

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月19日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540457

研究課題名（和文）北太平洋長期淡水化の随伴逆探索による原因解明

研究課題名（英文）Analysis of factors in the freshening trend of the water in the North Pacific through back-tracing using an adjoint model

研究代表者

蒲地 政文（KAMACHI MASAFUMI）

気象庁気象研究所・海洋研究部・部長

研究者番号：00354548

研究成果の概要（和文）：海洋データ同化システムにより作成した海洋モデル・観測統合データの解析から、北太平洋亜熱帯循環の広い範囲で数10年規模の淡水化トレンドが見られ、特に東北沖の黒潮、親潮混合域でその傾向が大きいことが明らかとなった。また、アジョイントモデルを用いた水塊逆追跡の結果などから、上記混合域で淡水化した海水が、黒潮に移流された後、東経160度付近の亜熱帯循環の副循環に取り込まれることにより、亜熱帯循環全体の淡水化を生じていることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：A multi-decadal freshening trend is found in the mid-depth layer in a large part of the North Pacific subtropical gyre through the analysis of synthesis data of an ocean model and observations generated by an ocean data assimilation system. In particular, the trend is large in the Kuroshio-Oyashio mixing area east of Japan. The backward tracing of water mass using an adjoint model indicates that freshened water in the mixing intrudes around 160°E into the subtropical gyre after advected by the Kuroshio, and that it results in the freshening of entire the tropical gyre.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	0	1,700,000
2010年度	900,000	0	900,000
2011年度	900,000	0	900,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	0	3,500,000

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：北太平洋中層水・低塩化・トレンド・アジョイント法・逆追跡・データ同化・海洋再解析・黒潮続流

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化による気温・水温の上昇や海面水位の上昇は「気候変動に関する政府間パネル（IPCC 2007）」により世界中で研究され、その精度については議論があるものの多くの国々で対策がとられつつある。このような議論では、温度を中心に議論されているが、

Boyer et al. (2005)は、長年の海洋観測から、海洋表層では昇温(温暖化)だけでなく、塩分が減少していること(淡水化)を報告した。さらに Nakano et al. (2007)は、海洋の中で淡水化と塩分増加の分布が、海洋の現象・水塊の分布に依存していることを明らかにし、また、39年間の淡水化の半分ほどは温

暖化の直接的な影響であることを指摘したが、残りの半分の原因は特定されていなかった。加えて、この解析は東経 137 度に沿った鉛直断面の中だけを扱っているため、海洋全体でどのように分布しているかは不明であった。温暖化と淡水化が同時に進行すると、海洋表層の密度が軽くなり、表層水の沈降が減少、ひいては二酸化炭素吸収量が減少し、温暖化が予想以上に進行する可能性があるため、研究開始当初は、温暖化だけでなく、淡水化についても海洋の中での分布、その時間・空間での変動の状況、および、その原因を解明することが喫緊の問題であった。

## 2. 研究の目的

海水の淡水化（塩分の低下）の状況（空間分布と変動特性）とその原因を、海洋データ同化システムにより作成された長期再現実験結果（海洋モデル・観測統合データ）の解析、および、データ同化で利用されているアジョイントモデルを用いた随伴逆探索により、解明する。

## 3. 研究の方法

### (1) 海洋モデル・観測統合データの解析

気象研究所で所有している海洋データ同化システムによる 1950～2007 年までの長期再現実験結果（海洋モデル・観測統合データ）を用いて、Nakano et al. (2007) で行った淡水化の検出を、北太平洋の全ての海域で行う。そのことにより、温暖化の影響による淡水化（あるいは海域によっては高塩分化）の空間分布を把握する。また、淡水化の特に顕著な海域について、同海域への塩分の流入、流出量の時間変化と同海域での淡水化の進行との相互関係の解析をして、淡水化の原因について究明すると共に、さらに、米国大気海洋庁環境予測センター(NCEP)のデータを用いて、大気の変動との関係についても検討する。

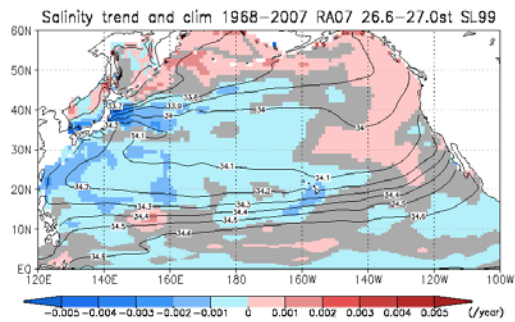
### (2) アジョイントモデルを用いた随伴逆追跡

アジョイント（随伴）モデルは、時間を遡って現象の原因がどの海域にあるか（随伴逆探索）、（その原因が一つではない場合）どの海域にどの程度の原因となる可能性があるかという情報を与えるモデルであり、4 次元変分法と呼ばれるデータ同化手法で用いられる他、これまで移流物質の起源を逆追跡するためにも利用されてきた。本研究では、アジョイントモデルを用いた逆追跡により、淡水化した水塊の起源を探索する。また、特定された起源から最終的な到達地点までの水塊の経路を明らかにするための新たな水塊追跡の手法を開発する。

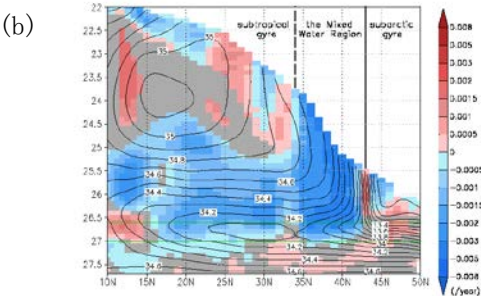
## 4. 研究成果

### (1) 海洋モデル・観測統合データの解析

#### (a)



#### (b)



#### (c)

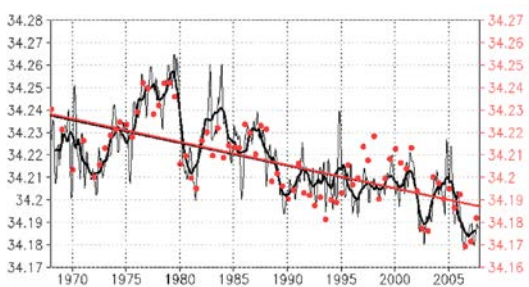


図 1：海洋モデル・観測統合データから算出した 1968-2007 年の塩分の線形トレンド。(a) 密度 26.6-27.0 の層でのトレンド（陰影）。(b) 東経 155 度に沿った縦軸を密度としたトレンド（陰影）の鉛直断面。(a), (b) の等値線は同期間の塩分気候値を表す。(c) 東経 137 度、北緯 16-32 度、密度 26.65-27.05 で平均した塩分の時系列（細黒折れ線）、その 5 年移動平均（太黒折れ線）、及び回帰直線（黒直線）（目盛りは左側）。赤丸、赤線は、観測データ、及び、その回帰直線（目盛りは右側）。

海洋モデル・観測統合データを用いて、1968 年から 2007 年にかけての塩分のトレンドについて求めたところ、中層にあたる密度 26.6-27.0 の層では、図 1 (a) で示すように、北太平洋亜熱帯循環の広い範囲、及び、北緯 40 度近辺の亜熱帯循環と亜熱帯循環の境界域で、淡水化のトレンドが見られた。特に、東北沖東方海域で、黒潮と親潮で南北を挟まれた、黒潮・親潮混合域において、淡水化のトレンドが顕著である。また、東経 155 度に沿った縦軸を密度とした鉛直断面（図 1 (b)）

を見ると、黒潮と親潮の間の混合域では、海面から中層まで低塩化が顕著であり、この緯度帯で低塩化した水が、中層を南の方へと広がっている様子が示唆される。また、日本南方の東経 137 度、北緯 16-32 度について観測データと比較する（図 1 (c)）と、海洋モデル・観測統合データにおいて、塩分の時間変動がおおむね再現されており、また、トレンドについては、観測データから求めたものと、ほぼ一致していた。

特にトレンドが大きかった黒潮・親潮混合域の中層では、同海域に流入する黒潮水と親潮水が混合することにより、北太平洋中層水 (North Pacific Intermediate Water: NPIW) と呼ばれる水塊が形成されている。本研究では、この水塊の淡水化の要因を調べるため、黒潮水・親潮水の流入・流出量やその塩分変化と、混合域内での NPIW の平均的な塩分変動との関係について解析を行った。その結果、黒潮水の総流入量（流入量－流出量）が減少し、親潮水の総流入量もやや増加した結果、NPIW にしめる親潮水の割合が増加し、その結果として、塩分の低下がおきていることが、明らかとなった。また、黒潮水の塩分についても低塩化トレンドが見られたが、この効果は、親潮水の高塩化トレンドとほぼ相殺しており、結局、NPIW に対する親潮水・黒潮水の塩分変化の影響は小さかった。

さらに、特に NPIW の淡水化への影響が大きかった黒潮水の総流入量の減少について、その原因を調べたところ、黒潮流速の増加トレンドに伴い、東経 150 度より東での流軸が南下することによる混合域からの流出が増加していることがわかった。なお、流速の増加は、房総半島東方からの流入量を増加させる効果もあるが、この効果は、黒潮流軸が長期的に南に移動した効果と相殺して、結局、流入量はわずかに減少していた。また、NCEP のデータを利用して、大気変動との関連を調べたところ、長期的なアリューシャン低気圧の強化に伴い、北太平洋中央部の黒潮の南で等密度面が深化して、その変動がロスビー波により、5-6 年かけて混合域まで伝播することにより、黒潮流速の増加がおきていることが示唆された。

## (2) アジョイントモデルを用いた随伴逆追跡

本研究では、まず、時間推進の接線形モデルと時間が逆転したアジョイント（随伴）モデルを用いて、ある水塊の粒子が、その起源となる海域（起源海域）から、最終的に到達する海域（到達海域）まで移動する際の経路を、その存在確率密度分布で表す方法を開発した。この手法では、まず、接線形コードを

用いて、起源海域から流出する水塊粒子の存在確率密度分布の時間発展を求める。次に、アジョイントモデルを用いて、ある地点において、その地点に存在する水塊粒子が、到達海域まで移流される確率の分布の時間発展を計算する。なお、この時間発展はアジョイントモデルの特性により、時間方向逆向きに計算される。さて、ある時刻にある地点に存在する水塊粒子が将来どこへ移流されるかは、その時刻における位置のみ依存し、過去にどのような経路を通過してその位置に到達したかどうかには依存しないので、起源海域から到達海域まで移動する水塊の存在確率密度分布は、起源海域から流出する水塊の確率密度と、到達海域へ移流される確率の積、すなわち、接線形モデルとアジョイントモデルの計算結果の積を、規格化することによって求められる。この確率密度は、起源海域から到達海域まで移動する水塊の量に比例しているため、その時間発展を調べることで、その水塊がどのような経路を通過して移動したかを、追跡することができる。なお、この手法は、接線形モデルによる通常の水塊追跡とアジョイントモデルを用いた水塊逆追跡を組み合わせたとと言える。

さて、本研究では、上記の手法を気象研究所海洋大循環モデルに基づく北西太平洋モデルのシミュレーション結果に適用して、日本の南の海域に見られる NPIW がその起源となる海域からどのような経路を移流されてきたかを解析した。モデルの海域は東経 117 度-西経 160 度、北緯 15-65 度で、解像度は、東西方向が東経 160 以西（以東）で、1/10 度（1/6 度）、南北方向が北緯 50 度以南（以北）で、1/10 度（1/6 度）である。また、シミュレーションでは 1948-2006 年の NCEP のデータを大気外力として用いた。追跡する NPIW の起源海域は、北緯 37.5 度以北、東経 130 度以東の塩分 34.0 以下の層とし、到達海域は、北緯 26-31 度、東経 136-140 度の海域の塩分 34.25 以下の層とした。また、水塊の移動期間は 1997-2006 年の 10 年間とした。

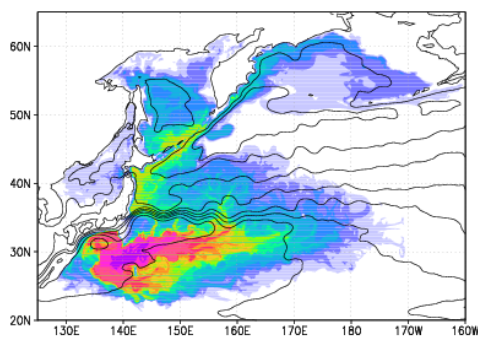


図 2：追跡した NPIW の存在確率密度を鉛直方向に積分した値の最大値の分布（陰影）と海面高度の 1997-2006 年平均値（等値線）。値は、見やすくするために適当にスケールされている。



図2は、追跡したNPIWの存在確率密度を鉛直方向に積分した値の最大値の分布であり、この値が大きいところほど、NPIWがよりまとまって、その場所を通過したことを示す。図から、オホーツク海の水が、千島列島を東へと抜け、ベーリング海からの水と合流して、親潮として南下している様子が示唆される。さらに、南下したNPIWは、東経144度付近の黒潮続流の第1の峰の西側で黒潮に取り込まれ、東へと移流されるが、主に、東経160度付近で、南下して亜熱帯循環の副循環に取り込まれ、日本の南海域に到達している。

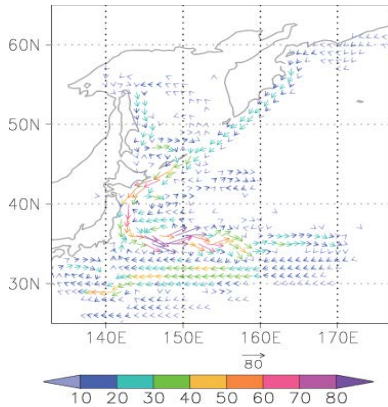


図3：追跡したNPIWの通過方向、及び、流量(1997-2006年の合計)。流量は追跡した水塊の総量に対する割合(%)で示す。

次に、NPIWの通過経路をより明らかにするため、1度毎の格子間隔で緯度線、経度線を通るNPIWの通過流量を計算した結果を図3に示す。この図からも、図2で示唆されるように、サハリン東岸を南下した水と、ベーリング海から千島列島東岸を南下した水が合流して親潮を形成し、北海道の南東、及び、本州の東岸を南下した後、黒潮に取り込まれて、東へ移流されることがわかる。特に、100%以上の水が黒潮に移流され東経148度付近を通過しているが、この中では黒潮の北側、及び、南側に見られる副循環を周回しているものも含まれている。また、黒潮に移流されたNPIWは、主に東経160度付近で黒潮から南にそれ、亜熱帯循環に取り込まれているようであるが、一部は、東経170度近くまで移流された後に南下して、西へと移流されている。なお、親潮に移流され北緯37.5度を南へと横切るのは、おおよそ70%が、親潮が強化される傾向にある1月から6月にかけてであった。

上記の結果から、日本の南の海域に到達するNPIWが、主に、東経160度付近で、黒潮から南にそれ亜熱帯循環に取り込まれていることが明らかとなった。また、東経160度付近を黒潮に移流され通過した水塊も大部分は

東経170度のやや手前で南下して黒潮から離れ、西へと移流されていた。上記の計算はNPIWの移動期間を10年と設定して行ったが、期間を5年や20年に変更しても、上記のような傾向は変わらなかった。それでは、なぜ、東経160度付近や東経170度の西側で、NPIWの水塊が黒潮を離れるのであろうか。理由の一つとして、東経160度付近より西で黒潮を横切った水塊は、黒潮の南側の副循環に取り込まれ、東経142度付近で再び黒潮に取り込まれてしまうため、日本の南の海域までは到達しないということが考えられる。また、海底地形の影響も考えられる。東経160度付近にはシャツクライズがあり、また、東経170度の東側には天皇海山列がある。

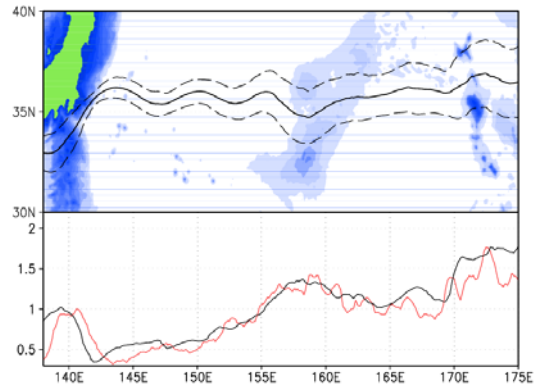


図4：上)モデルの海底地形(陰影)と平均的な黒潮流軸の緯度(実線)、及び、その標準偏差分だけ南北にずれた位置(点線)。下)流軸緯度の標準偏差(黒線)と流軸の傾きの標準偏差(赤線)。いずれも、1997-2006年のシミュレーション結果から計算した。

図4を見ると、シャツクライズがあるあたりで、黒潮流軸緯度の変動が大きくなっていることがわかる。また、このあたりでは、流軸の傾きの変動も大きくなっており、流軸の蛇行の大きさや形態についても激しく変動していることがわかる。このことから、シャツクライズの上を黒潮が通過するとき、黒潮が不安定化し、その結果として、NPIWの水塊が多く、黒潮から南へと抜けていることが示唆される。特に、シャツクライズを超えるとときに渦管の収縮がおきるので、高気圧性の循環を生じやすくなることが、原因の一つではないかと考えられる。実際に、この付近の存在確率密度分布の時間変化を見ても(図は省略)、黒潮により西から移流してきたNPIWが、シャツクライズ付近にできた大きな蛇行に沿って南に南下した後、そのまま黒潮から南西方向へ離れていく様子や、蛇行から切離した渦に伴い、亜熱帯循環内に入っていく様子が観察できる。また、天皇海山列付近では流軸の変動がさらに大きくなっており、そのため、シャツクライズを超えたNPIWも

大部分は、その手前で南下して、亜熱帯循環に取り込まれているようである。

海洋モデル・観測統合データの解析では、黒潮・親潮混合域で特に大きな淡水化のトレンドが確認された。また、アジョイントモデルにより NPIW の移動経路を追跡した結果から、この海域で淡水化した水塊は、10 年程度の時間スケールで、東経 160-170 度付近で黒潮を横切り、亜熱帯循環全体へと広がっていくことが予想され、結果的に、海洋モデル・観測統合データの解析から明らかとなった、亜熱帯循環の広い範囲に及ぶ淡水化のトレンドを生じていると考えられる。

#### 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 12 件)

- ① Y. Fujii, M. Kamachi, S. Matsumoto, S. Ishizaki (2012): Barrier layer and relevant variability of the salinity field in the equatorial Pacific estimated in an ocean reanalysis experiment. Pure Appl. Geophys., 査読有り, 169, 579-594, DOI:10.1007/s00024-011-0387-y.
- ② Y. Fujii, M. Kamachi, T. Nakaegawa, T. Yasuda, G. Yamanaka, T. Toyoda, K. Ando, S. Matsumoto (2011): Assimilating ocean observation data for ENSO monitoring and forecasting. Climate variability -Some aspects, challenges and prospects, 査読有り, InTech, Rijeka, Croatia, 75-98, DOI: 10.5772/30330.
- ③ Y. Fujii, S. Matsumoto, M. Kamachi, and S. Ishizaki (2010): Estimation of the equatorial Pacific salinity field using ocean data assimilation system. Adv. Geosci., 査読有り, 18, 197-212 (<http://www.worldscibooks.com/enviro/ncsci/7158.html>).
- ④ S. Matsumoto, T. Nakano, Y. Fujii, T.

Yasuda, M. Kamachi (2010): Utilization of Ocean Reanalysis Data for Climate Variability Analysis of the North Pacific Intermediate Water. Proceedings of the "OceanObs' 09: Sustained Ocean Observations and Information for Society" Conference (Annex), 査読なし, ESA Publication WPP-306, doi:10.5270/OceanObs09.

- ⑤ H. E. Hurlburt, M. Kamachi (4 番目), N. Usui (18 番目), 他 16 人 (2009): High-Resolution Global and Basin-Scale Ocean Analyses and Forecasts, Oceanography, 査読有り, 22, 110-127, (<http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2009.70>).
- ⑥ J. A. Cummings, M. Kamachi (5 番目), 他 9 人 (2009): Ocean Data Assimilation Systems for GODAE. Oceanography, 査読有り, 22, 96-109, (<http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2009.69>).

[学会発表] (計 17 件)

- ① N. Usui: Improved representation of nearshore processes at the southern coast of Japan using a 4DVAR assimilation system. International Workshop of the Coastal and Shelf Seas Task Team. Miami, USA (平成 24 年 1 月 10 日).
- ② 藤井陽介: 気象庁季節予報システムにおける TAO/TRITON ブイ・アルゴフロートのインパクト. 2011 年度日本海洋学会秋季大会, 福岡県春日市 (平成 23 年 9 月 28 日).
- ③ Y. Fujii: Ocean Observing System Evaluation for Seasonal/Decadal Prediction. GODAE Ocean View-CLIVAR-GSOP Workshop on Observing

System Evaluation and Intercomparisons. Santa Cruz, USA (平成 23 年 9 月 28 日).

- ④ Y. Fujii: Coupled Ocean and Atmosphere Analysis by Assimilating Ocean Observation Data to a Coupled Model. Workshop on Decadal Variability, Predictability, and Prediction, and to have research presentations. Boulder, USA (平成 22 年 9 月 20-23 日).
- ⑤ 藤井陽介: 曳航式 CTD で観測された南太平洋熱帯水とバリエイヤー. 2010 年度日本海洋学会秋季大会. 北海道網走市 (平成 22 年 9 月 7 日)
- ⑥ M. Kamachi: Application of Ocean Data Assimilation. CIMPA UNESCO Thematic School. Data assimilation for Geophysical Fluids. Wuhan, China (平成 22 年 5 月 4 日)
- ⑦ 藤井陽介: 海洋大循環モデルアジョイントコードのデータ同化への活用. 第 58 回理論応用力学講演会, 東京都 (平成 21 年 6 月 9 日)
- ⑧ 松本聡: 海洋再解析データを用いた北太平洋中層における長期変化の解析. 2009 年度日本海洋学会春季大会, 東京都 (平成 21 年 4 月 6 日)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

蒲地 政文 (KAMACHI MASAFUMI)  
気象庁気象研究所・海洋研究部・部長  
研究者番号: 00354548 (平成 21-23 年度)

### (2) 研究分担者

藤井 陽介 (FUJII YOSUKE)  
気象庁気象研究所・海洋研究部・研究官  
研究者番号: 60343894 (平成 21-23 年度)  
松本 聡 (MATSUMOTO SATOSHI)  
気象庁気象研究所・海洋研究部・研究官  
研究者番号: 60414516 (平成 21 年度)

### (3) 連携研究者

碓氷 典久 (USUI NORIHISA)

気象庁気象研究所・海洋研究部・研究官  
研究者番号: 50370333 (平成 21-23 年度)

### (4) 研究協力者

松本 聡  
(気象庁地球環境・海洋部, 平成 22-23 年度)  
石崎 士郎 (気象庁地球環境・海洋部)  
杉本 裕之 (気象庁地球環境・海洋部)  
沢田 謙 (気象大学校講師)  
Jason Yu (台湾中山大学教授)  
Francois-Xavier Le Dimet  
(フランスグルノーブル大学教授)  
Magdalena Balmaseda  
(ヨーロッパ中期予報センター)  
Jiang Zhu  
(中国大気物理学研究所教授)