

夏季アジアジェット出口付近のロスビー波の碎波と西部北太平洋モンスーンの関係

中西亮太¹・吉田康平²・植田宏昭³

(¹筑波大学理工情報生命学術院、²気象研究所、³筑波大学生命環境系)

1. 研究背景

夏季西部北太平洋モンスーンは、6月下旬のフィリピン東方海上における熱帯収束帯が活発化と、7月下旬の熱帯収束帯の弱化と同時に対流活動域が北東へ拡大する現象である convection jump (CJ) の、2段階の季節進行を示す (Ueda et al. 1995 ; Ueda and Yasunari 1996)。夏季西部北太平洋モンスーンの季節進行は、定常ロスビー波の伝播などを介し日本の梅雨期の形成および梅雨明けに寄与することが指摘される (Ueda and Yasunari 1996 ; Xie et al. 2009 ; Xie 2023)。熱帯収束帯の活発化から CJ の発生にかけての季節進行メカニズムは、亜熱帯の高い海面水温に起因する大気海洋結合系の視点で明らかにされてきた。一方で Ueda et al. (2009) は、夏季西部北太平洋モンスーンの季節進行には、大気海洋結合系の効果に加えて太陽放射や地表面状態、大気循環場の季節変化が重要であると指摘した。また Nakanishi et al. (2025) は、CJ の発生時に、ロスビー波の碎波 (Rossby wave breaking; RWB) に伴い高渦位 (potential vorticity; PV) 空気塊が亜熱帯へ貫入し、力学的上昇流が励起されることにより、CJ に伴う上昇流の強化や維持に寄与することを示した。これは西部北太平洋モンスーンの季節進行と中高緯度循環場との関係性を示したものである。しかし、西部北太平洋モンスーンの季節進行全体の枠組みにおいて、RWB などの中緯度循環場との関係性を明らかにした研究はない。

夏季アジアジェット出口付近では、RWB の発生に伴い high-PV が西部北太平洋亜熱帯域へ貫入し、力学的上昇流の誘発を通じて対流活動の活発化に影響することが知られる (Takemura and Mukougawa 2020 ; Nakanishi et al. 2025)。一方で、夏季東アジアモンスーンやウォーカー循環偏差など、熱帯・亜熱帯域の対流活動に伴う対流圏上層の発散風がア

ジアジェット出口付近における RWB の発生位置や頻度に影響することが指摘される (Abatzoglou and Magnusdottir 2006 ; Takemura et al. 2020)。このことから夏季西部北太平洋モンスーンの季節進行に伴う対流活動活発域の拡大が、RWB の発生頻度や位置の季節進行をもたらす可能性が考えられるが、夏季アジアジェット出口付近における RWB の季節進行を論じた研究は少ない。本研究では、夏季アジアジェット出口付近におけるロスビー波の碎波に着目し、熱帯-中高緯度相互作用の視点から夏季西部北太平洋モンスーンの季節進行メカニズムを調査する。

2. 使用データと手法

大気データとして、気象庁長期 55 年再解析データ (JRA-55) の 6 時間データを日データに加工し用いた (Kobayashi et al. 2015)。また対流活動の指標として米国海洋大気庁の外向き長波放射 (Outgoing longwave radiation; OLR) の日データを利用した (Liebmann and Smith 1996)。解析期間は 1958 年から 2021 年であり、気候値を日気候値、偏差を日気候値からの偏差として定義した。ただし熱帯収束帯の活発化イベントの解析のみ解析期間は 1974 年から 2021 年である。

渦位の南北勾配反転頻度を計算するために、Masato et al. (2013) のブロッキングインデックスを 350 K 等温位面の渦位に適用した。また夏季アジアジェット出口付近における典型的な RWB イベントとして、Takemura and Mukougawa (2020) で抽出された 44 事例の RWB イベントを用いた。定常ロスビー波の解析には Takaya and Nakamura (2001) の波活動度フラックスを使用した。また high-PV 貫入イベントとして惑星トラフから切離する寒冷渦を捉えるため、Kasuga et al. (2021) の寒冷渦指標を用いた。

熱帯収束帯の活発化イベントの抽出には

OLR 日データに 5 日間移動平均を施し、 $[10^{\circ}\text{--}20^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{--}140^{\circ}\text{E}]$ で領域平均した値の変動を用いた。6/15–7/10 に値が 220 W m^{-2} を下回った期間で OLR が最小となる日を day 0 とした。なお day 0 同士が 5 日以上離れていない場合は同一イベントと扱い、OLR の値が小さい日を day 0 とした。抽出された 54 事例の day 0 からラグ合成解析を行った。

西部北太平洋モンスーンの活動に伴う対流活動活発域の拡大が夏季アジアジェット出口付近の循環場に及ぼす影響を評価するため、線形傾圧モデル (LBM ; Watanabe and Kimoto 2000) を用いた。LBM の空間解像度は T42, σ 系鉛直 20 層とした。背景場には JRA-55 から計算した 6 月中旬の気候値を用い、強制源には Ueda et al. (2009) を参考に理想熱源を用いて熱帯収束帯の活発化を模した実験を行い、定常応答まで時間積分を行った。アジアジェット出口の評価には Mak and Cai (1989) の伸縮変形を用いた。渦位収支解析 (Sardeshmukh and Hoskins 1988) の絶対渦位移流項により対流活動に伴う発散風の影響を評価した。

3. 結果と考察

3.1 RWB の季節進行

図 1 に 10 または 11 日平均 (旬平均) の 350 K 渦位の南北勾配反転頻度を示す。頻度の極大域は 6 月中旬から下旬にかけてフィリピン東方海上の熱帯収束帯が活発な領域の北東付近に位置し (図 2b, c)、その後 7 月中旬から下旬にかけて極大域が北東へシフトし、中部北太平洋上の CJ 発生領域の北東付近に位置する (図 2e, f)。

次に、Takemura and Mukougawa (2020) で抽出された 44 事例の RWB イベントをそれらの平均位置からの東西で分類したところ、平均位置より西側で生じたイベント (以下、西側 RWB) が 21 事例、平均位置より東側で生じたイベント (以下、東側 RWB) が 23 事例であった。また西側/東側 RWB それぞれの発生時期を調査すると、西側 RWB は 7 月に 10 事例、8 月に 11 事例発生しており、東側 RWB は 7 月に 6 事例、8 月に 17 事例発生していた。西側 RWB は 7 月と 8 月でほぼ発生数が変わらないのに対し、東側 RWB は 8 月に発生数が集中する。これは渦位の南北勾配反転頻度が示す季節進行と整合する。

図 2 に西側/東側 RWB 発生日の 200 hPa ジオポテンシャル高度と波活動度フラックスを示す。西側 RWB では、東アジア上空の高度偏差から気候学的な惑星トラフ (太平洋

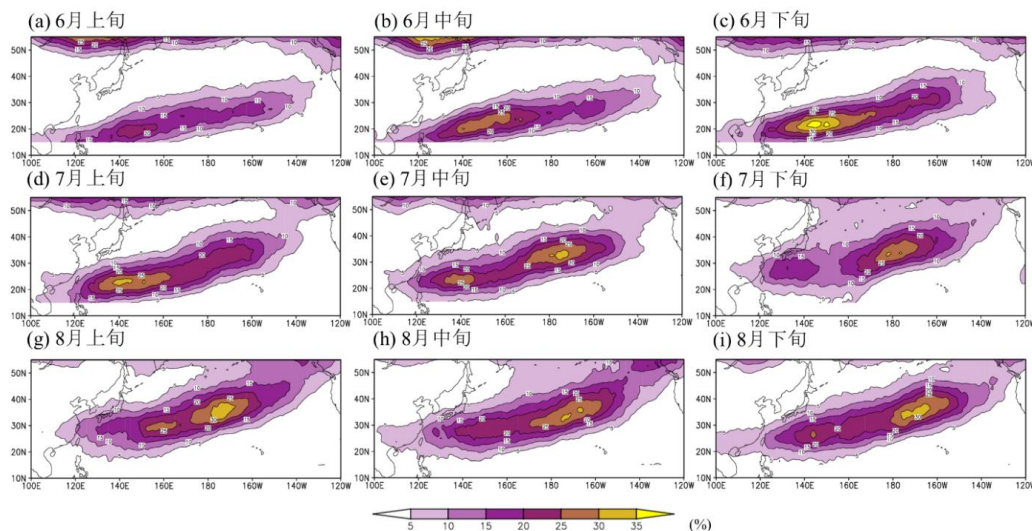


図 1 350 K 等温位面渦位に適用した Masato et al. (2013) のブロッキングインデックス [%] の旬平均気候値。陰影・等値線 (間隔: 5 %) とともに 350 K 面渦位の南北勾配反転頻度を示す。

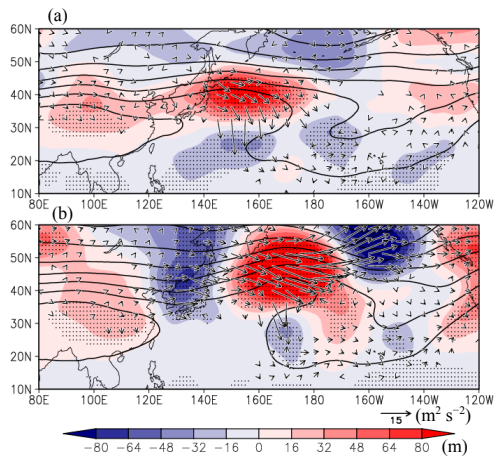


図2 (a)西側, (b)東側 RWB 発生日の合成図。等値線は 200 hPa 面ジオポテンシャル高度 (Z200) 合成値[m] (11900–12500 m, 間隔: 100 m)、陰影は Z200 偏差[m]、ベクトルで波活動度フラックス[m² s⁻²]を示す。ドットは t 検定により信頼度 95 % 以上で Z200 偏差が有意な領域。

中央トラフ)の南西端へ向かう南東への波のエネルギー伝播が確認される。南東へ伝播した波のエネルギーは太平洋中央トラフの南西端 (20°N, 140°E) に形成される有意な低高度偏差場で収束する (図 2a)。東側 RWB では、波のエネルギーは東アジア上空の高高度偏差場から中国北東部の低高度偏差場を経由して日本の東海上の高高度偏差場 (50°N, 170°E) へ伝播する。日本の東海上の高高度偏差場からは波のエネルギー伝播が東方と南方へ分流し、このうち南方へ分流した波のエネルギーは太平洋中央トラフの南西端付近の有意な低高度偏差場 (25°N, 170°E) へ伝播し収束する (図 2b)。このように西側/東側 RWB で high-PV の貫入位置が異なり、その位置は西部北太平洋モンスーンの季節進行に伴う対流活動活発域の拡大と対応する。このことから、夏季アジアジェット出口付近における RWB 発生位置は、西部北太平洋モンスーンの季節進行と同調するように盛夏期に向けて北東へシフトすると考えられる。また波のエネルギー伝播経路の特徴などから、RWB 発生位置の季節進行は、アジアジェットの北上および下流へ伸張によるアジ

アジェット出口の北東へのシフトを反映したものであると解釈できる。

3.2 熱帯収束帯とジェット出口の季節進行

図 3 に 6 月下旬の熱帯収束帯の活発化を模した LBM 実験の結果を示す。渦度収支解析の移流項および応答結果の水平風発散成分を確認すると、発散風の南風成分がアジアジェットの軸を横切り、東アジアのジェット軸上に負の渦度移流がみられる (図 3a)。200 hPa 面の伸縮変形分布では、負の伸縮変形が背景場の負の伸縮変形分布よりも東側および北東側に形成され、熱帯収束帯の活発化によりアジアジェットの出口が北上または下流へ伸張することがわかる (図 3b)。これらの結果から、6 月下旬の熱帯収束帯の活発化

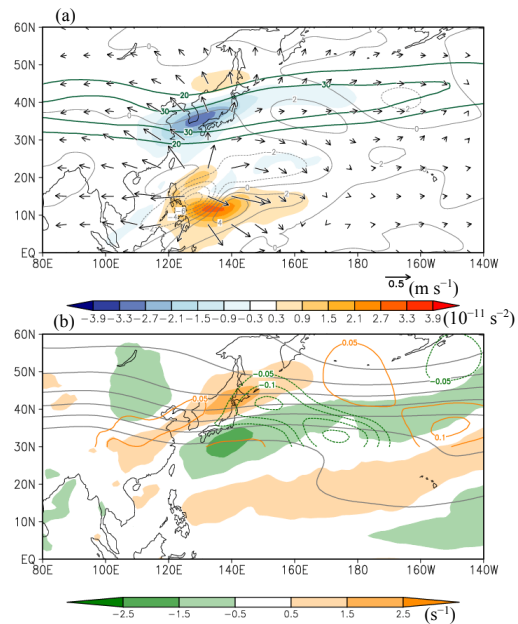


図3 (a) 200 hPa 面の応答と背景場から計算される渦位収支解析の絶対渦度移流項 (陰影; 10^{-11} s^{-2})、応答の水平風の発散風成分 (矢; m s^{-1})、応答結果の渦度 (灰色線、間隔 $0.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$)、背景場の東西風 (緑線、 $20 \sim 30 \text{ m s}^{-1}$ のみ描画)。(b) 応答の 200 hPa 伸縮変形 (緑色および橙色線、 $\pm 0.5 \text{ s}^{-1}$ かつ 25°N 以北のみ描画、間隔: 0.5 s^{-1}) と背景場の伸縮変形 (陰影; s^{-1})、背景場の Z200 (灰色線、11400–12400 m のみ描画、間隔: 100 m)。

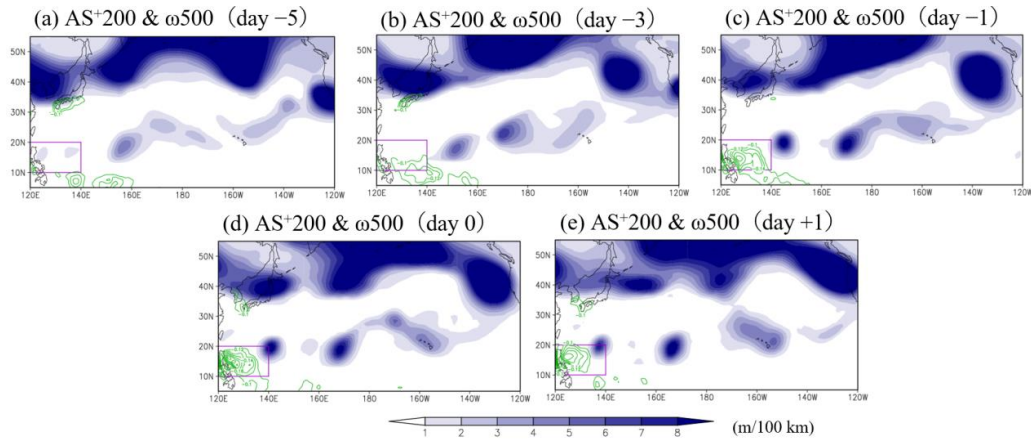


図4 抽出した熱帯収束帯の活発化イベントの day0 を起点とするラグ合成図。200 hPa における AS^+ の合成値（陰影； $m/100m$ ）、500 hPa の鉛直 p 速度（等値線； $\leq -0.1 \text{ Pa s}^{-1}$ のみ描画、間隔： 0.02 Pa s^{-1} ）を示す。紫枠はイベント抽出に用いた領域を示す。

は、北向き発散風が獲得するコリオリ加速傾向と発散風がもたらすジェット軸上への負渦度移流により、アジアジェットの出口の北東へのシフトに寄与すると解釈できる。また7月下旬のCJ発生を模した実験では、ジェット軸上への負の渦度移流による東アジアでのアジアジェットのさらなる北上への寄与が示された（図略）。

3.3 熱帯収束帯の活発化と high-PV 貫入

図4にITCZ活発化イベントにおけるラグ合成解析の結果を示す。アジアジェット出口付近から亜熱帯への波の伝播はみられず、渦位分布ではRWBの特徴である逆S字型の分布は確認できなかった（図略）。一方、200 hPaにおける等圧面の凹み分布（ AS^+ ）に着目すると、紫枠で示す熱帯収束帯の活発域の北東（ 20°N , 145°E ）に顕著な凹み分布が存在し、day-5からday+1にかけて西進する。500 hPa面における負の鉛直速度は、西進する凹み分布に沿うように強化する。図5に熱帯収束帯の活発域で平均した500 hPa面における上昇流とQベクトル発散の時系列をそれぞれ示す。領域平均した鉛直速度はday0で負のピークを迎え、Qベクトルの発散も同調するように変動し、day0で最も大きい負の値（収束）を示す。このことから、太平洋中央トラフから切離し西進する寒冷渦とフィリピン

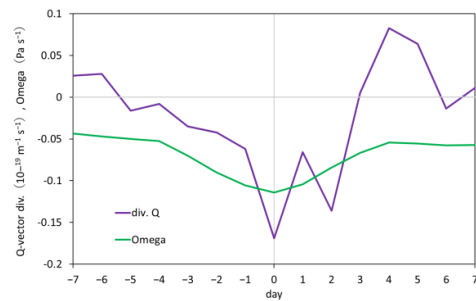


図5 $[10^\circ\text{--}20^\circ\text{N}$, $120^\circ\text{--}140^\circ\text{E}]$ で領域平均した850–200 hPaで積算したQベクトル発散（紫線； $10^{-19} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ）および500 hPa鉛直 p 速度（緑線； Pa s^{-1} ）の時系列。

東方海上における熱帯収束帯の活発化との間に力学的な関係性があると言える。また合成解析ではRWBの発生は確認されなかったが、事例ごとに350 K面の渦位分布を確認すると逆S字型の分布を示す事例も9事例確認できたことから、西進する寒冷渦の一部はRWBに伴い貫入するhigh-PVとしても説明される。

4. まとめ

本研究により、夏季アジアジェット出口付近におけるRWBの特徴は夏季西部北太平洋モンスーンと同調するように季節進行し、両者は季節進行の過程で双方向にフィードバ

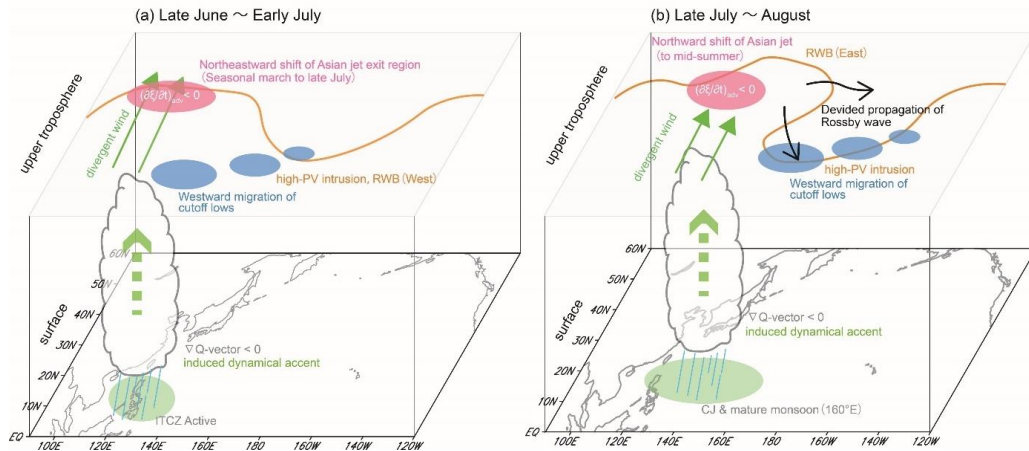


図 6 (a) 6 月下旬の熱帯収束帯の活発化から CJ 前、(b) CJ 発生から盛夏期における夏季西部北太平洋モンスーンとアジアジェット出口付近の RWB および太平洋中央トラフから切離し西進する寒冷渦との相互作用による季節進行の模式図。

ックすることが明らかになった。図 6a に 6 月下旬から 7 月上旬にかけて、図 6b に 7 月下旬から 8 月にかけての夏季アジアジェット出口付近における RWB と西部北太平洋モンスーンとの間における双方向フィードバックに関する模式図を示す。6 月下旬から 7 月上旬では、太平洋中央トラフから切離し西進する寒冷渦や RWB に伴う high-PV が熱帯収束帯の活発域の東にあたる 140°E 付近まで貫入し、力学的上昇流を要請して熱帯収束帯の活発化に寄与する。一方でフィリピン東海法上での熱帯収束帯の活発化は、対流活動に伴う発散風南風成分がアジアジェット出口付近に負の渦度移流をもたらす、東アジアにおけるアジアジェットの北上および下流への伸張に寄与して中緯度の 7 月下旬への季節進行の一部を担う。7 月下旬から 8 月では Nakanishi et al. (2025) で示されたように、RWB に伴う high-PV や太平洋中央トラフから切離し西進する寒冷渦が 170°E 付近に貫入して力学的上昇流を要請し、CJ の発生に影響する。このときにみられる RWB は中部北太平洋付近で生じる RWB の特徴と一致することから、6 月下旬の熱帯収束帯の活発化がその後の RWB 発生位置の北東へのシフトをもたらす、より東側への high-PV 貫入が生じるようになることで夏季西部北太平洋

モンスーンの最後の季節進行である CJ に影響したと解釈できる。また CJ を含むモンスーンの東方拡大は東アジアのジェット軸上に負の渦度移流をもたらしてジェットを北へシフトさせ、梅雨明けや盛夏期の気候形成に寄与する。これらの結果は、夏季アジアジェット出口付近における RWB と西部北太平洋モンスーンとが双方向にフィードバックをもたらすあいながら同調して季節進行することを示すものである。

本研究により、梅雨期から盛夏期にかけての季節進行に熱帯と中高緯度の双方向的なフィードバックが内在することが示唆された。気候システムの理解の観点から、今後はモデル実験を用いて中緯度対流圏上層の high-PV 貫入が夏季西部北太平洋モンスーンの対流活動に及ぼす影響を定量的に評価するとともに、本研究で示されたメカニズムを年々変動の視点から調査する予定である。

謝辞

本研究は科研費 (23K20542) 「梅雨前線の形成・変動の理解に向けた新しい気団形成論の構築」の支援を受けた。気象庁の竹村和人様に、夏季アジアジェット出口付近におけるロスビー波の碎波イベントの抽出結果をご提供いただいた。

参考文献

- Abatzoglou, J. T., and G. Magnusdottir, 2006: Planetary wave breaking and nonlinear reflection: Seasonal cycle and interannual variability. *J. Climate*, **19**, 6139–6152.
- Kasuga, S., M. Honda, J. Ukita, S. Yamane, H. Kawase, and A. Yamazaki, 2021: Seamless detection of cutoff lows and preexisting trough. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 3119–3134.
- Kobayashi, S., and co-authors, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Liebmann, B., and C. A. Smith, 1996: Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275–1277.
- Mak, M., and M. Cai, 1989: Local barotropic instability. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3289–3311.
- Masato, G., B. J. Hoskins, and T. Woollomgs, 2013: Winter and summer northern hemisphere blocking in CMIP5 models. *J. Climate*, **26**, 7044–7059.
- Nakanishi, R., M. Kuramochi, and H. Ueda, 2025: Summertime convection jump over the subtropical western North Pacific and its relation to Rossby wave breaking near the Asian jet exit region. *J. Meteor. Soc. Japan*, **103**, 5–15.
- Sardeshmukh, P. D., and B. J. Hoskins, 1988: The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1228–1251.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 607–627.
- Takemura, K., H. Mukougawa, and S. Maeda, 2020: Large-scale atmospheric circulation related to frequent Rossby wave breaking near Japan in boreal summer. *J. Climate*, **33**, 6731–6744.
- Takemura, K., and H. Mukougawa, 2020: Dynamical relationship between quasi-stationary Rossby wave propagation along the Asian jet and Pacific-Japan pattern in boreal summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 169–187.
- Ueda, H., M. Ohba, and S.-P. Xie, 2009: Important factors for the development of the Asian–Northwest Pacific summer monsoon. *J. Climate*, **22**, 649–669.
- Ueda, H., and T. Yasunari, 1996: Maturing process on the summer monsoon over the western North Pacific—A coupled ocean/atmosphere system. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 493–508.
- Ueda, H., T. Yasunari, and R. Kawamura, 1995: Abrupt seasonal change of large-scale convective activity over the western Pacific in the northern summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 795–809.
- Watanabe, M., and M. Kimoto, 2000: Atmosphere-ocean thermal coupling in the North Atlantic: a positive feedback. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 3343–3369.
- Xie, S.-P., K. Hu, J. Hafner, Y. Du, G. Huang, and H. Tokinaga, 2009: Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J. Climate*, **22**, 730–747.
- Xie, S.-P., 2023: *Coupled Atmosphere-Ocean Dynamics: From El Niño to Climate Change*. Elsevier, 424 pp.