedstad, D.Stammer, and A.Weaver : Approaches to Data Assimilation within GODAE, Proceedings of the international symposium "En route to GODAE", Biarritz, France, 2002.

Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, K. Baba, K. Horiuchi, Y. Ishikawa, Q. Jiang, Y. Y. Shen, J. D. Annan : An estimate of the circulation in the Pacific Ocean by 4D-VAR data assimilation. The international symposium "En route to GODAE", Biarritz, France, 2002.

Kamachi, M., T. Awaji, and F. Mitsudera : Japan-GODAE Network and North Pacific intercomparison, The international symposium "En Route to GODAE", 2002.

- Ishikawa, Y., T. Awaji, T. Topyoda, and N. Komori: Construction of a data assimilation system for ocean general circulations—Determination of weight parameters for the adjoint method, The international symposium “En Route to GODAE”, 245-246, 2002.
- Komori, N., T. Awaji, Y. Ishikawa, T. Kuragano, H. Yoritaka, and H. Kudo: Synergetic use of ADCP and altimetric data for short-range forecasts of the Kuroshio variations south of Japan, The international symposium “En Route to GODAE”, 325-326, 2002.
- 杉浦望実, 増田周平, 馬場金司, 蔣勤, 沈一揚, J. D. Annan, 淡路敏之, 石川洋一, 小守信正, 畑山隆紀 : 4D-VAR data assimilation experiment using JkJ Model, 海洋データ同化セミナー2001, 日本海洋振興財団, 2002.
- 豊田隆寛・石川洋一・淡路敏之・Yign Noh : OGCMによる北太平洋のモード水形成過程の解析 2002年度日本海洋学会春季大会, 2002.
- 小守信正・淡路敏之・石川洋一・倉賀野連・寄高博行・工藤宏之 : 黒潮客観解析データの作成に関する研究 (III) —海面高度計データと ADCP データの同時同化による平均場の連続修正— 2002年度日本海洋学会春季大会, 2002
- 杉浦望実・淡路敏之・馬場金司・石川洋一・増田周平・堀内一敏・蔣勤・沈一揚・J. D. Annan : 随伴形の海洋循環問題への適用 2002年度日本海洋学会春季大会, 2002
- 増田周平・淡路敏之・杉浦望実・馬場金司・堀内一敏・石川洋一・蔣勤・沈一揚・J. D. Annan : 海洋再解析データを用いた海洋循環についての研究 (I) —太平洋における南北熱輸送量の季節変動— 2002年度日本海洋学会春季大会, 2002
- 石川洋一・淡路敏之・豊田隆寛・小守信正・杉浦望実・増田周平・馬場金司 : 全球海洋大循環データ同化システムを用いた水・熱エネルギーフローの4次元解析 (II) —4D-VARにおける評価関数の重み決定法の開発— 2002年度日本海洋学会春季大会, 2002.
- 渡辺朝生・須賀利雄・深澤理郎・淡路敏之・石川洋一・蒲地政文・倉賀野連 : 亜表層・中層循環の構造 2002年度日本海洋学会春季大会 シンポジウム F 「北太平洋亜寒帯循環—SAGEの成果—」 2002.
- 石川洋一、淡路敏之、豊田隆寛 : データ同化の最前線と生態系モデルへのインパクト、水産海洋研究集会 水産海洋分野におけるモデル研究の最前線, 2002.