

Clausius-Clapeyron 式に基づく日平均気温と降水強度の関係式を用いた 将来における 1 時間降水強度の極値推定法

Estimation of Extreme Hourly Precipitation Intensity Based on Daily-mean Temperature and 99 Percentile Precipitation
Relationship Associated with The Clausius-Clapeyron Equation

北海道大学大学院工学院環境フィールド工学専攻 ○学正員 福島大輝 (Taiki Fukushima)
北海道大学大学院工学研究院環境フィールド工学部門 正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)
北海道大学大学院工学研究院環境フィールド工学部門 非会員 Murad Ahmed Farukh

1. はじめに

近年、北海道内において短時間スケールの極端降水イベントが頻発している。例えば、札幌市白石区では1999年8月末に14mmの10分間降雨量が、苫小牧市においても2013年8月13日に時間降雨量90mmが観測されている。もし将来の極端降水強度の年平均値が過去とは異なるものである場合、これまでの長期観測から得られる確率降水量をそのまま将来に適用可能であるのか否かという科学的及び治水計画上の疑問が生じる。従って、気候変動に伴う将来における降水強度の推定は今後の適応策を考えるうえで不可欠である。

次に、Clausius-Clapeyron 式 (以下、C-C 式) を介して気温と飽和水蒸気圧との関係に着目した近年の研究を紹介する。Lenderink and Meijgaard¹⁾はヨーロッパ全域を対象に1時間降水強度の99パーセンタイル値と地上気温の関係进行分析した。その結果、ある程度高い気温に達しない限り1時間降水強度の極値と気温の関係はC-C式に極めて近い変化率を示すことを明らかにした。また日本を含めたアジア域に着目した Utsumi et al.^{2,3)}の研究では、降水強度の99パーセンタイル値がC-C式から予測される水蒸気量変化率と類似することが確認され、この傾向は日本海側に位置する北海道内の道南から道北地域にかけてのデータをひとまとめに解析した結果においても見られた。

そこで水蒸気量と地上気温の関係から、将来気候に関して各地域における極端降水強度を見積もることが可能となれば、気候変動下における治水対策上の適応策を議論するために極めて有益な情報となると考えられる。

以上の背景から、本研究は札幌市を含む近隣市町村(約30km四方)に設置された52地点の観測データを用い、極端降水強度と地上気温の関係を明らかにする。そこで得られた関係式と気候モデルによって予測される将来気候における気温を用い、気候変動に伴う極端降水強度の推定手法を提案する。

2. 使用するデータ及び気候モデルの概要

2.1 使用するデータ

本研究において使用する観測データは、札幌市および周辺自治体により管理・運営されている札幌マルチセンサーである。この観測網は図-1に示す札幌市や近隣市町村に52箇所分布しており、10分間隔で降水強度や地

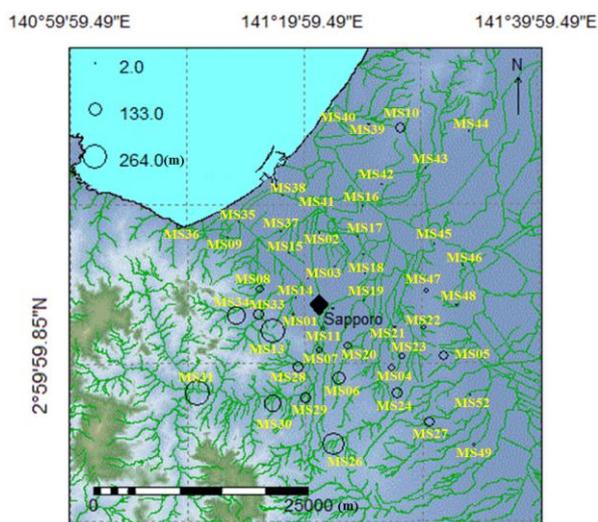


図-1 札幌マルチセンサー観測網の地域分布と各観測地点の番号(MS1-52)。図中の○は観測地点の標高(m)を示す。

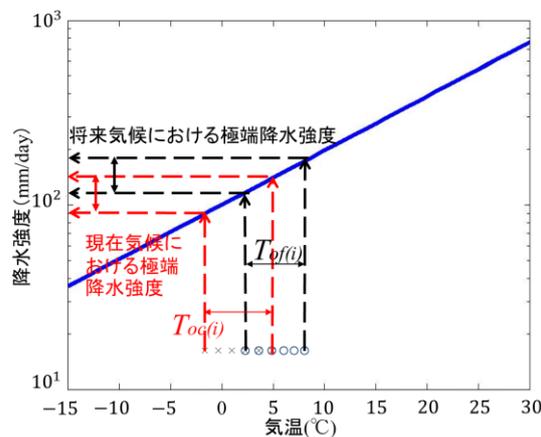


図-2 将来における降水強度推定方法の概念図

上気温を計測している。対象期間は1993年から2010年の18年間とし、地上気温並びに降水強度ともに10分間値と1時間値をそれぞれ用いる。

2.2 解析対象イベントの定義と抽出方法

まず全52箇所解析対象地点それぞれについて前述の全対象期間から降水(10分値と1時間値)が観測された日の日平均気温を計算し、その気温を2°C幅の気温ビン

ごとに分類する。次にすべての解析対象地点において、気温ビンごとに過去の降水イベントから 99 パーセンタイル値を求める(以下 99 パーセンタイル降水強度)。99 パーセンタイル値は、気温ビンごとに降水イベントを降水強度の大きいものから順に並べ、99 番目の割合に当たる値を意味する。なお本研究において 99 パーセンタイル降水強度に注目した理由は前述の Lenderink and Meijgaard¹⁾や Utsumi et al.^{2) 3)}等の先行論文との比較を可能とするためである。

2.3 全球及び領域気候モデルの概要

次章以降において議論を行う将来の極端降水強度の推定には、Max-Planck-Institut(以下、MPI)全球気候モデル(Global Climate Model、以下 GCM)による将来予測及び現在気候データを使用する。なお将来シナリオは A1b シナリオである。将来予測の対象期間は 2060~2070 年とし、これは全球平均気温が約 2°C 上昇した時期に相当する。この MPI GCM の気象データを側方境界条件として北海道全域を対象に領域気候モデルである Regional Spectral Model (以下、RSM)による力学的ダウンスケーリング⁴⁾を 10km 格子で実施し、気温及び降水強度データを算出する。

3. 将来気候における極端降水強度の推定手法の概念

図-2 は本研究が提案する気候変動下における将来の極端降水強度評価手法の概念図である。図中の青い実線は過去に観測された日平均気温の各気温ビンに対する 99 パーセンタイル降水強度を表す。図-2 中の×印は過去に解析対象地点で観測された気温を示し、 $T_{oc}(i)$ と記す(o :観測値; c :現在気候; i :解析対象地点番号を意味する)。○印はその解析対象地点における将来気候での気温 $T_{of}(i)$ (f :将来気候)を示す。気候モデルには各モデル固有のバイアス(一種の癖)が存在するため、対象地域においてこれまで観測された気温と気候モデルによる現在気候の気温の差を将来予測値に適用することでモデルのバイアスを除去し、これを $T_{of}(i)$ とする。最後に 99 パーセンタイル降水強度と日平均気温との関係式(青の実線)に $T_{oc}(i)$ 、 $T_{of}(i)$ を代入し、気温ビンごとに将来気候及び現在気候の降水強度を推定する。なお 99 パーセンタイル降水強度と日平均気温との関係式は次章にて導き、C-C 式との関連性についての説明も行う。

4. 極端降水強度と日平均気温の関係式の導出

4.1 全解析対象地点(52 地点)

図-3 は各気温ビンに対する 99 パーセンタイル降水強度を全解析対象地点ごとに示すものである。なお、縦軸は片対数としている。図中の赤い○印は 10 分間降水強度の 99 パーセンタイル値と日平均気温の関係を、青い○印は 1 時間降水強度の 99 パーセンタイル値と日平均気温の関係を表す。また赤点線は C-C 式を示す。横軸が日平均気温であることから、これと対応するように縦軸の降水強度は 10 分間及び 1 時間降水強度を日換算している。

まず高気温ビンでの 99 パーセンタイル降水強度と日

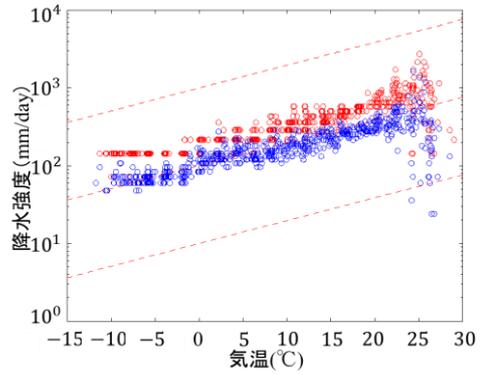


図-3 全解析対象地点の 99 パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係(縦軸は 99 パーセンタイル降水強度、横軸は日平均気温である。赤い○印は 10 分間降水量、青い○印は 1 時間降水量を使用したものである。赤い破線は C-C 式による飽和水蒸気量変化率(およそ 7%/°C)を表しており、傾きのみ意味を有する。)

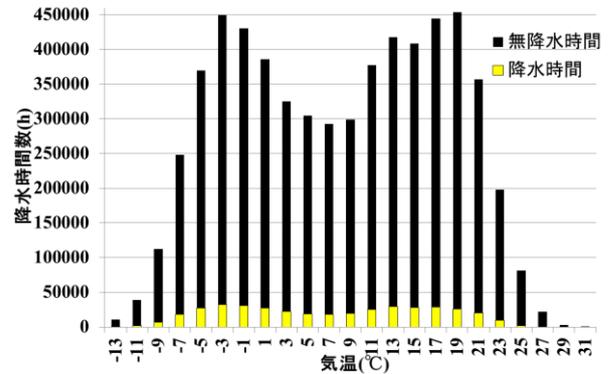


図-4 全解析対象地点の総降水時間と日平均気温の関係(横軸は日平均気温を気温ビンごとに示したものである。例えば 9°C は 8~11°C の気温幅を表す。)

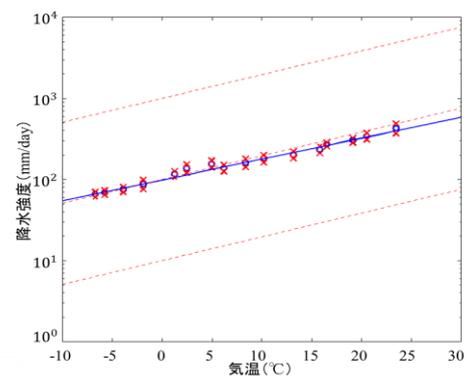


図-5 全解析対象地域の気温ビンごとの 99 パーセンタイル降水強度の空間平均値(青い○印は 1 時間降水強度を使用し、全 52 地点における結果を平均したもの、またそれから導き出される近似直線を青実線で示す。赤い×印は気温ビンごとに 99 パーセンタイル降水強度の空間的なばらつきを標準偏差で示したものである。縦軸は 99 パーセンタイル降水強度、横軸は日平均気温。赤い破線は C-C 式による飽和水蒸気量変化率(およそ 7%/°C)を表しており、傾きのみ意味を有する。)

平均気温の関係に着目する。この図から日平均気温が22~24℃付近までならば概ね C-C 式に沿う形となったが、24~26℃以上の気温ビンになると 10 分間及び 1 時間降水強度の 99 パーセンタイル値が C-C 式から離れ、下降することが読み取れる。先行研究^{2),3)}においては道南から道北にかけての日本海側という広領域に関して、日平均気温と 99 パーセンタイル降水強度の関係が 25℃付近まで C-C 式と類似することが示されており、これに対して本研究は、30km 四方に限定された狭い領域においても日平均気温が 22~24℃付近までであれば C-C 式と類似するという結果が示された。

次に低気温ビンにおける 99 パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係に着目する。10 分間降水強度の 99 パーセンタイル値は 0℃付近からそれ以下の気温にかけて一定値を取ることが読み取れる。一方で 1 時間降水強度の 99 パーセンタイル値は -8~-6℃付近までは C-C 式と類似する。1 時間降水強度の 99 パーセンタイル値と日平均気温の関係に関しては、-8~-6℃付近から 22~24℃ 付近までは C-C 式に概ね沿う。同関係が高気温ビン及び低気温ビンにおいて C-C 式と異なる要因については次節において議論する。

4.2 高気温及び低気温ビンにおいて極端降水強度と日平均気温の関係が C-C 式と異なる要因

高気温ビンにおいて 99 パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係が、C-C 式と異なる要因について Lenderink and Meijgaard¹⁾や Utsumi et al.^{2),3)}では、気温上昇と飽和蒸気圧曲線の関係から、高い気温ビンでは過飽和に至るまで水蒸気量が満たされず、そのため降水強度が低下するのではないかと指摘している。これに対して、本研究では気温ビンごとの降水時間数から考察する。

図-4 は全解析対象地点における気温ビンごとの総降水時間を示し、各気温ビンにおける平均降水時間は 17057.22 時間となる。99 パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係が C-C 式と類似する 20~22℃の気温ビンでの降水時間は 20315 時間となり、C-C 式から離れ下降しはじめる 22~24℃の気温ビンの降水時間は 9352 時間となる。また C-C 式と異なり降水強度が完全に下降している 24~26℃の気温ビンにおいては降水時間がさらに減少し、1950 時間である。このことから平均降水時間が平均値と比べ少ないと降水強度から 99 パーセンタイル値を求めるためのサンプル数が少ないと言える。つまりサンプル数が減少するにつれ極端降水強度が発生する確率も減少するものと考えられる。また 10 分間降水強度の 99 パーセンタイル値が 0℃付近以下において一定値をとる理由としては、降雪を人工的に融かすことによって降水強度を求める手法を採用している観測機器の特性に依存する可能性が考えられる。

4.3 対象地域における極端降水強度と日平均気温の関係式

札幌市における 99 パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係式を導くに当たり、1 時間降水強度の 99 パーセンタイル値を使用するものとする。前節において気

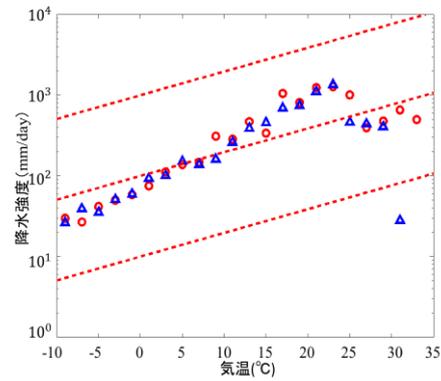


図-6 気候モデルによって計算された将来と現在気候の 99 パーセンタイル降水強度と平均時間気温の関係 (赤い○印: 将来気候データ、青い△印: 現在気候データ、赤点線:C-C 式から求まる水蒸気量変化率)

温ビンごとに総降水時間数は大きく異なる結果となる。従って 99 パーセンタイル降水強度の気温ビンごとの平均値による近似直線は、サンプル数によって大きな影響を受けてしまう懸念がある。これに対し既存研究^{2),3)}は 99 パーセンタイル降水強度を求める際に、各気温ビンでの解析対象日数を等しくした上で解析を行っている。本研究においては降水時間数が極めて少ない気温ビンを除くため解析対象気温幅を -8~-6℃から 22~24℃の気温ビンとする。図-5 の青い○印は解析対象気温幅(-8~24℃)の各気温ビンにおける 1 時間降水強度の 99 パーセンタイル値に関して観測地点間の平均値を示す。この平均値を使用し近似直線を引いたものが青実線となる。近似直線は

$$P_{99} = 10^{0.0258T + 1.9938} \quad (1)$$

と表すことできる。なお、式(1)中の T は日平均気温を、 P_{99} は 99 パーセンタイル降水強度を示す。以下、式(1)を「札幌における 99 パーセンタイル降水強度推定式」と定義する。図中の赤い×印は気温ビンごとに 52 地点間の 99 パーセンタイル降水強度のばらつきを標準偏差で示したものである。

5. 将来気候における極端降水強度の推定

5.1 将来気候における適用可能性

本節では「札幌における 99 パーセンタイル降水強度推定式」が将来気候に関しても適用可能であるか議論する。図-6 は MPI GCM による現在気候(1990~1999 年)及び将来気候(2060~2070 年)データに対して RSM による力学的ダウンスケーリングを行い、得られた結果から 99 パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係を求めたものである。99 パーセンタイル降水強度の抽出方法は 2 章 2 節において説明した通りである。図-6 から現在気候及び将来気候における 99 パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係は、C-C 式(赤い点線)とは異なる傾きを示すことが見て取れる。一方、現在気候と将来気候における 99 パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係を比較すると、-10~25℃付近までは両者の傾きは類似している。したがって、傾き自身は気候変動下においても特定の気温幅で保存されると推察され、「札幌にお

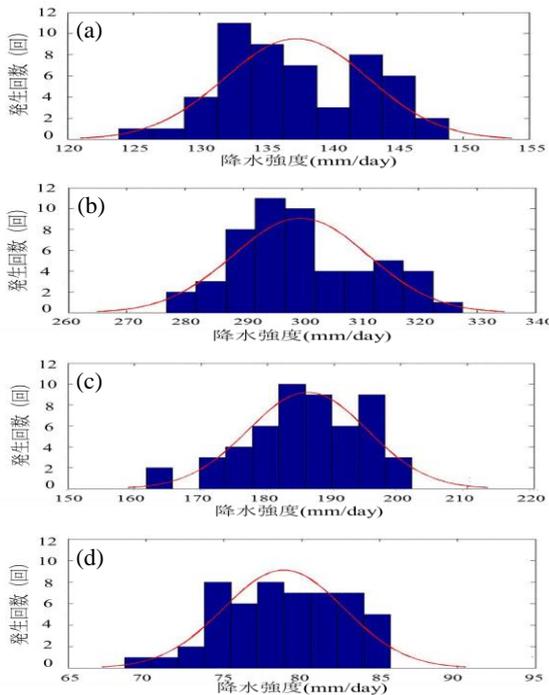


図-7 1993～2010年における全解析対象地点の可能最大99パーセントイル降水強度(a)MAM (b)JJA(c)SON(d)DJF

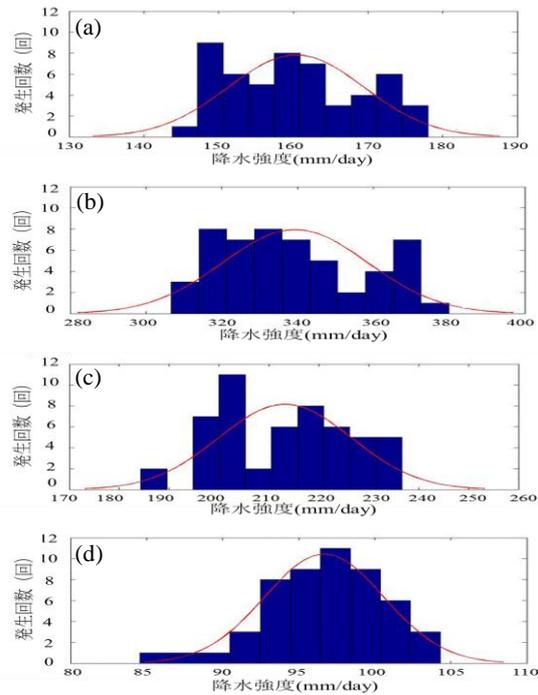


図-8 将来気候における全解析対象地点の可能最大99パーセントイル降水強度(a)MAM (b)JJA(c)SON(d)DJF

ける「99パーセントイル降水強度推定式」は将来気候において適用可能であることを示唆する。また図-6から30℃付近の高気温ビンにおいて、現在気候での降水強度が大幅に下降しているが、この傾向は図-3の高気温ビンでの結果と類似している。その理由の一つとして4章2節における議論と同様に高気温ビンにおいて降水時間が極端に少なくなることが考えられる。

5.2 将来気候における極端降水強度の推定結果

札幌マルチセンサー全52地点について1993年～2010年の18年間における平均気温を季節ごとに求める(3～5月をMAM、6～8月をJJA、9～11月をSON、12～2月をDJFと記す)。季節ごとにすべての解析対象地点における気温($T_{oc}(i)$ i は解析地点番号)をそれぞれ式(1)へ代入し、それぞれの99パーセントイル降水強度($P_{99}(i)$)を算定する。これにより現在気候における全解析対象地点が取りうる99パーセントイル降水強度が推定可能となる。得られた結果を図-7に示す。

次に、気候変動下における解析対象地点の気温を求める。各観測地点における将来気温を T_{mf} と記し、RSMから計算される現在気候の各季節の日平均気温を T_{mc} と記す。ここで気候変動下における解析対象地点の日平均気温を $T_{of}(i)$ と仮定すると、

$$T_{of}(i) = T_{mf} - (T_{mc} - T_{oc}(i)) \quad (i=1 \sim 52) \quad (2)$$

と表すことができる⁵⁾。RSMから得られる現在と将来の各季節の日平均気温の差を現在の全解析対象地点の気温に対応させることにより気候モデルの有するバイアスを除去した将来気温を推定する。そして $T_{of}(i)$ を式(1)に代入し、将来気候における $P_{99}(i)$ を求める。結果は図-8となり各季節定量的に将来の極端降水強度を表す。

6. まとめ

本研究は過去の日平均気温に対する99パーセントイル降水強度の関係式を求め、気候モデルから得られる将来の気温情報を反映させることによって今後発生し得る極端降水強度の推定手法を提案するものである。日平均気温幅が-8～-6℃から22～24℃の気温ビンならば「札幌における99パーセントイル降水強度推定式」の将来気候への適用性は高く、将来の極端降水強度推定は可能となる。しかし現在記録されていない高い気温に対する場合の極端降水強度の推定に関しては、過去の事例解析を踏まえ今後の検討が必要である。

謝辞：本研究は文部科学省 RECCA, SOUSEI(c-i-c)、地球規模課題対応国際科学技術協力 (IMPACT-T) 及び CREST (Core Research for Evolution Science and Technology) の成果の一部である。札幌マルチセンサーは札幌市からご提供頂いた。記して深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) Lenderink, G. & Van den Meulen, E: Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature change., Nature Geoscience 1,511-514,2008.
- 2) Utsumi N, Seto S, Kanae and Oki T: Dose higher surface temperature intensity extreme precipitation? Geophysical Research Letters, Vol.38, L16708, doi:10.1029/2011GL048426, 2011.
- 3) 内海信幸、瀬戸心太、鼎信次郎、沖体幹: 日本における1時間降水量の極値と地上観測気温の関係、水工学論文集、第55巻、2011.
- 4) 高藪出、金光正郎: 力学的ダウンスケーリングのレビュー、天気、Vol57、3-15、2010.
- 5) 木村富士男: アジアにおける降水帯の再現とメカニズムの考察、天気、Vo57、16-19、2010.