河川技術論文集，第25巻, 2019年6月

実河川流域における 大量アンサンブル気候予測データに基づく 将来気候下での降雨の時空間分布について

CHARACTERISTICS OF RANFALL DISTRIBUTION BASED ON A MASSIVE ENSEMBLE CLIMATE PROJECTIONS IN TOKACHI RIVER BASIN

舛屋繁和[1]・植村郁彦[2]・吉田隆年[1]・大村宣明[1]・千葉学[3]・戸村翔[3]・山本太郎[3]
岡部博一[4]・佐々木博文[4]・小林彩佳[4]・大屋祐太[5]・星野剛[6]・山田朋人[7]
Shigekazu MASUYA, Fumihiko UEMURA, Takatoshi YOSHIDA, Noriaki OOMURA, Manabu CHIBA, Sho TOMURA, Taro YAMAMOTO, Hirokazu OKABE, Hirofumi SASAKI, Ayaka KOBAYASHI, Yuta OOYA, Tsuyoshi HOSHINO, Tomohito YAMADA

[1]（株）ドーコン　水工事業本部　河川部（〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1）
[2]（株）ドーコン　水工事業本部　河川環境部（〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1）
[3]一般財団法人　北海道河川財団　企画部（〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目5-1　伊藤110ビル）
[4]国土交通省北海道開発局　建設部　河川計画課（〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目）
[5]北海道大学大学院工学研究院　修士課程（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）
[6]北海道大学大学院工学研究院　博士研究員（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）
[7]北海道大学大学院工学研究院　准教授　（〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目）

Recently, major disasters which seem to be the influence of climate change frequently occur in our country. Therefore, it is an urgent task to develop a flood control plan that takes into consideration the impact of climate change. In this study, we showed the relationship between rainfall distribution and river discharge from output rainfall of climate model using d4PDF which is massive ensemble climate prediction data.

Key Words : *Climate change, rainfall distribution, massive ensemble climate prediction data*

1．はじめに

「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[1)]」において，気候変動を考慮した治水計画の必要性が提言された．気候変動を考慮した治水計画の立案には，将来気候下における降雨量と降雨の時空間分布が必要となる．著者らは，d4PDF[2)]（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）を用いて，十勝川流域および常呂川流域においてRCP8.5シナリオに基づく将来気候下での不確実性を考慮した確率雨量の算定により，将来気候下での計画規模降雨の算定を行ってきた[3)4)]．しかしながら，これらの研究では将来気候下における降雨の時空間分布については考慮されていない．

湧川ら[5)]は，実績降雨を基にしたDAD(Depth-Area-Duration)特性を用いて，現在気候下における可能最大降水量を算定している．また，山田ら[6)]は，気候変動下では降雨の時空間特性が変化することを示唆しており，星野ら[7)]は，将来気候下においては降雨が局所的短時間に集中することを示している．

気候変動を考慮した治水計画の立案にあたっては，既往研究で示された降雨の時空間分布特性の変化が，河川流量に与える影響を把握する必要がある．本研究は，降雨の時空間的な局所化の詳細な特徴について，河川流量に与える影響を含めて明らかにするものである．

2．対象流域と使用データ

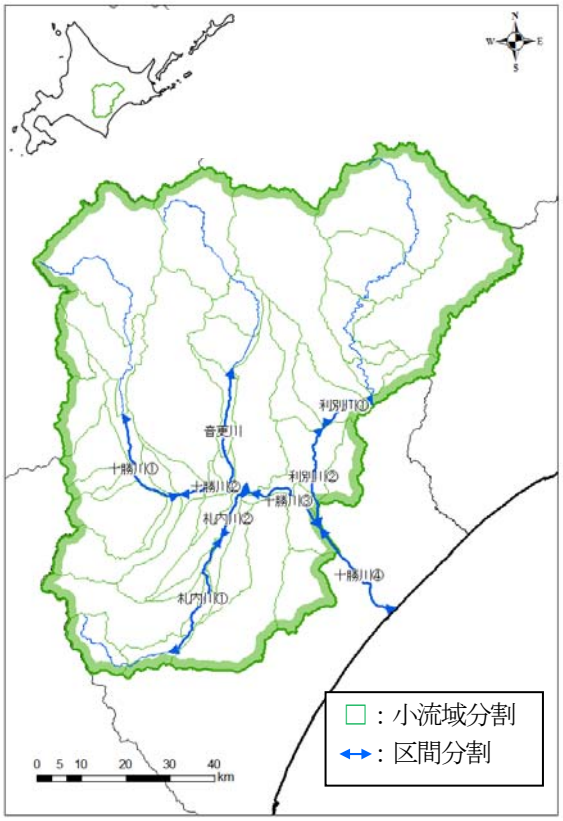


図-1 十勝川流域図

(1) 十勝川流域の概要

対象とした十勝川流域は，北海道を縦断する日高山脈の東部に位置する流域面積9010km^{2}の一級水系である．札内川や音更川，利別川等の支川が流入し，その流域は，地形等の特徴から42の小流域に分割される(図-1)．流域内には，十勝ダムおよび札内川ダム，佐幌ダムが位置し，出水時には洪水調節が行われている．

十勝川流域では，これまで昭和37年洪水や昭和56年洪水で大きな被害が発生しており，近年においても平成28年8月洪水において大きな被害が発生している．

(2) 使用した雨量データ

本研究では，d4PDFの領域実験結果(水平解像度20km)から得られる十勝川帯広地点における年最大流域平均72h雨量発生期間を対象に，北海道領域を水平解像度20kmから5kmに力学的ダウンスケーリングした過去実験60年×50メンバ，4℃上昇実験60年×6海面水温パターン×15メンバの降雨データ[7]を使用した．

なお，IPCC第5次報告書(AR5)では，RCP2.6-8.5の4つの気候変動シナリオが示されており，4℃上昇実験は想定される最悪シナリオであるRCP8.5シナリオに基づく気候予測データである．

3．降雨の空間分布と河川流量の関係

(1) クラスター分析による降雨の空間分布の分類

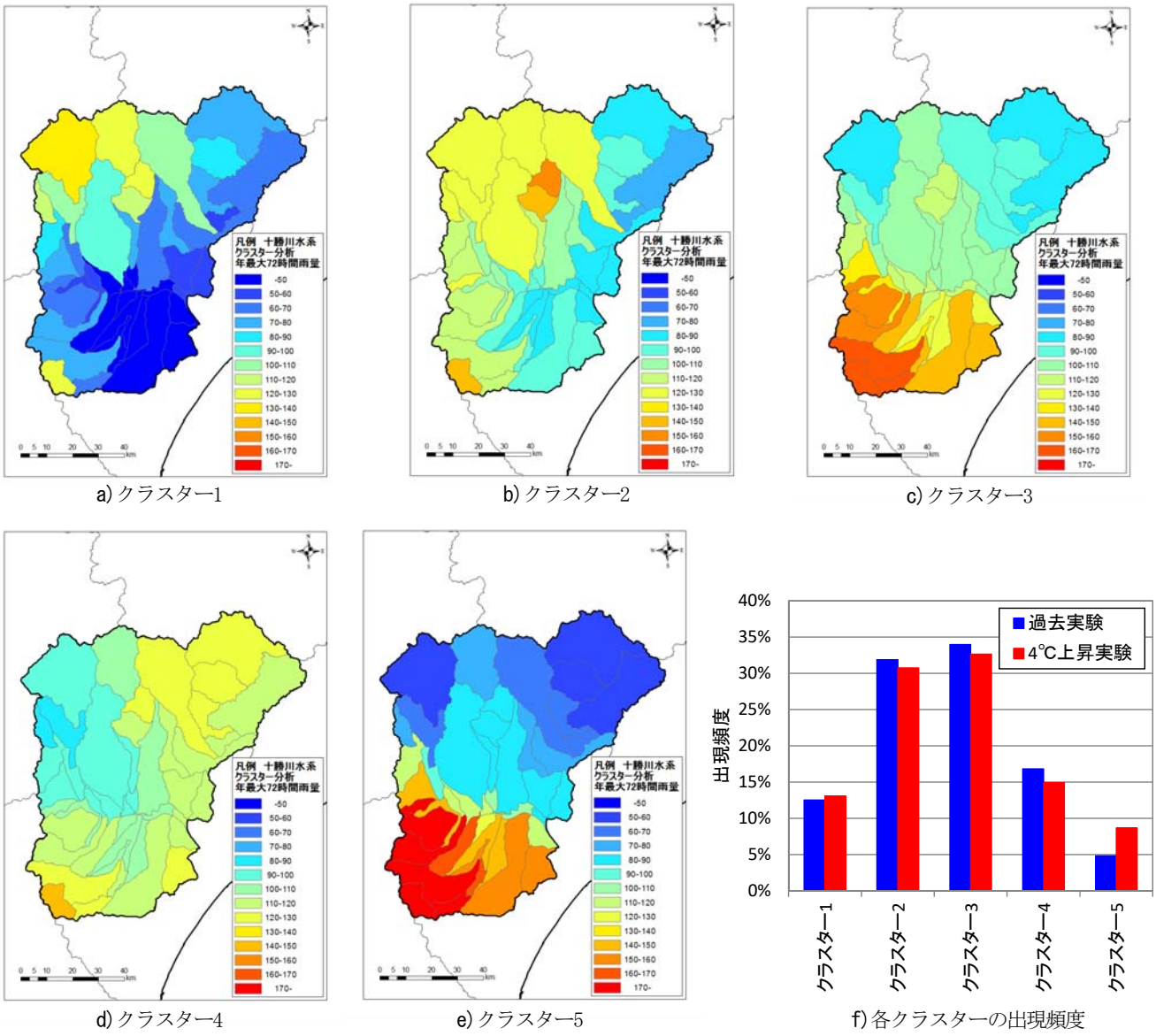
過去実験60年×50メンバ，4℃上昇実験60年×6海面水温パターン×15メンバの十勝川帯広地点年最大流域平均72h雨量イベントを対象に，図-1に示した小流域毎に流域平均72h雨量を算出した．総雨量の大きさの影響を除いて降雨の空間分布を分類するため，次式で流域全体の総雨量に対する各小流域の寄与率を算出した．

$$x_i = \frac{R_i A_i}{\sum_{i=1}^{n} R_i A_i} \qquad (1)$$

ここに，x：流域総雨量に対する寄与率，R：流域平均72h雨量(mm)，A：流域面積(km^2)，添字i：流域番号，n：小流域数(42流域)である．(1)式で求めた42の各小流域の流域総雨量に対する寄与率(以下，指標)を用いて，クラスター分析により過去実験60年×50メンバ，4℃上昇実験60年×6海面水温パターン×15メンバの年最大流域平均72h雨量イベントにおける降雨の空間分布を分類した．分析手法は，樹形図でクラスターの形成状態を確認できる階層的方法とし，階層的方法の中でも安定した解が得られることから比較的よく用いられるウォード法を用いた．また，指標の類似度判定にはユークリッド距離を用いた．

小流域毎に，各クラスターに含まれるアンサンブルメンバの72h雨量を平均したものを図-2 a)～e)に，各クラスターの出現頻度を図-2 f)に示す．クラスター1は，流域北西部に降雨が集中するパターンである．過去実験では約13%(376/3000メンバ)，4℃上昇実験では約13%(706/5400メンバ)が該当し，過去実験と4℃上昇実験で発生頻度は同程度である．クラスター2は，流域北部と流域西部の日高山脈沿いに降雨が広く分布するパターンである．過去実験では約32%(956/3000メンバ)，4℃上昇実験では約31%(1660/5400メンバ)が該当し，過去実験と比較して4℃上昇実験では減少傾向にある．クラスター3は，流域全体に降雨が広く分布し，その中でも流域南西部に降雨が集中するパターンである．過去実験では約34%(1019/3000メンバ)，4℃上昇実験では約33%(1762/5400メンバ)が該当し，過去実験と比較して4℃上昇実験では減少傾向にある．クラスター4は，北西部を除く流域全体に降雨が広く分布するパターンである．過去実験では約17%(504/3000メンバ)，4℃上昇実験では約15%(805/5400メンバ)が該当し，過去実験と比較して4℃上昇実験では減少傾向にある．クラスター5は，流域南西部に降雨が極端に集中する降雨パターンである．過去実験では約5%(145/3000メンバ)，4℃上昇実験では約9%(467/5400メンバ)が該当し，過去実験と比較して4℃上昇実験では増加傾向にある．

クラスター分析の結果，降雨が広く分布する傾向にある降雨の空間分布の出現頻度は4℃上昇実験では過去実験と比較して減少傾向にあり，流域南西部に降雨が極端



a) クラスター1　b) クラスター2　c) クラスター3

d) クラスター4　e) クラスター5　f) 各クラスターの出現頻度

図-2 各クラスターに含まれるアンサンブルメンバの72時間雨量の平均値と出現頻度

に集中する降雨の空間分布の発生頻度が増加する傾向が確認された.

(2) 降雨の空間分布と河川流量の関係

木村の貯留関数法[8]により，過去実験60年×50メンバ，4℃上昇実験60年×6海面水温パターン×15メンバの年最大雨量を対象に流出計算を実施し，ピーク流量を算出した．次に，十勝川および音更川，札内川，利別川において，前述のクラスター分類ごとに，4℃上昇実験におけるピーク流量の99%タイル値の過去実験からの変化倍率(以下，4℃上昇後ピーク流量倍率)を算出した(**図-3**)．なお，流出計算の実施にあたっては，人為的な河川流量の変化を除くため洪水調節施設が建設されていない状態を想定し，支川の流入状況を考慮して十勝川を4区間，札内川を2区間，利別川を2区間に分割して4℃上昇後ピーク流量倍率を算出した．また，ピーク流量の99%タイル値の算出にあたっては，区間毎にd4PDF領域実験において区間上流域の年最大流域平均72h雨量が発生している期間を抽出し，5kmダウンスケーリング期間が年最大流域平均72h雨量発生期間と合致するメンバのみを対象とすることにより，各区間の年最大流域平均72h雨量イベントによるピーク流量の99%タイル値となるように算出した.

全クラスターのピーク流量の99%タイル値では，札内川①区間および②区間の4℃上昇後ピーク流量倍率が約2.0倍となっており，その他の区間では4℃上昇後ピーク流量倍率が約1.5倍～1.7倍程度となっている．クラスター1では，全ての区間で概ね同程度の4℃上昇後ピーク流量倍率となっており，その倍率は約1.4倍～1.6倍程度である．クラスター2では，利別川①区間および②区間の4℃上昇後ピーク流量倍率が約1.9倍となっている．また，札内川①区間の4℃上昇後ピーク流量倍率が約1.8倍，十勝川③区間および十勝川④区間，音更川，札内川②区間が約1.6倍～1.7倍，十勝川①区間および十勝川②区間

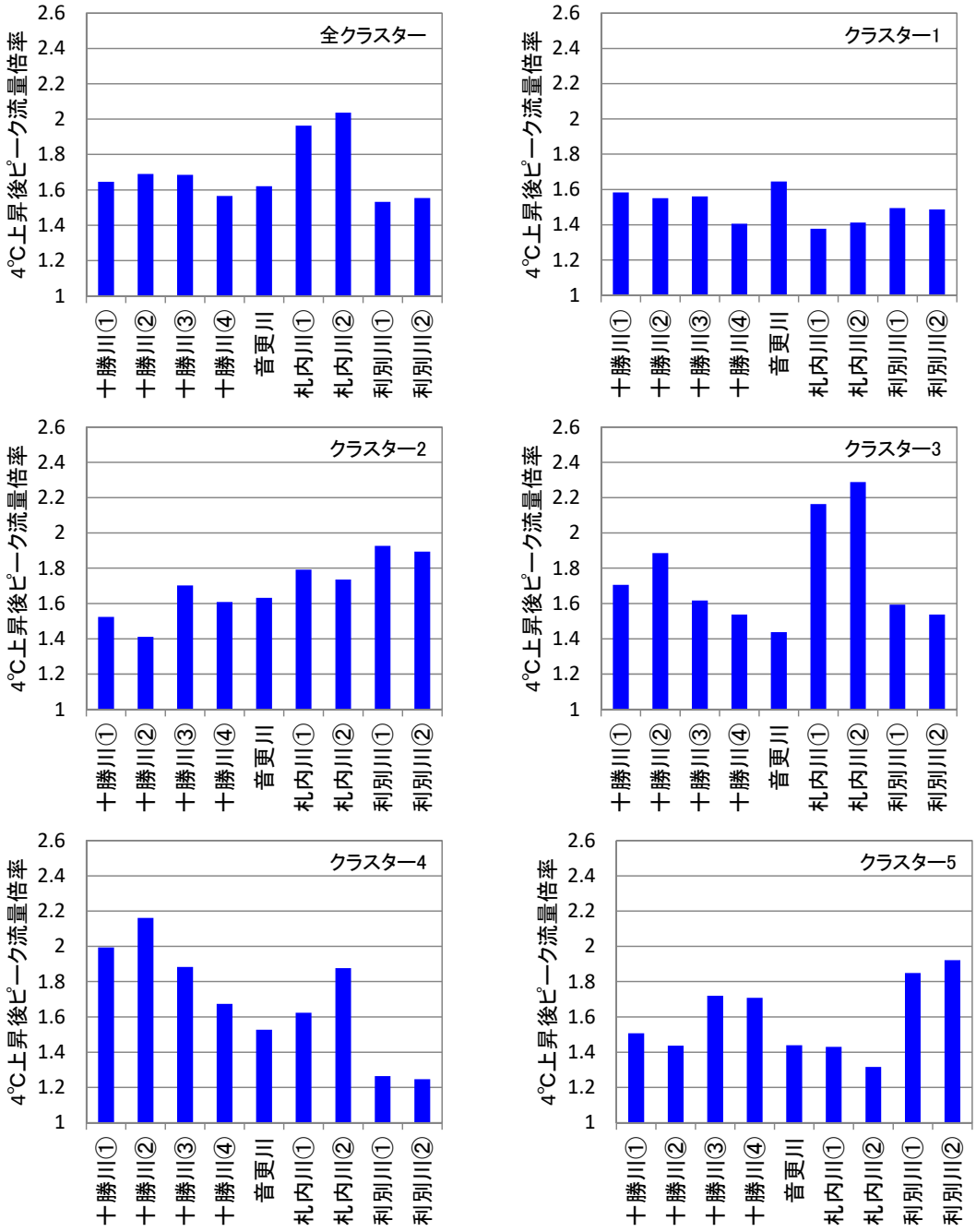
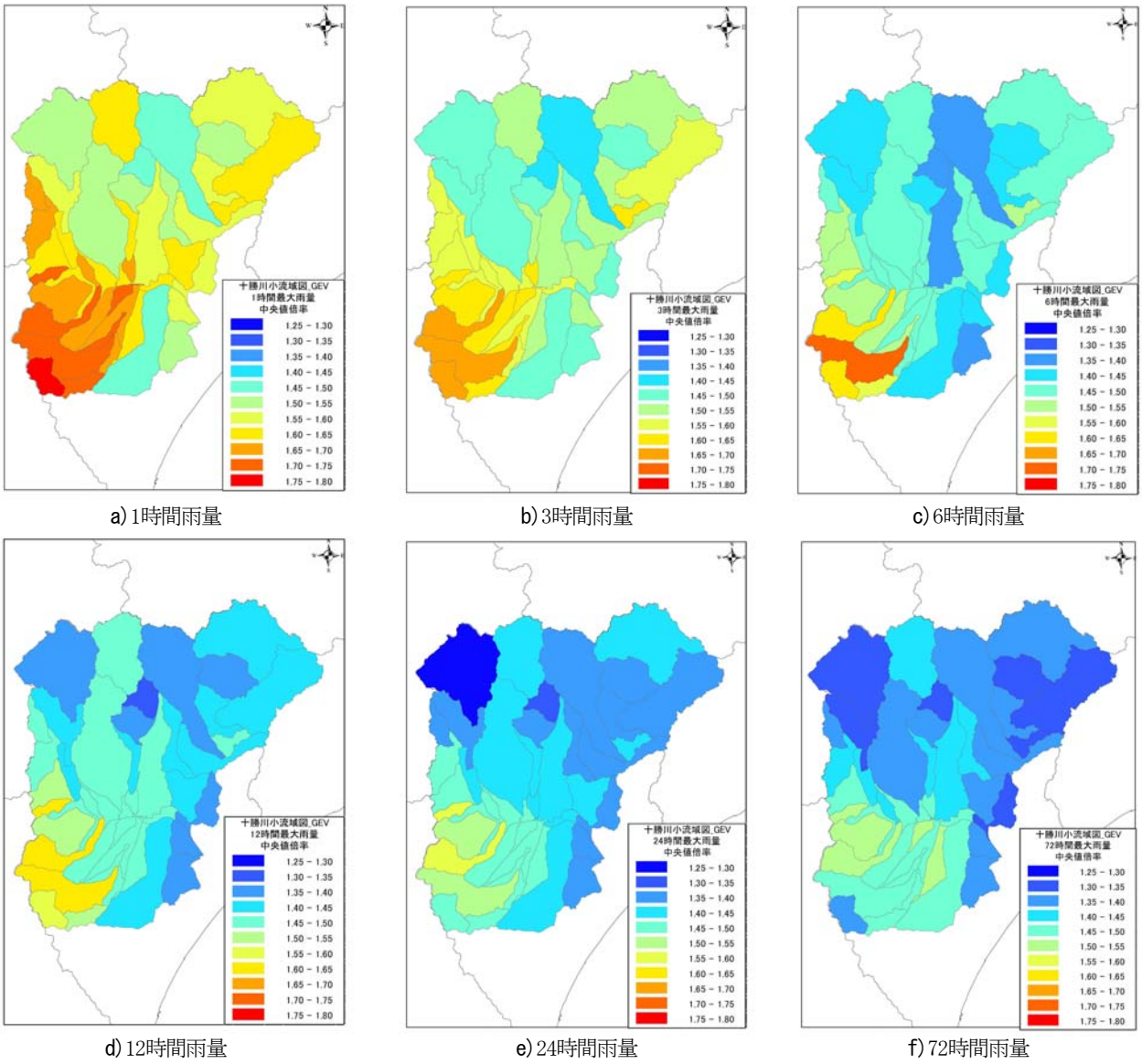


図-3 降雨空間分布と4℃上昇後ピーク流量倍率の関係

が約1.4倍～1.5倍となっている．クラスター2の降雨の空間分布では，利別川で4℃上昇後ピーク流量倍率が高くなる傾向にある一方で，十勝川①区間および②区間では他の区間と比較して4℃上昇後ピーク流量倍率が低くなっている．クラスター3では，札内川の4℃上昇後ピーク流量倍率が他の区間と比較して突出して高い傾向にあり，札内川①区間で約2.2倍，札内川②区間で約2.3倍となっている．また，十勝川②区間で約1.9倍，十勝川①区間で約1.7倍と4℃上昇後ピーク流量倍率が比較的高い傾向にある．その他の区間については，4℃上昇後ピーク流量倍率は約1.4倍～1.6倍となっている．クラスター4では，十勝川上流部の4℃上昇後ピーク流量倍率が高い傾向にあり，十勝川②区間では4℃上昇後ピーク流量倍率が約2.2倍，十勝川①区間で約2.0倍，十勝川③区間で約1.9倍である．また，札内川②区間でも4℃上昇後ピーク流量倍率が1.8倍と高い傾向にある．一方で，利別川①区間および利別川②区間では4℃上昇後ピーク流量倍率が約1.3倍となっており，他の区間と比較して4℃上昇後ピーク流量倍率が低い傾向にある．クラスター5では，利別川の4℃上昇後ピーク流量倍率が他の区間と比較して高い傾向にあり，利別川①区間で約1.8倍，利別川②区間で約1.9倍となっている．また，十勝川③区間および十勝川④区間においても約1.7倍と高い傾向にある．一方で，札内川②区間は4℃上昇後ピーク流量倍率が約1.3倍となっており，他の区間と比較して4℃上昇後ピーク流量倍率が低い傾向にある．



a) 1時間雨量　b) 3時間雨量　c) 6時間雨量

d) 12時間雨量　e) 24時間雨量　f) 72時間雨量

図-4 1/150確率雨量の4℃上昇後雨量倍率

4℃上昇後ピーク流量倍率は，降雨が集中している地域以外でも高くなる場合や，降雨が集中している地域でも低くなる場合がある．たとえば，クラスター5では，流域南西部に降雨が極端に集中しているにもかかわらず，札内川の4℃上昇後ピーク流量倍率が他のクラスターと比較して低い傾向にある．これは，クラスター5では過去実験においても流域南西部に降雨が集中していることから札内川のピーク流量が大きく，4℃上昇後ピーク流量倍率が低く算出されるためである．これらの結果は，降雨が集中している地域と4℃上昇後ピーク流量倍率が大きくなる区間が必ずしも一致しないことを示しており，降雨の空間分布が異なると，4℃上昇後ピーク流量倍率が大きくなる区間が異なることを示している．

以上の結果から，気候変動下における治水計画の立案にあたっては，支川単位で計画の対象とする降雨パターンを変える等，複数の降雨パターンを考慮した計画とする必要があると考えられる．

4．降雨の時間分布と河川流量の関係

過去実験60年×50メンバ，4℃上昇実験60年×6海面水温パターン×15メンバの十勝川帯広地点年最大流域平均72h雨量イベントを対象に，小流域毎にイベント内で最大となる1h雨量，3h雨量，6h雨量，12h雨量，24h雨量，72h雨量を算出した．算出した各時間雨量を用いて，著者らが既往研究において提案した不確実性を考慮した確率雨量[2)]を小流域毎時間雨量毎に算出し，各小流域における各時間雨量の4℃上昇実験1/150確率雨量中央値の過去実験に対する倍率(以下，4℃上昇後雨量倍率)を算出した．なお，不確実性を考慮した確率雨量の算出にあたっては，各小流域においても年最大雨量のみが標本となるよう，小流域毎にd4PDF領域実験において年最大雨量が発生している期間を抽出し，5kmダウンスケーリング期間が年最大雨量発生期間と合致するメンバのみを確

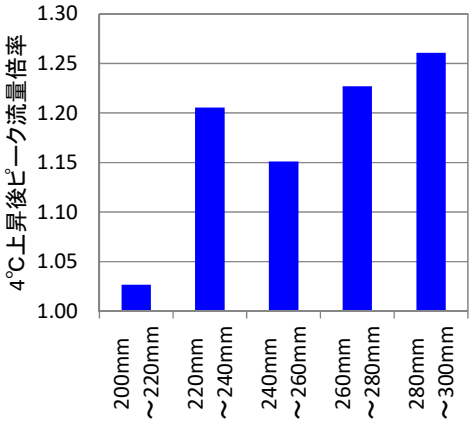


図-5 各72h雨量レンジの4℃上昇後ピーク流量倍率

率評価の標本とした．また，確率評価にはGEV分布を用いている．

各小流域の4℃上昇後雨量倍率を，**図-4**に示す．いずれの小流域においても，短時間雨量になるほど4℃上昇後雨量倍率が大きくなる傾向にある．また，小流域ごとに4℃上昇後雨量倍率が異なっており，いずれの時間雨量でも，流域南西部において4℃上昇後雨量倍率が他の地域よりも大きくなる傾向にある．特に，1h雨量では4℃上昇後雨量倍率が1.7倍を超える小流域が存在する．

一般に，短時間雨量が大きくなるとピーク流量が大きくなる傾向にある．そこで，現在気候下と将来気候下での同一規模降雨で発生するピーク流量の違いを評価するため，流域南西部に位置する札内川を対象に，72h雨量200mm～300mmで算出される過去実験284メンバ，4℃上昇実験849メンバのピーク流量を，72h雨量20mm毎の範囲で整理し，97.5%タイル値の4℃上昇後ピーク流量倍率を算出した(**図-5**)．72h雨量が200mm～220mmの範囲では，97.5%タイル値の4℃上昇後ピーク流量倍率は小さい．しかし，72h雨量が大きくなるにつれて97.5%タイル値の4℃上昇後ピーク流量倍率も大きくなる傾向にある．

以上の結果は，4℃上昇後雨量倍率は同一流域内であっても地域によって異なること，短時間雨量ほど4℃上昇後雨量倍率が大きくなる傾向にあり，同一規模の72h雨量であっても，4℃上昇後はピーク流量が大きくなる可能性があることを示している．そのため，気候変動を考慮した治水計画の立案にあたっては，現在の治水計画で用いられている実績降雨の単純引き延ばしではなく，例えばd4PDFから得られる4℃上昇後の降雨パターンを引き延ばさずに用いるなど，気候変動下における降雨の時間分布を適切に反映する必要があると考えられる．

5．おわりに

本研究では，気候変動を考量した治水計画の立案に向けて，将来気候下における降雨の空間分布特性と時間分布特性が河川流量に与える影響を評価した．

本研究で得られた主な成果を，以下に列記する．

1) 将来気候下では，広く分布する傾向にある降雨の空間分布の出現頻度は減少し，局所的に集中する降雨の空間分布の出現頻度が増加する．
2) 将来気候下でのピーク流量の増加傾向は，降雨の空間分布によって異なる．
3) 将来気候下での計画規模降雨の増加傾向は，地域毎時間雨量毎に異なる．
4) 将来気候下では，同一規模の72h雨量であっても，現在気候下と比較してピーク流量が大きくなる．

以上の結果から，気候変動を考慮した治水計画の立案にあたっては，これまでに経験した実績降雨の時空間分布のみではなく，気候変動予測データから得られる降雨の時空間分布を適切に反映する必要がある．

謝辞：本研究は，文科省・気候変動リスク情報創生プログラムで作成されたd4PDFを使用した．解析に使用した雨量は，平成29年度地球シミュレータ特別推進課題ならびに文部科学省SI-CATの支援により地球シミュレータを用いることで得られた．ここに記し，謝意を表する．

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) 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： http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/index.html. （閲覧日:2019年3月）
3) 植村郁彦，舛屋繁和，吉田隆年，大村宣明，千葉学，戸村翔，山本太郎，時岡真治，佐々木博文，濱田悠貴，星野剛，山田朋人: 実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく年最大流域平均雨量の算定，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.74，No.5，Ⅰ_115-Ⅰ_120，2018.
4) 舛屋繁和，植村郁彦，吉田隆年，大村宣明，千葉学，戸村翔，山本太郎，時岡真治，佐々木博文，濱田悠貴，星野剛，山田朋人: 実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく不確実性を考慮した将来気候下での確率雨量，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.74，No.5，Ⅰ_121-Ⅰ_126，2018.
5) 湧川勝巳，荒川英誠，柳沢修，岡部真人，竹島雄介: 河川におけるDAD特性を考慮したPMP(可能最大降水量)の算定に関する研究，河川技術論文集，第21巻，2015.
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，2018.
7) 星野剛，山田朋人，佐藤友則，川瀬宏明，杉本志織: 大量アンサンブル気候予測データを用いた大雨の時空間特性とその将来変化の分析，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.74，No.5，Ⅰ_13-Ⅰ_18，2018.
8) 木村俊晃: 貯留関数による洪水流出追跡法，建設省土木研究所，1961.

(2019.4.2受付)