

将来降雨シナリオを考慮した
急流河川における護岸・高水敷侵食特性

北海道大学大学院 工学研究院 久 加 朋 子
北海道大学大学院 工学研究院 星 野 剛

将来降雨シナリオを考慮した 急流河川における護岸・高水敷侵食特性

久加 朋子¹・星野 剛²
Tomoko KYUKA and Tsuyoshi HOSHINO

¹ 北海道大学大学院工学研究院 特任准教授

² 北海道大学大学院工学研究院 博士研究員

要 旨

近年、全国各地の河川において降雨外力の増大に伴う洪水リスクの増大が懸念されている。本研究では、2016年北海道豪雨災害にて被害を受けた十勝管内の河川（音更川を想定）を対象とし、降雨特性の変化と、それに伴う護岸流失・高水敷侵食特性の変化を把握した。以下の報告には下記テーマについて記載する。

- (1) 急流河川における将来洪水流量を考慮した河岸侵食特性の検討(久加朋子)
- (2) 大量アンサンブル気候データを用いた大雨パターンの分類とその将来変化（星野剛）

急流河川における将来洪水流量を考慮した河岸侵食特性の検討

久加 朋子¹
Tomoko KYUKA

¹ 北海道大学大学院工学研究院 特任准教授

要 旨

近年、十勝川水系の将来洪水流量は1.5～1.7倍程度まで変化する可能性が指摘されており、安全確保の観点からリスクを把握し、それを踏まえた河道計画を検討しておく必要がある。そこで、本研究では既往研究を発展させ、将来洪水流量を想定した場合の流路変動特性について数値解析より検討すると共に、低水路満杯流量程度～高水敷が冠水する規模の流量下における護岸付近の流れを再現し、出水時、堤防や護岸の侵食を確実に防御するために考慮すべき場所の把握を試みた。数値解析結果、音更川の当該区間では流量規模が大きくなるほど川幅も大きくなつた。ただし、低水路内において川幅は拡幅し続けることはなく、各ケース一定値に漸近した。これは、流量1.5倍を超えた付近から、ピーク流量通過後の流路形態が蛇行から複列、あるいは網状流路へ変化し、流路の拡幅が止まつたためである。ただし、この時点で既に堤防決壊している場合、堤内地に新流路が形成された。一方、水路実験の結果では、流れが高水敷に乗り上げる場所よりも、流れが本川に戻る場所にて浸食が顕著に表れる傾向が認められた。したがつて、将来洪水流量を考慮した急流河川区間の河道計画においては、河道内ではある程度蛇行流の移動を許容し得るが、堤防基盤部およびその前面を侵食に対しては確実に防御できる構造とすることが肝要となる。

《キーワード：蛇行；河岸侵食；流路変動；音更川；将来降雨》

1. はじめに

気候変動等に伴う降雨特性の変化が顕在化しつつある今日、大規模な出水頻度が増加する可能性を踏まえ、それに対応する適応策としての治水施設の整備や管理法を検討することは重要な課題である。しかし、急流河川の一般的な河道計画は、疎通させるべき流量に対応する河積を確保するための断面形状は規定されているものの、想定される外力による土砂移動を考慮した河道変化とそれに伴う川幅拡幅の可能性を十分に勘案したうえで策定されているとは言い難い。

河川の急勾配区間では、出水時の流路変動に伴い、河川水位が計画高水位を超えると河岸侵食により堤防が侵食され、決壊に至ることが知られている^{1) 2) 3)}。急流河川における流路の蛇行発達は、出水前の流路形状、流量ハイドログラフ形状、植生繁茂状況、低水護岸等の整備状況、上流からの土砂供給量など多岐に渡る要因が影響していると考えられる。前報⁴⁾では、2016年北海道豪雨災害にて被災した音更川上流区間（図-1）を対象とし、これまで既往論文でも注目されてきた流量ハイドログラフ形状に着目し、流量の増加または減少する過程、流量ピーク値自体がどの程度流路変動に影響を与えるかを検討した。結果、(1) 総流量が同じであればピーク時刻が異なっても類似する平面形状の流路変動と堤防決壊が生じること、(2) ただし、堤防侵食開始タイミングが異なり、流量を実績よりもゆっくり増加させた場合、ピーク流量到達前に決壊することが確認された。これは、河川管理上、非常に危険な状況に該当するはずである。つまり、これまで音更川を事例とした既往論文^{3) 4) 5)}などでは主に出水後半での蛇行発達と河岸侵食（破堤）が注目されてきたが、場合によっては出水前半のハイドログラフ形状も堤防侵食リスクと氾濫規模に大きく影響を与える可能性があることが指摘されたと言える。同時に、前報⁴⁾では、(3) 当該区間の低水路内の堆積幅の発達は流量400m³/sec程度を超える付近から明瞭に始まることが確認された。つまり、砂州地形の発達に伴う急激な蛇行化には、初期地形に依存した“ある流量”が存在する可能性を示されたと言える。

しかしながら、急流河川にみられるような大規模な側方侵食を伴う流路変動のメカニズムには依然と未解明な部分が多く、たとえば出水規模自体の増大が流路変動特性に与える影響、それに伴う河岸、地盤、堤防等の侵食リスクの変化など分かっていない部分も多い。十勝川水系の将来洪水流量は1.5～1.7倍程度まで変化する可能性が指摘⁶⁾されており、安全確保の観点からも、こうした状況下でのリスクを把握し、それを踏まえた河道計画を検討しておくことは肝要である。

そこで、本研究では、今後の急流河川の侵食リスクを推定する手法を確立するための知見を得ることを目的に、既往論文⁴⁾と同じく音更川上流域を対象に将来洪水流量を想定した流量規模の増大が流路変

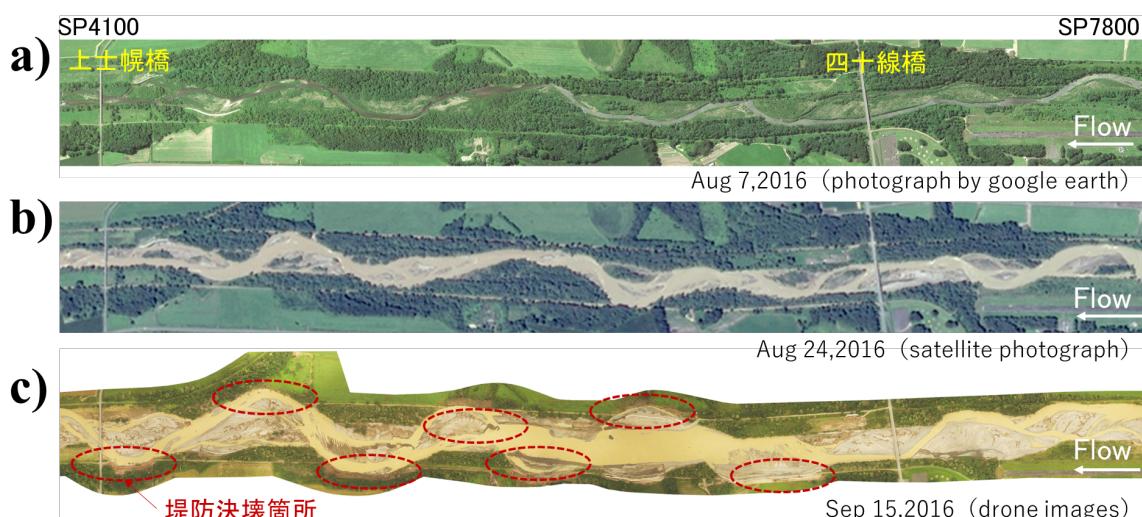


図-1 音更川上流区間の被災前後の航空写真

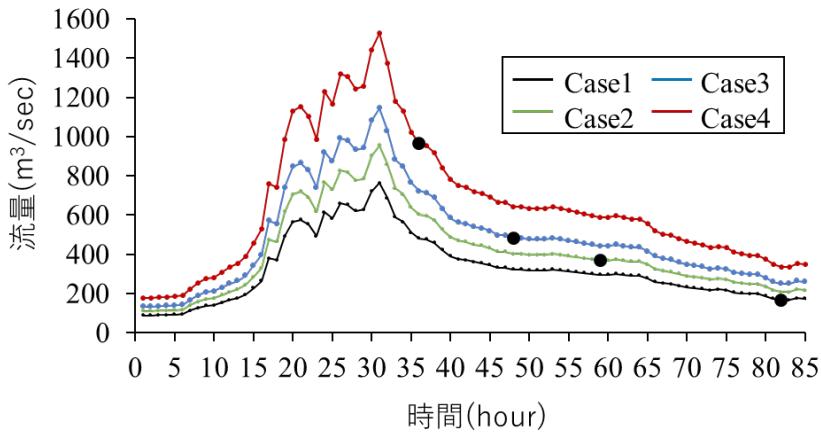


図-2 数値計算条件のハイドログラフ (Case1: 実績),
図中の黒丸はCase1と同じ総流量となる時刻を示す

動特性に与える影響について数値解析から検討した。ならびに、水路実験より低水路満杯流量程度～高水敷が冠水する規模の流量下における護岸付近の流れを再現し、出水時、堤防や護岸の侵食を確実に防衛するために考慮すべき場所の把握を試みた（ただし、水路実験に関しては事前実験かつ未報告の段階であり、詳細は省略している）。

2. 音更川

当該区間（図-1）の諸元は以下の通りである。流域面積は約500 km²、河床勾配は1/120程度と比較的急勾配であり、河床材料は平均粒径55mmの砂混じりの礫で構成されている。平成28年8月の北海道豪雨災害では、直線的に整備された区間において流路の蛇行化によって河岸が大きく侵食され、左右岸箇所に亘って堤防決壊に至った（図-1c）。出水前の河道は、図-1a）より樹木が繁茂した河川敷地内においてある程度の蛇行は確認できるものの、既設の護岸も相まって比較的安定した河道の様相であった。しかしながら、既往最大流量を観測した出水により、当該区間では急速な流路変動が生じ、流路の平均水路幅は2.54倍、流路の最大振幅は1.96倍まで大きく拡大した。当該区間の堤間は約200mほどであったが、出水後、最も拡幅した河道断面の川幅は298 m程度となつ³⁾。出水後の現地調査によると、当該区間の堤防接近箇所等には低水路護岸が設置されていたが、出水後には大部分が破壊流失していたことが確認された。また、痕跡水位調査からは、決壊した堤防はピーク水位時には存在しており外水氾濫を防いだものの、その後の流量低下時に決壊に至った状況が確認された。

2. 数値解析

2.1 数値解析モデル

音更川当該区間を対象とした将来降雨変化に伴う洪水増加を想定し、2016年北海道豪雨災害時の実績流量ハイドログラフ形状を1.2倍～2.0倍まで増加させた場合における流路変動の応答を数値解析より検討する。数値解析モデルには、出水中の局所洗堀に伴い植生が流出する条件を追加したiRIC Nays2D (<http://i-ric.org/ja/>) を用いた。計算範囲は、既往論文^{3) 4)}と同じく音更川SP1300～SP8600の区間とし、上流端には比較的川幅変化の認められなかった中央橋付近を選定した。計算格子サイズは縦断方向に7m、横断方向に4mとし、航空写真を参考に植生域を設定した。初期植生密生度および植生が流出する際の洗堀深は、十勝川水系別支川である札内川における既往の現地調査結果¹⁾を参考に、各々0.03、0.2mを与えた^{1) 3) 4)}。河床材料は、現地調査より得られた平均粒径55mmの均一粒径とし、マニングの粗度係数は0.03を与えた。流砂量式は芦田・道上の平衡流砂量式を用い、隣り合うメッシュ間の河床高の差が安息角以下になるように河岸（堤防）侵食を考慮した。上流端からは平衡流砂量を与え、初期河床高が変化しない条件とした^{3) 4)}。

2.2 解析条件

計算ケースの流量ハイドログラフ形状を図-2に示す。図-2に示すCase 1は、2016年8月の再現計算⁴⁾である。Case 1では、音更川土幌観測所で得られた実績流量の暫定値（帯広開発建設部）の流量ハイドログラフ形状を与えており、Case 2、Case 3およびCase 4は、Case 1の洪水ピーク流量を1.25倍、1.5倍、2.0倍までハイドログラフを引き伸ばしている。これらは、仮に将来降雨変化に伴う流出量増大が既往最大洪水の更新をもたらした場合、流路変動特性および蛇行流路の発達に伴う河岸・堤防侵食リスクがどのように変化するか、その特性を把握するものである。

3. 解析結果と考察（音更川の将来洪水を想定した流路変動特性）

3.1 総流量が同じ時刻における流路形状

図-3に、Case 1からCase 4の総流量が同じ時刻（図-2に示すハイドログラフの黒点）における河床変動量コンター図を示す。前報⁴⁾では、総流量を統一した条件のもとハイドログラフのピーク時刻のみずらした場合、計算終了時の流路の平面形状は類似し、堤防侵食箇所もほぼ同じように再現された。一方、本計算ではピーク流量が異なる（流量規模が異なる）場合、総流量が同じ時刻における流路の平面形状は明瞭に異なった。

結果を比較すると、本計算条件下ではピーク流量が大きいケース（Case 3およびCase 4）ほど蛇行波長が延長するものの、蛇行の振幅については顕著な影響が確認されなかった。また、低水路内の河床変動量に着目すると、ピーク流量が大きいケースほど変化が明瞭で、河床変動量の増分が大きく低水路内に短時間で多量の土砂が堆積した（図-3、黄色の領域が多量の土砂堆積域を示す）。これは、計算領域内の測線A-A'断面における通過掃流砂量（図-4）を比較した図から、以下のプロセスが推察される。まず、低水路内を流れる掃流砂量は、流量増加に伴い増加する（この掃流砂量の増加は流量に対して線形ではない点に注意）。その後、流量が減衰に転じた際、低水路内にて流しうる掃流砂量が急激に低下し（図-4）、それまで流れていた土砂が多量に砂州上に取り残される。これが、流量ピークを迎えた後、急激に低水路内の河床変動量の堆積量が増加した要因と言える。

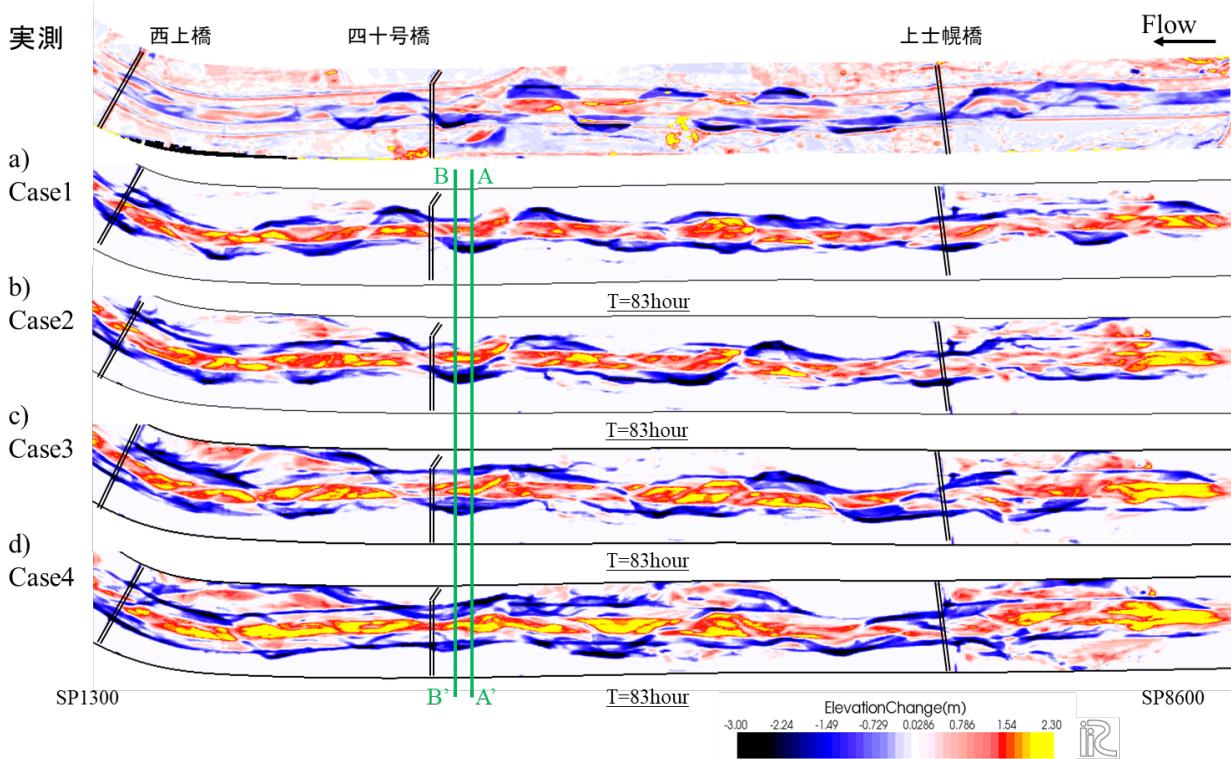


図-3 実測の河床変動量 (H21と災害後のLPデータの差分) と総流量が同時刻 (図-2の黒点) の河床変動量コンター図。

a) Case 1(実績1.0倍), b) Case 2(1.25倍), c) Case 3(1.5倍), d) Case 4(2.0倍)

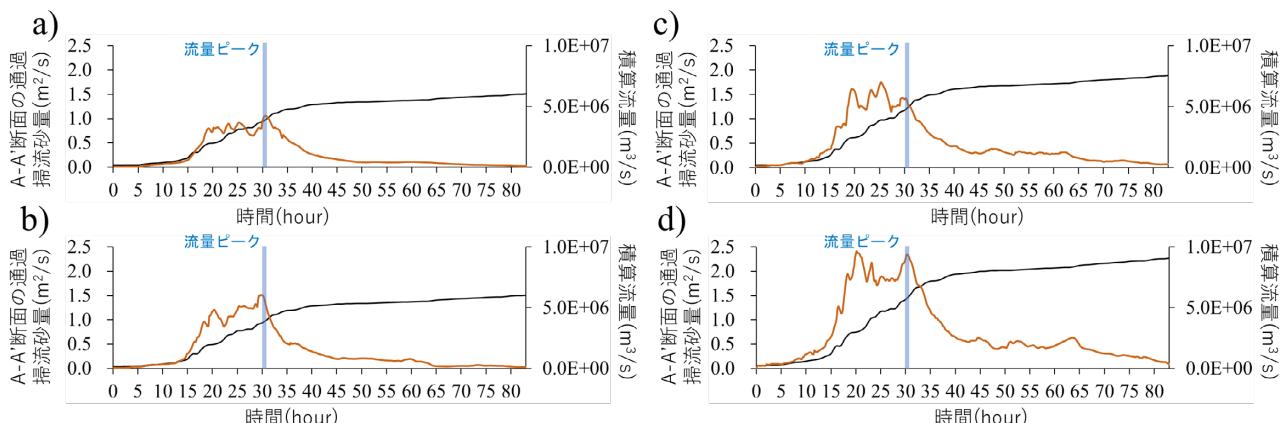


図-4 測線Aにおける積算流量と断面通過掃流砂量の時間変化。

a) Case 1(実績), b) Case 2(1.25倍), c) Case 3(1.5倍), d) Case 4(2.0倍)

3.2 計算終了時における流路形状

図-5および図-6に、Case 1からCase 4の計算終了時の河床変動量コンター図と水深コンター図を示す。流路の平面形状を比較すると、流量規模の大きいケース (Case 3とCase 4, 図-5) では、実測値に近いケースに比べ、蛇行流路の平面形状を維持できていないよう見える。とくに、最も流量規模の大きいCase 4では、水深コンター図 (図-6d) からも分かる通り、堤防を超えた堤内地側に新たな流路が分岐している。つまり、Case 4では、現状の堤防で囲まれた「複断面河道内での河道維持対策」を超えた領域まで流路変動していることが分かる。つまり、本結果によると、音更川当該区間では流量が1.5倍以上まで増大し、現況の川幅において低水護岸や堤防 (堤体と基盤) が出水途中に河岸侵食に伴い流失す

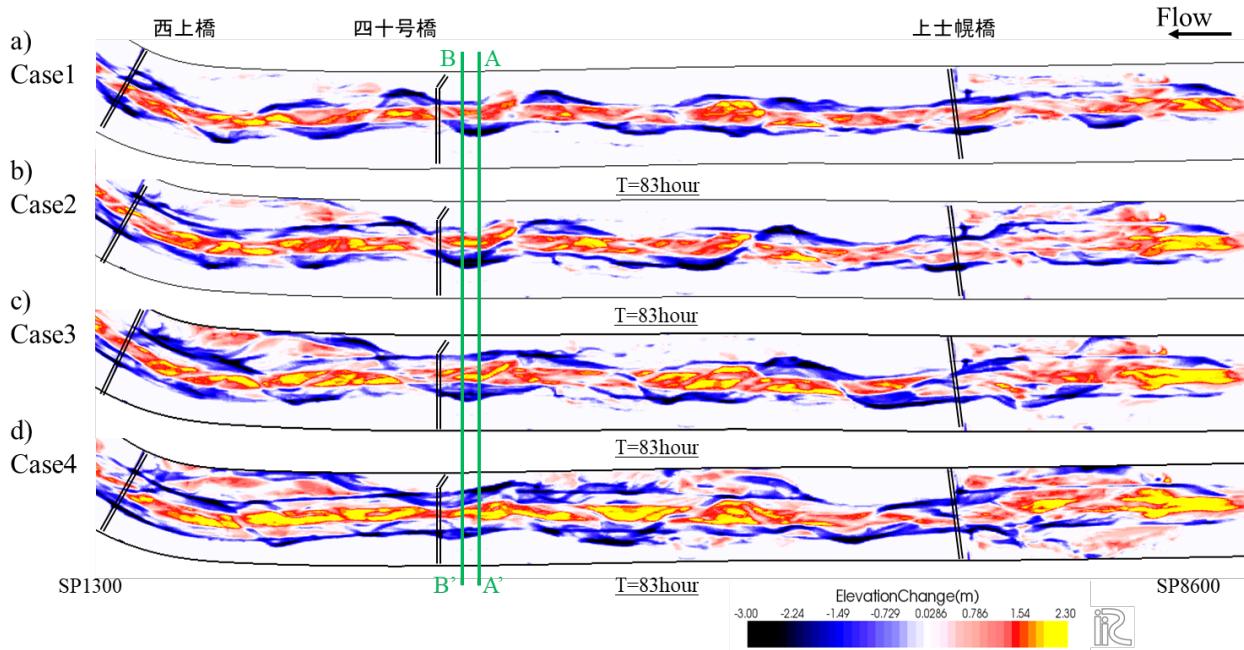


図-5 計算終了時 (T=83hour) の河床変動量コンター図。
a) Case 1(実績), b) Case 2(1.25倍), c) Case 3(1.5倍), d) Case 4(2.0倍)

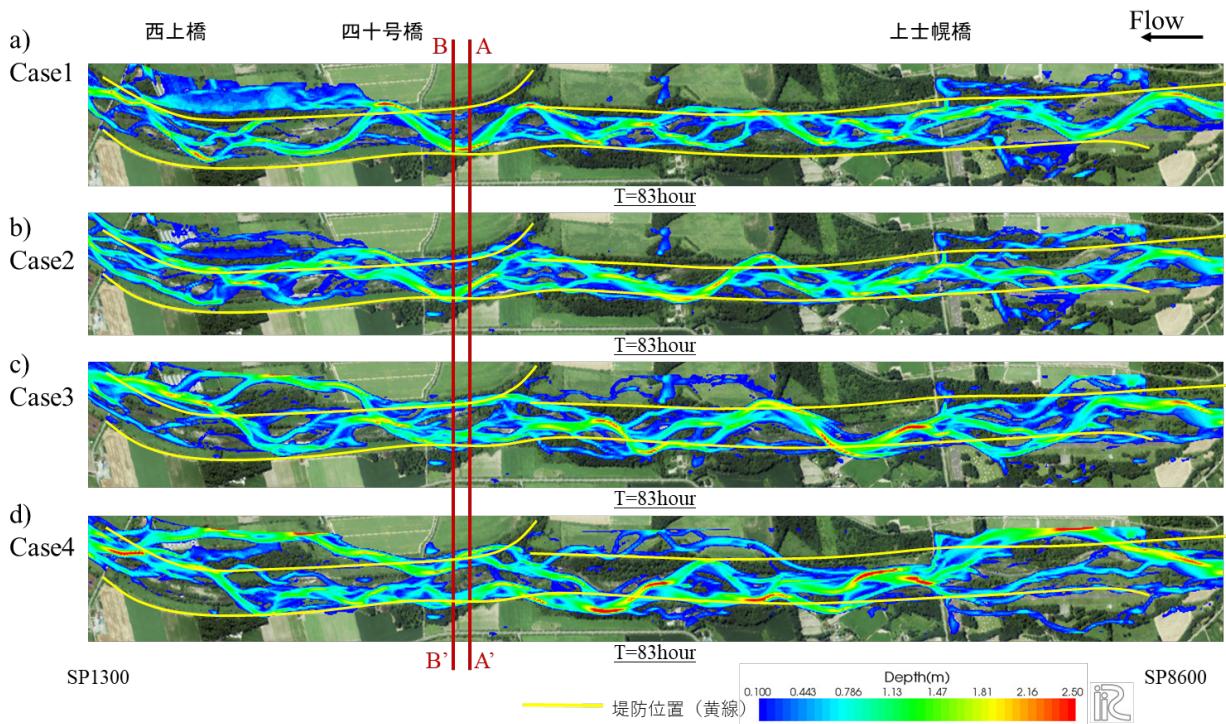


図-6 計算終了時 (T=83hour) の水深コンター図
a) Case 1(実績), b) Case 2(1.25倍), c) Case 3(1.5倍), d) Case 4(2.0倍)

るような状況が想定された場合、流路が堤防を越え、流路が低内地において分岐する可能性もあると示された。これは、当該区間の流路形態の平面形状が約20km上流の糠平ダム（1956年）建設前の流路・河道形態（<https://maps.gsi.go.jp/contentsImageDisplay.do?specificationId=180604&isDetail=true>）に近づくことを意味するものである。

3.3 将来洪水流量を想定した場における川幅拡幅

ここでは、流量規模増大に伴う蛇行流路の平面形状の変化が川幅の拡幅に与える影響を検討する。図-7に、測線A-A'断面における横断河床形状の時間変化を示す。また、図-8および図-9には、測線A-A'断面と測線B-B'断面における低水路の河岸侵食幅および積算侵食断面積を示す。なお、この測線B-B'断面は、流量の大きなケースほど時間経過とともに蛇行部がA-A'断面よりも下流側へ前進したため、あくまで比較用に示している。

図-7より、各ケースの低水路の最終的な川幅は、前述の流路の平面形状の違いに関わらず、流量規模が増加するほど大きくなることが分かる。これは、将来降雨流量が増大するほど、それに比例して川幅拡幅および堤防侵食リスクが高まることを示すものである。

続いて、図-8に示す測線A-A'断面と測線B-B'断面における低水路河岸侵食幅の変化を比較する。図

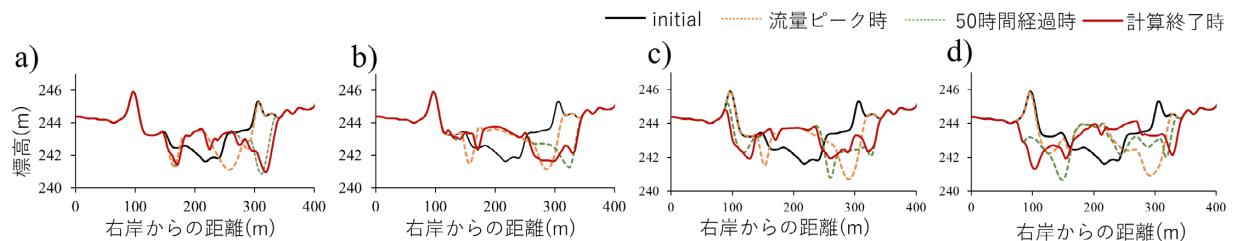


図-7 測線A-A'における横断河床形状の時間変化
a) Case 1(実績), b) Case 2(1.25倍), c) Case 3(1.5倍), d) Case 4(2.0倍)

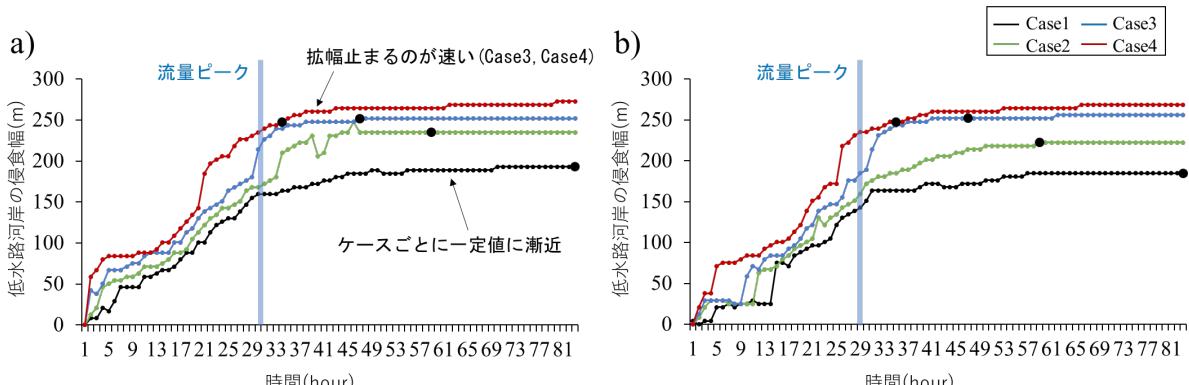


図-8 低水路の河岸侵食幅、黒点：総流量が同じ時刻を示す、
a) 測線A-A', b) 測線B-B'(測線A-A'より75m下流地点)

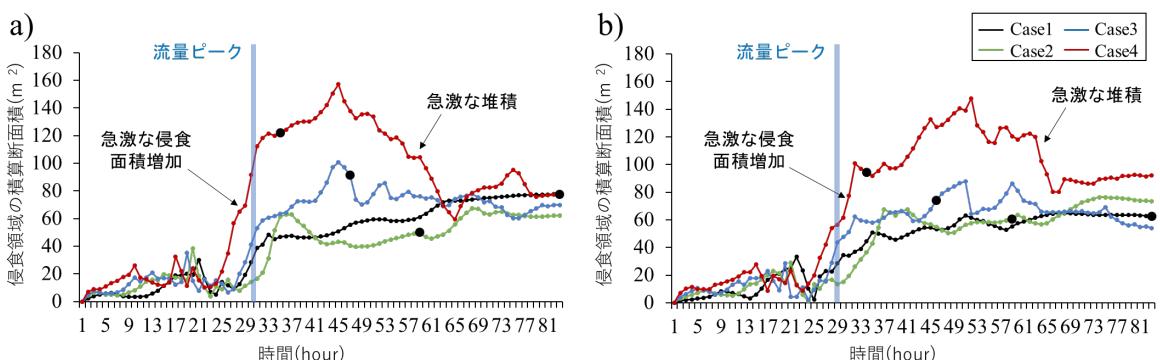


図-9 測線上の侵食領域の積算断面積 (m²)、黒点：総流量が同じ時刻を示す、
a) 測線A-A', b) 測線B-B'(測線A-A'より75m下流地点)

中の黒丸は、総流量が同じ時刻を示している。図-8から分かるとおり、各ケースの低水路の河岸侵食幅は、流量ピーク値に対応して大きくなることが分かる。ただし、図-8によると、低水路河岸の侵食幅はある各ケース一定値付近まで広がると次第に漸近し、拡幅が止まる様子が見てとれる。これは、流量1.25倍以下のケースでは、既往論文と同じく流量低下に伴い流路蛇行化が停止したためである。一方で、Case 3とCase 4については、もし仮にCase 1と同じプロセス⁴⁾で流路変動が進むと予想した場合、流量低下時に低水路内に浮州が出現することで流れが偏向し、流量がかなり小さくなるまで更なる蛇行化が進むはずである。しかし、本計算条件下によると、Case 3とCase 4は計算終了時においても流量が十分大きい(400m³/sec付近)にも関わらず、Case 1やCase 2よりも先に拡幅が停止した。これは、図-9の測線上の積算侵食断面積の変化が示すように、流量ピーク通過後、砂州上に急速に土砂が堆積し、低水路全体の河床高が上昇することで流路形態が蛇行(wandering)から、遷移状態(transition)あるいは網状流路(braiding)へと変化したためと考えられる。流路が分岐することで流れ場の掃流力が低下し、川幅拡幅が比較的早い段階で停止したと推察される。

3.4 急流河川の河道計画に関する考察

音更川では、2016年北海道豪雨災害やそれ以前においても、計画高水位到達以前に河岸侵食に伴う堤防決壊を幾度も経験してきた。本検討では、流量規模に応じて川幅の拡幅がどの程度まで発達するかを比較したところ、やはり流量規模が大きいほど拡幅距離が増大した。ただし、当該区間では流量が2016年出水の1.5倍規模を超えたあたりから、ピーク流量後に流路形態が変化し、蛇行流路の複列、網状流路化が始まる同時に、流路拡幅が止まった。ただし、この段階で既に破堤している場合、堤内地にも新流路が形成された。このことから、急流河川の河道計画においては、河道内ではある程度蛇行流の移動を許容し得るが、当該箇所の重要度や周辺箇所とのバランス等も踏まえたうえで、堤防基盤部とその前面を侵食に対して確実に防御できる構造とすることが肝要と言える。これより、たとえ高水敷が侵食され、低水護岸が流失するような想定外の流量においても、甚大な被害を抑制できるように検討することが望ましいと考える。

4. 水路実験

4.1 実験水路

ここでは、水路実験にて低水路満杯流量程度～高水敷が冠水する規模の流量下における護岸付近の流れを再現し、出水時、堤防や護岸の侵食を確実に防御するために考慮すべき場所の把握を試みた(ただし、水路実験に関しては事前実験かつ未報告の段階であり、詳細は省略している)。実験水路を図-10に



図-10 実験水路

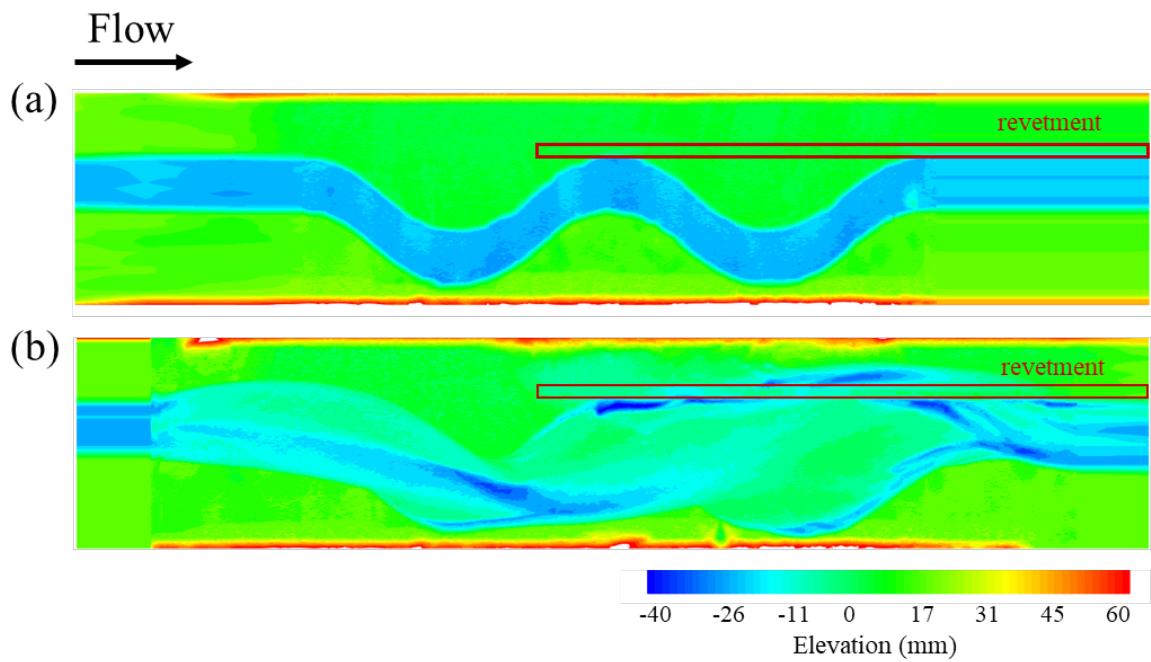


図-11 水路概要

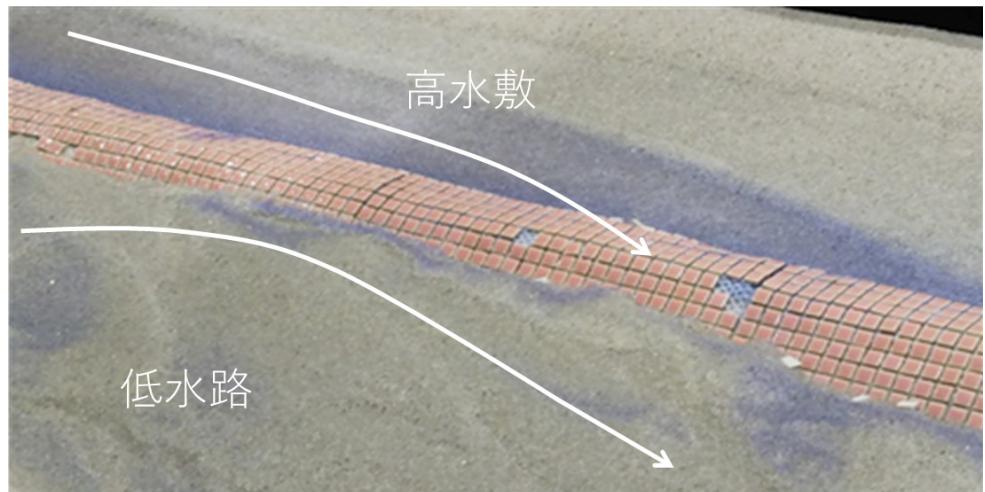


図-12 高水敷からの流れと低水路の流れの合流地点の拡大写真

示す。水路は北海道大学工学部所有の循環式の可傾斜水路を用い、全長7.6 m、幅1.5 m、勾配1/120の水路内に一様砂 ($d_m = 0.78$ mm) を敷き詰め、水路内には幅40 cmで蛇行部を2波長（蛇行角40°）有する初期水路を作成した。低水路の河岸高は左右岸で異ならせ（左岸：3.23 cm、右岸：4.23 cm）、左岸側の高水敷にのみ流れが乗りあがり冠水するようにした。実験での護岸模型は10×10×4 (mm) の角タイルを連結したタイルシートで作成した。

4.2 実験条件

実験は1ケース実施し、定常流 (0.005 m³/s) を45分間通水した。実験開始前と実験終了後には、レーザ変位計 (KEYENCE社製) を用いて河床高を測定し、各々の数値標高モデル (DEMs) を得た。また、実験前後を差分することで河床変動量 (DoDs) を得た。

4. 水路実験結果

低水路満杯流量程度～高水敷が冠水する規模の流量下における護岸付近の流れを再現し、出水時、堤防や護岸の侵食が生じやすいと推察される場所を確認した。図-11に実験初期と実験終了時の基準点からの河床高を示す。

図-11より、実験終了時の流路は低水路が河床上昇し、左岸側の高水敷上に浸食箇所に伴う流路が確認される。流れが乗り上げた場所は、蛇行部頂部よりも若干下流側であった。また、この蛇行頂部の位置は時間と共に下流方向へ移動したため、それに伴い、水が乗り上げる場所も時間とともに下流方向へ移動した。蛇行部では遠心力によって水位が上昇するため、この水位上昇部が主な高水敷への流れの流入部になった。一方、この高水敷へ乗り上げた流れは比較的護岸に沿って下流へ移動し、次の（下流側の）蛇行頂部の少し上流側にて、高水敷から低水路へと流れ落ちた。本実験では、高水敷の流れはほぼ全てこの場所に集中した。この落下する流れと低水路内の流れが合流する場所では、図-12に示すようにタイルの剥離が認められた。本実験では、このタイルの剥離と流れとの関係性まで示すことはできないものの、上述の音更川（数値計算にて対象とした地点付近）では護岸下部の浸食に伴う河岸崩壊のみでなく、護岸そのものの損傷が各所で認められており、今後、護岸の損傷箇所と河道内の地形に応答した流れ場の特徴との対応関係の比較に関する検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 永多朋紀、渡邊康玄、清水康行、井上卓也、船木淳悟：礫床河川における河道変化と植生動態に関する研究、水工学論文集、Vol.60, 1081-1086, 2016.
- 2) Iwasaki T., Shimizu Y., Kimura I.: Numerical simulation of bar and bank erosion in a vegetated floodplain: A case study in the Otofuke River, Advanced in Water Re-sources, Vol.93, pp.118-134, 2016.
- 3) 岡部和憲、久加朋子、清水康行、長谷川和義、新庄興、山口里実：流量低下時における河道変動の応答特性～十勝川水系音更川を事例として～、水工学論文集、Vol.74 (4), pp.1501-1506, 2018.
- 4) 岡部和憲、久加朋子、清水康行、長谷川和義、新庄興、山口里実：流量ハイドログラフ形状に対する蛇行流路の移動特性～十勝川水系音更川を事例として～、水工学論文集、Vol.74 (5), pp.1009-1014, 2018.
- 5) 桑村貴志：地形データを用いた河道変遷の調査、北海道開発局技術研究発表会論文集, 2013.
- 6) 北海道開発局：北海道地方における気候変動予測技術検討委員会最終とりまとめ資料, 2017.

大量アンサンブル気候データを用いた 大雨パターンの分類とその将来変化

星野 剛¹
Tsuyoshi HOSHINO

¹ 北海道大学大学院工学研究院 博士研究員

要 旨

大量アンサンブル気候データの膨大な降雨パターンをk-means法により分類し、リスク評価において考慮すべき降雨パターンを把握した。洪水の被害は流域平均降雨量だけでなく降雨の時空間的なパターンや事前の降雨量などにも依存するため、リスク評価には膨大な降雨パターンを考慮する必要があるが、これまでに経験した大雨のパターンは限定的である。これに対し、合計で数千年に及ぶ大量アンサンブルデータは様々な降雨の時空間分布や事前降雨のパターンを含むことから、流域平均降雨量だけでなく降雨の時空間分布等を踏まえた多角的な洪水リスクの評価に適している。本研究では音更川音更基準地点流域を対象にそれらの膨大な降雨事例のパターンを分類し、対象流域での大雨の特徴を把握した。また、気候変動が進行後の気候における降雨においても同様の分類を実施し、将来の気候において頻度が増加する可能性の高い降雨パターンを分析した。この結果、将来の気候においては時間的に集中的に降る大雨の頻度が増大することが明らかになった。これは、流量ピークの増大および流量の増減の勾配がより急になることを意味することから、河川管理においてピーク流量の増大および流量ハイドログラフの先鋭化を踏まえることが重要となることを示唆する結果である。

《キーワード：降雨パターン；音更川；d4PDF；k-means法；適応策》

1. はじめに

平成27年関東・東北豪雨、平成28年北海道・東北地方での豪雨、平成29年7月九州北部豪雨、平成30年7月西日本豪雨、令和元年東日本台風による豪雨など甚大な被害をもたらす豪雨が毎年のように発生しており、これまでの経験を上回る大雨に対する備えの重要性が顕在化している。国土交通省北海道開発局および北海道は2016年の北海道での豪雨災害を受けて専門家委員会¹⁾を設置し、「気候変動による将来の影響を科学的に予測し、具体的なリスク評価をもとに治水対策を講じるべき」との内容を取りまとめた。この内容を受けて国土交通省北海道開発局および北海道は「北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会」²⁾を設置し、気候予測データに基づき北海道地方における将来の洪水リスクを定量的に評価した。さらに国土交通省北海道開発局および北海道は令和元年度から「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会」³⁾を設置し、洪水リスク情報に基づく具体的な適応策の検討を開始している。また、国土交通省本省は平成30年度より「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」⁴⁾を設置し、日本全国を対象に気候変動による大雨の将来変化量を検討している。これらの専門家委員会においては過去に発生した大雨だけでなく、気候モデルにより作成された大量アンサンブル気候予測データに基づいて議論が進められている。このように今後の治水対策を考える上で、将来の洪水リスクの評価および適応策の検討において大量アンサンブルデータをいかに利用するかが極めて重要となっている。

前述の専門家委員会においては「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」(d4PDF)⁵⁾が用いられた。d4PDFは過去の気候や温暖化進行後の気候における数千年分の気候シミュレーションデータであり、洪水リスクの評価において気候システムの自由度がもたらす極端現象の生起確率を物理モデルを用いたモンテカルロ手法として推定可能とするものである。我が国ではこれまでの数十年間に渡る降雨観測から確率降雨等を基軸として治水計画が作られてきた。一方、降雨をもたらす気候システムの自由度は膨大な大きさを有しており、数十年間で各地域が経験した降雨イベントは限定的である。大量アンサンブルデータの使用は数十年間の観測に基づいて設定された確率雨量の振れ幅を推定可能とする⁶⁾。また、洪水の被害は降雨の時空間的なパターンや事前の降雨量などにも依存するが、大量アンサンブルデータ内には様々な降雨の時空間分布や事前降雨のパターンが含まれることから、流域平均降雨量だけでなく降雨の時空間分布等を踏まえた多角的な洪水リスクの評価が可能となる。このように大量アンサンブルデータの利用は洪水リスクの評価に新たな視点を追加しうるものである。

著者らはこれまでにd4PDFを水平解像度5kmへと力学的にダウンスケーリング(DDS)することで観測された大雨の特徴をよく表すことを明らかにしている⁶⁾。本研究では、まず、十勝川帶広基準地点流域(以降、十勝川流域)を対象に実施したDDSの降雨量が音更川音更基準地点流域(以降、音更川流域)での洪水リスクの評価に使用可能かを検証した。次に、音更川流域での流域平均降雨強度の時系列データをk-means法により分類した。また、気候変動後の降雨での分類結果と比較することで頻度が増加する降雨パターンを調べた。

2. 力学的ダウンスケーリングによる5km解像度の降雨データの作成

本研究ではd4PDF⁵⁾を使用した。d4PDFは約60km水平解像度のGlobal Climate Model (GCM) での結果 (d4PDF-60km) とそれを力学的ダウンスケーリングで日本周辺 (図-1) を対象に20km水平解像度にしたデータ (d4PDF-DS20) で構成される。d4PDFの実験は過去実験 (Past experiment; 50 ensemble members x 60 years (1951–2010)) と産業革命前から4°C全休平均気温が上昇自他気候条件である4°C上昇実験 (+4K experiment; 6つの海面水温パターン x 15 ensemble members x 60 years) で構成される。4°C上昇実験で使用された海面水温はCMIP5のRCP8.5シナリオに基づく6つのパターンで構成される。

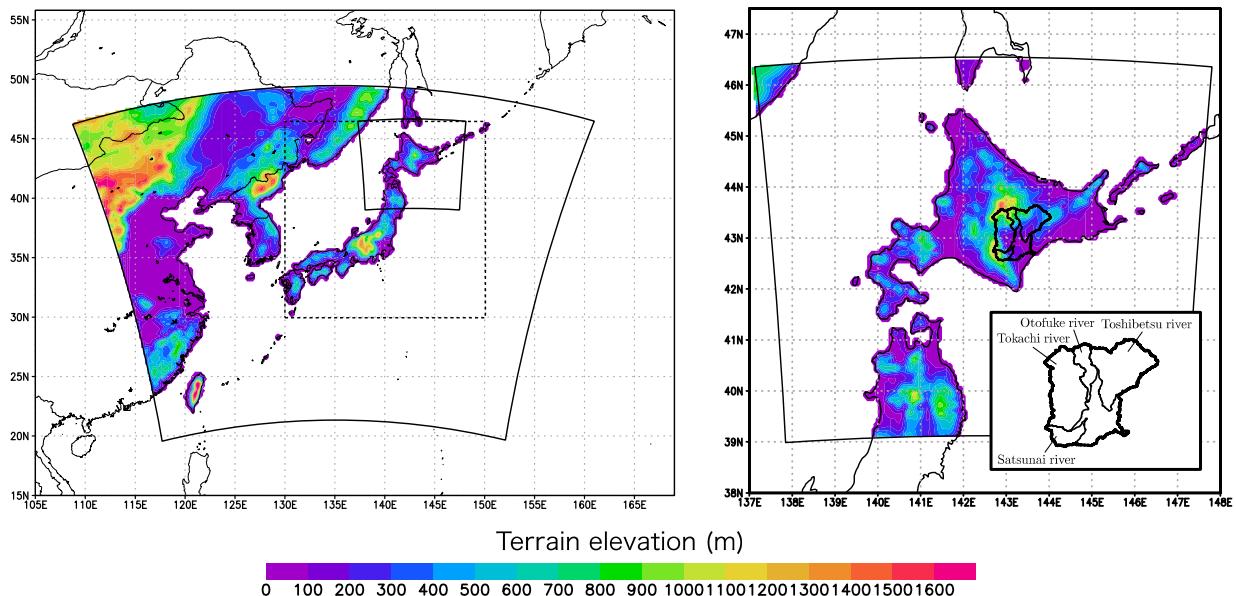


図-1 (左) 外側の実線はd4PDF-DS20の計算領域、内側の実線はd4PDF-DS5の計算領域を示す。点線はTCの検出領域を示す。(右) 太実線は十勝川流域全体を示し、内側の実線は対象とした支川流域（十勝川流域、音更川流域、札内川流域、利別川流域）を表す。外側の実線はd4PDF-DS5の計算領域を示す。色は力学的ダウンスケーリングにおける標高を示す。

支川流域の形状と地形形状を忠実に反映した降雨データを準備するため、本研究では力学的ダウンスケーリング (DDS) を実施し、d4PDF-DS20の年最大降雨イベントを5km水平解像度へと変換した。対象とした降雨イベントはd4PDF-DS20の各年での6/1から12/1までの十勝川流域での72時間累積降雨量が最大となるイベントとした（本研究ではこのイベントを年最大降雨イベントとした）。DDSにはd4PDF-DS20の作成に用いられた非静力学地域気候モデルNHRCM⁷⁾を用いた。対象領域は北海道周辺の800x800 km の範囲とした（図-1）。計算格子点数は水平方向に161x161、鉛直方向に50層とした。雲微物理スキームや地表面スキーム、境界層スキームなどの物理スキームはKawase et al., 2018⁸⁾と同一とした。ただし、本研究では標高にグリッド平均値を用いたが、Kawase et al., 2018⁸⁾はenvelope-type mountainsを用いた。また、d4PDF-DS20を初期値と境界値の条件に使用した。DDSの対象期間は各年の年最大降雨72時間降雨イベントを含む15日間とした。DDSは過去実験の3000イベントと4°C上昇実験の5400イベントを対象とした。なお、本研究では助走期間として15日間のはじめの5日間を除いた10日間を対象期間として、この10日間から最大の72時間降雨量を各支川流域から抽出した。DDSの対象は十勝川流域での年最大72時間降雨イベントであるが、この対象期間（10日間）には音更川音更基準地点流域、札内川南帶橋基準地点流域、利別川利別基準地点流域（それぞれ以降では音更川流域、札内川流域、利別川流域）でも大雨を含むことを確認した。図-2に観測値（1951–2010）から抽出した各支川流域での最大72時間降雨量と十勝川流域と各支川流域での発生日の違いを示す。この図より、ほとんどの大雨

ベント（少なくとも90パーセンタイル以上の降雨イベント）の発生日の相違が1日以下であることがわかる。ここからd4PDF-DS5は他の3つの支川流域でも大雨の評価が可能であることがわかる。

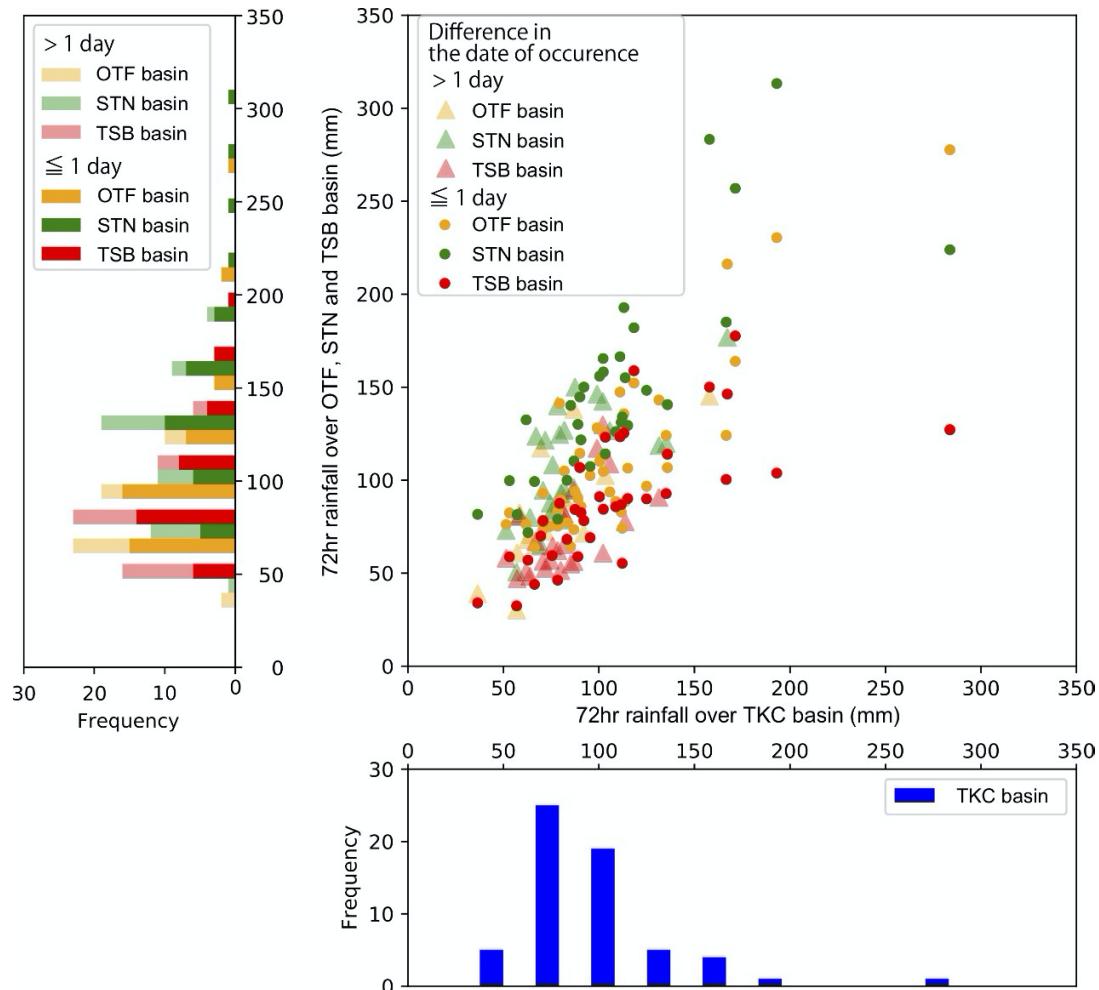


図-2 各支川流域での年最大72時間降雨量と十勝川流域とその他の支川流域での発生時間の差（1951-2010の観測値）。右上：十勝川流域での降雨量とその他の流域での降雨量の散布図、左上：音更川流域、札内川流域、利別川流域での年最大72時間降雨量の頻度分布（塗りつぶしは十勝川流域での発生日時の差が1日以内の事例数）。右下：十勝川流域での年最大72時間降雨量の頻度分布。

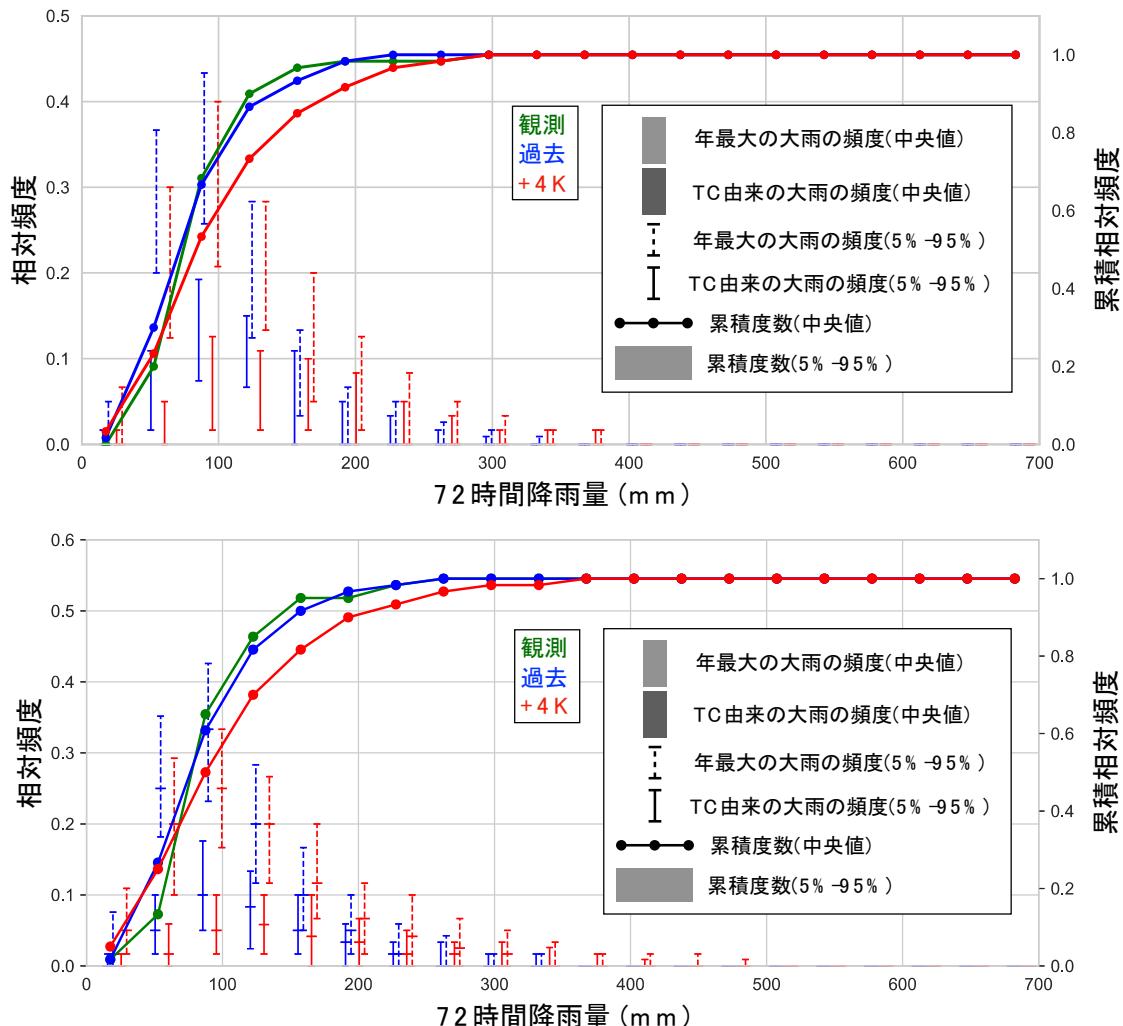


図-3 DDS実施後の降雨量の頻度分布（上：十勝川流域、下：音更川流域）

本研究では各支川流域での72時間年最大降雨イベントの発生期間中に熱帯低気圧が日本周辺域（図-1、点線）に存在した場合をTC由来降雨イベント、それ以外の降雨イベントを非TC由来降雨イベントとした。本研究ではd4PDF-60kmから作成されたTC経路データ（Yoshida et al., 2017⁹⁾）を使用した。トラッキングアルゴリズムはMurakami et al. (2011)¹⁰⁾に基づいている。比較対象にはRSMC best trackデータを用いた。

図-3に十勝川流域と音更川流域における観測値、d4PDF-DS5の過去実験、4°C上昇実験の年最大降雨量の頻度分布を示す。同図にはTC由来の大気を割合も頻度分布に示す。また、アンサンブルメンバー間での5-95パーセンタイル値も同時に示す。同図より、両流域ともに観測値は概ねd4PDF-DS5過去実験の5-95パーセンタイル値の幅に位置しており、DDSは妥当な年最大降雨量を計算していることがわかる。また、4°C上昇実験では両流域ともに年最大降雨量が増大することがわかる。図-4に各支川流域でのTC由来イベントと非TC由来イベントの90パーセンタイル値を示す。この図よりいずれの支川流域でもTC由来イベントで大きく、降雨量は支川流域ごとに異なることがわかる。観測値より、最も降雨量の大きい流域（札内川流域）と最も小さい流域（利別川流域）ではTC由来イベントで80 mm/72 h、非TC由来イベントで50 mm/72 hの相違がある。また、観測値はd4PDF-DS5の過去実験の値と近く、アンサンブルメンバー内の5から95パーセンタイル値の間に位置することから、d4PDF-DS5は降雨を議論するのに十分な再現性を有していると考えられる。

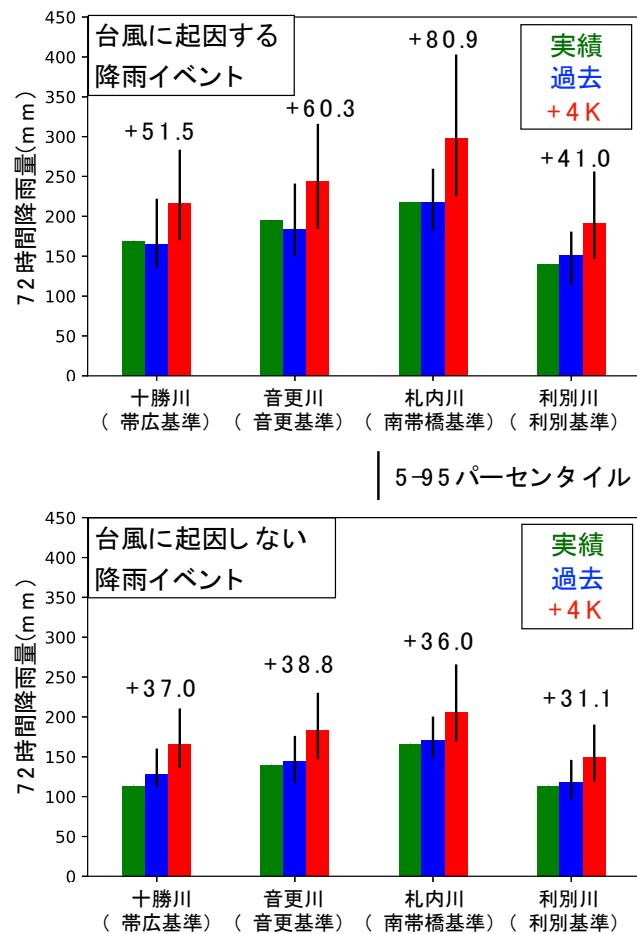


図-4 年最大72時間降雨量の90パーセンタイル値. 棒グラフは中央値を示し, エラーバーはアンサンブルメンバー間での5から95パーセンタイル値を示す. (上図) TC由来降雨イベント, (下図) 非TC由来降雨イベント.

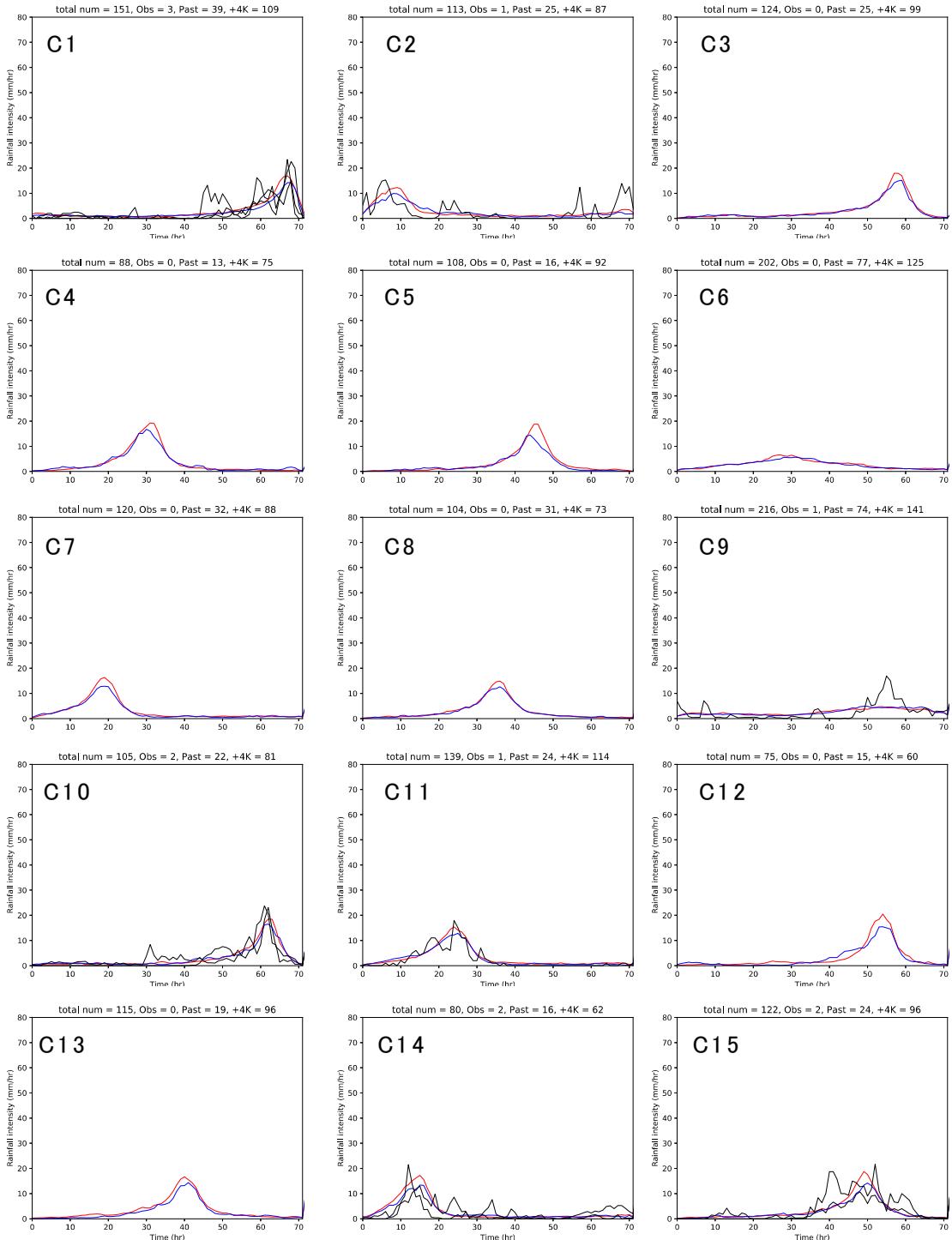


図-5 分類された年最大降雨イベントのハイエトグラフ（灰色はd4PDF-DS5、黒実線は観測結果、青実線はd4PDF-DS5の過去実験の平均値、赤実線はd4PDF-DS5の4°C上昇実験の平均値）

3. k-means法による降雨パターンの分類

本研究では音更川流域での年最大72時間降雨イベントをk-means法¹¹⁾を用いて、15パターンに分類した。k-means法とは、非階層クラスタリング分析の一種である。非階層クラスタリング分析とは異なる性質のものが混ざり合った集団から互いに似た性質のものを集め、クラスターを作る方法であり、階層クラスター分析と異なり、階層的な構造を持たず、あらかじめいくつのクラスターに分けるかを決め、その数に分割する。K-means法のアルゴリズムは、まず分割したいクラスター数と同数の重心の初期値を決める。次に各データと重心との距離を計算し、最も近い重心をそのデータの属するクラスターの重

心とする。その後、各クラスターの新たな重心を求める。再び各データと重心の距離を計算し、データを最も近い重心のクラスターに結びつけ、クラスターごとの重心を求める。これを重心が動かなくなるまで繰り返す。

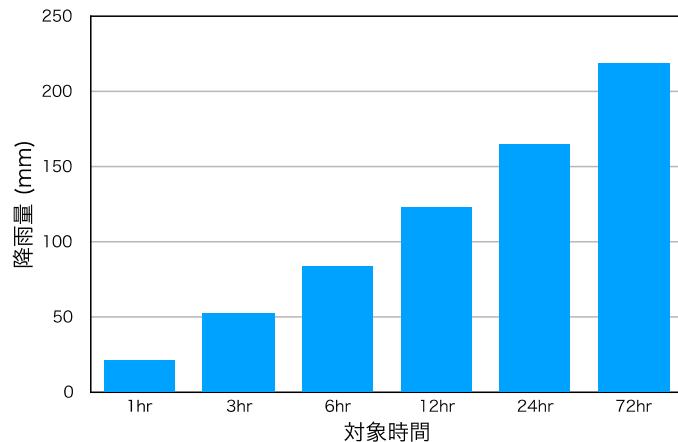


図-6 分類された年最大降雨イベントのハイエトグラフ（灰色はd4PDF-DS5、黒実線は観測結果、青実線はd4PDF-DS5の過去実験の平均値、赤実線はd4PDF-DS5の4°C上昇実験の平均値）

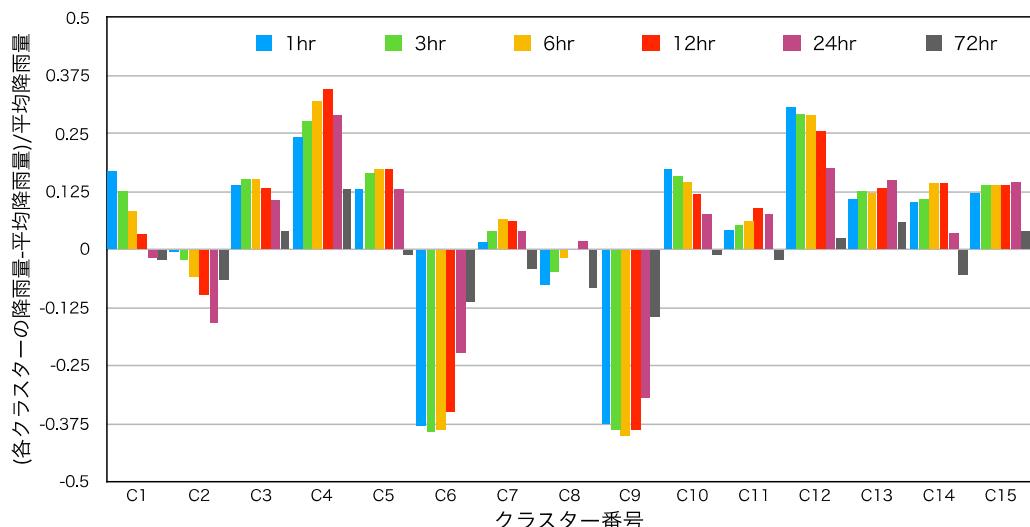


図-7 各クラスターの平均降雨量からの差

音更川流域の年最大72時間降雨イベントをk-means法により15パターンに分類した。入力データは72時間分の流域平均1時間降雨強度とし、降雨の時間分布を分類した。対象とした降雨イベントはある程度降雨量の大きいイベントを対象とするため、150 mm/72 hrを上回る降雨イベントとした。この条件を満たす観測値は1976年から2018年の間に12事例存在する（なお、2016年は大きな72時間降雨イベントが2事例存在していることから2016年のみ2事例（台風9号と台風10号による降雨）を採用した）。過去実験は452事例、4°C上昇実験は1398事例存在する。

図-5に分類された15事例のハイエトグラフを示す。同図より、鋭い降雨ピークを持たず、弱い雨が継続するクラスター（C6, C9）や降雨ピークの前に事前降雨があり、その後鋭い降雨ピークを持つクラスター（C1, C3, C10）などに分かれていることが確認できる。2016年の台風10号による大雨はC10に含まれており、大雨イベントの中でも降雨のピークの鋭いイベントであったことがわかった。各クラスターの降雨の特徴を定量的に評価するために各対象時間での最大降雨量を算出した。全降雨イベントから得

られた結果を図-6に示す。また、各クラスターの平均降雨量の全体での平均値からの差を図-7に示す。図-7よりC6, C9は短時間の降雨量が少ないことがわかる。また、C4, C12は1から24時間のいずれの降雨量も卓越していることから、ピーク流量が大きくなりやすい降雨パターンではないかと考えられる。

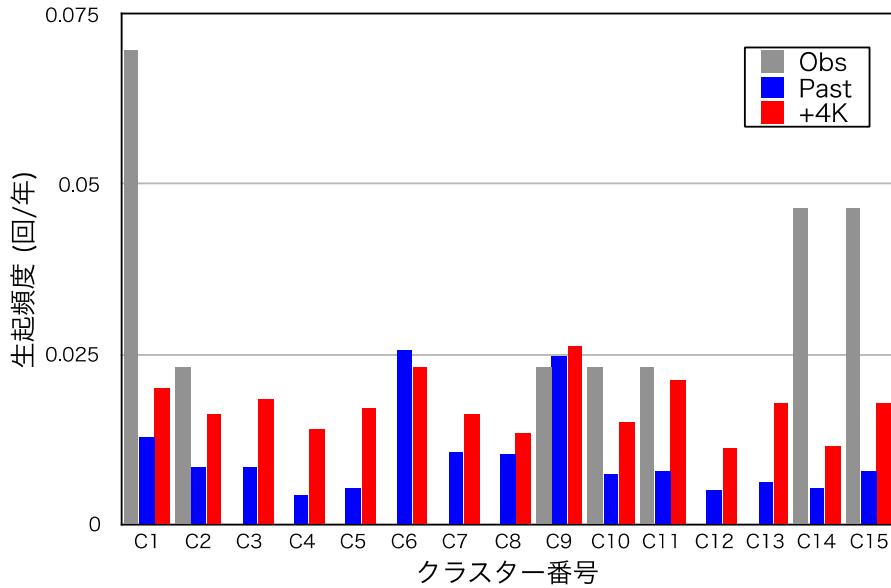


図-8 各クラスターの生起頻度

図-8に各クラスターの1年間での発生確率を示す。同図より、観測値にはC4, C12といった波形の鋭い降雨パターンが含まれておらず、洪水リスクを議論するのに十分なサンプル数がないことがわかる。d4PDF-DS5の過去気候と4°C上昇実験における150mm/72hrを上回る年最大降雨の発生頻度はそれぞれ0.15回/年、0.26回/年であり、1.7倍程度の頻度の増大を示す。図-8より、各降雨パターンの頻度の変化に着目すると、C6, C9といった短時間の降雨量が小さく、弱い雨が続くなどの降雨の集中度が弱い事例の頻度はほとんど変わらないことがわかる。これは将来の気候においては比較的弱い雨が続くことによる72時間の大雨のリスクは変わらず、時間的に集中的な降雨の頻度が顕著に増大することを示す結果であり、今後はそのような集中度が高く、洪水ピーク流量が大きくなりやすく、流量の上昇・下降速度の早いイベントに対する対策が重要となることを示す結果である。

5.まとめ

大量アンサンブル気候予測データ (d4PDF) を5km解像度に力学的ダウンスケーリングを実施し、音更川流域における年最大72時間降雨量の降雨パターンを把握した。k-means法により分類した結果、降雨の時空間的な集中度を反映した分類が実現した。温暖化進行後の降雨では降雨ピークが鋭い時間的に集中した降雨の頻度が増大することがわかり、降雨量の増大だけでなく降雨パターンの変化にも着目する必要が示された。このような降雨のパターンは河岸浸食リスクにも影響することが予想されることから、分類された降雨パターンそれぞれにおけるリスク評価を実施することで被害シナリオの分析や効果的な対策などに貢献できると考えられる。

参考文献

- 1) 平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会, ”平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方”, 2017.
- 2) 北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会, 2018.
- 3) 北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会, 2019.
- 4) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会, 2019.
- 5) Mizuta, R., and Coauthors, “Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models”, *Bull.Am.Meteorol.Soc.*, pp.1383–1393, 2016.
- 6) 山田朋人ら, “北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化”, 河川技術論文集, 第24巻, 391–396, 2018.
- 7) Sasaki, H., Murada, A., Hanafusa, M., Oh'izumi, M. and Kurihara, K., “Reproducibility of Present Climate in a Non-Hydrostatic Regional Climate Model Nested within an Atmosphere General Circulation Model”, *SOLA*, 7, 173–176, 2011.
- 8) Kawase, H.; Sasai, T.; Yamazaki, T.; Ito, R.; Dairaku, K.; Sugimoto, S.; Sasaki, H.; Murata, A.; Nosaka, M. Characteristics of Synoptic Conditions for Heavy Snowfall in Western to Northeastern Japan Analyzed by the 5-Km Regional Climate Ensemble Experiments. *J.Meteorol.Soc.Japan.Ser.II*, 96 (2), 161–178, 2018.
- 9) Murakami, H.; Mizuta, R.; Shindo, E. Future Changes in Tropical Cyclone Activity Projected by Multi-Physics and Multi-SST Ensemble Experiments Using the 60-Km-Mesh MRI-AGCM. *Clim.Dyn.*, 39 (9–10), 2569–2584, 2012.
- 10) Y.; Yoshida, K.; Aoyagi, T.; Kawase, H.; Mori, M.; Okada, Y.; Shimura, T.; Nagatomo, T.; Ikeda, M.; Endo, H.; Nosaka, M.; Arai, M.; Takahashi, C.; Tanaka, K.; Takemi, T.; Tachikawa, Y.; Temur, K.; Kamae, Y.; Watanabe, M.; Sasaki, H.; Kitoh, A.; Takayabu, I.; Nakakita, E.; Kimoto, M. Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-Km Global and 20-Km Regional Atmospheric Models. *Bull. Am.Meteorol.Soc.*, 98 (7), 1383–1398, 2017.
- 11) Fabian Pedregosa, Gael Varoquaux, Alexandre Gramfort, Vincent Michel, Bertrand Thirion, Olivier Grisel, Mathieu Blondel, Peter Prettenhofer, Ron Weiss, Vincent Dubourg, et al. Scikit-learn: Machine learning in python. *Journal of machine learning research*, Vol.12, No.Oct, pp.2825– 2830, 2011.