

近年のアジア・アフリカ・モンスーンの非常に深い対流が 南東太平洋の海面水温の低温化傾向に及ぼす影響

小寺邦彦（京大・理）・小林ちあき（気象研）・
Rei Ueyama (NASA Ames)・江口菜穂（九大・応力研）

1. はじめに

温室効果ガスの増加が気候に対してどの様に影響するのかについて様々な研究がなされている。中でも、大気循環の主要な成分であるハドレー循環に対する影響について、観測やモデル実験を通して多くの研究がなされている。一般的には温暖化によってハドレー循環は、弱化し、ハドレー・セルの高緯度方向への広がりが期待されている (Held and Soden, 2006; Chemke and Polvani, 2019)。しかし、対流活動は陸域と海洋域では大きく異なり、特に北半球夏季には、モンスーンによる対流活動がアフリカ、アジアの陸域で活発化して非常に深い対流が発生する。この為、北半球夏季には深い子午面循環が誘起され、冬季となる南半球の下降域で南米大陸の西に亜熱帯高気圧を発達させる。この南太平洋亜熱帯高気圧の発達に伴う地上付近の南東風の発達により南東太平洋の海面水温 (SST) の低下が発生する事が考えられる (Kodera et al., 2019)。しかし近年の地球温暖化の影響に関する気候モデルによる再現実験では、赤道域の東太平洋で観測されるのとは逆に昇温化傾向が見られる (Long et al., 2014)。このモデルと観測の不一致の理由については様々な説があるが、今の所不明である (Watanabe et al., 2023)。

本稿では近年 (1979–2022) の北半球夏季 (7–9 月) のアジア・アフリカ・モンスーン域の非常に深い対流による南北循環の変化と地球温暖化にもかかわらず発生している南東太平洋 SST の低下の関連に関して、気象庁の再解析データ JRA3Q を用いて解析を行った結果について記述する。

2. 結果

太陽放射の季節変化に応じて対流活動の中心は赤道を挟んで南北に変動する。一般にはハドレー循環に伴う上昇、下降域は対流圏中層の平均的な鉛直流について定義されているが、北半球夏季には大陸上、及びその近辺では、熱帯対流圏界面遷移層 (TTL) まで達する非常に深い対流が発生する。この為、北半球夏季には深い南北循環が見られる。

500hPa 並びに 125hPa の気圧系鉛直流 (ω) の気候値の季節変化を図 1a に示す。北半球夏季 (7–9 月) には、特に TTL (125hPa) での上昇域の北上が顕著である。対流圏中部の 500hPa では上昇流の中心は北緯 10 度付近に位置するが、TTL では中心はより極よりの北緯 15 度付近に位置している。

上記 500hPa 及び 125hPa の対流中心の ω と各緯度・高度の ω との相関係数を 1979 年から 2022 年の期間について計算した結果を図 1b、図 1c にそれぞれ示す。対流圏中層 500hPa の上昇流は南緯 20 度付近の下降流との相関を示している。これに反し、TTL の 125hPa の上昇流はより極側の南緯 30 度付近の下降流との相関を示している。つまり、TTL まで達する様な深いハドレー循環はより大きな水平スケールの南北循環を持っている。

北半球夏季 (7–9 月) の深いハドレー循環の指数として 100hPa の北緯 10–20 度で平均した水平風の発散を取る (図 2a)。1979 年から 2022 年にかけて発散は明瞭な増加傾向を示している。この発散場と各緯度の帯状平均 ω との相関係数の緯度—高度断面を図 2b に示す。図 1b で示した様に TTL の上昇流の中心は北緯 15 度付近にあり、下降流は南緯 30 度及び北緯 30 度付近に見られる (白矢印)。南半球の下降域は低緯度に広がり

ながら地上まで伸展している。同様に、100hPa の発散場と帯状平均気温との相関を見ると、下部成層圏では気温低下、対流圏では気温上昇との関連が見られる(図 2c)。また、対流圏では図 2b の下降域に対応する亜熱帯域で特に気温の上昇が見られる。図 2d は 125hPa の ω との相関図から、図 1b に見られる北緯 15 度付近の帯状平均 ω の極大は主に北緯 10–20 度帯のアフリカ–アジアのモンスーン域の対流が寄与している事が示唆される。一方、南緯 30 度付近の TTL の下降域は帯状に広がって分布している。この TTL の下降流が下層とどの様に繋がっているのか、亜熱帯域の南緯 35–25 度平均した ω との相関を図 2e に示す。TTL の下降域は対流圏では特に南アフリカ、南アメリカの山岳の西側で地表付近まで延びている。925hPa の気圧高度場との相関(図 2f)を見ると、これら大陸の西では亜熱帯高気圧が発達している。特に南太平洋の亜熱帯高気圧の東端では南風が強化され高気圧の外縁に沿って赤道東太平洋へと伸展している(図 2g)。さらに海面水温との相関を見ると、南風の強化域に沿って南アメリカ西岸で海面水温の低下が見られる(図 2h)。

3. まとめ

近年の北半球夏季のハドレー循環の変化は主に TTL に達するアフリカ–アジア域の対流活動の活発化によると考えられる。興味深いのは、図 2c の帯状平均 ω との高相関域は昇温傾向のある対流圏では無く寒冷化の見られる成層圏との間の TTL にある。この事から鉛直気温勾配の低下による TTL の安定度の減少との関係があることが考えられる。従って、近年の深いハドレー循環の発達には対流圏の温暖化に加え成層圏の寒冷化も寄与している可能性があると考えられる。

また、TTL まで持ち上げられた大気は、TTL 内での加熱により遠方の亜熱帯まで輸送さ

れる。それにより、下降域の南米大陸西の太平洋上で亜熱帯高気圧が発達し、その東端で南風が強化され沿岸湧昇が強まる。この為に近年の地表面の温暖化傾向にも関わらず南東太平洋では SST の低下が発生すると考えられる。

謝辞 本解析においては作図や統計解析には、気象庁の異常気象分析ツールを用いた。

References

- Chemke, R. and Polvani, L.M., 2019. Exploiting the abrupt 4× CO₂ scenario to elucidate tropical expansion mechanisms. *Journal of Climate*, 32(3), pp.859–875.
- Held, I. M., and Soden, B. J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 19(21), 5686–5699.
- Iwasaki, T. (1989), A diagnostic formulation for wave-mean flow interaction and Lagrangian-mean circulation with a hybrid vertical coordinate of pressure and isentropes, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 67, 293–312.
- Kodera, K., Eguchi, N., Ueyama, R., Kuroda, Y., Kobayashi, C., Funatsu, B.M. and Claud, C., 2019. Implication of tropical lower stratospheric cooling in recent trends in tropical circulation and deep convective activity. *Atmos. Chem. and Phys.*, 19(4), pp.2655–2669.
- Long, S.M., Xie, S.P., Zheng, X.T. and Liu, Q., 2014. Fast and slow responses to global warming: Sea surface temperature and precipitation patterns. *Journal of Climate*, 27(1), pp.285–299.
- Watanabe, M., Kang, S.M., Collins, M., Hwang, Y.T., McGregor, S. and Stuecker, M.F., 2024. Possible shift in controls of the tropical Pacific surface warming pattern. *Nature*, 630(8016), pp.315–324.

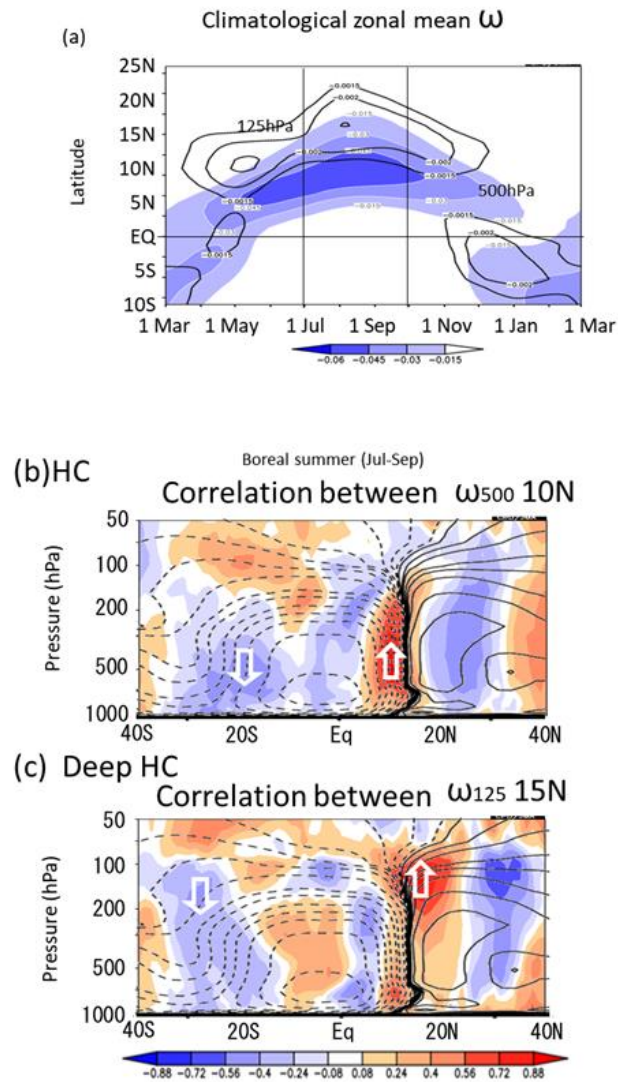


図1 (a) 125hPa (等値線) と 200hPa (彩色) における気候値の帯状平均 ω の季節変化。(b) 7-9 月平均 500hPa 10° N の帯状平均 ω と各グリッドの帯状平均 ω との 1979-2022 年の相関係数。(c) (b) に同じ、ただし 125Pa 15° N の帯状平均 ω との相関係数。矢印は上昇、下降の相関係数の中心位置を示す。また図中の等値線は温位面での質量重み付き帯状平均子午面循環(Iwasaki, T. , 1989)の気候値。

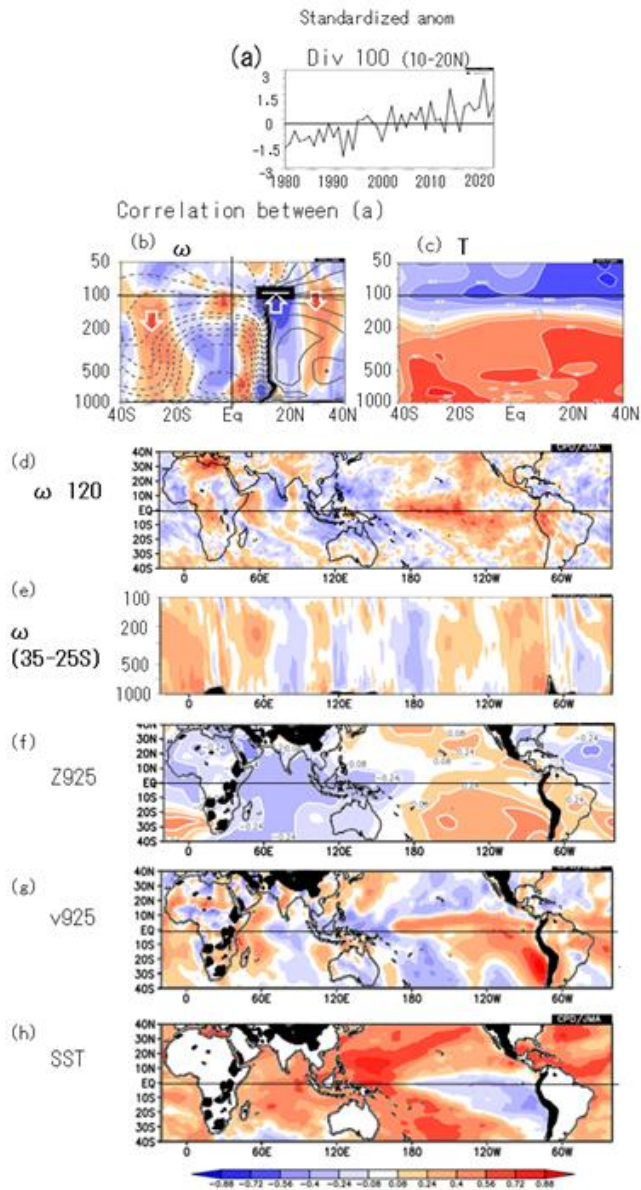


図2 (a) 7-9 月平均深いハドレー循環指数 (年々変動の標準偏差で規格化した 100hPa, 10-20° N 平均の水平発散) の時系列。 (b-g) (a) の時系列と各グリッドの変数との相関係数: (b) 帯状平均 ω , (c) 帯状平均気温, (d) 125hPa ω , (e) 35-25° S 平均 ω , (f) 925hPa 気圧高度, (g) 925hPa 南北風, (h) SST. (f)-(h) の黒色は高度 1200m 以上の地形。