

— 2023 年度日本海洋学会賞受賞記念論文 —

気候の形成・変動・変化における 大規模な大気海洋相互作用の役割に関する研究*

謝 尚平[†]

要 旨

1980 年代に海洋と大気をつなぐ一つの結合システムとして扱う斬新な研究アプローチが登場した。赤道湧昇域で起きるエルニーニョを説明するピヤークネス・フィードバックに加えて、風・蒸発・海面水温フィードバックが熱帯収束帯の北半球への偏在を説明するために提案され、亜熱帯太平洋南北モードにも適用された。後者は、中緯度大気擾乱が熱帯気候へ影響を及ぼす重要なメカニズムとして、注目されている。1990 年代以降、マイクロ波衛星観測により 1,000 キロメートルより狭い水平スケールを持つ現象が次から次へと発見された。ハワイ西方へ伸びる長い島陰、そして海洋フロントや中規模渦が大気境界層に及ぼす強制がその例である。地球温暖化に伴う海洋循環の変化に関して、風の変化よりは海面浮力強制が支配的であるという重要な結果が最近の研究から示唆された。進行する気候変化に現れる時空間パターンの解明は、海洋学および結合力学の新たな発展につながる。

キーワード：海洋・大気相互作用、南北モード、マイクロ波衛星観測、
温暖化による海洋循環の変化、気候変化に関するエネルギー論

1. はじめに—海洋大気結合力学の夜明け

海洋物理学と気象学は地球流体力学という接点を持つものの、研究対象も時空間スケールも大きく異なります。私が中国から東北大学へ留学した 1985 年当時、海洋・大気結合不安定という概念 (Philander *et al.*, 1984) が登場したばかりで、風の変化に対する海洋の力学調節がゆっくりで定常に達するには時間がかかり、それがエ

ルニーニョからラニーニャへ位相転換をもたらすことも提案されました (McCreary and Anderson, 1984)。いずれの場合も、東部太平洋では SST 偏差 T' が温度躍層の深さ偏差 h' に比例する、いわゆる thermocline フィードバックを仮定しています。

久保川厚先生と花輪公雄先生のアドバイスをを受け、修士一年目はほとんど 600 ページに及ぶ Gill (1982) の大気・海洋力学の教科書を読むのに費やし、そのおかげで基礎力が付いた実感が得られました。特にその第 11 章の赤道波動に惹かれましたが、大気と海洋の波動は別々に扱われ、まだ結合に至っていませんでした。大気と海洋を結合させるとエルニーニョのような自励振動が現れることをとても不思議に感じ、発展性のある研究領

* 2023 年 11 月 21 日受領 2023 年 11 月 29 日受理
著作権：日本海洋学会, 2023 年

† カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリップス海洋研究所
9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0206, USA
e-mail : sxie@ucsd.edu

域と判断し飛び込みました。

結合不安定波動の振る舞いは海面水温 (SST) 方程式に大きく左右されることも分かり, thermocline フィードバックが支配的だと, 結合擾乱が東進する傾向を示します (Hirst, 1986)。赤道太平洋では東風が卓越し, それによって躍層が東へ行くほど浅くなる構造を持っており, thermocline フィードバックが躍層の浅い東部太平洋で支配的で, 西太平洋では小さいと久保川先生が推測しました。そこで東西に傾く躍層が保たれる結合モデルを作成し, 結合フィードバックがどのように ENSO サイクルを起すのかを研究し, 修士論文にまとめ, 創刊したばかりの Journal of Climate に載せました (Xie *et al.*, 1989)。

2. WES フィードバック

1991 年に東北大学で博士の学位を取得し, 山形俊男先生にご推薦いただき, プリンストン大学でポスドクをすることになりました。メンターの George Philander 先生に勧められ, 92 年 2 月にマイアミで開かれた EPOCS という NOAA プロジェクトの研究会に参加しました。エルニーニョを予測するため熱帯太平洋を係留ブイでカバーする TAO 観測網の設置進捗報告 (Hayes *et al.*, 1991) を聞き, スケールの大きさに圧倒されました。(同じ年に海面高度計と, 風速ベクトルを測るマイクロ波散

乱計を搭載した ERS 衛星が打ち上げられました。)

一方, エルニーニョ研究が一段落したところで, 赤道太平洋でなぜ年周期振動が卓越するのか, といった熱帯太平洋の基本場を理解する必要があると, Philander 先生や Mike Wallace 先生が力説しました。東部太平洋に位置するガラパゴス島で 3 月の SST が 9 月より 5 度も暖かく, その鍵は熱帯収束帯 (ITCZ) が北半球に偏在することにあると私は思いました。熱帯収束帯が北半球に遍在するのは北半球の SST が南半球よりも高いから, というのが気象学的な解釈で, 一方北半球の SST はなぜ高いのかは実はあまりよく分かっていませんでした。90 年代半ばまで thermocline フィードバックが結合力学の常識で, 海面フラックスは単なる減衰として扱われていました。しかし, 太平洋では, 水温が高い北緯 10 度あたりで温度躍層が最も浅く, thermocline フィードバックでは SST の南北差は説明できません。そこで風速による蒸発効果を考えてみました。仮に北半球の SST が何らかの原因で少し暖かかったとすると, 相対的に冷たい南半球からの風が赤道を越え, 北半球に吹き込みます。コリオリ力でこの南風が南半球で偏東貿易風を加速し, 海面蒸発を大きくし, SST 擾乱を増幅します。同じく, 北半球では偏東貿易風が弱まり, 正の SST 擾乱も大きくなります。これは今 WES (風・蒸発・海面水温) フィードバックと呼ばれるもので, 南北反対称擾乱を選択的に成長させるようになっています (Fig. 1a)。

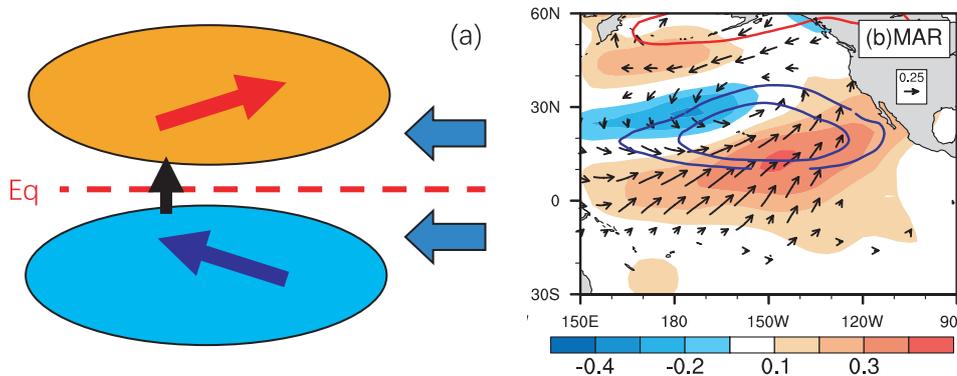


Fig. 1. Meridional modes (a) across the equator and (b) in the subtropics: SST (color shading) and low-level wind (arrows) anomalies. Block arrows in (a) denote the mean easterly winds. In (b), anomalies of SST, 850-hPa wind, and SLP (line contours at 0.1 interval; zero contour omitted, negative in blue) are expressed as correlations with a PMM index. (a) Based on Xie and Philander (1994), and (b) adapted from Ma *et al.* (2017).

当時 thermocline フィードバックが主流で、WES がどれだけ重要かは自信がなく、論文の発表は2年後の1994年を待たなければいけませんでした (Xie and Philander, 1994)。幸い95年にメルボルンで開かれた TOGA プロジェクトの成果をまとめる国際会議 (謝, 1995) で数少ない口頭発表として UCLA の David Neelin 氏に招かれ、大きな反響を得ました。ITCZ の南北非対称性の研究で日本気象学会山本・正野論文賞を受賞しました (謝, 1997)。

その後、WES フィードバックが赤道を挟む大西洋の南北ダイポールモード構造を作るなど (谷本, 2002)、亜熱帯南北モードへと拡張していきました。後者は、冬季中緯度大気擾乱がカリフォルニア沖で SST アノマリーを作り、それが大気傾圧ロスビー波を励起し北東貿易風を変調させ、SST と大気結合パターンが南西方向へ伝播する北太平洋南北モード (PMM ; Fig. 1b) というものです。この PMM が赤道西部太平洋に到達し、エルニーニョをもたらしたりします (Amaya, 2019)。中緯度擾乱が熱帯気候へ影響するものとして、今大きく注目されています (Luongo *et al.*, 2023)。

カリフォルニア沖で低層雲が広がり、海面に到達する太陽放射を変化させ SST との間に正のフィードバックがかかり、PMM に伴う SST 擾乱はそこで最大になります。この低層雲フィードバックが、蒸発の温度依存性から生じる SST 減衰効果に匹敵する強さとなっています (Yang *et al.*, 2023)。この低層雲フィードバックが WES フィードバックと一緒に、北東太平洋から南西方向へ延びる PMM の特徴的な構造を作り出します (Miyamoto *et al.*, 2023)。低層雲域は、赤道太平洋湧昇域と結ぶ Subduction Window (Nonaka *et al.*, 2000) でもあり、中緯度 SST 擾乱が伝わる海洋トンネル効果 (Liu and Alexander, 2007) が提案されていますが、実際温度擾乱は平均流にただ流されるのではなく、圧力を伴う波動として考える必要があります。

3. マイクロ波衛星観測

衛星リモートセンシングは地球観測に革命をもたらしてきました。可視・赤外光を使う衛星センサーは雲があると、海面が見えなくなります。一方、マイクロ波を使

えば、曇っていても海面はちゃんと見えます。マイクロ波散乱計は海上風のベクトル風速まで測れます。それまでの海上観測はまばらにしかない船に頼っていたため、水平規模千キロメートル以下の構造はよく分かっていませんでした。

亜熱帯循環内部領域で観測される、偏東貿易風に逆らう東向き海流 (Fig. 2) はその一例です。ハワイ諸島の西方を流れるハワイ風下反流 (HLCC) は4千メートル級の山々に励起される風応力カールのダイポールに駆動される (Xie *et al.*, 2001) ほかに、その北西に位置する亜熱帯反流 (STCC) は鉛直に分厚いモード水がその北側に溜まってできたものです。それは久保川先生の理論で説明され、東京海洋大学の小橋史明さんが観測から実証したもので (Kobashi and Kubokawa, 2012)、それまでただ流される受け身的な水塊として扱われてきたモード水の力学効果を見事に見出した重要な結果です。

モード水は黒潮続流域で形成されるもので、東北大学の先輩の須賀利雄さんが精力的に研究し多くの成果を収めています。例えば、モード水形成に重要な冬季混合層は続流ジェットの内側で深く (Suga *et al.*, 2004)、温度移流が強く海面熱フラックスが最も大きい続流上で混合層が深い、という低解像度海洋モデルの結果と大きく異なります (Fig. 3)。最近 OFES (Ocean general circulation model for the Earth Simulator) による高解像度 (1/30度) シミュレーションからメソまたはサブメソスケール擾乱が続流域を成層させる効果が示唆されました (Ding *et al.*, 2022)。深い混合層で形成されるモード水が温度躍層へ沈み込むに当たっても中規模渦が大きく寄与する結果が、アルゴフロートを用いた集中観測から得られています (Xu *et al.*, 2016)。

日本南岸の黒潮、またはその東を流れる続流が蛇行し、水温の高い海域で風速が高くなり、水温の低い海域で海上風が弱くなるのが衛星観測から分かりました (Nonaka and Xie, 2003 ; Fig. 4)。大気の力学調節の水平スケールが大きいと、SST フロントの暖かい側の海面付近で大気が不安定化し (SST - T_a が大きい、ただし T_a は海面気温)、鉛直混合が強化し上層風速の大きい空気が海面に届き、海上風が加速します。この風速・SST間の正相関は、大気内部擾乱が SST 変動を駆動する太平洋10年振動 (PDO) のような海盆規模モードとは逆に

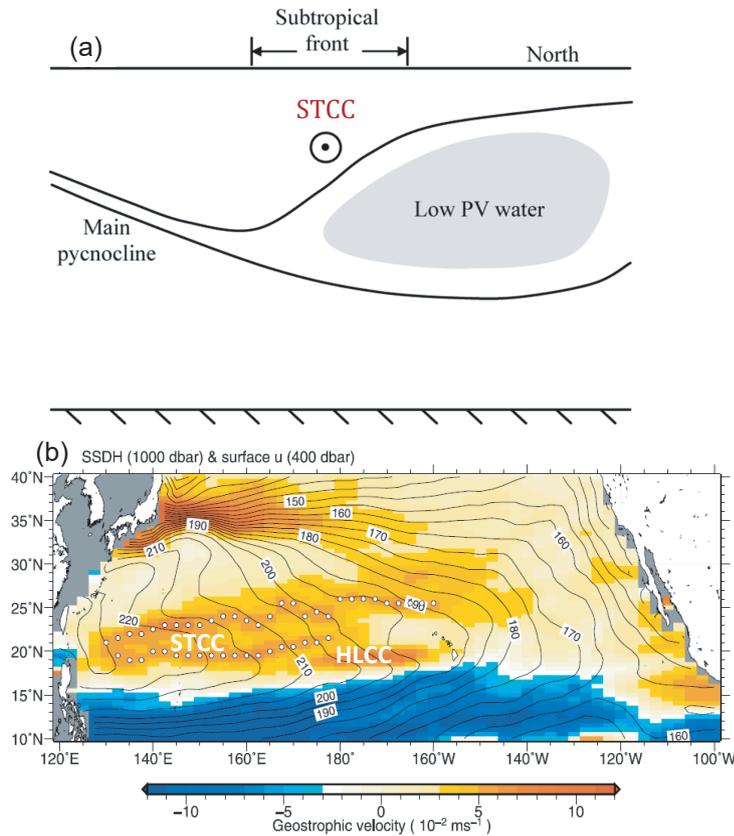


Fig. 2. (a) Schematic meridional density section across the STCC. (b) Annual-mean surface zonal geostrophic velocity relative to 400 dbar (color shade), and sea surface dynamic height referenced to 1,000 dbar (contours in cm). From Kobashi *et al.* (2006).

なっており、フロントスケールでは海洋が大気境界層に影響を及ぼすことを示す確実な証拠です (Small *et al.*, 2008)。

これらの衛星観測結果を踏まえ、北海道大学の谷本陽一さん、現在九州大学の時長宏樹さんがリードして、研究船から GPS ゾンデを打ち上げ黒潮続流の大気境界層への影響をとらえました (Tokinaga *et al.*, 2009)。東京大学の中村尚さんと JAMSTEC の野中正見さんが率いる新学術研究 HotSpot プロジェクト (中村ら, 2019) がそれをさらに発展させ、3 隻の研究船が黒潮続流を挟んで同時観測する快挙を達成しました (Kawai *et al.*, 2015)。

4. 地球温暖化：海洋の変化および役割

2007 年に気候変化に関する政府間パネル (IPCC) による第 4 次評価報告書が発表され、同年 IPCC がノーベル平和賞を受賞し、地球温暖化問題には今までにない関心が集まりました。ちょうど 2008 年にサバティカルを取ることになり、それをきっかけに自分の研究を気候変化へ拡張していこうと考えました。どうせならと温暖化研究で世界をリードする GFDL と NCAR へ行くことにしました。温室効果による海洋の昇温は水平方向に一様ではなく、何らかのパターンを形成するのだろうと簡単に思い、そのパターンを研究することにしました。その結果、幾つかのことが分かりました。まずは熱帯の降水は海面水温パターンによって決まり (Fig. 5), しかもその SST パターンは海洋と大気間のフィードバックによって作ら

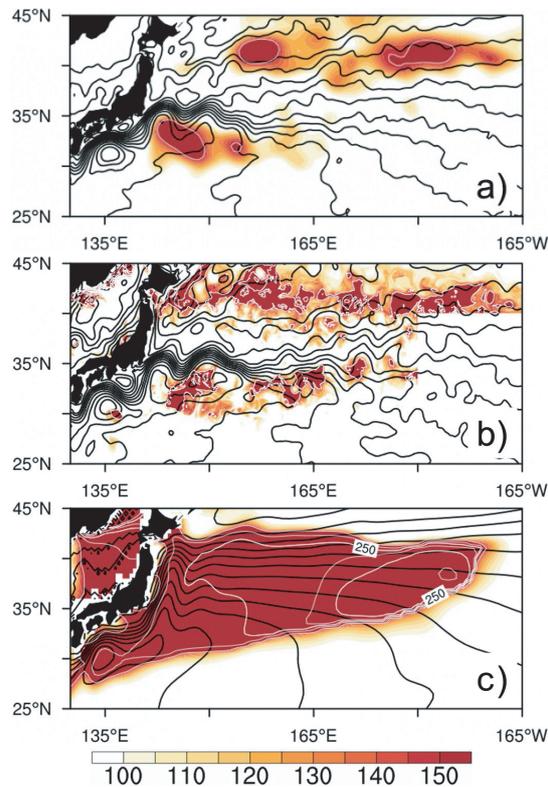


Fig. 3. March mixed layer depth (color shade and white contours at 50 m intervals) from (a) Argo observations, (b) 1/30° and (c) 1/2° OFES simulations, superimposed with sea surface height (black contours at 0.1 m intervals). From Ding *et al.* (2022).

れるようでした。これらの結果をまとめた論文 (Xie *et al.*, 2010) が *Journal of Climate* に受理されました。ある日 *Nature Geoscience* 誌を眺めたらよく似たタイトルが目につきました。他の人も同じことを考えるもんだねと思い、本文を読んでみたら、まだ印刷中の自分の論文に対する評論と分かりました。実は *Nature Geoscience* 誌の編集長が私たちの論文を見て、別の研究者に評論を書くように依頼したそうです (Clement *et al.*, 2009)。

温暖化によって現在の多雨域で雨が増えるという wet-get-wetter 説が支配的だったのに対して、SST パターンこそ熱帯降雨変化を決定するという結果は IPCC 第 5 次評価報告書 (Christensen *et al.*, 2014) に取り上げられ、台風頻度分布変化にも重要と報告されています。大気中の CO₂ 濃度を 2 倍にした場合の全球平均温

度の上昇幅を測る気候感度にも SST パターンが関わっており、注目されています (Rugenstein *et al.*, 2023)。

4.1. ハイエイタス

SST パターンの研究をきっかけに IPCC 第 5 次評価報告書 (AR5) のリードオーサーに選ばれました。2013 年 9 月にストックホルムで 100 以上の国の政府代表が集まり、科学者が書いた評価報告書を承認する会議に、第 14 章を代表して参加しました。ノーベル賞晩餐会が開かれる市役所の大ホールで、スウェーデン政府主催のディナーに招かれました。承認された第 5 次評価報告書を披露する記者会見で、一番聞かれた質問は、「1997 年から 15 年間に全球平均温度の増加はほとんど見られなく、持続的な昇温を作り出す気候モデルはおかしいのではないか」というものでした。

実はその 2 週間前に、現在東京大学の小坂優さんと *Nature* 誌に関連論文を発表しました (Kosaka and Xie, 2013)。気候モデルに通常の予測実験のように温室効果ガスなどの放射強制を入れると、全球平均温度は白線のようにほぼ単調増加し、黒線の観測と 2013 年時点においては大きくかけ離れています (Fig. 6)。しかし、熱帯太平洋の観測水温もモデルに取り入れると、赤線のように観測と驚くほど一致しています。すなわち、自然変動として熱帯太平洋水温がその 15 年間減少し、温暖化ハイエイタス (停滞) をもたらしたことになります。

ハイエイタス現象に広く関心が集まり、*Nature* 誌も私たちの論文を掲載する際に社説を発表し、またこの論文は 2013 年気候研究の重要な進展にも選ばれました (Van Noorden *et al.*, 2013)。

4.2. 海洋循環応答

太平洋の数十年規模振動は 90 年代から注目され、北太平洋、特に日本東方海域である黒潮続流域で振幅が大きく、多くの研究が成されてきました (Qiu, 2023)。JAMSTEC の佐々木英治さんの OFES モデルを観測の風応力で駆動すると、衛星から観測された海面高度変動とよく一致しています (Taguchi *et al.*, 2007)。

温暖化に対する北太平洋亜熱帯循環系の応答も調べられてきました。多くの気候モデルでは黒潮続流が強くなります (Sakamoto *et al.*, 2005; Yamanaka *et al.*, 2021)。

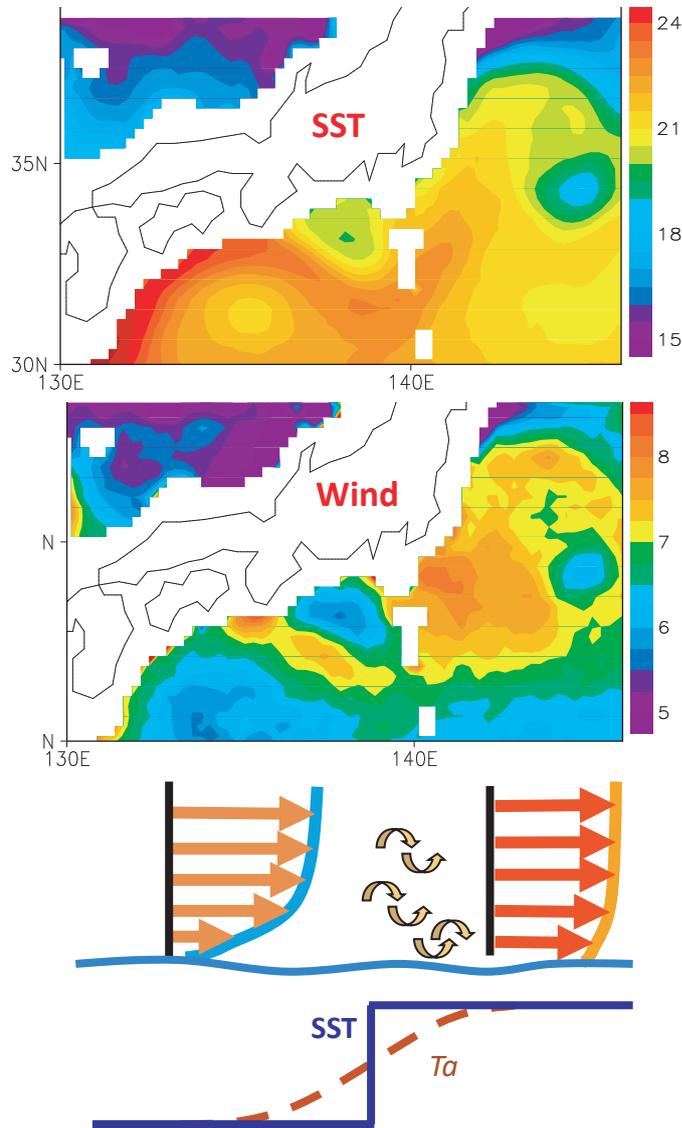


Fig. 4. (Top) SST (°C) and (middle) surface wind speed (m/s) averaged in April–June 2001. (Bottom) schematic of vertical wind profiles and air temperature (brown dashed curve) across a sharp SST front (blue solid). From Nonaka and Xie (2003).

このような海洋循環の変化はこれまで風の変化による、と当然のように考えられてきました。

しかし結合モデル比較プロジェクト (CMIP) からは、北太平洋における風の変化はモデル間でかなり異なっており、マルチモデル平均では、まとまった、ロバストな風変化のパターンは認められません。そうすると、もう一つの可能性として、ひょっとしたら風ではなく、海面昇温そのものが海洋表層循環を加速しているのかもしれない。

ません。

そこで風を変えずに、海洋大循環モデル (GCM) で海面水温を上げた実験をしてみました。案の定、世界中の亜熱帯循環が速くなりました。そのメカニズムは意外と簡単なものでした。

亜熱帯循環では風応力が変わらない限り、鉛直積分したスベルドラップ輸送も変わりません。海面水温を上げると、海洋上層が暖まり海面高度が上昇します。海面高

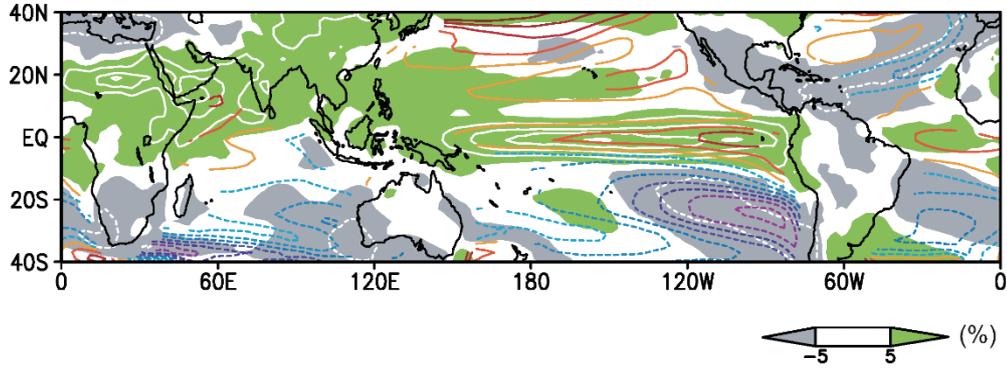


Fig. 5. Annual mean precipitation percentage change ($\delta P/P$ in green/gray shade and white contours at 20% intervals), and relative SST change (color contours at intervals of 0.2°C ; negative dashed) to the tropical (20°S to 20°N) mean warming in RCP8.5 projections, shown as CMIP5 ensemble-mean 2081–2100 minus 1986–2005 difference. From the IPCC AR5 (Christensen *et al.*, 2014).

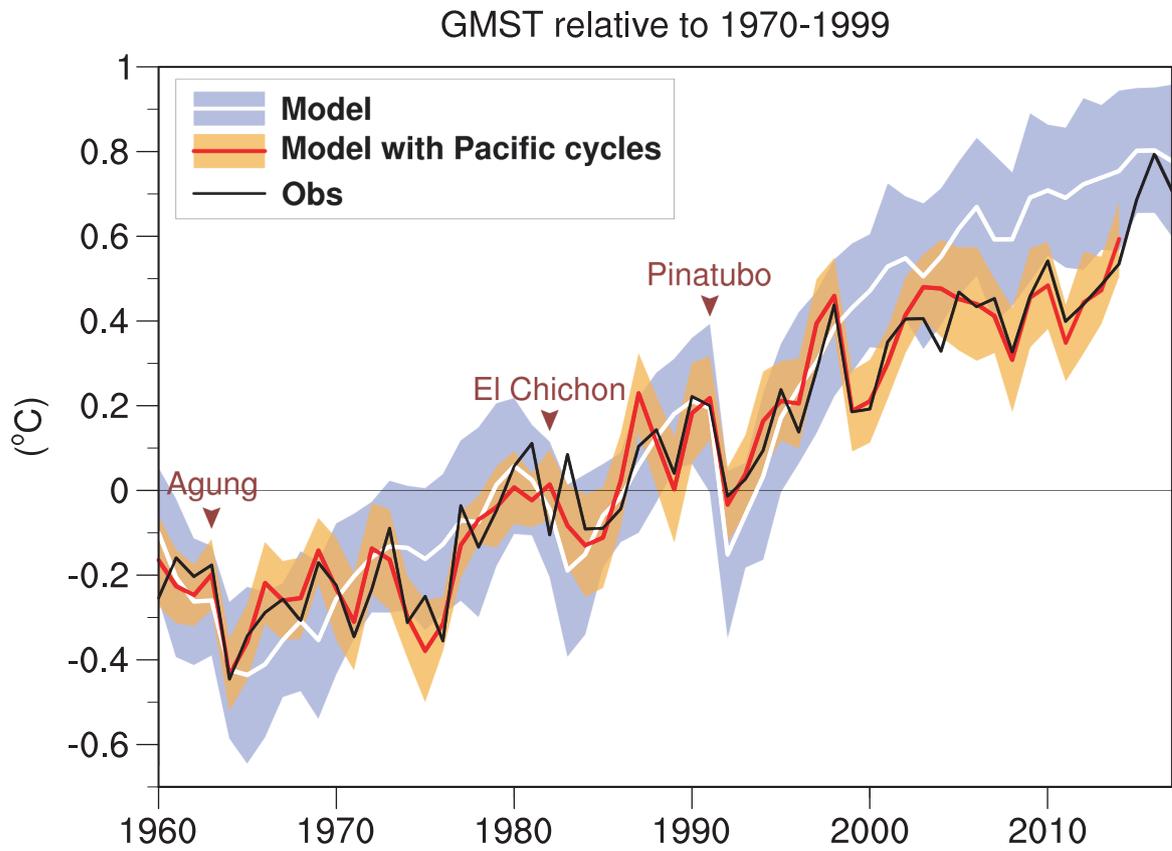


Fig. 6. Global mean surface temperature anomalies in observations (black), historical (20-member ensemble mean in white curve and spread in blue shading) and tropical Pacific pacemaker (10-member ensemble mean in red line and spread in orange shading) runs. Updated from Kosaka and Xie (2013).

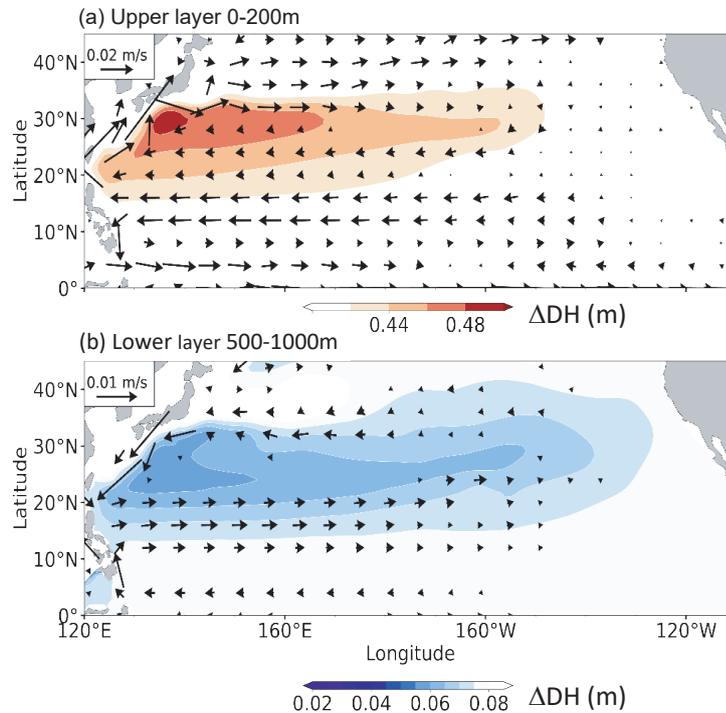


Fig. 7. Response to a 4K SST increase: vertically averaged dynamic height (m, color shading) and ocean current changes (m/s, vectors) in (a) upper (0 to 200 m) and (b) lower (500 to 1,000 m) layers. Adapted from Peng *et al.* (2022).

度の上昇分は層厚 h に比例するので、西で大きく、東で小さい分布となります。すると、南向きの地衡流が海面付近で強くなります。そこで一つ問題が起きます。それは運動する上層の層厚が変わらなければ、スベルドラップ輸送は強くなり、一定に保たれないということです。スベルドラップ輸送を保つには、層厚を小さくする必要があります。この層厚変化を考慮すると、海面付近の加速は半分になり、亜熱帯循環下部では流れが遅く、いわゆる上下のダイポール構造になります。海洋 GCM の実験を見てみると、確かに上層の加速並びに下層減速という構造になっています (Fig. 7 ; Peng *et al.*, 2022)。

海面高度変化は鉛直積分した海洋の貯熱量変化に対応しますので、このようにスベルドラップ・ダイナミックが海洋加熱量を強く制限することになります。

5. 展望：エネルギー論と結合力学の融合

大気中の温室効果ガスの増加によって地球が暖かくなりますが、大気上端における下向き放射の増加分（放射強制）の約半分を海洋が吸収し、温暖化を緩和しています。このような海洋の熱吸収は水平一様でなく、全球深層循環の沈み込みおよび上昇域それぞれに当たる北大西洋と南大洋に集中しています (Shi *et al.*, 2018 ; Fig. 8)。そこへ大気が何とか熱を運ぶように循環を調節し、それに伴い降水分布も変わります (Hu *et al.*, 2022)。海洋の熱吸収分布と海洋・大気大循環の変化は、海洋・大気結合力学の新たなフロンティアとして、今注目されています。

ピサの斜塔からボールを手離し、エネルギー保存則だけを知っていればボールの着地速度は予測できます。同じようなエネルギー保存に基づいた理論が提案されています。詳しい導出は Xie (2023, 14.4 節) に記載して

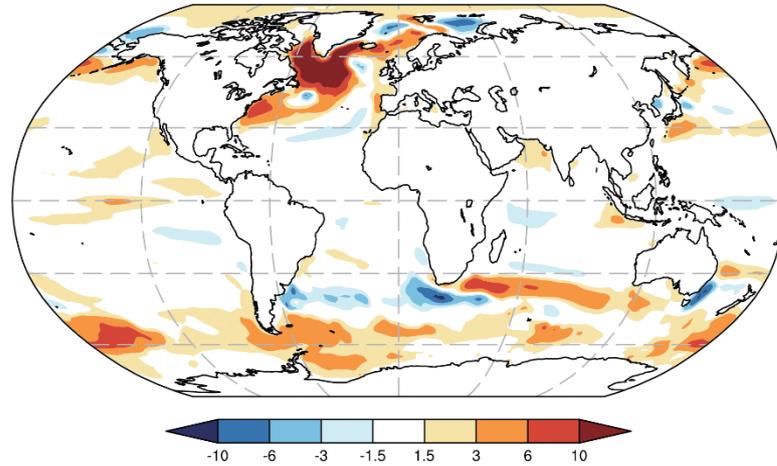


Fig. 8. 1861–2005 trend in net surface heat flux (color shading in 10^{-1} W m^{-2} per decade; downward positive) in CMIP5 historical greenhouse-gas single-forcing run. From Shi *et al.* (2018).

ありますが、大気貯蔵項が小さいため、鉛直および帯状積分した半球間エネルギー収支から

$$-F_a|_{y=0} = \langle R_{TOA} - Q_{net} \rangle_{SH}^{NH} / 2$$

が得られます。ここで F_a は赤道を越える大気エネルギー輸送量（北向き正）、 R_{TOA} は大気上端放射エネルギーフラックス、 Q_{net} は海面熱フラックス（共に下向き正）、右辺は南北半球積分値の差となっています。熱帯では大気エネルギー輸送はハドレー循環が担うため

$$F_a = \psi_M \Delta m$$

となり、 ψ_M は対流圏上層北向き質量輸送量、 Δm は対流圏上層と下層の湿潤エネルギーの差で、安定成層のため正の値をとります。すなわち、赤道を越えるエネルギー輸送はハドレー循環上層の風向きと同じ方向で、ITCZ はその向きと逆の半球にあることとなります。

温室効果ガスによる昇温を考える場合、放射強制が大まかに南北対称で、南大洋と北大西洋の熱吸収もほぼ互角なため、帯状平均したら ITCZ の南北移動は小さいです。しかし、南大洋と北大西洋の熱吸収はそれぞれ平均場における深層からの湧昇、および AMOC (Atlantic meridional overturning circulation) の弱化によるもので、モデルによっては両者の差が無視できず、ITCZ が南北移動する応答が確認されています (Geng *et al.*, 2022)。

一方、太陽光を反射する人為起源の大気エアロゾルは北半球で大きいため、生じるエネルギー南北半球差を補うため、海水運動を考慮しない海洋混合層モデルで ITCZ が大きく南に移動することが知られています。しかし、北半球の冷却が海洋南北循環を加速し (Fig. 9a)、北半球への海洋熱輸送が増えるため、大気によるエネルギー輸送が赤道で小さくて済みます (Fig. 9d)。したがって、海洋循環の変化が ITCZ の南への移動を抑えることとなります。AMOC の影響を直接受けない太平洋では、中緯度で沈み込み赤道で湧昇する、深度の浅い亜熱帯南北循環 (STC; Fig. 9b) も熱輸送に貢献し ITCZ の南北移動を減衰させる機能を持っています (Kang *et al.*, 2021)。

SST パターンを中心に据える“古典”結合力学と違って、このエネルギー論は SST を頭に扱わず、熱帯と中高緯度も区別せず大気柱の鉛直エネルギーフラックスの半球間差を診断すれば、熱帯収束帯の応答が予測できるという、便利な理論として広く使われています。しかしその欠点として、エネルギー擾乱が熱帯へ伝わる大気海洋相互作用過程を分離できないため、帯状平均からの東西変化を扱えないことが挙げられます。

大気エアロゾルは東西方向にも局在化しており、大気海洋結合応答を調べると、海洋南北循環のほか、第3節で述べた低層雲や WES フィードバックが重要な PMM パターンなど (Luongo *et al.*, 2023)、自然変動に見られるような結合フィードバックが多様な SST パ

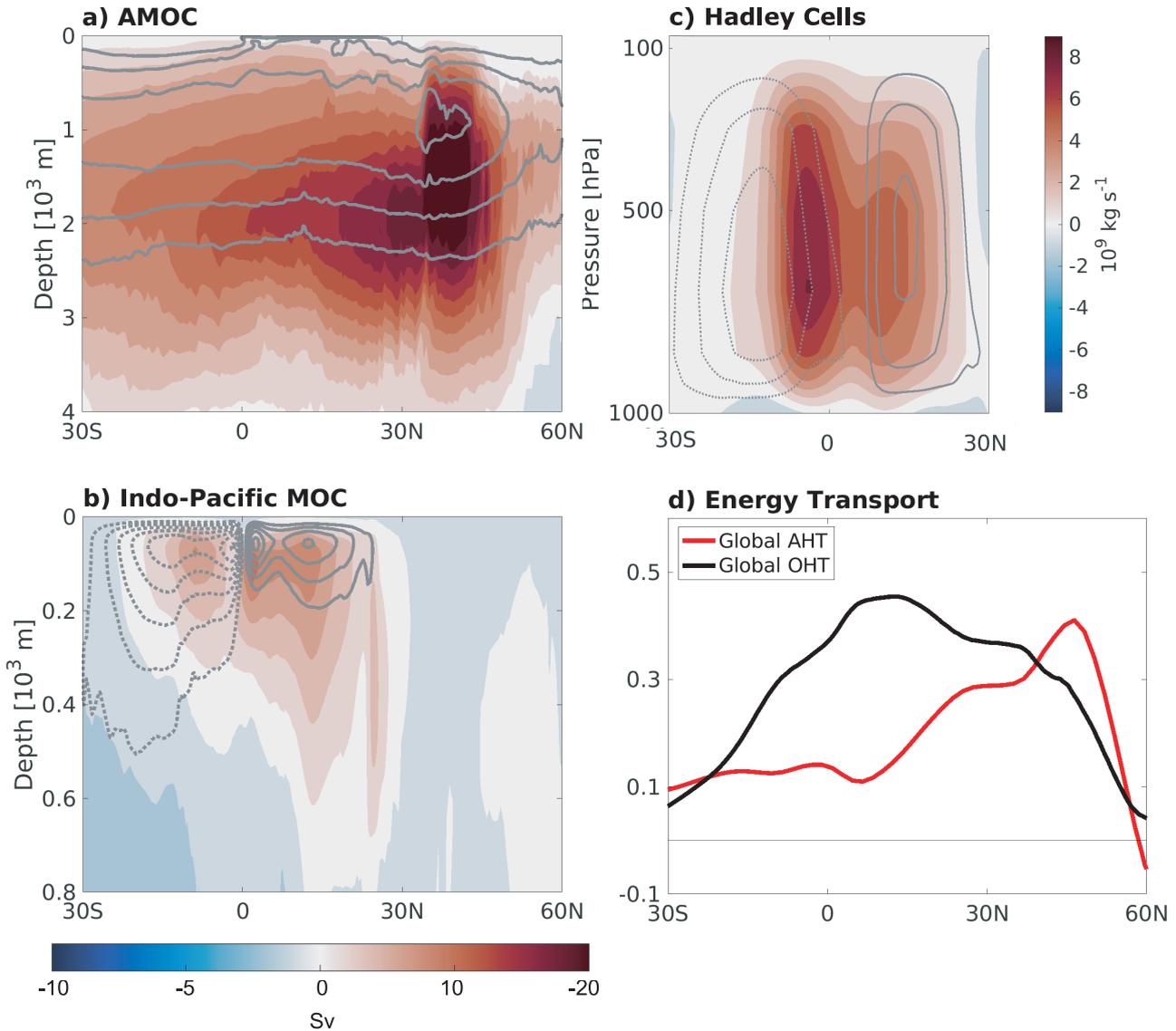


Fig. 9. Climate response to solar radiation reduction in the extratropical NH (45–65°N). Mean (gray contours, negative dashed) and change (color shading) in (a) Atlantic Ocean MOC, (b) Indo-Pacific ocean MOC (volume transport in Sv), and (c) atmospheric MOC (mass transport in 10^9 kg/s). Positive MOC streamfunction denotes clockwise circulation. (d) Changes in global energy transport by the ocean (black, PW) and atmosphere (red). Adapted from Luongo *et al.* (2022).

ターンを作り出すことが分かっています。SST 分布から見て、エアロゾルによる SST 冷却は北半球で大きいため、相対的に暖かい南半球へ ITCZ が移動することになります。このように SST パターンとエネルギー論は相補的で、異なる角度から同じ現象を見ていることになります。

大気汚染軽減によって、北半球エアロゾルの排出総量は 1980 年代からあまり変化していませんが、排出源は欧米からアジアへ、また最近では中国から南アジアへと変わってきました。このような東西分布による気候変化のパターンを理解するためには、エネルギー論のみならず SST パターンの研究も欠かせません (Kang *et al.*, 2021)。

6. おわりに

私が大学院に入ったころ、海洋と大気を一つの結合システムとして扱う斬新な研究アプローチが登場しました。エルニーニョをはじめ、インド洋ダイポールなど気候現象に対し理解が進み、一部は予報もできるようになりました。一方、1985年以降大気中CO₂濃度は80ppmも増え、全球平均温度も0.6度ほど上昇しました。このように地球温暖化時代はすでに到来し、環境や社会に大きな影響をもたらしています。それを理解し予測することは海洋学・気候学の更なる発展につながると思います。

謝 辞

このたびは名誉ある日本海洋学会賞を頂き、大変光栄に思います。海外で活動しているにも関わらず、学会賞に選ばれ、感激に耐えません。学会および関係者の皆様から心から感謝申し上げます。東北大学に在籍中、海洋物理学研究室の諸先生方からご指導いただき、また同窓同士が互いに勉強し合って、新しい研究に挑戦していく勇気を頂きました。北大、IPRC、スクリップスで各国から多くの大学院生、若手研究者と一緒に、海洋が主役の気候システムを広く、時には深く、探究できたことは実に幸運に思います。

本稿は受賞講演に基づき、一部説明を加えました。ここで割愛した研究の話題に関する和文解説として、ITCZ南北非対称性は謝(1997)、熱帯大西洋とインド洋変動は謝(2002)、そしてアジアモンスーンにかかわる大気海洋相互作用は謝(2024)をご参照いただければ幸いに思います。

References

- Amaya, D.J. (2019): The Pacific meridional mode: a review. *Curr. Clim. Change Reports*, 5, 296–307.
- Christensen, J.H., et al. (2014): Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, 1217–1308, doi: 10.1017/CBO9781107415324.028.
- Clement, A., A. Baker, and J. Leloup (2010): Patterns of tropical warming. *Nature Geosci.*, 3, 8–9.
- Ding, Y., L. Xu, S.-P. Xie, H. Sasaki, Z. Zhang, H. Cao, and Y. Zhang (2022): Submesoscale frontal instabilities modulate large-scale distribution of the winter deep mixed layer in the Kuroshio-Oyashio Extension. *J. Geophys. Res.-Oceans*, 127, e2022JC018915.
- Geng, Y.F., S.-P. Xie, X.T. Zheng, and C.Y. Wang (2020): Seasonal dependency of tropical precipitation change under global warming. *J. Climate*, 33, 7897–7908.
- Gill, A.E., 1982: *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Academic Press, 662 pp.
- Hayes, S. P., L. Mangum, J. Picaut, A. Sumi, and K. Takeuchi (1991): TOGA-TAO: A moored array for real-time measurements in the tropical Pacific Ocean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72, 339–347.
- Hirst, A.C. (1986): Unstable and damped equatorial modes in simple coupled ocean-atmosphere models. *J. Atmos. Sci.*, 43, 606–632.
- Hu, S., S.-P. Xie, and S.M. Kang (2022): Global warming pattern formation: the role of ocean heat uptake. *J. Climate*, 35, 1885–1899.
- Kawai, Y., T. Miyama, S. Iizuka, A. Manda, M. Yoshioka, S. Katagiri, Y. Tachibana, and H. Nakamura (2015): Marine atmospheric boundary layer and lowlevel cloud responses to the Kuroshio Extension front in early summer of 2012: three-vessel simultaneous observations and numerical simulations. *J. Oceanogr.*, 71, 511–526.
- Kang, S.M., S.-P. Xie, C. Deser, and B. Xiang (2021): Zonal mean and shift modes of historical climate response to evolving aerosol distribution. *Sci. Bull.*, 66, 2405–2411.
- Kobashi, F., H. Mitsudera, and S.-P. Xie (2006): Three subtropical fronts in the North Pacific: Observational evidence for mode water-induced subsurface frontogenesis. *J. Geophys. Res.-Oceans*, 111, C09033, doi: 10.1029/2006JC003479.
- Kobashi, F., and A. Kubokawa (2012): Review on North Pacific Subtropical Countercurrents and Subtropical Fronts: role of mode waters in ocean circulation and climate. *J. Oceanogr.*, 68, 21–43.
- Kosaka, Y., and S.-P. Xie (2013): Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 501, 403–407.
- Liu, Z., and M. Alexander (2007): Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections. *Rev. Geophys.*, 45, RG2005, doi:10.1029/2005RG000172.
- Luongo, M.T., S.-P. Xie, and I. Eisenman (2022): Buoyancy forcing dominates the cross-equatorial ocean heat transport response to northern hemisphere extratropical cooling. *J. Climate*, 35, 3071–3090.
- Luongo, M.T., S.-P. Xie, I. Eisenman, Y.-T. Hwang, and H.Y. Tseng (2023): A dynamic pathway by which Northern Hemisphere extratropical cooling elicits a tropical response. *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2022GL100719.
- Ma, J., S.-P. Xie, and H. Xu (2017): Contributions of the North Pacific Meridional Mode to ensemble spread of ENSO prediction. *J. Climate*, 30, 9167–9181.
- McCreary, J.P. and D.L. Anderson (1984): A simple model of El Niño and the Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 934–946.
- Miyamoto, A., H. Nakamura, S.-P. Xie, T. Miyasaka, and Y. Kosaka (2023): Radiative impacts of Californian marine low clouds on North Pacific climate. *J. Climate*, 36, 8443–8459.
- 中村尚・磯辺篤彦・立花義裕・早坂忠裕・川村隆一・野中正見・川合義美・見延庄士郎・三寺史夫・吉田聡 (2019) : 気候系の Hotspot : 中緯度の暖流や水温前線が及ぼす気候系への影響. *天気*, 66, 32–38.
- Nonaka, M., S.-P. Xie, and K. Takeuchi (2000): Equatorward spreading of a passive tracer with application to North Pacific inter-

- decadal temperature variations. *J. Oceanogr.*, **56**, 173–183.
- Nonaka, M., and S.-P. Xie (2003): Co-variations of sea surface temperature and wind over the Kuroshio and its extension: Evidence for ocean-to-atmospheric feedback. *J. Climate*, **16**, 1404–1413.
- Peng, Q., S.-P. Xie, D. Wang, R.X. Huang, G. Chen, Y. Shu, J.R. Shi, and W. Liu (2022): Surface warming-induced global acceleration of upper ocean currents. *Sci. Adv.*, **8**, eabj8394.
- Philander, S. G. H., T. Yamagata, and R. C. Pacanowski (1984): Unstable air-sea interaction in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 604–613.
- Qiu, B. (2023): Observational and theoretical studies on the North Pacific upper ocean circulation and its variability. *海の研究*, **32**, 67–93.
- Rugenstein, M., M. Zelinka, K. B. Karnauskas, P. Ceppi, and T. Andrews (2023): Patterns of surface warming matter for climate sensitivity. *Eos*, **104**, <https://doi.org/10.1029/2023EO230411>.
- Sakamoto, T. T., Hasumi, H., Ishii, M., Emori, S., Suzuki, T., Nishimura, T., and Sumi, A. (2005): Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high-resolution climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14617, doi:10.1029/2005GL023384.
- Shi, J., S.-P. Xie, and L.D. Tally (2018): Evolving relative importance of the Southern Ocean and North Atlantic in anthropogenic ocean heat uptake. *J. Climate*, **31**, 7459–7479.
- Small, R. J., S. deSzoek, S. P. Xie, L. O'Neill, H. Seo, Q. Song, P. Cornillon, M. Spall, and S. Minobe (2008): Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dyn. Atmos. Oceans*, **45**, 274–319.
- Suga, T., K. Motoki, Y. Aoki, and A. M. Macdonald (2004): The North Pacific climatology of winter mixed layer and mode waters. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 3–22.
- Taguchi, B., S.-P. Xie, N. Schneider, M. Nonaka, H. Sasaki, and Y. Sasaki (2007): Decadal variability of the Kuroshio Extension: Observations and an eddy-resolving model hindcast. *J. Climate*, **20**, 2357–2377.
- 谷本陽一 (2002): 環大西洋 10 年スケール変動に関する研究—2001 年度山本・正野論文賞受賞記念講演. *天気*, **49**, 811–818.
- Tokinaga, H., Y. Tanimoto, S.-P. Xie, T. Sampe, H. Tomita, and H. Ichikawa (2009): Ocean frontal effects on the vertical development of clouds over the western North Pacific: In situ and satellite observations. *J. Climate*, **22**, 4241–4260.
- Van Noorden, R., Tolleson, J., Check Hayden, E. *et al.* (2013): 365 days: 2013 in review. *Nature* **504**, 344–349.
- 謝尚平 (1995): 「TOGA 95」参加記. *天気*, **42**, 779–780.
- 謝尚平 (1997): 熱帯気候の南北非対称性の形成に関わる大気海洋相互作用—1996 年度山本・正野論文賞受賞記念講演. *天気*, **49**, 955–968.
- 謝尚平 (2002): 大気と海洋の多様な相互作用—2002 年度日本気象学会賞受賞記念講演. *天気*, **49**, 389–398.
- Xie, S.-P. (2023): *Coupled Atmosphere-Ocean Dynamics: From El Niño to Climate Change*. Elsevier, 424 pp. doi: 10.1016/C2021-0-02107-6
- 謝尚平 (2024): アジアモンスーンにおける大気海洋相互作用の研究ならびに国際連携を通じた人材育成—2023 年度日本気象学会藤原賞受賞記念講演. *天気*, 投稿中.
- Xie, S.-P., A. Kubokawa, and K. Hanawa (1989): Oscillations with two feedback processes in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, **2**, 946–964.
- Xie, S.-P., and S.G.H. Philander (1994): A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific. *Tellus*, **46A**, 340–350.
- Xie, S.-P., W.T. Liu, Q. Liu, and M. Nonaka (2001): Far-reaching effects of the Hawaiian Islands on the Pacific Ocean-atmosphere system. *Science*, **292**, 2057–2060
- Xie, S.-P., C. Deser, G.A. Vecchi, J. Ma, H. Teng, and A.T. Wittenberg (2010): Global warming pattern formation: Sea surface temperature and rainfall. *J. Climate*, **23**, 966–986.
- Xu, L., P. Li, S.-P. Xie, Q. Liu, C. Liu, and W. Gao (2016): Observing mesoscale eddy effects on mode water subduction and transport in the North Pacific. *Nature Commun.*, **7**, 10505, doi: 10.1038/ncomms10505.
- Yamanaka, G., H. Nakano, K. Sakamoto, T. Toyda, S. Urakawa, S. Nishikawa, T. Wakamatsu, H. Tsujino, and Y. Ishikawa (2021): Projected climate change in the western North Pacific at the end of the 21st century from ensemble simulations with a high-resolution regional ocean model. *J. Oceanogr.*, **77**, 539–560.
- Yang, L., S.-P. Xie, S.P. Shen, J.W. Liu, and Y.T. Hwang (2023): Low cloud-SST feedback over the subtropical Northeast Pacific and the remote effect on ENSO. *J. Climate*, **36**, 441–452.

Ocean-atmosphere interactions in climate formation, variability and change

Shang-Ping Xie[†]

Abstract

A scientific revolution was underway in the 1980s treating the ocean and atmosphere as a coupled system. In addition to Bjerknes feedback for El Niño in the equatorial upwelling zone, wind-evaporation-sea surface temperature (WES) feedback was originally proposed to explain the northward-displaced intertropical convergence zone (ITCZ) but broadened to explain the Pacific meridional mode, a key conduit for mid-latitude atmospheric variability to affect tropical climate. Since the 1990s, satellite-borne microwave sensors led to the discovery of narrow (<1,000 km) features in the ocean and atmosphere, including the long wake of Hawaii and ubiquitous ocean forcing of the atmospheric boundary layer across ocean fronts and eddies. My recent research probes how anthropogenic climate change is altering the ocean circulation. A major finding is that surface buoyancy forcing dominates while wind change is secondary as illustrated in the example of the surface acceleration of the subtropical gyre. A new chapter of ocean-atmospheric dynamics awaits to be written as growing climate change unveils its structure and patterns.

Key words: Ocean-atmosphere interactions, meridional modes, satellite observations, ocean circulation change in warming climate, energy view of climate change

(Corresponding author's e-mail address: sxie@ucsd.edu)
(Received 21 November 2023; accepted 29 November 2023)
(doi: 10.5928/kaiyou.32.5-6_95)
(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2023)

[†] Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0206, USA
e-mail: sxie@ucsd.edu