

空間平均降水量極値の将来変化

Future Change in Extremes of Spatially Averaged Precipitation

田中茂信

Shigenobu TANAKA

Synopsis

Climate change impact has recently attracted one of the most public attention because of frequent water-related disasters. While very heavy rainfall observed in several stations, moderate rainfall lasted long time on the whole at torrential rain in wide area of Kinki region in 2013 due to Typhoon “Man-yi” and that around Kinu River basin which caused a dike breach and vast inundation of Joso city in 2015. However, the very heavy rain but short duration caused unprecedented debris flow disasters at just upstream areas in Hiroshima 2014 and northern Kyushu 2017 rainfall disasters which killed many people but slight damage in downstream of their trunk rivers. This paper focuses on characteristics of spatially averaged extreme precipitation in future using “Database for Policy Decision-Making for Future Climate Change” (d4PDF).

キーワード: 気候変動, d4PDF, 空間平均降水量, 極値

Keywords: climate change, d4PDF, spatially averaged rainfall, extremes

1. はじめに

近年、洪水災害や土砂災害が頻発し、災害誘発事象の終了後も長く被災住民を苦しめている。これらの災害発生時に観測開始以来初めてというような報道されることが少なくなく、これらの原因として気候変動との関係が報道されることも多い。IPCCの第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約（気象庁，2014）では、「世界平均地上気温が上昇するにつれて、中緯度の陸域のほとんどと湿潤な熱帯域において、今世紀末までに極端な降水がより強く、より頻繁となる可能性が非常に高い」と報告されており、将来の災害発生に関する報道などが行われるなど関心が高まってきている。

大雨による災害は、大きく土砂災害と洪水災害に分けられ、それぞれについて、「どこ」が危険なのかを示すハザードマップと「いつ」危険になるのかを示す土砂災害警戒情報、大雨警報・注意報、指定河川洪水予報、洪水警報・注意報などがあり、危険

が迫った場合には避難勧告などが発令されることとなっている。

土砂災害の発生危険度はFig. 1に示すように60分積算雨量（短期降雨指数）と土壌雨量指数（長期降雨指数）で判断される。図からわかるように、土壌雨量指数が小さい場合は60分積算雨量が大きくても土砂災害の危険度はすぐには大きくならない。一般に、考えている空間の広がり小さいほど、また、考えている継続時間が短いほど降雨強度は大きくなりやすい。さらに、流域の末端から流達地点までの距離が長い大流域では短時間の雨や局所的な雨では洪水は引き起こされない。このようなことを踏まえると、大雨による災害の危険度を考えるに当たっては、時空間的な広がりごとに気候変動による降雨の変化傾向を把握することが重要であることがわかる。

一般に山間地で大雨が増強されることがあるので、空間的な広がりのみによって極値の発生状況がどの程度異なるかを見るためには、まず、極力平地が広

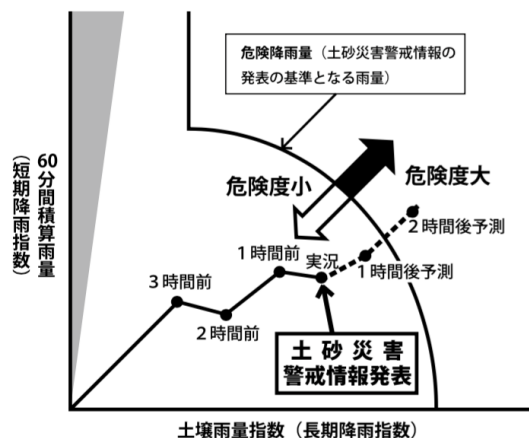


Fig. 1 The relationship between soil water index, 60 minute cumulative rainfall and issuance of sediment disaster warning

がっているところから検討すべきであろう。このため、関東平野の利根川流域から荒川流域にまたがる範囲に注目し、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムで作成され2016年6月に公開された「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, database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF)」(以下、d4PDFと呼ぶ)(文部科学省, 2016)を用いて、気候変動による極値事象の発生特性を調べる。Fig. 2に示す春日部と加須の2地点を中心とする半径の異なる領域(10, 20, 30および40km相当)を対象とする。

2. 解析に用いた資料

d4PDFは、高解像度全球大気モデルおよび高解像度領域大気モデルを用い、これまでにない多数のアンサンブル実験を行うことによって、確率密度分布の裾野にあたる極端気象の再現と変化について、十分な議論ができるように作成されたものである。本研究では、将来の気候変動の影響を検討するため、d4PDFの過去実験と将来実験の資料を用いる。

d4PDFは日本周辺領域について約20km格子でカバーしており、過去3,000年分(1950年9月1日～2011年8月31日の50アンサンブル)と将来5,400年分(6種類のSSTパターン: CCSM4, GFDL-CM3, HadGEM2-AO, MIROC5, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3(以降、順にCC, GF, HA, MI, MP, MRと呼ぶ)について、それぞれ2050年9月1日～2111年8月31日の15アンサンブル)で構成されている。本研究では年最大値を用いて解析を行うので、過去実験は1951年1月1日から2010年12月31日を、将来実験には2051年1月1日から2110年12月31日のそれぞれ60年間の日降水量を用いた。d4PDFの面積降水量の求め方は、Fig. 3左図に示すように、半径

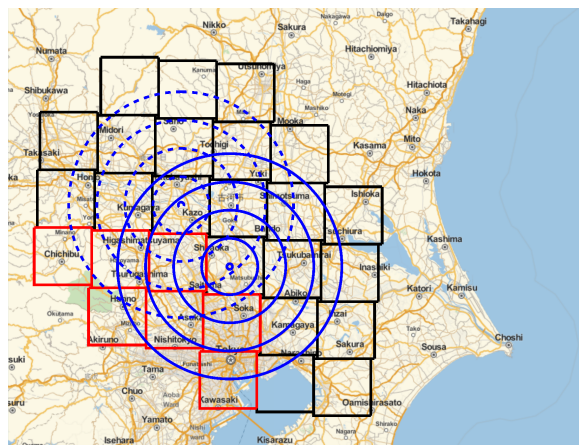


Fig. 2 The areas with 10,20,30 and 40km radius around Kasukabe(Blue) and Kazo(Blue dashed) and grids of d4PDF(Black and Red)

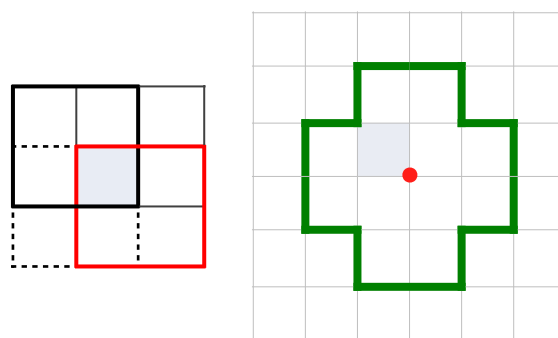


Fig. 3 Calculation method of spatially averaged precipitation using d4PDF

10kmの資料は考えている中心地点を含む灰色のグリッド、半径20kmは中心グリッドに隣接する4グリッドの平均が4つ考えられるので、その平均とする。半径30kmはFig. 3右図の灰色の中心グリッドを中心とする9グリッドの平均とする。半径40kmは中心グリッドの4隅を中心とする緑線で囲まれた12グリッドの平均が4つ考えられるので、それらの平均とした。

3. 解析方法

降雨のDAD特性から、一般に面積が大きくなるとその空間平均降水量の極値はあまり大きくならないことが想定されるが、一方、降雨強度の小さい部分はそれほど変わらないと考えられる。したがって、ある降雨継続時間についての降雨強度の極値の確率密度分布はFig. 4のようになることが想定され、将来の極端降雨の増加傾向により、面積の大小にかかわらず平均が大きくなり、分散も大きくなることが想定される。

極値資料を解析する際に用いる確率分布は極値分布であるGumble分布とGEVとする。これらの累積確率 $F(x)$ を表す分布関数は、それぞれ次のようになる。

$$\text{Gumbel: } F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x - \xi}{\alpha} \right) \right]$$

$$\text{GEV: } F(x) = \exp \left[-\left(1 - k \frac{x - \xi}{\alpha} \right)^{1/k} \right]$$

ここに、 ξ は位置母数、 α は尺度母数、 k は形状母数である。

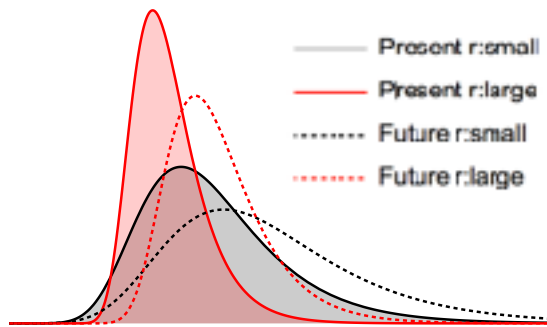


Fig. 4 Probability density distribution of rainfall intensity in small and large areas and their evolution in future

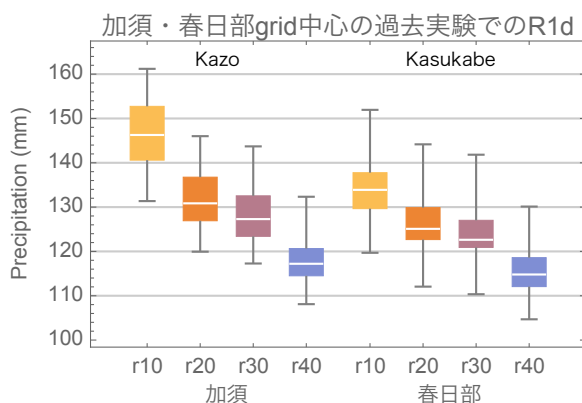


Fig.5 Variation of climatic normals of R1d in past experiment of d4PDF around Kazo and Kasukabe

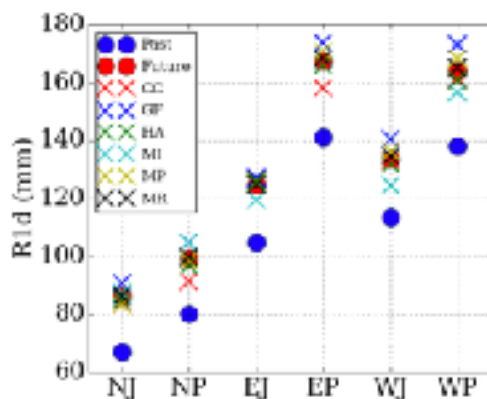


Fig. 6 Comparison of mean climatic normals R1d(mm) at six regions of Japan in past experiment and future one including six SST condition

まず、過去実験（1951-2010）についてみる。Fig. 5はそれぞれ加須および春日部が位置するグリッドを中心とするエリアにおける年最大日降水量の60年気候値R1dの50アンサンブルでの変動範囲を示したものである。エリアの大きさを横軸の半径で示している。半径が大きくなり平均面積が広くなるとR1dが小さくなるのがわかる。加須中心の方が春日部中心の値より大きめになっている。Fig. 6はd4PDF利用手引き（文部科学省，2016）にあるd4PDFのR1dの地域内平均値である。北海道，本州，四国および九州を6地域に分けており、今回の検討対象地域はEP（東日本太平洋側）内にあり、Fig. 5の加須と春日部のr10の値の平均がそれぞれ146mmおよび134mmであり、Fig. 6のEPの部分でPastを示す青●を挟む両側に位置していることから、ほぼ妥当な結果であると判断できる。

Fig. 7は春日部が位置するグリッドの年最大日降水量3000個と20年最大日降水量150個および60年最大日降水量50個をグンベル確率紙にカナンのプロットングポジションでプロットし、それぞれにL積率法でGumbel分布およびGEVをあてはめたものである。以後、断らない限り同様の方法を用いる。年最大値のプロットでは、Gumbel分布は230mm以上でサンプルのプロットから乖離している。GEVは年最大値系列に対しては非常によくフィットしているように見えるが、60年最大値では非超過確率0.1～0.9の外側でGumbel分布と乖離する。本来、Gumbel分布は最大値を抽出するブロックの大きさによることなく同一の尺度母数となる（北野他，2017）はずである。Fig. 7では20年最大値と60年最大値それぞれに当てはめたGumbel分布

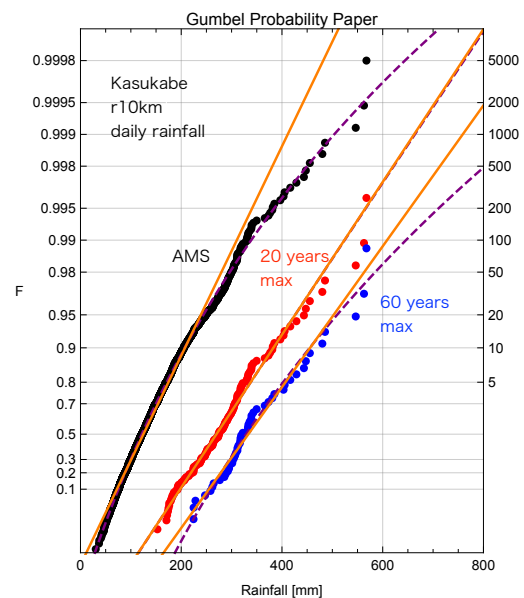


Fig. 7 Probability plots and Gumbel and GEV fitting curves for AMS, 20year's maxima and 60 year's maxima about daily rainfall at Kasukabe r10km grid in the past experiment

の尺度母数はほぼ同じ値であるが、年最大値の尺度母数とはかなり異なっている。今回、1/100あるいは1/200確率水文量を考えるので、サンプルサイズで判断せず、60年最大値を用いた結果を使用することとする。

4. 解析結果

まず、過去実験（1951-2010）についてみる。Fig. 8左は加須を中心に半径10, 20, 30および40kmのグリッド平均について60年最大日降水量をグンベル確率紙にプロットしたものである。半径が大きくなるにつれて、確率プロットと当てはめ曲線が徐々に小さくなるように右から左へシフトし、かつ、直線の勾配が大きくなっており、サンプルの分散が小さくなっていることを示している。1/100確率と1/200確率に相当する非超過確率（0.4および0.7）を一点鎖線で

示した。Fig. 8右は同様に春日部を中心としたものである。両地点ともに半径による平均降水量の違いが明瞭である。Fig. 9は加須gridおよび春日部grid中心の異なる半径、降雨継続時間に対し、60年最大値を用いてGumbel分布を適用して求めた1/100確率水文量を示したものである。同じ条件の確率水文量を比べると、加須の方が春日部より大きい。また、加須の方が春日部より半径の減少に対する極値の増加が大きい。

次に将来実験（2051-2110）の資料を見る。将来実験は6種のSSTパターン毎に15アンサンブルずつプロジェクションがある。Fig. 10はR1d(年最大日降水量の各アンサンブル内の平均)の面積変化を見たものである。全体的に過去実験と同様に加須の方が春日部より値が大きい。半径が大きくなり平均面積が広がるとR1dが小さくなるのがわかる。SSTパターン別に比較するとCCがどの面積においても他のSSTパター

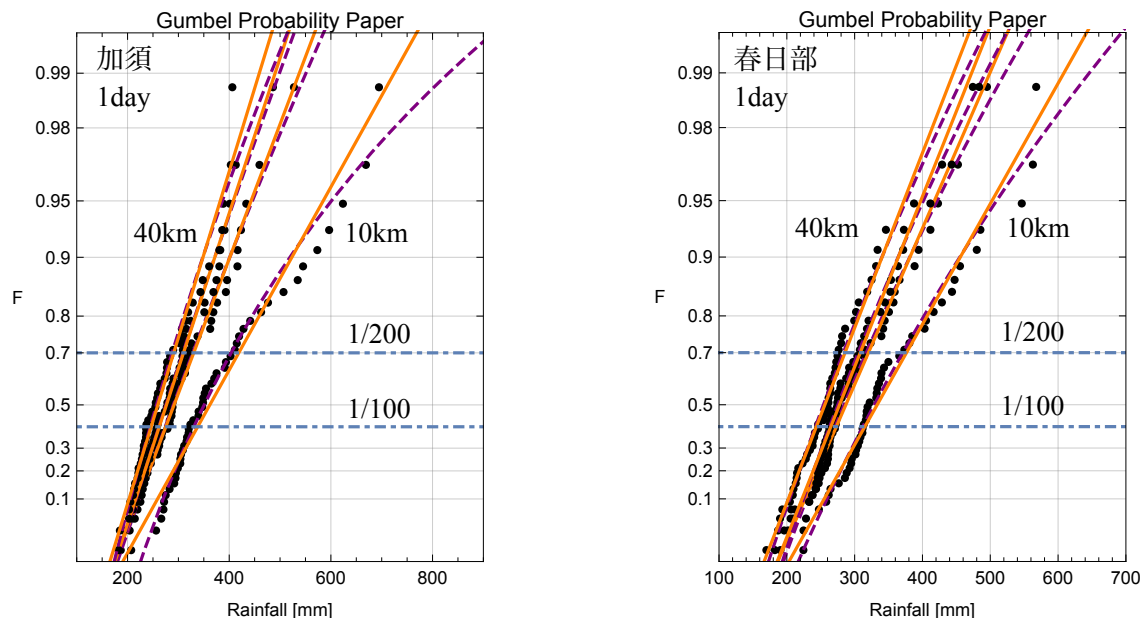


Fig. 8 Probability plots, Gumbel(orange solid line) and GEV(purple dashed line) fitting curves of 60 year's maxima for Kazo(left) and Kasukabe r10km grid in the past experiment

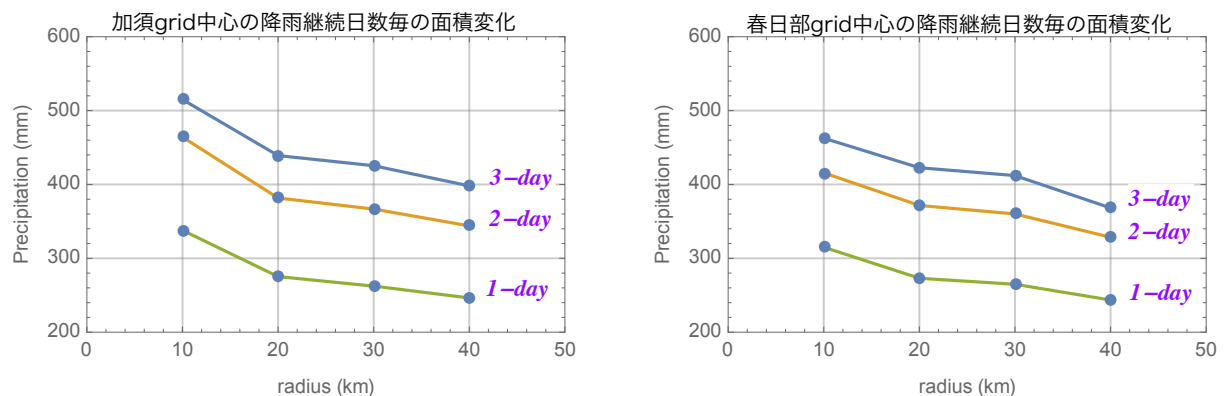


Fig. 9 Temporal and spatial variation of 100 year return level of Gumbel distribution for Kazo(left) and Kasukabe in the past experiment

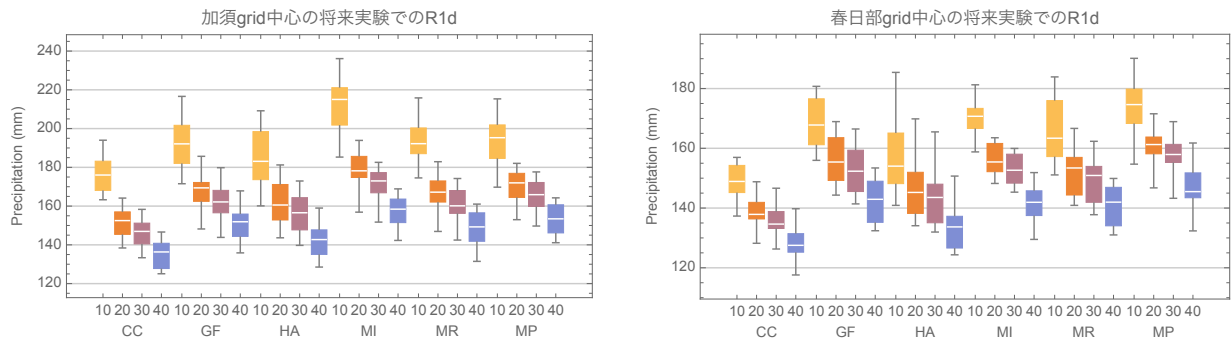


Fig. 10 Spatial variation of climatic normals R1d for Kazo(left) and Kasukabe(right) of six SST conditions in the future experiment

ンより小さい値となっている。半径10kmのR1dのアンサンブル平均が最大となるのは、加須ではMIの213mm、春日部ではMPの173mmとなっている。それぞれ、6SSTパターンの平均は加須で192mm、春日部で164mmとなっている。この春日部の値はFig. 6に示した将来実験の平均値とほぼ等しくなっているが、加須の値は30mmほど大きくなっている。

Fig. 11はFig. 9と同様の方法で、加須gridおよび春日部grid中心の異なる半径、降雨継続時間に対する1/100確率降水量を示したものである。ここでは各SSTパターンの15個の60年最大値を用い、Gumbel分布を適用して1/100確率降水量を求めている。加須、春日部両者とも過去実験と同様の傾向を示すが、将来実験の方が降水量が大きくなっている。春日部より加須の方が大きい傾向にある。SSTパターンの違いに注目すると、Fig. 10のR1dと同様にCCが両地点とも控え

めな値となっている。日降水量の半径10kmの値で見ると加須ではMRの510mm、春日部ではMIの440mmが最大となっている。

5. 考察

田中（2017）はd4PDFを用いた利根川上流部に位置する八斗島地点上流（流域面積5114km²）の流域平均降水量について報告している。それによると、6月から10月の観測値と過去実験50アンサンプルの月降水量は、平均や分散がほぼ同じであり、月降水量の観点からはバイアス補正の必要性はないが、最大や最小値は大きく異なっており、アンサンプルが増えると極端な現象の度合いも極端になることを示している。また、年降水量の観点からはバイアス補正の必要性は見られないと述べている。今回の検討範囲は、半径10～40kmあるいは20km格子のグリッド数1、

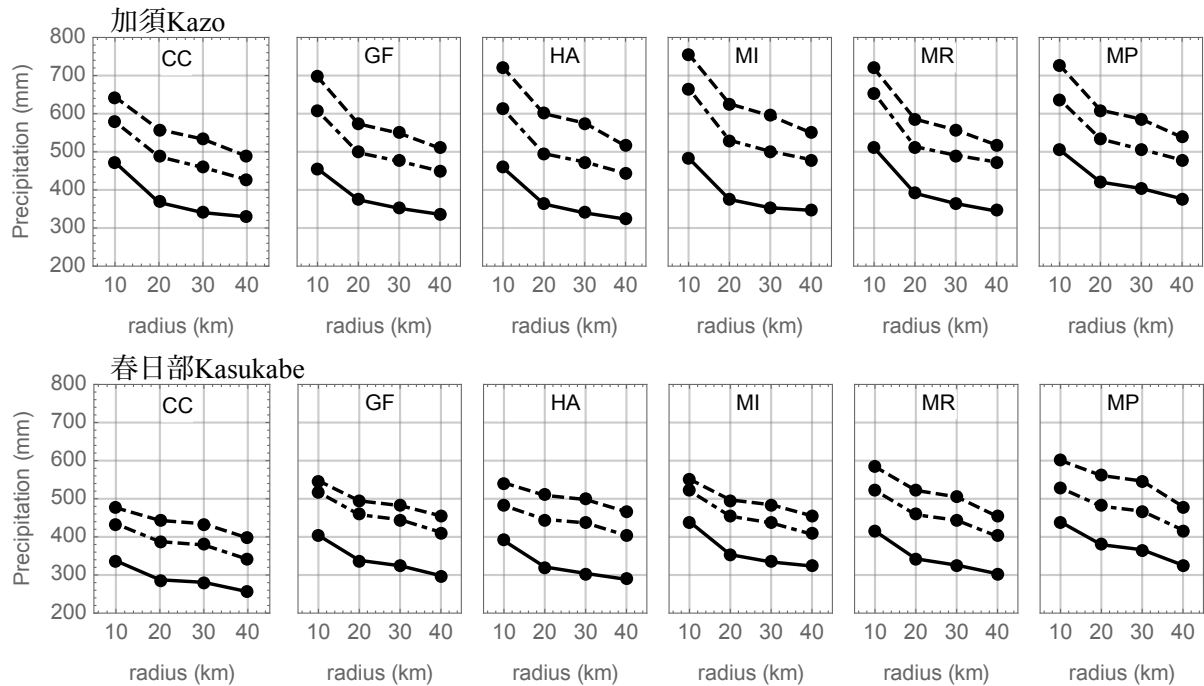


Fig. 11 Temporal and spatial variation of 100 year return level of Gumbel distribution for Kazo(top) and Kasukabe(bottom) of six SST conditions in the future experiment(dashed:3 day rainfall, dot-dashed:2-day rainfall, solid:daily rainfall)

4, 9, 12であり、面積は314, 1256, 2826, 5024km²あるいは400, 1600, 3600, 4800km²に相当する。面積的には半径40kmや12グリッドに相当するものは八斗島上流域とほぼ同等の面積である。八斗島上流の場合、夏の洪水期の雨量は観測とほぼ同様な値であったが、冬季の降水量が観測値に比べ大きいなどの違いがあったので、今回の観測所があるグリッドの年降水量を比較してみたところ、観測で、加須1189mm, 春日部1234mmに対し、d4PDF過去実験ではそれぞれ1772mm, 1547mmと格段に観測を上回っていた。この違いの原因が、観測所の数が少なく面積降水量を十分にとらえることができていないと考えるのか、さらにバイアスが含まれているのかは、よく調べてみる必要がある。したがってここでは、d4PDFの過去実験と将来実験の結果を比較して気候変動による変化のシグナルのみを取り出したと捉える。

Table 1は、加須gridおよび春日部gridを中心とした半径10, 20, 30, 40kmの面積平均降水量をd4PDF将来実験と過去実験のR1dについて比較したものであり、将来については6SSTパターンとその平均についても示している。この平均と過去実験の差分は、加須で46～30mm（平均36mm）、春日部で30～23mm（平均26mm）となっている。SSTパターンで見るとCCが小さ

い値となっていることがわかる。

Table 2は、Table 1と同様に日降水量の1/100確率水文量を一覧表にしたものである。こちらもCCが小さい値となっている。将来の6SSTパターンの平均値と過去実験の差分は、加須で96～88mm（平均93mm）、春日部で57～46mm（平均54mm）となっている。R1dや1/100確率水文量がこれだけ日降水量に付加されると災害規模も大きくなると想定される。

Table 1とTable 2ともに半径が大きくなるとR1dも1/100確率水文量も小さくなっていくが、その度合いは一様ではない。Table 3にTable 2とTable 1の差を示す。MIは加須も春日部も1/100確率水文量とR1dの差が半径の増加に対して一様に減少していない。このことは過去と将来または半径の変化に対して、確率分布を簡単な一つの式で結びつけることが難しいことを示唆している。しかしながら、平均的には単調に減少しており、全体で判断すれば、確率分布が単調に変化することが想定でき、気候変動に伴って、確率分布がどう変化するのかに関して、簡単な式が提案され、グリッドのR1dのような情報で説明できるようにになれば様々な時空間的な広がりに対する降水量極値を推定することが可能となると考えられる。

Table 1 Comparison of climatic normals R1d for Kazo(left) and Kasukabe(right) between past experiment and six SST conditions of the future experiment(Unit : mm)

”	Ã&								\$#%							
	(km)	Past	Future						Past	Future						
			!	CC	GF	HA	MI	MR		MP	!	CC	GF	HA	MI	MR
r10	146	192	176	192	185	213	193	193	134	164	149	168	158	170	166	173
r20	132	166	152	168	162	179	167	171	126	152	138	156	147	156	153	160
r30	128	160	146	162	156	171	160	165	124	149	136	153	144	153	150	157
r40	118	148	135	150	142	158	148	153	116	139	128	142	134	141	141	146

Table 2 Comparison of 100 year return level of daily rainfall by Gumbel distribution for Kazo(left) and Kasukabe(right) between past experiment and six SST conditions of the future experiment(Unit : mm)

” (km)	Å&								\$#%							
	Past	Future							Past	Future						
		!	CC	GF	HA	MI	MR	MP		!	CC	GF	HA	MI	MR	MP
r10	338	481	472	456	458	484	510	505	315	404	337	404	390	440	415	439
r20	275	382	367	374	363	375	391	421	273	337	287	338	321	353	342	379
r30	262	359	340	352	340	353	364	404	265	323	281	324	304	334	326	366
r40	246	343	329	336	323	346	344	377	244	299	256	298	289	324	303	326

Table 3 Differences between climatic normals R1d and 100 year return level of daily rainfall by Gumbel distribution for Kazo(left) and Kasukabe(right) in the past experiment and six SST conditions of the future experiment(Unit : mm)

" (km)	Å&								\$#%							
	Past	Future							Past	Future						
		!	CC	GF	HA	MI	MR	MP		!	CC	GF	HA	MI	MR	MP
r10	191	289	296	263	273	271	317	312	181	240	188	236	232	270	249	266
r20	144	215	215	206	201	196	225	250	147	185	149	183	174	197	190	219
r30	134	199	194	190	184	182	204	238	141	174	145	172	160	181	176	209
r40	129	195	195	186	181	188	196	223	128	161	128	156	155	183	163	180

6. おわりに

本研究では、時空間的な広がりを持つ降水量の極値が将来どのように変化するかについて調べるため、基礎的な研究として山地の影響の少ない関東地方の平野部でさまざまな面積的広がりを有する降水量の極値について調べてきた。水関連災害の多くは山間部にもたらされる豪雨が原因していることが多く、これらについて気候変動の影響を示すにはまだまだ多くの課題が残っている。引き続き研究を進めて参りたい。

謝 辞

本研究は、文部科学省委託事業統合的気候モデル高度化研究プログラムの支援を受けて実施された。d4PDFの資料は防災科学技術研究所社会防災システム研究領域石崎紀子氏より提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

気象庁(2014) : IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約, http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf

北野利一・高橋倫也・田中茂信(2017):気候モデルから得られる多数のアンサンブルデータを用いた確率降水量の推定法, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 73, No. 4, pp. I_1-I_6.

田中茂信(2017): d4PDFを用いた利根川流域降水量の極値評価, 京都大学防災研究所年報, 第60号B, pp. 757-764.

玉田沙耶香(2015): 防災基礎講座 改正土砂災害防止法について, そんぽ予防時報, Vol. 262, pp8-11

文部科学省(2016): 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/>

文部科学省(2016): d4PDF利用手引き第3章領域モデル実験, http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/img/d4PDF_Chap3_20151214.pdf

Stedinger, J.R., R.M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou(1993): Frequency Analysis of Extreme Events, Chap. 18, Handbook of Hydrology, (Ed.) D. R. Maidment, McGraw-Hill, New York, pp. 18.1-18.66.

(論文受理日: 2018年6月13日)