

# 2007年台風9号と2019年台風19号が利根川・千曲川両流域を 通過した際における地形性降雨の発生条件

Topographic Rainfall Generation Conditions during Typhoon No. 9 in 2007 and Typhoon No. 19 in 2019 passing through the Tone and Chikuma River Basins

北海道大学工学部環境社会工学科社会基盤学コース ○学生員 松岡陽生 (Haruki Matsuoka)  
北海道大学大学院工学研究院 正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

## 1. はじめに

2019年台風19号(令和元年東日本台風、以下、台風19号)は、静岡県や新潟県、関東甲信地方、東北地方を中心に広い範囲で記録的な大雨や暴風、高潮等の甚大な被害をもたらし、多くの地点で3、6、12、24時間降水量の観測史上1位の値を更新した<sup>1)</sup>。

日本最長の川と知られる信濃川は、長野県内で千曲川と呼ばれているが、その千曲川流域(図-1 赤色)においても台風19号による豪雨、洪水、浸水被害が多く発生した。千曲川上流域に位置する軽井沢、鹿教湯、北相木などで日降水量が観測史上1位を記録した<sup>2)</sup>。内陸に位置する千曲川流域内の長野市における降水量の平年値は965.1mm(1991年から2020年)で、日本の全国平均値の1718mmと比較すると約56%の降水量の少ない流域である<sup>3)</sup>。平年降水量の少ない本流域で記録的な豪雨災

害をもたらした原因として、埼玉県、長野県、山梨県、群馬県の県境に位置する関東山地付近における上昇流の発生により、関東平野方向からの水蒸気が関東山地を越え、風下側の千曲川流域内へ流入したことが考えられる。本来、南東方向から関東山地に向けて湿った空気が吹き付けた場合、関東山地よりも東側に位置する利根川流域の山間部で降雨が多くもたらされる(地形性降雨)と、山地を越えた空気は乾燥し、関東山地の西側に位置する千曲川流域への水蒸気流入量は少なくなると考えられる。したがって、台風19号は風上側にあたる関東山地付近の利根川流域で地形性降雨が発生し、かつ風下側の千曲川流域でも強雨もたらされたという特異な事例である。

この事例を将来の気候変動と絡めて考える。Clausius-Clapeyron 関係より、大気中の飽和水蒸気量は1度の温度上昇に対して約7%の割合で増加するが、降雨強度も



図-1 千曲川流域(赤色)と利根川流域の千曲川流域に隣接するエリア(灰色)<sup>5)</sup>

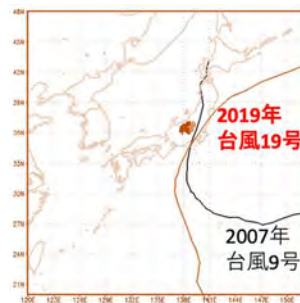


図-2 2019年台風19号と2007年台風9号の経路<sup>5)</sup>

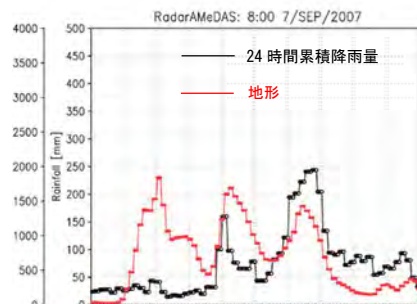
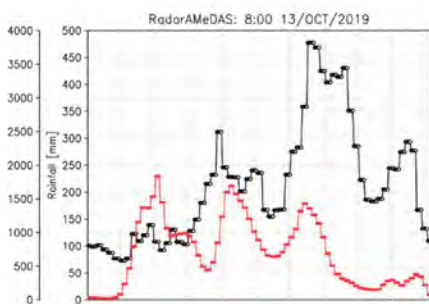


図-3 2019年台風19号(左)と2007年台風9号(右)の24時間累積降雨量の比較

(北緯36.7度における東西方向の鉛直断面を見ている。台風19号は2019年10月12日09:00(JST)~2019年10月13日09:00(JST)における24時間累積降雨量、台風9号は2007年9月6日09:00(JST)~2007年9月7日09:00(JST)における24時間累積降雨量である。赤色の地形は右からそれぞれ西御荷鉾山、関東山地、蓼科を表し、関東山地と蓼科に挟まれるのが千曲川流域である。)

同様の割合で増加することがわかっている<sup>4)</sup>。さらに高標高の地点における降雨強度は7%よりも大きな割合で上昇することも明らかになっている<sup>4)</sup>。このことから、将来の温暖化を鑑みると、台風19号のような山越えを伴う地形性降雨の発生頻度は増えることが懸念され、その発生条件を明確化することは今後の治水計画上也非常に重要である。

そこで本研究では、台風19号に焦点をあて、山越えを伴う地形性降雨の発生条件について検討することを目的とする。また、台風19号に経路が類似した近年の台風事例として、本研究では図-2に示す2007年台風9号を比較対象として取り上げる。図-3に2007年台風9号との地形と24時間累積降雨量の関係を比較した図を示す。図-3より、台風19号においては風下側の千曲川上流域においても24時間累積降雨量が約300mmという強雨がもたらされたことが見て取れる。このように、類似した経路をたどった台風でも、雨域の山越えの有無を決める違いはどこにあるのかを明らかにするために、風向・風速の水平面分布、大気中の温位、水蒸気の鉛直分布、大気の熱力学的安定度といった気象場の比較、分析を行う。

## 2. データと解析手法

### 2.1 使用したデータ

図-3の地形と降雨分布の関係を示す東西方向の鉛直断面における累積降雨量分布図の作成にあたっては、気象庁の解析雨量(Radar-AMeDAS)データを用いた。対象期間は2007年9月と2019年10月である。

4章で述べる解析にあたっては、気象庁のメソ数値予報モデルGPV(MSM)データを用いた。対象期間は2007年9月5日～2007年9月7日(2007年台風9号)と2019年10月11日～2019年10月13日(2019年台風19号)である。

### 2.2 各種気象パラメータの計算式

3章及び4章の解析で用いた各種気象パラメータの計算式を説明する。

#### a) 温位の算出方法

$$\theta = T \left( \frac{1000}{p} \right)^{0.2857} \quad (1)$$

ここで、 $\theta$ : 温位[K],  $T$ : 温度[K],  $p$ : 気圧[hPa]である。

#### b) 比湿の算出方法

湿潤空気に含まれる水蒸気質量と湿潤空気質量の比を表す比湿は以下の手順で求められる。

テテンの式より、

$$e_s = 6.11 \times 10^{\left( \frac{7.5t}{t+237.3} \right)} \quad (2)$$

ここで、 $e_s$ : 飽和水蒸気圧[hPa],  $t$ : 温度[°C]である。相対湿度の式より、

$$e = (h/100) \cdot e_s \quad (3)$$

ここで、 $h$ : 相対湿度[%],  $e$ : 水蒸気圧[hPa]である。式(2)、式(3)より、

$$q = \frac{0.622e}{p - 0.378e} \quad (4)$$

ここで、 $q$ : 比湿[kg/kg]である。

#### c) B-V 振動数の算出方法

安定成層している流体中で、気塊と周囲の大気の密度差によって生ずる浮力振動の振動数をB-V振動数といい、大気の熱力学的安定度を示す指標として用いられる。Dale and Joseph (1982)は、乾燥大気や湿潤大気での異なるB-V振動数の式を提案しているが<sup>6)</sup>、本研究では以下に示す湿潤B-V振動数を求めた。

$$N_m^2 = \frac{g}{T} \left( \frac{dT}{dz} + \Gamma_m \right) \left( 1 + \frac{Lq_s}{RT} \right) - \frac{g}{1 + q_s} \frac{dq_s}{dz} \quad (5)$$

ここで、 $g = 9.81$ : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>],  $T$ : 温度[K],  $\Gamma_m = 0.5$ : 湿潤断熱減率[K/100m],  $L = 2.5 \times 10^6$ : 気化潜熱[J/kg],  $q_s \approx \frac{0.622e_s}{p}$ : 飽和混合比[kg/kg],  $R = 287$ : 乾燥大気の気体定数[J/(kg·K)]である。

$N_m^2 > 0$ で安定、 $N_m^2 = 0$ で中立、 $N_m^2 < 0$ で不安定を意味する。気流が山を越えるかどうかのパラメータとして、以下の式(6)に示すフルード数(以下、Fr数)(Robert A. Houze Jr, 2012)がある。大気の流れが持つ運動エネルギーと山を越えるために必要なエネルギーの比がFr数であるが、本研究ではFr数を構成するパラメータである熱力学的な安定度のB-V振動数に着目することとする。

$$Fr^2 = \frac{U^2}{N_m^2 H^2} \quad (6)$$

ここで、 $Fr$ : フルード数[無次元],  $U$ : 風速[m/s],  $N_m$ : B-V振動数[s<sup>-1</sup>],  $H$ : 最大地形高さ[m]である。

## 3. 理想条件におけるB-V振動数の感度分析

3章では、実測値による解析の前に、理想的な気象場(気温勾配や相対湿度)を仮定した場合、条件によって上述した大気中の水蒸気(比湿)の鉛直分布やB-V振動数がどう変化するかについて感度分析を行った。

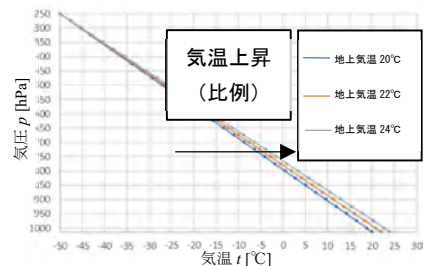


図-4 設定した気温のグラフ  
(地上面の気温が+2°C, +4°C上昇を仮定)

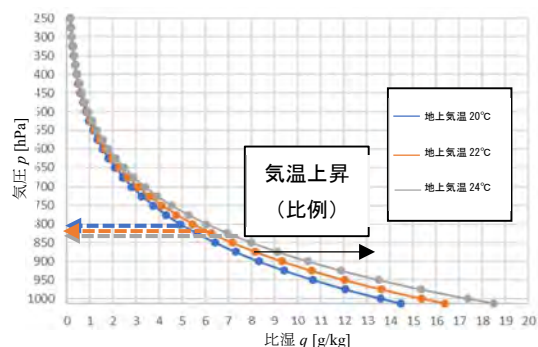


図-5 気温上昇による比湿の鉛直分布の変化

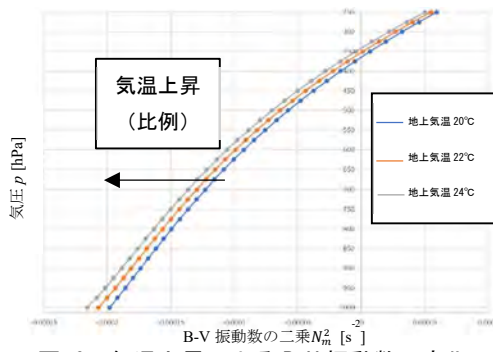


図-6 気温上昇によるB-V振動数の変化

本稿では、将来の温暖化による気温上昇を想定した場合について感度分析結果を示す。図-4 に設定した気温のグラフ、図-5 に比湿の鉛直分布の変化、図-6 に B-V 振動数の変化を示す。図-5 中に示されている水平な矢印破線は、それぞれの色に対応する比湿の鉛直分布の重心位置を表す。図-5 より、気温が+2℃、+4℃と上昇するほど、水蒸気（比湿）の鉛直分布は横に膨らむが重心位置は低くなることわかる。また図-6 より、気温が上昇するほど B-V 振動数の値は小さくなる、すなわち大気は熱力学的に不安定に推移することがわかる。気温が上昇すると大気中に含まれる水蒸気量は増加し、熱力学的安定度は不安定な状態に近づくことが明らかになったが、今回の感度分析は、あくまで任意の理想条件を仮定した場合の水蒸気の鉛直分布や B-V 振動数の定性的な振る舞いを議論したものであり、山越えを伴う地形性降雨の発生条件を検討する上では、山の高さや形状との相互関係や熱力学的安定度以外にも風向・風速分布等の力学的な要因も含めて考えることが必要である。

4. 2019 年台風 19 号と 2007 年台風 9 号の比較

4.1 解析結果

図-7(a) (b) (c) は 2019 年 10 月 12 日 15:00 (JST) における台風 19 号、図-7(d) (e) (f) は 2007 年 9 月 7 日 03:00 (JST) における台風 9 号の気象場である。それぞれの事例において図-7(c) (f) の黒線を台風が通過した時刻である。図-7(a) (d) に地上面における相当温位と水平風、図-7(b) (e) に 850hPa 面における相当温位と水平風を示した。図-8 は、図-7(c) (f) に示す黒線の鉛直断面（以下、北緯 36.7 度断面）である。図-8(a) (d) は温位、図-8(b) (e) は比湿、図-8(c) (f) は B-V 振動数である。また、図-8 中の黒色の範囲は北緯 36.7 度断面における地形を表し、右からそれぞれ西御荷鉾山、関東山地、蓼科である。関東山地と蓼科に挟まれるのが千曲川流域である。

4.2 比較と考察

地上面と 850hPa 面における相当温位と水平風の比較を行う（図-7(a) (b) (d) (e)）。地上面・850hPa 面どちらにおいても相当温位は台風 19 号の方が台風 9 号よりも全体的に小さい。一方で、水平風を比較すると、台風 19 号の方が台風 9 号に比べて風速が大きいことは明らかであり、850hPa 面の大気上層においては特に顕著である。

続いて、図-8 に示す温位、比湿、B-V 振動数の鉛直分布について両台風を比較する。温位の鉛直分布を比較すると、台風 19 号の方が台風 9 号に比べて全体的に温位が低くなっているが、温位の鉛直勾配に関しては両者に大きな差異は見られない（図-8(a) (d)）。比湿の鉛直分布を比較すると、台風 9 号の比湿の鉛直分布は比較的成層であるのに対し、台風 19 号においては比湿の分布が乱れている（図-8(b) (e)）。関東山地と蓼科に挟まれる千曲川流域上層の大気に注目すると、台風 19 号の方が

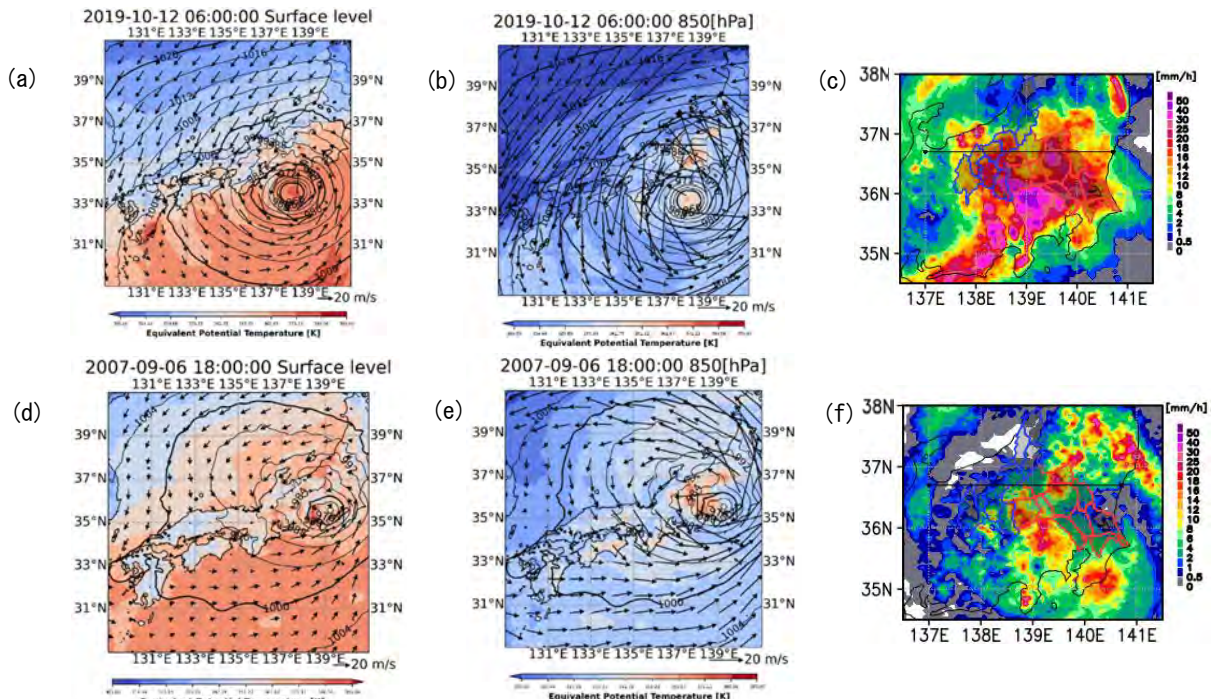


図-7 2019 年台風 19 号 ((a) (b) (c)) と 2007 年台風 9 号 ((d) (e) (f)) の気象場の水平分布の比較 ((a) (d) 地上面における相当温位と水平風速ベクトル, (b) (e) 850hPa 面における相当温位と水平風速ベクトル, (c) (f) 降雨強度と北緯 36.7 度の東西方向線を表す。 (a) (b) (c) 2019 年 10 月 12 日 15:00 (JST), (d) (e) (f) 2007 年 09 月 07 日 03:00 (JST) の時刻である。

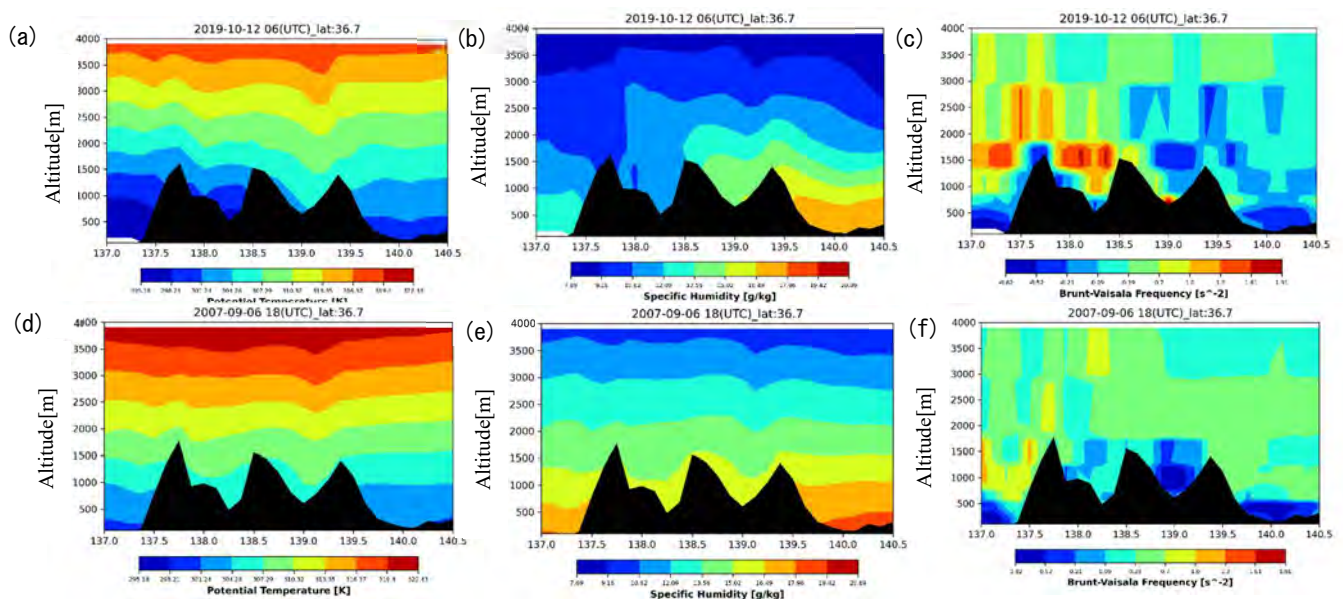


図-8 2019 年台風 19 号 ((a) (b) (c)) と 2007 年台風 9 号 ((d) (e) (f)) の気象場の鉛直分布の比較 ((a) (d) 温位, (b) (e) 比湿, (c) (f) B-V 振動数. (a) (b) (c) 2019 年 10 月 12 日 15:00 (JST), (d) (e) (f) 2007 年 09 月 07 日 03:00 (JST) の時刻における, 北緯 36.7 度の東西方向の鉛直断面である.

台風 9 号の上層の気象よりも比湿が小さい, すなわち台風 19 号の湿潤の度合いは比較的小さい. さらに比湿の鉛直分布を比較すると, 台風 19 号では, 東側から西側に吹き抜ける風が最初にぶつかる西御荷鉾山の上層において分布が波打っている. 次に, B-V 振動数を比較する (図-8(c) (f)). 台風 19 号においては, 気流が最初にぶつかる西御荷鉾山の風上側斜面の上層で高度約 3000m 付近まで B-V 振動数が負の値となっている. すなわち不安定場が広がっており, 千曲川流域の上層の気象は反対に正の値を示す. すなわち熱力学的に安定場が広がっている. 西御荷鉾山の風上側斜面の上層に熱力学的な不安定場が存在するため, 湿潤気象の対流が促進され, 図-8(b)に示す比湿の分布が波打っていると考えられる. また, 3 章の理想条件による B-V 振動数の感度分析結果から, 水蒸気量が増加すると気象は熱力学的に不安定な状態になることがわかった. 図-8(b)において千曲川流域上層は比湿の値が比較的小さいことから, 図-8(c)に示す B-V 振動数も正の値を示したと考えられる.

台風 19 号は台風 9 号に比べて, 大気中に含まれる水蒸気量は小さい. 風下側の千曲川流域における降水量が大きいことは図-3 から明らかであり, 水蒸気から雲水, 雲水から雨水への変換効率が高かったことが示唆される. さらに, B-V 振動数が西御荷鉾山の風上側において負の値であったことから, 不安定場により対流が発達して大雨をもたらした, 水蒸気が消費されたことが考えられる.

## 5. まとめ

本研究では, 山越えを伴う地形性降雨という特異な事例である台風 19 号に着目し, 類似した経路をたどった 2007 年台風 9 号との 2 事例比較を通して, 雨域の山越えの有無を決める条件について検討した.

台風 19 号においては, 850hPa (高度約 1,500m) 面の大気上層における水平風速が非常に大きいことや, 風上

側斜面上層に卓越する熱力学的な不安定場によって引き起こされる対流が, 大気中の水蒸気の鉛直分布を大きく乱すことが明らかになった.

今後の展望として, 山越えを伴う地形性降雨の発生条件を解明する上でも, 風向・風速の鉛直分布や水蒸気フラックスについても考慮することや, 複数の鉛直断面を比較すること, 似た経路をたどった他の台風事例も含めて解析を進めていく必要がある. 本発表ではこれらのさらに進んだ解析を含めることを目標とする.

**謝辞** 本研究の遂行にあたっては, 文部科学省「気候変動予測先端研究プログラム」JPMXD0722680734, 内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「国家レジリエンス(防災・減災の強化) (管理法人:国立研究開発法人防災科学技術研究所)並びに科研費基盤研究(B) 22H01594 の支援を受けた. 記して謝意を表す.

## 参考文献

- 1) 令和 2 年版 防災白書 | 特集 第 1 章 第 1 節 1-3 令和元年東日本台風による災害  
<https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r02/index.html>
- 2) 令和元年東日本台風の概要-長野市  
<https://www.city.nagano.nagano.jp/uploaded/attachment>
- 3) 気象庁 | 過去の気象データ検索  
<https://www.jma.go.jp/>
- 4) Yamada et al.: Using a massive high-resolution ensemble climate data set to examine dynamic and thermodynamic aspects of heavy precipitation change, ASL, 2021.
- 5) 竹原由: 極端気象下における降雨の地形依存性評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), 2018.
- 6) Dale and Joseph: On the effects of moisture on the brunt-vaissala frequency, *J.Atmos.Sci.*, 1982.
- 7) Robert A. Houze: Orographic effects on precipitating clouds, *Rev. Geophys.*, 2012.