夏季西部北太平洋上の convection jump と アジアジェット出口付近におけるロスビー波の砕波との関係

中西亮太¹ · 倉持将也¹ · 植田宏昭² (¹筑波大学理工情報生命学術院、²筑波大学生命環境系)

1. 研究背景

Convection jump (CJ) とは、フィリピン東 海上の熱帯収束帯の弱化と同時に生じる、熱 帯収束帯の北東における対流活動の急激な 強化のことであり、7月下旬頃に生じて定常 ロスビー波の伝播を介し日本に急激な梅雨 明けをもたらすことが知られる(Ueda et al. 1995; Ueda and Yasunari 1996)。CJ の発生メカ ニズムは、アジアモンスーンの季節進行の視 点で明らかにされてきた。7月上旬、西部北 太平洋亜熱帯域に存在する高気圧性循環の 直下における多照・弱風条件下により、CJ 発 生域で海面水温の高い領域が舌状に形成さ れる (Ueda and Yasunari 1996)。この高気圧性 循環はフィリピン東海上の熱帯収束帯から の下降流に支持されるものである。CJ 発生 域では海面水温が高いにも関わらず高気圧 性循環による下降流および大気境界層付近 における cap 効果により対流活動が抑制され る (Ueda et al. 2009; Zhou et al. 2016)。7月 下旬になると熱帯収束帯が弱化し、同時に高 気圧性循環も弱化することで大気の不安定 性を解消するように対流活動が急激に活発 化する。またこれらのプロセスには海面水温 上昇の効果に加え、モンスーンの季節進行に 伴う太陽放射, 地表面状態および 大気循環 場の季節変化が重要であると指摘される

(Ueda et al. 2009)。しかし、大気場の効果の 詳細なメカニズムについては明らかにされ ておらず、特に中・高緯度に着目した研究は 少ない。

一方近年、中・高緯度循環場の変動と亜熱 帯の対流活動との関係性が明らかになって いる。Takemura and Mukougawa (2020) は、 夏季アジアジェットの出口付近で生じるロ スビー波の砕波に伴う亜熱帯への高渦位 (potential vorticity; PV)を持つ空気塊の貫入 が、フィリピン付近での力学的上昇流を誘引

し、Pacific-Japan パターンを励起すること を明らかにした。同研究では亜熱帯の対流活 発化とhigh-PVの貫入には関係性があること をQベクトル解析により示した。さらに、ロ スビー波の砕波に伴うhigh-PVの貫入が台風 の発生に影響を及ぼすことがいくつかの先 行研究で指摘される(Galarneau et al. 2015; Fudeyasu and Yoshida 2019 ; Takemura and Mukougawa 2021)。これらの結果は、CJの発 生と中緯度波動の伝播および砕波との関係 性を示唆するものであり、Sato et al. (2005) およびLuetal. (2007) は中緯度波列とCJと の関連性を指摘したが、詳細なメカニズムや 力学的な考察は明らかになっていない。夏季 アジアジェット出口付近はロスビー波の高 気圧性砕波が頻繁に生じる地域である

(Postel and Hitchman 1999; Abatzoglou and Magnusdottir 2006)。一方で CJ の発生メカニ ズムにおける対流圏上層の変動からの影響 は明らかになっていない。本研究の目的を、 CJ 発生時における対流圏上層の変動を明ら かにし、CJ に伴う上昇流および対流活動と の関係性について調査することとする。

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)。また、貫入する high-PV の空気 塊をより詳細に解析するため Kasuga et al.

(2021)の寒冷渦指標を用いた。寒冷渦指標 は、トラフおよび寒冷渦を等方的な凹みとし て検出し、トラフから分離する寒冷渦を連続 的に捉えることができる指標である。本研究 では JRA-55 の 6 時間等圧面高度データから 作成した、等圧面の凹み分布に相当する物理 量である AS⁺を用いる。解析期間は 1974 年 から 2021 年であり、CJ の抽出対象期間を 7/20-8/8 とした。

CJ の抽出には、OLR 日データに 5 日間移 動平均を施し CJ 発生領域である 15°-25°N, 150°-160°E (CJ 域) で領域平均した値の変動 を用いた。CJ の抽出対象期間中に値が一度 でも 200 W m⁻²を下回った年を CJ 発生年と し、抽出対象期間内で OLR が最小となる日 を CJ 日 (day 0) とした。 表 1 に、抽出さ れた全 20 事例の CJ における day 0 を示す。 抽出した day 0 を起点に、ラグ合成解析およ び Q ベクトル解析を行った。

表1 抽出された CJ 日 (day 0)

1980/8/1	1981/8/1	1984/7/27	1985/7/22
1986/8/5	1988/8/1	1989/8/1	1990/7/27
1994/7/25	1998/7/27	1999/7/30	2002/7/22
2004/7/23	2009/7/29	2012/8/1	2015/8/4
2016/8/6	2017/7/27	2018/7/29	2021/7/22

3. 結果

図 la に CJ 発生年、Fig. 1b に CJ 非発生年 における 6/1-8/10 の OLR 領域平均値を時系 列で示す。CJ 発生年では 7 月下旬に顕著な OLR の低下がみられる。図 lc に、CJ 事例に おける領域平均 OLR の合成値を時系列で示 す。CJ 域における OLR の気候値と比較する と、CJ の発生から衰退は 10 日程度で生じる ことがわかる。





 図1 (a) CJ 発生年 (b) CJ 非発生年の5日間移 動平均 OLR を CJ 域で領域平均した値 の時系列(単位;Wm⁻²)。赤線は200W m⁻²を示す。(c) CJ 領域平均 OLR のラグ 合成値(黒線)および日本周辺[35°-45°N, 135°-155°E]における領域平均 Z950 偏 差(赤線)の時系列。緑線は CJ 域の OLR 気候値を示す。

図 2 にラグ合成解析の結果を示す。 左列に 200 hPa ジオポテンシャル高度と Takaya and Nakamura (2001)の波活動度フラックス、中 列に 360 K 面渦位、右列に 200 hPa AS⁺と 500 hPa 上昇流を示す。 day -5 では日本の北東海 上に高高度偏差場、その東側では太平洋中央 部に気候学的なトラフ (太平洋中央トラフ) が確認できる (図 2a, b, c)。 この高高度偏差 は day -7 から形成されており、CJ 非発生年 には見られない特徴である。 また高度場に沿



図 2 day -5, -3, -1, 0, +1, +3 におけるラグ合成解析の結果。左列に等値線で 200 hPa ジオポテンシャ ル高度(Z200)の合成値(m)、陰影で Z200の日気候値からの偏差(m)、ベクトルで Takaya and Nakamura (2001)の波活動度フラックス(m2 s⁻²)を示す。また点描はt検定により偏差の 値が 95%以上有意であることを示す。中列に陰影で 360 K 面 PVU を表す。1PVU の大きさは Hoskins et al. (1985)による。右列に陰影で 200 hPa における寒冷渦指標(Kasuga et al. 2021) の AS⁺ (m/100 m)を、等値線で 500 hPa の鉛直速度(≦-0.1 Pa s-1)を示す。紫色の四角は CJ 域を表す。

う波のエネルギー伝播がみられ、太平洋中央 トラフの前面では、日本の北東海上の高高度 偏差場から南東方向への波のエネルギー伝 播が確認できる。day −3 になると、紫色の枠 で示す CJ 域の北東に低高度場が形成され始 め、日本の北東海上から南東へ伝播する波の エネルギーはこの低高度場付近で収束する (図 2d)。この特徴は day -1 から day 0 にか けて明瞭になり、day+1 まで持続する(図 2g, i,m)。波のエネルギーの蓄積はロスビー波の 砕波と関係性があり、day -1 から day +3 に かけて渦位場において明瞭なロスビー波の 砕波を確認できる。またロスビー波の砕波に 伴う high-PV の貫入は CJ 域の北東側で見ら れる(図 2h,k,n)。day -3 から day +1 の AS⁺ に着目すると、day -3 において気候学的な太 平洋中央トラフから伸びた凹み分布が day -1 から day 0 にかけて円形かつ明瞭になり CJ 域の北東へ侵入することがわかる(図 2f,i,l)。 明瞭な凹み分布は day +3 まで継続的に CJ 域 周辺に確認でき、day 0 から day +3 にかけて 急激な上昇流の強化が見られる(図 2l,o,r)。 上昇流が最大となるのは day +3 であり、OLR が最小値となる day 0 から 3 日のずれがある。

図 3 に 850-200 hPa 鉛直積算した Q ベク トル偏差の収束発散および 500 hPa における 鉛直速度の CJ 域における領域平均値を時系 列で示す。Q ベクトルの収束と上昇流の強化 が同時に生じており、両者のピークは day+3 から day +4 付近に確認できる。



図 3 850-200 hPa で鉛直積算した Q ベクトル偏 差の収束発散(10⁻¹⁵ m⁻¹ s⁻¹)(紫線)およ び 500 hPa 鉛直速度(Pa s⁻¹)(緑線)を CJ 域で領域平均したラグ合成値の時系列。

4. 考察とまとめ

ラグ合成解析と Q ベクトル解析の結果、 CJ 発生時における対流圏上層の変動と CJ に 関連する上昇流との関係性が明らかになっ た。CJ が発生する数日前から、日本の北東海 上に高高度偏差場が形成される。この高高度 偏差から太平洋中央トラフの前面に沿って 南東へ伝播した波のエネルギーは、CJ 域の 北東側に形成される低高度場付近で収束す る。波のエネルギーの蓄積によりロスビー波

の砕波が生じ、high-PV は CJ 域の北東に貫 入する。ロスビー波の砕波と低高度場の形成 はday0にかけて明瞭になる。低高度場はday +1 まで、ロスビー波の砕波は day +3 まで持 続する。さらに AS+合成値の結果が円形の凹 み分布を示していたことから、CJ 域の北東 における低高度場の形成とhigh-PVの貫入は 太平洋中央トラフから分離して西進する寒 冷渦の侵入としても解釈することができる。 実際に 1996 年の事例などにおいて CJ 発生 時に明瞭な寒冷渦が侵入したことが寒冷渦 指標で確認できた。さらに Q ベクトル解析 の結果により、CJ 発生前後にみられる対流 圏上層の変動と CJ に関連する上昇流との間 に関係性があることが明らかになった。しか し、OLR の最小日が day 0 であるのに対しQ ベクトル偏差の収束および上昇流が最大に なるのは day +3 付近であった。この数日の ずれは、Arakawa and Schubert (1997)の convection-circulation feedback により雲頂が 対流圏界面付近に達した後も上昇流が強化 し続けたものと解釈できる。day 0 以降の上 昇流の強化と O ベクトル偏差の収束はロス ビー波の砕波が day +3 まで持続している結 果にも支持されるものであり、high-PVの貫 入が CJ の発生に加え、対流の維持にも影響 を及ぼすと解釈することができる。

これらの結果は、CJ の発生メカニズムに は高 SST 領域の形成や熱帯収束帯からの遠 隔作用に代表される熱帯からの影響に加え、 ロスビー波の砕波に伴う high-PV の貫入、寒 冷渦の侵入、低高度場の形成という対流圏上 層・中高緯度からの影響が作用すること示す ものである。本研究の結果は、アジアモンス ーンの季節進行における対流圏上層と中高 緯度の重要性を示唆するものであり、中高緯 度からの視点を含めたアジアモンスーンの 季節展開の包括的な理解が今後の研究に期 待される。

謝辞

本研究は科研費(7K01223/21H00626)「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。

参考文献

- Arakawa, A., and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the largescale environment, Part I. J. Atmos. Sci., 31, 674–701.
- Abatzoglou, J. T., and G. Magnusdottir, 2006: Planetary wave breaking and nonlinear reflection: Seasonal cycle and interannual variability. *J. Climate*, **19**, 6139–6152.
- Fudeyasu, H., and R. Yoshida, 2019: Statistical analysis of the relationship between upper tropospheric cold lows and tropical cyclone genesis over the western North Pacific. J. Meteor. Soc. Japan, 97, 439–451.
- Funatsu, B. M., and D. W. Waugh, 2008: Connections between potential vorticity intrusions and convection in the eastern tropical Pacific. J. Atmos. Sci., 65, 987–1002.
- Galarneau, T. J., R. McTaggart-Cowan, L. F. Bosart, and C. A. Davis, 2015: Development of North Atlantic tropical disturbances near upper-level potential vorticity streamers. *J. Atmos. Sci.*, 72, 572–597.
- Hoskins, B. J., I. Draghici, and H. C. Davies, 1978: A new look at the ω -equation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **104**, 31–38.
- 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.
- Lu, R., H. Ding, C.-S. Ryu, Z. Lin, and H. Dong, 2007: Midlatitude westward propagating disturbances preceding intraseasonal oscillations of convection over the subtropical western North Pacific during summer. *Geophys. Res. Lett.*, 24, L21702, doi: 10.1029/2007GL031277.

- Postel, G. A., and M. H. Hitchman, 1999: A climatology of Rossby wave breaking along the subtropical tropopause. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 359–373.
- Sato, N., K. Sakamoto, and M. Takahashi, 2005: An air mass with high potential vorticity preceding the formation of the Marcus Convergence Zone. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17801, doi: 10.1029/2005GL023572.
- 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., and H. Mukougawa, 2020: Dynamical relationship between quasistationary Rossby wave propagation along the Asian jet and Pasific-Japan pattern in boreal summer. J. Meteor. Soc. Japan, 98, 169–187.
- Takemura, K.,and H. Mukougawa, 2021: Tropical cyclogenesis triggered by Rossby wave breaking over the western North Pacific. SOLA, 17, 164–169.
- Ueda, H., 2014: *Climate System Study: Global monsoon perspective*. University of Tsukuba Press, 217 pp.
- 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.
- Zhou, W., S.-P. Xie, and Z.-Q. Zhou, 2016: Slow preconditioning for the abrupt convective jump over the northwest Pacific during summer. J. Climate, 29, 8103–8113.