

地球温暖化時の熱帯太平洋東西 SST 勾配の変化に関する

理論的考察

平岩 純、渡部 雅浩（東京大学大気海洋研究所）

1. はじめに

熱帯西太平洋の海表面水温（Sea surface temperature, SST）は、ビャークネスフィードバックに伴う赤道湧昇による東部での冷却効果が働く結果、気候学的に西部で高く、東部で低いという東西勾配が維持されている。気候モデルを用いたシミュレーションでは、この熱帯太平洋の東西 SST 勾配は温暖化時に弱まることが示唆されているが、定量的に不確実性が大きい。

温暖化が進んだ気候で東西 SST 勾配を変化させるメカニズムはいくつも提唱されているが、本研究では過去のレビューなどにに基づき、次の3つのメカニズムを主要なものとする。すなわち、全球水収支で制約されるウォーカー循環の弱化、平均 SST に依存する蒸発効率の違い、および海洋力学サーモスタットである。前者2つのメカニズムは温暖化時に東西 SST 勾配を弱化させる一方、後者は強化させるように働く。

最近のレビュー研究では、将来の東西 SST 勾配の弱化は複数のメカニズムの競合と集合的效果で説明される(Watanabe et al. 2024)。しかし、これまで指摘されてきた東西 SST 勾配を変化させるメカニズムの中には、過去には重要であったが将来は効果がなくなってゆくものも含まれる。また、個々のメカニズムは異なる時間スケールで SST 勾配を異なるように変化させるため、集合的效果といっても簡単に理解可能ではない。

そこで、本研究では将来の温暖化が進んだ気候における東西 SST 勾配の変化に注目し、主要と考えられる3つのメカニズムをシンプルに定量化する低次の大気海洋結合方程式系を構築するという独自のアプローチにより、熱帯太平洋東西 SST 勾配の変化のメカニズムの理解を試みる。温暖化強制のメカニズムがどう働くにせよ、熱帯太平洋の大気海洋結合相互作用が応答を決める上で本質的であることを考慮し、ENSO の理論として提案された充填―再充填振動モデルをベースに、温暖

化強制メカニズムを組み込んだ。構築した方程式系の理論的な解構造を調べ、どのような条件で SST 勾配が弱化あるいは強化するか、といったパラメータ依存性を明らかにすることを本研究の目的とする。

2. 低次熱帯太平洋結合モデル

本研究で構築した方程式系のベースになった、充填―再充填振動モデルの元になった非線形2ボックスモデル (Jin 1996, Science) を式(1-7)で示す。これは平均場を含むトータルの場を対象とし、熱帯西部・東部太平洋の SST(T_w, T_e)および熱帯西部の水温躍層の厚さ(h_w)を予報変数とする(式 2,7)。 T_e の定常解は日射や潜熱フラックスなどを表す緩和項による加熱(式 2 の右辺第一項)と湧昇流による冷却(式 2 の右辺第二項)のつり合いによって決まっている。式(3)で湧昇流速度(w)を、式(4)で東部太平洋の亜表層水温(T_{se})を、式(5)で東西風応力(τ)を定めている。東西風応力は、地球自転に伴う成分(τ_0)と東西 SST 勾配に依存する成分の和で書き表される。式(1-7)を時間積分することにより T_e, h_w の時間発展が得られ、約 1/4 波長ずれて振動し（後者が先行する）、その周期は 4 年弱である。 T_e の振幅(5K 程度)がやや大きいものの、これらの特徴は実際に観測されている ENSO と整合的である。

$$\frac{dT_w}{dt} = -\varepsilon_t(T_w - T_b) \quad (1)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = -\varepsilon_t(T_e - T_b) - \frac{M(w)(T_e - T_{se})}{H_m} \quad (2)$$

$$w = -\alpha\tau \quad (3)$$

$$T_{se} = T_w - (T_w - T_{b0}) \left\{ 1 - \tanh \left[\frac{H + h_e - z_0}{h^*} \right] \right\} / 2 \quad (4)$$

$$h_e = h_w + bL\tau \quad (5)$$

$$\tau = \tau_0 - \mu(T_w - T_e) \quad (6)$$

$$\frac{dh_w}{dt} = -rh_w - \frac{rbL\tau}{2} \quad (7)$$

本研究ではこの方程式系に温暖化のメカニズムを組み込む修正を行い簡易モデルを構築したが、これを式(8-16)で示す。修正したところを赤字で示している。式(8-9)右辺に温暖化に伴う大気上端での放射強制力(F)を与える。この放射強制は、式(15)を通じて全球平均地表気温の変化 ΔT と結びつけられる。 $F = 0$ のときの定常解が現在気候の平均状態を、 $F > 0$ のときの定常解が温暖化時の平均状態を表す (CO₂濃度4倍増はおよそ $F=8\text{Wm}^{-2}$ に相当)。

3つのメカニズムのうち、海洋力学サーモスタットは、表層水温と亜表層水温が異なるペースで昇温することで表現され、フィードバックと結合して温暖化応答を増幅する。全球水収支で制約されるウォーカー循環弱化的メカニズムは、式(14)右辺第一項で示したように、東西風応力のうち地球自転に伴う成分を、全球平均地表気温変化に比例する形で減少させることにより表現する。また、式(8-9)右辺第一項のように、緩和項を放射対流平衡温度とその海域の SST における潜熱フラックスの差に比例する形で記述することで、平均 SST に依存する蒸発効率の違いを表現する。

$$\frac{dT_w}{dt} = -(Q_e(T_w) - Q_e(T_b)) + \beta F \quad (8)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = -(Q_e(T_e) - Q_e(T_b)) - \frac{M(w)(T_e - T_{se})}{H_m} + \beta F \quad (9)$$

$$Q_e(T_{e0}) - Q_e(T_b) = \varepsilon_t(T_{e0} - T_b) \quad (10)$$

$$w = -\alpha \tau \quad (11)$$

$$T_{se} = T_w - (T_w - T_{b0}) \left\{ 1 - \tanh \left[\frac{H + h_e - z_0}{h^*} \right] \right\} / 2 \quad (12)$$

$$\tau = \tau_0(1 - \gamma \Delta T) - \mu(T_w - T_e) \quad (13)$$

$$\frac{dh_w}{dt} = -rh_w - \frac{rbL\tau}{2} \quad (14)$$

$$\Delta T = \frac{F}{\lambda} \quad (15)$$

$$\beta = \rho C_p H \beta^* \quad (16)$$

3. 結果と考察

あるパラメータを選択して CO₂濃度4倍増時の放射強制を与えたときの定常解を計算した結果、3つのメカニズムが定性的に過去の研究と整合的な効果を示すこと、および気候モデル群の CO₂濃度4倍増実験で予測されているような、東西 SST

勾配の 1°C 弱の減少を再現可能であることがわかった(図 1)。

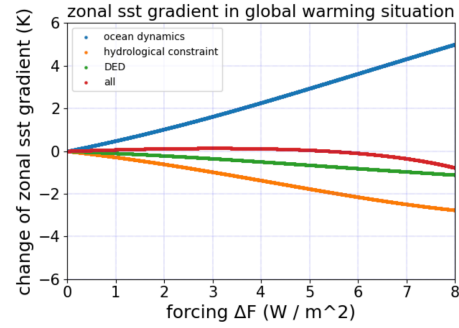


図 1 温暖化強制(横軸)に対する東西 SST 勾配の変化(縦軸)の例。赤線が全てのメカニズムを組み込んだ計算結果を示す。青、橙、緑がそれぞれ海洋力学のメカニズム、全球水収支で制約されるウォーカー循環弱化的メカニズム、平均 SST に依存する蒸発効率の違いのメカニズムの効果を表す。

簡易モデルの解を特徴づけるパラメータを4つ選択した(式(8)–(16)の青字で示す)。4つのパラメータとは、SST が放射対流平衡温度にどのように近づいていくかを示す海面フラックスの緩和時定数 ε_t 、東西 SST 勾配と東西風応力を関係づける大気海洋結合係数 μ 、温暖化に伴うウォーカー循環弱化的度合いを決めるパラメータ γ 、大気上端の放射強制のうち海面に到達する割合を示すパラメータ β^* である。これらのパラメータを様々に変えて、以下の4つのメトリックのパラメータ依存性およびそのメカニズムを調べた。すなわち、① 現在気候における東部太平洋の SST (24.5~26.5°C)、② 現在気候での ENSO の線形安定性および振幅 (1~2K)、③ CO₂濃度4倍増時の西部太平洋の昇温量(3.5~4K)、および④ CO₂濃度4倍増時の東西 SST 勾配の変化 (0.2~1.2K の弱化)である。なお、それぞれのメトリックの観測や気候モデルによる推定値を括弧内で示した。

現在気候に関するメトリックである①と②は ε_t と μ にしか依存しない。それらの依存性を図 2 に示すが、 ε_t が小さいほど放射対流平衡への緩和が弱く、加熱が不十分であるため、また μ が大きいほど、フィードバックがより強く働くことにより、湧昇流による冷却効果が強まるため、東部太平洋の定常解の SST が低く、東西 SST 勾配が強くなる。ENSO の安定性は μ に対して敏感であり、東部太平洋の SST が 24.5°C 近傍になるよ

うな μ の範囲で線形不安定となり、自励振動する ENSO 解が生じることがわかった。

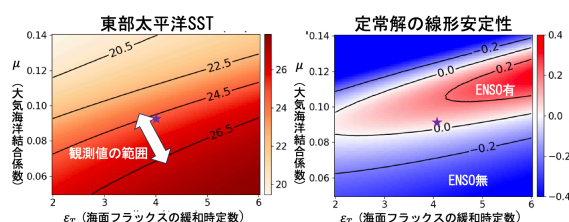


図2 $\varepsilon_t - \mu$ 空間における、現在気候の東部太平洋の定常解の SST(左)および ENSO の線形安定性 (右)。右図は赤い領域で ENSO のような自励振動解の存在を示す。

次に温暖化時の気候については、 γ と β^* 、 ε_t と μ に分けて解析を行った。まずは、図2で現在気候が観測に近い値を示すパラメータ ε_t, μ の組み合わせを一つ選び(紫色の星印で示した)、温暖化応答の γ と β^* に対する依存性を調べた(図3)。図から読み取れるように、CO₂濃度4倍増時の西部太平洋の昇温量は、 β^* が大きいほど地表面に到達するエネルギーが増加するため大きくなるが、 γ に対する依存性はない。東西 SST 勾配については、 β^* が大きいほど西部太平洋の昇温量が大きいため、湧昇流速のうち東西 SST 勾配に起因する部分が増大し、東部太平洋において湧昇流による冷却効果が強化されるため昇温量が小さくなることにより東西 SST 勾配が強化される。また、 γ が大きいほど全球水収支の変化によるウォーカー循環弱化的メカニズムが強く働くため、東西 SST 勾配が弱化する。また、CO₂濃度4倍増時の西部太平洋の昇温量および東西 SST 勾配の変化の両方が気候モデルによる推定と整合的であるようなパラメータがほとんど存在しないこともわかった。

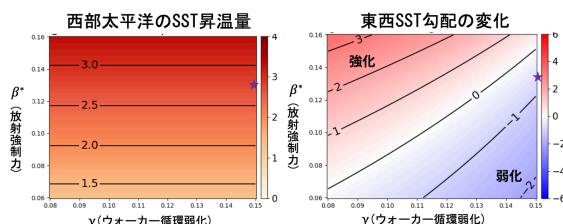


図3 $\gamma - \beta^*$ 空間における、CO₂濃度4倍増時の西部太平洋の昇温量(左)および東西 SST 勾配の変化 (右)。右図は赤が強化、青が弱化を表す。

次に、図3でCO₂濃度4倍増時の東西 SST 勾配の変化が気候モデルによる予測に近く、また西部

太平洋の昇温量が大きい γ, β^* の組み合わせを選択し(紫色の星印で示した)、温暖化応答の ε_t と μ に対する依存性を調べた(図4)。図から読み取れるように、CO₂濃度4倍増時の西部太平洋の昇温量は、 ε_t が大きいほど、また μ が大きいほど小さい。東西 SST 勾配の変化については、 ε_t が大きいほど現在気候の定常解の東部太平洋の SST が高く、東西 SST 勾配が弱いため、湧昇流速のうち東西 SST 勾配に起因する部分が小さく、他のメカニズムの効果も合わさって温暖化時に東部太平洋の湧昇流による冷却効果が弱体化し東部太平洋の昇温量が大きくなり、結果として東西 SST 勾配が弱化的ことがわかった。 μ に対する依存性も同じメカニズムによって説明することができ、 μ が小さいほど現在気候の定常解の東部太平洋の SST が高く、東西 SST 勾配が弱化する。また、CO₂濃度4倍増時の西部太平洋の昇温量および東西 SST 勾配の変化の両方が気候モデルによる推定と整合的であるようなパラメータは図の左下の領域に存在することがわかったが、図2で示した通り、このようなパラメータでは現在気候において ENSO のような振動解が存在しない。

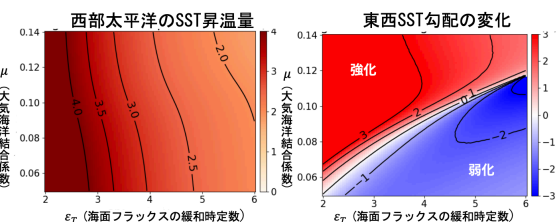


図4 $\varepsilon_t - \mu$ 空間における、CO₂濃度4倍増時の西部太平洋の昇温量(左)および東西 SST 勾配の変化 (右)。右図は赤が強化、青が弱化を表す。

図4(右)で示したCO₂濃度4倍増時の東西 SST 勾配の変化の ε_t, μ に対する依存性は、現在気候における東部太平洋の SST やそれに伴う東西 SST 勾配の強さ・湧昇流の強さと合わせて考えると理解できる。このことを端的に示すのが図5で、これは ε_t の値を変化させ、他の3つのパラメータを固定して計算を行い、結果を横軸が現在気候の定常解の東部太平洋の SST、縦軸が西部太平洋の昇温量(左)および東西 SST 勾配の変化(右)として描画したものである。図から読み取れるように、CO₂濃度4倍増時の西部太平洋の昇温量は、現在気候の定常解の東部太平洋の SST が高いほど小さい。また、CO₂濃度4倍増時の東西 SST 勾配の変

化に対する各メカニズムの効果は、現在気候の定常解の東部太平洋の SST が高いほど、海洋力学の効果は小さく（図 5 右の青線、現在気候において東西 SST 勾配が弱く、ビャークネスフィードバックも弱い）、全球水収支の変化によるウォーカー循環弱化的メカニズムは強く（図 5 右の橙線、東西風応力のうち地球自転に伴う成分の相対的な割合が高く、このメカニズムによる東西風応力のうち地球自転に伴う成分の弱体化が大きく影響するため）、平均 SST に依存する蒸発効率の違いのメカニズムは弱い（図 5 右の緑線、東西太平洋の SST の差が小さいため）ことがわかった。

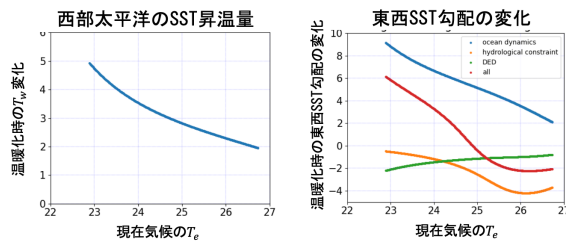


図 5 現在気候の東部太平洋の定常解の SST と、CO₂ 濃度 4 倍増時の西部太平洋の昇温量(左)および東西 SST 勾配の変化(右)の関係。 ϵ_t を変化させ、他の 3 つのパラメータは固定している。

これまでに示したとおり、簡易モデルの計算結果と、観測や気候モデルシミュレーションの結果との整合性については、観測に近い現在気候の定常解と、気候モデルが予測する温暖化応答の両方を満たすようなパラメータの組み合わせはほぼ存在しない。このことは、簡易モデルが現実を単純化し過ぎているか、簡易モデルに組み込んでいないプロセスが気候モデルにおいて重要であることを示唆する。前者の例としては、緩和項を東西で同一の表式で記述しており、東部太平洋の低層雲フィードバックを無視していることなどが、後者の例としては熱帯外で昇温した海水の赤道域への輸送効果のメカニズムなどが考えられる。後者について検証するために、式(12)の T_{b0} （水温躍層以深の水温を表す）を、常に同じ値を用いていたのを変更し CO₂ 濃度 4 倍増時は 2K 昇温することによりこのメカニズムを簡易的にモデルに組み込んで再度温暖化応答を求めた。その結果を図 6 に示すが、これは ϵ_t, μ を変化させて温暖化応答を計算した結果を、横軸を現在気候の定常解の東部太平洋の SST (左) および ENSO 振幅 (右)、縦軸を

CO₂ 濃度 4 倍増時の西部太平洋の昇温量としてプロットしたものである。点の色は CO₂ 濃度 4 倍増時の東西 SST 勾配の変化を示し、赤が強化、青が弱化、その中でも気候モデルで予測されている 0.2~1.2K の弱化を示すものを緑で示している。緑のマーカーで示した領域に存在する緑色の点が、観測に近い現在気候の定常解と、気候モデルが予測する温暖化応答の両方を満たすパラメータを示している。図から読み取れるように、このメカニズムを組み込むことにより全体的に東西 SST 勾配が弱化し、現在気候と温暖化応答の両方が観測や気候モデルの結果と整合的であるようなパラメータが表れることがわかった（右上では緑の領域に緑色の点が存在しないが、右下では存在することから読み取れる。）

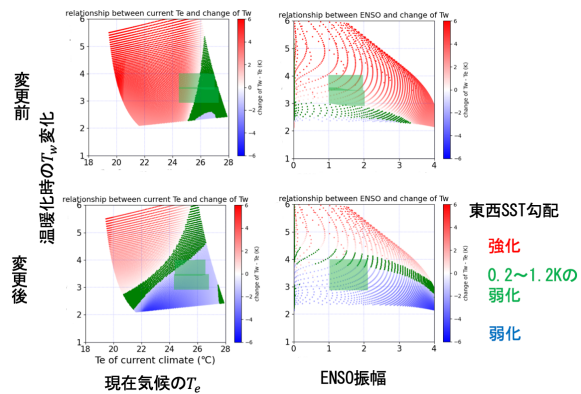


図 6 現在気候の東部太平洋の定常解の SST (左) および ENSO 振幅 (右)、CO₂ 濃度 4 倍増時の西部太平洋の昇温量、東西 SST 勾配の変化の関係性。東西 SST 勾配の変化は点の色で示す。上側 2 枚が水温躍層以深の水温の修正前、下側 2 枚が修正後の結果を示す。

4. まとめ

本研究では、温暖化時の太平洋東西 SST 勾配の変化について、現在気候における大気海洋結合相互作用と、温暖化時の変化を同じ枠組みで示すような方程式系を構築し、解構造の理解やパラメータ依存性に関する理論的考察を行った。本研究の結果から、温暖化時の東西 SST 勾配の変化と現在気候における東西 SST 勾配がパラメータを介して関連付けられる。将来的に、このモデルを用いて気候モデルの不確実性の要因理解が可能になると考えられる。