

季節内変動スケールにおけるシルクロードパターンの多様性と日本への影響について

帶向伸悟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. はじめに

シルクロードパターン (SRP) は、夏季アジアジェットの導波管上に正負の気圧偏差が並ぶ波列状のテレコネクションパターンのことで、その多くがロスビー波のエネルギー伝播を示す (Enomoto et al. 2003 ; Kosaka et al. 2009)。SRP の時間スケールは多岐にわたり、季節内スケールの解析も行われる。Zhu et al. (2023) は、ユーラシア大陸における 200 hPa 南北風 (V200) の PC1 と PC2 で張られる位相空間から東西波列を 8 つのパターンに分類し、季節内規模の時間スケールにおける SRP を卓越位相のないモードとして解析することで、地域別の熱波発生頻度が SRP の特定位相に偏る傾向を持つことを示した。しかしながら、季節内変動を示す SRP を波列パターンから詳細に分けた研究は十分ではなく、力学構造や外部強制力に言及したものは少ない。また、夏季日本における高温・多雨時に SRP が大きく寄与することは知られるが (Shimpo et al. 2019 ; Yokoyama et al. 2020)、対応する SRP の位相を整理し、包括的に SRP の日本への影響を議論した先行研究は十分ではない。

本研究では季節内変動スケールにおける SRP を細分化することで位相ごとの特徴を整理し、季節内 SRP の力学構造や、夏季日本における高温や多雨への影響を調査した。

2. 使用データ・解析手法

大気の再解析データとして 1979 年から 2022 年までの JRA-55 (Kobayashi et al. 2015) 6 時間値を、日々の降水量データとして 1997 年から 2022 年までの GPCP (Huffman et al. 1997) を用いた。解析には日平均値を計算した後、11 日間移動平均を施したものを使用した。偏差の値はカレンダー日の日気候値からのずれで定義する。

SRP の抽出には Kosaka et al. (2012) を参考に、V200 (対象領域 ; 30°N-50°N, 30°E-130°E) の EOF 解析から算出される主成分 (PCs) を用いており、主要モードである PC1 と PC2 で張られる位相空間から SRP の位相ダイアグラムを作成した (図 1)。ここで、PC1 と PC2 は各標準偏差から規格化を施し、位相ダイアグラム上の偏角と原点からの距離により SRP を 8 つのパターンと origin に分類している。以降、phase ごとの名称を P1 などと示す。各位相の SRP のイベント中心日は、位相ダイアグラム上で SRP の同位相に 3 日以上存在する事例において、同一事例内で位相の中心角度 (例 : P2 の中心角度は 45°) に最も近い日と定義し、位相ごとに合成解析を行った。

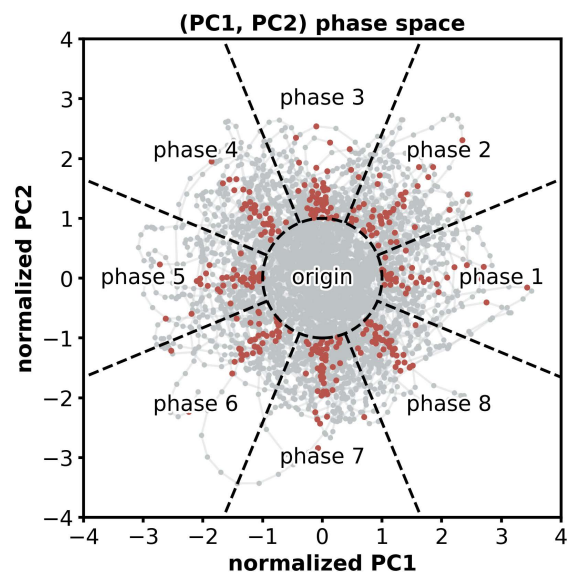


図 1 : 季節内 SRP の位相ダイアグラム。灰色のプロットは全事例を、赤色のプロットはイベント中心日を表す。

3. 結果と考察

3.1 季節内 SRP の対流圏上層における特徴と日本周辺の循環場に与える影響

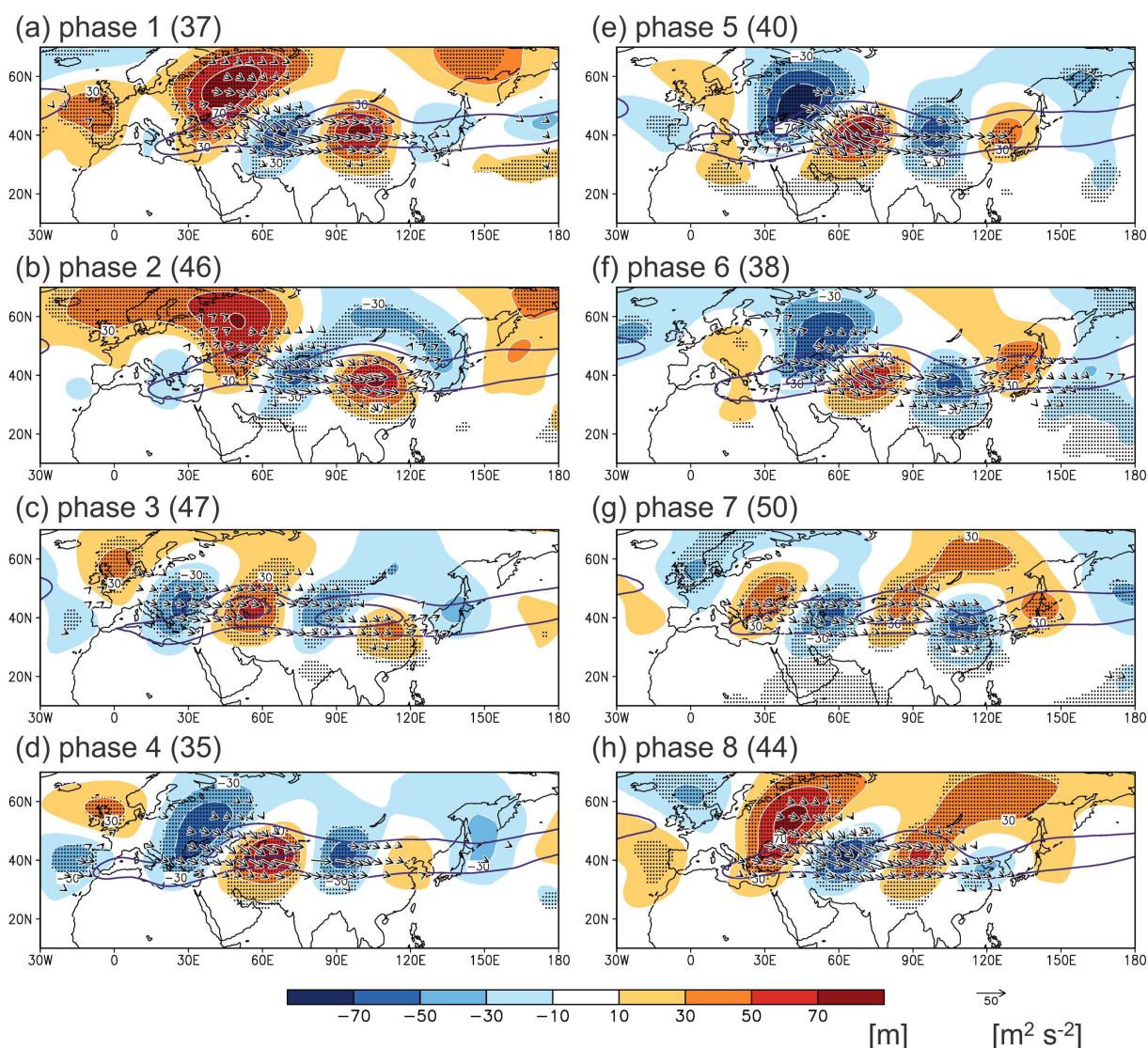


図 2：200 hPa における季節内 SRP のイベント中心日を合成解析した各位相のジオポテンシャル高度偏差[m]（陰影、白色等値線 ± 30 , ± 50 , ± 70 ）、平均東西風[m s⁻¹]（黄色等値線、間隔 20, 30）および Takaya and Nakamura (2001) の波活動度フラックス[m² s⁻²]（ベクトル）。統計的有意性の検定は片側 t 値 95 %（プロット）に基づく。

位相ダイアグラムをもとに 8 つに分類した 200 hPa ジオポテンシャル高度 (Z200) 偏差を図 2 に示す。分類された全ての位相でアジアジェット上にロスビー波を伴う東西波数 5~6 程度の東西波列がみられ、SRP が明瞭に現れていることがわかる。波列の東西分布を P1 から P8 まで比較すると、Z200 偏差の位置が東へ徐々に移りながら波列が分布しており、卓越位相のない季節内 SRP の波列を 8 つのパターンから表現できていると解釈できる。日本の周辺では、P5, P6, P7 にお

いて高気圧性偏差場が、P1, P2 において朝鮮半島付近でトラフがみられた。

図 3 に季節内 SRP の各位相に対する日本周辺の気温・降水量の空間分布を示す。各変数の偏差位置は、P1 から P8 へと位相番号が大きくなるにつれ分布が東にずれており、対流圏上層の高度偏差との対応が明らかである。日本における地上気圧と地上気温は、P5~P7 の際に高気圧性偏差と高温偏差が、P2, P3 では低気圧性偏差と低温偏差がみられた。また、降水量の正偏差と極向きの水蒸気フラックス偏差は P1, P2, P8 において顕著であり、

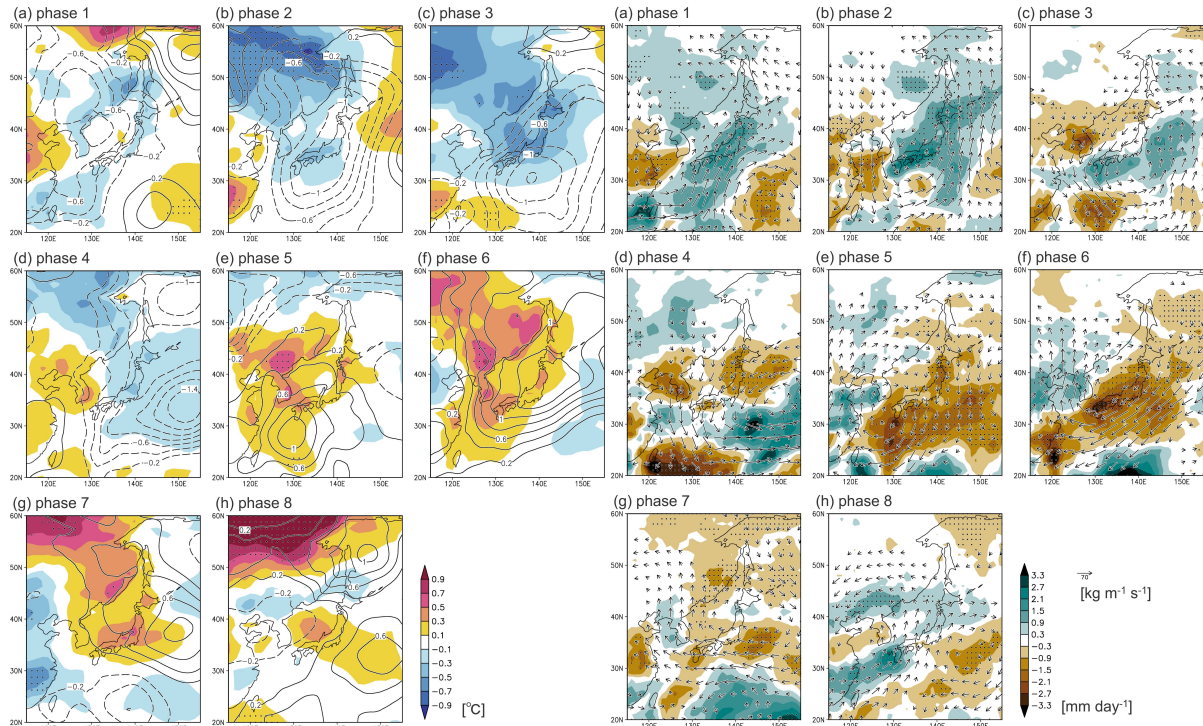


図 3：日本付近における季節内 SRP のイベント中心日を合成解析した下層の循環。左図：各位相の地上 2 m 気温偏差[°C]（陰影）および SLP 偏差[hPa]（等値線）。右図：各位相の降水量偏差[mm day⁻¹]（陰影）および水蒸気フラックス偏差[kg m⁻¹ s⁻¹]（ベクトル）。水蒸気フラックスは 1,000 hPa から 300 hPa における水蒸気量と水平風の積を鉛直積算した。統計的有意性の検定は片側 t 値 95 %（プロット）に基づく。

特に P1 では東日本、P2 では北日本、P8 では西日本において偏差が明瞭であった。こうした特定の季節内 SRP の位相に傾向が偏る様子は、極端気温・降水イベントでもみられた。各イベントにおける季節内 SRP の発生頻度を位相ごとに分けて比較したところ（図省略）、最も高い発生頻度を示す位相とその位相に隣接する位相の合計が示す割合はおよそ 3 割であり、その割合は極端現象の種類や位相ごとに異なることがわかった。これは季節内 SRP が日本の極端現象に高頻度で寄与することと、波列の構造により周辺地域への影響に差が生じることを示唆する。

3.2 季節内 SRP の力学構造

本節では各位相の遷移関係や振幅の特徴を整理する。図 4 に季節内 SRP の位相ダイアグラム上における角速度の大きさを頻度分布で示す。ここで正の角速度、つまり位相ダイアグラムで反時計回りに変化するもの

は波列の東進と対応する。季節内 SRP の平均頻度分布は、角速度の小さい 0°day⁻¹ 線付近を中心としつつ、やや正に偏ることが読み取れる。この結果は、Muetzelfeldt et al. (2023) が示したわずかに東向きの位相速度をもつ準定常的な季節内 SRP の性質と一致する。各位相の遷移頻度分布に着目すると、定在頻度や位相速度方向が位相ごとに異なる特徴がみられた。特に、P2 や P7 では角速度が小さく定在的な位相であること、P8 は角速度が大きい傾向で変動的な位相であることがわかる。P5 や P6 では頻度分布が正に偏っており、東向きの位相速度を持つことから背景風に流されやすい位相であることが示唆される。

季節内 SRP の各位相によって波列の維持・強化の様子が異なる要因を調査するため、それぞれのエネルギー変換効率を計算した（表 1）。ここで、エネルギー変換効率とはエネルギー変換が偏差場のエネルギーを満たすの

に要する時間スケールを表すものである (Kosaka and Nakamura 2006 ; Kosaka et al. 2009 ; Martineau et al. 2022)。傾圧エネルギー変換効率の値はいずれの位相も 2 日から 4 日程度であり、11 日間移動平均場を考慮すると非常に高い効率で有効位置エネルギーを満たすことがわかる。これは位相によらず SRP の維持・強化には南北間の熱輸送が重要であることを意味する。順圧エネルギー変換効率は、P2 が 7.5 日と他の位相と比較して高い効率を示した。定在傾向を示す遷移の結果と整合的であり、背景風のエネルギーを効率的に偏差

場に渡すことで波列が発達し、定在頻度が増していたことが考えられる。正味のエネルギー変換効率は、P1, P2, P5, P6 の効率が高く、P3, P7 は低い効率であり、位相ダイアグラムにおける位相ごとの振幅の偏差と似た傾向がみられた。これらの要因は、チベット高原周辺の南アジア高気圧の変動要素や周辺外部強制源との結びつきによる影響が考えられる。

3.3 外部強制力との関係性

季節内 SRP の各位相における強制源を定性的に評価するため、SRP のイベント中心日と 3 日前の気候場との関連性を検証した。図 5 に中心日における対流圏上層の波列と 3 日前の非断熱加熱 Q1 の偏差および発散風偏差の空間分布を示す。P4~P6 は、アラビア海か

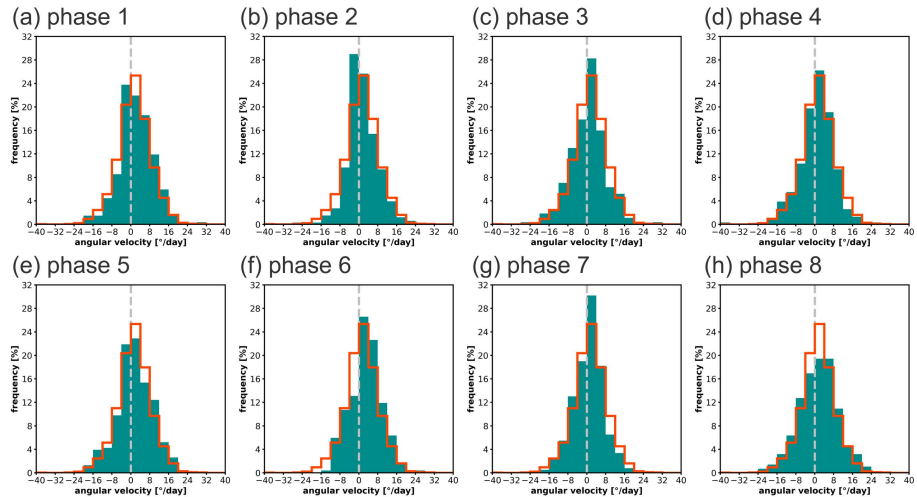


図 4 : SRP 各位相における遷移頻度分布。横軸は角速度の大きさ $^{\circ} \text{ day}^{-1}$ 、縦軸はその頻度[%]を示す。緑色のブロックは各位相の遷移頻度分布、オレンジ色の線は 8 つの位相を平均した遷移頻度分布である。

表 1 : SRP 各位相における振幅と、北半球全域の各エネルギー変換効率。地表面から 100 hPa までの鉛直積分かつ北半球全域で水平積分した値が偏差場のエネルギーをエネルギー変換で満たす時間スケール[day]を示す。上から順に順圧エネルギー変換効率、傾圧エネルギー変換効率、正味のエネルギー変換効率である。振幅は位相ダイアグラム上における原点からの距離であり、偏差は SRP 全体の平均からの差を表す。

phase	1	2	3	4	5	6	7	8
τ_{CK}	12.2	7.5	11.4	9.1	25.9	18.6	18.9	14.8
τ_{CP}	2.9	3.3	3.6	3.4	2.6	2.3	2.9	3.0
τ_{CK+CP}	5.0	4.7	5.9	5.1	5.0	4.6	5.7	5.1
amplitude anom.	-0.01	0.08	-0.15	0.05	0.06	0.05	-0.03	-0.09

らインド半島にかけて Q1 の正偏差が顕著に現れており、チベット高原や地中海の周辺で風が収束していた。ここから、発散風偏差に伴う渦度強制により、アジアジェットの入り口付近に相当する SRP の波源や SRP の波列の一部を熱帯の対流活発が強制・強化していたことが示唆される。これらの点は、今後渦度収支解析やエネルギー変換生成項の解析から定量的な議論を行う必要がある。

欧州のブロッキングと季節内 SRP との関係性を診断するため、Masato et al. (2013) の 2 次元指標に基づき、季節内 SRP のイベント中心日から 3 日前のブロッキング頻度を算出した (図 6)。各位相におけるブロッキング頻度偏差の極大点は北欧より低緯度側に P2, P3, P5 が、極側に P1, P4, P7, P8 が位置し、その周囲にブロッキング偏差頻度の高い領域

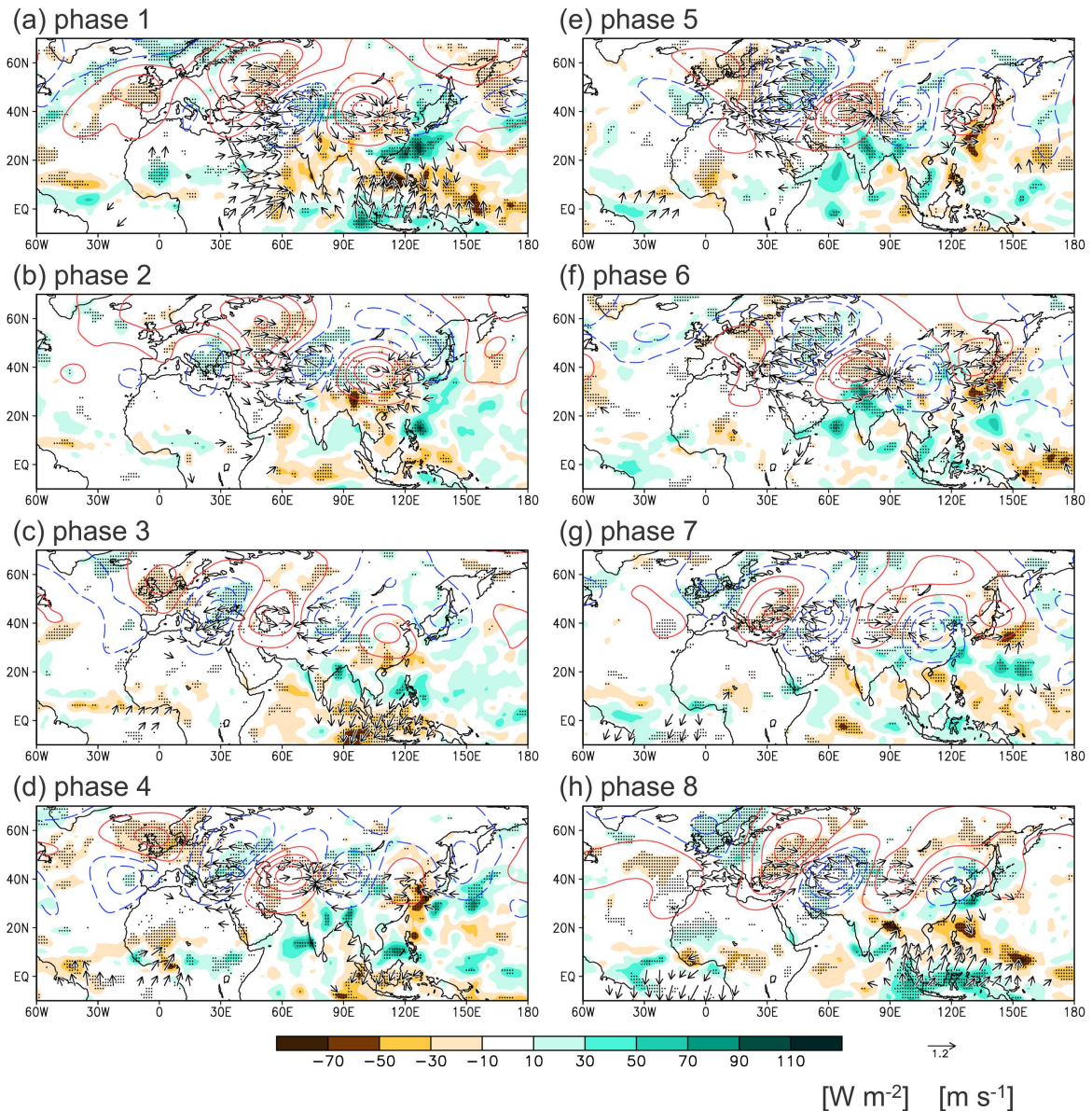


図 5：200 hPa における季節内 SRP のイベント中心日を合成解析した各位相のジオポテンシャル高度偏差[m]（等値線 ± 10 , ± 30 , ...）、3 日前の Q1 偏差 $[\text{W m}^{-2}]$ （陰影）と発散風偏差 $[\text{m s}^{-1}]$ （ベクトル、閾値 0.4 m s^{-1} ）。Q1 は地表面から 10hPa までを鉛直積算した。統計的有意性の検定は片側 t 値 95 %（プロット）に基づく。

がみられた。P3, P4, P5 は図 2 で示した欧州付近における低気圧性偏差の北側に極大点が現れており、季節内 SRP の各位相に対応する波束伝播の波源としてブロッキングが寄与している可能性を示唆する。

4. まとめと今後の課題

本研究では、季節内 SRP を位相ダイアグラムから 8 つに分類し、各位相の日本への影

響、および各位相の力学構造について調査した。日本周辺における気温分布や降水分布は季節内 SRP の東西波列位置に応じて変動することが明らかとなった。また、季節内 SRP の各位相における遷移や振幅とエネルギー変換効率の間には関係性がみられ、振幅の大きい（小さい）位相ほど、エネルギー変換効率が高い（低い）傾向があり、波列の成長・衰退にエネルギー変換が関与していたことが示唆された。定在性の高い位相である P2

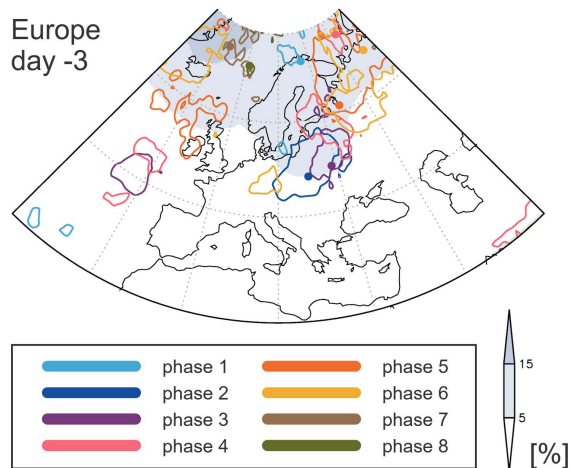


図 6：欧州における季節内 SRP のイベント中心日から 3 日前のブロッキング発生頻度 [%]。陰影は気候平均場を示す。色付き等値線はブロッキング頻度偏差が 7%を超えるものであり、プロットは領域内における各位相の頻度偏差の極大値を示す。

は、主に北日本に多雨をもたらす位相であり、位相の定在性と極端現象との関連性も考えられる。したがって、季節内 SRP の位相ごとの力学構造の違いが日本をはじめとした東アジアへの気候影響の大きさを決定する可能性が示唆された。さらに、周辺地域からの外部強制力である北インド洋の非断熱加熱や欧州のブロッキングが特定の位相の形成・発達に関与している可能性が得られた。今後、さらなる力学的要因の調査により、定量的かつ詳細に解析することで季節内 SRP の予報精度が向上することが期待される。

参考文献

- Enomoto, T., B. J. Hoskins, and Y. Matsuda, 2003: The formation mechanism of the Bonin high in August. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **129**, 157–178.
- Huffman, G. J., and Coauthors, 1997: The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **78**, 5–20.
- Kobayashi, S., Y. Ota, and Y. Harada, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48.
- Kosaka, Y., and H. Nakamura, 2006: Structure and dynamics of the summertime Pacific –

Japan teleconnection pattern. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **132**, 2009–2030.

- Kosaka, Y., H. Nakamura, M. Watanabe, and M. Kimoto, 2009: Analysis on the dynamics of a wave-like teleconnection pattern along the summertime Asian jet based on a reanalysis dataset and climate model simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 561–580.
- Kosaka, Y., J. S. Chowdary, S. P. Xie, Y. M. Min, and J. Y. Lee, 2012: Limitations of seasonal predictability for summer climate over East Asia and the Northwestern Pacific. *J. Clim.*, **25**, 7574–7589.
- Martineau, P., H. Nakamura, A. Yamamoto, and Y. Kosaka, 2022: Baroclinic Blocking. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, 1–10.
- Masato, G., B. J. Hoskins, and T. Woollings, 2013: Winter and summer northern hemisphere blocking in CMIP5 models. *J. Clim.*, **26**, 7044–7059.
- Muetzelfeldt, M. R., R. Schiemann, A. G. Turner, P. L. Vidale, and A. Menon, 2023: Intraseasonal oscillations of the Silk Road pattern lead to predictability in East Asian precipitation patterns and the Mei Yu front. *Environ. Res. Commun.*, **5**, 015003, doi: 10.1088/2515-7620/acb040.
- Shimpo, A., and Coauthors, 2019: Primary factors behind the Heavy Rain Event of July 2018 and the subsequent heat wave in Japan. *SOLA*, **15**, 13–18.
- 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.
- Yokoyama, C., H. Tsuji, and Y. N. Takayabu, 2020: The effects of an upper-tropospheric trough on the heavy rainfall event in July 2018 over Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 235–255.
- Zhu, T., J. Yang, B. Wang, and Q. Bao, 2023: Boreal summer extratropical intraseasonal waves over the Eurasian continent and real-time monitoring metrics. *J. Clim.*, **36**, 3971–3991.