

地域性に着目した短時間豪雨をもたらす降水システムに関する解析

Analysis of Precipitation Systems Causing Short-duration Heavy Rainfall, Focusing on Difference among Regional Characteristics

渡辺悠一朗⁽¹⁾・中北英一

Yuichiro WATANABE⁽¹⁾ and Eiichi NAKAKITA

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Summer heavy rainfall in Japan is often caused by cumulonimbus clouds, with regional variations influenced by topography. Thus, understanding regional precipitation systems is essential. This study analyzes spatial structure and environmental conditions of precipitation systems that cause heavy rainfall in each region using AMeDAS precipitation, national composite radar GPV and mesoscale numerical weather prediction model GPV. The precipitation systems that bring heavy rainfall to Kyoto can be broadly classified into two types. One system features a linear rainband northeast of Mt. Rokko, driven by a low-pressure area, an upper-level trough, and moist air. The other is a localized rain area over Kyoto City, influenced by a Pacific high and convective instability. In heavy rainfall cases in Fukui, it is believed that precipitation occurs under similar environment regardless of duration of rainfall. Based on the characteristics of rainfall intensity spatial distribution, it is considered that the contribution of localized precipitation systems is minimal.

キーワード: 地域性, 総観規模環境場, ゲリラ豪雨, 線状対流系豪雨

Keywords: Regional characteristics, Synoptic-scale environment, Guerrilla heavy rainfall, Line-shaped mesoscale convective system

1. はじめに

1.1 研究の背景

日本では様々な地域で多様な豪雨現象により、豪雨災害をもたらされている。災害をもたらす豪雨として、単独積乱雲によるゲリラ豪雨・マルチセル型豪雨・線状対流系豪雨があげられる。これらの豪雨は主に夏季に発生する積乱雲によりもたらされ、突発性と局地性が共通する特徴である。一方、それぞれの現象は異なる時空間スケールを持つことが知られている。単独積乱雲のゲリラ豪雨は5km~15km程度

の空間スケールで10分から1時間ほどの豪雨をもたらす。マルチセル豪雨は20km~100km程度の空間スケールで1時間弱から3時間ほどの豪雨をもたらす。線状対流系豪雨では50km~200km程度の空間スケールで3時間を超える豪雨をもたらすこともある。このような時空間スケールの違いがあるため、もたらされる可能性のある災害の規模も異なる。

これらの3つの現象には、時空間スケールのほかに発生しやすい地域の違いがある。近畿地方では単独積乱雲によるゲリラ豪雨、関東地方ではマルチセル豪雨が発生する頻度が高い。線状対流系豪雨は日本

全国で発生するものの、梅雨前線と雨域の位置関係により発生場所に異なる傾向が見られると仲ら(2024)は指摘した。以上のことから、夏季の積乱雲による豪雨は地域特性や地形による効果を受け、発生傾向が異なると考えられる。

地球温暖化による豪雨災害の激甚化が危惧される中で、都市部での内水氾濫や一級河川規模の洪水など、様々な地域で発生する多様な規模の水害に備えるためには、それぞれの地域の特性を加味した降水システムへの包括的な理解が重要となる。

1.2 先行研究

これまでも夏季の積乱雲による局地的かつ突発的な豪雨災害を防ぐための予測技術向上を目指した研究が行われてきた。中北ら(2013)はゲリラ豪雨をもたらす可能性のある降水セルであるゲリラ豪雨のタマゴの渦度分布からゲリラ豪雨の危険性予知の可能性を示唆した。東ら(2017)は高分解能偏波ドップラーレーダー網(XRAIN)を用いて、マルチセル型ストームによる冠水危険の予測可能性を示した。線状対流系豪雨は現在もメカニズムに未解明な部分が多く、予測困難であるため、様々な過去事例の解析が行われ

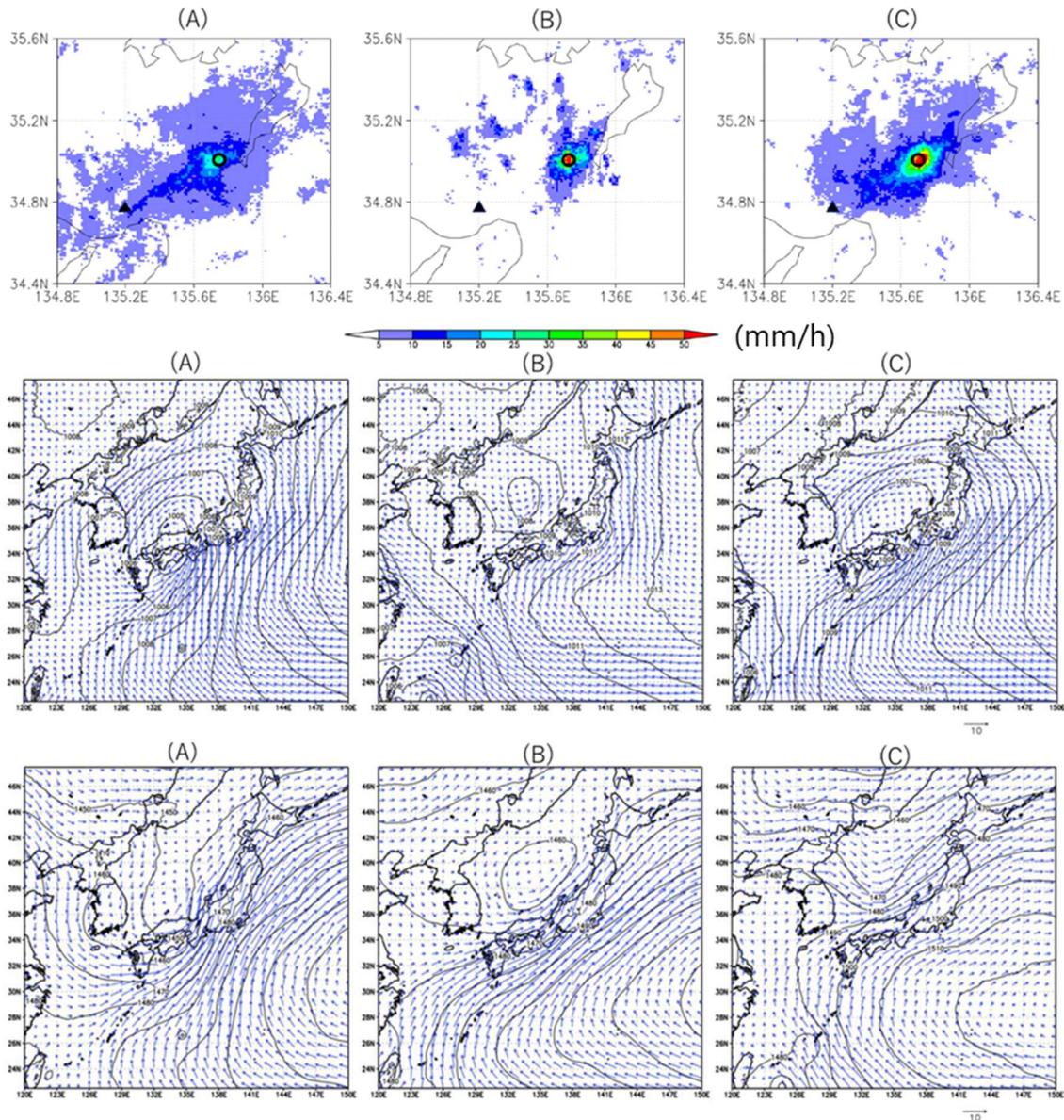


Fig. 1 The average spatial structure and environmental conditions for each group extracted from heavy rain cases based on data from Kyoto Meteorological Observatory. The first row shows the average precipitation intensity for each group. The second row shows the distribution of the average sea level pressure and near-surface horizontal wind for each group. The third row shows the distribution of the geopotential height and horizontal wind at the 850 hPa isobaric surface for each group. (Kajikawa et al. 2024)

ている。

以上のように単独積乱雲によるゲリラ豪雨・マルチセル豪雨・線状対流系豪雨のそれぞれの現象に関する研究が行われてきた。これらの現象を包括的に理解することを目指して、梶川ら(2024)は京都市という特定地域に焦点を当て、降水システムの多様性について議論した。京都市の豪雨事例を京都地方気象台のAMeDASの日最大1時間降水量20mm以上と日最大10分間雨量10mm以上という2種の閾値を用いて抽出し、前者のみを満たすグループAと後者のみを満たすグループB、両者を満たすグループCの3グループに分類した。それぞれのグループ毎の平均的な空間構造、及び環境場をFig.1に示す。Aは六甲山を起点とする線状の雨域を持つ事例の寄与が大きく、関西西部の低圧部と上空のトラフの影響で豪雨をもたらされたことが示唆された。Bは京都市上空の局所的な雨域を持つ事例の寄与が大きく、太平洋高気圧の発達により湿った空気が供給され、地表面温度が上昇し、熱雷のような雨がもたらされたことが示唆された。CはA同様に六甲山を起点とする線状の雨域を持つ事例の寄与が大きく、Cの平均的な環境場はAとBの両者の特徴を持つため、A、Bのそれぞれの特徴を持つ事例が含まれると考えられると述べた。

1.3 研究の目的

1.2節で述べたように梶川ら(2024)は京都市という特定地域に着目し、多様な豪雨事例を解析した結果、降水の継続時間により豪雨事例を特徴的な降水システムに分類できる可能性を示した。2種の継続時間の閾値を満たした事例のグループは複数の降水システムが混在しており、さらなる分類を行うことで降水システムへの理解を深めることができると考えられる。

本研究では梶川ら(2024)の分類方法を基に、特定地域に豪雨をもたらす降水システムを単独積乱雲によるゲリラ豪雨・マルチセル豪雨・線状対流系豪雨のような夏季の積乱雲による降水システムに分類することを目指し、それぞれのメカニズムへの理解を深めることを目的として解析を行う。さらに他地域の解析を行うことで、地域間の共通点・相違点、および梶川ら(2024)の手法の他地域への応用可能性についても検討し、多様な継続時間を持つ降水システムの解析を行う。

1.4 本論文の構成

第2章では梶川ら(2024)の手法を参考にした豪雨事例の抽出・分類、および分類されたグループに対する解析手法について述べる。第3章では第2章の手法を用いて得られた京都における豪雨事例の解析結果

について述べる。第4章では福井における豪雨事例の解析結果について述べる。第5章で本論文のまとめと結果に対する考察を述べる。

2. 使用データと解析手法

本章で述べる使用データと解析手法は梶川ら(2024)を基に、夏季の積乱雲による降水システムに着目するために改良を加えたものである。

2.1 使用データ

豪雨事例の抽出には対象地域におけるAMeDASにより計測された積算降水量データを用いる。AMeDASは日本全国の1300カ所以上の気象観測所で利用されている気象庁の無人観測施設であり、降水量の計測所は約17km間隔で配置されている。本研究では2008年から2022年の夏季(5月から10月)を対象とする。同期間の全国合成レーダーGPVの降雨強度、メソ数値予報モデルGPV(MSM)の地上データと等圧面データを用いて、降水システムに伴う環境場の解析を行う。全国合成レーダーGPVは気象庁が保有する全国の20台のレーダーで観測したエコー強度の1kmメッシュ、10分間隔のデータである。MSMは気象庁の運用する解析データである。格子系は地上では0.05度×0.025度、等圧面では0.1度×0.125度、時間間隔は3時間のデータである。

2.2 豪雨事例の抽出方法

事例の抽出には京都地方気象台と福井地方気象台のAMeDAS積算降水量のうち、日最大1時間降水量と日最大10分間降水量を用いる。日最大1時間降水量が20mm以上、日最大10分間降水量が10mm以上の2つを豪雨事例抽出の閾値とし、前者のみを満たすパターンをA、後者のみを満たすパターンをB、両者を満たすパターンをCと分類する。降水量の閾値を満たす事例を抽出したのちに台風による直接的な雨がもたらされた事例を除外する。台風事例の除外には気象庁の天気図データとMSMの海面更正気圧のデータを利用する。気象庁の予報用語で、1時間降水量が20mmを超える雨は強い雨と定義、10分間降水量には明確な定義はないものの、1時間降水量が10mmを超える雨はやや強い雨と定義されるため、これらの閾値を用いる。本研究では日最大降水量を用いるため、1日に対して1事例の豪雨を抽出する。複数グループに重複して選択されることはなく、日付毎に事例は選択され、分類される。豪雨事例の抽出に2種の積算雨量の閾値を用いる目的は、防災の観点で重要である雨量の指標を用いながら、それぞれの地域の豪雨事例について、異なる降水継続時間により異なる降水シ

システムが寄与することを明らかにすることである。10分間と1時間を対象とする理由は第1章で述べたように、ゲリラ豪雨やマルチセル豪雨、線状対流系豪雨などの降水システムは数十分から数時間の時間スケールの現象であり、それらの現象に焦点を当てるためである。台風による豪雨も防災にとって重要な事例である。しかし、本研究では特に夏季の積乱雲による豪雨を対象と考えるため、これを除外する。

2.3 合成図解析

抽出・分類を行った豪雨事例のグループ毎の合成図を作成することで、それぞれのグループの豪雨事例の平均的空間構造、及び環境場の共通点・特徴を探る。合成図解析に用いる各データの時刻について

述べる。降雨強度のデータに関して、日最大1時間降水量の閾値を満たす事例は、日最大降水量を記録した1時間に含まれる6つのデータのうち、最も大きい降雨強度が事例抽出に用いたAMeDASの地点で記録された時刻を代表的なデータとして用いる。降雨強度のデータは10分間ごとのデータであることと、AMeDASの点データから事例を収集するという観点から、このような代表データの選択方法をとる。日最大10分間降水量の閾値を満たす事例は日最大10分間降水量を記録した10分間に観測されたデータを用いる。MSMを用いた環境場指標に関する合成図作成にはそれぞれの豪雨観測前の最も近い時刻のデータを用いる。

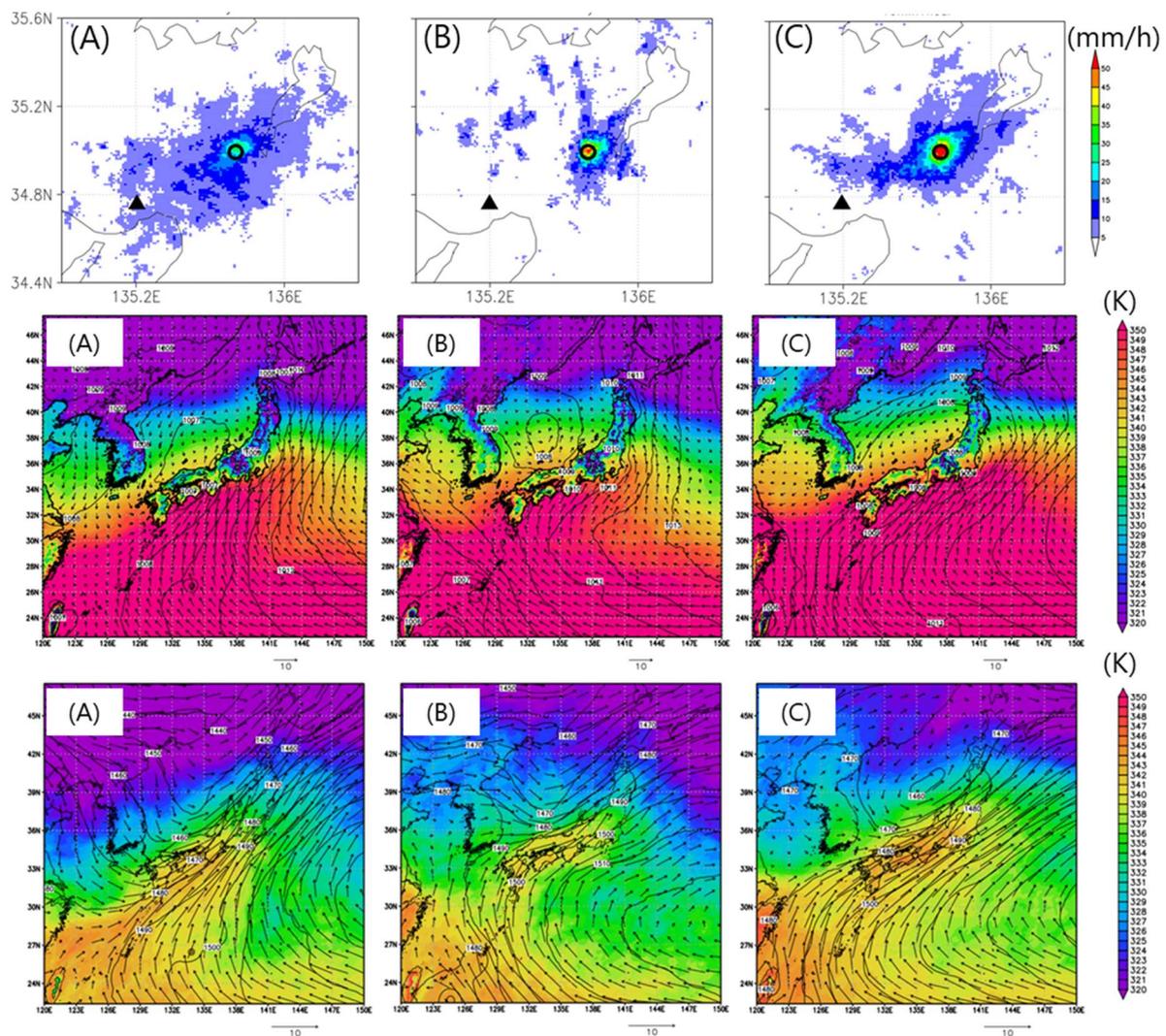


Fig. 2 The average spatial structure and environmental conditions for each group, excluding direct heavy rain cases caused by typhoons, extracted from heavy rain cases based on data from Kyoto Meteorological Observatory. The first row shows the average precipitation intensity for each group. The second row shows the distribution of the average sea level pressure, near-surface horizontal wind, and near-surface equivalent potential temperature for each group. The third row shows the distribution of the geopotential height, horizontal wind, and equivalent potential temperature at the 850 hPa isobaric surface for each group.

3. 京都における豪雨事例の解析

3.1 台風を除外した豪雨事例の解析

京都地方気象台のAMeDASのデータから、Aに26事例、Bに19事例、Cに45事例抽出された。梶川ら(2024)と比較して、Aからは7事例、Cからは3事例の台風事例が除外され、Bは台風事例が含まなかった。各グループの豪雨の平均的な空間構造と豪雨発生に寄与する平均的な環境場を確認する、及び台風除去前との差異を比較するためにグループ毎の降雨強度の平均的な空間分布と平均的な環境場をFig.2に示す。Fig.1と異なり、対流不安定な環境場であるか、また水蒸気量の分布の推定のため、相当温位をシェードで示した。Aの空間構造は台風除外前(Fig.1)と比較するとシャープさが減少したものの、六甲山付近から北東へ伸びる雨域を示した。Bの空間構造は台風事例が含まれなかったため、Fig.1と同様の分布を示す。Cの空間構造を台風除外前(Fig.1)と比較すると、弱い雨域の南北方向への広がり小さくなったものの、強い雨域は六甲山付近から京都への線状に近い雨域を示した。

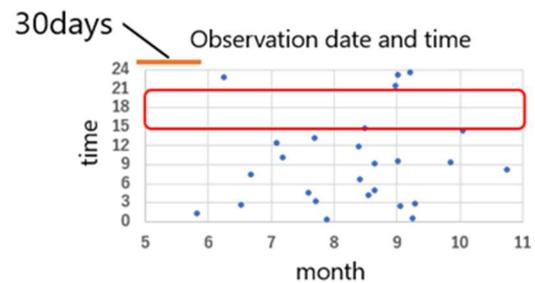
Aの海面更正気圧および水平風の平均的な分布は関西付近における気圧の値は台風除外前と比較して大きい値を示したものの、関西西部に低圧部が同様に分布する。Aの850hPa等圧面におけるジオポテンシャル高度では台風除去前よりも浅いトラフが確認された。Bは降雨強度と同様に台風事例を含まないため、Fig.1と同様の分布を示す。Cの海面更正気圧の分布は台風事例の除外前と同様に太平洋側の高圧部と関西から日本海付近の低圧部が確認された。Cの850hPa等圧面上のジオポテンシャル高度の分布には台風事例の除外前と同様の特徴に加え、日本海側に切離低気圧が確認された。

各グループの相当温位の空間分布を比較する。関西地域に着目すると地上付近の相当温位はCで最も高く、Aで最も低い分布を示した。上層においては、関西地域の相当温位はCで最も高く、Bで最も低い。Aの西日本上空の相当温位は345K程度の値を示し、これは線状降水帯発生の6条件の一つの環境条件に一致する。上層と地上付近の相当温位の差から、Bのグループが最も対流不安定な環境であると考えられる。対流不安定な環境はゲリラ豪雨の発生に大きく寄与する。Cは上層、地上付近ともに最も高い相当温位を示す。その理由は日最大1時間降水量と日最大10分間降水量の両者の閾値を満たす事例が含まれるため、顕著な豪雨事例が集中することが原因と考えられる。

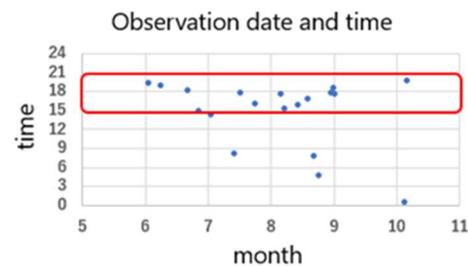
以上のことから、京都の豪雨事例のうち日最大1時間降水量の閾値のみを満たすグループは六甲山付近

からの北東に伸びる雨域で特徴づけられ、関西西部の低圧部及びその上空のトラフ、湿った空気存在により豪雨が引き起こされたと考えられる。日最大10分間降水量の閾値のみを満たすグループは京都市上空の雨域で特徴づけられ、太平洋側の高圧部による太平洋からの湿った空気の流入と対流不安定な環境により豪雨が引き起こされたと考えられる。日最大1時間降水量と日最大10分間降水量の両者の閾値を満たす事例は平均的な空間構造と環境場ともに、2種の閾値を片方のみ満たすグループ両者の特徴を示し、2つのグループの特徴を持つ事例がそれぞれ存在すると考えられる。Cは空間構造においては強い雨域、環境場においてはより湿った空気が見られ、防災の観点から危険である豪雨事例が多く含まれると考えられるので、3.2節にCのグループのさらなる分類・解析結果を示す。これらの考察から、台風による直接的な降雨を除外した場合にも梶川ら(2024)と同様の結果が得られるといえる。

3.2 2種の閾値を満たすグループの解析



(A) Cases that meet the 1-hour threshold



(B) Cases that meet the 10-minute threshold

Fig. 3 (A) A scatter plot of the observation dates and times for cases where only the threshold of a daily maximum 1-hour precipitation over 20 mm was met. (B) A scatter plot of the observation dates and times for cases where only the threshold of a daily maximum 10-minute precipitation of over 10 mm was met.

3.1節で述べたように日最大1時間降水量と日最大10分間降水量の閾値を満たすグループには顕著な豪雨事例が含まれると考えられ、防災の観点から、このグループの豪雨の発生メカニズムへの理解を深めることは重要である。また、日最大1時間降水量の閾

値のみを満たすグループと日最大10分間降水量の閾値のみを満たすグループのそれぞれの特徴を持つ事例を含むと考えられるため、これらを分類することを検討し、さらなる両者の現象の違いへの理解を深める。

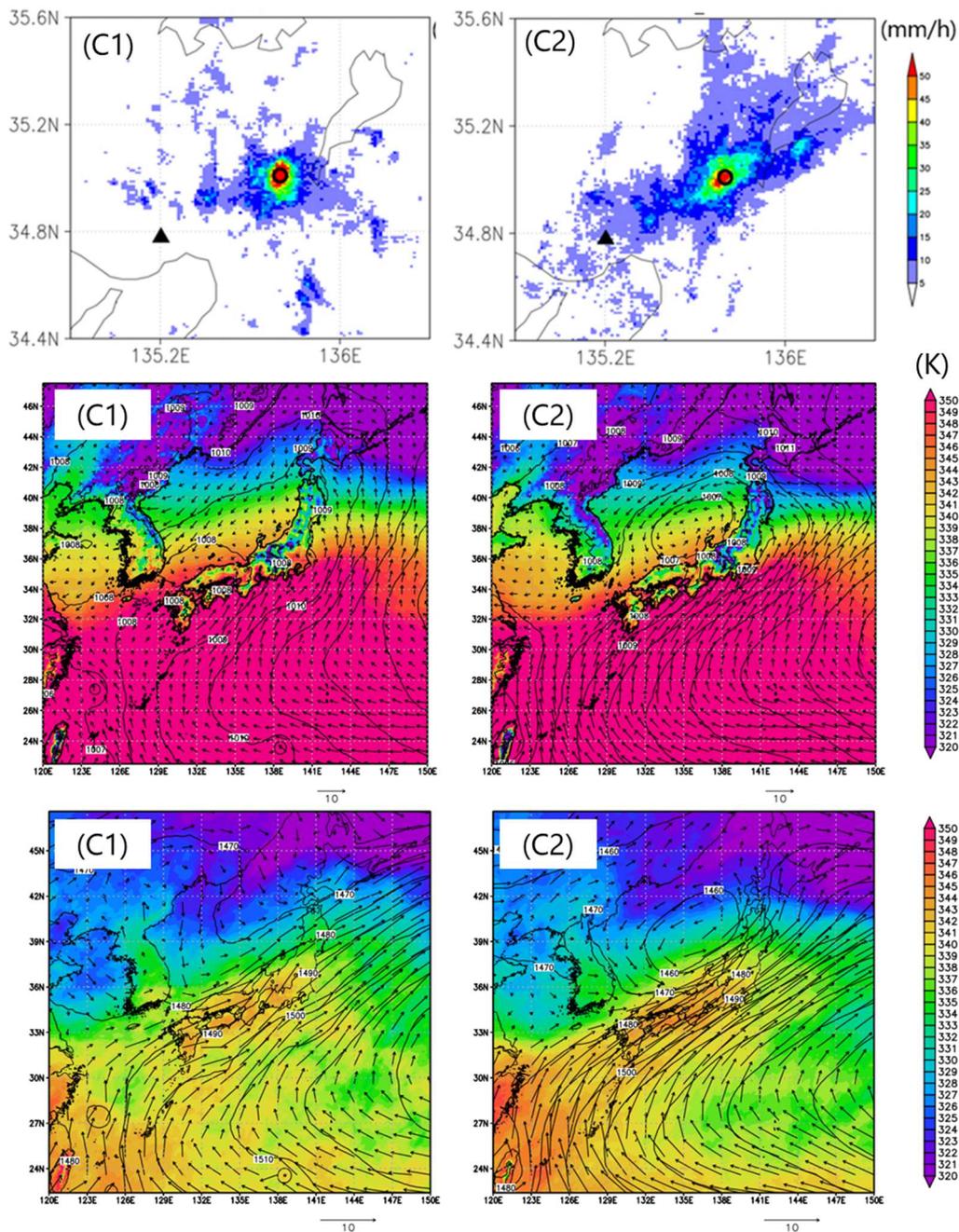


Fig. 4 The average spatial structure and environmental conditions for groups classified by observation time from heavy rain cases of C extracted from Kyoto Meteorological Observatory, excluding direct heavy rain cases caused by typhoons. Group C1 consists of cases observed between 14:00 and 20:00, while Group C2 consists of cases observed outside of these hours. The first row shows the average precipitation intensity for each group. The second row shows the distribution of the average sea level pressure, near-surface horizontal wind, and near-surface equivalent potential temperature for each group. The third row shows the distribution of the geopotential height, horizontal wind, and equivalent potential temperature at the 850 hPa isobaric surface for each group.

3.1節で分類したAとBの事例の観測された日時をFig.3に示す。Aで観測された事例は14時台から20時台にかけて観測された事例はないものの、Bで観測された事例は同時間帯に19事例のうち15事例が観測されたことがわかる。このことから、Cの事例を14時台から20時台に観測された事例とそれ以外の事例に分けることで異なる降水システムに分類することを考える。Fig.4にCを発生時刻で分けた場合のグループごとの合成図解析の結果を示す。Cに含まれる事例のうち、14時台から20時台に観測された事例のグループをC1、それ以外の時刻に観測された事例のグループ

をC2とする。C1には17事例、C2には28事例含まれる。C1の降雨強度の空間分布は京都市上空に局所的な雨域で特徴づけられた。平均的な海面更正気圧の分布には太平洋側の高圧部の張り出しが見られた。上空のジオポテンシャル高度にも同様に太平洋側の高圧部の発達が見られた。地表付近と上層の相当温位を比較すると地表付近の相当温位の方が高いことから対流不安定であることがわかる。これらのC1の特徴はFig.2のBの特徴に類似する。C2の降雨強度の空間分布は六甲山付近からの線状の雨域で特徴づけられた。海面更正気圧の分布では日本海側の低圧部

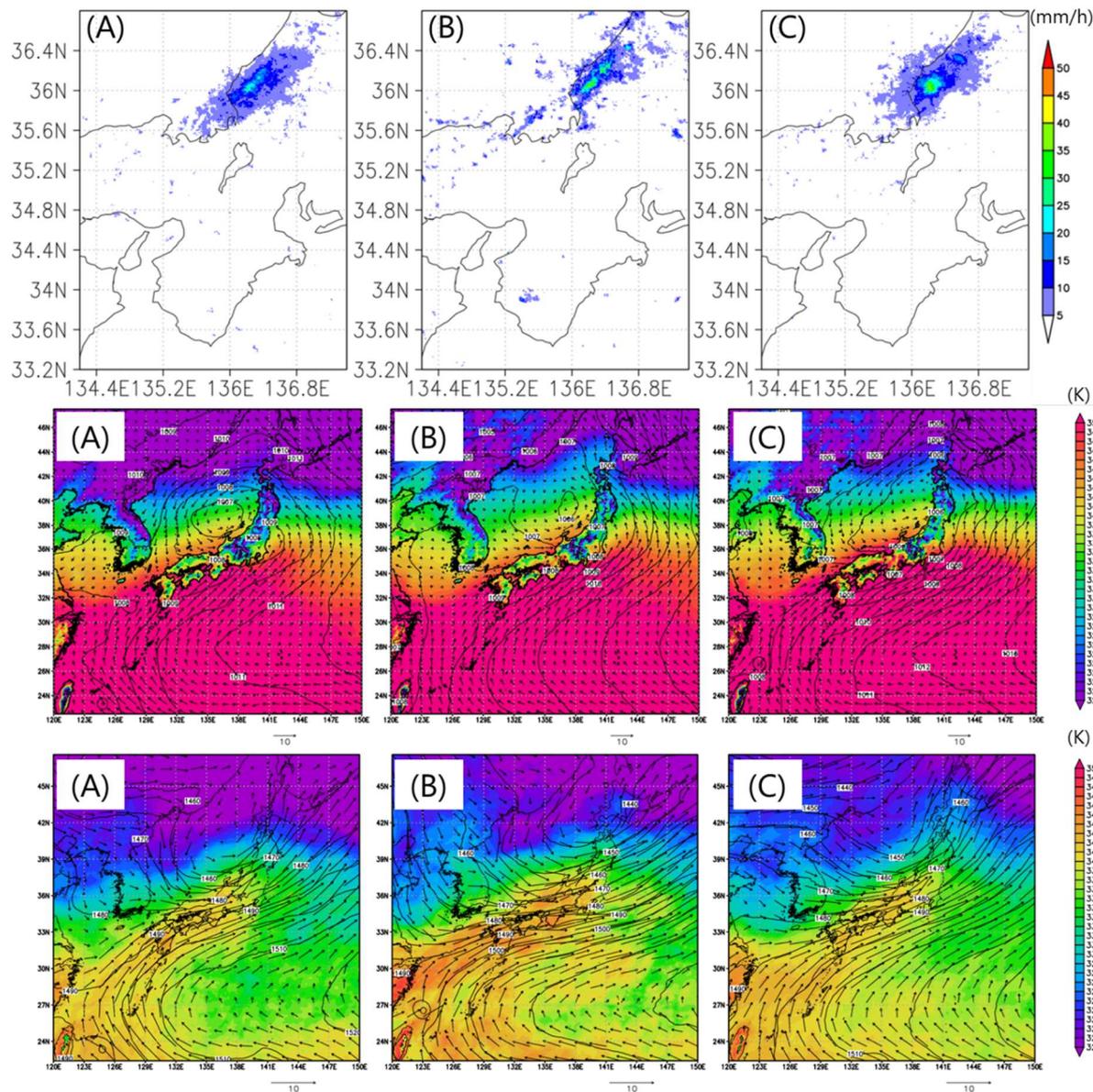


Fig. 5 The average spatial structure and environmental conditions for each group, excluding direct heavy rain cases caused by typhoons, extracted from heavy rain cases based on data from Fukui Meteorological Observatory. The first row shows the average precipitation intensity for each group. The second row shows the distribution of the average sea level pressure, near-surface horizontal wind, and near-surface equivalent potential temperature for each group. The third row shows the distribution of the geopotential height, horizontal wind, and equivalent potential temperature at the 850 hPa isobaric surface for each group.

の発達が見られ、上空には切離低気圧が見られた。上空の相当温位は西日本を広く覆う形で345K程度の値を示した。低圧部の位置は関西西部よりもやや北に位置するものの、C2の特徴はFig.2のAの特徴に類似する。

以上より、京都市に豪雨をもたらす降水システムは大きく2種に分類可能であることが示唆された。一つは六甲山付近から線状の雨域で特徴づけられる豪雨で関西地域付近の低圧部と上空の湿った空気とトラフや切離低気圧が見られる環境によりもたらされると推察される。もう一方は京都市上空の局所的な雨域で特徴づけられる豪雨で太平洋側の高圧部の発達と対流不安定な環境によりもたらされると推察される。

4. 福井における豪雨事例の解析

京都の豪雨事例に用いた解析手法が他地域に適用可能であるかの検討のため、及び福井に豪雨をもたらす降水システムへの理解を深めるため、同様の解析を行った。福井地方気象台のAMeDASのデータから、3章の解析と同様の日最大1時間降水量20mm以上と日最大10分間降水量10mm以上の2種の閾値を用いて事例を抽出・分類した。台風による直接的な豪雨事例を除外すると、Aは18事例、Bは14事例、Cは42事例が分類された。異なる継続時間を持つこれらのグループの平均的な雨域の空間分布、豪雨の発生に寄与する平均的な環境場を合成図解析により確認した。Fig.5は福井の豪雨事例のグループごとの平均の降雨強度の分布と環境場を示す。3つのグループの空間構造を比較するとすべてのグループに顕著な雨域の違いは見られなかった。すべてのグループに共通して若狭湾方向から北東方向への雨域が見られた。京都の豪雨事例の合成図(Fig.2)と比較すると地方気象台の位置での降雨強度が20mm/h程度と小さく、局所的な雨域を持つグループがない。このことから福井に豪雨をもたらす降水システムにゲリラ豪雨の寄与は大きくないと考えられる。災害をもたらした線状対流系豪雨として知られる2021年7月29日、2022年8月4日の豪雨はCに分類された。しかし、それらに見られるような特徴的な空間構造は合成図解析の結果では見られなかった。

同様に平均的な環境場を確認する。地表付近ではどのグループでも日本海側の低圧部及び低圧性の風の流れ、上空にはトラフが確認された。上空の相当温位はすべてのグループに共通して九州南西部から中部にかけて高い。京都の解析で得られた環境場と比較するとAやCなどの日最大1時間雨量の閾値を満たすグループの環境に近い特徴を示した。したがっ

て、平均的な環境場にも顕著な違いは見られないものの、3グループに共通した特徴は見られた。

これらの結果から福井に豪雨をもたらす降水システムは降水の継続時間によっては分類されず、どの継続時間においても類似した環境場で発生することが示唆された。また京都の事例の解析で得られた合成図(Fig.2)と比較すると福井では局所的な雨域が分布しておらず、ゲリラ豪雨のような雨の発生は多くないと考えられる。

5. まとめと考察

本研究では梶川ら(2024)の分類方法を基に、特定地域の豪雨事例を夏季の積乱雲による降水システムごとに切り分け、それぞれのメカニズムへの理解を深めることを目的に解析を行った。また、福井の豪雨事例の解析を行うことで、地域間の共通点・相違点、および同手法の他地域への応用可能性を検討した。京都地方気象台、福井地方気象台のAMeDASデータの日最大1時間降水量20mm以上と日最大10分間降水量10mm以上の2種の閾値を用いて事例を抽出・分類し、グループごとに合成図解析を行い、降水システムの平均的な空間構造・環境場を探った。

京都における豪雨事例の解析により京都の豪雨は大きく2種の降水システムに分類される可能性が示唆された。一つは六甲山付近からの線状の雨域で特徴づけられ、関西付近の低圧部と上空のトラフ、及び大気の湿り気具合が豪雨の発生に寄与すると考えられるシステムである。もう一方は京都市上空の局所的な雨域で特徴づけられ、太平洋側の高圧部の張り出しと対流不安定な環境が豪雨の発生に寄与すると考えられるシステムである。

福井における解析では同手法を用いた降水の継続時間による降水システムの分類はできず多様な地域への適用が難しい可能性が示された。合成図解析から得られた豪雨の平均的な空間構造・環境場から、単独積乱雲によるゲリラ豪雨の発生が少ないことが示唆された。

本研究の手法及び結果はAMeDASの積算雨量という点データを出発点として空間構造、さらには総観規模環境場までの繋がりを探ることができる可能性を示した。京都の豪雨事例の解析の結果から、防災という意味で、ある地域に災害をもたらす現象を大まかに把握することが可能になるという点で有用であると考えられる。ただし、福井の豪雨事例の解析からもわかるように完全に分類されない可能性がある。さまざまな環境の結果もたらされた雨量のみではなく、メソスケールの現象という観点を事例の分類に取り入れることにより、段階的な空間スケ

ールの環境場の関係性を把握することに繋がると考えられる。今後はメソスケールの現象の部分により着目しながら、豪雨災害を未然に防ぐための予測精度向上に向けて、総観規模場とそれによりもたらされるメソスケール現象、その現象の結果もたらされる雨量という一貫した流れの理解を深めたい。

参考文献

東俊孝・片山勝之・中北英一(2017): マルチセル型ストームの早期探知に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), 73巻, 4号, p.1_223-1_228
梶川義幸・渡辺悠一郎・大石哲・中北英一(2024): 京都市に豪雨をもたらす降水システムの時空間構造と環境場に関する解析, 土木学会論文集, 80巻, 16号, 論文ID:23-16003
加藤輝之(2015): 線状降水帯発生要因としての鉛直シアと上空の湿度について, 平成26年度予報技術研

修テキスト, 気象庁予報部, pp.114-132
仲ゆかり・福田果奈・中北英一(2024): 時空間特性を考慮した停滞前線性線状対流系の過去事例における発生・発達条件の統合的解析, 土木学会論文集, 80巻, 16号, 論文ID:23-16006
中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠(2013): ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), 69巻, 4号, p.1_325-1_330
吉崎正憲・加藤輝之(2007): 豪雨・豪雪の気象学, 朝倉書店, p187
D.-S. KIM, M. MAKI, S. SHIMIZU, D.-I. LEE (2012): X-Band Dual-Polarization Radar Observations of Precipitation Core Development and Structure in a Multi-Cellular Storm over Zoshigaya, Japan, on August 5, 2008, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.90, No.5, pp.701-719

(論文受理日: 2024年8月30日)