

# 黒潮とメキシコ湾流にて観測される海面水温の同期について

\* 神山 翼<sup>1</sup>・三浦裕亮<sup>2</sup>・木戸晶一郎<sup>2</sup>

(1: お茶大院理, 2: 東大院理)

※本研究は、京都大学防災研究所で行われた「異常気象研究会 2018」にて発表した内容を、加筆修正したものである。

## 1 はじめに

2018 年の上半期には、黒潮とメキシコ湾流<sup>\*1</sup>の両者で、平年に比べて非常に高い海面水温 (SST) が観測された (図 1a). 定量的には両海域で 2 標準偏差を超える海面水温が広く散見されたが、気候系における西岸境界流の特異性を考慮すると、これを偶然の一致とみるのは不自然であろう。そこで、実際に黒潮 ( $35^{\circ}\text{N}$ - $45^{\circ}\text{N}$ ;  $80^{\circ}\text{W}$ - $50^{\circ}\text{W}$ ) とメキシコ湾流 ( $35^{\circ}\text{N}$ - $45^{\circ}\text{N}$ ;  $140^{\circ}\text{E}$ - $170^{\circ}\text{E}$ ) において SST の領域平均を取り、その時系列を計算したところ、両海流 SST の同期が顕著に現れた (図 1b, 1c). それゆえ、ここに何か面白い物理があることを疑うのは自然であろうと考え、この現象を**境界流同期 (Boundary Current Synchronization; BCS)** と名付けて、その性質を調査することにした。

BCS に似た現象を調べている先行研究は、数少ないながら存在する。Gallego and Cessi (2001) (以下 GC01) は、少なくとも我々が知る限りで唯一、BCS のような現象を理論的アプローチによって予言した研究である。GC01 は、学部生がよく習うような古典的な西岸境界流モデルを「面白そうだから 2 個くつつけ

てみた」という趣旨の数理モデルを提案した。彼らのモデルにおいてあるパラメータを選ぶと、西岸境界流が同期する解が得られるが、その解は我々が見ている BCS と (少なくとも時系列の見た目が) よく似ている。仮に現実の BCS が、GC01 が 17 年前に得た理論解によって記述されるべきものならば、

- 太平洋と大西洋がそれぞれ異なる固有振動数を持ち、帶状平均の大気が 2 つの海流の情報を媒介することで同期させるのが BCS である
- BCS は海洋の受動的応答ではなく、中緯度大気海洋結合モードである

という結論になる。しかし当然ながら、このモデルが現実の BCS の本質を捉えているかどうかは未解明であり、それは今後我々が解決したい問題でもある。

一方、Kelly and Dong (2004) (以下 KD04) は、(やはり我々が知る限りで唯一の) BCS のような現象の観測的先行研究である。KD04 は、蓄熱量偏差に経験的直交関数 (EOF) 解析を行うことにより、その第一モードに両海流の共通な変動成分を検出した。KD04 は、そのメカニズムとして北極振動 (AO)<sup>\*2</sup>との関係を主張したが、16 年前のデータの長さと解像度から得られた結論の頑健性は、今日の基準からすると限定的であると言わざるを得ない。

2020 年現在、最先端のデータを用いると、SST だけ

\*1 厳密にはこれらの海流の「統流域」であるが、以下では簡単のため省略する。

\*2 北半球環状モード (NAM) と同一の意味で使われることが多い。

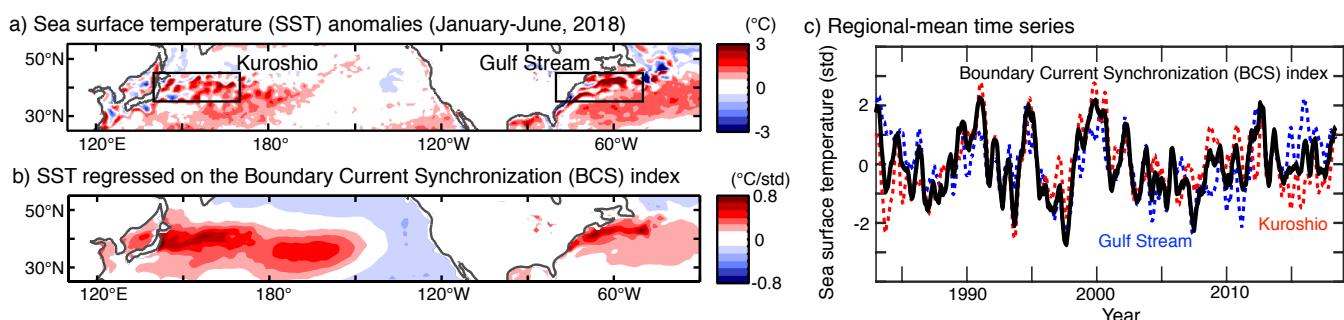


図 1 黒潮とメキシコ湾流にて観測される海面水温の同期現象。 (a): 2018 年前半に観測された海面水温偏差。 (b): BCS インデックスへの海面水温回帰図 (1982-2018)。 (c): BCS インデックス (黒), メキシコ湾流 ( $35^{\circ}\text{N}$ - $45^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{W}$ - $50^{\circ}\text{W}$ ) (青) および黒潮 ( $35^{\circ}\text{N}$ - $45^{\circ}\text{N}$ ,  $140^{\circ}\text{E}$ - $170^{\circ}\text{E}$ ) (赤) における領域平均海面水温偏差。

でなく、海面高度、海面熱フラックスにも両海流の同期を確認することができる。特に、西岸境界流付近の SST を決める力学過程の重要性は、黒潮とメキシコ湾流を個別に調べた多くの先行研究とも整合的である。衛星による高解像度データの十分な蓄積、良質な再解析データ、そして全球気候モデル (GCM) を手に入れた現在、「境界流同期 (BCS)」という現象の見方を確立し、その物理的メカニズムと中緯度気象への影響を明らかにすることは有益であろう。

本研究では、まず次節で既知の気候モードとの関係を確認する。次に、第 3 節では BCS を海洋側の環状モードとして解釈できる可能性を提示し、第 4 節では BCS が中緯度における異常気象の理解に役立ちうるかを探る。最後に、第 5 章では結論と今後の課題をまとめるとする。

## 2 既知の気候モードとの関係

BCS は極めて単純なデータ解析によって見出された現象であり、仮にそれが未発見の物理モードと解釈すべきものであったとしても、既知のモードとの関係が全くないとは考えづらい。そのため本節では、まず BCS を既知のモードの文脈で解釈することで、関係性を整理する。以下では、解析期間はすべて 1982 年 1 月から 2018 年 7 月である。

まず、前述の黒潮 ( $35^{\circ}\text{N}$ - $45^{\circ}\text{N}$ ;  $80^{\circ}\text{W}$ - $50^{\circ}\text{W}$ ) とメキシコ湾流 ( $35^{\circ}\text{N}$ - $45^{\circ}\text{N}$ ;  $140^{\circ}\text{E}$ - $170^{\circ}\text{E}$ ) の領域について、各点でトレンドを除去した SST 偏差の領域平均時系列を計算し、それぞれを自身の 1 標準偏差で規格化した。次に、この 2 つの規格化時系列を平均した時系列を **BCS インデックス** として定義し、この時系列が記述する変動を調査した。

まず、BCS は偏西風ジェットの南北移動と不可分であることが判明した。具体的には、300 hPa 面と 850 hPa 面の東西風について BCS インデックスへの回帰図を計算すると、BCS インデックスが正のとき（すなわち、西岸境界流が共に暖かいとき）、下層から上層までジェット北偏の強いシグナルがあり、逆に BCS が負のときにはジェット南偏が見られることがわかった。この偏西風ジェットの南北移動と西岸境界流の SST 変動との関係は、それを代表するような領域平均時系列をプロットすることによっても明確に確認された。

そこで次に、SST と 850 hPa 東西風について、特異値分解 (SVD) 解析を行ったところ、SVD 第一モード (SVD1) に BCS と酷似したパターンが検出された。SVD 解析を行うと、2 つの気候変数について別々の空間パターンが得られ、そのパターンに各々の元データを射影して得られる 2 つの時系列の共分散を最も良く説明するものが第一モードとして定義される。本解析では、SST 側と東西風側の SVD1 時系列は互いの分散を 53% も説明するので、このデータは SVD 解析に適したものであると言える。

東西風側の SVD1 時系列は、北半球環状モード (NAM) のインデックスと 0.74 という高い相関 (95% 信頼区間で有意) を持つ。この時系列は、従来の NAM の低周波成分を捉えつつ、中緯度海洋との関係がより強い時系列であると言える。一方、SST 側の SVD1 時系列は、太平洋十年規模振動 (PDO) のインデックスと 0.73 という高い相関 (95% 信頼区間で有意) を持つ。この時系列は、従来の PDO の特徴を捉えつつ、大西洋にも強いパワーを持つ時系列であると言える。以上をまとめると、BCS は PDO 内部変動と NAM 低周波が共有する変動成分であると言えるだろう。これは、PDO は北太平洋内部変動成分と熱帯強制成分に分解できると主張する先行研究 (e.g., Newman et al., 2016) とも整合する。

この結果をもう少し野心的に解釈すると、従来はある領域の EOF 第一モードとして定義されて独立なモードとして理解してきた PDO と NAM は、上記のように SVD によってモードの取り出し方を少し変えるだけで、互いの分散を 53% も説明するインデックスが定義できることになる。根拠薄弱な憶測をあえて述べると、PDO の北太平洋内部変動成分と NAM 低周波成分は同一の大気海洋結合現象として理解できる可能性を秘めていると言えるかもしれない。

## 3 BCS を海洋側の「環状モード」として理解する

本節では、前節で得た SVD 時系列の意味をもう少し深く考えてみることにする。まず、東西風側の SVD1 は、ジェットの南北移動であるということは頑健である。いま、850 hPa 東西風の南北差を表すインデックスとして、太平洋・大西洋の南側 ( $35^{\circ}\text{N}$ - $45^{\circ}\text{N}$ ,  $120^{\circ}\text{E}$ - $0^{\circ}$ ) および北側 ( $45^{\circ}\text{N}$ - $55^{\circ}\text{N}$ ,  $120^{\circ}\text{E}$ - $0^{\circ}$ ) の領域

平均の差をとった時系列を計算すると、その時系列は SVD1 の時系列と 0.86 もの非常に高い相関（95% 信頼区間で有意）を示す。この結果は、NAM は慣例として EOF で定義されるが、東西風の南北差で定義する場合があることとも整合する。これと同じような思想で、SST でも同じ領域で南北差インデックスを計算すると、SVD1 の時系列と 0.84 というやはり非常に高い相関（95% 信頼区間で有意）を示す。つまり実は、SST 側の SVD1 も、SST の温暖域の南北移動を記述するモードに他ならないということである。

上記の根拠により、SVD1 は「偏西風ジェットや SST の南北移動は、太平洋と大西洋の両海盆で同位相になりやすい」ことを捉えていることになる。実際、序節で紹介した GC01 の海盆結合境界流モデルでも、SST の「南北双極子」的な振る舞いは再現される。それならば、BCS は海洋側の「環状モード」であるとして理解してもよく、**北半球海洋環状モード (Northern Oceanic Annular Mode; NOAM)** のように呼ぶべきものかもしれない。換言すると、「北半球中緯度の偏西風ジェットや SST の南北移動には海盆をまたぐ同期モードが存在し、特に（ミクロスケールの自由度が存在する）西岸で強調されるのが BCS である」と理解するのが筋が良さそうである。

BCS が環状モードであるという立場をとるならば、大気側との類推により、南半球にも探してみたくなる。実は、ブラジル海流とアガラス反転流も北半球と同様に同期しており、こちらは南半球海洋環状モード (Southern Oceanic Annular Mode; SOAM) と呼べるものかもしれない。ただし、北半球と同様に SVD 解析を行うと、NOAM は中緯度に SVD1 のシグナルが限定されるのに対し、SOAM は熱帶強制と不可分な SVD1 が取り出される。NOAM が中緯度の固有

モード的振る舞いを呈するのに対し、SOAM はエルニーニョ南方振動 (ENSO) 等の熱帶強制が主であるとすれば、SOAM 時系列において 3-8 年程度の周期が卓越することと整合する。

NOAM に関する未解決問題の一つとして、NAM との主従関係が挙げられる。すなわち、BCS や NOAM は、大気側のモードに強制的に応答しているのか、あるいは大気海洋結合系をなすのかという問題である。慣習的には、中緯度の海洋は大気に受動的だと考えられる傾向があるが、経年変動以上かつ半球規模ならば結合系をなしても不思議はない。たとえば Ogawa et al. (2012) 等によると、いわゆる「eddy-driven jet」は SST 前線の位置に強く依存することが知られている。また、前節に示したような PDO との関係を考えると、海洋側の内部変動は少なくとも十年規模のタイムスケールにおいては積極的な役割を果たすと考え方が先行研究との整合性も良い。NAM と NOAM を合わせて、**相互作用環状モード (interactive Annular Mode; iAM)** のようなものが定義できるかどうかを精査することは、今後の重要な課題である。

#### 4 BCS は中緯度における異常気象の理解に役立ちうるか？

BCS が偏西風ジェットの低周波成分に重要な役割を果たすならば、中緯度における異常気象の理解にも役立ち得る。そこで本節では、2018 年の北半球夏の猛暑は、黒潮およびメキシコ湾流の SST が高かったこととどのように関係しているかを調べた。本節の結果やその解釈についてはまだ極めて予備的な段階であるがご容赦願いたい。

まず 7 月の地表気温の BCS インデックスへの回帰

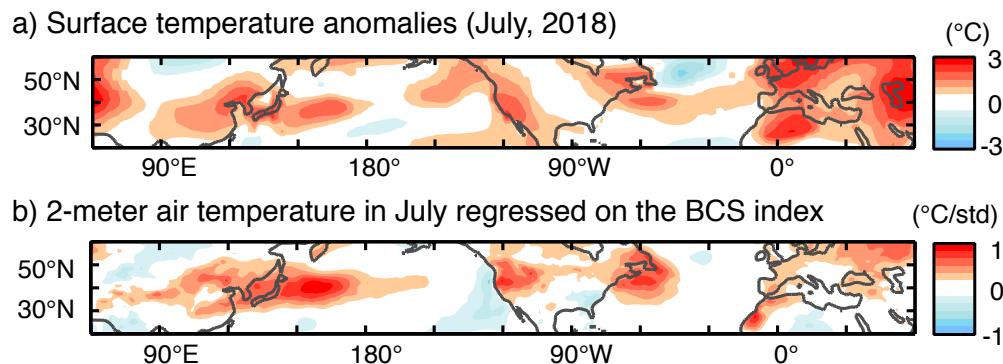


図 2 境界流同期と中緯度の異常気象との関係。 (a): 2018 年 7 月に観測された地上気温偏差。 (b): BCS インデックスへの 2 m 気温回帰図 (1982-2018; 7 月のみ)。

図を調べてみると、それが2018年7月の地表気温のパターンと酷似していることがわかる（図2）。前節述べた通り、この解釈は2通り考えられる。まず1つは「中緯度海洋は大気に受動的である」との慣用的な理解に基づき、ジェットの位置がSST（地表気温）のパターンを決めたとする見方である。この場合、NAMが原因で、NOAMが結果であると考えることになる。しかし、もう1つの見方として、偏西風ジェットの位置とSSTが（すなわちNAMとNOAMが）大気海洋結合系としてこの地表気温パターンを選択したという考え方もありうる。この場合は、BCSやNOAMを深く研究することで、我が国の異常気象をもたらすジェット北偏の理解が1ステップ進むことになる。

前節で定義したSSTの南北差時系列をNOAMのインデックスとして用いて、2m気温へのNOAM回帰図に2m気温の元データを射影した時系列は、NOAMインデックスと低周波において顕著な同期を呈する。さらにこの時系列は、2018年7月の地上気温のパターンに地上気温のデータを射影した時系列ともよく揃う。経年変動以上の時定数でこれらの時系列がよく揃うということは、大気のメモリーの少なさを考えると、多少なりとも結合系を疑いたくなる。

また、回帰図を見る限りは2018年7月の降水についても同様のことが言え、この解釈も気温と同様に2通りの解釈が考えられる。すなわち、偏西風ジェットの位置がSSTと降水パターンを決めたか、あるいは偏西風ジェットの位置とSSTが大気海洋結合系としてこの降水パターンを選択したという解釈である。いずれにせよ、NAMとNOAMが結合系なのか否かという点がここでも重要な問題となる。

## 5 結論と今後の課題

最後に、本研究の結論と今後の課題を再掲する。まず、本研究の最も重要な結論は「黒潮とメキシコ湾流のSSTは、偏西風ジェットの南北移動を通してアメリカ大陸をまたいで海盆間の情報をやりとりし、経年変動～10年規模変動程度の時間スケールで同期している」ということである。本研究では、まずこの同期現象を「境界流同期（BCS）」と名付け、BCSはPDO内部変動とNAM低周波が共有する変動成分であることを示した。次に、BCSは北半球海洋環状モード（NOAM）のようなフレームワークで理解しうること

を示し、BCSは日本の異常気象と密接に関係することを指摘した。

今後の課題としては、BCSは偏西風ジェットの変動に中緯度海洋が受動的に応答することによって起こる現象であるのか、あるいは中緯度の大気海洋結合系をなしているのかという点をより詳しく調べるのが最も重要である。また、BCSの長期トレンドについては、西岸境界流は温暖化が他の海域よりも速いことが知られており、ジェットの極側シフトと関連づけて議論することで我々の理解が進む可能性がある。

また、理論や観測データ、再解析データの解析だけでBCSのメカニズムにこれ以上踏み込むのは困難なので、今後はモデル実験等が必須となる。昨今では海洋側の解像度を高くしたモデルを用いることにより、中緯度の大気海洋結合現象における海洋の重要な役割が理解され始めてきた。実際、予備的な解析では、海洋側の解像度を高くしたGCMでもBCSが検出されている。そのような最新のモデル実験を通して、西岸境界流が果たす役割を再考することは、気候系の理解を深めていく上で不可欠であろう。

## 参考文献

- Gallego, B. & Cessi, P. Decadal variability of two oceans and an atmosphere. *J. Climate* **14**, 2815–2832 (2001).
- Kelly, K. A. & Dong, S. The relationship of western boundary current heat transport and storage to midlatitude ocean-atmosphere interaction. *Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction, Geophys. Monogr.* **147**, 347–363 (2004).
- Newman, M. et al. The Pacific Decadal Oscillation, Revisited, *J. Climate* **29**, 4399–4427 (2016).
- Ogawa, F., et al. A. Dependence of the climatological axial latitudes of the tropospheric westerlies and storm tracks on the latitude of an extratropical oceanic front. *Geophys. Res. Lett.* **39** (2012).