

夏季日本付近におけるロスビー波の砕波頻度と関連する大気大循環

竹村 和人（京都大学大学院理学研究科、気象庁気候情報課）

向川 均（京都大学大学院理学研究科）、前田 修平（気象庁気象研究所）

1. はじめに

シルクロードパターン (Enomoto et al. 2003) に代表されるような、盛夏期アジアジェットに沿って伝播するロスビー波は、アジアジェット出口にあたる日本付近において、しばしば砕波を引き起こす（例えば、Postel and Hitchman 1999, Abatzoglou and Magnusdottir 2006 など）。アジアジェット出口付近における砕波に関する先行研究では、北太平洋西部における砕波に伴う大気循環場の下流影響 (Strong and Magnusdottir 2008)、太平洋十年規模変動 (Pacific Decadal Oscillation: PDO; Mantua et al. 1997) への影響 (Strong and Magnusdottir 2009)、及び砕波の頻度の長期トレンド (Bowley et al. 2019) について示されてきたが、砕波頻度の年々変動をもたらす海況や大気大循環の特徴に関する調査は行われておらず、そのメカニズムは明らかでない。

そこで本研究では、大気再解析及び海面水温データを用いて、月平均場において、砕波頻度に回帰させた海況や大気大循環の特徴を調べる。また、本研究における統計解析の結果より、砕波頻度の年々変動は、エルニーニョ・南方振動 (El Niño Southern Oscillation: ENSO) と強く関連することが示されたため、ENSO による砕波頻度への影響とそのメカニズムに関する考察も行う。

2. 使用データと解析手法

大気循環場のデータには、水平解像度 1.25° 、鉛直 37 層 ($1000 \sim 1\text{hPa}$) からなる気象庁 55 年長期再解析 (JRA-55; Kobayashi

et al. 2015) の日別値及び月平均値を用いた。海面水温 (SST) のデータには、水平解像度 1° の COBE-SST (Ishii et al. 2005) の月平均値を用いた。対象期間は、いずれも 1958～2018 年の各年 7、8 月である。ここで、気候値は 1981～2010 年平均値、偏差は気候値からの差で定義した。

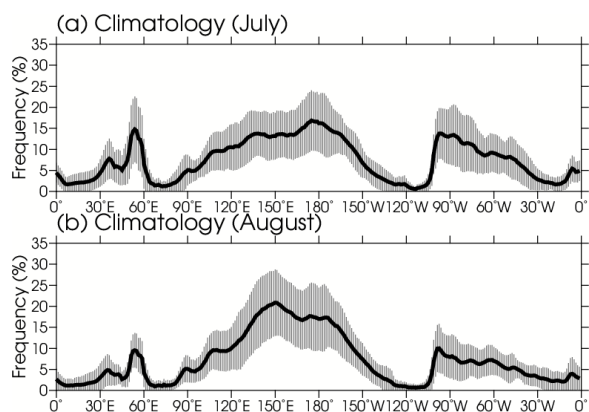
本研究では、Pelly and Hoskins (2003) の手法に基づき、砕波の発生日を、東西 5° 幅の北側 15° –南側 15° 間における力学的対流圏界面 (2PVU 面) 上の温位差が正、すなわち温位の南北勾配が逆転した日で定義した。さらに、月平均砕波頻度を、砕波の発生日数の月全体の日数に対する割合 (%) で定義した。

さらに、月平均砕波頻度と ENSO との関係を評価するため、本研究では、気象庁による定義を参考に、El Niño 発生年及び La Niña 発生年を、各月のエルニーニョ監視海域 ($5^\circ\text{S} \sim 5^\circ\text{N}$, $150^\circ \sim 90^\circ\text{W}$) で平均した SST (NINO.3) の基準値 (前年までの 30 年平均値) からの差の 5 か月移動平均値が、それぞれ $+0.5^\circ\text{C}$ 以上及び -0.5°C 以下となった年で定義した。

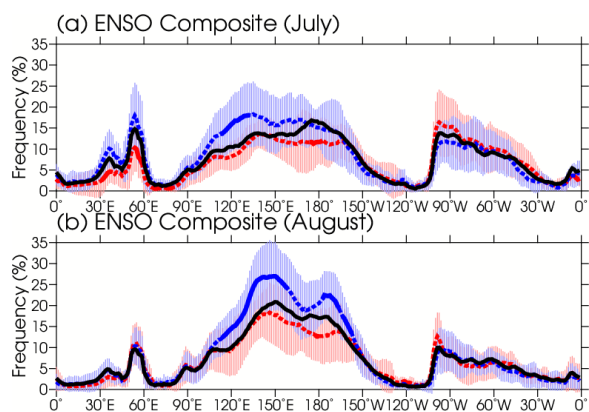
3. 解析結果

3.1 砕波頻度の気候学的特徴

第 1 図に、 $25^\circ \sim 45^\circ\text{N}$ で平均した月平均砕波頻度の経度分布を示す。7、8 月ともに、日本付近～その東海上において、砕波頻度の極大域がみられ、その領域では年々変動が大きいことを見て取れる。この砕波頻度の極大域は、特に 8 月に明瞭であり、北米～北大西洋や $50^\circ \sim 60^\circ\text{E}$ 付近の極大域における頻度と比較して、約 2 倍の頻度を示している。



第1図 25°-45°Nで平均した、(a)7月、(b)8月における、砕波頻度の気候値（黒線）、及び気候値期間における±1標準偏差の幅（灰色陰影）の経度分布。



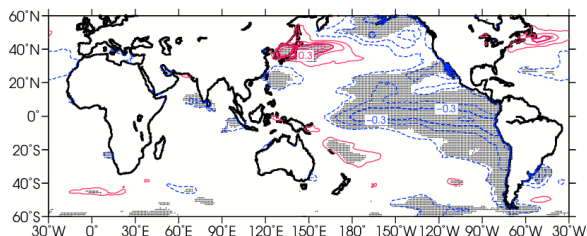
第2図 第1図と同じ。ただし、砕波頻度の気候値（黒線）、及びEl Niño発生年（赤破線）、La Niña発生年（青破線）における合成図及び±1標準偏差の幅（それぞれ暖色、寒色陰影）の経度分布。色実線は、気候値との差が、95%信頼度水準で統計的に有意な領域を示す。

第2図に、El Niño、La Niña発生年で合成した月平均砕波頻度の経度分布を示す。この図より、7、8月ともに、日本付近における月平均砕波頻度は、La Niña発生年に、気候値と比較して有意に増加する傾向がみられ、その傾向は特に8月に明瞭である。

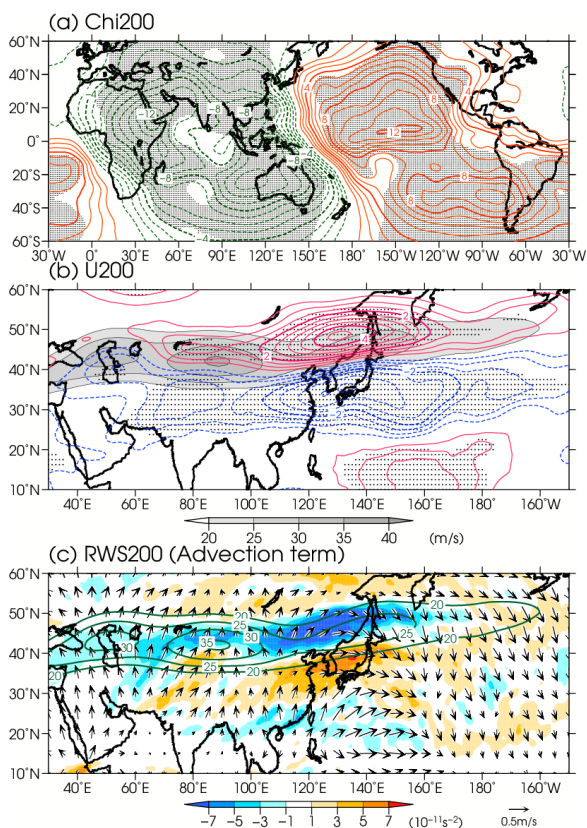
3.2 高い砕波頻度と関連する海況・大気循環

本節以降では、8月平均場に着目し、日本付近（25°-45°N、130°-160°E）で平均した砕波頻度に回帰させた海況及び大気大循環の特徴を調べる。第3図に、日本付近の砕波頻度に回帰したSSTの分布を示す。この図より、

日本付近のSSTは高温偏差を示す傾向がみられ、砕波に伴って昇温した大気からの影響が示唆される。また、La Niña発生年に砕波頻度が増加する傾向と対応して、中・東部太平洋赤道域のSSTは低温偏差を示している。



第3図 8月における、日本付近（25°-45°N、130°-160°E）における月平均砕波頻度に回帰したSST。等値線間隔は0.1°C。ハッチは、95%信頼度水準で統計的に有意な領域を示す。



第4図 第3図と同じ。ただし、200hPaにおける(a)速度ポテンシャル、(b)東西風、及び(c)ロスビー波ソースの渦度移流項（陰影）。(b)の陰影は、200hPa東西風の気候値。(c)の矢印と等値線は、それぞれ砕波頻度に回帰した200hPa発散風と東西風気候値を示す。等値線間隔は、(a) $1 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ 、(b) 0.5m/s、(c) 20m/s以上について5m/s。

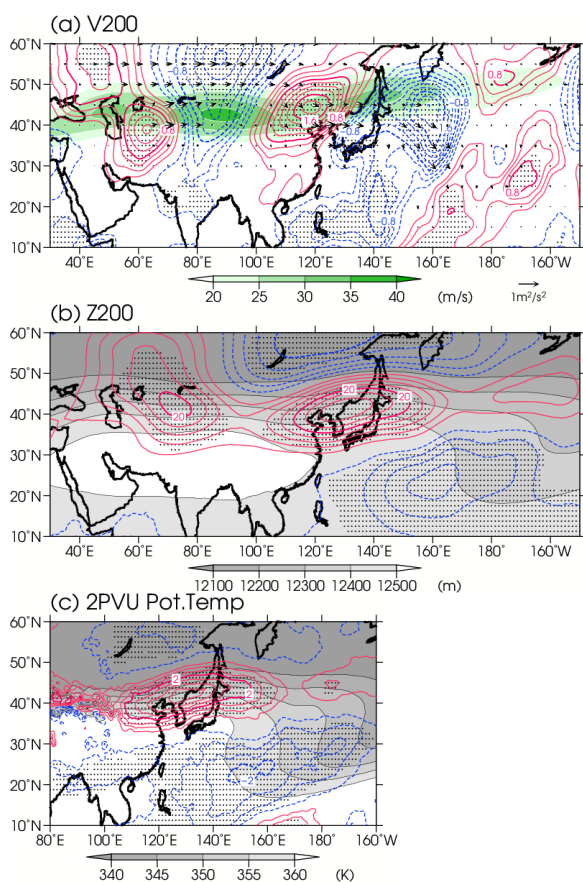
次に、日本付近の砕波頻度に回帰した、対流圏上層における大気大循環の特徴を、第4図及び第5図に示す。200hPa 速度ポテンシャルの回帰分布より、対流圏上層では、太平洋中・東部では収束偏差が卓越し（第4図(a)）、同赤道域における SST 低温偏差と対応する。一方、インド洋を中心に発散偏差が明瞭であり、インドネシア付近～太平洋におけるウォーカー循環は、気候値と比較して強くなる傾向を示している（図省略）。また、インド洋を中心とした発散偏差と対応して、ユーラシア大陸では北向きの発散風偏差となり（第4図(c)の矢印）、アジアジェットの変動に影響を及ぼすことが推察される。ユーラシア大陸における、200hPa 東西風の回帰分布をみると、40°N 以北で西風偏差、それ以南で東風偏差となる傾向がみられる（第4図(b)）。この西風偏差は、気候値のアジアジェット（第4図(b)の灰色陰影）の中心付近～その北側に位置することから、アジアジェットが気候値と比較して強く、かつ北偏する傾向を示している。ここで、ユーラシア大陸における北向き発散風偏差による、アジアジェットの北偏への寄与を調べるため、以下の式で定義される 200hPa ロスビー波ソース（Sardeshmukh and Hoskins 1988）の渦度移流項を評価した。

$$\left[\frac{\partial \xi'}{\partial t} \right]_{adv} \cong -\mathbf{v}_x' \cdot \nabla(\bar{\zeta} + f) - \bar{\mathbf{v}}_x \cdot \nabla \zeta' \quad (1)$$

ここで、 ξ は絶対渦度、 ζ は相対渦度、 f はコリオリパラメータ、 $\mathbf{v}_x$ は発散風を示し、上付きバーは気候値、プライムは偏差を表す。第4図(c)より、40°N 帯にみられる負の渦度変化傾向（陰影）は、北向き発散風偏差（矢印）が気候学的アジアジェット（等値線）を横切る領域に対応している。これらの結果は、ユーラシア大陸上における北向き発散風偏

差に伴うコリオリ加速傾向がアジアジェットの強化に、低緯度側からの負渦度移流がジェットの北偏に、それぞれ寄与することを示している。また、この 40°N 帯における負渦度変化傾向は、第5図(b)に示した 200hPa 高度の回帰分布にみられる、ユーラシア大陸の 40°N 帯における帯状の正（高気圧性）偏差域とも対応している。

さらに、第5図(a)に示した 200hPa 南北風の回帰分布より、アジアジェット（緑陰影）に沿って南北風偏差の波列パターンが明瞭にみられ、日本付近において砕波に対応した高気圧性偏差となる位相をもつパターンを



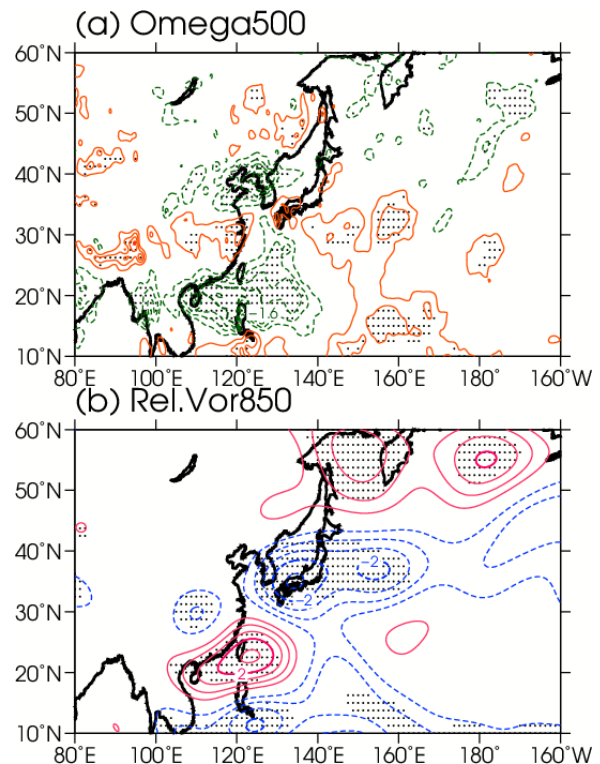
第5図 第3図と同じ。ただし、(a)200hPa 南北風、(b)200hPa 高度、及び(c)2PVU 面温位。(a)の緑陰影は、200hPa 東西風の気候値に砕波頻度の+1 標準偏差で説明される変動を加算した値、矢印は砕波頻度への回帰より算出した波の活動度フラックス（Takaya and Nakamura 2001）を示す。(b)及び(c)の灰色陰影は、気候値を示す。等値線間隔は、(a)0.2m/s、(b)5m、(c)0.5K。

示している。また、アジアジェットに沿う準定常ロスビー波の伝播がみられ（第5図(a)の矢印）、日本付近における高気圧性偏差の増幅、及びそれに関連した砕波頻度の増加と対応している。

200hPa 高度及び 2PVU 面温位の回帰分布をみると、砕波頻度の増加と関連して、日本付近で正（高温位）偏差、日本の南海上の亜熱帯域で負（低温位）偏差となる傾向がみられる（第5図(b)と(c)）。200hPa 高度偏差と気候値（第5図(b)の灰色陰影）との比較より、ミッドパシフィックトラフが気候値と比較して強く、かつ西に伸びる傾向を見て取れる。また、2PVU 面における低温位空気塊の亜熱帯域への侵入は、フィリピン付近に達し、熱帯の大気循環場にも影響を及ぼすことが推察される（第5図(c)）。

最近、Takemura and Mukougawa (2020, in press) は、日本付近における砕波に伴う、亜熱帯域での活発な積雲対流活動への影響について日別再解析データを用いたラグ合成図解析を実施した。その結果、約1週間の時間スケールで、アジアジェット沿いの波束伝播は、日本の東海上における砕波、及びそれに伴う亜熱帯域における活発な積雲対流活動を通して、PJ パターンの発現に寄与することが示された。そこで以下では、砕波頻度に回帰させた日本の南海上における大気循環の特徴に着目して解析する。

第6図に、日本付近の砕波頻度に回帰した 500hPa 鉛直 p 速度、及び 850hPa 相対渦度の分布を示す。第6図(a)より、フィリピン北部付近では上昇流偏差が明瞭にみられ、積雲対流活動が活発となる傾向がみられる。この上昇流偏差域は、亜熱帯域への侵入がみられた 2PVU 面上における低温位空気塊の前面に対応する（第5図(c)）。さらに、第6図(b)

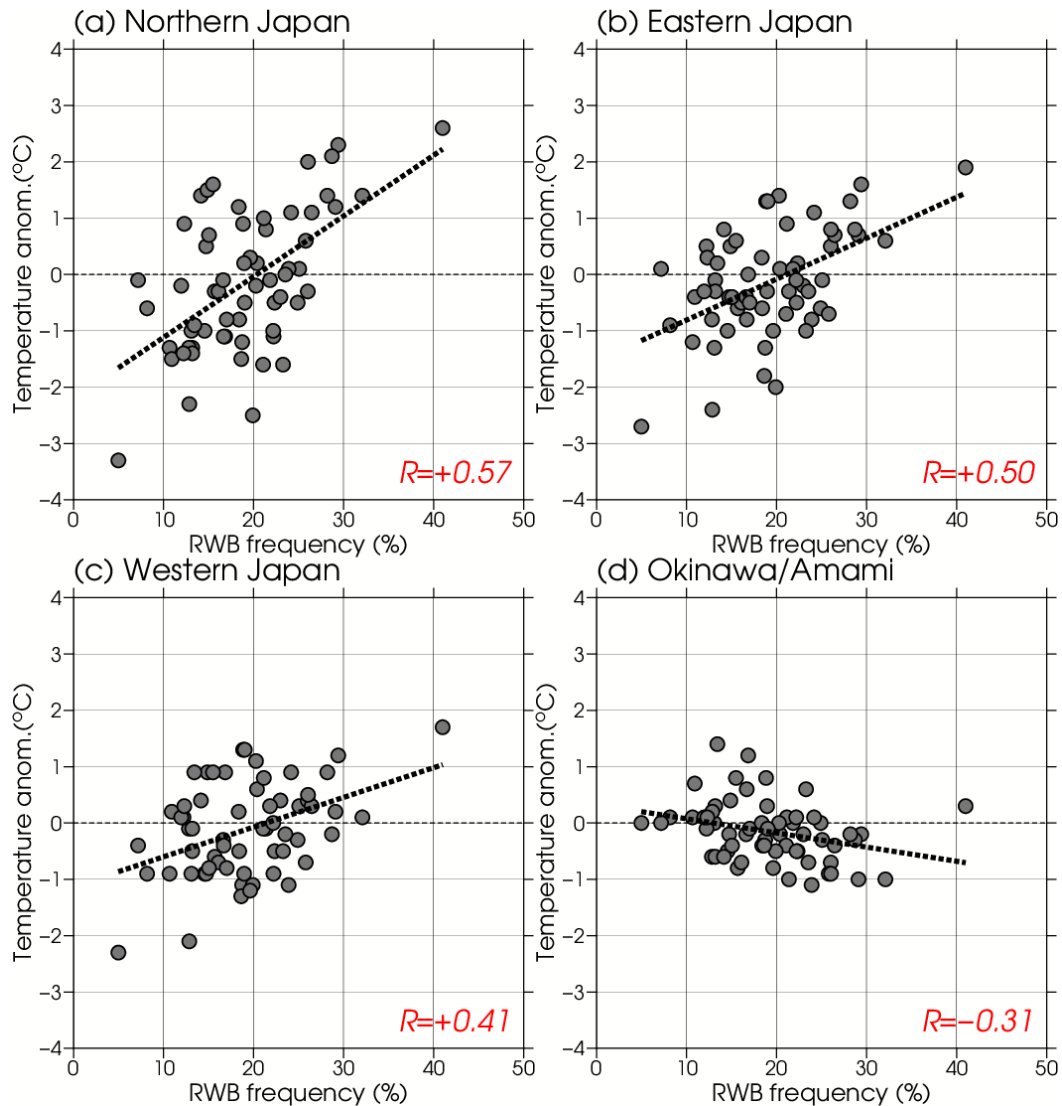


第6図 第3図と同じ。ただし、(a)500hPa 鉛直 p 速度、及び(b)850hPa 相対渦度。等値線間隔は、(a) 0.4×10^{-2} Pa/s、(b) 0.5×10^{-6} s⁻¹。相対渦度は、T24 により平滑化した値で統計解析を行った。

をみると、活発な積雲対流活動に対応して、対流圏下層においてフィリピンの北で低気圧性循環偏差、日本付近で高気圧性循環偏差となる、PJ パターン(Nitta 1987)が明瞭にみられ、日本付近への太平洋高気圧の張り出しが強まる傾向を示している。これらの結果は、Takemura and Mukougawa (2020, in press) によるラグ合成図解析の結果と整合する。また、対流圏下層では、オホーツク海で低気圧性循環偏差となる傾向もみられ（第6図(b)）、PJ パターンを含む南北三極構造(Hirota and Takahashi 2012)がみられることも興味深い。

3.3 砕波頻度と日本の地域平均気温偏差

以上の結果より、La Niña 現象発生時には、日本付近における砕波頻度が有意に増加する傾向がみられ、対流圏上層における高気圧偏差の増幅や、下層における太平洋高気圧の



第7図 8月の、(a)北日本、(b)東日本、(c)西日本、(d)沖縄・奄美における日本付近（25°-45°N, 130°-160°E）で領域平均した月平均砕波頻度（横軸）と、月平均地域平均気温偏差（縦軸）の散布図。相関係数を、図の右下に示す。

張り出しが顕著となることが示された。このことから、日本付近における砕波頻度は、ENSO による影響を通して、日本の夏の天候とも関係することが推察される。第7図に、8月における砕波頻度と、日本の地域平均気温偏差との散布図及び相関係数を示す。この図より、砕波頻度と気温偏差との間に、北・東・西日本では有意な正相関、沖縄・奄美では弱い負相関を見て取れる。この結果は、ENSO に伴う日本の夏の天候への影響評価では、日本付近における砕波頻度を加味するこ

との重要性を示している。

4. まとめ

本研究では、盛夏期の日本付近における砕波頻度と関連する海況及び大気大循環の特徴について、ENSO による影響に着目した解析を行い、日本付近における砕波頻度は、La Niña 発生年に気候値と比較して有意に増加する傾向が示された。

8月平均場に着目した日本付近における砕波頻度との回帰分析より、La Niña 発生年に

現れやすい SST 分布と対応して、対流圏上層では、太平洋中・東部で収束偏差、インド洋で発散偏差となり、ユーラシア大陸における北向き発散風に伴うアジアジェットの強化及び北偏傾向がみられた。また、アジアジェットは、日本付近で高気圧性偏差となる位相によって南北に蛇行する傾向を示し、日本付近における砕波頻度の増加と対応していた。さらに、砕波頻度の増加と関連して、ミッドパシフィックトラフの強化及び西への伸張がみられ、フィリピン付近における積雲対流活動の活発化や、PJ パターンの発現とも関連することがわかった。一方、8月における砕波頻度と日本の地域平均気温偏差との相関解析より、日本付近における砕波頻度は、ENSO による影響を通して、日本の盛夏期の気温とも関係することが明らかになった。

本研究における回帰分析より、日本付近における砕波頻度と関連するアジアジェットの変動として、特定の位相をもつ波列パターンが示されたが、この波列パターンとシルクロードパターンとの関連については、今後より詳しく解析を行う必要がある。また、日本付近における砕波頻度が、北西太平洋域における熱帯擾乱の活動に及ぼす影響について調査を行うことも、夏季の季節予測において重要な課題と言える。

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.
- Bowley, K. A., J. R. Gyakum, and E. H. Atallah, 2019: A new perspective toward cataloging Northern Hemisphere Rossby wave breaking on the dynamical tropopause. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 409-431.
- Enomoto, T., B. J. Hoskins, and Y. Matsuda, 2003: The formation mechanism of the Bonin high in August. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 157-178.
- Hirota, N., and M. Takahashi, 2012: A tripolar pattern as an internal mode of the East Asian summer monsoon, *Climate Dynamics*, **39**, 2219-2238.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865-879.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace, and R. C. Francis, 1997: A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1069-1079.
- Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 373-390.

- Pelly, J. L., and B. J. Hoskins, 2003: A new perspective on blocking. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 743–755.
- Postel, G. A., and M. H. Hitchman, 1999: A climatology of Rossby wave breaking along the subtropical tropopause. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 359–373.
- 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.
- Strong, C., and G. Magnusdottir, 2008: Tropospheric Rossby wave breaking and the NAO/NAM, *J. Atmos. Sci.*, **65**, 2861–2876.
- Strong, C., and G. Magnusdottir, 2009: The role of tropospheric Rossby wave breaking in the Pacific Decadal Oscillation. *J. Climate*, **22**, 1819–1833.
- 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.
- 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**, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-010>, in press.