

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540476

研究課題名(和文)北太平洋海洋表層貯熱量の十年規模変動：東方伝播の強制起源と大気への影響

研究課題名(英文)Origin and Climatic Impact of Decadal-Scale, Eastward-Propagating Heat Content Anomalies in the North Pacific

研究代表者

田口 文明 (Taguchi, Bunmei)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・主任研究員

研究者番号：80435841

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：海洋表層貯熱量は、気候シグナルを長期にわたって記憶することから、年々～十年規模変動の予測可能性の鍵を与えられ考えられる。本研究では、大気海洋結合モデル、海洋大循環モデル、及び船舶歴史観測に基づく水温塩分客観解析データを用いて、これまで十分に調べられてこなかった海盆の西岸から東岸に向かって東方伝播する貯熱量シグナルの力学とその強制機構及び大気影響を明らかにした。水温と塩分が密度補償しながら大きな南北勾配を持つ北太平洋亜寒帯前線帯が、およそ十年の時間スケールで南北に変位することにより、塩分と密度補償する形で大きな貯熱量偏差が生成され、受動トレーサとして東方に移流されるメカニズムを提案した。

研究成果の概要(英文)：We investigated upper ocean heat content (OHC) variability, which is at the heart of natural climate variability on interannual-to-decadal time scales and thus provides climate memory and the source of decadal prediction skill, by jointly analyzing coupled GCM, an eddy resolving OGCM, and historical ocean analysis data. We found that spiciness (density-compensating temperature and salinity) variability is a major part of the OHC variability in the North Pacific and the density and spiciness variations explain the west- and eastward propagating signals, respectively, of OHC. Further analysis suggests that spiciness anomalies are caused by meridional displacement of the subarctic frontal zone. Specifically, spiciness anomalies are generated by large scale advection of mean spiciness gradient by anomalous current associated with the ocean frontal shifts.

研究分野：海洋物理学、気候学、大気海洋相互作用

キーワード：北太平洋十年規模変動 亜寒帯前線帯 黒潮続流 spiciness 海洋再解析データ 海洋大循環モデル 大気海洋結合モデル

1. 研究開始当初の背景

北太平洋十年規模変動 (Pacific Decadal Variability, PDV) は、気候の主要な自然変動のひとつであるが、そのメカニズムについては未解明な部分が多い。特に未解明なのは、中緯度海洋の役割である。大気からの強制を受けた海洋が、その成層や循環構造の変化を通じて大気への気候シグナルを記憶し、熱的・力学的な応答の時間遅れを伴って再び大気へ影響を及ぼすシグナルの伝播過程が PDV の予測可能性の鍵を握ると考えられているが、その全容は明らかになっていない。中緯度海洋が気候変動のメモリを担うプロセスの 1 つとして、風系変動によって引き起こされる海面高度の変化が、海洋ロスビー波を励起し西方に伝播することが衛星観測から良く知られている。一方、船舶による長期水温観測データなどを用いて気候変動の指標として監視されることの多い海洋表層貯熱量は、しばしば東向きに伝播することも報告されている。このような対照的な伝播特性 (伝達方向・経路) は、共通の大気強制に対し、海面高度と海洋貯熱量がそれぞれ独立な力学過程に従い、太平洋の西岸と東岸に伝播し、大気に再影響している可能性を示唆している。しかし、東方伝播する貯熱量シグナルについては、これまで十分に調べられてこなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで十分に調べられてこなかった海盆の西岸から東岸に向かって東方伝播する貯熱量シグナルの力学とその強制機構及び大気影響を明らかにすることである。海洋表層貯熱量の十年規模偏差について、以下のプロセスの解明を目指す。

- 課題 1. 伝播メカニズム
- 課題 2. 強制メカニズム
- 課題 3. 大気への影響
- 課題 4. 気候系への影響

3. 研究の方法

本研究では、大気・海洋再解析データと海洋循環・大気海洋結合モデルの長期積分結果を相補的に活用する。まず、大気海洋結合モデル CFES の長期積分データを解析し、モデルの中で生じている海洋表層貯熱量変動の伝播・強制・大気影響 (研究目的課題 1-3) 過程を明らかにし、それを説明する仮説を導出する (雑誌論文成果)。CFES 長期積分データは、現実的かつ、統計的に十分なサンプル数の PDV イベントを再現しているデータである反面、観測データによって束縛されていないため、過去に実際に起こったイベントとの比較は不可能である。そこで、次に、海洋再解析データと海洋循環モデル OFES による過去再現実験データを解析し、CFES 長期積分データの解析から導き出した仮説を検証するとともに、過去に観測された PDV イベントと海洋貯熱量変動との対応を明らかにする (学会発表成果)。最後に、海洋前線変動に伴う

海洋貯熱量が気候系に及ぼす影響 (研究目的課題 4) を明らかにするために、大気海洋結合モデル CFES を用いた感度実験を行なう (学会発表成果)。

4. 研究成果

(1) 北太平洋で東方伝播する十年規模海洋表層貯熱量偏差の起源: 大気海洋結合モデルデータの解析による仮説の提案

大気海洋結合モデル CFES の長期積分結果において、自立的に発生する海洋表層貯熱量の変動メカニズムを解析した (Taguchi and Schneider, 2014, 以下 TS14)。中緯度北太平洋に於ける海洋貯熱量変動の多くの部分は、塩分と密度補償した形で存在すること、密度補償する水温の南北勾配が大きい北西太平洋亜寒帯前線帯で貯熱量の変動も大きいこと、さらに風系変動によって生じた亜寒帯前線の南北変位によって貯熱量の変動が引き起こされることを示した (図 1)。この結果から、東方伝播する十年規模貯熱量偏差は、亜寒帯前線帯に沿って大きい密度補償する水温・塩分勾配に対して、前線帯の南北変位に伴う流速偏差が横切る移流効果により生じているという仮説を提案した (図 2)。亜寒帯前線帯の南北変位が、風系変動に伴う西方伝播する海洋ロスビー波によって生じていることを考慮すると、この仮説は、海面からの熱強制だけでなく、海洋循環の変化による力学的な強制によっても、顕著な海洋貯熱量偏差が生成・伝播することを示唆している。

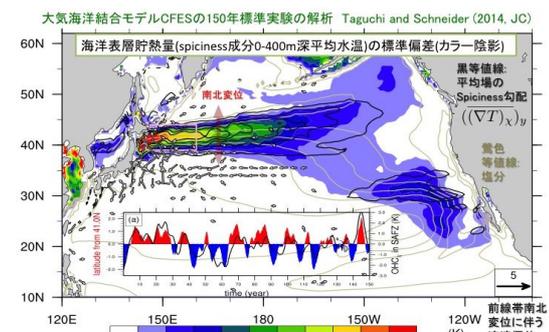


図 1: CFES による北太平洋亜寒帯前線帯の南北変位に伴う海洋表層貯熱量の標準偏差

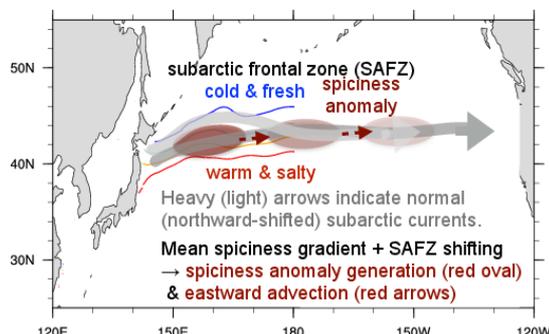


図 2: Taguchi and Schneider (2014) 仮説

(2) 北太平洋西岸境界流の南北変位と海洋表層貯熱量変動: 海洋再解析と OFES 過去再現実験データによる仮説の検証

本研究では、TS14 により提案された仮説(図 2)を、観測データを取り込んだより現実的なデータを用いて検証した(Taguchi et al. 2016, J.Climate に投稿中, 学会発表成果)。用いたデータは、1945-2012 年の海洋客観解析データ (Ishii and Kimoto, 2009) と 1950-2012 年の準全球 海洋大循環モデル OFES による過去再現実験 (Sasaki et al, 2008)の月平均の水温・塩分場である。まず、年々~十年規模の自然変動に着目するために、線形トレンドと月平均気候値を除去した。次に TS14 の方法に従い、水温偏差を、当密度面に直交する方向の水塊変位によってもたらされる(密度偏差を伴う)力学成分と、当密度面に沿った水塊変位によってもたらされる(密度変化を伴わない)密度補償(spiciness)成分に分離した。そして、両成分毎上層 400m 深で鉛直平均した水温偏差を、それぞれ海洋表層貯熱量(OHC)の力学成分 OHC、密度補償(spiciness)成分 OHC と定義した。

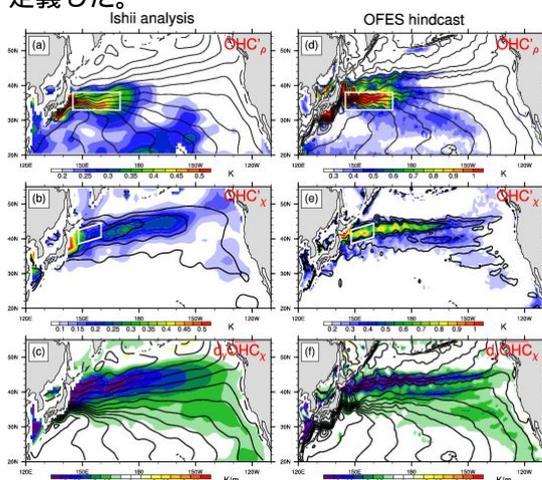


図 3: (a)海洋客観解析データに基づく年平均海洋表層貯熱量の力学成分 OHC の標準偏差(1945-2012 年、カラー陰影、単位[K])、黒等値線は 2000m 基準の力学高度(0.1m²/s²毎)、(b)(a)と同じ。ただし密度補償成分 OHC。等値線は表層 400m 深での時間平均場 spiciness の南北勾配(0.1[K/100m]毎)、(c)時間平均場 spiciness の南北勾配。(d-f)(a-c)と同様、ただし OFES 過去再現実験に基づく。

図 3 に OHC と OHC の年々~十年規模標準偏差の空間分布を示す。力学成分 OHC の変動は、亜熱帯循環域で大きく、黒潮続流域に沿って極大となる。一方、密度補償成分 OHC の変動は、北緯 40 度以北の亜寒帯に沿って大きい。北太平洋亜寒帯前線帯は、海洋表層の水温と塩分の大きな南北勾配で特徴づけられ、それらの勾配(北に向かって低温低塩)は互いに密度補償している。つまり、亜寒帯前線帯に沿って気候平均場における spiciness の南北勾配(等密度面に沿った水温勾配、図 3b 等値線、図 3c カラー陰影)が大きい。空間解像度の粗い海洋客観解析デー

タに対して、黒潮続流と亜寒帯前線帯を良く解像する OFES 過去再現実験の結果では、OHC と OHC の変動の其々が、より明確に黒潮続流と亜寒帯前線帯に集中・分離する(図 3d-f)。変動の大きな黒潮親潮続流域における南北-深さ断面で各成分の水温偏差の変動を調べると(図略)、水温の力学成分は、黒潮続流に伴う密度躍層に沿って大きく、傾圧第 1 モードロスビー波に伴う主躍層の鉛直変位により水温偏差が生じていることを示唆していた。一方、密度補償成分は、より浅い構造を持つ亜寒帯前線帯で大きく、等密度面に沿った水温の南北勾配とよく対応し、密度補償した大きな水温勾配を背景場に持つ亜寒帯前線帯が、風系変動に対する応答などで南北に変位すれば、大きな spiciness 偏差が生じることを示唆していた。

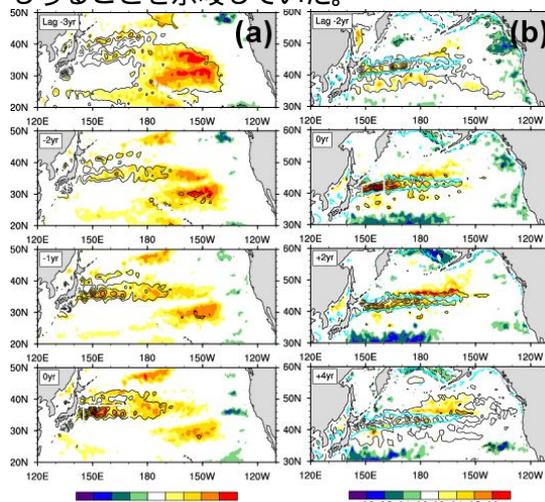


図 4: (a) OFES 過去再現実験データに基づく黒潮続流域で平均した OHC 偏差の時系列に対する OHC 偏差のラグ相関(カラー陰影)・回帰(等値線、0.2K 毎)係数。(b) (a)と同じ。但し、亜寒帯移行領域で平均した OHC 偏差時系列に対する OHC のラグ相関回帰(0.1K 毎)

次に、各成分の OHC 偏差の時間発展の様子を図 4 に示す。力学成分 OHC は、黒潮続流域での変動に 3 年ほど先行して、東部太平洋に南北スケールが大きく振幅の弱いシグナルが現れる。その後、シグナルは西方に伝播しながら、黒潮続流の流軸上に集中し振幅が大きくなる(図 4a)。この傾向は、Sasaki et al. (2013)により提案されたジェットに補足されたロスビー波と整合的である。一方、OHC は、亜寒帯西部の領域で偏差が現れた後、亜寒帯前線帯に沿って東北東に伝播する。これは受動トレーサとしての OHC が、背景の亜寒帯海流に移流されると解釈でき、TS14 の結果と整合的であった。以上の結果は、大きな平均 spiciness 勾配を持つ亜寒帯前線帯の南北変位によって、水温と塩分が補償し合う形で貯熱量偏差が生成され背景流で移流されるとした TS14 の仮説と整合的であることに加え、2 つの形態(ロスビー波と spiciness)の貯熱量偏差の生成や伝播に、

黒潮続流と亜寒帯前線帯が重要な役割を果たしていることを示唆している。

(3) 北太平洋亜寒帯前線帯の南北変位に対する大気と海洋の応答: CFES 感度実験

上に述べた結果から、北太平洋の海洋表層貯熱量の変動には、西岸域の海洋前線帯の南北変位が重要な役割を果たしていることがわかった。前線帯の南北変位の気候系への影響(研究目的課題4)を調べるために、CFESを用いた感度実験を行った(図5)。本実験では、大気と海洋の結合計算を行なう際に、モデルの海洋コンポーネントに付加的な風応力分布を与えることにより、モデルの中で人為的に海洋前線の南北変位を引き起こし、それに対する大気と海洋の結合系としての応答を調べる。与える風応力偏差は、北太平洋の風系変動として典型的な、アリューシャン低気圧の弱化に伴う東風偏差を太平洋中央～東部で与える。既存の標準実験から17組の大気海洋の初期値からスタートし、17メンバーのアンサンブル実験を行った。

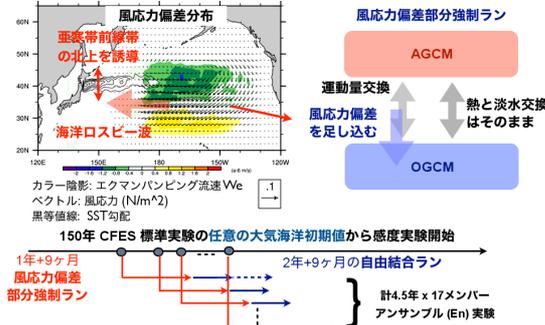


図5: 理想的な風応力偏差強制を与えるCGCM感度実験

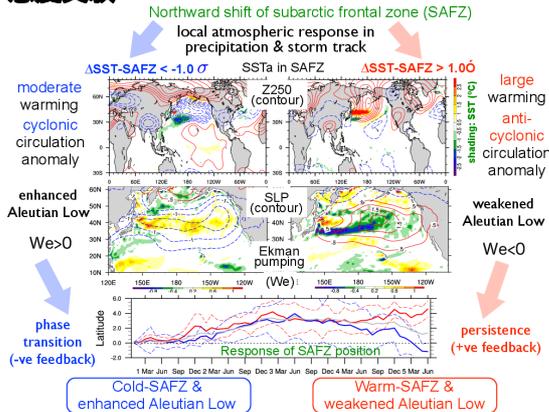


図6: 感度実験で得られた偏西風弱化に対する大気海洋結合応答の2つのレジーム

実験で得られた大気海洋系の応答(感度実験と標準実験の差)のアンサンブルメンバー間のばらつきを調べたところ、積分初期に導入した偏西風弱化という同一の束縛条件に対して、顕著に異なる2つの応答のレジームが得られた(図6)。すなわち、風応力偏差に励起された海洋ロスビー波によって、前線帯が大きく北上し昇温したメンバーについては、アリューシャン低気圧が弱化する大規模な大気循環応答を示し、その海洋へのフィード

バックによって前線の北上と昇温が維持されるレジーム(Warm-SAFZ & Weakened Aleutian Low)、一方、前線帯の北上と昇温が小さいメンバーについては、逆にアリューシャン低気圧の強化と前線帯の南下を促す海洋応答(Cold SAFZ & Enhanced Aleutian Low)を示した。この結果は、海洋前線変動に対して、中緯度大気海洋結合系に系統的な応答はあるものの、その不確実性もまた大きいことを示唆している。

(4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクトと今後の展望

近年、北太平洋の西岸境界流の一つである亜寒帯前線帯に伴う海面水温前線に対する大気応答について国内外で活発に研究されており、大気応答は局所的な大気境界層内だけに留まらず、海盆スケールの大気循環にも影響を及ぼすことが明らかになってきた(Frankignoul et al. 2011, Taguchi et al. 2012, Okajima et al. 2014, Smirnov et al. 2015)。本研究は、北太平洋亜寒帯前線帯の南北変位が、海洋においても西岸境界流の下流域に遠隔的な影響を及ぼすことを明らかにした。このような海洋の東方への遠隔影響は、西岸域の海洋前線変動に伴う海面水温偏差を東方に拡大し、その持続時間スケールを延長する効果もあり、気候系への影響とその予測可能性にとって重要な意味を持つ。さらに、大気海洋結合モデルを用いて行った感度実験から、海洋前線帯に対する大気応答は、固定された海面水温の境界条件に対する応答だけではなく、大気と海洋を結合した系と捉えて両者の応答とフィードバックを議論する必要性を示した。今後は、感度実験で得られた2つの対照的な大気海洋応答レジームの発現機構と、その予測の不確実性への影響を定量評価してゆく必要がある。

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14件)

Nonaka, M., Y. Sasai, H. Sasaki, B. Taguchi, and H. Nakamura, How potentially predictable are midlatitude ocean currents?, Scientific Reports, 査読有り, 6, 2016 doi:10.1038/srep20153

Kida, S. 他 24 名中 20 番目, Oceanic fronts and jets around Japan—a review. J. Oceanography, 査読有り, 71, 2015, 469-497, doi:10.1007/s10872-015-0283-7

Hosoda, S., M. Nonaka, T. Tomita, B. Taguchi, H. Tomita, and N. Iwasaka, Impact of downward heat penetration

below the shallow seasonal thermocline on the sea surface temperature, *J. Oceanography*, 査読有り, 71, 2015, 541-556, doi:10.1007/s10872-015-02757

Taguchi, B. and N. Schneider, Origin of Decadal-scale, Eastward-propagating Heat Content Anomalies in the North Pacific. *J. Climate*, 査読有り, 27, 2014, 7568-7586, doi:10.1175/JCLI-D-13-00102.1

Miyasaka, T., H. Nakamura, B. Taguchi, M. Nonaka, Long-term modulations of decadal-scale climate variability in the wintertime North Pacific since 1950, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有り, 41, 2014, 2948-2955, doi:10.1002/2014GL059696

Qiu, B., S. Chen, N. Schneider, and B. Taguchi, A coupled decadal prediction of the dynamic state of the Kuroshio Extension system. *J. Climate*, 査読有り, 27, 2014, 1751-1764, doi:10.1175/JCLI-D-13-00318.1

Kuwano-Yoshida, Y, B. Taguchi, and S.-P. Xie, Baiu rainband termination in atmospheric and atmosphere-ocean models. *J. Climate*, 査読有り, 26, 2014, 10111-10124, doi:10.1175/JCLI-D-13-00231.1

Di Lorenzo, E.ほか 16 名中 14 番目, 2013: Synthesis of Pacific Ocean climate and ecosystem dynamics, *Oceanography*, 査読有り, 26(4), 68-81, doi:10.5670/oceanog.2013.76

Sasaki, H., B. Taguchi, N. Komori, and Y. Masumoto, Influence of local dynamical air-sea feedback process on the Hawaiian Lee Countercurrent. *J. Climate*, 査読有り, 26, 2013, 7267-7279, doi:10.1175/JCLI-D-12-00586.1

[学会発表](計 21 件)

Taguchi, B., N. Schneider, M. Nonaka, H. Sasaki, Decadal variability of upper ocean heat content in the western boundary current regions, the 26th IUGG General Assembly, June 30, 2015, Prague, Czech Republic

Taguchi, B., M. Nonaka, N. Schneider, H. Nakamura, Response of atmosphere-ocean system to latitudinal shifts of the North

Pacific subarctic frontal zone: A coupled GCM experiment, AOGS 2014 annual meeting, July 29, 2014, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Hokkaido

Taguchi, B., M. Nonaka, N. Schneider, H. Sasaki, Response of ocean-atmosphere system to latitudinal shifts of the North Pacific western boundary current extensions in a coupled GCM. Ocean Scale Interactions Symposium, June 25, 2014, Brest, France

Taguchi, B., Large-scale ocean atmosphere interaction enhanced by oceanic frontal variability in the North Pacific, CLIVAR WGOMD Workshop on High Resolution Ocean Climate Modeling, April 8, 2014, Kiel, Germany

Taguchi, B., M. Nonaka, N. Schneider, H. Nakamura, Climatic influences of decadal-scale latitudinal shift in the North Pacific subarctic frontal zone, Frontal Scale Air-Sea Interaction Workshop, August 6, 2013, Boulder, Colorado, USA

田口文明, 野中正見, 中村 尚, Emanuel Di Lorenzo, 黒潮続流域とカリフォルニア海域の物理環境の相互関係, 水産海洋学会シンポジウム「魚種交替のシナシス- 気候変動による海洋生態系・浮魚資源変動機構及びその科学的理解に基づく社会への貢献-」, 2013年3月21日, 東京海洋大学(東京都港区)

[図書](計 1 件)

田口文明・岡英太郎・佐々木克徳・杉本周作・見延庄士郎、発行者:社団法人日本気象学会、印刷者:(株)協有社、黒潮続流域の大気海洋相互作用と北太平洋十年規模変動、気象研究ノート「気候系の hot spot:中緯度大気海洋相互作用の最前線」(11 章), 2016, 印刷中

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田口 文明(Taguchi, Bunmei)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・主任研究員
研究者番号: 80435841

(2) 連携研究者

佐々木 英治(Sasaki, Hideharu)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・主任研究員
研究者番号: 50359220