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 極端豪雨及び豪雪の極値推定法

ESTIMATION FOR EXTREME RAINFALL AND SNOWFALL BASED ON
RELATIONSHIP BETWEEN DAILY TEMPERATURE AND PRECIPITATION
INTENSITY ASSOCIATED WITH THE CLAUSIUS-CLAPEYRON EQUATION

福島大輝¹・山田朋人²

Taiki FUKUSHIMA and Tomohito J YAMADA

¹学生会員 北海道大学大学院工学院環境フィールド工学専攻 修士課程
(〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 博士(工学) 北海道大学大学院工学研究院環境フィールド工学部門 准教授
(〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

This paper discussed estimation method of probable maximum value of extreme precipitation. We analyzed the 99th percentile of 10-minutes and 1-hour precipitation for each daily average temperature bin based on observational data in Sapporo. Even if temperature is lower than zero degrees, 99th percentile precipitation intensities tend to have an approximation equation that rate of the precipitation increase was almost same as the Clausius-Clapeyron like relation. We estimated the future 99th percentile rainfall intensity under climate change condition by using the projected future temperature in a dynamically downscaled temperature in the Regional Spectral Model (RSM).

Key Words : *extreme precipitation, 99th percentile, climate change, Clausius-Clapeyron relation, histogram, climate model*

1. はじめに

従来、土木工学分野における河川計画や洪水対策は、整備目標として任意の時間スケールにおける確率降水量を基に行われてきた。ここで扱われる降水データは気候値として時間的に変化しないという定常性を仮定している¹⁾。

河川計画や洪水対策に対しては、短期的な予測と長期計画の両面が必要となる。短期的な予測は、流量観測所やリアルタイム観測より予想される降水量から洪水の発生を確認し警報、注意報を出すものである。一方で長期計画は、過去の観測データから求める確率降水量を基に行われ、ここでは解析対象データの年最大値や日最大値といった極値を採用することが多い¹⁾。

Kanae et al.²⁾は過去1890年から1999年の気象庁による長期観測データを使用し、東京における1時間豪雨の極値についての経年変化特性を明らかにした。また、Fujibe et al.³⁾は全国複数地点における降雨強度の長期トレンド

について議論を行っている。また、土屋ら⁴⁾は関東地方における10分間降雨強度と1時間降雨量の関係性を導いた。

北海道における近年の豪雨特性に着目すると、道内の多くの地域において短時間豪雨イベントが確認されている。札幌市白石区では1999年8月末に10分間に14mmが観測され、苫小牧市においても2013年8月13日に時間降雨量90mmが観測されており、道路冠水や鉄道運休など、人々の生活に大きな支障を与えた。このような背景に対して、降雨強度の極値に関する気候値そのものが変化している場合、任意の時間スケールにおける確率降水量をそのまま将来に適用可能であるのかという科学的疑問が生じる。Milly et al.⁵⁾は降水量の頻度特性に非定常性の考慮を導入する必要性を唱えている。このことは気候変動に伴う水文気象特性の物理的理解が進み、さらには観測データが現在よりも充実した場合を鑑みると、利用可能な気候関連情報を最適活用するためには、この非定常性の理解が不可欠であることを意味するものと言えよう。

一方で、Clausius-Clapeyronの式（以下、C-C式）に基

づき、降水強度と大気中の飽和水蒸気圧を結びつける研究も存在する。Lenderink and Meijgaard⁶⁾はヨーロッパ全域を対象に1時間降水強度と地上気温の関係を分析した。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式はC-C式に極めて近い変化率を示すことを明らかにした。日本を含めたアジア域ではUtsumi et al.^{7,8)}の研究から99パーセンタイル値の極端豪雨は、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。

前述のような長期間の降雨データから近年の降雨パターンの傾向を掴むことに加え、水蒸気量と降水強度の関係から各地域における短時間極端豪雨及び豪雪の大きさを見積もることは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は極めて有益な情報である。以上の背景に対して本研究は札幌市を含む近隣市町村(約30km四方)に存在する52地点の観測データを用い、降雨だけではなく降雪も含め短時間スケールの極端な降水強度と日平均気温の関係を明らかにすることを目的とする。その上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の気温情報を用い、気候変動に伴う極端降水強度の推定手法を提案する。

2章では使用するデータ及び気候モデルについて記す。3章では観測データから見出す極端降水強度と日平均気温との関係を基に、気候モデルによって予測される将来の気温情報を用いた気候変動下における極端降水強度の推定手法を提案する。4章では得られた結果を基に極端降水強度と日平均気温の関係について議論を行う。5章では3章において提案した将来の極端降水強度推定手法を用いた結果を紹介し、まとめを6章に記す。

2. 使用するデータ及び気候モデルの概要

(1) 使用するデータ

本研究において使用した観測データは、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地点に分布しており、10分間隔で降水強度や地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時間間値をそれぞれ用いた。

(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℃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雨イベントから99パーセンタイル降水強

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の推定方法の概念図

度を求める(以下99パーセンタイル降水強度)。99パーセンタイル降水強度は、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Utsumi et al.^{7,8)}等の先行論文との比較を可能とするためである。

(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)がA1bシナリオを用いて実施した将来予測及び現在気候データを使用した。将来予測の対象期間は2050~2060年とし、これは全球気温が約2℃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のRegional Spectral Model(以下、RSM)による力学的ダウンスケーリング⁹⁾を10km格子で実施し、気温及び降水強度データを算出した。

3. 将来の極端降水強度の推定手法

図-2は本研究が提案する気候変動に伴う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の気温ビンに対する99パーセントイル降水強度の関係を表す。この関係に2章(3)において説明を行った現在気候に対する将来の気温の変化量を考慮させる。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する。当然ながら気候モデルは降水強度そのものを計算しているが、気候モデルが示す降水強度は気温と比較すると一般に再現性が低いとされており¹⁰⁾、本研究では相対的に信頼性の高いと考えられる気温データのみを用いることとした。

図-2中の×印は解析対象地域で観測される気温を示し、 $T_{oc}(i)$ 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)。○印はその地域内における将来の気温 $T_{of}(i)$ (f:将来気候)を示す。ただし $T_{of}(i)$ は前述のバイアス除去を施した気候モデルが示す値^{11),12)}である。 $T_{oc}(i)$ 及び $T_{of}(i)$ は矢印で示す幅を有するが、この幅は解析対象地域内における気温の一番高い観測地点と一番低い地点の温度差を表す。99パーセントイル降水強度と日平均気温との関係式に $T_{oc}(i)$ 、 $T_{of}(i)$ を代入し、気温ビンごとに降水強度を推定する。なお99パーセントイル降水強度と日平均気温との関係式、及びC-C式の関連性については次章にて説明を行う。

4. 99パーセントイル降水強度とC-C関係

(1) 解析対象地点ごとの評価とサンプル数の影響

図-3は10分間降水強度の99パーセントイル値と日平均気温の関係(赤い○印)、同じく1時間降水強度の99パーセントイル値と日平均気温の関係(青い○印)をそれぞれ示す。図は片対数グラフであり、99パーセントイル降水強度を各観測地点で個別に求めた結果をプロットしたものである。横軸は日平均気温を表すことから、縦軸も日降水強度に換算した値とした。また図中の赤い点線はC-C関係を表す。先行研究では同じ気候区分に属するが遠隔に分布する複数の観測地点のデータを用いて短時間降水強度と日平均気温の関係がC-C線と似たような傾きを示すことを明らかにした。これに対して本研究では30km四方に限定された地域のデータのみからでも99パーセントイル降水強度と日平均気温の関係は概ねC-C線に沿った傾きを有することを示すものである。1時間値(図中の青い○印)のみの結果ではあるが、日平均値で零下の状

図-3 全解析対象地点の99パーセントイル降水強度と日平均気温の関係。(縦軸は99パーセントイル降水強度、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。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、傾きのみに意味を有する。

図-4 全解析対象地点の気温ビンごとの発生回数(色は解析対象地点ごとに異なる。左から右にかけて解析対象地点番号が大きいことを意味する)。縦軸が発生回数、横軸は日平均気温を気温ビンごとに示したものである。

図-5 全解析対象地域の気温ビンごとの99パーセント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パーセント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パーセントイル降水強度、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、傾きのみに意味を有する。)

況であっても降水強度と日平均気温の関係はC-C式に近い傾きを有する。一方、日平均気温が22～24℃より大きな気温ビンでは10分値、1時間値ともにC-C式からは外れる傾向が見てとれる。その理由についてLenderink and Meijgaard⁶⁾やUtsumi et al.^{7,8)}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に降水イベントのサンプル数から考察する。

図-4は札幌マルチセンサー52地点における気温ビンごとの日数を示す。気温ビンごとに左側の寒色系ほどマルチセンサーの若い番号を意味する(図-1を参照のこと)。この図から99パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係がC-C式からずれる気温ビンでは、その際に生じる降水イベントの数が他の気温ビンと比較して極めて少ないことが分かる。また-10℃付近以下において99パーセンタイル降水強度がほぼ一定値をとる理由としては、降水イベント数が極めて少ないことに加え、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も依存するものと考えられる。

(2) 極端降水強度と日平均気温の近似直線

前節において述べたとおり、気温ビンごとに降水日数は大きく異なる。そのため99パーセンタイル降水強度を気温ビンごとに平均し近似直線を求めると得られた結果は気温ビンごとのサンプル数に大きな影響を受けてしまう。またUtsumi et al.^{7,8)}では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。以下の解析では図-4に示した結果より、解析対象気温幅を-8～-6℃の気温ビンから22～24℃の気温ビン間とする。図中の赤い破線はC-C式による水蒸気量変化率を表す。青い○印は解析対象気温幅(-8～-6℃)の各気温ビンにおける99パーセンタイルの1時間値降水強度の観測地点間の平均値とその近似直線を示す。この近似直線は

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

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」と呼ぶこととする。図中の黒い×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。赤点線は式(2)のC-C式を表すものであるが、これは気温上昇に伴い大気中の飽和水蒸気圧が増加することを意味する。

$$P_{99} = 10^{0.0294 \times T + b} \quad (2)$$

式中の b は任意の係数である。熱力学の式から飽和比湿の変化率を α とすると、式(2)が示す傾きは7%/℃程度である¹³⁾ことから、 α をHardwick Jones et al.¹⁴⁾における飽

和水蒸気圧の式(3)へ代入し、気温が ΔT 変化した際の飽和水蒸気圧を求める。

$$P_2 = P_1(1 + \alpha)^{\Delta T} \quad (3)$$

ただし P_1 はある気温に対する飽和水蒸気圧である。式(1)、(2)の両式を比較すると、札幌市を含む周辺地域では観測値から得られる99パーセンタイル降水強度はC-C式による水蒸気量変化率と類似していることが分かる。また、赤い×印で示される各気温ビンにおける52地点間の標準偏差の大きさから、同地域内の99パーセンタイル降水強度の空間的ばらつきの大きさが確認できる。

(3) 52地点間の極端降水強度のばらつき

本研究の解析対象である52地点それぞれについて、各季節における日平均気温を求める(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を式(4)へ代入し $P_{99}(i)$ を算定する。なお、式中の i は観測地点の番号を示す。

$$P_{99}(i) = 10^{0.0258 \times T(i) + 1.9938} \quad (4)$$

これにより全解析対象地点において各季節が取りうる可能性のある99パーセンタイル降水強度が推定可能となる(以下、可能最大99パーセンタイル降水強度)。

図-6は季節ごとに可能最大99パーセンタイル降水強度の空間的ばらつきを頻度分布として示す。ただし図-6及び図-8における赤い曲線は正規分布を表す。縦軸の頻度の総和は全52か所存在する解析対象地点総数と等しい。現在気候のMAMでは、可能最大99パーセンタイル1時間降水強度は日換算で145(mm/day)以上となりうる解析対象地点数は2つ存在する。また、同季節における札幌市内で考えられる可能最大99パーセンタイル降水強度は同じく日換算で138(mm/day)付近である。同様にJJA、SON、DJFの可能最大99パーセンタイル降水強度の発生頻度のピークは290(mm/day)、185(mm/day)、80(mm/day)付近となった。

次に各季節における可能最大99パーセンタイル降水強度の幅(空間的ばらつき)について考察する。MAMにおける可能最大99パーセンタイル降水強度は125(mm/day)～148(mm/day)の間に存在しており、JJAでは280(mm/day)～325(mm/day)、SONにおいては162(mm/day)～200(mm/day)、最後にDJFでは70(mm/day)～85(mm/day)である。図-4より、冬季の日平均気温の空間的ばらつきは他の季節よりも顕著であるが、一方で可能最大99パーセンタイル降水強度が示す空間的ばらつきは他の季節と比較して小さい(図-6)。この原因としては、式(1)が示す通り気温が高いほど99パーセンタイル降水強度の空間内のばらつきは大きくなるため、気温が低くなるにつれて空間内のばらつきは小さくなると考えられる。

図-6 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

5. 将来気候に関する99パーセントイル降水強度の推定方法

本章では2章において記した領域気候モデルによる現在及び将来予測結果と前章までで議論を行った「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を試みる。図-7は、MPI GCMによる現在気候(1990～1999年)及び将来気候(2050～2060年)値に対して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パーセント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パーセントイル降水強度の抽出方法は札幌マルチセンサーを解析する方法と同様である(2章を参照のこと)。図-7から現在気候及び将来気候における99パーセントイル降水強度と日平均気温の関係(赤線が将来気候、青線が現在気候を表している。ただし近似直線は降水イベント数が極端に少ない30℃以上は含んでいない)は、C-C式(赤い点線)とは異なる傾きである。一方、現在気候と将来気候における99パーセントイル降水強度と時間平均気温の関係を比較すると、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保存されるものと推定できる。このことは、「札幌における99パーセントイル降水強度推定式」は将来気候においても適用できる可能性を示すものである。

次に1993年～2010年の期間から全解析対象地点におけ

図-7

気候モデルによって計算された将来と現在の99パーセント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式から各季節の日平均気温 $T_{oc}(i)$ を求める。本研究が対象とする札幌市及び周辺地域は3つのグリッドに相当するため、以下の解析では3グリッドにおける気温データを用いることとする。RSMから計算される同期間の各季節の日平均気温を T_{mc} とする。一方、各観測地点における将来気温を T_{mf} と記す。ここで気候変動下において実際に各地点それぞれが取りうる日平均気温を $T_{of}(i)$ と仮定すると、

$$T_{of}(i) = T_{mf} - (T_{mc} - T_{oc}(i)) \quad (i=1 \sim 52) \quad (5)$$

と表すことができる¹¹⁾¹²⁾。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観測地点の気温に

対応させることによって気候モデルの有するバイアスを除去した将来の気温($T_{of}(i)$)を推定する。次に $T_{of}(i)$ を前章において得られた式(1)に代入し、 $P_{99}(i)$ を求める。これにより今後予測される気温情報と過去の極端降水強度の日平均気温の関係をを用いた将来起こり得る極端降水強度の議論が可能となる。

図-8は全球平均気温が現在よりも約2℃上昇した際の将来気候に関して季節ごとの可能最大99パーセンタイル降水強度とその空間的ばらつきを示す。MAMの可能最大99パーセンタイル1時間降水強度の発生頻度ピークは、日換算でそれぞれ160(mm/day)となり、現在気候のMAMと比較して20(mm/day)程度大きい。同様にSONとDJFに関しても約20(mm/day)の増加、一方JJAでは約40(mm/day)の増加となることが分かる。

6. まとめ

本研究は観測データから得られた過去のC-C関係と気候モデルによって示される将来予測気温に基づき、将来取り得る極端降水強度の推定手法を提案するものである。以下を本論文のまとめとする。

- ・現在気候に対して、札幌マルチセンサーを使用し札幌市における99パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係を考察した結果、日平均気温が-8~6℃付近から22~24℃付近においてC-C関係と類似した(図-5)。このことから上記の気温幅にて「札幌における99パーセンタイル降水強度推定式」を経験式として得た。
- ・将来気候に対して、「札幌における99パーセンタイル降水強度推定式」の適用性を議論すると、気候モデルから現在気候及び将来気候共に99パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係は、C-C関係と異なる傾きを示したが、同モデルが示す現在気候での傾きと将来気候での傾きは類似する結果となった。このことから、現在気候及び将来気候に関して、99パーセンタイル降水強度と日平均気温の関係の傾きは保存する可能性が高い。そこで、経験式としての「札幌における99パーセンタイル降水強度推定式」は将来気候での適用性が高いといえる。
- ・将来気候において、札幌マルチセンサーが取りうる気温は、気候モデルから得られる現在気候と将来気候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で気候モデルの有するバイアスを除去し気温とした。
- ・「札幌における99パーセンタイル降水強度推定式」に季節平均ではあるが、将来気候の観測気温を適用し99パーセンタイル降水強度を求めた(5章)。しかしJJAに関して、気温がある閾値を超えると99パーセンタイル降水強度が減少方向に向かう結果であるため、現在記録されていない高い気温に対する本手法の妥当性はそ

の物理的理由の解明を含め今後議論を必要とするものである。

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)、および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) 寶馨: 水文頻度解析の進歩と将来展望, 水文水資源学会誌, Vol. 11, No.7, 740-756,1998.
- 2) Kanae,S.,Oki,T.,Kashida, A:Change in hourly heavy precipitation at Tokyo from 1890 to 1999. 気象集誌 Vo82, 241-247, 2004.
- 3) Fujibe F.Yamazaki N.,Katsuyama M. and Kobayashi K.: The increasing trend of intense precipitation in Japan based on four-hourly data for a hundred years. SOLA 1,41-44,2005.
- 4) 土屋修一,阿部陽一,佐藤直良,山田正: 10分間降雨強度と1時間降雨量の関係に関する研究, 水文水資源学会2003年研究発表会要旨集,pp144-145,2003.
- 5) Milly,P.C.D.,Julio,B.,Malin,F.,Robert,M.,Zbigniew,M.,Dennis,P.,Ronald,J.: Stationarity Is Dead: Whither Water Management? Policy Forum on 'Science' 319,No5862, 573-574,2008.
- 6) Lenderink, G. & Van ,M, E: Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature change., Nature Geoscience 1,511-514,2008.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9)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,Vo57,3-15,2010.
- 10)Parry, Martin Lewis, ed. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Vol. 4. Cambridge University Press, 2007.
- 11)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.
- 12)佐藤友徳: 疑似温暖化実験, 天気,Vo57,37-38,2010.
- 13)Trenberth K.E.,Dai A. Rasmussen, R.M & Parsons D.B: The changing character of precipitation. Bulletin of the American Meteorological Society 84, 1205-1217,2003.
- 14)Hardwick J, R.S Westra and A Sharma: Observed relationship between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity, Geophysical Research Letters, VOL37, L22805, doi:10. 1029-2010 GL045081, 2010. (2013. 9. 30受付)