

平成21年5月25日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18340139  
 研究課題名（和文） 四次元変分法データ同化を用いた階層的逆解析によるエルニーニョ現象の解読  
 研究課題名（英文） Elucidation for irregularity of El Nino events by using an innovative multi-connected inversion approach with the 4-dimensional variational atmosphere-ocean data assimilation system

研究代表者  
 淡路 敏之（AWAJI TOSHIYUKI）  
 京都大学・大学院理学研究科・教授  
 研究者番号：40159512

## 研究成果の概要：

四次元変分法大気海洋結合データ同化の利点を最大限に活かした 1990 年代の再解析プロダクトならびに変動の要因を特定する上に有益な顕著現象の逆解析データを作成・併用して、太平洋熱帯域を対象に詳細解析を行った結果、再解析データの精度は通常のシミュレーション結果と比べ海面水温にして約 2 倍程度向上し、熱輸送量は ENSO 現象に規定され顕著な経年変動を示すとともに、その変動は recharge-discharge 理論に西風バースト効果を組み入れることにより、これまで未解明であった 90 年代におけるエルニーニョ発生の多様性の一側面を説明できるという新知見を得た。具体的には、従来の理論では欠けていた off-equator での赤道ロスビー波の西方伝播に伴う南北熱・水輸送の時間変動過程と西岸からの赤道ケルビン波の伝播による東向き熱・水輸送の interplay を従前のリチャージ理論に組み入れれば、エルニーニョの振幅と周期が不規則になることを明らかにすることに成功し、関連論文は米国地球物理学連合の J. Geophys. Res. から刊行されるやいなや、その週刊ダウンロード数は世界第 4 位であった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2007 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

## 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：データ同化・エルニーニョ・予測・大気海洋フィードバック

## 1. 研究開始当初の背景

全球気候に大きな影響を及ぼす顕著的気

候変動として未だに社会的関心事である熱帯太平洋起源のエルニーニョ・ラニーニャ現

象に関して、赤道太平洋に展開された TAO ブイネットワーク観測や衛星観測等による 1990 年代以降の高密度データは当時、エルニーニョの発生様式やその広がり及び周期・強度は、先行研究で指摘されていたような経年的に発生するという共通の特徴を持つものの、その様式は不規則かつ多様であることを明示した。このような現実の物理過程の説明は、それまでの亜表層の波動による海面水温変動を重視した大気海洋相互理論や表層循環の変動に伴う海面水温変動を重視したモデルならびにそれらを発展させた概念モデルであるリチャージ理論では無理があり、個性豊かなエルニーニョを特徴づける物理機構の解明が待たれていた。

一方、複雑系現象の動態解明に道を拓く有効な技法として、変動現象を時間軸を遡って調べることができる逆解析手法が、現象の発生と変遷の要因を突き止めるアプローチとして注目を集めるようになり、この手法を階層的に熱帯太平洋の大気海洋相互現象に適用すれば、物理量間の連鎖系の診断、とりわけエルニーニョ発生のトリガーとなる要因とその物理過程や物理量間の階層構造を診断し解読できる探索データを作成できる可能性があった。

## 2. 研究の目的

四次元変分法を用いた世界初の階層的逆解析手法を大気海洋結合系モデルに適用することにより、先行研究ではなしえなかった現実的な自由度系での大気から海洋、海洋から大気への相互作用過程を診断できる再解析データ、及び注目する変動現象の逆解析データを作成して、エルニーニョ・ラニーニャサイクル現象の新たな動態解明を行う。

## 3. 研究の方法

世界レベルの四次元変分法階層的な大気海洋結合同化システムを構築して、観測史上最大のエルニーニョなど多様なエルニーニョが発生した 1990 年代の気候変動実験に適用することにより、時間軸順方向の大気海洋系時系列格子データセットならびに赤道太平洋変動に着目した逆解析データを作成・解析して、1) 個々のエルニーニョの発生や発達の不規則性を支配する要因を突き止める鍵である主温度躍層変動・海面水温・海上風間のフィードバックの動態を診断するとともに、2) エルニーニョ発生のトリガーとなる西風バーストと海洋の応答、引き続く大気のフィードバック過程の支配機構を明らかにし、個々のエルニーニョの物理過程の共通点と相違点を明確にする。3) 以上の結果にもとづき、エルニーニョの顕著な特徴である“不規則性”を説明できるようリチャージ理論の現実モデル化を行いメカニズムを解明するとともに、現実の複雑系におけるエルニーニョ現象の理解に役立つ知識基盤を得る。

## 4. 研究成果

全球を対象とした四次元変分法大気海洋結合データ同化システムと階層連結した高分解能熱帯太平洋領域結合モデルの開発・改良に成功し、関係する国際研究コミュニティの協力を得て、同化実験に必要な入力用データ及び検証用データの入手・整備を行い、まず、史上最大の 1997/98 エルニーニョ過程の再現に向けた顕著年データ同化実験を実施した結果、西風バーストの連続発生とそれに伴うエルニーニョの現実の動態の再現に成功し、作成した結合系顕著年再解析データならびアジョイント法逆解析により、西風バーストをトリガーとした一連のエルニーニョの動態を解読した。これにより、従前のリチャージ理論に新たに time-varying Sverdrup

transport の物理要素を取り込めば、エルニーニョ発生の不規則性を説明できる手がかかりが得られ、ヨーロッパ中期予報センター等の国内外の会議で発表する等して、off-equator での赤道ロスビー波の西方伝播に伴う南北熱・水輸送の時間変動過程と西岸からの赤道ケルビン波の伝播による東向き熱・水輸送の interplay を新たに組み入れた理論モデルを提案した。

次に、開発した階層的大気海洋結合同化システムを用いて、中程度の規模から史上最大規模のエルニーニョが発生した 1990 年代を対象とした世界初の大気海洋結合系長期再解析実験を行い、現実的な自由度系での大気海洋相互作用過程を診断・解析した結果、新理論が一連のエルニーニョ現象の不規則性の特徴を概ね説明できることが分かった (図 1)。

#### 結合再解析によるエルニーニョの多様性研究

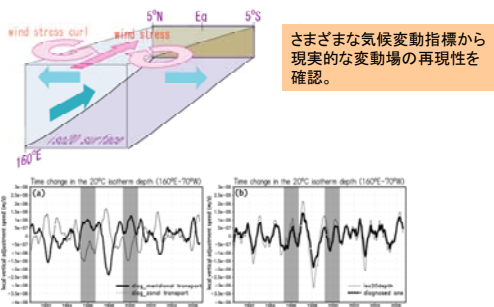


図 1. (上)時間変動する off-equator での南北スベルトラップ輸送と赤道沿い東向き輸送の概念図。(左下) 東西輸送及び南北輸送による躍層深の鉛直変位速度 (右下) 水平輸送による躍層深の鉛直変位速度と解析場の躍層深の鉛直変位速度

さらに、エルニーニョの不規則なライフサイクルを明らかにするとともに、エルニーニョの予測可能性に向けて、“地球気候のゆらぎ”を考慮したアンサンブル予測実験 (11 メンバー) を 1990 年代の全エルニーニョを対象に行った結果、四次元変分法結合同化を用いて経年変動のエネルギーシグナルを精緻に抽出・再現するよう初期値化すれば予報ス

コアが大きく向上することが判明し、世界最長クラスの 2 年先行予測に成功した (図 2)。

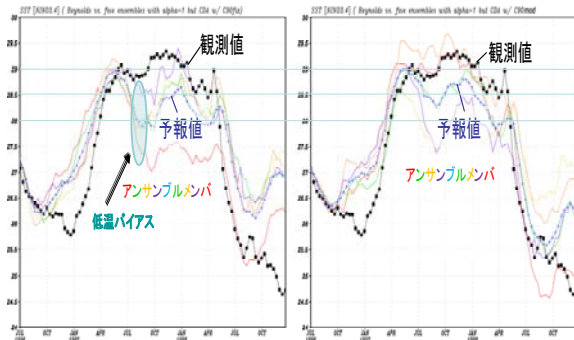


図 2. 結合モデルによる ENSO 予報実験結果 (NINO03.4SST の時間変化) (左)シミュレーション予測 (右) 結合同化システムによる初期値化予測

さらに進んで、複数のダウンスケーリング実験を行い、エルニーニョ発生のトリガーである西部熱帯太平洋での西風バーストの発生に関わる大気海洋相互作用の素過程の再現に成功するとともに、西風バーストの連続発生に果たす日周期熱・水交換の重要性とその機構を明らかにした。同時に、長年の謎であった課題、すなわち、なぜ海面水温が 29°C を超えると大気海洋結合が強化されるのか、そのメカニズムの一端を解明した。

以上の成果は、エルニーニョ発生の標準理論であるリチャージ理論を拡充し、発生と強度の不規則性に関するメカニズムを明らかにするものと国際的に認識され、米国地球物理学連合の J. Geophys. Res. から刊行された論文の週刊ダウンロード数は世界第 4 位となるなど、高く評価された。なお、解析データセットは web から発信・公開した。

#### 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 15 件)

査読有

① Ishikawa, Y., T. Awaji, T. Toyoda, T. In,

- K. Nishina, T. Nakayama, and S. Shima: High-resolution synthetic monitoring by a 4-dimensional variational data assimilation system in the northwestern North Pacific, *Journal of Marine System*, 2009. (in press)
- ②Balmaseda, M., O. Alves, A. Arribas, T. Awaji, D. Beringher, N. Ferry, Y. Fujii, T. Lee, M. Reineker, T. Rosati, and D. Stammer: Ocean initialization for seasonal forecasting, *Oceanography*, 2009 (in press).
- ③Lee, T., T. Awaji, M. Balmaseda, E. Greiner, M. Martin, and D. Stammer: Ocean state estimation for climate research, *Oceanography*, 2009 (in press).
- ④Toyoda, T., S. Masuda, N. Sugiura, T. Mochizuki, H. Igarashi, M. Kamachi, Y. Ishikawa, and T. Awaji: A possible role for unstable coupled waves affected by resonance between Kelvin waves and seasonal warming in the development of the strong 1997-1998 El Nino, *Deep-Sea Res.* 1, 56, 495-512, 2009
- ⑤Masuda, S., T. Awaji, T. Toyoda Y. Shikama, and Y. Ishikawa: Temporal evolution of the equatorial thermocline associated with the 1991-2006 ENSO, *J. Geophys. Res.* 114, C03015, doi:10.1029, 2009.
- ⑥Mochizuki, T., T. Awaji and N. Sugiura : Possible oceanic feedback in extratropics in relation to the North Atlantic SST tripole, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L05710, doi:10.1029/2008GL036781, 2009.
- ⑦五十嵐弘道、淡路敏之、豊田隆寛、増田周平、杉浦望実、佐々木祐二、一井太郎、秋山秀樹、畠山清：海洋環境変動の把握技術と水産資源変動解析に果たす役割、*水産海洋研究*, 73(1), 34-35, 2009.
- ⑧Mochizuki, T. and T. Awaji: Summertime evolution of decadal sea surface temperature anomalies in the midlatitude North Pacific, *Journal of Climate*, 21, 1569-1588, 2008.
- ⑨Sugiura N., T. Awaji, S. Masuda, T. Mochizuki, T. Toyoda, T. Miyama, H. Igarashi, and Y. Ishikawa: Development of a four-dimensional variational coupled data assimilation system for enhanced analysis and prediction of seasonal to interannual variations. *J. Geophys. Res.*, 113, C10017, doi:10.1029/2008JC004741, 2008.
- ⑩J. P. Matthews, X. D. Yang, J. Shen and T. Awaji: Structured sun glitter recorded in an aster along-track stereo image of Nam Co Lake(TIBET): An interpretation based on supercritical flow over a lake-floor depression, *J. Geophys. Res.*, 113, C01019, doi:10.1029/2007JC004204, 2008.
- ⑪Shang-Ping Xie, T. Miyama, Y. Wang, H. Xu, S. P. de Szoeke, R. J. Small, K. J. Richards, T. Mochizuki, and T. Awaji: A Regional Ocean-Atmosphere Model for Eastern Pacific Climate: Towards Reducing Tropical Biases, *Journal of Climate*, 20, 1504-1522, 2007.
- ⑫Mochizuki, T., T. Miyama, and T. Awaji: A simple diagnostic calculation of marine stratocumulus cloud cover for use in general circulation models, *J. Geophys. Res.*, 112, D06113, doi:10.1029/2006JD007223, 2007.
- ⑬Mochizuki, T., H. Igarashi, N. Sugiura, N. Ishida, T. Awaji: Improved coupled GCM climatologies for summer monsoon onset studies over Southeast Asia, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01706, doi:10.1029/2006GL027861, 2007.
- ⑭Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, T. Toyoda, Y. Ishikawa, K. Horiuchi: Interannual variability of temperature inversions in the subarctic North Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24610, doi:10.1029/2006GL027865, 2006.
- ⑮Nakamura T., T. Toyoda, Y. Ishikawa, and T. Awaji: Enhanced ventilation in the Okhotsk Sea through tidal mixing at the Kuril Straits, *Deep Sea Res.*, 53, 425-448, 2006.
- [学会発表] (計9件)
- ①Awaji, T., Shuhei Masuda, Nozomi Sugiura, Takahiro Toyoda, Hiromichi Igarashi, Yoichi Ishikawa, Yuji Sasaki: K7 Ocean Reanalysis Experiment by Using a 4D-VAR Data Assimilation System, International workshop on the North Pacific Ocean observation Strategy for carbon cycle and climate change, (2-4 March 2009. Tokyo).
- ②Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, T. Toyoda, H. Igarashi, Y. Sasaki, T. Kawano, and M. Fukasawa: DEEP OCEAN reanalysis experiment By using a 4D-VAR adjoint method. Final GODAE symposium 2008 (12-15 Nov., Nice).
- ③五十嵐弘道・淡路敏之 (2008) : 赤道アフ

リカ東部における降水量の年々変動と水蒸気輸送について。日本気象学会 2008 年度秋季大会。(11月19-21日、仙台)

- ④ Kamachi, M. and T. Awaji: National Presentation Japan. IGST-XIII-2008-GODAE-. (1-5 June, 2008. Silver Spring/Washington DC, U. S. A)
- ⑤ Toyoda, T., S. Masuda, N. Sugiura, H. Igarashi, Y. Sasaki, Y. Ishikawa, T. Awaji: Interannual variabilities of eastern subtropical mode waters in the North and the South Pacific identified from reanalysis datasets obtained by 4DVAR data assimilation. Asia Oceania Geophysical Society 2008 (16-20 June, Busan).
- ⑥ Sugiura, N., S. Masuda, T. Awaji, T. Toyoda, H. Igarashi, Y. Sasaki, : A global 4D-Var data assimilation experiment with a fully coupled GCM. Asia Oceania Geophysical Society 2008 (16-20 June, Busan).
- ⑦ Igarashi, H. (JAMSTEC), T. Awaji (Kyoto Univ., FRCGC), N. Sugiura (FRCGC), T. Toyoda (FRCGC), Y. Sasaki (FRCGC), T. Ichii (NRIFS/FRA), H. Akiyama (SNFRI/FRA), K. Hatakeyama (JAMSTEC) : Application of ocean data assimilation to the diagnosis of neon flying squid and jumbo flying squid stock assessment. Asia Oceania Geophysical Society 2008 (16-20 June, Busan).
- ⑧ Igarashi, H. (JAMSTEC), T. Awaji (Kyoto Univ., FRCGC), N. Sugiura (FRCGC), S. Masuda (FRCGC), T. Toyoda (FRCGC), Y. Sasaki (FRCGC), T. Ichii (NRIFS/FRA), H. Akiyama (SNFRI/FRA), K. Hatakeyama (JAMSTEC) : Application of ocean reanalysis to the diagnosis of two pelagic squid stocks. Final GODAE symposium 2008 (12-15 Nov., Nice).
- ⑨ Awaji, T., Four-dimensional variational coupled data assimilation, AOGS 4th annual meeting, (3 August 2007. Bangkok).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

淡路 敏之 (AWAJI TOSHIYUKI)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号 : 40159512

### (2) 研究分担者

石川 洋一 (ISHIKAWA YOUICHI)

京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号 : 70335298

根田 昌典 (KONDA MASANORI)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号 : 10273434