

# 京阪神地域の都市が 局地的大雨に与える影響に関する事例解析

奥 勇一郎, 東谷 果歩\*  
社会環境部門, \*気象庁仙台航空測候所

## A Case Study of impacts of urbanization on localized heavy rainfall in Keihanshin Metropolitan Area

Yuichiro OKU and Kaho HIGASHITANI

School of Human Science and Environment,  
University of Hyogo  
1-1-12 Shinzaike-honcho, Himeji, 670-0092 Japan

**Abstract:** A localized heavy rainfall event on 26 July 2018 in the Keihanshin (Kyoto, Osaka and Kobe) metropolitan area is numerically simulated in this paper, and the impact of urbanization on heavy rainfall is investigated. The control experiment used the actual land cover indicates that the rainfall is resulted from the thermal instability induced by daytime solar heating associated with urban heat island effect. The sensitivity experiment, that is used an imaginary land cover in which the urban area was changed to paddy fields, demonstrates the latent heat flux was much larger than the sensible heat flux, which impacts the rainfall. It is therefore suggested that the land-use distribution of a region plays a major role in shaping up spatial rainfall variability.

**Keywords:** urbanization, heavy rainfall, numerical weather prediction model, land-use data

### 1. はじめに

都市はその周辺の郊外と比べて気温が高くなるヒートアイランド現象が確認されており、近年ヒートアイランド現象と都市で起こる局地的大雨の関係性について関心が高まっている。都市の規模が小さい場合はヒートアイランド現象による収束や上昇流は弱く、都市による影響は地表が乾燥することのみとなって降水量は減少し、一方で都市の規模が大きい場合はヒートアイランド現象が顕著となり、大気が鉛直方向に混合されることで対流が発達し、降水量の増加につながるという結果が北京を対象とした数値実験により示されている (Miao et al., 2010)。加えて、都市の規模が大きい場合は都市の規模が小さい場合と比べて熱の輸送量が増加するために降雨域の移動が速くなることも確認されている。Kusaka et al. (2019) は山に隣接した沿岸都市で起こる短時間の対流性降雨を対象とし、都市の有無により雨の降る場所や地表の風の収束する場所が異なることを示した。都市で

は顕熱フラックスの増加に伴って気圧が小さくなり、海風前線が強められることで海風は内陸へ進入しにくくなる。その結果、地表の風は沿岸近くの都市域で収束し、雨の降る場所も都市がない場合と比べて沿岸近くとなることが確認されている。

京阪神地域のヒートアイランド現象を対象とした研究として、北尾ら(2010)では数値予報モデルを用いて土地利用を変更した研究が行われ、晴れた夏季の大阪地域の都市では日中の気温上昇が著しいことが確認されている。平野部では大阪湾からの海風が卓越し、海風が到達することによって気温の上昇が抑えられることが確認されており、海風の進入状況が気温に影響を与えるとされている (奥と梶元, 2014)。さらに、土地利用による海風の振る舞いの違いも見られ、都市がある場合には海風の進入距離が短く、風速はやや弱いことと、都市がない場合よりも夜の遅い時間帯まで吹き続ける傾向が確認されている (奥と池田, 2021)。一方、気象庁(2012)によると

大阪の都市では顕熱フラックスが増加するために気温が上昇し、潜熱フラックスが減少するために湿度が減少することが示されている。加えて、Shimadera et al. (2015) によると都市での顕熱フラックスの増加は午後から夕方にかけて対流性の雲が発達することにつながり、都市で降水を増加させることが確認されている。

本研究の目的は、京阪神地域の都市の有無により局地的大雨の発生や変化にどのような違いが生じるのか、数値予報モデルを用いて調べることである。その上で雨の様子の違いの原因について、それぞれの気象要素の違いを調べ、雲のでき方の違いを考察することにより明らかにする。さらに、先行研究において実施されていた土地利用を変更することによる海風の様子の違いにも注目し、雨の降り方と関連があるのかについて考察する。

## 2. 数値シミュレーション

本研究では米国大気研究センター (NCAR: National Center for Atmospheric Research) を中心に開発が進められている領域気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) Ver. 3.7.1 (Skamarock et al., 2008) を用いた。WRF へ入力する大気の初期値・境界値には気象庁メソ数値予報モデル (MSM) の解析値を使用した。海面温度と土壌の初期値・境界値には、それぞれ気象庁 55 年長期再解析データ (JRA-55) と米国環境予測センター (NCEP: National Centers for Environmental Prediction) の現業客観解析データを用いた。領域気象モデルの計算領域を Fig. 1 に、主な計算設定を Table 1 にそれぞれ示す。計算期間は 2018 年 7 月 24 日 21:00 から 8 月 1 日 3:00 までとし、タイムステップ 3 秒にて計算を行った。標高は国土地理院の 50 m

Table 1: Model settings and WRF physics parameterization schemes used in the study

Model	WRF/ARW ver3.7.1
Horizontal resolution	800m
Number of grids	351×351×50
Cumulus scheme	none
Urban Physics	UCM (Kusaka et al., 2004)
Microphysics	WSM6 (Hong and Lim, 2006)
SW radiation	RRTM (Mlawer et al., 1997)
LW radiation	Dudhia (Dudhia, 1989)
PBL scheme	MYJ 2.5 level (Janjić, 1994)

水平解像度の数値地図データを使用した。土地利用は国土数値情報 100m 水平解像度のデータを使用した。実際の土地利用に基づいた再現実験 (CTRL) と計算領域の都市の土地利用をすべて水田 (U2PF) および緑地 (U2GL) に変更した感度実験を行い (Fig. 1)、都市の有無によって雨の降り方がどのように変化するのか調べた。

## 3. 対象事例概要

先行研究では都市の顕熱フラックスが局地的大雨の発生の一因となっていることを指摘しているので、夏季において主要な総観規模擾乱がなく午前中が晴れており、午後に局地的大雨がみられた事例を本研究の対象とする。このうち 2018 年 7 月 26 日の 19:10 から 30 分間に 20mm の降水が神戸で観測された事例を選んだ。Fig. 2 にレーダー観測による同日 18:20 と 19:20 の降水強度を示す。神戸だけでなく京阪神地域で強い雨が観測され、実際に

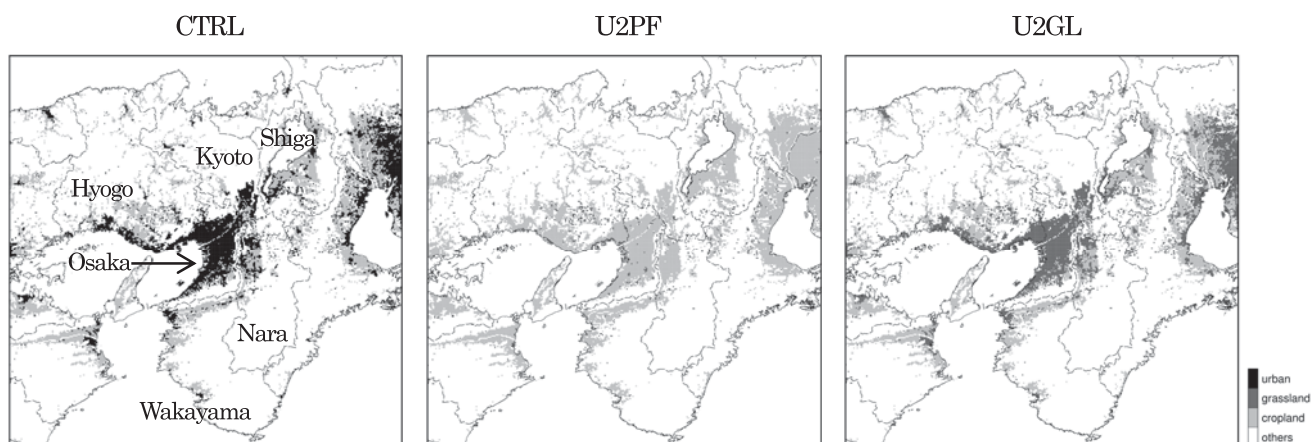


Fig.1: Land-use of computational domain in the present study. CTRL is the hindcast of the event with actual land-use data, U2PF is the sensitivity experiment of CTRL in which all urban cover was replaced by paddy field, and U2GL is same as U2PF but all urban cover was replaced by grassland. The dashed lines denote the prefectural borders.

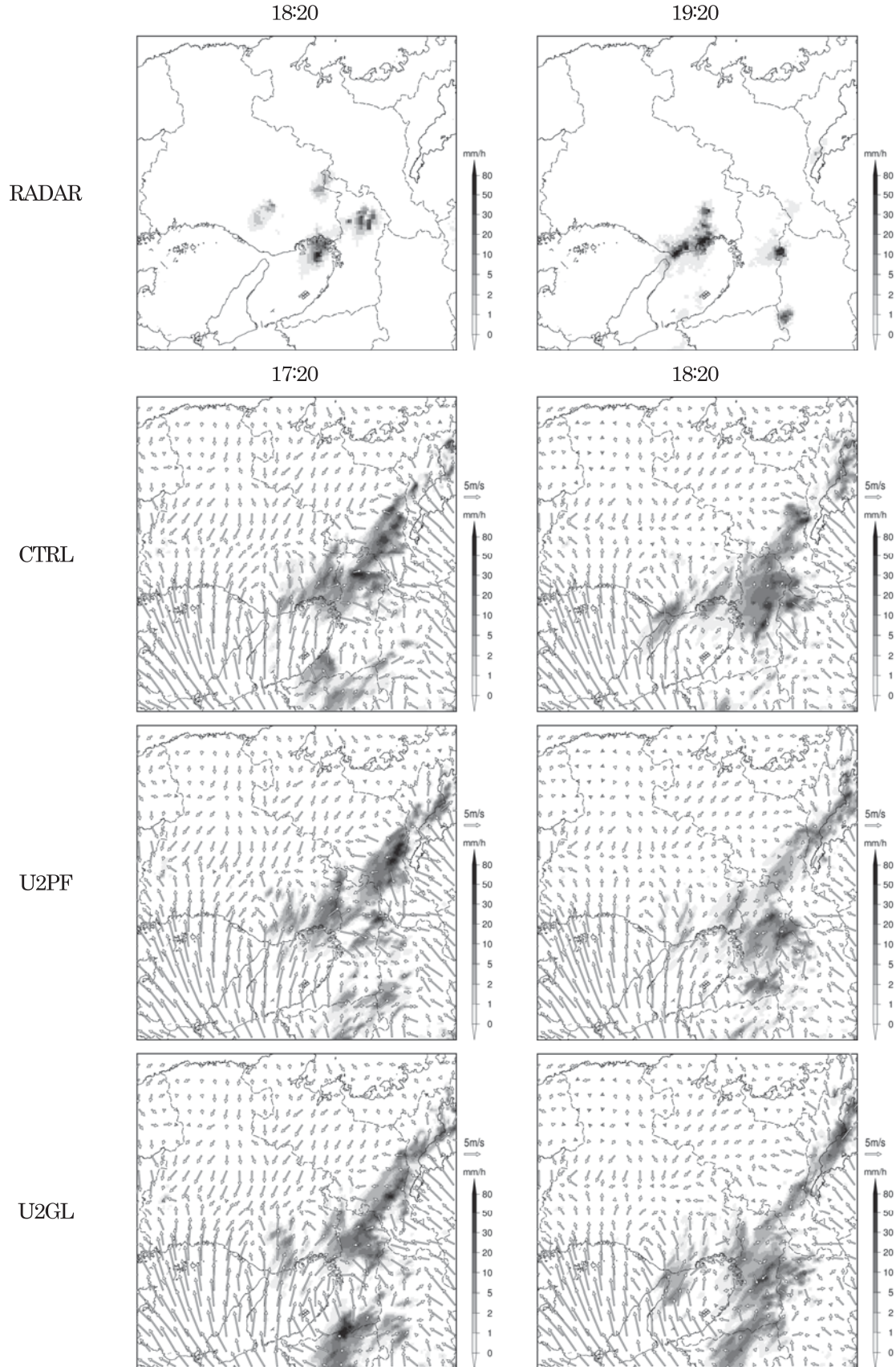


Fig. 2: Rainfall intensity measured by radar (top row) at 18:20 (left panel) and 19:20 (right panel) on 26 July 2018. Rainfall intensity and wind at 10m height simulated in CTRL (2nd row from the top), U2PF (3rd row from the top), U2GL (bottom row) at 17:20 (left column) and 18:20 (right column).



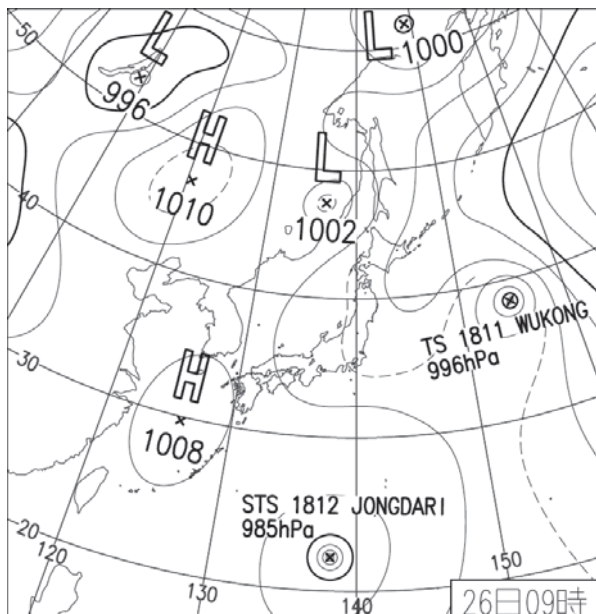


Fig. 3: Weather chart at 09:00 on 26 July 2018 provided by Japan Meteorological Agency

観測された時間帯よりも 1 時間のずれはあるものの CTRL においても強い雨がシミュレートされた。近年、計算機性能の向上とともに気象モデルの高解像度化が進んだが、その一方でモデルの解像度に対応した初期値・境界値の精度向上が課題となっており、今日の技術をもってしても当該事例のような水平スケールが数 km 程度の局地的な強い雨を同地点かつ同時刻で再現することは極めて困難である。ゆえに、Fig. 2 のレーダーと CTRL における降雨の位置のずれと時間のずれは許容範囲であるとともに、CTRL で再現された強い雨と感度実験におけるそれを比較することで本研究の目的である都市の有無による局地的な強い雨の振る舞いの違いを比較、考察することが可能であると判断できる。

次に、この事例における降水の発達過程を総観気象の視点から考察する。Fig. 3 は 9:00 の地上天気図である。関東以北では曇り、その他の地域ではおおむね晴れており、西日本では 4 割を超す地点で日最高気温が  $35^{\circ}\text{C}$  以上の猛暑日となった。神戸においても朝からの強い日差しにより 8:10 には気温がすでに  $30^{\circ}\text{C}$  を超え、この日を含めて 4 日連続で猛暑日となった。

一方、CTRL の計算結果に基づく水蒸気混合比と風向、風速の時間変化 (Fig. 4 の左図) から、近畿地方の日本海側では北寄りの風が、太平洋側では南東の風がそれぞれ吹いている様子が見て取れる。前者は東シナ海の高気圧から吹き出す風、後者は日本の南海上の台風 12 号に吹き込む風がそれぞれ対応していることが Fig. 3 から読み取ることができる。加えて、日中の時間帯は晴れてい

たことから、これらの風に海陸風循環が重なった結果であると考えられる。地表面付近では中国山地の南側で日本海からの北風と瀬戸内海からの南風が収束する地域が帯状となって東西に分布しており、その上空となる  $850\text{hPa}$  (海面からおおよそ  $1,500\text{m}$ 、Fig. 4 の右図) の高さでは地表面付近の風の収束により持ち上げられた空気による水蒸気混合比の高い領域が確認できる。この高さでは北寄りの風が卓越しており、水蒸気の凝結により形成された雲は北から南へと移動する。図には示さないが CTRL だけでなく、U2PF や U2GL でも同じ特徴が確認できた。これらの過程を経て、夕方頃に京阪神地域で強い雨が降ったものと考えられる。

#### 4. 都市による雨への影響

CTRL の京阪神地域の土地利用が都市となっている格子点を対象に降水強度を求め、その時間変化を調べた。Fig. 5 は 1 格子点あたりの降水強度の時間変化を示す。CTRL、U2PF、U2GL とともに正午以降に降水強度の増大がみられるが、U2PF と U2GL は 18:00 以降に降水強度が減少するのに対して、CTRL はさらに増大し U2PF や U2GL に 30 分程度遅れて減少することがわかる。これは Fig. 2 の 18:20 における CTRL の降水域の面積および降水強度が、U2PF や U2GL のそれらと比べて大きいことからわかる。また、7 月 26 日 0:00 から 24 時間の 1 格子点あたりの積算降水量を調べたところ、U2PF は  $13.1\text{mm}$ 、U2GL は  $13.9\text{mm}$  であったのに対し、CTRL は  $17.4\text{mm}$  であった。以上から、U2PF と U2GL に比べて CTRL では、より広い範囲でより長い時間にわたって強い雨が降り、結果として積算降水量が多くなったことがわかる。

都市はコンクリートの建物が林立していることに加えて地表面の多くはアスファルトに覆われている。郊外に広く分布する水田や緑地といった植生域と比べるとこれら人工被覆域の保水力は相対的に小さく、水分の蒸発による熱の散逸が期待できない。加えて、人工被覆域は植生域と比べて日射による熱を蓄積し、その日中に蓄積した熱を日没後も保持し大気へ顕熱フラックスとして放出することになるため、日没後の気温の低下を妨げる。これらが都市の気温が郊外の気温と比べて高くなるヒートアイランド現象の原因である。

Fig. 5 の降水強度と同じ方法で、顕熱フラックスと潜熱フラックスの時間変化を求めた。結果を Fig. 6 に示す。日中における CTRL の潜熱フラックスは、U2PF や U2GL の潜熱フラックスと比べて小さく、水分の蒸発量が相対的に小さいことがわかる。一方、顕熱フラックス

は日の出とともに値が大きくなり正午前後に最大値に達するが、U2PF と U2GL は日没前後にほぼ 0 となるのに対し、CTRL では日没後数時間も正の値を維持している。これは建物をはじめとする人工被覆域における蓄熱の効果の現れであり、日没後もなお顕熱フラックスにより大気が加熱されていることを示している。このため CTRL では日没の時間帯においても気温の低下が妨げられ、U2PF や U2GL と比べて相対的に大気が不安定になるものと考えられる。

一方、図には示さないが、CTRL における局地的大雨

と鉛直風、水平風の時間変化の様子を、U2PF や U2GL のそれらと比べると、いずれの結果においても、降り始めの雨で生じた下降気流によって地上での風の発散が起こっている様子が見られた。地上での風の発散域が近接することで収束域が形成され、その収束域で別の新たな上昇気流が生じることになるが、CTRL では都市があることによる熱的不安定が加わってさらに上昇気流の発生が促進される。鉛直風速の水平分布を示した Fig. 7 において、CTRL では大阪府、京都府、奈良県の府県境の地域で U2PF や U2GL ではみられない強い上昇気流の領

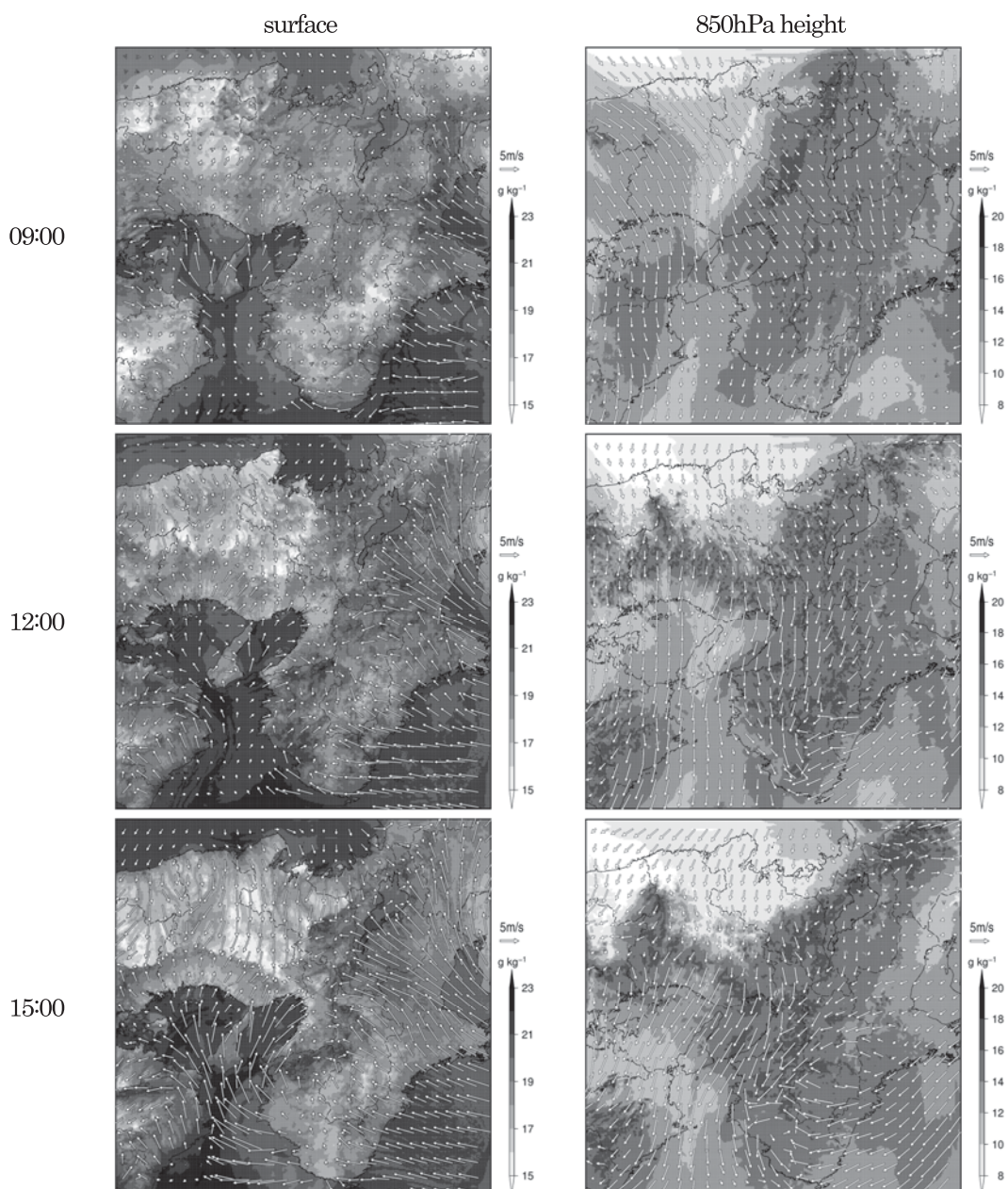


Fig. 4: Horizontal distribution of water vapor mixing ratio at 2m height (shaded) and horizontal wind at 10m height (vectors) on 26 July 2018 for CTRL case (left column) and those at 850hPa height (right column).



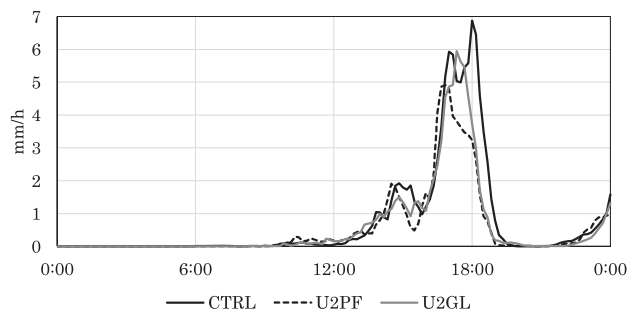


Fig. 5: Time series of spatial averaged rainfall intensity over the urban area in CTRL.

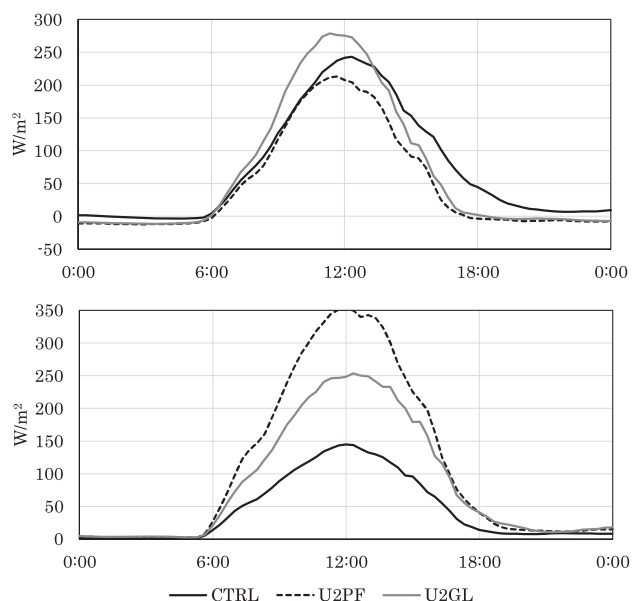


Fig. 6: Same as Fig. 5, but sensible heat flux (top panel) and latent heat flux (bottom panel).

域が広がっているのが確認できるが、これはそのためである。以上により U2PF と U2GL に比べて CTRL でより広い範囲でより長い時間にわたって強い雨が降り、積算降水量が多くなった原因のひとつであると考えられる。

## 5. 考察

本研究では数値予報モデルを使用し実際に局地的大雨が観測された事例についての再現実験 (CTRL) と都市を水田や緑地に変更した感度実験 (U2PF、U2GL) を行い、京阪神地域の都市の有無による局地的大雨の様子の違いを比較した。その結果、U2PF と U2GL に比べて CTRL では、より広い範囲でより長い時間にわたって強い雨が降り、結果として積算降水量が多くなったことが示せた。

都市の有無による顕熱フラックスと潜熱フラックスの違いを比較すると、地表面温度の違いにより都市があ

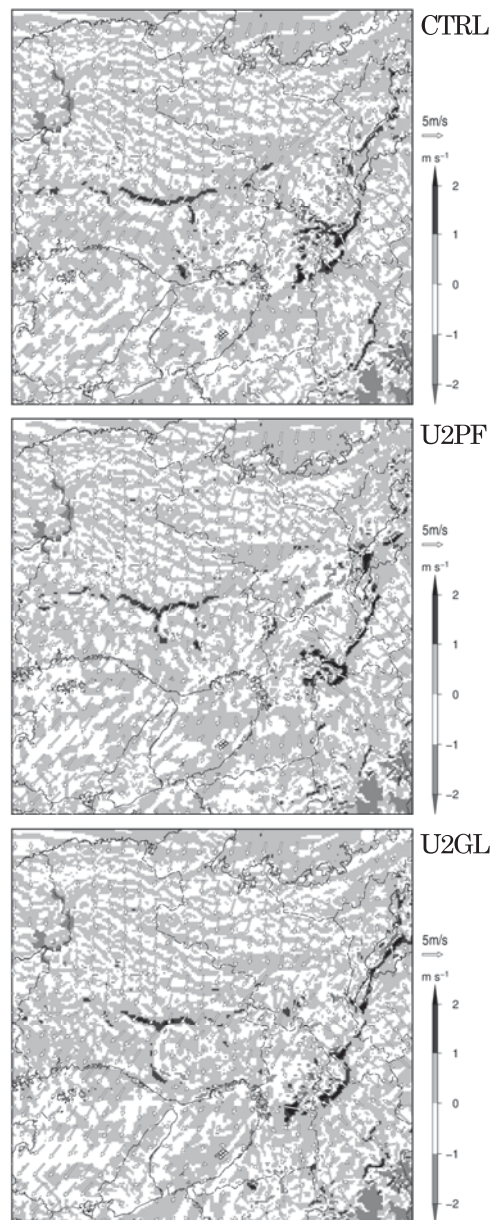


Fig. 7: Horizontal distribution of vertical wind speed (shaded) and horizontal wind (vectors) at 900hPa height at 17:20 on 26 July 2018 for CTRL (top panel), U2PF (middle panel) and U2GL (bottom panel).

る場合は都市がない場合と比べて顕熱フラックスが大きくなることが確認できた。一方、潜熱フラックスについては都市をなくした場合に都市がある場合と比べて大きくなることがわかった。水蒸気混合比についても都市がない場合の方が大きな値となっており、これは潜熱フラックスとして多くの水蒸気が大気に放出されているためであると考えられる。これらは Souma et al. (2013) の結果と整合的である。

都市の有無による鉛直風と地上の水平風を比較する

と、日射が強い時間帯になると都市では上昇気流が点在して見られ、熱的不安定となっていることがわかった。これは、都市があることで局所的な熱的不安定を生じ、それが降水域を決める一因となっていることを示している。以上は Shimadera et al. (2015)の結果と整合的である。

都市があることで、具体的にある地域における降水量に変化を及ぼしているのかについては、さらなる事例解析を進める必要がある。一方、Kusaka et al. (2019)で示されているような海風前線の違いが降水域に直接影響を及ぼす様子は確認できなかったものの、都市がない場合の方が内陸まで海風が進入していることがわかり、海風前線によるとみられる上昇気流も確認できた。

以上のことから、都市がある場合は熱的不安定となることで上昇気流が発生しやすくなり、局地的大雨の発生に寄与する要因がある一方で、水蒸気量は減少し、局地的大雨の発生を妨げる要因もあることがわかった。しかし、本研究では熱的な効果と水蒸気のそれぞれがどの程度雨に影響を与えているのかは判断できない。そのため、大気の水蒸気をなくした感度実験を行うなどそれぞれの効果をさらに詳しく調べる必要がある。

## 謝 辞

本研究で使用した気象庁メソ数値予報モデル (MSM) のデータは、京都大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースによって収集・配布されたものです。気象庁 55 年長期再解析データ (JRA-55) と地上観測データはともに気象庁ホームページから、米国環境予測センター (NCEP) 現業客観解析データは同センターのホームページからそれぞれダウンロードしたものを使用しました。

## 参考文献

Dudhia, J., 1989: Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.46, No.20, pp.3077-3107.

Hong, S. Y. and J. O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol.42, No.2, pp.129-151.

Janjić, Z. I., 1994: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Monthly Weather Review*, Vol.122, No.5,

pp.927-945.

Kusaka, H., Nishi, A., Mizunari, M., Yokoyama, H., 2019: Urban impacts on the spatiotemporal pattern of short-duration convective precipitation in a coastal city adjacent to a mountain range. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 145, pp. 2237-2254.

Miao, S., Chen, F., Li, Q. and Fan, S., 2011: Impacts of Urbanization on Summer Precipitation: A Case Study of Heavy Rainfall in Beijing on 1 August 2006. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 50, pp. 806-825.

Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol.102, No.D14, pp.16663-16682.

Shimadera, H., Kondo, A., Shrestha, K., L., Kitaoka, K., Inoue, Y., 2015: Numerical Evaluation of the Impact of Urbanization on Summertime Precipitation in Osaka, Japan. *Advances in Meteorology*, Vol. 2015, Article ID 379361.

Souma, K., Sunada, K., Suetsugi, T., Tanaka, K., 2013: Use of ensemble simulations to evaluate the urban effect on a localized heavy rainfall event in Tokyo, Japan. *Journal of Hydro-environment Research*, Vol.7, No.4, pp.228-235.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Tech. Note NCARTN-475+STR.

奥 勇一郎, 梶元 慶子, 2014: 大阪市における夏と冬のヒートアイランド現象の違いに関する観測的研究. *日本ヒートアイランド学会論文集*, Vol.9, pp.1-14.

奥 勇一郎, 池田 航一, 2021: 大阪湾沿岸都市域における海風とその冷却効果に関する事例解析. *兵庫県立大学環境人間学部研究報告*, Vol. 23, pp. 91-97.

北尾 菜々子, 森山 正和, 田中 貴宏, 竹林 英樹, 2010: メソ気象モデル WRF を用いた大阪地域のヒートアイランド現象に関する研究—潜在自然植生の概念を用いた都市化の影響評価. *日本建築学会環境系論文集*, Vol.75, No.651, pp.465-471.

気象庁, 2012: ヒートアイランド監視報告. pp.78.

(令和3年11月26日受付)