

気象要素を用いる客観手法による梅雨前線の季節進行と年々変動

The seasonal march and interannual variation of baiu fronts by an objective method with weather elements

北海道大学工学院環境フィールド工学専攻
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 宮本真希 (Maki Miyamoto)
正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

1. はじめに

梅雨期における豪雨による河川の氾濫や土砂災害がもたらす被害は甚大であり、令和2年7月豪雨による死者は84名にものぼった¹⁾。そのうち、7月4日に球磨川が氾濫した熊本県での被害は65名であった。平成30年7月にも西日本豪雨が日本全域に大きな被害をもたらしており、梅雨前線の降水による被害は多少の差はありながらも毎年発生している。

近年の豪雨災害を引き起こす原因のひとつであり、社会的影響が非常に大きいにも関わらず、梅雨前線（ひいては前線という気象現象）は気象学（発生・発達メカニズムや構造）および気候学（季節進行や年々変動）のどちらにおいても明らかになっていない部分が多い²⁾。日常の天気予報で目にする天気図に描かれている前線は、専門的な知識を有する予報官によって前線が存在すると推定された位置に描かれたものである。すなわち天気図の前線の定義は、個人の解釈の違いや各事例の大気の状態の違いにより一意ではないため、この前線に対する定量的な評価はできない。

2019年10月に気候変動に踏まえた治水計画に係る技術検討会が提言した「気候変動を踏まえた治水計画」³⁾にて示された通り、今後の河川整備計画は将来気候における降水をもとに策定される。これは単に降水量に着目するだけでなく、降水に寄与する気象現象に関する説明が必要である。しかし、将来気候を仮定した気象データセット d4PDF は大量のアンサンブル計算により作成されており、これを利用した前線の解析には数値的な手法が有効であるため、客観解析手法の開発およびその理解に取り組まなければならない。Takahashi(2013)は日本周辺を対象に、客観手法を用いた前線の季節進行および年々変動の解析を行ったが、将来気候を対象とした同様の研究はまだ行われていない。

前線の客観解析手法を扱うにあたり、気象現象としての前線の理解が必要である。本研究では特に梅雨前線の事例を取り上げていくため、梅雨前線の気象学的な特徴を述べる。梅雨前線は長さ1000kmにも及ぶ大規模な気象現象であり、前線の北側には比較的冷たく乾いた空気が、南側には暖かく湿った空気が存在している。梅雨前線は停滞前線の一種であるため、大局的には同じ位置にとどまり続けるが、両者の勢力バランスにより梅雨前線は1日に南北方向へ100km程度の小規模な移動をしている。南側の暖湿空気の主な供給源は太平洋高気圧であり、高気圧から時計回りに吹き出す風が、前線に向かって南西方向から吹く。前線の北側では寒冷乾燥な空気が北東方向から吹いてくるため、一般に、前線付近の大気は水平方向に気温差が大きく、正の相対渦度をもつことで特徴付けられる。

本研究では、梅雨期の日本周辺を対象に客観解析手法を用いて前線を抽出した。抽出のためのインデックスは水平方向の気温差と渦度を変数に採用した無次元数である⁴⁾。このインデックスの値が閾値を超えるグリ

ッドには前線が存在すると判定した。まず初めに、抽出した前線の発生頻度分布を月ごとに作成することで5月から7月にかけて梅雨前線が徐々に北上していく様子を捉えた。次に、日本の梅雨の全盛期である6月の発生頻度分布を2006年から2020年の各年について作成した。これを気象庁が作成した地上天気図と比較し、各年の梅雨前線の位置や移動の傾向が発生頻度分布に表れていることを示した。

2. 手法とデータ

2.1 前線の客観解析手法

前線の客観的な解析手法の開発に初めて取り組んだRenard and Clarke(1965)は前線の特徴付ける気象要素は水平方向の気温差であるとして、前線を検出するパラメータTFP(Thermal Frontal Parameter)を作成した。さらに、TFPを利用して前線の位置を推定する手法(T判定)がHewson(1998)により提案された。T判定を含め、TFPを利用した前線解析は最もよく用いられている方法であり、気象庁の前線解析においてもTFPの分布を参考資料として利用している⁵⁾。しかし、Hewson(1998)でも指摘されていた通り、前線を定義する気象要素として気温に加えて風が挙げられる。そこでSimmonds et al.(2012)は風向の変化を前線抽出のインデックスに用いた手法(WND)を提案した。T判定とWNDによる前線抽出の比較はSchemm et al.(2015)によって行われた。温帯低気圧に伴う前線の事例ではWNDで寒冷前線のみ抽出されたのに対し、T判定では温暖前線、寒冷前線ともに抽出された。どちらの前線も水平方向の気温差は大きい、風向の変化が明瞭なのは寒冷前線のみであることに一致する。一方で、水平方向の風速差が大きい場の前線の事例ではWNDで前線全体を抽出できていたが、T判定では一部が途切れて抽出されており、用いる気象要素によって各手法の抽出対象となる前線が異なることが示された。

Parfitt et al.(2017)は前線を定義する第一の気象要素は気温であり、風は二次的な要素でしかないため単体での使用には注意が必要であると述べた。その上で、T判定の複雑な計算を単純化するため、気温と風の両方を用いたインデックスによる前線抽出方法(F判定)を提案した。冬の北大西洋上の温帯低気圧に伴う前線の抽出においてはT判定とF判定のどちらも概ね同じ結果が得られた。

本研究では前線の客観的な抽出手法としてParfitt et al.(2017)が提案したF判定を使用する。熱力学変数として水平方向の気温勾配 $|\nabla(T_p)|$ [K/100km]、力学変数として相対渦度 ζ_p [1/s]を採用した無次元数Fを用いて前線の有無を判断する数値的手法である。無次元数Fは次のように定義される。

$$F = \frac{\zeta_p |\nabla(T_p)|}{f |\nabla T|_0} \quad (1)$$

ここで、 f は惑星渦度[1/s]、 $|\nabla T|_0 = 0.45$ [K/100km]である。 $|\nabla T|_0$ はParfitt et al.(2017)と同じ値を採用した。

F判定では無次元数Fの値が1以上であるグリッドには前線が存在しているとみなす。前線の存在を判定する閾値はParfitt et al.(2017)に準拠している。日本周辺に前線が存在していた複数の事例に対してF判定を適用し、閾値1で前線を抽出できることは確認済みである(図は省略)。

1979年から2015年の12月から2月の地球全体を対象とした前線の発生頻度分布においては、T判定とF判定ともに、温帯低気圧が頻繁に発生・通過する領域(storm track)と対応する位置で高頻度であった⁴⁾。しかし、900hPa(高度約1000m)の前線抽出においてT判定では暖流のメキシコ湾流の上空の領域で発生頻度がF判定に比べて高くなっていた。メキシコ湾流により海面水温が高いため、温度の低い大気が局所的に温められたことが原因であると推測される。一般に、900hPaは地表面の影響を受けやすく、600hPa(高度約4000m)での解析ではこのような違いは見られなかった。本研究では地上天気図との比較を考慮して、より地表面に近い900hPaで解析を行う。日本周辺においても黒潮による同様の影響がT判定の結果に現れることが予想されるため、F判定の使用が適当である。

2.2 使用データ

本研究では、気象庁が運用するメソ数値予報モデルの初期値の再解析データ(以下、MSM)を用いた。MSMは10kmグリッドに3時間おきに格納された鉛直16層の等気圧面データである。Parfitt et al.(2017)では、80kmグリッドの再解析データ(ERA-Interim)を使用している。これに対してMSMは高解像度であるため、無次元数Fの計算を行う前にデータを平滑化する処理を行った。例えば、座標(x,y)のグリッドGを対象に水平方向の気温勾配を算出する際、東西方向の気温差と南北方向の気温差からそれぞれを二乗した和の平方根を求める。100kmあたりの気温差を水平方向の気温勾配と定義しているため、東西方向の気温差は $G_{west}(x-5,y)$, $G_{east}(x+5,y)$ それぞれを中心とする5×5グリッドについて $\sigma=1$ のガウシアンフィルタで平滑化を行い、 $G_{west}(x-5,y)$, $G_{east}(x+5,y)$ の気温の差をとった。南北方向の気温差についても同様である。相対渦度 $\zeta_p = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ も同様に対象グリッドを中心として100km間の風速差から算出した。

$$\zeta_p = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\zeta_p \approx (v(x+5,y) - v(x-5,y)) - (u(x,y+5) - u(x,y-5)) \quad (2)$$

なお、 u , v は気温と同様にガウシアンフィルタを適用してから計算に用いている。

3. 梅雨期の前線分布

3.1 梅雨の季節進行

2006年から2020年までの各月についてF判定による前線の発生頻度をグリッドごとに算出した。発生頻度は8[タイムステップ/日]×30[日]の240タイムステップのうち無次元数Fが閾値1を超えたタイムステップの割合である。図-1(a)から(c)は順に5, 6, 7月の前線の発生頻度分布である。

沖縄地方では例年5月頃から梅雨入りし、6月には梅雨明けする。沖縄地方の発生頻度は、図-1(a)から(c)を順に見ると、5月は0.12から0.15、6月は0.6から0.12、7月は0.03以下であり、梅雨期の5, 6月に比べ

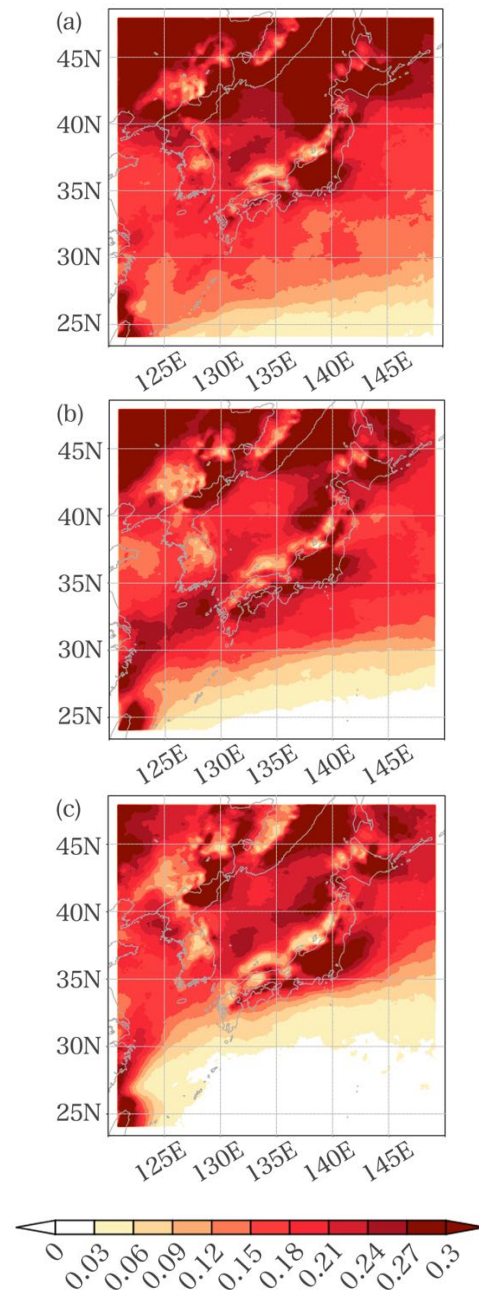


図-1 2006年から2020年までの15年間の(a)5月、(b)6月、(c)7月のF判定(閾値1)による前線発生頻度分布

て7月の発生頻度が低い。また、6月は北海道を除く日本全域で梅雨を迎え、7月に入るとおおむね南から順に梅雨明けしていく。図-1(b)において、発生頻度0.24以上の高頻度帯が東シナ海から日本列島を覆うように伸びており、6月が日本の梅雨の全盛期であることによく一致する。

発生頻度が0から0.03(図-1において白)の低頻度領域の月ごとの変化に注目する。東経130度において5月に低頻度領域は存在しないが、6月に北端が北緯25度、7月には北緯29度付近まで到達している。同様に、東経140度において低頻度領域は5月に存在せず、6月に北緯26度付近、7月に30度付近まで到達しており、梅雨前線の北上を表す。この結果はT判定による前線の季節進行を示したTakahashi(2013)と概ね一致する。

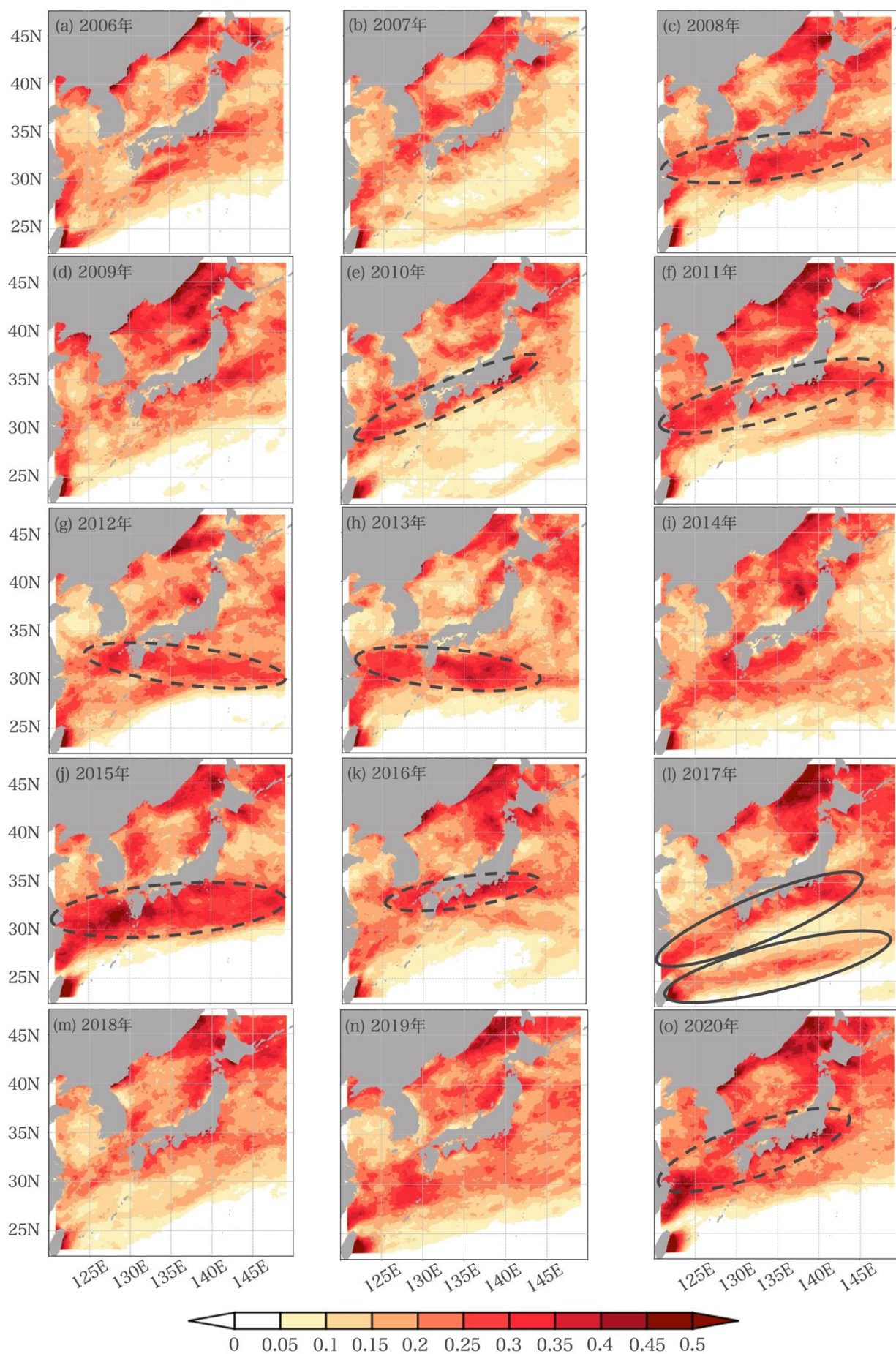


図-2 2006年から2020年の各年6月においてF判定(閾値1)により抽出した前線の発生頻度分布

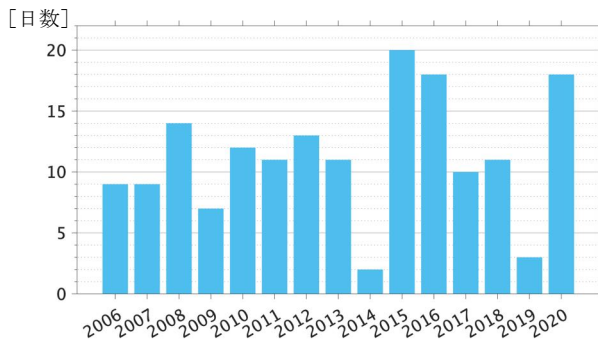


図-3 各年 6 月において地上天気図の前線が九州地方に連続して停滞していた累積日数

3.2 梅雨の年々変動

図-2 に 2006 年から 2020 年までの 6 月の前線発生頻度分布を示した。図-2(c), (e), (f), (g), (h), (j), (k), (o) において、黒破線で示す発生頻度が 0.25 以上の高頻度領域の明瞭な帯が九州地方に存在する。図-3 に示した通り、各年 6 月に九州地方で前線が連続して停滞していた日数は 14 日(2008 年)、12 日(2010 年)、11 日(2011 年)、13 日(2012 年)、11 日(2013 年)、20 日(2015 年)、18 日(2016 年)、18 日(2020 年)であり、梅雨前線は九州地方に集中していた。これより F 判定による前線発生頻度分布が梅雨前線の位置傾向を表すことが示された。

図-2(l)において、黒実線で示すように 2 本の帯が存在している。気象庁の地上天気図によると 2017 年は 6 月中旬まで梅雨前線が北緯 25 度付近に停滞することが多く、下旬には北緯 30 度付近で停滞していた。

4. まとめ

梅雨前線に伴う降水は豪雨災害の原因になり得る社会的重要性の大きい気象現象である。豪雨災害を引き起こす要因のひとつは梅雨前線の南側に流入する暖気の水蒸気を多分に含んでいるため、降水量が多くなり得ることである。梅雨前線は南北に若干の位置変動をしながらも大局的には同じ領域に停滞し続けるため、降水が同じ地域に集中することも一つの要因として挙げられる。さらに、水平方向 1000km 以上にわたって存在する大規模な気象現象であるため影響範囲が非常に大きく、令和 2 年 7 月豪雨や平成 30 年 7 月豪雨（西日本豪雨）でも被害が全国各地に広がった。

本研究では、前線の特徴付ける水平方向の気温勾配と相対湿度を用いた無次元数 F による客観前線抽出手法を採用した。日本の梅雨期を対象とした客観手法による前線抽出は、気温に相当する熱力学変数から作成したインデックスを用いる T 判定で既に行われている⁶⁾。梅雨前線の存在しない領域の分布を比較すると、T 判定と F 判定のどちらにおいても 5 月から 7 月にかけて北上しており、梅雨前線の北上を表している。また、各年 6 月の F 判定による前線の発生頻度分布はそれぞれ異なる分布を示した。発生頻度分布において高頻度領域が帯として顕著に表れた年は、天気図の前線も九州地方に集中して停滞しており、季節進行と年々変動のどちらの面においても F 判定で前線を捉えることができた。

F 判定に限らず客観前線抽出手法に共通する問題は、前線が存在しないグリッドにおいて前線が抽出されることである。図-1, 2 においても明らかに梅雨前線が存在しない位置で発生頻度が分布している。特に北緯 35 度以北では温帯低気圧の通過時に無次元数 F が閾値を超

えるため発生頻度が高い。T 判定を用いて地球全体を対象に前線を抽出した解析でも同様に、温帯低気圧が頻繁に通過する領域 (storm track) において発生頻度が高くなることが報告されている^{2), 4), 10)}。現在気候では北緯 40 度以南を中心に梅雨前線が存在しているため、天気図との比較により容易に前線と低気圧の区別ができる。しかし、将来気候において梅雨前線の存在する緯度帯が変化する可能性があることを考慮すると、F 判定における前線の停滞の継続時間などの条件を加えることで移動性の低気圧を除いた抽出を行う必要がある。

客観手法を用いて前線抽出において、低気圧などの別の気象現象を捉えてしまう問題は改善する必要がある。一方で、現在気候に対する解析では前線の気候学的な特徴を十分に捉えられており、将来気候における前線の気候特性を明らかにすることが期待される。

謝辞：本研究の遂行にあたっては文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマ C「統合的気候変動予測」JPMXD0717935561 の助成を受けた。また、科研費基盤研究(A)19H00815、科研費基盤研究(B)19H02241 の支援を受けた。

参考文献

- 1) 消防庁：令和 2 年 7 月豪雨による被害及び消防機関等の対応状況(第 5 4 報)、2020。
- 2) Berry, Gareth, Michael J. Reeder, and Christian Jakob : A global climatology of atmospheric fronts, *Geophysical Research Letters*, 38(4), 2011.
- 3) 気候変動に踏まえた治水計画に係る技術検討会：気候変動を踏まえた治水計画、2019。
- 4) Parfitt, Rhys, Arnaud Czaja, and Hyodae Seo, A simple diagnostic for the detection of atmospheric fronts, *Geophysical Research Letters*, 44(9), pp.4351-4358, 2017.
- 5) 気象庁：アジア太:洋地上天気図の標準的な解析手法、量的予報技術資料、第 24 巻、pp.94-103、2018。
- 6) Takahashi : An objective frontal data set to represent the seasonal and interannual variations in the frontal zone around Japan, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 91(3), pp.391-406, 2013.
- 7) Renard, Robert J., and Leo C. Clarke. : Experiments in numerical objective frontal analysis, 1965.
- 8) Hewson, Tim D., Objective fronts, *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 5(1), pp. 37-65, 1998.
- 9) Simmonds, Ian, Kevin Keay, and John Arthur Tristram Bye, Identification and climatology of Southern Hemisphere mobile fronts in a modern reanalysis, *Journal of Climate*, 25(6), pp.1945-1962, 2012.
- 10) Schemm, Sebastian, Irina Rudeva, and Ian Simmonds, Extratropical fronts in the lower troposphere-global perspectives obtained from two automated methods, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(690), pp.1686-1698, 2015.