

気候変動影響による洪水氾濫・農業リスクの変化予測 ～フィリピン・パンパンガ川流域での検討事例～

Badri Bhakta SHRESTHA・宮本 守・澤野久弥・深見和彦

1. はじめに

気候変動により洪水外力が増大した場合、その河川流域での洪水氾濫リスクは高まる。我が国では、仮に21世紀末に向けて全球平均気温が2度程度上昇する場合（RCP2.6シナリオ相当）、治水計画規模の降雨量は全国1級水系平均で約1.1倍となると想定され、その結果として、洪水氾濫発生頻度は約2倍になると試算されている。仮にひとたび洪水氾濫が発生すれば、流域内の人々の生活の基盤となる社会基盤施設のみならず、そこで営まれている様々な産業に幅広く被害が生じる恐れがある。このため、気候変動による氾濫被害リスク変化の評価は、それに対処するための適応策立案のための前提として重要な研究課題である。

ここでは、土木研究所ICHARMが行ってきた気候変動下における降雨量変化予測と降雨流出氾濫モデルの技術開発成果を基盤とした洪水氾濫による農業へのリスクの変化予測を試行した研究事例を紹介する。海外流域を対象とし、当地の主要産業である米作農業に係る被害特性曲線を組み合わせる研究であり、その流れは図-1の通りである。以下、研究対象域を紹介し、各段階における研究方法と結果を示す。

2. 研究対象域の概要

本研究の対象域は、フィリピン国・パンパンガ川流域である。マニラ首都圏の北部に位置し、ルソン島で第2位の流域面積（約1万km²）、約660万人（2010年）の人口を有する。当該地域はフィリピン国内で最大の穀倉地帯であり、土地利用は水田(38%)、草原・灌木地(24%)、森林(18%)等から構成され、主要な産業は米作である。このことから、パンパンガ川流域での主要産業である農業への洪水氾濫被害のリスクを考える上で、米作への影響を検討することが最も重要となる。流域内には、サン・アントニ

オおよびカンダバの2つの広大な湿地があり、氾濫変化を検討する上で重要である(図-2)。2つの多目的ダムがあるが、南側のアンガットダムはパンパンガ川本川下流部で合流する支川の上流にあり、マニラ首都圏の水資源確保を最大の目的としている。このため、本研究では、本川中流部の洪水氾濫に影響する北側のパンタバガンダムのみを考慮している。

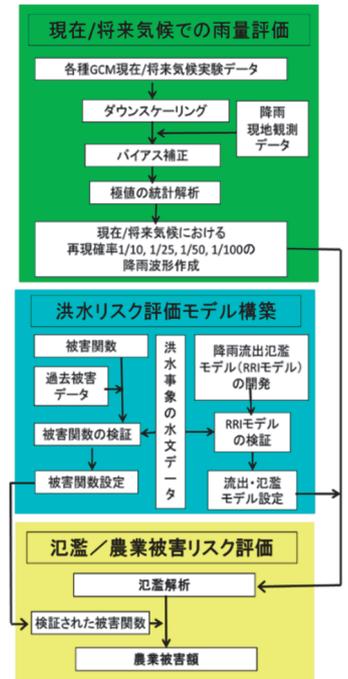


図-1 研究全体の流れ

3. 現在/将来気候での雨量変化の評価

本研究の目的は、現在から気候変動後の将来に向けて、洪水・氾濫リスクがどのように変化し、それがどのような農業リスクの変化につながるかを定量的に推定する手法を確立させることである。将来としては、世界の多くの研究機関が気候変化予測計算の対象としている21世紀末とし、気候変化シナリオとしてはRCP8.5（全球平均気温4度程度上昇に対応した最悪シナリオ）を想定する。ここでは、我が国の気象庁が世界最高空間分解能(20km)での気候変化予測計算を行っているMRI-AGCM3.2Sの将来気候予測計算データ（2075～2099年）とその対比としての現在気候再計算データ（1979～2003年）を利用することとし、それぞれを5km分解能までダウンスケーリングした上で、年最大流域平均48時間雨量の確率評価を行い、超過確率1/50および1/100の雨量変化の評価を行った。それらの手法については、本誌の牛山ら³⁾による報文で既に詳しく

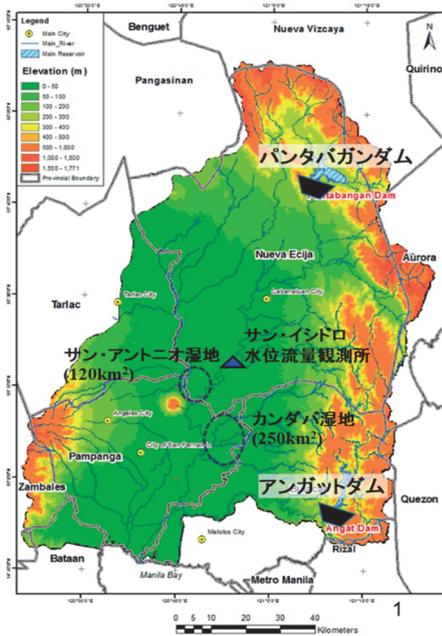


図-2 フィリピン国パンパンガ川流域

述べているので、ここでは説明を省略する。なお、MRI-AGCM3.2Sでは、将来気候における海面水温分布(SST)条件として4種類(3つのパターンとその平均パターン)

設定して大気側の将来気候予測計算を行ったデータが存在している。牛山ら⁹⁾では、そのうち最悪ハザードを提示する観点で確率雨量が最大となるSST条件での将来予測計算結果をダウンスケーリングした結果について紹介しているが、本研究では、ある生起確率を想定する中での平均的なハザード条件の下でのリスク変化を検討する観点から、平均SSTパターン条件での将来予測計算結果をダウンスケーリングしたデータを以下用いている。そのデータに基づく確率雨量評価結果を表-1に示す。

洪水流出・氾濫計算のために必要となる降雨分布・波形については、現在/将来気候予測のダウンスケール計算結果について、流域平均48時間雨量として大きい方から降順で10ケースずつをそれぞれ抽出(すなわち現在気候の10ケースと将来気候の10ケースの雨量時空間分布は全て異なる)し、それらの雨量波形全体について、上記の1/50及び1/100確率の流域平均48時間雨量値に一律に引き延ばしたものをを用いる。

4. 洪水・氾濫/農業リスク評価モデル構築

4.1 洪水流出・氾濫計算モデルの構築と再現計算

本研究では、洪水流出・氾濫計算モデルとして、RRI(Rainfall Runoff Inundation)モデル⁴⁾を用いた。RRIモデルは、本誌別報文で紹介したWEB-RRIモデル⁵⁾における詳細な地表面-大気相互作用サブモデルを含まない版であるが、洪水イベント毎の短期流出計算には国内外で数多く適用実績があり、拡散

表-1 MRI-AGCM3.2Sの現在/将来気候予測の力学的ダウンスケーリングデータから得られたパンパンガ川流域平均確率雨量値(mm/48h)

超過確率	現在気候	将来気候
	1979-2003	2075-2099
1/50	312	450
1/100	345	557

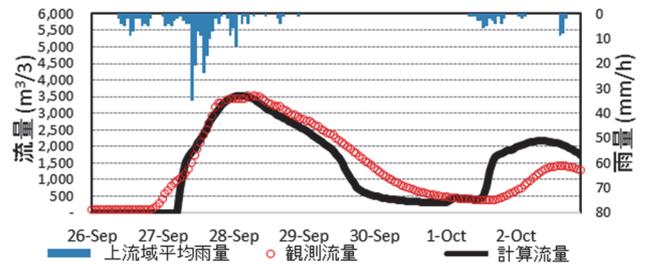


図-3 パンパンガ川既往最大洪水事例におけるRRIモデルによる流出計算結果と実測流量との比較(2011年9月26日~10月4日、サン・イシドロ地点)

波近似で流れの支配方程式を解くことにより、前述の二大湿地の影響を含めて河道と氾濫原の間の収支を一体的に計算できる。干渉SAR技術により2013年に作成された5mメッシュ標高データ(IfSAR-DEM)を基礎として450mメッシュでの河道網・モデル定数評価を行った。現地の操作ルールに基づきアンガットダムの洪水調節を考慮した。

パンパンガ川の過去最大の洪水である2011年9月洪水事例を対象に、当時利用可能な17カ所の地上雨量観測データをRRIモデルに入力して洪水氾濫計算を行った。下流域大氾濫原の上流側にある中流部のサン・イシドロ水位流量観測所における観測流量ハイドログラフとの比較を図-3に示す。最初の大きなピークについて概ね良好な再現結果を得た。

4.2 農業被害リスク評価モデルの構築・検証

当地の主要産業である米作への被害リスクを算出するモデルの構築を行った。図-4にその被害関数を示す。フィリピン農業省農業統計局が作成した米の生育段階毎の浸水深と浸水期間に応じた米生産高損失率の数表⁶⁾をもとにモデル化を行った。浸水深20cm以下では無被害とし、穂ばらみ段階では、完全水没浸水深とそこから10~15cm小さい浸水深(水面上に稲穂がある状態)を区別し、それらの間の米生産高損失率変化については直線により補間し、算定を簡便化している。

4.1で示した2011年9月洪水事例におけるRRIモデルによる洪水氾濫計算結果(水田メッシュにおける浸水深・浸水期間)を上記の米作被害関数と組み合わせることで被害額を算出し、流域下流部の氾濫原域に位

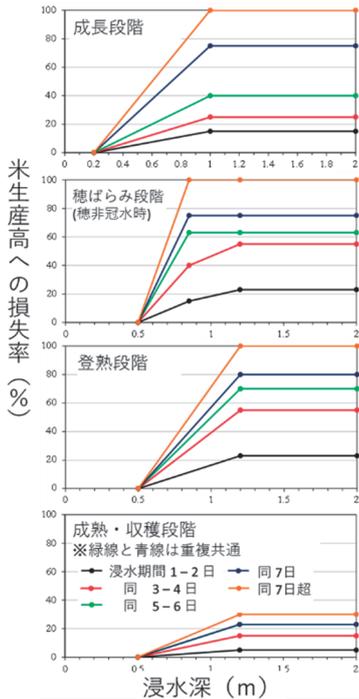


図-4 米の成長段階、浸水深/日数に応じた生産高損失率（フィリピン農業統計局データに基づく）

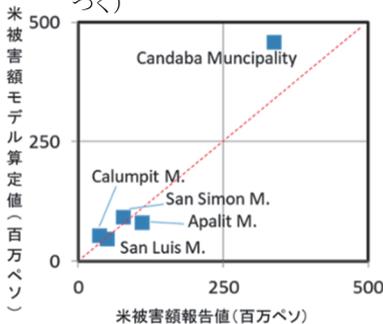


図-5 RRIモデルを基盤とした洪水氾濫/農業被害リスク評価モデルを用いた洪水氾濫による米被害額計算値とフィリピン現地の米被害額報告値（各市役所調査）の比較（フィリピン・パンパンガ川流域、2011年9月洪水時）
 ※米被害額＝米生産高×損失率
 ※米生産高(ペソ)＝17(ペソ/kg)×4360(kg/ha)×水田面積(ha)

スずつ入力し、それらの両者の比較を行うことで、気候変動による洪水氾濫/農業（米作被害）リスク変化の評価を行った。なお、過去の米作被害の多くは登熟段階で発生していることから、損失率関数は登熟段階のものを用いた。

3.で述べたように、超過確率1/50及び1/100雨量に引き延ばす前の現在の雨量分布10ケースと将来の雨量分布10ケースは独立に評価・抽出され全て異なることから、現在/将来での雨量分布10ケース平均同士での比較を基本とし、加えて、米被害を発生させる水田域での氾濫面積（以下「氾濫面積」

置するパンパンガ州、及び、同州内の主要都市毎の被害額集計報告値と比較した結果を図-5に示す。地理的分布傾向を含めて良い再現性を確保できていることが確認され、本被害評価モデルが概ね妥当であることが示された。

5. 気候変動による洪水氾濫/農業リスク変化特性の評価

4.で開発・検証を行った洪水氾濫/農業リスク評価モデルに対し、3.で評価を行った現在気候（以下「現在」という。）及び将来気候（以下「将来」という。）における雨量分布データ（流域平均48時間雨量として年超過確率1/50及び1/100に対応）をそれぞれ10ケース

という。）での最悪雨量分布ケース同士の比較に着目する。表-2（上）に示すように、気候変動により、現在から将来に向けて1/50雨量に対して氾濫面積は10ケースでの平均では17%程度、それによる米作への被害額は16%程度増加する推定結果となった（1/100ではそれぞれ約20%、18%）。米被害が発生する氾濫面積の増加率と米被害額の増加率はほぼ同じオーダーであるが、後者がやや小さい値となっている。但し、増加率の標準偏差もほぼ同様の値であり、雨量分布の違いの影響も気候変動影響と同程度に大きいことがわかる。

表-2 現在/将来気候における流域平均48時間雨量各1～10位の雨量分布ケースに基づく、現在気候から将来気候への氾濫面積及び米被害額の増加率の評価結果（超過確率1/50および1/100雨量の場合。）

	超過確率1/50		超過確率1/100	
	米被害氾濫面積増加率	米被害額増加率	米被害氾濫面積増加率	米被害額増加率
10ケース平均	17% (14%)	16% (12%)	20% (13%)	18% (10%)
※括弧内は増加率の標準偏差（変動係数）				
最悪ケース（米被害氾濫面積1位）	11%	3.7%	16%	4.1%

次に現在/将来の最悪ケース同士を比較してみる（図-6、図-7）。表-2下に示すように、氾濫面積については約11%（水田域以外を含めての氾濫総面積では約18%）増加する結果であるが、米被害総額の増加は4%弱と算出され、氾濫面積の増加割合に比べてさらに小さな値となった。このことは、1/100確率雨量においてもほぼ同様の結果であった。

この原因を探るため、氾濫面積だけでなく、浸水深、浸水日数についても調べた。その結果、平均浸水深については、氾濫面積と同様、1/50に対して3.4m（現在）から4.7m（将来）、1/100に対して3.6m（現在）から5.0m（将来）に増加する一方で、平均浸水日数は、1/50に対して5.7日（現在）から4.4日（将来）、1/100に対して5.7日（現在）から4.6日（将来）に逆に減少する予測となっていた。図-4からわかるように、米の浸水被害は、浸水深に対しては、どの生育段階においても1.5mを超えともはや感度がなくなり増加しなくなる。それに対し、浸水期間については、5～6日から3～4日に減少すると、被害額が階段状に大きく縮小する。すなわち、ここでは、氾濫面積や浸水深が増大しても、後者の米被害増大効果は小さい一方、平均浸水期間の減少が被害額を縮小させる効果があるために、氾濫面積増大による米被害額の増加傾向を押し下げたものと考えられる。なお、平均浸水期間の減少は、浸水位の上昇による氾濫面積の増加分が、浸水位の下降により

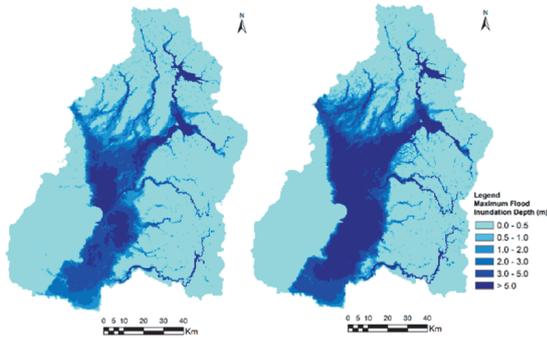


図-6 現在気候(左)及び将来気候(右)のそれぞれの条件における流域平均48時間雨量の1/50超過確率雨量分布の10パターン中で、浸水被害を受ける水田面積が最大となるケース同士の最大浸水深分布の比較

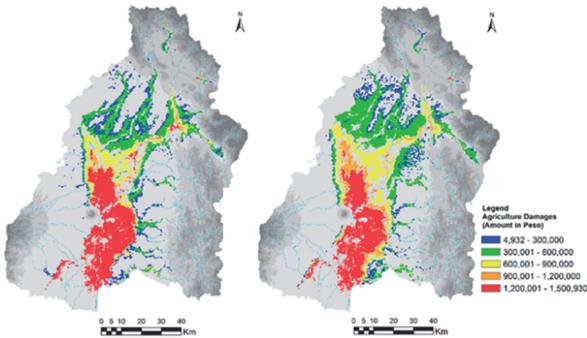


図-7 現在気候(左)及び将来気候(右)のそれぞれの条件における米作被害額分布(それぞれの雨量パターン分布は図-6のケースに対応)

速やかに浸水が解消するエリアにほぼ対応するためと推定されるが、同時に、将来における年最大48時間雨量が時間的・空間的に集中する傾向にあることによる可能性もある⁷⁾。以上の研究結果は、気候変動の農業リスク変化への影響を考える上で、降雨量の変化のみならず、降雨の時空間分布の変化や地形に応じた洪水氾濫の諸特性と、被害生起特性の関係を総合的に分析することの重要性を示すものである。

6. おわりに

本報では、フィリピン・パンパンガ川流域を対象として、RRIモデルによる降雨流出・氾濫計算結果を用いて、農業(米作)被害の気候変動による変化

をマクロに評価する試みを紹介した。氾濫区域毎のより詳細な分析や、1/50未満のより高頻度降雨での分析、及び、将来における社会(土地利用を含む)変化の農業リスクへの影響の分析は今後の課題である。また、農業被害に止まらない水関連災害分野での適応策を立案する上で、より広範な社会経済分野への影響(波及効果を含む)の総合的な分析手法の確立も大きな課題である。

なお、本研究は、文部科学省「気候変動リスク情報創生プログラム(研究代表:中北英一京都大学教授)」(平成24~28年度)により行われた。

参考文献

- 1) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会:気候変動を踏まえた治水計画のあり方提言、2019
- 2) Shrestha, B.B., Perera, E.D.P., Kudo, S., Miyamoto, M., Yamazaki, Y., Kuribayashi, D., Sawano, H., Sayama, T., Magome, J., Hasegawa, A., Ushiyama, T., Iwami, Y. and Tokunaga, Y.: Assessing flood disaster impacts in agriculture under climate change in the river basins of Southeast Asia, *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-019-03632-1, 2019
- 3) 牛山朋来、伊藤弘之:地球温暖化による将来の降雨量変化を詳細に評価するためのダウンスケーリング技術、*土木技術資料*、第62巻、第2号、pp. 8~11、2020
- 4) Sayama, T., Ozawa, G., Kawasakmi, T., Nabesaka, S. and Fukami, K.: Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, *Hydrological Sciences Journal*, 57:2, pp.298-312, 2012
- 5) Rasmy, A.W.M., 牛山朋来、安川雅紀、深見和彦:観測情報の乏しい発展途上で運用可能な洪水予測システムの開発~全球規模の衛星降雨観測・降雨予測情報の活用~、*土木技術資料*、第62巻、第2号、pp. 12~17、2020
- 6) Bureau of Agricultural Statistics of the Philippines: Manual on damage assessment and reporting system, 2013
- 7) 宮本守、牛山朋来、岩見洋一、小池俊雄: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、*土木学会論文集(水工学)*、Vol.73, No.4, I_277~I_282、2017

Badri Bhakta SHRESTHA



研究当時 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ主任研究員、現 東京大学、博士(工学)
Dr.Badri Bhakta SHRESTHA

宮本 守



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ 研究員
MIYAMOTO Mamoru

澤野久弥



研究当時 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ長、現 企画部長
SAWANO Hisaya

深見和彦



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ長
FUKAMI Kazuhiko