フィリピン・パンパンガ川流域における 浸水時間を考慮した氾濫外力の将来変化

宮本 守¹・牛山 朋来¹・岩見 洋一¹・小池 俊雄²

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター

(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail:mmiyamoto@pwri.go.jp

²フェロー会員 国立研究開発法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター長

(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail:t-koike@pwri.go.jp

気候変動影響による洪水氾濫形態の将来変化を明らかにすることを目的としてフィリピンのパンパンガ川流域を対象に時空間的な洪水氾濫特性を分析した。氾濫解析には RRI モデルを適用し、降雨は MRI-AGCM3.2S の RCP8.5 シナリオの結果を領域気象モデルにより 5km にダウンスケーリングし地上雨量で出現頻度をバイアス補正した。その結果、将来気候では浸水面積が約 1.2 倍に増大するが平均浸水時間は短くなることがわかった。これは浸水面積が増大したことで湛水が早く解消するグリッドが増え、浸水領域全体での平均浸水時間が小さくなったことも一因であるが、将来気候において降雨の時空間的な偏りが大きくなる傾向も考えられるため、浸水面積と浸水時間の両方を考慮した手法で洪水被害リスクの将来変化を評価する必要がある。

Key Words: inundation duration, RRI model, WRF model, MRI-AGCM, climate change

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次報告書第2作業部会報告書¹⁾には、「アジアにおけるインフラや居住に対し広範な被害をもたらす河川沿い、沿岸域、都市部での氾濫の増加」が将来のリスクとして報告されている。特に極端気象による洪水被害の拡大は重要な課題であり、気候変動影響を考慮した上で洪水被害リスクを軽減するための対策が求められている。将来気候下における洪水リスクを軽減するためには、洪水氾濫の発生頻度および規模に加えて氾濫形態の変化を明らかにする必要があり、そのためには氾濫外力の時間的、空間的な変化傾向も適切に評価しなければならない。

気候変動が洪水氾濫に及ぼす影響の評価を目的とした研究は数多くあるが、浸水時間も含めた将来変化を評価した研究はほとんど見受けられない。Sperotto et al. ²⁾は気候変動が洪水リスクに及ぼす影響を分析することを目的として領域リスク評価(RRA)手法を開発し、ベネツィアにおける将来気候シナリオの洪水リスクを被害の対象別に詳細に評価しているが浸水時間に関する観点は含まれていない。Coleman et al. ³⁾はGISベースの面積-時間氾濫指標モデル(ATIIM)を開発し将来変化の評価手法を提案しているが、その評価対象は感潮帯における生態系の生息環境であり洪水リスクに関するものではない。

本研究では、台風および南西モンスーンの影響により毎年のように洪水氾濫被害が発生しているフィリピンのパンパンガ川流域においてダイナミックダウンスケーリングした全球気候モデル(GCM)の結果を用いて極端気象下における洪水氾濫の将来変化を分析した。洪水氾濫の評価には浸水時間を考慮したハザード評価値を定義し、50年確率および100年確率の降雨に対する洪水氾濫の時空間特性の将来変化を分析した。

2. パンパンガ川流域の概要

フィリピンの首都マニラの北部に位置するパンパンガ川流域は流域面積 10,434 km²のルソン島で 2 番目の大きさの流域である。図-1 に示すように、流域内には 17 地点の地上雨量観測所が設置されている。パンパンガ川流域では年降水量の約 83%が雨期である 5 月から 10 月に集中しており、台風と南西モンスーンが主な洪水発生の原因となっている。また広大な穀倉地帯である対象流域は土地利用の大部分が農地であるため洪水氾濫による農業被害は深刻な問題となっている。したがって洪水被害リスクを推定する上で浸水時間は重要な項目である。流域内には二つの大規模な多目的ダムが建設されており、北部に位置するパンタバンガンダムは主として流域の農業活動に伴う水需要を支え、下流に位置するアンガット

図-1 パンパンガ川流域の概要

ダムは首都マニラに対する水資源供給源として重要な役割を担っている。また流域内には大規模な湿地帯が二つ存在しており、地形的な理由から雨季の間は長期間にわたって雨水が浸水する。特に下流側の Candaba 観測所周辺に位置する約 250 km²の湿地帯 Candaba Swamp ではほとんどの住居が嵩上げされており、パンパンガ川本川の越流堤から人為的に導水し湛水させることで漁業や養殖を行う生活様式が確立されている。そのため、洪水氾濫解析の際は湿地帯による氾濫水の貯留効果も考慮する必要がある。

3. RRI モデルによる氾濫解析

本研究ではパンパンガ川流域の洪水氾濫解析に RRI (Rainfall-Runoff-Inundation) モデルを適用した。RRI モデルの概要図を図-2 に示す。RRI モデルは降雨を入力として斜面流出から洪水氾濫までを一体的に解析するモデルである。RRI モデルではグリッド分割した対象範囲を河道と斜面に分けて取扱い、河道が存在するグリッドセルには河道と斜面の両方が存在すると仮定している。主な特徴として、二次元拡散波近似を解析に使用していること、側方地中流と鉛直浸透流を反映していること、河道と斜面のインタラクションを考慮していることが挙げられる。基礎式等のモデル詳細は既往論文^{4,5)}を参照されたい。パンパンガ川流域のモデルのメッシュサイズは 15 秒角 (約 450 m) とし、標高データはフィリピンの National Mapping and Resource Information Authority

図-2 RRI モデルの概要図

表-1 同定されたパラメータ

パラメータ		単位	森林	農地	水面
河道粗度	n_{river}	m ^{-1/3} s	0.035	0.035	0.035
斜面粗度	N	m ^{-1/3} s	0.35	0.3	0.2
土層厚	d	m	1.0	1.0	1.0
鉛直飽和透水係数	K_v	m/s	5.55E-7	5.55E-7	0
空隙率	Φ	-	0.471	0.471	0.471
土壌吸引圧	S_f	m	0.3163	0.3163	0.3163

(NAMRIA) から提供された IfSAR (5 m メッシュ) をアップスケールして使用した。水文パラメータは、流域の土地利用を森林、農地、水面の 3 種類に大別して 2009 年と 2011 年に実際にパンパンガ川流域で発生した洪水で同定した値を使用した。本解析で使用したパラメータを表-1 に示す。

4. 流域降雨量の分析

本研究では洪水氾濫形態の将来変化を明らかにすることを目的として、MRI-AGCM(Meteorological Research Institute -Atmospheric General Circulation Model) 3.2S(super high resolution in 20 km)の RCP8.5 シナリオの現在気候 25 年分(1979 年から 2003 年)と将来気候 25 年分(2075 年から 2099 年)の結果を降雨データとして用いた^{6,7)}。海面水温の設定は MME(Multi-Model Ensemble)とした結果を使用した⁸⁾。

(1) WRF モデルによるダイナミックダウンスケーリング

パンパンガ川の流域面積は 10,434km²であるため、20 km メッシュの MRI-AGCM の出力降雨データを領域気象モデル (WRF) により 5 km メッシュにダイナミックダウンスケーリングした。WRF モデルの積雲パラメタリゼーションには、近年のパンパンガ川流域における洪水時の再解析雨量のダウンスケーリングで最も再現性に優

図-3 降雨強度と出現頻度の関係

図-4 現在気候と将来気候の頻度解析結果の比較
(年最大 48 時間雨量)

れていた Grel3D アンサンブルスキームを使用した⁹⁾。

(2) 地上雨量計との比較によるバイアス補正

パンパンガ川流域では 1980 年から 1982 年までと 1992 年以降(1994 年と 2008 年を除く)に地上雨量観測が実施されているため時間雨量データが存在する。これらの 22 年分の地上雨量観測の時間雨量データとダイナミックダウンスケーリングした降雨データを比較した結果、出現頻度に差異が確認されたためダイナミックダウンスケーリング結果のバイアス補正を行った¹⁰⁾。バイアス補正では、ダウンスケーリング結果の空間的な降雨分布は補正せず、各月ごとに同じ出現頻度の流域平均日降水量が地上雨量と同じ値になるように補正した。ただし、年間を通して上位 0.5%の降水量は月別に扱わずに通年で地上雨量と比較し同じ値になるように補正した。図-3 はダウンスケーリング前とダウンスケーリング後、バイアス補正後の降雨強度と出現頻度の関係である。ダウンスケーリング前の GCM の結果は特に降雨強度が高い雨量が地上観測雨量より過少になっているが、ダウンスケーリ

ング後は地上観測雨量に近くなっている。さらにバイアス補正を行うことで、やや過大になっていた出現頻度は地上雨量とほぼ一致した。

(3) 現在気候と将来気候の年最大 48 時間雨量の比較

積雲パラメタリゼーションに起因するバイアスを考慮して前節で述べたバイアス補正手法を将来気候の降雨にも適用した上で、現在気候と将来気候の年最大 48 時間雨量を比較した。図-4 は現在気候と将来気候の年最大 48 時間雨量の頻度解析結果の比較である。図中には Gumbel と GEV の結果を示しているが、50 年確率降雨や 100 年確率降雨の作成を想定して一般に非超過確率が高いフィッティングに優れている GEV を本研究では採用した。50 年確率の 48 時間降雨量は現在気候の 312 mm に対して将来気候は 450 mm であり約 1.4 倍、100 年確率の 48 時間降雨量は現在気候の 345 mm に対して将来気候は 557 mm であり約 1.6 倍となっており、将来気候下において顕著に増加していることが示された。

現在気候において年最大 48 時間雨量が最大となったのは 2001 年の 300.9 mm であり、将来気候において年最大 48 時間雨量が最大となったのは 2087 年の 526.4 mm であった。これらの最大ケースの 0.5 m 以上の浸水範囲および浸水深を図-5 に示す。現在気候では流域面積の 29.6%が 0.5 m 以上浸水したのに対して将来気候では流域面積の 38.8%が 0.5 m 以上浸水しており約 610 km²増大している。さらに浸水深も全体的に大きくなっている。

5. 洪水氾濫の将来変化

(1) 確率年降雨の作成

洪水氾濫の将来変化を定量的に評価することを目的として、図-4 に示した 50 年、100 年確率の 48 時間雨量による洪水氾濫解析を実施した。確率年降雨の作成では、多様な降雨パターンを考慮するために 25 年分の上位 10 件を対象として年最大 48 時間雨量が 50 年確率および 100 年確率と同じ値になるように引き伸ばし倍率を乗じた。解析期間は流域内の湿地帯等による貯留効果を考慮

現在気候（2001年） 将来気候（2087年）

図-5 年最大48時間雨量の最大ケースの浸水深

して15日間としたが、降雨の引き伸ばしは図-6に示すように年最大48時間雨量のみとし、降雨の空間分布はそのまま使用した。50年確率および100年確率への引き伸ばし倍率が2倍以上になるケースも見受けられたが、今回は降雨パターン数の確保を優先して引き伸ばし倍率の上限は設けず、上位10件を対象とすることとした。

(2) 将来変化の評価

本解析では洪水被害リスクの推定のための氾濫外力として浸水深、浸水面積、浸水時間が重要な要素であると考え、氾濫外力の程度を示す指標として、基準となる浸水深を超える浸水面積と浸水時間を乗じたハザード評価値を次式により定義した。

$$E_d = A_d \cdot D_d \quad (1)$$

ここに、 E_d 基準深さ d に対するハザード評価値($\text{km}^2 \cdot \text{day}$)、 A_d 基準深さ d を超える浸水面積(km^2)、 D_d 基準深さ d を超える浸水時間(day)である。なお、本解析では、フィリピンにおける農業被害額の算定の際に被害が発生する高さを参考に基準浸水深を0.5mとした。

現在気候と将来気候の各25年分の上位10件を50年確率と100年確率に引き伸ばした降雨による氾濫解析結果を表-2に示す。表中の平均浸水時間は解析期間15日間のうち浸水したメッシュの総浸水時間の平均値である。50年確率降雨の浸水面積に関して、最大ケースは1.18倍、10件の平均は1.21倍現在気候より将来気候が増大している。100年確率降雨では最大ケースは1.22倍、10件の平均は1.25倍現在気候に対して将来気候の浸水面積が増大している。図-7は浸水面積が最大となった2002年と2090年の100年確率降雨に対する対象期間を通じての最大浸水深である。浸水面積と浸水深ともに将来気候下での増加傾向が表れている。その一方で、表-2では0.5m以上浸水した面積の平均浸水時間は50年確率と100年確率の両方で将来気候の方が短くなっている。将来気候において平均浸水時間が短くなったのは、浸水

図-6 降雨の引き伸ばし対象範囲（将来気候2090年の事例）

面積が増大したことで湛水が早く解消するグリッドが増え浸水領域全体での平均浸水時間が短くなったことが一因であるが、将来気候下において年最大48時間雨量が時間的・空間的に集中する傾向も考えられるためこの点に関してはさらなる検証が必要である。図-8は2002年と2090年の100年確率降雨に対する浸水時間の空間分布である。2090年の事例のように浸水時間が長いエリアは下流部の湿地帯や低平地に集中しており空間的な偏りが大きい。流域全体として浸水時間が短い事例も確認された。図-9は100年確率降雨の2002年と2090年の浸水日数別の浸水面積である。2090年の結果は浸水時間が短い面積の比率が相対的に高く、2002年の結果は10日以上浸水する面積の比率が相対的に高くなっている。2090年の事例で14日間（336時間）の浸水度数が突出しているのは、湿地帯および低平地における貯留効果であると考えられる。前述したように、Candaba Swampでは氾濫水が貯留する地形になっており、住民も貯留水を利用する生活様式を採っている。図-10は100年確率降雨の上位10件の平均の浸水面積を浸水日数別に示している。将来気候で増加しているのは浸水日数が短い面積であり、浸水日数が長い面積は同程度である。このことから、将来気候での浸水面積の増加には浸水日数が短い氾濫の増加が寄与しており、それに伴い浸水時間の平均値は小さくなっていると考えられる。以上のように、浸水面積と浸水時間の将来変化傾向は一致しているとは言えず、流域の洪水被害リスク推定のための氾濫外力に対しては浸水面積と浸水時間の両方を考慮した時空間的な評価手法が必要であると考えられる。

6. まとめ

本研究では、フィリピンのパンパンガ川流域を対象として気候変動影響による洪水氾濫外力の将来変化を浸水時間を考慮して評価した。本研究で得られた知見を以下に列挙する。

- 1) MRI-AGCM3.2SのRCP8.5シナリオをWRFによりダウンスケーリングし地上観測雨量でバイアス補正した結果を用いて年最大48時間雨量の頻度解析を行った。その結果、将来気候の50年確率48時間雨量

表-2 年最大 48 時間雨量が上位 10 件の氾濫解析結果（最大ケースを太字で表記）

50年確率							
	降雨 パターン	48h雨量 (mm)	引き伸 ばし後 (mm)	引き伸 ばし倍率 (-)	浸水面積 (km ²)	平均浸水 時間 (h)	ハザード 評価値 (km ² ・day)
現在	1 2001	300.9	311.7	1.04	3054.6	139.9	17812
	2 2003	252.7	311.7	1.23	3108.8	138.4	17925
	3 1992	238.5	311.7	1.31	3570.1	112.6	16752
	4 2002	232.6	311.7	1.34	3581.3	153.5	22912
	5 1996	203.3	311.7	1.53	3134.0	176.3	23020
	6 1984	181.9	311.7	1.71	3275.8	110.7	15116
	7 1991	178.2	311.7	1.75	3209.2	147.1	19673
	8 1998	174.5	311.7	1.79	2708.6	182.4	20586
	9 2000	157.7	311.7	1.98	3111.3	126.3	16374
	10 1986	154.8	311.7	2.01	3200.3	117.1	15614
	平均	207.5	311.7	1.57	3195.4	140.4	18578
将来	1 2087	526.4	450.3	0.86	3665.1	121.4	18541
	2 2078	309.3	450.3	1.46	2743.5	131.5	15029
	3 2077	273.8	450.3	1.64	4070.9	142.0	24090
	4 2090	244.7	450.3	1.84	4190.3	114.2	19932
	5 2076	204.1	450.3	2.21	3956.5	125.3	20653
	6 2092	186.9	450.3	2.41	3692.0	125.5	19311
	7 2089	184.0	450.3	2.45	4033.0	117.9	19807
	8 2099	182.3	450.3	2.47	4240.0	106.1	18752
	9 2098	174.7	450.3	2.58	3867.9	162.9	26253
	10 2088	171.6	450.3	2.62	4058.3	126.6	21409
	平均	245.8	450.3	2.05	3851.7	127.3	20378

100年確率							
	降雨 パターン	48h雨量 (mm)	引き伸 ばし後 (mm)	引き伸 ばし倍率 (-)	浸水面積 (km ²)	平均浸水 時間 (h)	ハザード 評価値 (km ² ・day)
現在	1 2001	300.9	344.8	1.15	3224.7	137.6	18492
	2 2003	252.7	344.8	1.36	3254.3	136.0	18444
	3 1992	238.5	344.8	1.45	3725.5	111.9	17378
	4 2002	232.6	344.8	1.48	3748.5	150.4	23487
	5 1996	203.3	344.8	1.70	3270.2	172.4	23487
	6 1984	181.9	344.8	1.90	3452.3	110.2	15850
	7 1991	178.2	344.8	1.93	3360.0	144.9	20285
	8 1998	174.5	344.8	1.98	2787.2	180.9	21008
	9 2000	157.7	344.8	2.19	3282.6	125.5	17168
	10 1986	154.8	344.8	2.23	3378.0	116.2	16358
	平均	207.5	344.8	1.74	3348.3	138.6	19196
将来	1 2087	526.4	556.5	1.06	4027.0	118.4	19861
	2 2078	309.3	556.5	1.80	3031.6	130.4	16471
	3 2077	273.8	556.5	2.03	4356.1	137.7	24984
	4 2090	244.7	556.5	2.27	4584.8	111.0	21213
	5 2076	204.1	556.5	2.73	4272.9	122.8	21865
	6 2092	186.9	556.5	2.98	4108.4	120.9	20697
	7 2089	184.0	556.5	3.03	4483.6	112.9	21084
	8 2099	182.3	556.5	3.05	4539.4	105.0	19867
	9 2098	174.7	556.5	3.19	4158.0	158.2	27408
	10 2088	171.6	556.5	3.24	4371.0	124.1	22603
	平均	245.8	556.5	2.54	4193.3	124.1	21605

現在気候 将来気候
図-7 現在気候（2002年）と将来気候（2090年）の
100年確率降雨の浸水深

現在気候 将来気候
図-8 現在気候（2002年）と将来気候（2090年）の
100年確率降雨の浸水時間

は約 1.4 倍の 450 mm となり、100 年確率は約 1.6 倍の 557 mm となることがわかった。

- 2) 年最大 48 時間雨量が最大となった 2001 年と 2087 年の 0.5m 以上の浸水範囲および浸水深を比較した結果、将来気候では流域面積の 38.8%が浸水しており現在気候より約 610km²大きい結果となった。
- 3) 年最大 48 時間雨量が上位 10 件を 50 年確率と 100 年確率に引き伸ばした降雨で氾濫解析した結果、将来気候では浸水面積は増大するが平均浸水時間は短くなった。これは将来気候下において湛水が早く解消するグリッドが増えることで浸水時間の平均値が小さくなったことが一因であると考えられる。
- 4) 浸水面積と浸水時間の将来変化傾向は異なっていることがわかった。したがって、例えば気候変動の将来影響に対する適応策等の検討や洪水被害リスク推定のための氾濫外力の評価の際はハザード評価値のような時空間的な特性を考慮した手法が必要である。

7. 今後の課題

本研究では将来気候下において浸水面積が増大する一方で浸水時間が短くなるという結果が得られた。その一因として湛水が早く解消する面積が増えることで浸水時間の平均値が小さくなることを挙げているが、その背景にはパンパン川流域において将来の気温上昇に伴う放射対流平衡により極端気象が時間的・空間的に集中することに起因している可能性も考えられる。この点に関しては今後 MRI-AGCM3.2S の極端気象の時空間分布を慎重に分析し将来変化傾向についてさらなる検証が必要であると考えている。

謝辞：本研究は文部科学省委託事業気候変動リスク情報創生プログラム「課題対応型の精密な影響評価」（平成 24 年度－平成 28 年度）のもとで行われた。また本研究

図-9 現在気候 (2002 年) と将来気候 (2090 年) の
浸水日数別の浸水面積

図-10 現在気候と将来気候の浸水日数別の浸水面積
(上位 10 件の平均)

で使用した標高データ IFSAR はフィリピン国 NAMRIA から提供された。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) IPCC Working Group II: CLIMATE CHANGE 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability (Summary for Policymakers), 2014.
- 2) Sperotto, A., Torresan, S., Gallina, V., Coppola, E., Critto, A. and Marcomini, A.: A multi-disciplinary approach to evaluate pluvial floods risk under changing climate: The case study of the municipality of Venice (Italy), *Sci Total Environ.* ,562:1031-43. doi: 10.1016/j.scitotenv. 2016.03.150. 2016.
- 3) Coleman, A. M., Diefenderfer, H. L., Ward, D. L. and Borde, A. B.: A Spatially Based Area-Time Inundation Index Model Developed to Assess Habitat Opportunity in Tidal-Fluvial Wetlands and Restoration Sites., *Ecological Engineering*, 82:624-642. doi:10.1016/j.ecoleng. 2015.05.006
- 4) 佐山敬洋, 建部祐哉, 藤岡奨, 牛山朋来, 萬矢敦啓, 田中茂信: 2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.69, No.1, 14-29, 2013.
- 5) 佐山敬洋, 藤岡奨, 牛山朋来, 建部祐哉, 深見和彦: インダス川全流域を対象とした2010年パキスタン洪水の降雨流出氾濫解析, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.68, No.4, I_493-I_498, 2012.
- 6) Kitoh, A. and Endo, H.: Changes in precipitation extremes projected by a 20-km mesh global atmospheric model, *Weather and Climate Extremes*, 11, 41-52, doi:10.1016/j.wace.2015.09.001. 2016.
- 7) Mizuta, R., Yoshimura, H., Murakami, H., Matsueda, M., Endo, H., Ose, T., Kamiguchi, K., Hosaka, M., Sugi, M., Yukimoto, S., Kusunoki, S. and Kitoh, A. : Climate simulations using MRI-AGCM3.2S with 20-km grid., *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A: 233-258. 2012.
- 8) Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H. and Kitoh, A.: Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes. *SOLA*, 807 10, 167-171, doi:10.2151/sola.2014-035. 2014.
- 9) Grell, G. A., and Devenyi, D: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.* 29, DOI:10.1029/2002GL015311. 2002.
- 10) Ushiyama, T., Hasegawa, A. and Iwami, Y.: Dynamical Downscaling and Bias Correction of Rainfall in the Pampanga River Basin, Philippines for Flood Risk Change on Global Warming. *Proceeding (CD) of The 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER2016)*. Kyoto, Japan; S02-15. 2016.

(2016. 9. 30 受付)

FUTURE CHANGE ON INUNDATION HAZARD CONSIDERING DURATION IN THE PAMPANGA RIVER BASIN, PHILIPPINES

Mamoru MIYAMOTO, Tomiki USHIYAMA , Yoichi IWAMI and Toshio KOIKE

To understand future inundation patterns due to climate change, temporal-spatial flood inundation in the Pampanga River basin was analyzed. Dynamic downscaling by the WRF model and bias correction using ground rainfall were applied to the results from MRI-AGCM3.2S with the RCP 8.5 scenario to prepare rainfall data in future climate. Inundation analysis with the RRI model shows that the area of inundation may increase by 20% in the future while the duration may shorten by 10%. The finding that wider inundation and a shorter duration of inundation are concurrently recognized suggests that the mean duration of the maximum inundation may be shorter in future climate due to the spatial-temporal trend of annual maximum rainfall. As further researches, a clarification of the interaction between wider inundation and a shorter duration of inundation by considering a temporal aspect such as the hazard evaluation value defined in this study, can contribute to more reliable assessment of future flood damage risk.