

北インド洋ベンガル湾で発生する熱帯低気圧とアジアジェット上のロスビー波列の関係

平田英隆・川村隆一(九大院・理)

1. はじめに

北インド洋ベンガル湾で発生する熱帯低気圧（便宜的に BOB cyclone と呼ぶ）は、pre-monsoon 期及び post-monsoon 期に発生数の極大を示す事が知られている。特に 11 月は一年の中でも BOB cyclone の発生数が多く (Singh et al., 2001), 周辺地域はしばしば深刻な経済的損害, 人的被害を受けることがある。最近では, 2007 年 11 月に発生した Cyclone SIDR がバングラデシュに甚大な被害をもたらした (e.g., Paul, 2010)。11 月のベンガル湾周辺の対流圏上層の大規模循環場に注目すると, 季節進行と共に南下してきたアジアジェットがベンガル湾の北端に位置している。アジアジェットは東方へ伝播する定常ロスビー波の導波管となる事が知られているので (e.g., Hsu and Lin, 1992; Branstator, 2002), アジアジェットに沿って伝播してきたロスビー波列がベンガル湾の大気循環場を変化させて BOB cyclone

の経路や強度に影響を与えることが考えられる。

一方で, 総観規模擾乱に伴う対流熱源はアジアジェット上に定常ロスビー波を励起するポテンシャルがあることが知られている (Yamada and Kawamura, 2007; Yoshiike and Kawamura, 2009)。Yamada and Kawamura (2007) は, 秋季に北西太平洋の熱帯低気圧 (台風) がアジアジェット上に定常ロスビー波を励起し, Pacific-Japan (PJ)・パターン (Nitta, 1987) の形成に寄与することを示した。11 月に発生する BOB cyclone の中には北進し, アジアジェットに接近する事例が存在するので, BOB cyclone も台風同様にアジアジェット上に定常ロスビー波を励起する可能性がある。もし, このような現象が生じるのであれば, 偏西風下流方向に位置する東アジアの天候に遠隔影響を与えることが考えられる。

そこで, 本研究の目的は 11 月において (1) アジアジェット上を伝播するロスビー波列が BOB cyclone の発達や経路に与える影響, (2) BOB cyclone がアジアジェット上にロスビー波列を励起するのかどうかを明らかにする事とする。

2. 使用データ及び解析手法

解析対象とする BOB cyclone を抽出するために, Joint Typhoon Warning Center (JTWC) から提供されているベストトラックデータを 1979 年から 2010 年の期間で使用した。本研究では, 以下の二つの条件で BOB cyclone を抽出した。1 つ目の条件は 11 月にベンガル湾で最大発達を向かえる事例, 2 つ目の条件は 20° N 以北に北進する事例とした。この条件で 11 事例

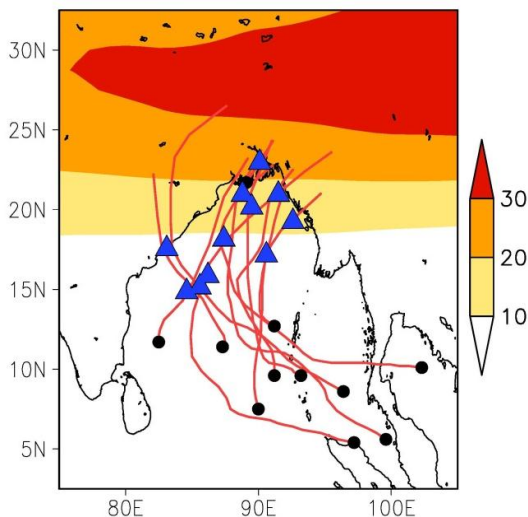


図 1. 本研究で対象とする BOB cyclone の発生地点(●), 最大発達位置(▲), 経路(—). 陰影では西風の 11 月気候値 ($m s^{-1}$) を示している。

が抽出され、図1に示すようにこれらの多くの事例が似たよう経路、最大発達位置をとる。そこで、BOB cyclone とラージスケールの大気循環場との関係を明らかにするために、BOB cyclone の最大発達日を day 0 (key day) としてコンポジット解析を行った。ここで、最大発達は日平均した最大風速で定義した。

また、大気循環場の解析には、1979 年から 2004 年の期間は the Japanese long-term Re-Analysis project data (JRA-25) (Onogi et al., 2007) を、2005 年から 2010 年の期間は Japan Meteorological Agency Climate Assimilation System (JCDAS) の日平均値を使用した。これらの日平均値に対して、二つの low-pass filter (3 日加重平均と 31 日移動平均) を組み合わせることで sub-monthly 時間スケールの変動を抽出した。3 日加重平均は 1-2-1 フィルターである。このフィルターは

Kawamura and Ogasawara (2006) や Yamada and Kawamura (2007) で使用されているものと同じである。

3. ロスビー波列が BOB cyclone へ与える影響

図2に day-3 から day+2 の間の 250hPa 流線関数偏差と波活動度フラックス (Takaya and Nakamura, 2001) のコンポジット図を示す。

day-3 から day+2 の間、地中海からインド亜大陸の西方へと連なる定常ロスビー波列 (便宜的に、Mediterranean-Indian Subcontinent; MIS パターンと呼ぶ) が見られる。この波列に伴って形成される、ベンガル湾北西方向の低気圧循環偏差 (MIS LOW) は day-1 にもっとも強まる。MIS LOW は BOB cyclone が北進及び最大発達する直前に強まるので、BOB cyclone の北進や最大発達に影響を与えている可能性が高い。本稿では、MIS パターンが

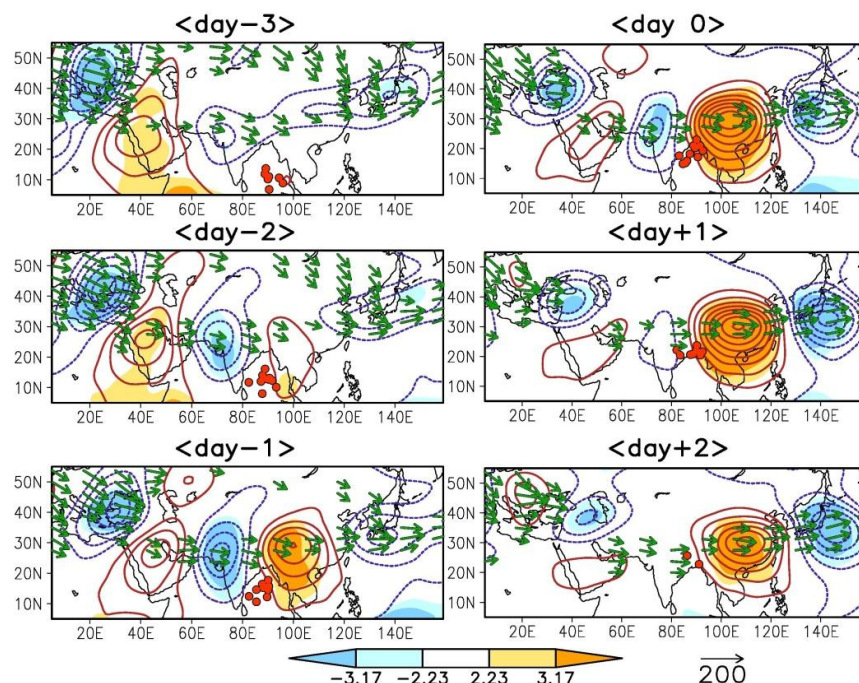


図2. 250hPa 流線関数偏差 (等値線; $\times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) と波活動度フラックス (ベクトル; $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$) のコンポジット図。赤丸は解析に用いた BOB cyclone の存在位置を示す。陰影は流線関数偏差が統計的に有意な領域 (濃い領域; 危険率 1% 以下, 薄い領域; 危険率 5% 以下) を示す。

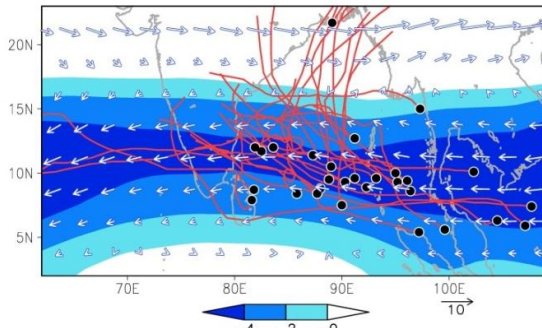


図 3. 11 月に発生した BOB cyclone の発生地点 (●) と経路 (—) を示す. また, 500hPa 水平風 (ベクトル; m s^{-1}) と東風 (陰影; m s^{-1}) の 11 月気候値をベクトルと陰影でそれぞれ示す. BOB cyclone の経路に与える影響について解析した結果の詳細を示す.

熱帯低気圧の経路は 500hPa 循環場の流れの向きと対応が良いことが知られている (George and Gray, 1976). そこで, まず気候平均場から 11 月の BOB cyclone の経路と 500hPa 循環場

の関係を整理し, さらに MIS LOW が 500hPa の循環場に与える影響について見ていく. 図 3 に 11 月の 500hPa 水平風と東西風の気候値と 11 月に発生した BOB cyclone の経路を示す. 11 月のベンガル湾は基本場としては北東モンスーン気流の影響で東風が卓越しており, この東風領域に対応して多くの BOB cyclone が西進している. しかしながら, いくつかの事例は北進している. この経路の違いを明らかにするために, 図 4 の上段に 500hPa 流線関数と水平風の偏差のコンポジット図を示す. day-2 から day-1 の間 MIS LOW に対応してベンガル湾の北西方向に低気圧性循環偏差のピークが形成されていることが分かる. 一方で, ベンガル湾には BOB cyclone に対応する低気圧性循環偏差が見られる. MIS LOW に対応する低気圧性循環偏差はアラビア海からベンガル湾へ西風偏差, ベンガル湾中央付近には南風偏差を形成する. 図 4 の下

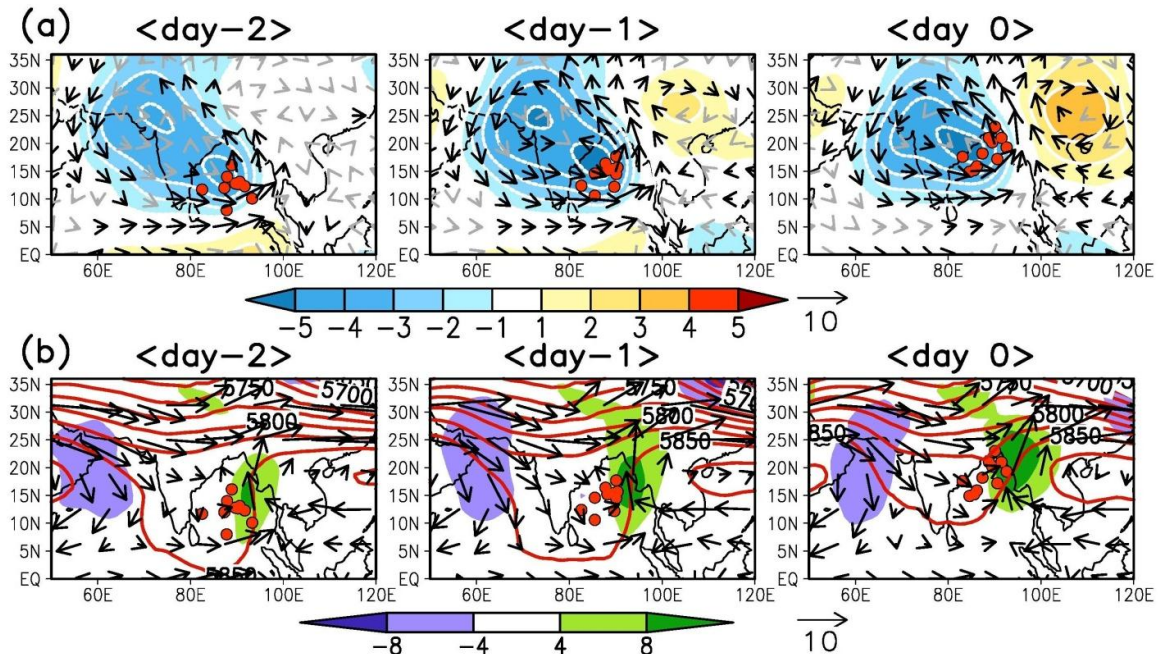


図 4. (上段) 500hPa の流線関数偏差 (陰影; $\times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) と水平風偏差 (ベクトル; m s^{-1}) のコンポジット図. 赤丸は解析に用いた BOB cyclone の存在位置を示す. 黒いベクトルの部分は水平風偏差が統計的に有意な領域 (危険率 10%以下) を示す. (下段) 500hPa の水平風 (ベクトル; m s^{-1}), 南北風 (陰影; m s^{-1}), ジオポテンシャル高度 (等値線; m) のコンポジット図.

段に 500hPa ジオポテンシャル高度と水平風のコンポジット図を示す。ふたつの低気圧性循環に対応して深いトラフがベンガル湾を覆っている。ベンガル湾上では基本場東風は弱化し東西風が弱まっており、トラフの東端で南風が強まっている。この南風に沿って BOB cyclone が北進している。従って、この 500hPa のトラフは BOB cyclone の西進を抑制し、さらに北進を促進する働きがあることが示唆される。これらのことから、MIS LOW は 500hPa のトラフの形成に関与し、BOB cyclone の北進に影響を及ぼすことが考えられる。

4. BOB cyclone がロスビー波列へ与える影響

図 2 の day-1 から day+2 の期間に注目すると、ベンガル湾の東縁から日本への波列伝播（便宜的に Bay of Bengal-Japan; BJ パターンと呼ぶ）が見られる。BJ パターンは東向きの波活動度フラックスを伴っており、定常ロスビー波の下流発達が生じていることが分かる。また、

BJ パターンは MIS パターンと比較して高い統計的有意性を示す。BOB cyclone のアジアジェットへの接近と BJ パターン発達の時間発展が一致するので、もしかしたら BOB cyclone が BJ パターンの励起・強化に寄与しているかもしれない。実際、先行研究においてハリケーンや台風が亜熱帯ジェット上に定常ロスビー波を励起する事が示されているので（Enomoto et al. 2006; Yamada and Kawamura, 2007），BOB cyclone もアジアジェット上に定常ロスビー波列を励起する可能性は十分にある。そこで、BOB cyclone が定常ロスビー波のソースになっているか調べるために、Sardeshmukh and Hoskins (1988) に従い Rossby wave source を計算した。図 5 の上段は 250hPa の速度ポテンシャル偏差のコンポジット値とアジアジェットの位置を示すために 250hPa 東西風の 11 月気候値も示している。また、図 5 の下段は 250hPa における流線関数偏差と Rossby wave source のコンポジット図を示している。解析された BOB

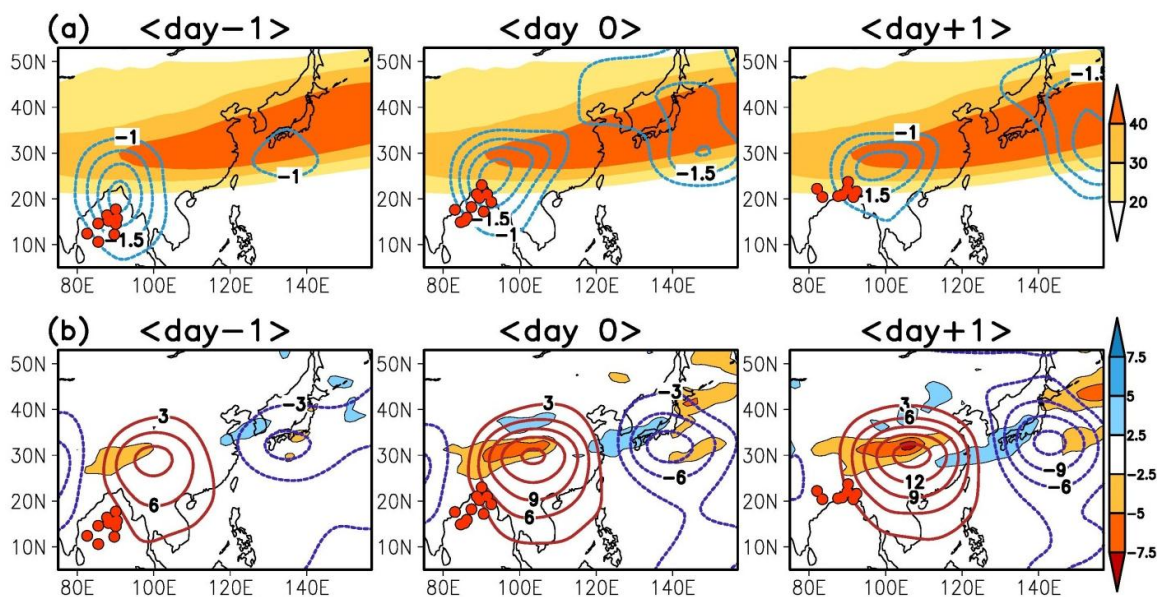


図 5. (上段)250hPa の速度ポテンシャル偏差（等値線； $\times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）のコンポジット図。陰影で 11 月の西風気候値 (m s^{-1}) も示している。速度ポテンシャル偏差は発散部のみ示している。赤丸は解析に用いた BOB cyclone の存在位置を示す。(下段) 250hPa 面の Rossby wave source (陰影； $\times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$) と流線関数偏差（等値線； $\times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）のコンポジット図。

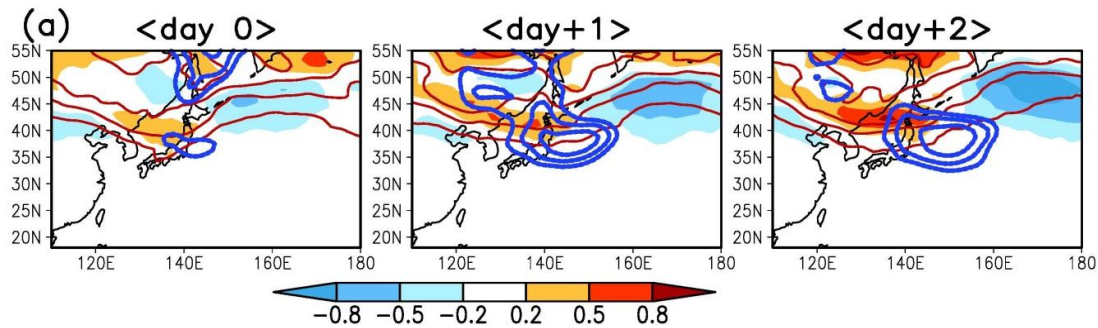


図 6. 310K 面渦位 (赤の等値線; PVU) , 渦位偏差 (陰影; PVU) , SLP 偏差 (青の等値線; hPa) のコンポジット図. SLP 偏差の等値線間隔は 0.5hPa であり, -2.5hPa 以下の部分のみ示している.

cyclone の位置も合わせて示している. day -1 から day 0 にかけて BOB cyclone に対応する発散偏差域の中心が値をあまり変化させずにアジアジェットの高気圧性の渦度を励起する負の Rossby wave source が見られる. これに対応してアジアジェット上に高気圧性の渦度を励起する負の Rossby wave source は BOB cyclone に伴う発散偏差域の中心が最もアジアジェット 強風域に侵入する day+1 に極大値を示す. このことからこの負の Rossby wave source の生成には BOB cyclone が関与していることが分かる. さらに, day+1 は BJ パターンが最も顕著になる時でもあるので, この負の Rossby wave source と BJ パターンの発達の時間発展は一致する. これらのことから, BOB cyclone に伴う発散域がアジアジェット上に定常ロスビー波を励起し, BJ パターンの振幅を顕著に増幅させたと考えられる.

また, BJ パターンは日本付近の対流圏上層に低気圧循環偏差 (BJ LOW) を励起する. PV thinking の観点から (Hosikins et al. 1985), BJ LOW は日本付近の温帯低気圧の発生・発達に影響を与えるかもしれない. 図 6 に, 310K 面の渦位, 渦位偏差, SLP 偏差を示す. day 0 から day+2 の間, 正の PV 偏差が BJ LOW に対応して日本海付近に貫入している. 11 月には, この正の PV 偏差の前面に強い下層傾圧帯と黒潮続流域が存在しているので (Hayasaki and

Kawamura, 2012 の Fig.S1 参照), この状況は上層と下層擾乱のカップリング発達に適した状況であるといえる. 実際, day 0 から day+3 の間, 正の PV 偏差の前面に負の SLP 偏差が次第に成長していく様子が見てとれる. これは BJ LOW と下層の低気圧循環の間でカップリン発達が生じている可能性を強く示唆する. 実際に多くの事例で, 急速に発達する低気圧が出現している. このように, BOB cyclone は BJ パターンを介して, 晩秋・初冬の日本付近の温帯低気圧活動に影響を与えうる.

5. まとめ

本研究では, 晩秋にアジアジェット上を伝播する定常ロスビー波がベンガル湾で発生する熱帯低気圧 (BOB cyclone) の活動に与える影響と BOB cyclone がアジアジェット上の定常ロスビー波を励起するかどうかについて調べた. 11 月においてアジアジェットに接近する BOB cyclone を抽出したところ, 多くの事例が似た発達経路を通り, 同じような場所で最大発達を迎えることが分かった. そこで, BOB cyclone とアジアジェットの変動の双方向の関係を調査するために, 各 BOB cyclone の最大発達日を day 0 として, コンポジット解析を行った.

BOB cyclone の北進の前兆現象として, 対流圏上層において地中海からインド亜大陸へと連なるロスビー波列 (MIS パターン) が顕在

化する。MIS パターンはベンガル湾の北西方向に低気圧循環偏差を励起し、東風による BOB cyclone の西進を抑制し、さらに北進を促す働きがあることが分かった。一方で、BOB cyclone の最大発達以降はベンガル湾の東端から日本付近へ連なる波列パターンが顕著に増幅する。対流圏上層において BOB cyclone による発散域がアジアジェット上に深く貫入することで、ジェット領域内に高気圧性循環偏差を励起し、これが BJ パターンの発生・発達に寄与していることが分かった。さらに、この発達した波列は日本付近の温帯低気圧活動に影響を与えることが分かった。

本研究は、晩秋期において地中海付近から伝播していった定常ロスビー波列が BOB cyclone の北進のトリガーとし働く事、さらにこの BOB cyclone がアジアジェットに接近することで、偏西風下流方向への波列パターンを励起・強化することを示した。この現象は熱帯-中緯度相互作用及び大規模循環場と総観規模擾乱の間の相互作用の典型例である。このような力学的相互作用の適切な理解は短期・中期予測に対して非常に重要であり、さらなる調査が必要である。

謝辞

今回の研究集会への参加にあたり、京都大学防災研究所より旅費の補助を受けました。この場を借りて、お礼申し上げます。また、研究集会において貴重な質問、コメントを下された皆様に感謝致します。

参考文献

Branstator, G., 2002: Circumglobal teleconnections, the jet stream waveguide, and the North Atlantic Oscillation. *J. Clm.*, **15**, 1893–1910.
Enomoto, T., W. Ohfuchi, H. Nakamura and M. A. Shapiro, 2006: Remote effects of tropical storm Cristobal upon a

cut-off cyclone over Europe in August 2002. *Meteor. Atmos. Phys.*, **96**, 29–42.
George, J. E., and W. M. Gray, 1976: Tropical cyclone motion and surrounding parameter relationships. *J. Appl. Meteor.*, **15**, 1252–1264.
Hayasaki, M., and R. Kawamura, 2012: Cyclone activities in heavy rainfall episodes in Japan during spring season. *SOLA*, **8**, 45–48.
Hoskins, B. J., M. E. McIntyre, and A. W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 877–946.
Hsu, H.-H., and S.-H. Lin, 1992: Global teleconnections in the 250-mb streamfunction field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1169–1190.
Kawamura, R., and T. Ogasawara, 2006: On the role of typhoons in generating PJ teleconnection patterns over the western North Pacific in late summer. *SOLA*, **2**, 37–40.
Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **65**, 373–390.
Onogi, K., et al., 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **85**, 369–432.
Paul, B. K., 2010: Human injuries caused by Bangladesh's Cyclone Sidr: an empirical study. *Nat. Hazards.*, **54**, 483–495.
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.
Singh, O. P., T. M. A. Khan, and S. Rahman, 2001: Has the frequency of intense tropical cyclones increased in the north Indian Ocean?. *Current Sci.*, **80**, 575–580.
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**, 608–627.
Yamada, K., and R. Kawamura, 2007: Dynamical link between typhoon activity and the PJ teleconnection pattern from early summer to autumn as revealed by the JRA-25 reanalysis. *SOLA*, **3**, 65–68.
Yoshiike, S., and R. Kawamura, 2009: Influence of wintertime large-scale circulation on the explosively developing cyclones over the Western North Pacific and their downstream effects. *J. Geophys. Res.*, **114**, 10.1029/2009JD011820.