

1.5. アジアにおける水災害リスク評価と適応策情報の創生

課題代表者：吉谷 純一（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）

（土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター）吉谷純一・岩見洋一・澤野久弥・
徳永良雄・千田容嗣・津田守正・栗林大輔・海野 仁・大原美保・Shrestha Badri Bhakta・Abdul Wahid
Mohamed RASMY・萬矢敦啓・宮本 守・工藤 俊・牛山朋来・長谷川聡・郭 榮珠・E.D.P Perera・
小関博司・Sanchez Patricia Ann Jaranilla・Maksym Gusyev・LIU Tong・山崎祐介・萩原葉子・
南雲直子・竹内邦良・小池俊雄
（山梨大学生命環境学部）馬籠 純

a. 要約

本課題では、アジアの5河川流域における洪水及び渇水リスク評価を行う。このため、今年度は、今までの現地調査や利用可能データを考慮し水災害リスク評価の具体的方法を再検討し、洪水及び渇水リスクの変化は農業生産額の将来変化で示すこととした。具体には、洪水リスクを浸水被害額で、渇水リスクを灌漑できないことに伴う収穫減で表す。

パンパンガ川流域においては、力学的ダウンスケーリング手法を改変した。洪水リスクに関しては、バイアス補正、年最大48時間雨量の発生頻度分析、現在気候と将来気候の確率雨量の設定を行い、洪水リスク評価モデルにより農作物被害額を算出した。洪水リスク評価モデルの一部である被害額算定モデルについては現地被害額データとの比較により検証を行っている。渇水リスクに関しては、貯水池運用実績を調査しその実績より貯水池運用モジュールを作成し、貯水池流入量を予測するBTOPモデルに連結させ、貯水位変動の計算と実績の比較によりその検証を行った。このモデルにより、現在気候と将来気候の灌漑できない面積を計算し、収穫減少額を算出した。

ソロ川流域においては、パンパンガ流域で用いた農業被害曲線を適用しても洪水被害額を適切に推定できることを確認するとともに、ウォノギリダム流入量を計算するBTOPモデルを構築した。メコン川流域においては、クラティエ地点の洪水流量の頻度分布曲線を計算するとともに、渇水リスク評価に必要な資料を収集した。チャオプラヤ川流域においては、洪水氾濫量の統計的評価と将来変化について検討した。インダス川流域においては、洪水氾濫モデルの融雪コンポーネントを改良し再現性を高めるとともに、渇水リスク評価のためのBTOPモデル構築を進めている。

b. 研究目的

本研究は、土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）が21世紀気候変化予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」ほかで開発してきた水文モデル、GCM 降雨バイアス補正手法等を、アジアの水災害が懸念される複数の河川流域に当てはめ、現在及び将来気候における洪水及び渇水に関し、ハザード評価を行い、加えて脆弱性評価を行うことにより、気候変化適応のための主要課題解決に向けた計画立案、意思決定等に必要な情報を創出としての水災害リスク評価を行うものである。

対象河川地域としては、最近大きな水災害を経験し、気候変動の社会的影響が大きいと予想される代表的な河川流域として、パキスタンのインダス川、タイのチャオプラヤ川、メコン川、インドネシアのソロ川、ならびにフィリピンのパンパンガ川の5河川流域を対象とする。

c. 研究計画、方法、スケジュール

研究対象とする水災害として、洪水と渇水の2つを取り上げ、対象5河川流域の主要産業である農業被害を基本的な指標としてリスク評価を行う。

前年度までに得られた各河川流域での水災害に関する知見を基に、リスク評価研究の方法を再整理し、図1.5-1に示した。雨量評価は洪水リスク評価、渇水リスク評価共通の項目であり、ダウンスケーリング、バイアス補正の後、洪水リスク評価のためには降雨の極値を、渇水リスク評価

のためには通年の降雨データを用いる。

図中の「洪水リスク評価モデル構築」及び「渇水リスク評価モデル構築」は、どちらもハザード評価と被害評価の部分からなる。洪水ハザード評価は河川の洪水と氾濫を計算できる RRI モデルを用い、渇水ハザード評価は、貯水池への流入を計算する BTOP モデルと貯水池運用モデルを組み合わせ用いている。ただし、貯水池がなく天水に頼る農地の場合は異なる方法で評価することにした。

洪水による農作物被害は、できるだけ現地で使われる被害関数入手し、これを修正して用いる。図 1.5-2 のとおり、被害関数は浸水深、浸水日数、育成段階区分から被害率を算出する式形となっている。

渇水被害は、図 1.5-3 のとおり、水不足で灌漑できないことによる収穫損失額で評価することにした。

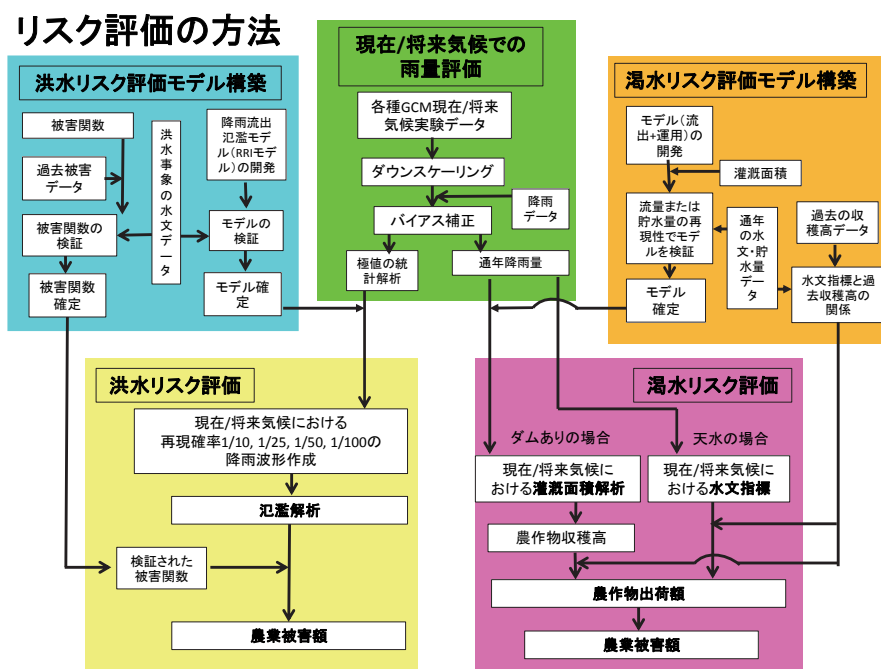


図 1.5-1：リスク評価研究の方法

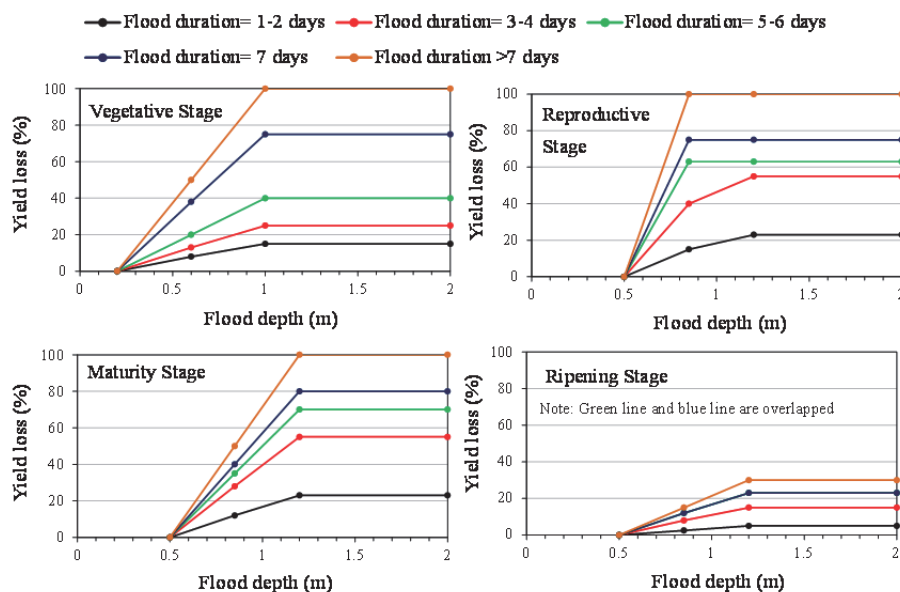


図 1.5-2：洪水リスク評価に用いる稲作被害関数

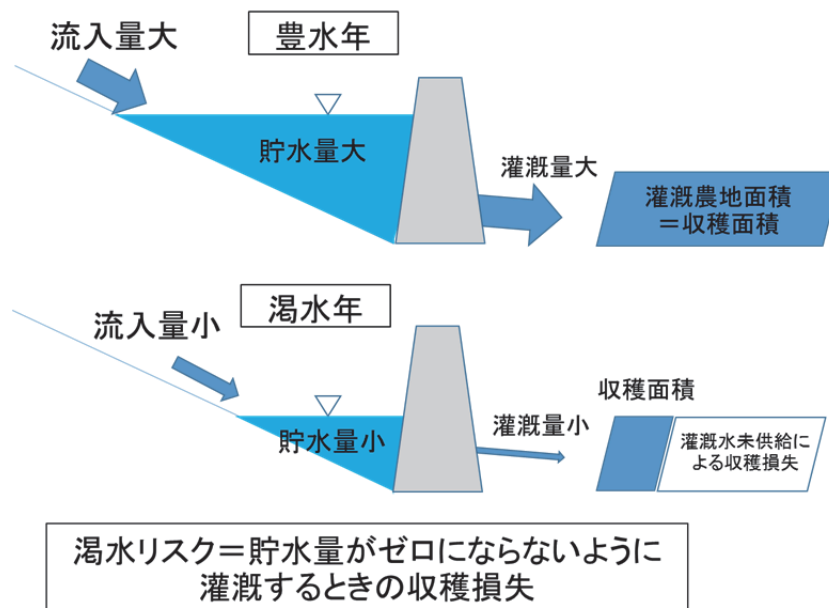


図 1.5-3：渇水リスク評価における被害額算定概念図

モデルの構築及びリスク評価研究に必要なデータ種類と取得状況を表 1.5-1 と表 1.5-2 に示した。研究に必要なデータが最も充実するパンパンガ川での一連の洪水及び渇水リスク評価を先行して行い、残る 4 流域でのリスク評価はパンパンガ川流域での評価に倣った方法で行うことにしている。

表 1.5-1：洪水リスク評価関連データ取得状況

			パンパンガ川	メコン川下流域 (ベトナム)	ソロ川	チャオプラヤ川	インダス川
RRIモデル構築	期間		2011年9月	1998-2003年	2007年12月-2008年1月	1980-2012年	2010年
	雨量データ		○	○	○	○	○
	流量データ		○	○	○	○	○
被害関数関連	現地被害関数		○	○ (ベトナム)	○ (パンパンガ川の関数を適用)	○ (タイ)	調査中
	検証対象洪水		2011年9月	2000年	2007年12月-2008年1月	2011年	2010年
	被害実績データ (どちらか一方で検証可能)	被害面積	×	○ (精査中)	○ (県単位)	調査中	調査中
		被害額	○ (県単位)	調査中	○ (流域単位)	調査中	調査中

表 1.5-2：渇水リスク評価関連データ取得状況

		パンパンガ川	メコン川 下流域 (カンボジア)	ソロ川	チャオブラ ヤ川	インダス川
BTOPモデル 構築	期間	1980- 2014年	1979- 2003年	1983- 1999年	1980- 2012年	1995- 2012年
	雨量データ	○	○	○	○	調査中
	流量データ	○	調査中	○	○	△
	ダムデータ	○	—	○	○	調査中
灌漑農地面積		○	○	○	○	調査中
渇水被害関連 データ(ダム有 解析用)	毎年の灌漑面 積/収穫高	○ 1989-2013年	—	×	○ 2007-2014年 (県単位)	調査中
	渇水被害デー タ	×	—	○ (県単位)	○ 2002-2013年 (国単位)	調査中
農作物収穫高 (天水解析用)	毎年の収穫高	×	○ 2009, 2011, 2012 年(県単位)	×	○ 2007-2014年 (県単位)	調査中

d. 平成 27 年度研究計画

小流域における高解像度の時間雨量データを得るために必要なダウンスケーリング手法について、前年度までに明らかになった問題点を考慮した修正を行い、対象河川流域における各種 RCP シナリオ実験について必要なダウンスケーリングを行う。また、様々なシナリオ／気候実験データに対応して、現地河川流域スケールでの洪水・渇水ハザード指標とその不確実性の予測結果をとりまとめる。

さらに、各対象河川流域について、現地行政機関と連携を取りながら、引き続き水災害被害データや水需給関係情報などのデータの収集と現地調査を実施するとともに、洪水リスク評価モデルや渇水リスク評価モデルを構築し、将来の気候変動による影響評価を行う。

e. 平成 27 年度研究成果

1.5.1. フィリピン・パンパンガ流域での水災害リスク評価

1.5.1.1. 現在及び将来気候での雨量評価

パンパンガ川流域では、GCM 温暖化実験データを力学的ダウンスケーリングで行ってきた。平成 26 年度は、MRI-AGCM3.2S と 3.2H のデータを用いてダウンスケーリングを進めており、現在気候（2 種類）および RCP8.5 将来気候（5 種類）のそれぞれ 25 年間を対象としている。領域モデルは WRF を使い、水平解像度 15km と 5km へのダウンスケーリングを行った。これまで、Kain&Fritsch (KF) 積雲パラメタリゼーションスキームを用いていたが、弱い降水を過大に出力し、豪雨が過小に表現されるバイアスがあった。

平成 27 年度は、バイアス補正手法の開発と、積雲パラメタリゼーションスキームの調整を行い、より信頼性の高い降水分布を得ることを目指した。

積雲スキームは、KF スキームが開発された北米に比べて湿度が高い日本付近に適合させるため、気象庁において修正された KF スキーム（成田,2008）を用いて再計算を行った。すると、バイアスは残るものの、弱い降水が減少するといった改善が得られた。

バイアス補正手法は、猪股他（2009）の手法を基にして、地上雨量計の 22 年間のデータを基準として行った。しかしながら、地上雨量計の観測点は 8～17 地点と少なく、時間的にも不連続であるため、ダウンスケーリング出力値と 1 対 1 で対応させるには十分ではない。そこで、流域平均雨量の日別値が地上雨量計の値に合うようにバイアス補正を行った。すると、雨量強度別の出現頻度の他、年最大 24 時間雨量などの極値も、雨量計のものと合致した。

図 1.5-4 は、ダウンスケーリングした降雨量にバイアス補正処理を施したものについて、年最大 48 時間雨量の頻度解析を行ったものである。左右のそれぞれの図に、地上雨量計（黒）と

ERA-interim 再解析のダウンスケーリング結果（緑）によるものも合わせて表示した。図左のMRI-AGCM3.2Sの結果では、現在気候（青）は、雨量計やERA-interim に比べて過小となった。温暖化実験（赤～黄）は、概ね現在気候よりも大きく、特にマルチモデル平均 SST を用いたもの（赤）が最も大きかった。1/20 確率雨量は現在気候の 232mm から 318mm に増加した。図右のMRI-AGCM3.2Hの結果も似た傾向であり、1/20 確率雨量は 249mm から 289mm に増加し、いずれの場合も温暖化後に年最大 48 時間雨量が増加することを示した。

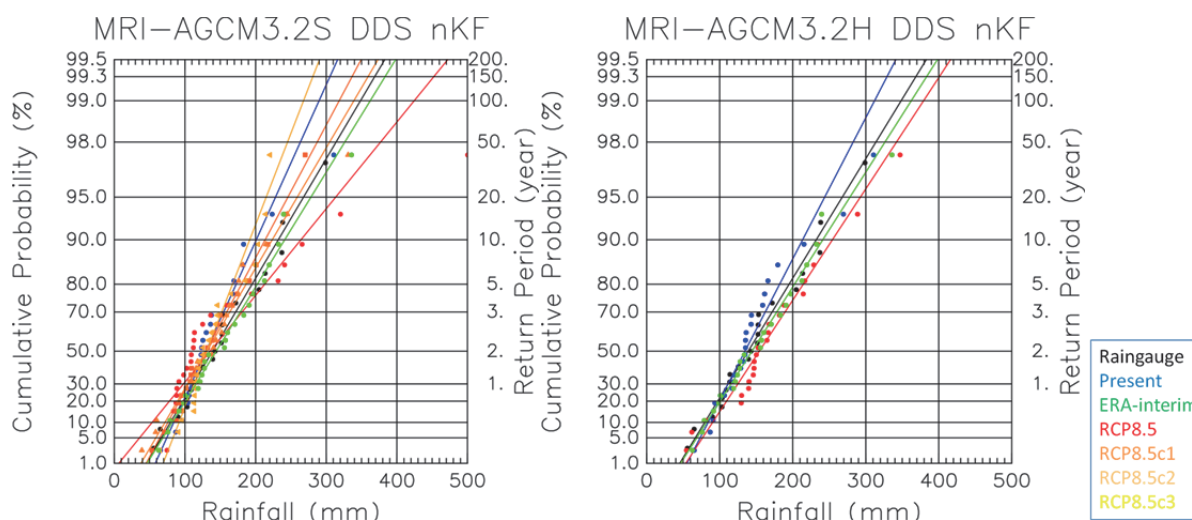


図 1.5-4 : パンパンガ川流域の年最大 48 時間雨量の頻度解析。

(左) MRI-AGCM3.2S, (右)MRI-AGCM3.2H の結果。

洪水リスク評価に用いる T 年確率雨量 (T=10, 25, 50 または 100) の降雨波形は、2011 年 9 月洪水の各降雨強度に一律の倍率を掛けて作成した。

1.5.1.2. 洪水リスク評価

(1) Verification

We applied the abovementioned methodology and estimated flood damages on crop yields in the flooding areas for the September 2011 flood. In conclusion, the methodology using a finer Digital Elevation Model (DEM) was verified by comparing estimated and reported flood damages.

The fine resolution Digital Elevation Model (DEM) dataset is called the Interferometric Synthetic Aperture Radar (IfSAR). The IfSAR-DEM data, which was derived using intermap's airborne IfSAR data acquisition system, were obtained from the National Mapping and Resource Information Authority, Philippines. The IfSAR-DEM data is available at 5m grid size, which is up-scaled to 450m grid size in this study.

For comparison, the damage assessment is also conducted by using coarser DEM data of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM-DEM) (15 arc-seconds, approximately 450m grid size), which was derived based on spaceborne imaging radar-C/X-band Synthetic Aperture Radar.

The hazard assessment is conducted to estimate the damage by using Rainfall Runoff Inundation model. To estimate flood damage, the abovementioned flood damage functions are used to estimate the yield loss in rice-plants due to flooding. The estimated values of agricultural damage by using IfSAR-DEM and SRTM-DEM are compared with the reported values.

The agricultural damage is defined as a function of flood depth, flood duration and growth stage of the rice-plants as shown in Fig.1.5-2.

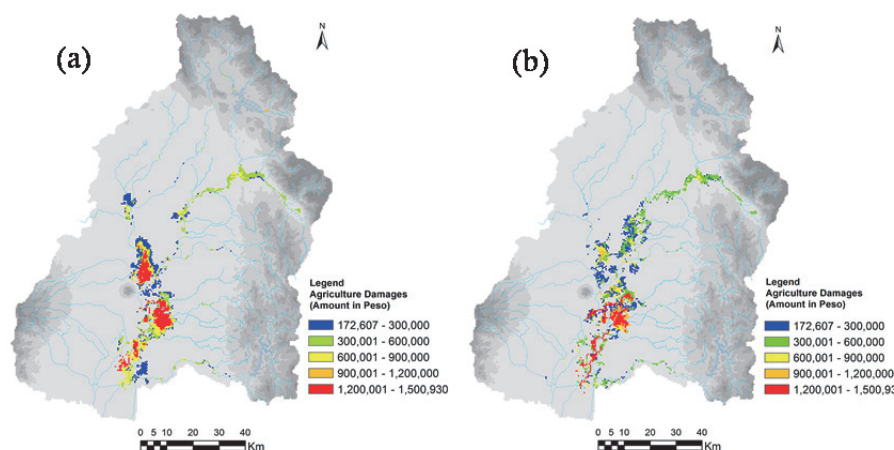


Fig1.5-5 : Distribution of calculated agricultural damage for September 2011 flood event (a) using IfSAR-DEM (450 m x 450 m grid size) and (b) using SRTM-DEM (450 m x 450 m grid size).

Table 1.5-3 : Comparison of calculated agricultural damage using IfSAR-DEM and SRTM-DEM for September 2011 flood case with reported values.

Province/ Municipality	Reported	Calculated (using IfSAR-DEM)		Calculated (using SRTM-DEM)	
	Damage (million peso)	Damage (million peso)	Area affected (ha)	Damage (million peso)	Area affected (ha)
Pampanga Province	1376	821.59	19318	723.41	16888
Calumpit M.	37	53.69	2308	43.2	1255.5
San Luis M.	114.88 (50.29*)	46	1923	43.4	1174.5
Apalit M.	109.69	80.04	2349	70.29	1377
San Simon M.	78.08	92.05	1944	59.32	1356.75
Candaba M.	337.5	457.6	8808.75	395.2	8322.75

* Estimated damage in inundated area by using proportion of inundation area and total paddy area in the municipality (Inundated area=1923.75ha, Total Paddy Area=4394.25ha).

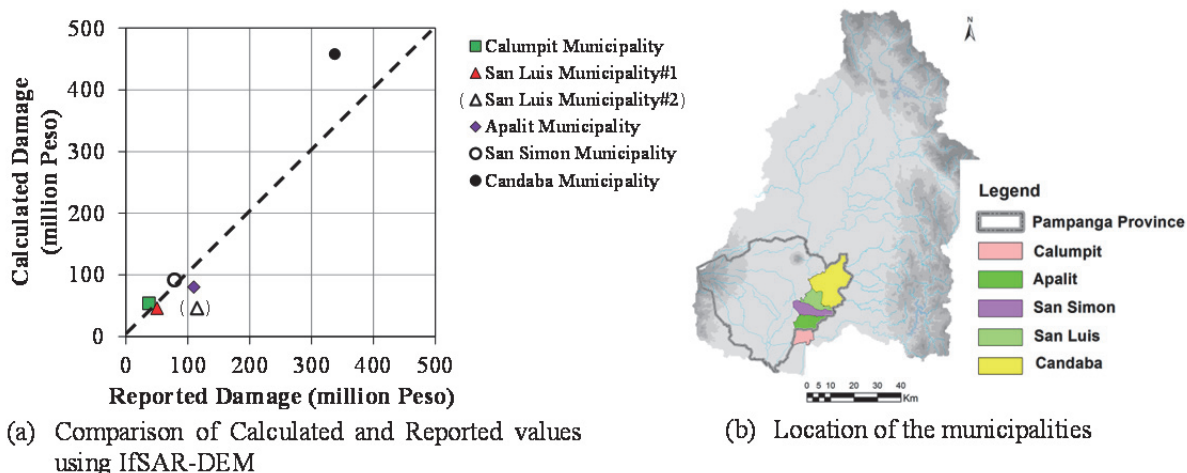


Fig. 1.5-6 : Plotting of calculated damage using IfSAR-DEM with reported values at Calumpit, San Luis, Apalit, San Simon and Candaba municipalities.

Fig. 1.5-5 shows the calculated agricultural damage (rice-crops) in the case of September 2011 flood event by using (a) IfSAR-DEM and (b) SRTM-DEM. According to the cropping calendar published by the National Irrigation Administration in 2013, the rice plants during the September 2011 flood was at the

maturity stage. Thus, the damage functions of the maturity stage were used to estimate the production loss of rice crops for the September 2011 flood event. The total estimated damages by using IfSAR-DEM and SRTM-DEM are estimated to be 1475.78 and 1259.46 million pesos, respectively.

Table 1.5-3 compares the calculated agricultural damage by using IfSAR-DEM and SRTM-DEM with reported values and the table shows that the calculated damage using IfSAR-DEM is more agreeable with reported values. Fig. 1.5-6 shows the plotting of calculated damage using IfSAR-DEM and reported values and calculated damage is reasonable with the reported data. From the results, it can be concluded that the quality of DEM data affects the results of damage estimation and the fine resolution DEM is important to get more accurate results of damage estimation.

(2) Estimation of flood risk change in the future

We applied a $1/T$ exceedance probability hyetograph ($T=10, 25, 50$ or 100) to the verified flood risk assessment methodology. The assessment result for the $T=50$ case is shown in Figure 1.5-7.

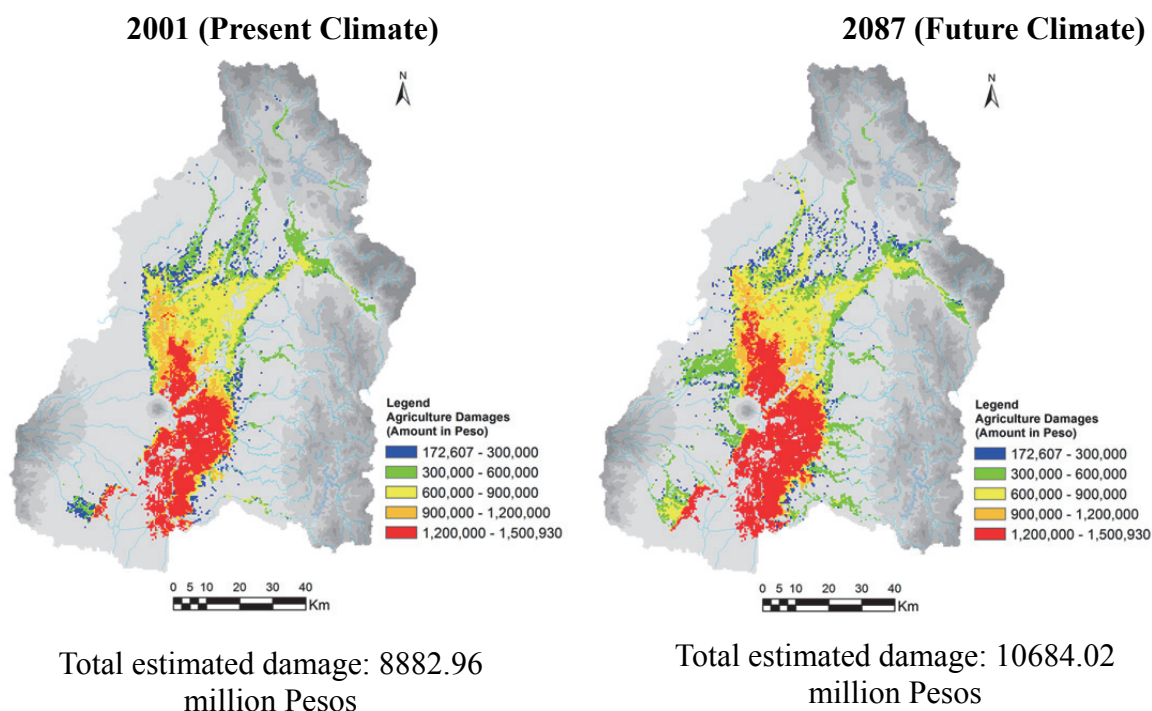


図 1.5-7 : 約 50 年確率の洪水リスク変化

1.5.1.3. 渇水リスク評価

We conducted drought assessment for the irrigated area from the Pantabangan Dam reservoir (PD). The PD is located in headwaters of the Pampanga River basin with a capacity of 3,000 million cubic meters (MCM) and has the main purpose to provide irrigation water supply for the downstream irrigated area of about 1000 sq. km. The PD is operated by National Irrigation Administration (NIA), which determines irrigated area of rice paddies based on the PD water volume at the beginning of dry (November) and wet (May) seasons, and has experienced several extreme droughts in the past. For 1997-1998 drought, the Pantabangan effective water storage was 20% of its capacity in November 1997 (the beginning of dry season) and only 48,484 ha were scheduled for irrigation. Despite this reduced irrigated area, the PD volume was insufficient to provide irrigation water until April 1998 (the end of dry season) resulting in damaged rice paddies.

In this year study, a new reservoir operation module was developed to simulate a multi-purpose operation of PD: constant discharge for electricity generation, variable discharge for irrigation water supply, and variable peak discharge for the gated and spillway flood control operation. The reservoir operation

module determines irrigated area of rice paddies based on the reservoir water volume at the beginning of dry (November) and wet (May) seasons as well as estimates daily irrigation water demand from PD for the scheduled downstream irrigated areas. The developed PD reservoir operation module was connected with the 15-arcsec (about 0.5-km) grid BTOP model, which was developed for the entire Pampanga River basin and calibrated to PD inflows between 1980 and 2012 in the previous years' study. The BTOP model with PD reservoir operation module was run with local observed precipitation and validated with historical PD volume and NIA irrigated area datasets from 1980 to 2003. From the reservoir operation module calibration, we selected a special type of PD reservoir operation: constant irrigated area of 820 sq. km during wet season and estimated area based on PD volume during dry season. This simulation of PD special operation resulted in a good match between simulated and historical data especially during dry periods of 1983-1987 and 1993-1999 while other combinations of PD operation had a poorer performance (Figure 1.5-8). As a result, the PD reservoir module with the special operation was selected for the drought assessment of PD under present and future climates.

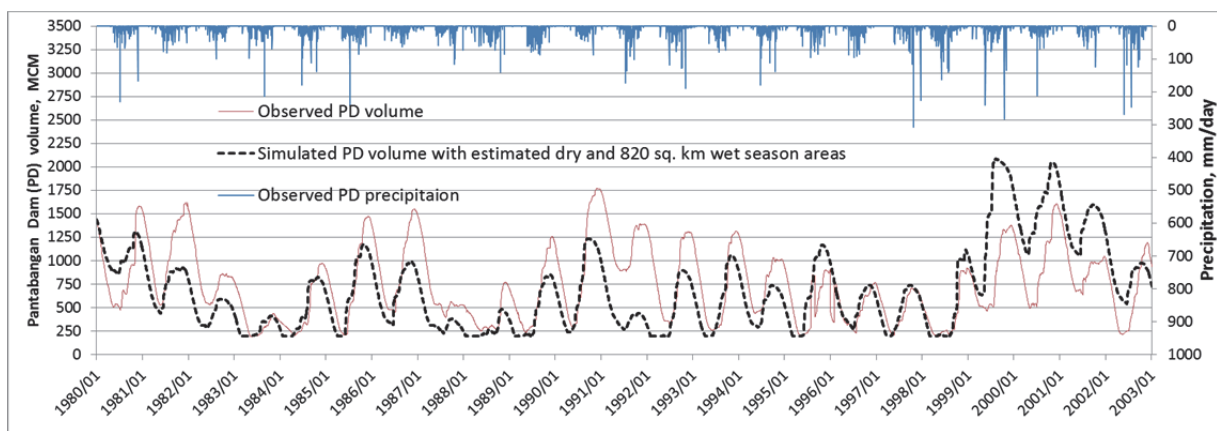


Figure 1.5-8 : Simulated PD volume using BTOP model with local precipitation and PD reservoir module with estimated irrigation area for dry season and constant irrigation area of 820 sq. km for wet season.

For the climate change drought assessment, we investigated PD operation using MRI-AGCM-3.2S precipitation with the Representative Concentration Pathways (RCP) 8.5 emission scenario simulated with four sea surface temperature patterns: mean of 28 CMIP5 models, Cluster 1 (c1) of 8 models, Cluster 2 (c2) of 14 models and Cluster (c3) of 6 models (Kitoh and Endo, 2015). The local PD precipitation data, which has a maximum daily precipitation of 308 mm/d and 25-year annual average of 1885 mm/yr, was used for statistical bias-correction of the MRI-AGCM-3.2S precipitation. The bias-corrected resulted in 1936 mm/yr (AMIP), 1958 mm/yr (RCP8.5), 1687 mm/yr (RCP8.5-c1), 1932 mm/yr (RCP8.5-c2), and 1762 mm/yr (RCP8.5-c3). In addition, the bias-corrected maximum daily precipitation, which are important for the replenishment of PD during wet seasons as well as flood control operation, was 308 mm/d (AMIP) and 608.07 mm/d (RCP8.5), 441 mm/d (RCP8.5-c1), 499 mm/d (RCP8.5-c2), and 365 mm/d (RCP8.5-c3). All these cases were simulated using the BTOP model with PD operation and we demonstrate drought assessment of PD for dry season agriculture under RCP8.5 (mean) and RCP8.5-c1, which represents uniform warming in both hemispheres (Kitoh and Endo, 2015). From the BTOP simulation, the 25-year average irrigation area of dry season is 650 sq. km for AMIP (1979-2003) and is 624 sq. km under the RCP8.5 case. This result indicates that despite slightly higher precipitation of future RCP8.5 precipitation the dry season irrigation area is slightly reduced. However, the BTOP simulation with RCP8.5-c1 precipitation results in 520 sq. km of dry season irrigated area, which is much lower compared to the present climate. In addition, the PD simulation of RCP8.5-c1 case resulted in exhausted PD volume at the beginning of dry season (November) and produced no planting during one dry season. From these results, the climate change impacts may intensive droughts in the downstream irrigated area due to lack of PD

water volume. Therefore, the PD inflows may be increased by utilization of trans-basin infrastructure and are planned to be evaluated under climate change in the next stage of this study.

上述の現在気候 AMIP、将来気候 RCP8.5 および RCP8.5-c1 を用いて求めた乾季における可能面積を基に、年平均収穫量ならびに年平均生産額の変化を試算した。ここで、単位面積当たり収穫量については、Country STAT Philippines（フィリピン政府統計局資料）によると、3.55 t/ha（2000 年）～4.20 t/ha（2003 年）であることから、4.0 t/ha と設定し、また、単位重量当たり価格については、8,800 Peso/t（2000 年）～9,440 Peso/t（2003 年）であることから、9,000 Peso/t と設定した。また、これらの数値は現在と将来で同一に設定した。試算結果を、図 1.5-9、表 1.5-4 に示す。乾季における灌漑区域の生産額については、現在気候では年平均 2,340 百万 Peso (AMIP)、将来気候では年平均 1,872 百万 Peso (RCP8.5-c1)～2,246 百万 Peso (RCP8.5)と試算され、将来気候では生産額の減少が見込まれた。

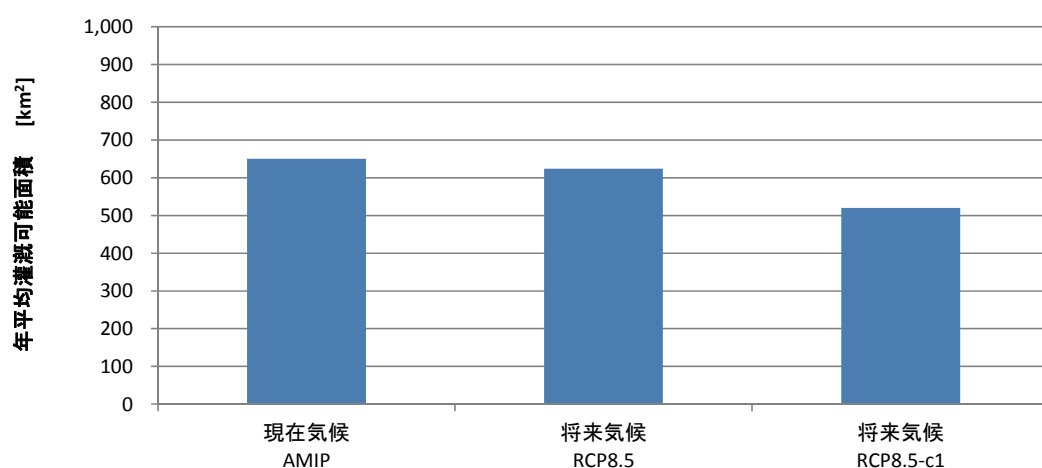


図 1.5-9：現在気候と将来気候における灌漑可能面積の比較

表 1.5-4：現在気候と将来気候における年平均生産額の比較

	現在気候 AMIP 1979年～2003年平均 (A)	将来気候 RCP8.5 1979年～2003年平均 (B)	変化率 (B)／(A)	将来気候 RCP8.5-c1 1979年～2003年平均 (C)	変化率 (C)／(A)
かんがい可能面積 (乾季) [ha]	65,003	62,379	0.96	51,997	0.80
単位面積当たり 収穫量 [t/ha]	4.0	4.0	–	4.0	–
単位重量当たり 米価 [PhP/t]	9,000	9,000	–	9,000	–
かんがい区域 生産額 (乾季) [× 10 ⁶ PhP／年]	2,340	2,246	0.96	1,872	0.80

1.5.2. ソロ川流域での水災害リスク評価

(1) ソロ川流域の将来の洪水氾濫及び流況の変化の推定

本節ではソロ川流域を対象として水災害リスクの将来変化を分析する。用いる降水量データはMRI-AGCM3.2S 現在気候（1979年～2003年）及びMRI-AGCM3.2S 将来気候（2075年～2099年）である。また、流出氾濫計算には降雨流出氾濫モデル（RRIモデル）を用いる。

前述の現在気候と将来気候をそれぞれ入力した計算結果を用いて、年ごとのピーク流量と最大氾濫量の頻度分析を実施した結果、両者ともリターンピリオド10年よりも長くなると現在気候と将来気候の差が顕著になる結果となった。これはイベントベースでの計算結果を用いた分析と同様の結果であり、将来では大規模な流量、氾濫量の出現頻度が増加することを示唆している。

また、現在気候、将来気候それぞれにおいて、流域平均の年最大4日積算雨量の頻度解析を実施した上で、以下に示す手順で、10年、25年、50年、100年のリターンピリオドに対する4日積算雨量を作成して各リターンピリオドに対するピーク流量、最大氾濫量を推定した。

- 1) 現在気候、将来気候それぞれの25年間における、最大4日積算雨量となる4日間を抽出する。
- 2) 抽出された4日間の雨量の時空間分布を採用し、頻度解析結果に応じた引き伸ばし率を乗じて各リターンピリオドに対する4日間の雨量の時空間分布を作成する。
- 3) 引き伸ばされた4日間の雨量を含む通年の雨量データをRRIモデルに入力し、それぞれのリターンピリオドに対するピーク流量、最大氾濫量を計算する。

表1.5-5は上述1)で抽出した4日積算雨量（表中のOriginal）と各リターンピリオドに対する値及び、それらをRRIモデルに入力して計算したピーク流量、最大氾濫量を示す。リターンピリオド間の違いを比較するための一例として、リターンピリオド10年と100年の雨量に着目する。現在気候では90 mm/4daysと106 mm/4dayの違いであり、その比は約1.2である。その一方で、将来気候では95 mm/4daysと132 mm/4daysで比は約1.4となる。つまり、低頻度の4日積算雨量は将来気候においてより大きな増加率となる。また、括弧内の値はOriginalに対する各リターンピリオドの値の比である。つまり、降水量における括弧内の値は引き伸ばし率そのものを表し、これを流量及び氾濫量における括弧内の値と比較することで、各水文量の4日積算雨量に対する感度を理解できる。現在気候のリターンピリオド100年に着目すると、4日積算雨量の比は109%であるのに対し、ピーク流量の比は109%、最大氾濫量の比は131%となる。このことから、最大氾濫量はピーク流量に比べてより顕著に増加することがわかる。将来気候でも同様にリターンピリオド100年に着目すると、現在気候ほどではないものの、最大氾濫量の増加率が流量の増加率に比べて大きい。なお、増加率の値そのものの違いは、洪水前の流域の湿潤状態や降雨量の時空間分布に依存すると考えられる。

表1.5-6は現在気候及び将来気候における流況を示したものである。まず平均値に着目すると、将来気候では豊水流量が増加し低水流量が減少することがわかる。このことから、洪水時などの極端なイベント時のみならず、流量の大小の差が大きくなることを示している。また、標準偏差に着目すると、豊水流量及び平水流量において大きくなる。すなわち、雨季の流量のばらつきが大きくなることを示唆している。

表 1.5-5：現在気候及び将来気候における、それぞれの 25 年間の最大 4 日積算雨量と各リターンピリオドに対する値及び、それらを RRI モデルに入力して計算したピーク流量、最大氾濫量

Present	Precipitation (mm/4days)	Discharge at Cepu (m3/s)	Inundation (mm)	Future	Precipitation (mm/4days)	Discharge at Cepu (m3/s)	Inundation (mm)
	value (ratio of the value to the original (%))	value (ratio of the value to the original (%))	value (ratio of the value to the original (%))		value (ratio of the value to the original (%))	value (ratio of the value to the original (%))	value (ratio of the value to the original (%))
Original	97 (-)	2,054 (-)	18 (-)	Original	126 (-)	3,236 (-)	102 (-)
10 year return period	90 (93)	1,928 (94)	14 (78)	10 year return period	95 (75)	2,860 (88)	73 (71)
25 year return period	97 (100)	2,055 (100)	18 (100)	25 year return period	109 (87)	3,037 (94)	86 (84)
50 year return period	101 (105)	2,157 (105)	21 (106)	50 year return period	120 (95)	3,176 (98)	97 (95)
100 year return period	106 (109)	2,245 (109)	23 (131)	100 year return period	132 (105)	3,311 (102)	108 (106)

表 1.5-6:現在気候及び将来気候における流況

単位: m3/s	現在気候		将来気候	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
豊水流量	959	148	1091	188
平水流量	377	84	389	138
低水流量	89	47	73	41
渇水流量	16	13	12	9

(2) 洪水及び渇水リスク評価

2007 年 12 月から 2008 年 1 月にかけてソロ川流域で発生した洪水による農業リスク評価を行うことを目的に、RRI モデルによる氾濫シミュレーション結果（工藤など、2015）に、パンパンガ川流域において開発した農業被害曲線(Shrestha et al., 2015)を試験的に適用し、その結果得られた推計被害面積及び推計被害額を統計データと比較した。その結果、流域全体の推計被害面積は約 66,000ha となり、統計値である約 60,000ha と近い値となった。また、被害額については、統計値は約 93 百万ルピーであるのに対し、推計値は約 144 百万ルピーとなった。

インドネシア・ソロ川流域の渇水リスクについては、長期流出解析手法である BTOP モデルを用いて流域のモデル化を実施した。1983 年~1999 年の観測日雨量を用いてウォノギリダム流入量を再現した結果、おおむね実流入量に近い再現結果が得られた。一方、1997 年~2006 年の乾季初頭におけるウォノギリダム貯留量と受益地における渇水被害面積との関係について整理したところ、明瞭な関係は見出せなかった。今後は、解析対象期間中のかんがい関連データを追加収集するとともに、水文データと渇水被害との関係を整理し、渇水リスクの評価を進める。

1.5.3. メコン川流域での水災害リスク評価

(1) Flood risk assessment

Inundation analysis was conducted for the Lower Mekong Basin (LMB) to evaluate the climate change impacts using the 20-km super high resolution atmospheric general circulation model, MRI-AGCM3.2S experiments. The selected MRI-AGCM3.2S experiments in the study were an AMIP-type experiment as present climate (SPA_m01: 1979-2003), and 4 members of RCP8.5 greenhouse gas emission scenario experiments with different sea surface temperature (SST) distributions, as future climate ensembles (Named as SFA rcp8.5, SFA rcp8.5-C1, SFA rcp8.5-C2 and SFA rcp8.5-C3) for 2075-2099. The considered LMB in Cambodia and Vietnam area was approximately 187,000 km² and it was about 24% of the total basin area of the Mekong River. Two hydrological models were employed in the study with the

bias-corrected precipitations of MRI-AGCM3.2S for the aforementioned experiments. The BTOP model (Block-wise TOPMODEL) with 20-km resolution was executed for the whole Mekong Basin and its discharge outputs at the Kratie station were obtained to utilize as the upstream discharge boundary condition for the Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model which was executed for inundation simulations for the LMB. The river discharge outputs of the RRI model were calibrated against the gauging stations of Kampong Cham, Chroy Changvar, Prek Kdam, Koh Khel and Neak Luong for the period of 10 years from 1998 to 2007. The inundation distribution outputs for that period were justified by the available flood maps for 1998 and 2000.

The calibrated RRI model was executed with the BTOP generated Kratie discharges and bias corrected precipitations for aforementioned climatic conditions. According to the obtained RRI simulation results for the climate scenarios, a significant increment of inundation distribution can be observed for the RCP8.5 future inundation distribution outputs when compared with AMIP-type present experiment. Figure 1.5-10 depicts the 25 years averaged inundation distributions for present and future climatic experiments. The inundation area increments for the future climatic conditions compared with the present AMIP-type experiment are 1.34, 1.26, 1.35 and 1.24 respectively for RCP8.5 experiments with four SST distributions. The conducted frequency analyses for the Kratie discharge based on Gumble and GEV distributions for the present and future experiments are summarized in Figure 1.5-11 and 1.5-12. The increment ratios of the Kratie discharges for the return periods of 10, 25, 50, 75 and 100 are summarized in the Table 1.5-7. The future flood damages for the agriculture are supposed to conduct based on the produced inundation simulations in this study as the next step.

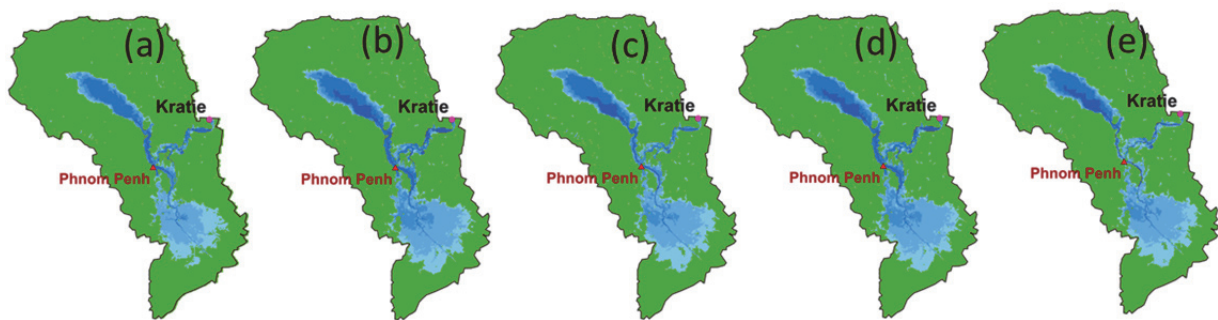


Figure 1.5-10 : 25 years averaged inundation distributions: (a) SPA_m01, (b) SFA rcp8.5, (c) SFA rcp8.5-C1, (d) SFA rcp8.5-C2 and (e) SFA rcp8.5-C3.

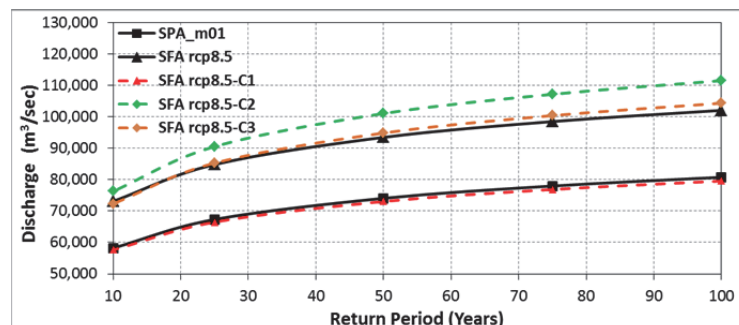


Figure 1.5-11 : Return periods for Kratie discharges for climatic experiments based on Gumble distribution

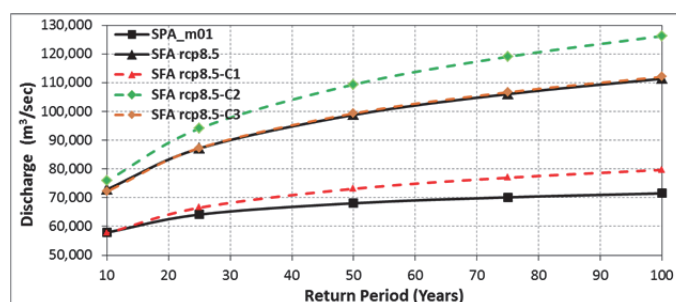


Figure 1.5-12 : Return periods for Kratie discharges for climatic experiments based on GEV distribution

Table 1.5-7 : Increment comparison of the Kratie discharge for future rcp8.5 climatic scenarios with the present AMIP type climatic experiment SPA_m01

Return Period	(SFA rcp8.5/SPA_m01)		(SFA rcp8.5-C1/SPA_m01)		(SFA rcp8.5-C2/SPA_m01)		(SFA rcp8.5-C3/SPA_m01)	
	Gumble	GEV	Gumble	GEV	Gumble	GEV	Gumble	GEV
100	1.26	1.56	1.00	1.11	1.38	1.77	1.29	1.57
75	1.26	1.51	1.00	1.10	1.37	1.70	1.29	1.52
50	1.26	1.45	1.00	1.07	1.36	1.61	1.28	1.46
25	1.26	1.36	1.00	1.04	1.34	1.47	1.27	1.36
10	1.26	1.26	1.00	1.00	1.31	1.31	1.24	1.25

(2) 渇水リスク評価

メコン川流域の渇水リスクについては、タイ東北地方に広がる天水田を対象に米の作付面積、収穫面積、収穫量に関する資料を収集した。今後は、降水量と収穫面積、収穫量の関係を整理し、渇水リスクの評価を進める。

1.5.4. タイ・チャオプラヤ川での水災害リスク評価

(1) 洪水リスク評価

チャオプラヤ川流域では、SPA-m01、SFA-rcp85、SFA-rcp85-c1~c3を用いて、それぞれ25年間の連続した期間の降雨流出氾濫過程を、RRIモデルにより解析を行っている。RRIによる解析から得られた年最大氾濫量は、年最大値を記録した日から6ヶ月間さかのぼった期間の累積雨量(6ヶ月雨量)ともっとも相関が高いので、6ヶ月雨量と年最大氾濫量の関係や、2011年規模の降雨及び氾濫の再現期間とその将来変化を、年最大値資料(AMS)及び閾値超過資料(POT)を用いて、検討している。2011年規模の6ヶ月雨量は、1400mmである。この規模の降雨の再現期間は、Gumbel分布に当てはめれば、現在気候で25年であり、将来気候では7~10年程度に短くなった。これは、分布関数の勾配減少によるものと、領域のx軸方向へのシフトによるものである。一方2011年の洪水氾濫量は、流域面積で除して水高換算すれば、150mm程度である。これには、指数分布を用いれば、再現期間は、現在気候で31年、将来には10~11年に短くなる。こちらは、勾配が小さくなることによるものである。

図1.5-13に6ヶ月雨量と年最大氾濫量の関係を示す。これによれば、現在気候でも将来気候でもほぼ0.3程度の勾配を持つ線形関係にある。ここで、1400mmを越えるような幾つかの降雨イベント発生している。さらに0.3の傾きから大きく上に外れている、SPA-m01(A)とSFA-rcp85-c3(B)がある。また、同じくSFA-rcp85-c3(C)は、Bと雨量ではほとんど差が無いにもかかわらず、氾濫量はBの半分の150mm程度しかない。ここで、AおよびBについては、年最大氾濫量の1ヶ月程度前に200mm以上の降雨がある。Cは5月ごろから一定量の降雨があるが、その時間当たりの増加割合はAおよびBほど大きく急にはならない。このことから、雨季の終わりに200mm以上の降雨があると、従来の雨量の増加に対する氾濫量の増加の関係を大きく越えた氾濫量になる可能性が高くなることがわかった。図1.5-14は、図1.5-13におけるA、BおよびCの6ヶ月雨量の空間分布である。これを見てみると、A、BおよびCのいずれも流域中央に降水が生じている。6

ヶ月の積算雨量では、明らかに A よりも C の方が多いが、降雨の特性の違いにより、A の方が大きな氾濫量を生じていた。

(2) 渇水リスク評価

タイ・チャオプラヤ川流域の渇水リスクについては、長期流出解析手法である BTOP モデルを用いて流域のモデル化を実施した。1980 年~2003 年の観測日雨量を用いてブミポンダム、シリキットダム流入量を再現した結果、おおむね実流入量に近い再現結果が得られた。また、天水田における渇水評価の基礎となる米の作付面積、収穫面積、収穫量に関する資料を収集し、分析に着手した。今後は、灌漑エリアについては長期流出解析手法を用いてリスク評価を進めるとともに、天水田についても降雨と収穫面積、収穫量の関係を整理し、渇水リスクの評価を進める。

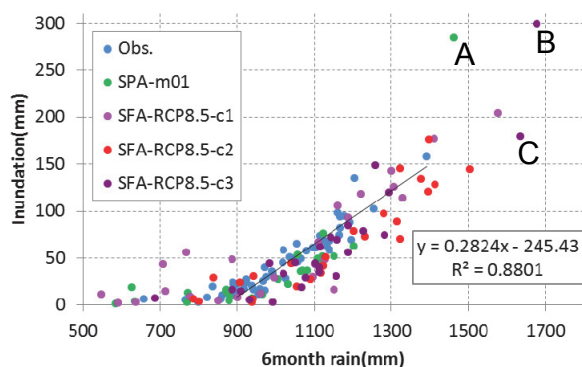


図 1.5-13: 6 ヶ月雨量と年最大氾濫量の関係。図の直線は、水色で示す、観測雨量データとそれを RRI に与えて得られた氾濫量の関係において下記直線である。

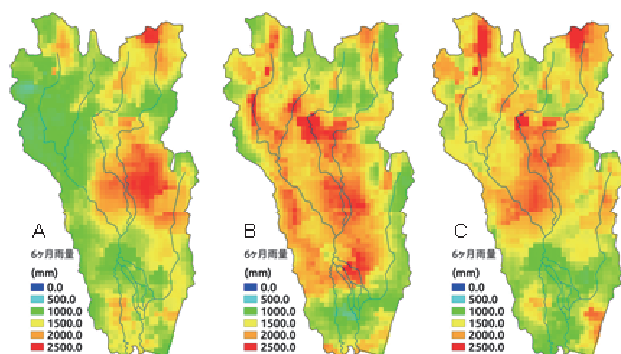


図 1.5-14 : 図 1.5-13 の A,B および C における 6 ヶ月雨量の空間分布

1.5.5. パキスタン・インダス川流域での水災害リスク評価

(1) Flood risk assessment

In Pakistan extreme water hazards management (floods and droughts) is an increasingly important issue. There are strong indications that in South Asia, particularly in Pakistan, climate change is intensifying the climate-related natural disasters including floods, droughts, cyclones and landslides. In order to address those disasters, it is indispensable to assess water related hazards under the changing climate scenarios in the future. This study focuses the main stem of the Indus River (Figure1.5-15).

IFAS was introduced and implemented for long-term simulations in the Indus River Basin in Pakistan. In addition, snowmelt was calculated by degree-day method with ground-based air temperature and daily fractional snow cover from MODIS, which remarkably improved the model performance in the Upper Indus Basin in particular the early monsoon. Monsoon of 2010 was selected for IFAS snowmelt module calibration as representatives of extreme flood (Figure1.5-16).

Long-term simulations were conducted on daily basis with MRI-AGCM3.2S outputs without considering snowmelt, as precipitation is the major contribution to discharge from middle to lower Indus River Basin. Simulated discharge at middle to lower Indus was at reasonable magnitude especially during monsoon season under the present scenarios from 1979 to 2003(Chashma in Figure1.5-17). Results under

the general future scenarios from 2075 to 2099 showed 10-20% increase in discharge, while there was an extreme event in 2088 due to extremely heavy precipitation (Figure1.5-18). On the other hand, discharge simulated in the Upper Indus Basin (Tarbela in Figure1.5-17 and Figure1.5-18) was missing the peaks in general.

In the Upper Indus Basin, snowmelt contributes as much as 40% to discharge, in particular early monsoon season. Trial simulations with snowmelt were conducted with raw air temperature and fractional snow cover from MRI-AGCM3.2S. The main sources of simulation discrepancies were under evaluation, such as bias in air temperature and snow coverage. With the corrected inputs, simulated discharge both in the past (1979–2003) and in the far future (2075–2099) can be obtained, which will be analyzed for future water resources in the local area as well as for water related hazards under different future climate changing scenarios.

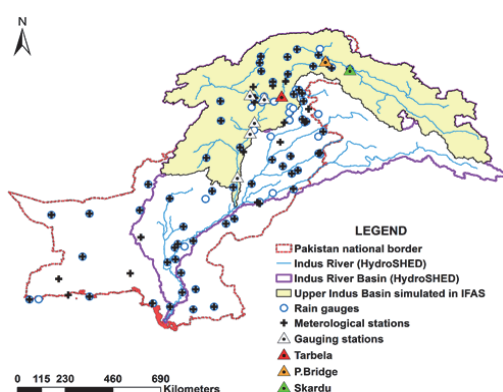


Figure1.5-15 : The study area with meteorological and gauging stations.

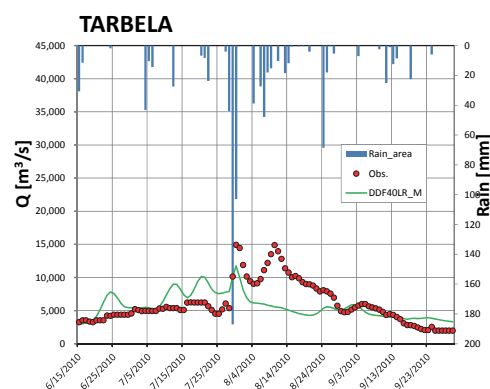


Figure1.5-16 : Validation of the snowmelt included simulations at Tarbela in 2010.

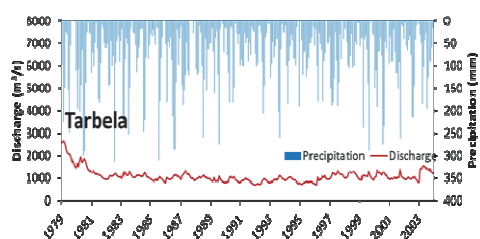


Figure1.5-17 : Monthly precipitation and average discharge without snowmelt simulated with MRI-AGCM 3.2S SPA-M01 (1979–2003).

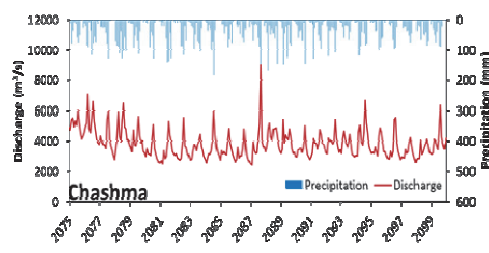
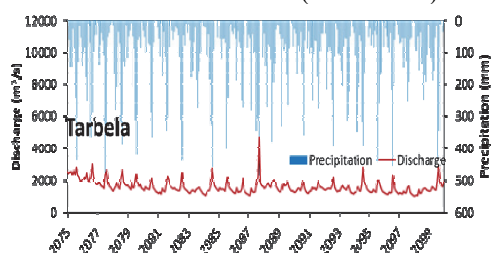
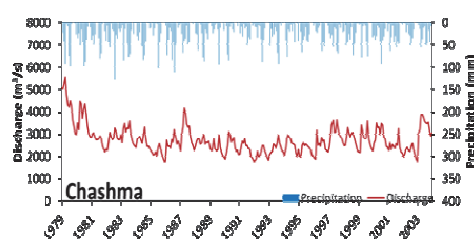


Figure1.5-18 : Monthly precipitation and average discharge without snowmelt with MRI-AGCM 3.2S SFA-rcp85 (2075–2099).

(2) 渇水リスク評価

パキスタン・インダス川流域の渇水リスクについては、長期流出解析手法である BTOP モデルの構築に着手した。今後は、BTOP モデルを用いて現在気候・将来気候における河川流況を試算するとともに、渇水リスクの評価を進める。

f. 考察

(1) 現地政府機関との意見交換及び現地調査

災害リスク評価のためには、各種モデルを用いて推算した評価結果の検討を行うために、その災害の被害データが必要である。しかし、被害データについては、現地政府機関が提供に慎重であることも多いため、その入手には、当該機関との複数回の意見交換を通じて、信頼関係を構築することが必要となる。また、現地に即したリスク評価を行うためには、現地調査を行って現地の地形や社会的状況などを理解することが重要である。このような認識のもと、積極的に現地国を訪問するなどして、政府機関との意見交換や現地調査を実施している。平成 27 年度においては、下記のような意見交換を行った。

平成 27 年 8 月 4 日に澤野上席研究員がインドネシア・ジャカルタの公共事業・国民住宅省を訪問し、Mudjiadi 水資源総局長、Widiarto 水資源ネットワーク局長、水資源管理局の Charisal 河川流域計画課長に面会し、当プログラムにおいてソロ川で進めている気候変動による洪水・渇水の影響に関する研究について説明した。Mudjiadi 総局長からは、ソロ川流域での渇水が懸念されており、今後は流域での対応が必要で、本研究に対しても、今後の流域管理に資するものとして期待していることが表明された。



図 1.5-19 : インドネシア 公共事業・国民住宅省水資源総局長への訪問（右：Mudjiadi 水資源総局長、左中央：澤野上席研究員）

g. 引用文献

- 成田正巳, 2008 : Kain-Fritsch スキームの改良とパラメータの調整 : 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 103-111.
- 猪股広典, 竹内邦良, 深見和彦, 2009 : GCM 降水量データの統計的バイアス補正手法に関する一考察. 水工学論文集, 53, 223-228.
- Kitoh, A. and H. Endo, 2015: Changes in precipitation extremes projected by a 20-km mesh global atmospheric model. Water and Climate Extremes.
- 工藤俊, 佐山敬洋, 長谷川聡, 岩見洋一, 2015 : インドネシア・ソロ川流域における洪水流量及び氾濫量に着目した気候変動影響評価, 水工学論文集, 第 59 巻.
- B.B.Shrestha,T.Okazumi,M.Miyamoto,H.Sawano,2015:Food damage assessment in the Pampanga river basin of the Philippines, Journal of Flood Risk Management.

h. 成果の発表

論文（受理、印刷済）

1. Badri Bhakta Shrestha, Hisaya Sawano, Miho Ohara, Naoko Nagumo, 2015 : RICE-CROPS FLOOD DAMAGE ASSESSMENT IN THE PAMPANGA RIVER BASIN OF THE PHILIPPINES. Advances in River Engineering, JSCE.
2. Badri Bhakta Shrestha, Toshio Okazumi, Mamoru Miyamoto, Hisaya Sawano, 2015 : Flood damage assessment in the Pampanga river basin of the Philippines. Journal of Flood Risk Management, John Wiley & Sons Ltd.
3. 大原美保, 南雲直子, Badri Bhakta Shrestha, 澤野久弥, 2015 : 地域データの乏しいアジアの洪水常襲地帯における簡便な洪水リスク評価手法に関する研究 ―フィリピン共和国パンパンガ川流域を対象として―. 地域安全学会論文集, 27, 225-235.
4. M.A Gusyev, A. Hasegawa, J. Magome, D. Kuribayashi, H. Sawano, S. Lee, 2015: Drought assessment in

the Pampanga River basin, the Philippines - Part 1: Characterizing a role of dams in historical droughts with standardized indices. 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia.

5. Hasegawa, A., M. Gusyev, T. Ushiyama, J. Magome and Y. Iwami, 2015 : Drought assessment in the Pampanga River basin, the Philippines Part 2: A comparative SPI approach for quantifying climate change hazards. 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia.

口頭発表

1. 牛山朋来, 宮本守, 長谷川聡, 岩見洋一, 2015 : フィリピン・パンパンガ川流域の力学的ダウンスケーリングによる降水のバイアス補正. 2015 年度春季大会講演予稿集.
2. Naoko NAGUMO, Hisaya SAWANO, 2015 : Characteristics of fluvial landforms and floods in the Pampanga River basin central Luzon. XIX INQUA Congress.
3. 南雲直子, 大原美保, バドリ・バクタ・シュレスト, 澤野久弥, 2015 : ルソン島中部における洪水常襲地帯の浸水特性に応じた地域区分. 日本地理学会発表要旨集.
4. 大原美保, バドリ・バクタ・シュレスト, 南雲直子, 澤野久弥, 2015 : 洪水常襲地帯における洪水災害対応シナリオ作成手法の提案 -フィリピン共和国 パンパンガ川流域での取り組み. 第 70 回土木学会年次学術講演会講演概要集.
5. 牛山朋来, 長谷川聡, 岩見洋一, 2015 : 利根川流域における温暖化実験結果の力学的ダウンスケーリング. 2015 年度秋季大会講演予稿集.
6. 長谷川聡, Maksym Gusyev, 岩見洋一, 2015 : 気候変動評価のための SPI. 日本気象学会 2015 年秋季大会.
7. Ushiyama, Miyamoto, Hasegawa, Iwami, 2015 : Dynamic downscaling and bias correction of rainfall in the Pampanga Basin, Philippines, for flood risk change on global warming. AOGS2015, 4 Aug, Singapore.
8. Ushiyama, Miyamoto, Hasegawa, Iwami, 2015 : Dynamic downscaling of global warming experiment in Pampanga River Basin, Philippines, for water hazard risk study. Strategic Strengthening for South-South Cooperation for Modelling and Managing Hydro Hazards (UNESCO Workshop), Aug.31-Sep.01,2015, Jakarta.
9. 徳永良雄, 2015 : Climate Change impact analysis on water-related disasters and adapting measures in JAPAN. The 22th Hydraulic Engineering Conference in Taiwan
10. Daisuke KURIBAYASHI, 2015: Importance of Data and Information. International Symposium on "Integrated Actions for Global Water and Environmental Sustainability"
11. Hasegawa, A., M. Gusyev, J. Magome and Y. Iwami, 2015 : A comparative SPI approach for quantifying historical and on-going droughts in the Pampanga River Basin. the Philippines, 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia
12. M. Gusyev, A. Hasegawa, P. Sanchez and H. Sawano, 2015 : Using drought indicators for disaster risk management: A case study of dam infrastructure in the Pampanga River Basin, the Philippines. APEC Climate Symposium 2015, Manila, Philippines
13. M. Gusyev, A. Hasegawa, J. Magome, H. Umino and H. Sawano, 2015: Drought assessment in the Pampanga River basin, the Philippines - Part 3: Evaluating climate change impacts on dam infrastructure with standardized indices. 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia
14. Kuniyoshi Takeuchi, Maksym Gusyev, Jun Magome and Muhammad Masood, 2015: Global Floods and Droughts Simulation to Support the International Flood Initiative and the International Drought Initiative of the UNESCO International Hydrological Programme. AGU 2015 Fall Meeting, December 14 – 18, San Francisco, USA.

アウトリーチ活動

1. 鈴木篤, 2015 : アジアにおける水災害リスク評価と適応策情報の創生、「水災害分野における気候変動による影響と適応に関するシンポジウム」 ～後悔しないためのパラダイムとは～、国立オリ

ンピック記念青少年総合センター カルチャー棟 小ホール、平成 27 年 5 月 29 日

2. 澤野久弥,2015 : Evidence-based Risk Assessment for the Enhancement of Flood Resilience / Session 1.3.AP Climate change adaptation and mitigation in Africa, Americas, Asia-Pacific, Europe and the Mediterranean region - Building resilience to water-related disasters in the Asia-Pacific region, 7th World Water Forum 7 (Republic of Korea) ,12-17 April 2015
3. 澤野久弥,2015 : Flood Disaster Risk Management for Disaster Risk Reduction / WORKSHOP ON RISKS AND IMPACTS ON FLOODS FROM EXTREME EVENTS IN ASEAN COUNTRIES (Republic of Indonesia) ,5 August 2015
4. Badri Shrestha,2016 : Flood Risk Assessment, Workshop on Evidence-based Flood Contingency Planning, Calumpit Municipality SB Hall,17 February 2016
5. Badri Shrestha,2016 : Flood Hazard/Risk Assessment, Workshop on Evidence-based Flood Contingency Planning, Luxent Hotel, Quezon City,18 February 2016
6. Hisaya Sawano,2016 : SOUSEI Project (Program for Risk Information on Climate Change) and Future Earth Research, Workshop on Evidence-based Flood Contingency Planning, Luxent Hotel, Quezon City,18 February 2016
7. Hisaya Sawano,2016 : Flood Disaster Risk Reduction, Asia Water Cycle Symposium 2016,Takeda Hall, University of Tokyo,1-2 March 2016