# 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:田中 茂信

(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)

 (土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター)田中茂信・竹内邦良・深見和彦・岡積 敏雄・上野山智也・佐山敬洋・萬矢敦啓・鍋坂誠志・廣江亜紀子・牛山朋來・郭 栄珠・上米 良秀行・杉浦 愛・長谷川聡・宮本 守・E.D.P Perera・Maksym Gusyev・Shrestha Badri Bhakta
 (山梨大学 大学院医学工学総合研究部)馬籠 純

### a. 要約

洪水や渇水といった水災害リスクが気候変動によってどの程度変化するのかを、いくつかの特 定脆弱地域(河川流域)において、不確実性を含めて定量的に予測し、かつ、それに伴う社会経 済影響を評価することを目的とする。平成24年度は、個別河川流域での洪水ハザードを定量的に 予測する手法を開発するために、21世紀気候変動予測革新プログラム(革新プロ)で開発したバ イアス補正、洪水流出解析モデルを基盤としながら、気象・水文資料の不足状況も考慮しつつ、 GCMの予測を様々な河川流域に適した時空間スケールにダウンスケーリング手法する手法の開 発、流域スケールでの洪水氾濫を含む洪水ハザード評価モデルの開発に着手した。また、洪水の みならず渇水の際の社会経済被害を評価するための洪水・渇水リスク評価モデルの開発に着手し た。また、これらの研究開発に必要となる情報収集を図るための現地調査をメコン川中下流域お よびソロ川流域において実施した。

## 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」 (革新プロ)ほかで開発してきた流域規模分布型水文モデル、GCM降雨バイアス補正手法等によ るハザード評価研究を、アジアの水災害が懸念される複数の特定脆弱地域に当てはめ、水災害リ スクの社会経済影響評価を行い、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するものである。

特定脆弱地域としては、最近大きな水災害を経験し、気候変動影響も大きいと予想される地域 の代表として、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を対象とする。

## c. 研究計画、方法、スケジュール

本研究は、以下のサブ課題群で構成する。

小課題(1) 流域スケールでの影響評価基本技術の開発

(1-1) 不確実性を考慮した河川流域スケールでの GCM 予測値に基づく洪水・渇水ハザード予測 値の現地適用(ローカルカスタマイズ)手法の開発

- ① GCM による降水量予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発
- ② GCM による河川流出量(洪水・渇水)予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発
- ③ GCM 降雨予測値を用いた不確実性を考慮した河川流域スケールでの洪水氾濫予測手法の 開発
- (1-2) 社会経済評価のための基本技術の開発
- ① 洪水リスク評価モデルの改良
- ② 渇水リスク評価モデルの開発
- ③ 水マネジメントシステムにおける洪水リスクと渇水リスクの適正な配分の検討

④ 脆弱性モニタリングシステムおよび対策指標の開発

小課題(2)特定脆弱地域での影響評価(具体的な河川流域での事例研究)

- ① インダス川流域
- ② メコン川中下流域
- ③ チャオプラヤ川流域
- ④ ソロ川流域
- ⑤ パンパンガ川流域

実施期間を平成 24 年度~平成 28 年度の5 年間とし、以下の年次計画、方法で実施する。 【平成 24 年度】

特定脆弱地域としてまず先行研究対象とする河川流域を選定する。それら流域において、流域 スケールでの洪水・渇水ハザード評価を行うために必要なダウンスケーリングに着手する。

また、流域スケールでの水文流出解析モデルの構築と併せて社会経済影響評価のための情報収 集・整理を行い、洪水・渇水リスク評価モデルの開発に着手する。

### 【平成 25 年度】

特定脆弱地域のうち、小規模流域では MRI-AGCM3.2S による現在気候実験データの力学的ダウンスケーリングに着手する。大規模流域では CMIP5 等の現在気候および将来気候予測実験のバイアス補正および統計的ダウンスケーリングを実施する。また、渇水から洪水までを長期連続的に再現する流出解析モデルと、降雨を入力して流域一体で氾濫現象を再現する流出氾濫モデルの構築と特定脆弱地域における検証を行う。

【平成 26 年度】

複数の対象河川流域における CMIP5 の各種実験の大気の力学的ダウンスケーリングを開始し、 極端イベントのサンプル数を増やす。一方、現地河川流域スケールでの洪水・渇水ハザード指標 とその不確実性の分析を行う手法を提案し、対象河川流域における具体的な評価に着手する。

また、洪水リスクについて、洪水に対する脆弱性をグローバル GIS データ等から評価する手法 を開発する。一方、各対象流域内における社会構造の変化シナリオを設定し、それに基づく将来 水需要および水ストレスの推定に着手する。

【平成 27 年度】

ダウンスケーリング手法について修正を行い、複数の対象河川流域における各種 RCP シナリオ 実験について大気の力学的ダウンスケーリングを行う。また、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、洪水・渇水リスク評価モデルを完成させ、将来気候の下での洪水・渇水リスク変化予 測マップを試作する。

【平成 28 年度】

河川流量解析システムや社会構造の変化予測の最終成果を活用し、洪水/渇水ハザードの変化 の社会経済影響評価結果を整理するとともに、洪水・渇水リスクの変化予測結果についてとりま とめる。

## d. 平成 24 年度研究計画

平成 24 年度は、c.に示した小課題(1)では、(1-1)の①~③、(1-2)の①②に着手する。また、これ らの研究に必要な情報収集を図るため、対象河川流域での現地調査を実施する。今年度は、メコ ン川中下流域(②)およびソロ川(④)における現地調査にまず着手した。

# e. 平成 24 年度研究成果

### 1.5.1. 流域スケールでの影響評価基本技術の開発

# 1.5.1.1. 不確実性を考慮した河川流域スケールでの GCM 予測値に基づく洪水・渇水ハザード 予測値の現地適用(ローカルカスタマイズ)手法の開発

(1) GCM による降水量予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発

本研究は、特定脆弱地域のうち流域面積の小さいソロ川およびパンパンガ川流域について、 GCM実験データの力学的ダウンスケーリングを行い、河川流域スケールでの降水量の将来変化を 予測するものである。

カ学的ダウンスケーリングを行うためには、GCMの出力として少なくとも3次元6時間間隔の 基本変数が必要である。今回は、CMIP5のGCM出力の中で上記データが入手可能で、解像度も 比較的高い(1.4度間隔) MIROC5を対象とした力学的ダウンスケーリング手法を開発した。力学的 ダウンスケーリングを行う領域モデルはWRFを用いた。MIROC5は緯度座標と鉛直座標が等間 隔ではなく、そのままではWRFで読み込めないため、等間隔に変換した。なお、高度データは出 力に含まれていないため、元の格子系で地上気圧と気温から測高公式を用いて求めた。このよう にして作成した MIROC5のデータをWRF に導入し、ダウンスケーリングができることを確認し た。

① インドネシア・ソロ川流域でのダウンスケーリング

第1の計算対象流域として、インドネシア・ソロ川流域で水平解像度15kmと3kmのダウンス ケーリング実験を行った。対象として、1979年の1年間の降水データから最も降水強度が大きか った10月1日~10日を選択した。MIROC5の3時間毎降水量データでは、この期間中2日間は 降水が持続し、結果として大きな積算雨量をもたらしていた。しかし、WRFによるダウンスケー リングでは積雲対流の日変化が強過ぎ、日中は強い降水が計算されるものの、夜間は降水が持続 しなかった。

積雲対流の日変化を抑えることを目的として雲物理パラメタリゼーションを変えた実験を行った。その結果、雲量・積算降水量・降水量の日々変動に変化が見られたが、いずれの場合も積雲対流の日変化を抑えることはできなかった。また、MIROC5の海表面温度を WRF に与える実験を行ってみたが、結果に大きな変化は見られなかった。

② フィリピン・パンパンガ川流域でのダウンスケーリング

第2の計算対象流域として、フィ リピン・パンパンガ川流域で水平解 像度 10km と 2km へのダウンスケー リング実験を行った。まず、ダウン スケーリング計算の妥当性の検証 を行うため、NCEP 再解析データ(水 平格子間隔1度)をダウンスケーリ ングし、地上雨量計による観測デー タと比較した。対象として、この地 域に洪水をもたらした 2011 年 9 月 の台風 17 号にともなう降水イベン トを用いた。WRF によるダウンス ケーリング結果は台風の構造を明 瞭に再現し、計算されたパンパンガ 川流域の降水量は地上雨量計と比 較して、時間的なずれなどはあるも のの、最大降水強度・積算降水量・



図1 フィリピン・パンパンガ川流域における NCEP 再 解析データのダウンスケーリング実験の結果。上の3枚 は、パンパンガ川流域平均雨量の時系列。下の3枚の図 は、期間積算雨量。

豪雨継続時間をよく再現していた (図1上の左 と右)。

次に、MIROC5を用いたダウンスケーリング 実験として、1979年の1年間の降水データか ら最も降水強度が大きかった7月25日前後を 対象とした計算を行った(図2)。MIROC5の 計算結果では、この降水をもたらした現象は台 風であることは想像できたが、水平解像度が 150km 程度であるため台風の構造までは判断 できなかった(図2左下)。それが、水平解像 度10kmのダウンスケーリングによって台風の 構造が明確に見えるようになり(図2右下)、ま た水平解像度2kmのダウンスケーリングによ りパンパンガ川流域内の降水分布も明瞭に見 えるようになった。また、空間平均積算降水量 は MIROC5に比べて2倍程度に大きくなった (図2上)。



# (2) GCM による河川流出量(洪水・渇水)予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの 利用手法の開発

スナップショット。

対象流域と流出解析モデルの選定

様々な空間スケールと自然・社会特性を有する河川において、不確実性の小さい洪水・渇水リ スク予測を実現するためには、まず、洪水・渇水のハザードを定量的に算定するための洪水およ び低水の流出解析モデルを構築する必要がある。しかしながら、ここで対象となる河川は、水災 害が頻発している発展途上国にある河川である。そこでは、しばしば雨量や水位・流量といった 水文観測所が十分整備されず、従来広く用いられてきた Data Driven 型の集中定数型流出解析モデ ルを構築するには、データの量や質において不十分であることが多い。このため、水文観測デー タの不足を GIS データによってある程度補うことのできる分布定数型流出解析モデルを基盤とし た流出解析モデルの構築を目指すこととする。

ここで検討を開始する対象流域としては、本研究で対象とする5つの流域のうち、流域面積スケールや流域特性が日本の河川流域に近いと考えられるインドネシア国ジャワ島のソロ川(流域面積16,800km<sup>2</sup>)とした。

選定候補となるモデルは、BTOP (Block-wise TOP) モデル(Takeuchi et al., 2007)と、IFAS (総合 洪水解析システム)(Sugiura et al., 2010)に実装された土研分布モデルである。BTOP モデルは、革 新プロにおいて、全球規模で構築すべき洪水流出解析システムの母体として採用し、世界主要河 川に対して 20km メッシュスケールで河道網を作成しモデル構築を行った。創生プロでは、全球 洪水・低水流量解析システムの母体として、この革新プロモデルを引き継ぎ、洪水だけでなく低 水を含めた主要河川での定数の最適化や必要機能の追加に取り組んでいる。そこで、ここでは、 まず IFAS の適用性を検討する。IFAS は、元来は、水害が頻発する発展途上国に多い水文観測デ ータが不十分な河川でも、洪水流出解析によるハザード分析やリアルタイム洪水予測システム整 備による早期警報システムの早期立ち上げを可能とすることを目的として、分布定数型の流出解 析モデル(土研分布モデル)を基盤としつつ、必要な入出力インターフェースや解析ツールを一 体化したソフトウェアパッケージであり、土木研究所 ICHARM において開発を継続している。 IFAS上に実装された土研分布モデル(Ver.2)のメッシュ毎の鉛直モデル構造を図3に示す。地上 水文観測資料が不足している流域でも、土地利用等の GIS データを用いて各メッシュのモデル定 数の1次近似値を初期設定するとともに、グローバルに入手可能なデジタル地形データ(DEM)か ら落水線網・河道網を構築して各メッシュからの流出を合算することが可能であるとともに、地 上雨量の代わりに衛星観測雨量を入力することで流出解析を行うことができるところに特長があ



図 4 Global Map(DEM、Landcover)によるモデル定数 の現時点での標準値による初期推定

る。後述する RRI モデルと異なり、洪水氾濫の効果を高精度に評価することはできないが、氾濫 貯留の効果が及ぶ河川区間より上流側の河川計画・洪水予報基準点見合いで確率流量を算出する ことで、その下流側の洪水リスクを評価する目的であれば、比較的簡便・高速に解析を行うこと ができる点はメリットとなり得る。

② 衛星雨量を活用したモデル定数同定と流出解析

グローバルに入手可能な、地球地図国際運営委員会が整備している Global Map による DEM な らびに土地被覆データにもとづき、ソロ川流域の抽出・河道網作成と各メッシュの土研分布モデ ル定数初期推定を行った結果を図 4 に示す。さらに、モデル定数のチューニングと検証を行うた めに、2007 年 12 月から 2009 年 12 月までの雨量・流量資料を収集した。雨量観測所そのものは 129 地点存在し、数としては少なくないが、そのほとんどは日雨量しか計測しておらず、洪水解 析に必要となる時間雨量データはソロ川上流域(8 カ所)のみに存在する。また、水位観測所に ついても、40 地点以上の観測値を収集したが、そのほとんどは日単位であり、時間単位でデータ が存在するのが上流 3 カ所と中流 1 カ所のみである。雨量観測所との関係も考慮し、ここではソ

ロ川の上流側に位置する Jerug 水位流量観測所(上流域面積: 3,580km<sup>2</sup>)において土研分布モデルのモデル定数調整と検証を 行うこととした。

まず、Jerug 上流域にある7地点の地上雨量データを用いた 流出解析を行ったが、良好な結果を得ることができなかった。 このため、地点雨量としての定量性では劣るが、流域を網羅 するデータが得られる衛星雨量を用いることを試みた。用い た衛星雨量は、0.1度(約 10km)メッシュ時間雨量を公開し ている JAXA による GSMaP である。但し、生データのままで は、強雨時に一般に時間雨量値を過小評価することが知られ ており、かつ、ソロ川では対流性の短時間豪雨が頻発するこ とから、時間単位で地上雨量との相関性を検証することが困

難であった。このため、白石ら(2009) が開発した雨域移動情報を活用した ICHARM 独自の自己補正手法を基盤 としつつ、補正係数について日雨量単 位でソロ川上流域で最適化を図った。 図5にソロ川上流域平均日雨量として の衛星雨量生値・補正値と地上雨量と の相関図を示す。この補正手法を



図 5 地上雨量と GSMaP(生値 および補正値、mm/日)の相関(流 域平均雨量,洪水イベントのみ)



GSMaP時間雨量に適用した上で、降雨-洪水流出解析とモデル定数調整を行った。図6に早い中間流出を規定する係数値の感度分析を行った事例を示す。これらの結果をもとに調整された定数 セットを用いて 2007 年 12 月の当地最大規模の洪水での検証を行った事例を図7に示す。なお、 ソロ川では、時間単位での雨量・流量観測を行う観測地点を今後増やすことが計画されている。 衛星雨量は時間単位のデータの精度が高くない。地上時間雨量データが入手できるようになれば、 主要な地先における洪水ハザードをより定量的に評価するためにも、それらの地上観測データを 十分に活用して雨量入力資料を再調整するとともにモデル定数調整を再度実施することが必要と なる。



# (3) GCM 降雨予測値を用いた不確実性を考慮した河川流域スケールでの洪水氾濫予測手法の開発

本研究は、特定脆弱地域を対象に、降水量の将来予測から流域スケールで洪水ハザードの将来 変化を予測し、その予測結果を、別途検討する被害関数にあてはめることによって、将来の洪水 リスクを算定するものである。河川流域における水災害をもたらす直接の要因(すなわち被害関 数の主要な因子)は洪水氾濫である。そこで、土木研究所 ICHARM で別途開発を進めてきた降雨 流出氾濫モデル(Rainfall-Runoff-Inundation: RRI Model)(Sayama et al., 2011)を適用することで、2次 元的な洪水氾濫ハザードを評価する手法の開発・検証を行う。したがって、各流域における基本 的な研究手順は、以下の4ステップとなる。

各流域における基本的な研究手順は、以下の4ステップとなる。

- 1) 観測雨量を入力した大規模洪水の再現:河川流量・水位・氾濫域の再現検証
- 2) 観測雨量を入力した長期の降雨流出氾濫計算:長期連続の河川流量の再現検証
- 3) GCM 現在気候を入力した降雨流出氾濫計算:河川流量・氾濫の統計特性を2)と比較

4) GCM 将来気候を入力した降雨流出氾濫計算:河川流量・氾濫の統計的特性の変化予測

平成 24 年度は、2011 年に甚大な洪水被害が発生したタイ・チャオプラヤ川流域に焦点を当て て分析を開始した。上記1)については、佐山ら(2013)の研究によって 2011 年タイ洪水の再現計 算を進めており、本検討ではとくに2)について蒸発散や土壌による貯水の効果を考慮に入れな がら、1980 年から 2004 年までの長期連続計算を実施し、過去の観測情報と比較した。

図8にチャオプラヤ川流域の概略図と主要地点における月流量の観測・計算結果を比較する。 基本的には2011年の再現計算で同定したモデル・パラメータをもとに、山地の森林土壌でより多 くの水が保水できるように改良することによって、長期の流出を再現できるようになった。

図9は2006年から2011年における各年の最大浸水域について、衛星観測情報とRRIモデルの シミュレーション結果とを比較したものである。C2地点(ナコンサワン地点)上流でモデルの氾濫 域がやや過小評価になるなど、いくつかの要改善点はあるものの、年ごとの氾濫域の大小などを モデルはよく再現した。なお浸水深については2011年に限って別途詳細な比較検証を行っている。



図8 チャオプラヤ川流域と主要地点における観測・計算の月流量比較



図9 チャオプラヤ川流域における年最大浸水域(上:衛星画像、下:RRIモデル)



図 10 長期計算による氾濫頻度マップ

図 10 は 1980 年から 2004 年および 2011 年の 計 26 年間の流出氾濫計算に基づき、26 年間で 浸水した年の割合を示している(浸水したかど うかの判断基準は最大浸水位が 50 cm 以上とし た)。この図からスコータイ周辺やナコンサワン 周辺、アユタヤ周辺の氾濫頻度が 80%以上とな り、氾濫しやすい条件であることが分かる。

このような氾濫頻度マップは、流域の地形条件だけでなく、気象・土地利用・河川の条件を反映して作成されている。堤防などの人工構造物の影響が小さい流域であれば他の流域にも比較的容易に展開できる。また GCM 出力による気候の将来予測情報を入力すれば、氾濫頻度が将来どのように空間的に変化するかを明らかにすることができる。

## 1.5.1.2. 社会経済評価のための基本技術の開発

### (1) 洪水リスク評価モデル

## ① 概要

特徴の異なるアジアの5河川流域を 対象に、住民生活や農業生産等の社会 経済活動に対する洪水被害を数量化 しその地理分布を推定できる洪水リ スク影響評価手法を開発する。この手 法開発での最も大きな課題は、データ が未整備であることである。このため、 衛星情報やモデルを組み合わせてこ のデータ不足を克服することが必要 となる。

この手法は、地上・衛星観測や水 文・水理モデリングに基づいて洪水氾 濫現象の空間時間分布を求める技術



図 11 メコン川下流域の氾濫推定の事例

と、センサス資料や衛星観測に基づいて家屋や水田等の分布を求め、それに浸水被害推定式を適 用して氾濫水深を被害額に換算する技術で構成される。前者は多様な流域でも共通に適用可能な 技術であるが、各流域の氾濫特性を踏まえた調整が必要となる。後者は各流域の社会経済、文化、 生活様式、農業形態等の地域事情に応じて個別に開発を進める必要がある。今年度はメコン川下 流域での開発に着手した。

氾濫情報の推定

氾濫水位および範囲の特定において、今年度は試行的に二つの手法に取組んでいる。まず、第 一次近似として、メコン川下流域の特徴を利用して推定した。カンボジア氾濫原は、シルト分を 含む洪水を取り込むコルマタージュ農業が発達しており、その水路が河川の流れと横断方向に耕 作地に引き込まれている。そのため河川水位が高い場合には氾濫水位とほぼ同程度の水位になる ことがメコン川委員会の調査で明らかにされている。そのため、想定されている時期の通常の水 位であれば洪水被害が生じず、その時期以外で高い水位になることで被害となる。

この特徴から、氾濫水深の分布は複数地点の河川水位観測を内外挿して求めた水位分布と衛星 観測に基づく微地形情報を組み合わせて求めた。カンボジア水資源気象省水文河川局の水位観測 は毎日2回現地時刻7時19時に実施されるので、2つの水文観測所の河川水位を内挿して各流下 距離での水位を求め、河川水位と河道周辺の氾濫水位が等しくなるように外挿して求めた。

二つ目の方法は、湛水分布を Terra/Aqua 衛星搭載センサ MODIS の観測から推定する方法(Kwak et al., 2012) である。地形情報は全球 3 秒格子の数値標高モデル STRM3 の 2.1 版を用いた。この 手法で得られた水深分布から氾濫現象の正確な理解が可能となる。

なお、さらにこれらの精度を高める方法として、ALOS 衛星搭載センサ PRISM の観測に基づく 数値標高モデルによる補正を実施中(萬矢ら、2013)であり、この解析結果をあわせることによ り洪水氾濫解析モデルの検証や家屋分布推定の精度向上に資することとなる。

### 浸水被害推定式の開発

洪水被害額の推定では、まずは家屋・家財を対象とし、メコン川委員会が2008年に実施した現 地調査及び今年度実施した現地調査に基づく浸水被害曲線の作成・検証作業を進めている。浸水 被害曲線を面的に適用するために必要な家屋分布は、LandScan等の高空間分解能の人口分布デー タ、カンボジア計画省統計局によるセンサス資料、及び衛星観測に基づく微地形情報等を組み合 わせて統計学的に求める。今年度はその準備として上述基礎データの収集・整理作業に取り組ん だ。高床式住居はメコン川下流域で広く認められる居住様式であり、家屋床高の違いを考慮した 洪水被害の検討が重要である。地盤高等の立地条件や家屋の材料・構造・築年数等の因子を他の

## (2) Drought Risk Evaluation Model

### ① Framework

A drought risk evaluation framework was proposed to characterize a socio-economic drought exposure using sophisticated hydrologic model outputs and historical drought events. The proposed framework was developed from extensive literature review of drought characterization methods. Despite many existing drought indices and models, there is still no universally applicable method to describe all related



Figure12 The concept of applied threshold level method

processes and parameters causing the socio-economic drought. A socio-economic drought is defined as a lack of weather-related water supply to meet anthropogenic water demand for domestic, industrial and agricultural activities. In Asian developing countries, the water demand data is often unavailable and the absence of the water demand information makes the socio-economic drought characterization an impossible task.

### ② The Applied Threshold Level Method(ATLM)

The ATLM defines socio-economic drought based on time-dependent water demand, which is estimated from the domestic, agricultural and industrial water demand data. When this water demand information is unavailable, the threshold level for the socio-economic drought can be established using hydrologic drought parameters with historical drought

records. Once the threshold level is determined, the cumulative water stress can be used to define the drought exposure. The local water demand data collection is an essential component of the socio-economic drought characterization. The local field survey is needed to obtain the agricultural water demand, which varies during the growing season and depends on local farming practices.

③ BTOP model for reproduction of river discharge

In the water supply side, a distributed hydrologic model BTOP can be used to produce simulated river discharge. The five study river basins have been developed in the BTOP model. The BTOP model for the Mekong River basin has been calibrated and the model calibration is ongoing for the other four river basin BTOP models.



Figure 13 River basins implemented in the global BTOP model and the simulated daily river discharge at outflow of the river basins.

## 1.5.2. 特定脆弱地域での影響評価

## 1.5.2.1. メコン川下流域現地調査

## (1) 洪水氾濫域調査

洪水氾濫域を調査するため、次のステップを踏んだ。1) 氾濫現象の一次解析をすることで全体 像を把握、2)1)の結果を受けて氾濫解析方法を選択、3) 選択した解析方法においてクリティカル となる箇所を解明するための現地調査を行う。

### 1) 氾濫現象の一次解析

衛星搭載の MODIS によるデータから氾濫状況の一次解析を実施する。ここで用いる MODIS デ ータは約一週間に一度作成される約 500m メッシュのデータである。これらをもとに Kwak et

al.(2012)の手法を用いて MLSWI を算出 する。この MLSWI は 0.0~1.0 の範囲の 数字であるため、0.7~0.8 程度の数字を 閾値として設定する。図 14 は 2011 年 5 月下旬から 2011 年 11 月下旬までの同結 果を全てプロットしたものであるが、青 が 0.7 以上 0.8 以下、赤が 0.8 以上を示 す。またこの解析結果から多くの氾濫域 は、コルマタージュが行われ、河川水位 が自然堤防を越えない状況でさえも浸 水が確認できるような地域であり、一方、 氾濫域 2 及び 9 に関してはいわゆる日 本で見られる外水氾濫のような形態で あることがわかった。



図14 MODIS 及び MLSWI を用いた氾濫域と氾濫現象の分類

### 2) 氾濫解析方法の選択

1)の知見を受け、それぞれの領域に対する観測項目を選択した。すなわち氾濫域2及び9に関 しては、氾濫流入量を決定し、氾濫流を解くような手法が必要となる。またその他の地域に関し ては、コルマタージュを辿って流入する氾濫水が圧倒的に多いことから、高水位時にはメコン川 本川の河川水位と氾濫域の水位が等しいと仮定する、Shresta et al. (2013)の手法が有効であること 判断した。

### 3) 現地調査

1)及び2)の検討結果を受け、それぞれに応じた現地調査を実施した。その一例を図15に示す。 この図は図14が示す氾濫域2を拡大したものである。また MLSWIは2011年9月30日の値であ る。道路地図から氾濫域2の下流端近辺には幹線道路があり、現地調査から、この道路は5m程 度の比高を持つ連続した道路盛土であること、部分的にアンダーパスが存在することが認められ た。このような道路盛土は氾濫現象に大きな影響を及ぼす構造物であることから、氾濫解析を実

施するための Digital Surface Model(DSM)に反映させる必 要がある。このような観点か ら同道路盛土の形状を高性 能 GPS (NavCom Technology 社の受信機 SF-3050 を使用。 鉛直方向に±15cm 程度の誤 差)により計測した。図 16 は JAXA が作成した PRISM DSM である。この図が示す ように多くのノイズが見ら



図 15 氾濫域 2 の拡大図: コンターは 2011 年 9 月 30 日における MLSWI

れ、上記の道路盛土が観測されてい ないことなどが特徴的である。これ を 萬 矢 ら (2013)の 手 法 を 用 い て PRISM DSM の修正、また道路盛土、 アンダーパスを反映させた(図 17)。

## (2) 家屋調査

家屋洪水被害額の推定に用いる関 係式を作成・検証するために、2011 年雨季の洪水被害状況について 2012 年 12 月にカンボジアでの現地 調査を実施した。家屋調査は4日間で Takeo 州、Kandal 州、Kampong Cham 州の 12 集落(図 18赤丸)57世帯を訪問しヒアリングを行った。 世帯人員・構成、収入、家屋価値、氾濫水深、 床上浸水深、家屋・家財被害額等を聞き取り、 併せて、前出の高精度 GPS 測位及び簡易レー ザー測量 (Laser Technology 社の TruPulse を使 用)により、地盤面の高さと家屋の床高を計 測した。2008年のメコン川委員会の調査結果 があるが、今回は上流と下流の違いを確認す るため前回対象外であった上流の Kampong Cham 州を対象にしたこと、及び、同様に前 回調査では実施していない地盤高・家屋床高 の計測を実施した。今後、両調査結果を分析 し、広域に適用可能な洪水リスク評価手法の 構築を目指している。さらに、この地域の住



図 16 PRISM DSM の生データ



図 17 修正 PRISM DSM



図18家屋洪水被害調查実施集落(赤丸)

居様式の特徴である高床式住居と、微地形、主要幹線道路や治水利水構造物との位置関係などを 現地調査や衛星観測に基づく詳細な分析により解明していくこととしている。

## 1.5.2.2. ソロ川流域現地調査

## (1) 洪水氾濫域調査

ここでもメコン川と同様の仮定を基に、現地 調査を実施した。それらは1)氾濫現象の一次解 析で全体像を把握、2)氾濫解析手法の選定、3)2) にあわせた現地調査を実施することである。以 下、これらを説明する。

1) 氾濫現象の一次解析及び氾濫解析手法の選 定

図 19 はソロ川流域とその氾濫状況を示す。この河川の氾濫域は大きく2つの領域に区分する



図19 ソロ川流域における氾濫状況の解析結果

ことができる。領域 A はカルデラ地帯の中の河川であり、領域 B は低平原における河川である。 領域 A 及び B の境界付近は外輪山の様相を示し、この間では 30km で 50m 程度の標高差がある。 一方、領域 A の氾濫域ではおおよそ 100km で 30m の標高差、領域 B の氾濫域ではおおよそ 130km で 35m の標高差となる。ここでは 2007 年の大規模洪水に着目し、MODIS データを用いた MLSWI、 ALOS Palsar と RRI モデルを用いた氾濫解析結果を比較した。また現地 Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo (ソロ川河川事務所)が発行した氾濫域を比較した。それによると、 RRI(Sayama et al., 2011)の解析結果と MODIS を用いた MLSWI、 ALOS Palsar の結果は概ね一致し た。

ソロ川ではメコン川と同じ氾濫手法は使えず、降雨と流出を同時に解析できる RRI が最適であると判断した。

図 20 は図 19 の示す領域 C の拡大図である。ここでは MLSWI、 ALOS Palsar、 RRI の解析結 果を示している。この図から三者がほぼ同様の結果となっていることを示している。他方、図 21 は BBWS Bengawan Solo の調査結果である。ピンク及び水色の範囲が氾濫域を示す。これを見る と、メコン川の左岸は氾濫しているが、右岸は氾濫していないことを示している。



図 20 MLSWI, ALOS Palsar, RRI の解析結果



図 21 BBWS Bengawan Solo の調査結果 (図 19 の領域 C に相当する範囲)

2) 現地調査

現地調査は図 19 が示すソロ川沿いを全川にわたり調査しているが、ここでは特徴的な箇所の紹介をする。図 21 の示す赤のラインは本現地調査ルートで、青丸で示す地点におけるヒアリング、 それによる洪水痕跡から、同地点は洪水氾濫実績があることが確認できた。なお、現在この地域 は堤防に囲まれているが、それが完成したのが 2007 年洪水後であることが確認でき、これらから、 この地域は図 21 が示すような氾濫状況(すなわち左岸だけが浸水して右岸は浸水していない)で はないことが理解できた。

### (2) House Hold Survey

The objective of the household survey was to approach and set a strategy to gather the necessary information in order to be able to assess flood related damages in Solo river basin.

Hence, 22 households in 9 villages in 7 Kecamatan, 3 Kabupaten and 2 Provinces were interviewed for the biggest flood events they experienced in the flood event of December 2007-January 2008.

### The main information on house damages was that:

In average this December 2007 flood lasted 8 days with water depth of  $1m\pm0.5m$  near and inside the house.

People are very reluctant to talk about money and they find difficult to value what they have, especially the houses structures. People were relatively poor (in average living with 36,000Rp/day for 5 persons in the household, under 1\$/day/person).

In general, as water rises slowly, households have time to put valuables in higher places and limit damages. Moreover, it was very difficult to get people imagine what would be the damages if as they told us about the greatest flood they have experienced.

Bamboo, wood houses as well as concrete houses present the same type of roof, therefore while using remote sensed images, it won't be possible to conduct speculation on house value by only looking at roofs. Considering roof area might be an alternative.

<u>The main information on agricultural damages</u> as most of the households live from rice production was that:

2 to 3 cycles of 3-4months per year (seeding in April and September and harvest in July and December). (some farmers also rotate with one cycle of vegetable crops).

Rice production is conducted from seed, and is irrigated, highly fertilized (around 500-600kg/ha N, P, K, M) and treated with pesticides (1 to 2L/ha).

The average yield is 7-7.5ton/ha per harvest and the height of the plant at maturity is 90-100cm.

The vulnerable stage is once there is a panicle. Indeed, if the field get flooded, it cannot be harvested anymore as the plant will fall and even though the plant is still good, mice and other pest will come and destroy the harvest. Problem is not water depth or getting submerged but the loss of rigidity/turgescence.

# f. 考察

インドネシア・ソロ川流域におけるダウンスケーリング実験で積雲対流の日変化が強く出過ぎ たことは、赤道島嶼域の日射による地表面温度上昇・海陸の温度差が強過ぎたことが原因だと考 えられる。これらの問題を解決するためには、地表面分類・土壌水分量・海表面温度の再現精度 を改善することが求められるが、現地観測データがないために実現は困難である。熱帯島嶼域は、 日変化によって引き起こされる積雲対流の影響が大きく、総観規模スケールの現象の効果が中緯 度と比較して小さいため、数値予報が困難であることが報告されている(Hayashi et al.2008)。し かし、洪水を引き起こすような降水イベントは総観規模スケールの現象によって引き起こされる ことが考えられる。そのため、今後は総観規模スケールの現象にも注目し、その再現性を高める ことによって、洪水をもたらす降水現象の再現性を高めていくことが重要と考えられる。

一方、フィリピン・パンパンガ川流域におけるダウンスケーリング実験では、台風を解像できることを確認した。また、NCEP 再解析データをダウンスケーリングした実験では、計算された降水変動は地上雨量計の観測結果の特徴をよくとらえていた。得られた結果から、今回開発したWRFを用いたダウンスケーリング実験は、パンパンガ川流域における水災害リスク評価を行う上では有効であると言える。

洪水ハザードを簡便に予測するために必要な洪水流出解析モデルについては、本研究では水文 資料が不足する流域で適用しなければならない条件が多くなると想定される中で、インドネシ ア・ソロ川における検討は重要な先行事例になった。そこでは衛星雨量を必要に応じて適切に補 正しながら、グローバルに入手可能な GIS データによってモデル構築が可能な IFAS と組み合わ せて活用することで、地上水文資料の不足を補う可能性を示した。今後は、温暖化シナリオや GCM により異なる将来予測降雨シナリオを活用し、確率洪水流量の変化を評価する手法を確立すると ともに、渇水のハザードについても変化予測を行う手法を検討していく必要がある。

一方、水災害に直結する洪水氾濫ハザードをきめ細かく予測するための降雨流出氾濫予測の課題では、本年度は特にチャオプラヤ川流域に焦点を当てて、長期連続計算による河川流出と広域の洪水氾濫の再現精度を検証した。同様の解析をGCMによる出力結果をもとに実行することで、将来の洪水リスクを評価できる。今後は、今年度実行した再現計算の分析をさらに進め、流域氾濫量の降水量に対する感度を明らかにしたうえで、気象研究所によるAGCM3.2S(=約20 km 解像度)および 3.2H(=約60 km 解像度)のアンサンブル予測を入力して流出氾濫解析を実行する方針である。他の CMIP5 の GCM 出力については、全ての予測情報を入力するのは困難であるため、降雨量の変化傾向を見ながら、上述の氾濫の感度に基づいて、将来の洪水リスクの変化を分析する予定である。

メコン川とソロ川においては、データ不足を克服するため衛星情報を最大限活用したうえで、 氾濫解析モデルの検討とあわせて効果的現地調査を行い氾濫の状況を把握した。メコン川では氾 濫の概略検討を行い、道路等の氾濫形態のクリティカルになる構造物の把握を現地で行った。ソ ロ川では RRI モデルで解析を行い、過去の氾濫情報の補正等を現地ヒアリング等で行った。さら に、PRISMDSM の修正を行い今後の氾濫解析に活用できる氾濫原データの作成を行った。今後こ れらを活用して洪水リスク評価モデルの構築に検討を進めていくこととしている。

メコン川下流域では多数の高床式住居が広く分布するため、この地域の家屋洪水被害推定においては家屋床高を考慮した推定方法を検討する必要がある。家屋床高の高低には各世帯の経済状況等の個別事情が反映されている場合も少なくないが、家屋床高の地域性、地理分布を考える上では、その他にも、微地形との対応、主要幹線道路や治水利水構造物との位置関係などを把握す

る必要があり、地盤高等の立地条件や家屋の材料・構造・築年数等の因子も考慮しながら、現地 調査や衛星観測に基づいて詳細な分析を進める。他の流域でも現地調査を通じて生活様式等を把 握し、それらを踏まえて最適な被害推定手法の検討を進める。過去のメコン川委員会での調査結 果と今回の現地調査結果の両者を詳細に分析して、カンボジアの住居形式や氾濫形態にあった浸 水被害曲線を、洪水リスク評価手法の検討や現地での追加補足調査を組合せながら構築していく こととしている。

ソロ川における現地調査により、家屋の資産調査、貧富のレベル調査等を行ったがほとんどの 家で明快な回答が得られず、今後電化製品などの家財からの資産検討等をしていく必要がある。 カンボジアで適用した穀物の浸水被害推定を、そのままインドネシアの農業では活用できないこ とがわかり、今後他の情報からの浸水被害推定が必要との課題が明らかになった。

渇水リスク評価については、一定の仮定の下による新たな手法による解析が必要と判断し、流 出計算モデル(BTOP)の各流域への適用を進め、メコン川では検証も完了した。また、渇水の評 価として過去の渇水履歴とモデルの再現計算をもとにATLMを提案してパンパンガ川で試行を行 った。各国の適切なコンタクト先に引き続き接触して不足情報の入手に努めるとともに、モデル の開発及び検証を進めていく。

# g. 引用文献

Fahmi Hidayat,Harry M. Sungguh,Harianto, 2008, Impact of Climate Change on Floods in Bengawan Solo and Brantas River Basins, Indonesia, River Networks.

- Hayashi, S., K. Aranami, and K. Saio, 2008: Statistical verification of short term NWP by NHM and WRF-ARW with 20km horizontal resolution around Japan and Southeast Asia. SOLA, 4, 133-136.
- Kwak, Y. et al. 2012. Estimation of flood volume in Chao Phraya river basin, Thailand from MODIS images coupled with flood Inundation level, IEEE-IGARSS2012, pp. 887-890.
- Mishra, A.K. and V.P. Singh. 2010. A review of drought concepts. Journal of Hydrology 391: 202-216.
- Mishra, A.K. and V.P. Singh. 2011. Drought modeling A review. Journal of Hydrology 391: 157-175.
- Miyamoto, M., A. Sugiura, T. Okazumi, S. Tanaka, S. Nabesaka and K. Fukami, 2012: Suggestion for an advanced early warning system based on flood forecasting in Bengawan Solo River Basin, Indonesia, Proceedings of the 10th International Conference on Hydroinformatics, Hamburg, Germany.
- 佐山敬洋、建部祐哉、藤岡 奨、牛山朋來、萬矢敦啓、田中茂信、2013:2011 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、印刷中
- 白石芳樹、深見和彦、猪股広典、 2009:雨域移動情報を活用した衛星観測雨量データ補正方法の提案 - 吉野川流域の事例解析-、 水工学論文集、 第 53 巻、pp385-390
- Shresta et al. Development of flood vulnerability indices for lower Mekong basin in Cambodian floodplain, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.69, No.4, I 1-I 6,2013
- Smakhtin, V.U., and E.L. Schipper. 2008. Droughts: The impact of semantics and perceptions, Water Policy, 10: 141-143.
- Takahiro Sayama, Go Ozawa, Takahiro Kawakami, Seishi Nabesaka and Kazuhiko Fukami (2011): Rainfall-Runoff-Inundation Analysis of Pakistan Flood 2010 at the Kabul River Basin, Hydrological Science Journal, IAHS
- Takeuchi K. et al., 2007: A BTOP model to extend TOPMODEL for distributed hydrological simulation of large basins, Hydrological Processes, vol.22, No.17, pp.3236-3251.
- 建部 祐哉・佐山 敬洋・牛山 朋來・藤岡 奨・田中 茂信:チャオプラヤ川流域における長期降雨流出 氾濫解析、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 69、No. 4、I\_457-I\_462、2013.
- Tomonobu Sugiura, Takahiro Kawakami, Go Ozawa, Kazuhiko Fukami, Jun Magome, Seishi Nabesaka, EXPERIMENTAL APPLICATION OF FLOOD FORECASTING SYSTEM (IFAS) USING SATELLITE-BASED RAINFALL Proceeding of the 9th International Conference on Hydroinfomatics (HIC2010), (2010), CD-ROM

- Van Loon, A.F. and H.A.J. Van Lanen. 2012. A process-based topology of hydrological drought. Hydrology and Earth System Sciences 16: 1915-1946.
- Van Huijgevoort, M.H.J., P. Hazenberg, H.A.J. Van Lanen, and R. Uijlenhoet. 2012. A generic method for hydrological drought identification across different climate regions. Hydrology and Earth System Sciences 16: 2437-2451.
- Yevjevich V. 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Hydrology Papers 23, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- 萬矢ら、氾濫解析のための PRISM DSM の活用と GPS を用いたその修正方法に関する研究、土木学会論文集 B1(水工学)Vol.69、 No.4、 I\_1549-I\_1554、 2013

website of data and information on disaster in Indonesia http://dibi.bnpb.go.id/

Indeks Rawan Bencana Indonesia (Natural Disaster Indices for Indonesia), BNPD, UNPD, 2011.

# h. 成果の発表

論文(受理、印刷済み)平成24年度:2件

- 1. Shresta et al. Development of flood vulnerability indices for lower Mekong basin in Cambodian floodplain, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.69, No.4, I 1-I 6,2013
- 2. 建部 祐哉・佐山 敬洋・牛山 朋來・藤岡 奨・田中 茂信: チャオプラヤ川流域における長期降雨流 出氾濫解析、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol. 69、No. 4、I\_457-I\_462、2013.

# 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:安田 成夫

(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)

(土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター)安田成夫・岩見洋一・岡積敏雄・上野 山智也・鍋坂誠志・栗林大輔・佐山敬洋・Shrestha Badri Bhakta・工藤 俊・萬矢敦啓・宮本 守・ 牛山朋來・長谷川聡・郭 栄珠・E.D.P Perera・杉浦 愛・本永良樹・上米良秀行・Maksym Gusyev・ 李 商恩・山崎祐介・萩原葉子・南雲直子・竹内邦良

(山梨大学 大学院医学工学総合研究部) 馬籠 純

## a. 要約

平成 25 年度は、インドネシア・ソロ川やフィリピン・パンパンガ川流域において領域気象モデル(WRF)を用いて降水のダウンスケールを行い精度の検証を行った。パンパンガ川流域におい て降雨流出氾濫解析モデルを構築し、既往洪水の流量及び浸水域の再現性を検証した。再現結果 をもとに、被害曲線を用いて被害額を試算し、実際の被害額と比較し、その精度を検証した。ま た、同流域において、BTOPモデルを用いて流出の予測シミュレーションを行い、1998年の渇水 時の状況の再現性について確認した。併せて、この地域の主たる農産物である米生産のための灌 漑水需要から全体需要を算定し、渇水時の実際の水需要の比較により、手法の精度を検証した。 ソロ川流域においても、長期的な計算をするにあたって初期値としてのモデル土壌水分量の状態 を適切に再現する手法を検討した。タイ・チャオプラヤ川流域においては、GCMによるアンサ ンブル予測降雨量を用い、降雨流出氾濫モデルから将来の洪水氾濫生起確率の変化を分析した。

カンボジア・メコン川、ソロ川、パンパンガ川において現地調査し、洪水・渇水脆弱性の実態 把握や洪水被害等の社会経済影響評価のための情報収集・整理を行った。

## 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」 (革新プロ)ほかで開発してきた流域規模分布型水文モデル、GCM 降雨バイアス補正手法等に よるハザード評価研究を、アジアの水災害が懸念される複数の特定脆弱地域に当てはめ、水災害 リスクの社会経済影響評価を行い、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するものである。

特定脆弱地域としては、最近大きな水災害を経験し、気候変動影響も大きいと予想される地域 の代表として、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を対象とする。

## c. 研究計画, 方法, スケジュール

本研究は、以下のサブ課題群で構成する。

小課題(1) 流域スケールでの影響評価基本技術の開発

(1-1) 不確実性を考慮した河川流域スケールでの GCM 予測値に基づく洪水・渇水ハザード予測 値の現地適用(ローカルカスタマイズ)手法の開発

- ① GCM による降水量予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発
- ② GCM による河川流出量(洪水・渇水)予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発
- ③ GCM 降雨予測値を用いた不確実性を考慮した河川流域スケールでの洪水氾濫予測手法の 開発
- (1-2) 社会経済評価のための基本技術の開発

- ① 洪水リスク評価モデルの改良
- ② 渇水リスク評価モデルの開発
- ③ 水マネジメントシステムにおける洪水リスクと渇水リスクの適正な配分の検討
- ④ 脆弱性モニタリングシステムおよび対策指標の開発

小課題(2)特定脆弱地域での影響評価(具体的な河川流域での事例研究)

- ① インダス川流域
- ② メコン川中下流域
- ③ チャオプラヤ川流域
- ソロ川流域
- ⑤ パンパンガ川流域

実施期間を平成24年度~平成28年度の5年間とし、以下の年次計画、方法で実施する. 【平成24年度】

特定脆弱地域としてまず先行研究対象とする河川流域を選定する。それら流域において、流域 スケールでの洪水・渇水ハザード評価を行うために必要なダウンスケーリングに着手する。

また、流域スケールでの水文流出解析モデルの構築と併せて社会経済影響評価のための情報収 集・整理を行い、洪水・渇水リスク評価モデルの開発に着手する。

### 【平成 25 年度】

特定脆弱地域のうち、小規模流域では MRI-AGCM3.2S による現在気候実験データの力学的ダ ウンスケーリングに着手する。大規模流域では CMIP5 等の現在気候および将来気候予測実験の バイアス補正および統計的ダウンスケーリングを実施する。また、渇水から洪水までを長期連続 的に再現する流出解析モデルと、降雨を入力して流域一体で氾濫現象を再現する流出氾濫モデル の構築と特定脆弱地域における検証を行う。

### 【平成 26 年度】

複数の対象河川流域における CMIP5 の各種実験の大気の力学的ダウンスケーリングを開始し、 極端イベントのサンプル数を増やす。一方、現地河川流域スケールでの洪水・渇水ハザード指標 とその不確実性の分析を行う手法を提案し、対象河川流域における具体的な評価に着手する。

また、洪水リスクについて、洪水に対する脆弱性をグローバル GIS データ等から評価する手法 を開発する。一方、各対象流域内における社会構造の変化シナリオを設定し、それに基づく将来 水需要および水ストレスの推定に着手する。

### 【平成 27 年度】

ダウンスケーリング手法について修正を行い、複数の対象河川流域における各種 RCP シナリオ 実験について大気の力学的ダウンスケーリングを行う。また、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、洪水・渇水リスク評価モデルを完成させ、将来気候の下での洪水・渇水リスク変化予 測マップを試作する。

【平成 28 年度】

河川流量解析システムや社会構造の変化予測の最終成果を活用し、洪水/渇水ハザードの変化 の社会経済影響評価結果を整理するとともに、洪水・渇水リスクの変化予測結果についてとりま とめる。

### d. 平成 25 年度研究計画

平成 25 年度は、c.に示した小課題(1)では、(1-1)の①~③、(1-2)の①②について引き続き進展

させている。また、これらの研究に必要な情報収集を図るため、対象河川流域での現地調査を実施している。今年度は、メコン川中下流域(②)、ソロ川流域(④)およびパンパンガ川流域(⑤) における現地調査を行っている。

## e. 平成 25 年度研究成果

### 1.5.1. 流域スケールでの影響評価基本技術の開発

# 1.5.1.1. GCM による降水量予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発

本研究は、特定脆弱地域のうち流域面積の小さいソロ川およびパンパンガ流域について、 GCM 実験データの力学的ダウンスケーリングを行い、河川流域スケールでの降水量の将来変化 を予測するものである。

昨年度は MIROC5(1.4 度間隔)の出力を用いて試験計算を行ったが、今年度は MRI-AGCM3.2S(20 km間隔)の出力が入手可能になったため、このデータを主に用いて計算を進め た.領域モデルは WRF を用いた。なお、力学的ダウンスケーリングに用いる3次元6時間毎の出 力データとしては提供されている中で最高解像度の1.25°間隔のデータを用いた。 (1)フィリピン・パンパンガ流域でのダウンスケーリング



図 1.5-1: パンパンガ川流域の最近の 4 洪水事例を対象とした ERA-interim 再解析データのダウン スケーリング実験。上段は地上雨量計,下段はダウンスケーリングしたパンパンガ流域平均雨量 の時系列である。



図 1.5-2: パンパンガ川流域の年最大 24 時間雨量の確率分布 (左)地上雨量計、(中)再解析 ERAinterim のダウンスケーリング、(右)MRI-AGCM3.2S 現在気候のダウンスケーリング

フィリピン・パンパンガ川流域で水平解像度 10km と 2km へのダウンスケーリング実験を行っ た。最初に、ダウンスケーリング計算の検証を行うため、この流域で発生した最近の4つの洪水 事例を対象として、NCEP Final Analysis (米国)、 NCEP reanalysis II (米国)、 JRA-25 (日本) ERA- interim (欧州)の再解析データをダウンスケーリングし、地上雨量計による観測データ と比較した。その結果、ERA-interimの場合が最も再現精度が良かった。また、図 1.5-1の 2009年 9月や2011年9月のように、観測結果をほぼ忠実に再現できる場合もあれば、2011年6月のよう に大きく過小評価する場合もあった。これらの原因として、台風性の雨は再現精度が良いのに対 し、モンスーン性の雨は今回のような高解像度領域モデルにとって再現が不得意であったためと 考えられる。

次に、1979年~2003年の25年間を対象として、年最大24時間降水量を求め、水文統計解析に より確率分布を求めた(図 1.5-2). 2 kmメッシュまでのダウンスケーリング計算を 25 年間行うには 計算機資源が不十分なため、年最大雨量をもたらす降雨イベントをあらかじめ抽出し、そのイベ ントを含む1周間を対象にダウンスケーリングを行った。なお、図1.5-2(左)の地上雨量計による 計算は、1980~2013年までの計22年間である。

まず、図 1.5-2(中)の再解析の結果は、大きな雨量をもたらした 2 つのイベントが確率分布に影 響して出現確率の小さい雨量を増大させ、20 年確率雨量も 261mm と地上雨量計に比べて大きな ものになった。これに対して、図 1.5-2(右)の現在気候実験の確率分布は地上雨量計の結果と近い ものであり、20 年確率雨量も 161mm であった。再解析および現在気候のダウンスケーリングの 結果は出現確率が大きい雨が少なめに出る傾向があった。これは、高解像度領域モデルがモンス ーン性の雨をうまく再現できないことによるものと考えられる。一方、再解析の上位2つのイベ ントを除いて統計解析を行うと、確率分布は地上雨量計の結果に近くなり、20 年確率雨量も 181mmとなった。

#### GCM による河川流出量(洪水・渇水)予測値の不確実性を考慮した河川流域スケー 1.5.1.2. ルでの利用手法の開発(インドネシア・ソロ川)

## (1) 適用したモデルの概要

### 2 段タンク分布型流出解析モデル

流出解析モデルに、土木研究所で開発され た土研分布モデル ver.2 を用いた(図 1.5-3 参 照). 当該モデルは、タンク型のパラメータ 分布型流出解析モデルである。

### 2 モデル構築に用いたデータ等

モデル構築には、国土地理院が発行する 標高データの GlobalMap(Elevation)を用いて モデルを構築し、土地利用データ Globalmap(Landcover)等を用いてパラメータ 設定を行った。

### (2) 帯水層タンク初期水位の影響

 日雨量データを用いた長期流出計算結果 (解析期間:2002/1/1~2009/12/31)

モデルの特性を把握するため、構築したソロ川モデルの帯水層タンクの水位について、流域全 体を一様に 2.0m(高湿潤状態)、1.0m(湿潤状態)、0m(乾燥状態)の3ケースを設定して流出 解析を行い、ハイドログラフを描いて結果を比較した(図 1.5-4 参照. Jurug 地点:流域面積 3.580km<sup>2</sup>)。当初の3ヶ年は、解析結果に顕著な差があり、時間の経過とともにその差が小さくな っていくことが分かる。





図 1.5-3: 土研分布モデル ver2.0 タンク構造図





図 1.5-4:高湿潤状態(WL:2.0m),湿潤状態(WL:1.0m),乾燥状態(WL:0.0m)解析結果比較(Jurug 地点)



図 1.5-5: 高湿潤状態(WL:2.0m)の計算開始日(左図:A)と7年11ヶ月後(右図:B)の帯水層タンク水位

このときの帯水層タンク水位を仮想的に土壌水分量を表現する状態変数とする。図 1.5-5 に計算 開始日(A)と7年11ヶ月経過時点(B)の帯水層タンク水位を示す。A が流域ほぼ一様に高湿潤状態 であるのに対して、B は河川周辺に水が集まった結果、水の空間分布が河川周辺に集まっている ことが分かる。現地の地下水分布のデータを入手できていないため検証はできていないものの、 モデル上、定常的な地下の水分布を仮想的に再現した結果である。

### 初期水位の影響

地下タンクの初期水位を満水にして高湿潤状態を再現し、この状態から降雨流出解析を行って 算出した流量をQ<sub>s</sub>とする。一方、地下タンクの水位を0に設定し、この状態から降雨流出解析を 行って算出した流量をQ<sub>d</sub>とする。時間経過とともにQ<sub>s</sub>とQ<sub>d</sub>双方の流出解析結果の差が無くなっ ていくことが分かる。Q<sub>s</sub>とQ<sub>d</sub>の差をQ<sub>d</sub>で除した値を初期水位の影響指数とする。この指数が 0.001、つまり解析結果の差が0.1%以内であれば、初期水位の差が解析結果に与える影響がなく なるものとした。この指数が0.001を下回る期間を明確にすることによって適切な流出解析を行 うための仮想的な土壌水分量初期状態を再現できると考えられる。

$$0.1(\%) < \left(\frac{Q_s - Q_d}{Q_d}\right) \times 100$$

## 1.5.1.3. 降雨-流出-氾濫解析モデルによるパンパンガ川流域の洪水ハザードの推定

フィリピンにおいて最も洪水に脆弱な流域の1つであるパンパンガ川流域を対象に降雨流出氾 濫解析モデルである RRI(Rainfall-Runoff-Inundation)モデルを適用し既往の洪水の浸水域を推定した。

## (1) 対象洪水

2011 年 9 月に発生した台風 17 号(NESAT)による洪水を対象として氾濫解析を行った.対象とし た洪水は図 1.5-6 が示すように降雨量(48 時間雨量)、流量(Arayat 地点)ともにこれまでの記録で 既往最大の洪水イベントである.



図 1.5-6: パンパンガ川流域における年最大 48 時間雨量(左)と日平均流量(右)の頻度解析結果

## (2) 降雨-流出-氾濫解析モデルによる解析結果

ICHARM らが開発した洪水流出解析モデル IFAS(Integrated Flood Analysis System)と RRI モデル

をパンパンガ川流域に適用し洪水流量の再現性 を検証した。図 1.5-7 はパンパンガ川流域の水 文観測地点である。図 1.5-8 は San Isidro 地点と Mayapyap 地点における流量の実測値と IFAS お よび RRI の解析結果である。対象とした洪水で はパンパンガ川流域の San Isidro 地点より上流 で氾濫が起きたため、河道内の洪水流出のみを 解析する IFAS では実測値のピークを過大評価 しているが降雨流出および氾濫を一体で解析す る RRI モデルではハイドログラフ全体を概ね再 現することができた(図1.5-8上)。ただし、氾 濫の発生より上流の Mayapyap 地点では IFAS が ピーク流量を精度よく再現できている(図1.5-8 下)。次に RRI モデルによる氾濫エリアを図 1.5-9に示す。パンパンガ川流域には図 1.5-9に 示したようにカンダバスワンプとサンアントニ オスワンプの2つの広大な湿地帯があり、洪水 時には遊水機能を発揮し下流流量を低減してい る。RRI モデルによる結果においても湿地帯が 湛水していることが示された。



図 1.5-7: パンパンガ川流域の水文観測地点





図 1.3-8 . San Island 地点(エ)と Mayapyap 地点(下)におけるハイドロ グラフ

図 1.5-9: RRI モデルによる氾濫解析結果

### (3) 気候変動の水害ハザードに対する影響評価に向けて

これまで地上雨量計のデータを用いて氾濫解析を行ったが、今後は GCM 実験データの力学的 ダウンスケーリングした結果を雨量データとして適用し、気候変動の将来影響評価を行う予定で ある。現状では再解析データをダウンスケーリングした結果を RRI モデルに適用し地上雨量を用 いた結果との比較検証を行っている。

### 1.5.1.4. チャオプラヤ川流域における将来の降水量と洪水氾濫予測

GCM によるアンサンブル予測降水量を降雨流出氾濫モデル(RRI)に入力し、2011 年タイ洪水 に匹敵する規模の洪水氾濫生起確率が、現在(1979-2003)から将来(2075-2099)に渡ってどの ように変化するかを分析した。

### (1) チャオプラヤ川流域における将来の降水量の変動

本研究で用いるアンサンブル予測降水量は、気象庁 AGCM3.2S の1ケース、AGCM3.2H の12 ケース(3種の積雲対流スキーム: Arakawa-Schubert、Kain-Fritsch、Yoshimura と4種の海面 水温の組み合わせ)計13ケースとした。現在気候は、海面水温のアンサンブルがないため計4ケ ースとなる。以下の分析では、現在気候と将来気候に分けて、アンサンブル平均を中心に議論す る。

まずチャオプラヤ川流域の年平均降水量とその標準偏差を調べた結果、現在から将来に向けて、 それぞれ 1162mm から 1269mm、181mm から 223mm 増加した。また年最大日降水量も同様に 50mm から 60mm、14mm から 19mm に増加

していた。

次に、チャオプラヤ川の下流氾濫に影響を及 ぼす6ヶ月の降水量に着目すると、平均が 994mmから1078mmに、標準偏差が195mm から238mmに増加していた。これらの6か月 降水量をGumbel分布に当てはめて求めた10、 20、50、100年の再現期間を表1.5-1に示す。

ŧ٩.	1 5	.1.	C	2.	E H	R久	旦の	里祖弗明	
衣	1.9.	·۱۰	ю	ケ	月	年小.	里の	円���別旧	

項目		6ヶ月降ス	水量(mm	)
分布型		Gumb	el分布	
再現期間	10年	20年	50年	100年
現在 P	1254	1367	1512	1621
将来 F	1401	1540	1721	1856
Fの再現期間	5年	9年	18年	31年

2011年の大規模洪水では、6か月降水量が約1400 mm であったと報告されており、本研究で用 いた GCM の結果に基づけば、現在気候で24年の再現期間に匹敵する。これが将来気候になると 1400 mm の雨は約10年に一回の頻度で生じることになり、2011年規模の洪水頻度が増えること が GCM 出力から推定される。ただし観測雨量に基づく2011年洪水の再現期間は50年から100 年と言われており、バイアス補正を施した現在気候でも6か月降水量が過大評価傾向であること に注意が必要である。

## (2) 将来の洪水氾濫

次に各アンサンブルメンバーの予測降水量をRRIモデルに入力して流域スケールの流出氾濫計 算を実行し、年最大の氾濫量(氾濫量を流域面積で除した水高換算値)のピーク値を推定した。 推定された毎年の氾濫量に指数分布を適用して頻度解析を行った結果、表 1.5・2 に示す全ての再 現期間で、年最大氾濫量が約3割増加していた。なお観測雨量を用いて推定した 2011 年の氾濫 量は、約150mmであり、現在気候と将来気候に対する再現期間はそれぞれ 29 年と12 年となっ た。また図1.5・11 に示すように、25 年間における 50 cm 以上の浸水回数を空間分布で示すと、 バンコク北西部において浸水頻度が約2割増加することが推定された。



図 1.5-10: 氾濫の頻度分布変化と数値 (破線はアンサンブルメンバー、実線 はアンサンブル平均)

表 1.5-2:年最大氾濫量の再現期間

項目	소	F最大氾	濫量(mn	n)
分布型		指数	分布	
再現期間	10年	20年	50年	100年
現在 P	102	133	173	204
将来 F	136	177	232	273
Fの再現期間	6年	10年	19年	32年



図 1.5-11:25 年間における浸水回数(左:現在,中:将来,右:将来-現在)

# 1.5.1.5 Flood Risk Assessment Model

## (1) Outline

The hazard assessment has been done by using hydrological and hydraulic model and flood-prone areas are identified. By considering major exposure in the flood-prone areas and damage function based on flood characteristics, we can estimate flood damages for risk assessment. The agricultural damage estimation for flood risk assessment in the Pampanga river basin of the Philippines has been presented as a case study. For flood damage estimation, the Rainfall Runoff Inundation (RRI) model developed by Sayama et al. (2012) was used to calculate the flood depth and duration. The flood depth and duration were calculated at 500 m x 500 m grid size using Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data.

## (2) Agricultural damage function

Rice crops are major agricultural production in the Pampanga river basin. Thus, agricultural damages are represented by rice crops. The rice crops damage function given by BAS (2013) as shows in Fig.1.5-12 were used to estimate a preliminary results of rice crop damages in the Pampanga river basin.



Figure 1.5-12: Rice crop damage functions for different stages of crops (BAS, 2013).

## (3) Results and discussion

In Pampanga river basin, there was a severe rice crops damages during typhoon "Pedring" in 2011. Provisionally, it was considered to estimate rice crop damages in 2011 flood event. Fig.1.5-13 shows the estimated damage function using maximum, minimum and average values of damages function (Okazumi et al., 2014).



Figure 1.5-13: Estimated rice crops damages using (a) maximum values, (b) minimum values and (c) average values of damage function.

Table 1.5-3 compares the estimated rice crops damages in the Pampanga Province and the Calumpit Municipality. In Calumpit Municipality case, the calculated value of rice crop damages is approximately

same as statistical damage value. However, in case of Pampanga Province, the statistical value of rice damages also includes rice crop damages due to strong wind in the areas. So there is significant difference between calculated and statistical values of rice crop damages in the

Table 1.5-3: Compa	rison of calculated	and statistical	damages

	Rice crops damages (million Peso)				
Descriptions	Statistical	Using maximum values	Using minimu m values	Using average values	
Pampanga Province (Affected area 15,900ha)	1,376	777	443	609	
Calumpit Municipality (Affected area 1,250ha)	37	54	30	42	

Pampanga Province. Further discussion must be necessary for calibration of flood risk assessment model under limited information.

### 1.5.1.6 Drought Risk Assessment

(1) Distributed hydrological BTOP model as water supply side for drought assessment

In our drought risk assessment methodology, water supply side was obtained with distributed hydrological BTOP model in the study river basins. The BTOP model was constructed on the 15 arc-second spatial resolution (approximately 450 m) using simple upscaling algorithm that preserves original 90 m resolution of HydroSHEDS river length, elevation and riverbed slope with (Masutani and Magome, 2008, 2013). In the Pampanga river basin, the BTOP model was subdivided into nine blocks based on locations of river gauging stations, (see Fig.1.5-14). The daily river discharge was simulated with BTOP for 57 years (1951-2007) with the ground-based precipitation dataset APHRODITE Monsoon Asia version V1003R1 (Yatagai et al. 2012). For the Pampanga river basin, seven observation stations were used to calibrate natural river discharge and the dam inflows, after construction of the Angat Dam in 1969 and the Pantabangan Dam in 1979. The simulated



Figure 1.5-14: BTOP model with 0.5

BTOP daily discharge was in good agreement with observed river discharges during dry seasons.

(2) Estimation of Irrigation Water Demand with a Simplified FAO module

In the water demand side, we focused on irrigation water demand, because major freshwater users in the Pampanga river basin are due to agricultural activities. In particular, we decided to generate the long-term time-series of irrigation water demand in paddy fields of the National Irrigation Administration's Upper Pampanga River Integrated Irrigation Systems (UPRIIS). We considered three criteria in selecting methods for irrigation water demand, including: (i) data availability (methods should be sufficiently met by locally available data); (ii) generalization (methods should be applied to other river basins in the different countries); (iii) reliability (methods should be those proved to show reliable estimates). Based on above

criteria, we finally decided to adjust methods in FAO's irrigation manual module #4 (Savva and Frenken, 2002) to local data availability.

Our irrigation water demand procedure is illustrated in Figure 1.5-15. First, the cropping calendar was established for a basis for the time-series of irrigation water demand over an average year. Based on data of the Bureau of Agricultural Statistics



Figure 1.5-15: Irrigation Water Demand for Rice

(BAS), two cropping seasons for rice (regular dry season from Dec. to April and regular wet season from June to Oct.) were respectively divided into periods for five growth stages of rice. Second, the crop water requirement (CWR), i.e., the water amount for the maximum yield of the crop, was estimated. Here the value of Kc was estimated over the developed cropping calendar by using data in FAO (1998). Local data about meteorological observations were insufficient to use FAO's Penman-Monteith equation to estimate the evaportranspiration (ETo). Third, we converted the obtained time-series of CWR into those of the

irrigation division requirement (IDR), using data of JICA (1982; 1992) about effective rainfall, and irrigation system efficiency. Fourth, monthly irrigation water demand was estimated for the period from Jan. 1991 to Dec. 1999 by multiplying two monthly time-series, i.e. IDR and irrigated area.

## 1.5.2. 特定脆弱地域での影響評価

## 1.5.2.1. パンパンガ川流域の洪水脆弱性に関する現地調査

パンパンガ川流域における洪水・渇水脆弱性と現行の 被害算定手法の実態把握を目的として2013年7月に現地 調査を行った。パンパンガ川流域は流域内人口が多い上 、重要な穀倉地帯であることから、被害算定に関しては 人的被害と農業被害の観点から行った。

(1) パンパンガ川流域における洪水被害

パンパンガ川流域では、台風の上陸頻度が非常に高いことからほぼ毎年洪水氾濫が発生している。図 1.5-16が示す 2004 年の洪水で浸水したエリアから流域の低平地の大部分が浸水していることがわかる。

(2) 湿地帯による遊水機能

パンパンガ川流域にはカンダバスワンプとサンアント ニオスワンプの2つの広大な湿地帯があり、洪水時には これらの湿地帯が浸水することで流域全体としての遊水 機能を果たしている。特にカンダバスワンプでは、河川 堤防の一部を低くすることで高水を湿地帯に流入させ河 川流量のピークカットを行っている(図1.5-17)。湿地帯



図 1.5-16:2004 年に発生した洪水の パンパンガ川流域の浸水

内には多くの人が居住しているが、図 1.5-18 が示すように、カンダバスワンプでは多くの家屋が 嵩上げされ浸水に備えている。さらには浸水時には一部で漁業も営まれており、住民は洪水と共 存しているといえる。したがって、浸水被害を算定にあたっては湿地帯の内外で異なる手法を適 用する必要がある。



図 1.5-17:パンパンガ川から カンダバスワンプへの流入



図 1.5-18: カンダバスワンプ内の嵩上げされた住居

(3) 河道の流下能力に関する既存データの精査

パンパンガ川流域では雨量観測所が 18 地点設置されており、そのうち 11 地点は水位も観測さ れている。流量観測はこれまでに数地点で行われているが、洪水時のデータは少なく、H-Q 曲線 の作成に十分とは言えない。その中でも比較的データが多い Arayat 地点を中心に本調査では本 川の河道流下能力を確認した. 図 1.5-19 現地調査において河道幅から目視で推定した河道流下能 力である。また図 1.5-20 は Arayat 地点における H-Q 曲線を現地調査後に見直した結果である。 現地調査の結果から、これまでの H-Q 曲線では洪水時に流下能力を過大評価していたと考えられ るため、河道幅から推定される流量と整合性がとれる程度に修正した。



# 1.5.2.2 Household Survey in Pampanga River Basin

# (1) Outline

The households with assets are major stocks of the people living in the flood-prone areas. It is thus necessary to consider household damages in flood risk assessment towards development of flood risk assessment model. The direct damage of house and assets varies according to the socio-economic group of the community, which can be categorized based on flood characteristics. To observe the household and flood characteristics in the Pampanga river basin of the Philippines, a field investigation was carried out in June 16-22, 2013.



Figure 1.5-21: Households types in the Pampanga river basin of the Philippines.

## (2) Household characteristics in the Pampanga river basin

During the field investigation in June 2013, it was observed that elevated houses using concrete stilts can be found in the Swamp areas of the Pampanga river basin, mainly in the Candaba Swamp. In the Candaba Swamp area, houses can be categorized mainly into two groups: (a) normal house and (b) elevated house with stilts. Further, it can also be categorized into two groups based on walls: (i) concrete block wall and (ii) wooden wall. However, in other

areas, house can be categorized as (a) normal house with concrete wall and (b) normal house with wooden wall. Fig.1.5-21 shows the different types of houses in the Pampanga river basin. The assessment of house damage will be carried out by considering house types, socio-economic factors and their daily life styles. It is also planned to conduct household survey in the flood prone areas of the Pampanga river basin tentatively in March 2014 to collect information on household and flood characteristics. By reviewing experiences of past study of house damages estimation in Cambodian floodplain of Lower Mekong Basin under Technical Assistance 7276 of Asian Development Bank and West Rapti River basin in Nepal under KAKUSHIN program, the house damages can be estimated by developing damage function/threshold criteria of the damages according to flood characteristics and by considering socio-economic characteristics. In further, to develop appropriate house damage function, it is necessary to collect information and data on flood and socio-economic characteristics in the Pampanga river basin.

# 1.5.2.3 カンボジア・メコン川の洪水氾濫予測シミュレーションに用いる河床高計測とその推定方 法の検討

メコン川下流域の洪水氾濫リスクマネジメントを実施するために、現地調査に基づいた家屋被 害額の算定、Rainfall Runoff Inundation RRI (Model)による氾濫計算、衛星データから算定する実績 氾濫による水位算定、現地調査に基づいた痕跡水位の計測を実施している。メコン川は数キロに 及ぶ川幅を持ち、例えばカンポンチャムにおける洪水ピーク時の流量は 40,000m<sup>3</sup>/s を超える。こ のような流域における河川において氾濫解析を実施するにあたり、氾濫流量と河道内を流れる流 量を大雑把に把握することが重要となる。ここではカンポンチャムからプノンペンにかけて、約 100km の河道を、2km 程度のピッチで超音波多層型流速計(以降、ADCP)を用いて、横断測量に よる水深の計測、河川水流量の計測を実施した。また同時に、高さ方向の精度が±15cm 程度の高 精度 GPS を使用して、河道内の水位を計測した。またここでは、水深を推定する方法を議論する。

図 1.5-22 はプノンペンからカンポンチャムまでのメコン川の航空写真と、観測時の航跡、代表 的な観測側線を示す。表 1.5-4 はそのときの計測結果の一例を示す。



図 1.5-22:メコン川と計測断面

表 1.5-4: 谷計測側線における河床局と流
-------------------------

section #	TotalQ	Width	TotalArea	depth
	m³∕s	m	m 2	m
M 6	8316.1	1136.4	18490.7	16.3
Μ7	8334.0	1017.5	18762.5	18.4
M 8	6699.2	1039.1	19838.1	19.1
M 16	7960.2	1879.1	17980.4	9.6
M 17	7750.2	1320.6	16582.0	12.6
M 18	7664.3	714.7	16420.4	23.0
M 19	7459.2	747.2	14873.3	19.9
M 20	7940.0	1209.5	18099.9	15.0
M 21	7205.0	1039.1	17636.3	17.0
M 22	6564.4	815.0	16985.0	20.8
M 23	6881.6	617.2	17654.3	28.6
M 24	7686.9	900.6	15233.8	16.9
M 25	7159.3	1375.3	15050.2	10.9
M 26	7607.1	2164.9	15074.6	7.0
M 28	7720.5	1346.3	16521.7	12.3
M 29	7224.9	1686.9	14102.7	8.4
M 30	7934.2	1184.8	15281.6	12.9
M 31	7142.1	828.1	13684.7	16.5
M 32	7202.7	846.2	14018.0	16.6
M 33	8050.9	1026.5	17483.5	17.0
M 33c	8156.2	1160.1	16755.2	14.4
M 37	7486.1	1585.9	12377.8	7.8
M 38	7512.0	1327.7	14699.5	11.1
M 39	7770.2	913.9	14883.1	16.3
M 40	7285.2	667.0	15687.0	23.5
M 41	7571.4	1070.2	12477.0	11.7
M 42	6591.9	1174.6	17398.6	14.8
M 51	7779.8	1465.8	15506.6	10.6
M 52	7695.9	975.9	18113.7	18.6
M 53	6688.5	695.7	17629.7	25.3
M 54	7231.3	556.1	16187.8	29.1
M 55	6951.0	899.3	17128.3	19.0
M 56	7790.2	1079.4	15880.4	14.7
average	7485.2	1105.0	16196.9	16.2

この観測では大きな砂州が存在するような場所においては分量が生じていること、その支川での水深が浅くて曳航船が入れなかったために全断面の計測ができない測線もあった。表 1.5-4 はそれらをのぞいたすべての測線における総流量; Total Q、ADCPによる計測流量、測線幅; Width、河積; Total area、平均水深(Total area/Width); Depth を示す。総流量は、ADCPによる計測流量、上層、下層、左右岸不感帯の推定流量を加算したものである。また川幅は計測断面の幅と左右岸の距離計測によるものを加算したものである。また同区間は他の河川との合流もないこと、水位の日変化が流量としては無視できるほど小さいことを前提に考えると、ほぼ断面における流量の連続性が保たれていて、全断面において、このときの流量は、7.500m<sup>3</sup>/s 程度であることがわかる。

また横断測量を実施した断面においての最大の川幅は 2,165m、最小で 556m となり、大きく 変化し、それに応じて水深も変化している。ここでは紙面の都合上示さないが、河岸湾曲部にお いては、教科書にあるようないわゆる湾曲部の河床地形が多く見られた。

## 1.5.2.4 カンボジア・メコン洪水多発集落における家屋の地理的分布と洪水被害

昨年度の予備的調査(上米良他、2013)の結果を踏まえて、洪水多発集落における家屋の地理 的分布とその変遷、居住・生活様式及び最近の洪水被害状況について、より詳細な現地調査を実 施した。

カンダル州北端、メコン川右岸に位置するムクカンプル郡の集落(図 1.5-23、黄色の実線で囲 まれた領域)を対象に、雨季終了直後の 2013 年 12 月に聞取りと測量による家屋調査を実施した (631 家屋で聞取り、うち 425 家屋で測量)。調査項目は、家屋の立地(経緯度、地盤高)、特徴 (世帯数、世帯人員、家屋の素材・構造、建築面積、床高、築年数、建築期間、建築費用)、2011 年及び 2013 年洪水時の浸水深と家屋被害額(家屋修繕費用)である.加えて、集落の居住・生活 様式を理解するための聞取りを実施した。

初期解析の結果、家屋の地理的分布及び洪水被害状況について次のような特徴が明らかになった。調査対象地域では、河岸沿いに発達した自然堤防を横切るかたちでメコン川から後背湿地に向かって複数の水路が延びており、それらの水路沿いの微高地に家屋が密に分布している。そして、水路から離れるに従って地盤は低くなり家屋密度は次第に疎となる。また、近年最大規模の2011 年洪水と直近の 2013 年洪水とでは浸水域の広がり方や水深分布が異なり、それに伴って各家屋の洪水被害の程度やその地理的分布も異なる。



図 1.5-23: 現地調査対象地域(黄色の実線で囲まれた領域)



# 1.5.2.5 ソロ川におけるリスク評価のためのデータ収集状況

洪水・渇水によるリスク評価を行 うためには、雨量・流量といった基 本的な水文データのみならず、流域 内の利水状況や過去の洪水・渇水に よる被害程度等を把握しておくこと が必要である。本節では、特定脆弱 地域のうちの一つであるソロ川の 2013 年 9 月の調査時点でのデータ収 集状況を報告する。図 1.5-24 にはソ ロ川流域及び 2007 年洪水の浸水範囲 を示す.また、Fahmi *et al* (2008)によ って報告されている 2007 年洪水の被 害状況を表 1.5-5 に示す。

2013 年 9 月調査では、「水供給」 、「水需要」、「過去の被害程度」に 重点を置いてデータの収集を行った . 収集状況を表 1.5-6 に示すが、被害 の大きな要素の一つである農業被害 面積については 2007 年洪水・1997 年 渇水ともにデータを入手した。当該 データはひと月に2回調査されたもの で、作物の品種毎、栽培された地区 毎にまとめられたものである。2007 年 12 月の 2 回目調査の被害面積デー タを表 1.5-7 に示す。なお、表 1.5-7 は 中部ジャワ島について合計されたも のである。



図 1.5-24: ソロ川流域及び 2007 年洪水の浸水範囲 (インドネシア公共事業省による報告及び RRI モデル による出力結果, 黄色のフラッグは 2013 年 1 月調査に おける Household Survey 調査地点)

表 1.5-5:2007 年洪水の被害状況 (Fahmi et al (2008)) の報告のうち,被害額と死者数を抽出)

地区	被害額 単位:10億ルピア)	死者数
Wonogiri	42	9
Sukoharjo	31.29	1
Karanganyar		77
Sob	11.258	
Sragen	192	5
N gaw i	40	5
B bra		2
Bojonegoro	598.3	
Tuban	25.6	
Lamongan	10.1	
Gresk	30	1
計	980.548	100

表 1.5-6: データ収集状況

	収集済み	入手元				
水供給	Wonogiri Dam から上流域及びMadiunへの水配分 計画	BBWS/PJT1				
	耕作面積	DP				
水需要	クロップカレンダー	DP				
	作物必要水量	BBWS/PJT1				
過去の対実知度	農業被害 面積) (997-2010) 洪水·渇水)	DP				
過去の被害性度	家屋被害 2012-2013) 洪水)	BPBD				
その他	人口統計	BPS				
ここで、インドネシア国公共事業省ソ 水資源公社 <u>PJT1</u> Jasa Tirta 1 Pub 農務省 <u>DP</u> D inas Pertanian) 地方防災局 <u>BPBD</u> BADAN PENANG インドネシア国中央統計庁 <u>BPS</u> Bad	その他 人口統計 ここで、インドネシア国公共事業省ソロ川事務所 <u>BBWS</u> BALA IBesar W ilayah Sungai, Bengawan Sob) 水資源公社 <u>PJT1</u> Jasa Tirta 1 Public Corporation) 農務省 <u>QP</u> D inas Pertanian) 地方防災局 <u>BPBD</u> BADAN PENANG GULANG AN BENC ANA DAERAH) インドネシア国中央統計庁 BPS Badan Pusat Statistik) である					

	被害面積ℓInitha)		
	Affected	Lost	
*	45893	27501	
トウモロコシ	2625	1431	
落花生	234	207	
大豆	1108	631	
玉葱	421	1	
チリ	13	9	
キャッサバ	109	58	
ささげ	1	1	
バナナ	6665	6665	

表 1 5-7 : 2007 年 12 月の 2 回目の被害面積調査結果(中部シャワ	表	€15-7:2007年12	月の2回目の被害面積	積調査結果(中部ジー ・	ャワ島)
--	---	---------------	------------	--	------

## f. 考察

(1) 流域スケールでの影響評価に関する考察については、次の通りである。

フィリピン・パンパンガ川流域:本流域を対象としてダウンスケーリング実験を行ったところ、 ERA-interim が最も再現性が良いことを確認した。25年間の年最大雨量の出現確率分布を求めた 結果は、MRI-AGCM3.2S現在気候は地上雨量計の結果と近いものだったが、ERA-interimの結 果は出現確率の小さい雨を過大評価した。今後、温暖化実験のダウンスケーリングを進めていく 予定であるが、結果の議論を行うにあたり、今回得られた確率分布の特性に注意して議論を行う 必要がある

パンパンガ川流域を対象に氾濫適用モデルの検討を行った。中流付近(San Isidro 地点より上流) で氾濫が発生するため、上流部以外では洪水流出モデルよりも氾濫解析モデルの方が適用性が高い。さらにパンパンガ流域では湿地帯における氾濫水の貯留等を氾濫解析モデルにより考慮する 必要がある。

For Pampanga river basin, flood and draught changes are investigated concerning economic loss. The damage curves of rice crops depend on each stage of rice crops and there is also uncertainty in flood damages. The calculated result of rice crops damages in case of Calumpit Municipality is reasonable with reported values. However, in case of Pampanga Province, there is significant variation between calculated and statistical values of rice crops damages because the statistical value of rice damages also includes rice crop damages due to strong wind in this case. The development of appropriate rice crop damage curves is necessary in further study. The method of flood damage estimation for risk assessment presented in the paper can also be applied other river basins such as Solo river basin of Indonesia, Lower Mekong basin in Cambodian floodplain, Indus river basin of Pakistan and Chao Phraya of Thailand.

Natural meteorological droughts were frequently observed in the Pampanga river basin due to lack of precipitation while only one socio-economic drought, i.e., the phenomena when water demand is unsatisfied by irrigation water supply, was recorded in 1998. We examined this pattern and found that the Pantabangan Dam provided water for the irrigation withdrawals in all cases of natural drought except year 1998. In 1998, the water storage in the dam, which was 20% of its capacity at the begging of growing season, was not sufficient to cover river water demand of 48, 484 ha for the entire growing season, see Figure 1.5-25. In April 1998, the dam water storage was exhausted and resulted in water deficiency of 92.8 MCM, see shaded area. This water deficit affected 44,293 ha of irrigational area using modified FAO irrigation manual module #4 with calculated Irrigation Water Demand of 0.024 cm/ha, see shaded area in Figure 1.5-25. For the 1998 socio-economic drought, BAS reported affected irrigation area of 17,130 ha and totally damaged area of 3,300 ha in the Pampanga River Basin. The discrepancy between the estimated and recorded affected area may be due to overestimation of the IDR values and/or underreporting of the affected area by BAS. However, no spatial data were available to validate affected and damaged irrigation area in 1998 drought. Therefore, our next task is to collect drought damage data for validation and estimation of the drought damage curve in the Pampanga river basin.



Figure 1.5-25 : historical drought in the Pampanga river basin

<u>インドネシア・ソロ川流域</u>:流出解析モデルを構築し、長期計算を行って初期値の違いが解析 結果に与える影響を定量的に評価した。モデル上、地下の水分布について、仮想的に定常状態を 再現したが、現実の水分布との違いについて検証できていない。これを検証する手法を見出すこ とが出来れば、より適切なモデル定数を見出し、再現性の高い解析結果が得られるものと考えら れる。今後、GCM ダウンスケールが完了次第モデルに入力し、解析を行っていく。

<u>タイ・チャオプラヤ川流域</u>:本流域では、年降水量、年最大日降水量、6ヶ月雨量のいずれも 将来に増加しており、2011年タイ洪水をもたらした降水量(約1400 mm)の再現期間は、現在 気候で24年であったものが、将来では約10年に短くなった。同様に各アンサンブルメンバーの 予測雨量をRRIモデルに入力して氾濫量を推定した結果、2011年の氾濫量(約150 mm)の再現 期間が現在気候の29年から将来気候の12年と短くなった。この結果はチャオプラヤ川流域にお いて、2011年のような大規模洪水の頻度が増加する可能性を示唆している。

(2) 特定脆弱地域での影響評価に関する考察については、次の通りである。

<u>フィリピン・パンパンガ川流域</u>:本川では H-Q 曲線を作成するための流量観測データが十分で なく、特に洪水時の流量の推定は非常に少ない。さらに河道横断面形状も変化しやすく、ピナツ ボ火山の噴火前後では大きく異なる。モデルのキャリブレーション等のためにもまず、既存デー タを精査し、実測の洪水流量を正確に捉えることが必要であった。さらに、被害の算定にあたっ ては湿地帯による洪水被害緩和機能を考慮する必要である。

The direct damage of house and assets varies according to the socio-economic group which can be categorized based on flood characteristics. In the swamp areas of Pampanga river basin, the elevated house with stilts to avoid flood damages can also be found. The house damage function can be developed according to house types by considering daily life styles of house households and socio-economic factors. The socio-economic data and households characteristics with information of past household damages are necessary to collect in further for development of appropriate house damage curve.

カンボジア・メコン川中下流域:図1.5-26は表1.5-4の側線番号を横軸に、左縦軸を川幅、右

縦軸が水深である。◆は表 1。5-4 の川幅、■の水深は表 1。5-4 の結果である。また▲は推定水 深であり、次の式から求めた。

$$h_{n+1} = h_n \cdot \left( \frac{B_{n+1}}{B_n} \right)^{-24/25}$$

上式は流量と流砂量の連続関係及び代表粒径、水面勾配、河床粗度が断面 n 及び n+1 において等 しいと仮定し、断面 n の水深 h<sub>n</sub>と川幅 B<sub>n</sub>、断面 n+1 の川幅 B<sub>n+1</sub>から断面 n+1 の水深 h<sub>n+1</sub>を算定 するものである。ここでは M6 の河床高を初期値として、上式と表 1.5-4 の各段面の川幅から、推 定水深を算定した。図が示すように■と▲を比較すると、上記のような単純な一次元の式を用い ても概ね正しく算定できることがわかる。ただし、断面 31、 32、34 の二つは 5m 程度のずれが 生じている。これは上記の仮定が成立しないこと、流れが二次元的なことなどが考えられる。現 に図 1.5-22 が示すように、断面 30 付近の断面 31、32、33 は河道湾曲部であることから、一次元 的な流れでは説明できないことが推測される。

今後は、計測により得られた水位と水深から河床高を算定し、それを RRI の初期条件として使用する。また上記の推定水深に関して水面勾配、河床粗度の観点から考察を続ける。



図 1.5-26:河道断面における川幅と水深の空間的変化

また、調査対象地域の地形と家屋の地理的分布の調査では、明瞭な対応関係を持つことが分かった。それ故、家屋密度分布を地盤高の関数として表現することで、集落の空間構造を数理的に記述できると考えられる。しかしながら、広域の洪水リスクを評価するためには、特定の地域に認められた集落の空間構造が、メコン川下流域に点在する多数の集落に共通する構造なのか確認する必要がある。その一手段として、今後、衛星観測を活用した分析に着手する。高分解能の光学衛星画像(IKONOS/GeoEye-1 画像等)や地形データ(ALOS 搭載 PRISM 観測等)を活用すれば広域の家屋分布や地形を詳細に把握できる。現地調査データとの比較により衛星観測の確からしさを検討した上で分析を進める。家屋の洪水被害額を推計するための経験式を作成できると考えられる。被害額と浸水深の関係は家屋の素材・構造、床高、築年数等に応じて異なる可能性があるため、現地調査データの分析を進める。

<u>インドネシア・ソロ川流域</u>:表 1.5-6 のデータを用いて地区ごとに浸水面積と被害面積を比較し てその関係性を分析した上で、将来において推定される浸水面積と比較する。それにより将来に おける被害面積を推定することができると期待される。今後は収集されたデータを活用して解析 を進めながら不足しているデータの収集を進め、将来におけるリスク評価につなげていきたい。

# g. 引用文献

Bureau of Agricultural Statistics (BAS), 2013: Manual on damage assessment and reporting system, Department of Agriculture, Philippines.

Fahmi H, Harry M. S, Harianto, 2008: Impact of Climate Change on Floods in Bengawan Solo and Brantas

River Basins, Indonesia, International RIVER SYMPOSIUM

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations),1998: Crop Evapotranspiration Guidelines for Comuting Crop Water Requirements FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Italy.
- JICA, 1989: Feasibility report on the Pampanga Delta Development Project, The Philippines.
- JICA,1992:The master plan study on the small-scale irrigation development project, National Irrigation Association, The Philippines
- Masutani, K., and J. Magome, 2008: Effects of the Novel Scaling Algorithm of River Networks on Discharge Simulations, Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, Vol .21, Issue 23: 242-247
- Masutani, K., and J. Magome, 2013: Runoff analysis with DEM scale Independent TOPMODEL (in Japanese). Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, Vol .26, Issue 1: 26-37.
- Okazumi, T., Miyamoto, M., Shrestha, B. B. and Gusyev M. 2014: Uncertainty estimation during the process of flood risk assessment in developing countries case study in the Pampanga river basin -, Journal of Disaster Research, Vol. 9, No. 1, pp.69-77.
- Savva A.P. and Frenken K. 2002:Irrigation Manual: Planning, Development, Monitoring and Evaluation of Irrigated Agriculture with Farmer Participation, Module 4, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Zimbabwe.
- Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K. 2012: Rainfall-Runoff-Inundation analysis of Pakistan flood 2010 at the Kabul river basin, Hydrological Sciences Journal, Vol.57, no.2, pp.298-312.
- Tomonobu Sugiura, Takahiro Kawakami, Go Ozawa, Kazuhiko Fukami, Jun Magome, Seishi Nabesaka, , 2010: EXPERIMENTAL APPLICATION OF FLOOD FORECASTING SYSTEM (IFAS) USING SATELLITE-BASED RAINFALL Proceeding of the 9th International Conference on Hydroinfomatics (HIC2010), (2010), CD-ROM
- Yatagai, A., K. Kamiguchi, O. Arakawa, A. Hamada, N. Yasutomi and A. Kitoh. 2012: APHRODITE: Constructing a Long-Term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia Based on a Dense Network of Rain Gauges. Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol .93: 1401-1415. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00122.1
- 上米良 秀行・杉浦 愛・岡積 敏雄・萬矢 敦啓,2013: メコン川下流域を対象にした家屋洪水被害 推定手法の検証. 河川技術論文集,19,351–356.

## h. 成果の発表

論文

- 佐山敬洋・建部祐哉・藤岡 奨・牛山朋來・萬矢敦啓・田中茂信, 2013: 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, p. 14-29,
- 建部祐哉・佐山敬洋・牛山朋來・藤岡 奨・田中茂信, 2013: チャオプラヤ川流域における長期降雨 流出氾濫解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 69, No. 4, I\_457-I\_462.
- 3. 佐山敬洋・建部祐哉・藤岡 奨・牛山朋來・田中茂信, 2013: 大規模洪水氾濫の時空間起源分析に関 する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 69, No. 4, I 463-I 481, 2013.
- 岡積敏雄,田中茂信,2013:途上国へ適用可能な洪水リスク評価技術,土木学会河川技術論文集, 第19巻,pp17-20,2013年6月
- 5. 萬矢敦啓・上米良秀行・岡積敏雄・郭栄珠, 2013:人工衛星データを用いた洪水氾濫水位の算出手 法の検討~メコン川下流域を例として~,河川技術論文集,第19巻, pp341-344, 2013 年6月
- 6. 上米良秀行,杉浦愛,岡積敏雄,萬矢敦啓,2013:メコン川下流域を対象にした家屋洪水被害推定 手法の検討,土木学会河川技術論文集,第19巻,pp 351-356,2013 年 6 月
- 7. 鍋坂誠志,藤岡 奨,宮本 守,杉浦 愛,岡積敏雄,田中茂信,深見和彦,2013:インドネシア国ソロ 川流域におけるリアルタイム洪水予警報システムの構築,河川技術論文集 第19巻,2013年6月,

pp.345-350

- A. Sugiura, S. Fujioka, S. Nabesaka, T. Sayama, Y. Iwami, K. Fukami, S. Tanaka and K.Takeuchi, 2013: Challenges on modelling a large river basin with scarce data: A case study of the Indus upper catchment. In Piantadosi, J., Anderssen, R.S. and Boland J. (eds) MODSIM2013, 20th International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2013, pp. 2346–2352. ISBN: 978-0-9872143-3-1.
- A. Yorozuya, H. Kamimera, T. Okazumi, Y. Iwami, and Y. Kwak, 2013: Estimation of water surface elevation on inundated area using satellite based information. In Piantadosi, J., Anderssen, R.S. and Boland J. (eds) MODSIM2013, 20th International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2013, pp. 2353-2359. ISBN: 978-0-9872143-3-1.
- 10. Ushiyama T., T. Sayama, Y. Tatebe, S. Fujioka, K. Fukami, 2013: Numerical simulation of 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin by using lagged ensemble rainfall forecasting. J. Hydrometeor., in press.
- Okazumi, T., Miyamoto, M., Shrestha, B. B. and Gusyev M. 2014: Uncertainty estimation during the process of flood risk assessment in developing countries - case study in the Pampanga river basin -, Journal of Disaster Research, Vol. 9, No. 1, pp.69-77

口頭発表

- 佐山敬洋,建部祐哉,田中茂信,2013:大流域を対象にした降雨流出氾濫現象の長期水収支解析, 水文・水資源学会,神戸大学,pp.30-31,2013.9.25
- 2. 佐山敬洋, 2013:世界の水災害予測における PUBの挑戦,水文・水資源学会創立 25 周年記念シン ポジウム,神戸大学百年記念館, 2013.9.27
- 3. Takahiro Sayama, Yuya Tatebe, Shigenobu Tanaka, 2013: Large-scale Flood Simulation with Rainfall-Runoff-Inundation Model in the Chao Phraya River Basin, Vienna, EGU Conference, 2013.4.12, (ポスター)
- 4. Shrestha, B. B., Okazumi, T., Tanaka, S., Sugiura, A. and Kwak, Y. 2013: Assessment of flood hazards and vulnerability in Cambodian floodplain, Proceedings of the 6th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER-6), June 2013.
- Okazumi, T. 2013: Flood Risk Assessment and Disaster Data Users' perspective -, Expert Group Meeting on Improving Disaster Data to Build Resilience in Asia and Pacific, UNESCAP, Sendai, Japan, 30 Sep-1 Oct, 2013.
- 6. Okazumi, T. 2013: Development of Global Water-related Risk Indices assessing real phenomena of flood disasters, 9th MLIT-USACE Technical Exchange Meeting, 9 December, 2013.
- 7. Takahiro Sayama, Yuya Tatebe, Shigenobu Tanaka, 2013: How Sensitive is Large-scale Flood Inundation to Rainfall Variability? -Water Balance Analysis Based on Basin-wide Rainfall-Runoff-Inundation Simulation-, San Francisco, AGU Fall Meeting, 2013.12.13, (ポスター)

アウトリーチ

- Yasuda, N., 2013: Activities of ICHARM and Recovery of Tohni-Hongo Area in Kamaishi City, Geohazards: Impacts and Challenges For Society Development In Asia Countries, 49<sup>th</sup> CCOP Annual Session, 22-23 October 2013, Sendai, Japan
- 2. 上米良秀行,2013:メコン川下流域を対象にした家屋洪水被害推定手法の検証,オーガナイズドポ スターセッション2「洪水流・氾濫流・浸水被害ー現象と評価ー」,2013年度河川技術に関する シンポジウム,2013年6月
- 3. 岡積敏雄, 2013:河川・防災技術の現状と今後の方向性に関する話題提供「世界の多様な条件下で も標準的に適用できる技術開発」:オーガナイズドセッション「国境を越える河川技術」,土木 学会河川技術シンポジウム6月7日

# 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:鈴木 篤

(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)

 (土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター)鈴木 篤・岩見洋一・澤野久弥・徳永 良雄・千田容嗣・津田守正・栗林大輔・佐山敬洋・大原 美保・Shrestha Badri Bhakta・工藤 俊・ 萬矢敦啓・宮本 守・牛山朋來・長谷川聡・郭 栄珠・E.D.P Perera・小関博司・上米良秀行・ 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 大学院医学工学総合研究部) 馬籠 純

### a. 要約

平成26年度は、流域スケールでの影響評価基本技術の開発では、特定脆弱地域のうち流域面積 の小さいパンパンガ川流域について、GCM実験データの力学的ダウンスケーリングを行い、河川 流域スケールでの降水量の将来変化を予測した。また、対象河川流域における具体的な洪水の影 響評価を行うため、インドネシア・ソロ川流域を対象にRRIモデルを適用し、実測雨量、 MRI-AGCM3.2S現在気候、MRI-AGCM3.2S将来気候の降雨量を入力した結果を用いて降雨量と流 量・氾濫量の関係分析及び流量・氾濫量の頻度解析を実施した。メコン下流域を対象にRRIモデ ルを適用し、APHRODITEによる雨量を入力し、対象領域内の流量再現性を確認した。タイ・チ ャオプラヤ流域を対象にAGCM3.2S(RCP8.5)による降雨量と気象要素から算定した可能蒸発散量 とを降雨流出氾濫(RRI)モデルに入力し、降雨と氾濫の応答関係を分析した。特定脆弱地域での 影響評価では、洪水・渇水リスク評価を検討するため、パンパンガ川流域を対象にしてBTOPモ デルを用いて流出予測シミュレーションにより渇水の影響を、さらに、RRIモデルにより2011年、 50年確率、100年確率の洪水での浸水期間や洪水深を求め、洪水農業被害の影響を検討した。

カンボジア・メコン川、ソロ川、パンパンガ川において現地調査を行い、洪水・渇水脆弱性の 実態把握や洪水被害等の社会経済影響評価のための情報収集・整理を行った。

## 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」 (革新プロ)ほかで開発してきた流域規模分布型水文モデル、GCM 降雨バイアス補正手法等によ るハザード評価研究を、アジアの水災害が懸念される複数の特定脆弱地域に当てはめ、水災害リ スクの社会経済影響評価を行い、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するものである。

特定脆弱地域としては、最近大きな水災害を経験し、気候変動影響も大きいと予想される地域 の代表として、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を対象とする。

## c. 研究計画、方法、スケジュール

本研究は、以下のサブ課題群で構成する。

小課題(1) 流域スケールでの影響評価基本技術の開発

(1-1) 不確実性を考慮した河川流域スケールでの GCM 予測値に基づく洪水・渇水ハザード予測 値の現地適用(ローカルカスタマイズ)手法の開発

① GCM による降水量予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発

### 通しページ 36
- ② GCM による河川流出量(洪水・渇水)予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発
- ③ GCM 降雨予測値を用いた不確実性を考慮した河川流域スケールでの洪水氾濫予測手法の 開発
- (1-2) 社会経済評価のための基本技術の開発
- ① 洪水リスク評価モデルの改良
- ② 渇水リスク評価モデルの開発
- ③ 水マネジメントシステムにおける洪水リスクと渇水リスクの適正な配分の検討
- ④ 脆弱性モニタリングシステムおよび対策指標の開発

小課題(2)特定脆弱地域での影響評価(具体的な河川流域での事例研究)

- ① インダス川流域
- ② メコン川中下流域
- ③ チャオプラヤ川流域
- ④ ソロ川流域
- ⑤ パンパンガ川流域

実施期間を平成24年度~平成28年度の5年間とし、以下の年次計画、方法で実施する。

【平成 24 年度】

特定脆弱地域としてまず先行研究対象とする河川流域を選定する。それら流域において、流域 スケールでの洪水・渇水ハザード評価を行うために必要なダウンスケーリングに着手する。

また、流域スケールでの水文流出解析モデルの構築と併せて社会経済影響評価のための情報収 集・整理を行い、洪水・渇水リスク評価モデルの開発に着手する。

#### 【平成 25 年度】

特定脆弱地域のうち、小規模流域では MRI-AGCM3.2S による現在気候実験データの力学的ダ ウンスケーリングに着手する。大規模流域では CMIP5 等の現在気候および将来気候予測実験のバ イアス補正および統計的ダウンスケーリングを実施する。また、渇水から洪水までを長期連続的 に再現する流出解析モデルと、降雨を入力して流域一体で氾濫現象を再現する流出氾濫モデルの 構築と特定脆弱地域における検証を行う。

【平成 26 年度】

複数の対象河川流域における CMIP5 の各種実験の大気の力学的ダウンスケーリングを開始し、 極端イベントのサンプル数を増やす。一方、現地河川流域スケールでの洪水・渇水ハザード指標 とその不確実性の分析を行う手法を提案し、対象河川流域における具体的な評価に着手する。

また、洪水リスクについて、洪水に対する脆弱性をグローバル GIS データ等から評価する手法 を開発する。一方、各対象流域内における社会構造の変化シナリオを設定し、それに基づく将来 水需要および水ストレスの推定に着手する。

【平成 27 年度】

ダウンスケーリング手法について修正を行い、対象河川流域における各種 RCP シナリオ実験に ついて大気の力学的ダウンスケーリングを行う。また、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、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。

【平成 28 年度】

河川流量解析システムや社会構造の変化予測の最終成果を活用し、洪水/渇水ハザードの変化

の社会経済影響評価結果を整理するとともに、洪水・渇水リスクの変化予測結果についてとりま とめる。

#### d. 平成 26 年度研究計画

平成 26 年度は、c.に示した小課題(1)では、(1-1)の①~③、(1-2)の①②について引き続き進展 させている。また、これらの研究に必要な情報収集を図るため、対象河川流域での現地調査を実 施している。今年度は、メコン川中下流域(②)、チャオプラヤ川流域(③)、ソロ川流域(④) およびパンパンガ川流域(⑤)における現地調査を行っている。

## e. 平成 26 年度研究成果

#### 1.5.1. 流域スケールでの影響評価基本技術の開発

# 1.5.1.1. GCM による降水量予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手法の開発

本研究は、特定脆弱地域のうち流域面積の小さいパンパンガ川流域について、GCM 実験データの力学的ダウンスケーリングを行い、河川流域スケールでの降水量の将来変化を予測する。さらに、降水量データを用いて流出氾濫計算を行い、洪水リスクの将来変化を予測する。

昨年度から、MRI-AGCM3.2S(20km 間隔)の出力データを用いて力学的ダウンスケーリングを進めている。領域モデルはWRFを用いており、対流パラメタリゼーションはKain&Fritschを用いた。

フィリピン・パンパンガ川流域で水平解像度 15km と 5km へのダウンスケーリング実験を行った。平成 25 年度は、計算機資源の制約から、豪雨が発生した 1 週間を対象に 2 kmまでのダウンス ケーリングを行った。ダウンスケーリングに用いる領域気候モデル(RCM)の統計的性質を把握す るためには、通年のデータが必要である。そこで、今年度は解像度を 5 kmに変更して全期間でダ ウンスケーリング計算を行った。

図 1.5-1 は、RCM によるダウンスケーリング計算結果が、地上雨量計に比べてバイアスがある ことを示している。図 1.5-1 (中)の現在気候では、頻度解析の Gumbel 直線(赤実線)が地上雨 量計のもの(青一点鎖線)よりも年最大雨量が小さく、確率雨量を過小評価していた。また、出 現頻度が小さいほど過小評価傾向が大きくなった。図 1.5-1 (右)の将来気候実験の結果は、現在 気候に比べて確率雨量が増大することを示した。しかし、こちらも同様にバイアスを含むものと 考えられる。



図 1.5-1: パンパンガ川流域の年最大 24 時間雨量の頻度解析。(左)地上雨量計、(中)MRI-AGCM3.2S 現 在気候のダウンスケーリング、(右)MRI-AGCM3.2S RCP8.5 将来気候のダウンスケーリング

図 1.5-2 は、地上雨量計とそれに対応する地点の現在気候ダウンスケーリング結果について日雨 量別出現頻度を示したものである。この図から、両者の雨量出現頻度は異なっており、RCM の結 果は日雨量 100mm 以下では出現頻度が過大であり、日雨量 150mm 以上の豪雨では出現頻度が過 小となっていた。この 150mm 以上の RCM の過小評価傾向が、図 1.5-1 の頻度解析の過小評価に つながるものと言える。また、月平均値では、ダウンスケーリング結果は雨量計の 2 倍程度過大 となった(図は省略)。このような地上雨量計と RCM の雨の特性の違いを修正するようなバイア ス補正が必要である。



図 1.5-2: 地上雨量計(黒丸)とそれに対応する地点における現在気候ダウンスケーリング結果(赤 四角)の日雨量別出現頻度

## 1.5.1.2 ソロ川流域の洪水氾濫特性と将来の洪水氾濫の変化の推定

インドネシア・ジャワ島の中部から東部に位置するソロ川流域(流域面積:15,752km<sup>2</sup>)を対象 にRRIモデルを適用し、実測雨量、APHRODITE(V1101)(1979年~2003年)、MRI-AGCM3.2S現在 気候(1979年~2003年)、MRI-AGCM3.2S将来気候(2075年~2099年)の降雨量を入力し出力され た結果を用いて降雨量と流量・氾濫量の関係分析及び流量・氾濫量の頻度解析を実施した。なお、 流量はソロ川中流部に位置するCepu観測所(集水域面積:10,886km<sup>2</sup>)の流量を用いた。 (1)入力降雨の作成

洪水氾濫解析を実施するために各年の降雨イベントを以下の手順で作成した。

- 1)年最大流量をもたらす降雨期間を調べるために、実測流量及び実測雨量がともに存在する 2003年~2009年それぞれにおいて、年最大流量と、その発生日までのソロ川流域平均雨量の X日積算値の相関係数を算出した結果、年最大流量とソロ川流域平均雨量の4日積算値(以 下、4日積算雨量)の相関係数が最も高かった。
- 2) 当該イベントによる洪水がピーク流量を記録するために十分長いと考えられる期間として、4 日積算雨量が一年間の中で最大となる4日間に、助走期間4日、洪水逓減期間4日を加えて 12日間の降雨イベントを作成した。
- (2) 4 日積算雨量とピーク流量・最大氾濫量の関係

図 1.5-3 は 4 日積算雨量とピーク流量の関係を示している。4 日積算雨量が 125 mm となる将来 気候の洪水に対応する流量は約 3,000 m<sup>3</sup>/s となっている。さらに 2007 年実績洪水も4 日積算雨量 は 167 mm と大きいものの、ピーク流量は約 3,000 m<sup>3</sup>/s である。異なる4 日積算雨量がほぼ同じ流 量をもたらしている理由は、流量が 3,000 m<sup>3</sup>/s 付近に達するとそれ以上の規模の流量の大半は氾 濫量に分配されるためと推察される。図 1.5-4 は 4 日積算雨量と最大氾濫量との関係を示している。 なお、氾濫量はソロ川流域のうち Wonogiri ダム下流域部分の氾濫ボリュームを対応する面積で除 した値であり、最大氾濫量は各年の計算期間中の最大の氾濫量のことである。APHRODITE、 MRI-AGCM3.2S 現在気候、MRI-AGCM3.2S 将来気候に対して 4 日積算雨量と最大氾濫量を線形近 似した場合、その回帰係数は約 0.6 になる。一方、4 日積算雨量が特に大きくなる3 イベントにつ いては回帰直線で推定される値よりもさらに最大氾濫量の増加が大きく、これは上述のように Cepu 付近の流下能力を超える洪水が発生する場合に、流出の多くが氾濫に分配されるためである と推察される。



図 1.5-3: 4 日積算雨量とピーク流量の関係 (図中の 2007 年洪水及び 2009 年洪水は 実測雨量及び観測されたピーク流量を示す)



図 1.5-4: 4日積算雨量と最大氾濫量の関係 (図中の 2007 年洪水及び 2009 年洪水は実測 雨量及び実測雨量を RRI モデルに入力して 出力された最大氾濫量を示す)

(3)ピーク流量・最大氾濫量の頻度解析

図 1.5-5 はピーク流量の頻度解析結果である。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広がってくる結果となった。また、リターンピリオド 2 年よりも短いデータでも現在気候よりも将来気候の方が大きな値を示す結果となった。

図 1.5-6 は最大氾濫量の頻度解析結果である。リターンピリオド 10 年より短いデータでは現在 気候と将来気候で明瞭な差が見られない一方で、リターンピリオドが長くなると両者の差は広が ることが分かる。つまり、将来では大規模な最大氾濫量の頻度が増加し、規模がさらに大きくな ることが示唆されている。





図 1.5-6:最大氾濫量の頻度解析結果

(赤: MRI-AGCM3.2S 現在気候、青: MRI-AGCM3.2S 将来気候、双方とも確率密度関数は GEV を使用)

## 1.5.1.3 メコン下流域を対象にした降雨流出氾濫シミュレーションの検証

対象 5 流域のひとつであるメコン川流域では、カンボジアのクラティエ地点下流を浸水解析の 対象にする。対象とする領域の面積は 103,350 km<sup>2</sup> であり、メコン全流域の約 13%を占める。この 領域に RRI モデルを適用し、クラティエ地点の流量と降水・蒸発散量を入力して長期の流出・氾 濫現象を推定する。本検討では、まず 1998 年から 2007 年までのクラティエ観測流量と APHRODITE による雨量を RRI モデルに入力し、対象領域内の流量再現性を確認した。図 1.5-7 に Prek Kdam 地点と Koh Khel (バサック川) + Neak Luong (メコン川) 地点の観測と計算の比較 を示す。前者の地点はメコン本川とトンレサップ湖との間に位置しており、雨季は観測・モデル ともに流量が負になっており、本川からトンレサップ湖に流入している。また後者の地点はプノ ンペン下流で本川とバッサック川に分流した後の地点であり、分流比が明らかでないため、両者 を合計した流量で観測と計算を比較している。合計のピーク流量は、境界条件として設定したク ラティエ地点のピーク流量よりも 10,000 m<sup>3</sup>/s 程度小さくなっており、この傾向をモデルは妥当に 表現している。ただし、ハイドログラフの逓減部はモデルが過小評価傾向にあり、その原因のひ とつは Prek Kdam 地点でも確認されるトンレサップからの流入の過小評価と考えられえる。また RRI モデルで計算されるピーク時の浸水深は図 1.5-7 に示したとおりであり、この妥当性について は今後メコン流域委員会(MRC)からも情報を収集しながら検証を進める。これらの検証が終われ ば、別途 BTOP モデルで推定する将来気候に対するクラティエ地点の河川流量を RRI モデルに入 力し、気候変動がメコンデルタ地帯における浸水に及ぼす影響を分析する予定である。





図 1.5-7: RRI モデル による計算流量と観 測流量の比較(上)、 2000 年洪水時の浸水 想定域(MRC)(左下) とモデルによるピー ク浸水深(右下)との

# 1.5.1.4. チャオプラヤ川流域における 2011 年洪水時の降雨量と氾濫量の統計的評価とその将 来変化

AGCM3.2S(RCP8.5)による降雨量と気象要素から算定した可能蒸発散量とを降雨流出氾濫 (RRI)モデルに入力し、降雨と氾濫の応答関係を分析した。降雨量と氾濫量にそれぞれ Gumbel 分布と指数分布を当てはめて非超過確率を算出し、それらが現在から将来にどのように変化する かを分析した。 分析には AGCM3.2S の計算ケー スのうち、現在(1979-2003) SPA\_m01 と将来(2075-2099)の SFA-rcp8.5 及び海面水温のクラス タのアンサンブル c1-c3 を加えた現 在1、将来4の全5ケースを用いた。 佐山ら(2013)によれば、年最大の 氾濫量は、それが生起するまでの6 ヶ月間累積雨量と相関が高くなる ( $R^2 = 0.85$ )ことが分かっている。以 下では、同様に6ヶ月雨量と最大氾 濫量について分析する。

図 1.5-8 に現在と将来における、6 ヶ月雨量及び年最大氾濫量と非超 過確率/再現期間との関係を示す。 佐山ら(2013)による 1960 年から 2011 年の観測雨量を用いた分析結 果も合わせて表示した。



現在の6ヶ月雨量は、1000mmか

ら 1200mm の範囲において、観測値と AGCM がほぼ同程度の再現期間を示すが、それ以下の領域 では AGCM が過小、それ以上の領域では AGCM が過大傾向にあるため、Gumbel プロットの傾き は AGCM の方が小さくなっている。その結果、例えば 2011 年の実績降雨量 1400 mm の再現期間 は、観測情報に基づけば約 50 年になるのに対し、AGCM のそれは 25 年になる。現在の年最大氾 濫量については、70mm 程度までは同じ氾濫量に対して AGCM の方が観測情報よりも再現期間が 長くなる。ただし1 点だけ AGCM の結果では 280mm という極端に大きな氾濫が生じており、こ れは雨季の終盤である 10 月に 500mm 程度の大きな降雨があったことが主な原因であることを確 認している。

将来の6ヶ月雨量においては、ケース毎にばらつきがあるものの、全般的に同じ再現期間に対して将来の降水量が増加傾向にある。また将来の年最大氾濫量についても同様のことが言える。 具体的には、2011年の洪水氾濫における6ヶ月雨量と氾濫量は、それぞれ1400mm、150mmであり、それらの再現期間は、現在から将来へそれぞれ、25年から7~10年、31年から10~11年に短くなる。

## 1.5.2. 特定脆弱地域での影響評価

## 1.5.2.1. Socio-economic drought assessment using BTOP model in Pampanga River Basin

In previous study, we introduced an assessment framework of the socio-economic drought that occurs due to water imbalance between anthropogenic water demand and reduced water supply from precipitation, river, and soil moisture water (Mishra and Singh, 2010). In the Pampanga river basin, we estimated irrigation water demand in the Upper Pampanga River Integrated Irrigation System (UPRIIS) and simulated natural river discharges with 0.45-km grid size BTOP model using globally available precipitation data (Gusyev et al., 2014). For the present water supply, existing water infrastructure such as the Pantabangan multi-purpose dam has been reducing the impacts of natural droughts on water scarcity during dry and wet seasons. In future climates, natural droughts may further reduce water inflow into reservoirs while anthropogenic water demand may increase due to population growth, industrial development and agricultural area expansion. Therefore, our socio-economic drought assessment focuses on water inflow (water supply) as well as reservoir water storage in this year's study.

To quantify historical droughts, the Pantabangan Dam was selected as a pilot site to conduct dam operation assessment of the historical water supply and demand (Figure 1.5-9A). The Pantabangan Dam

has reservoir capacity of 2,966 MCM and was constructed in 1976 at the northern part of the Pampanga river basin (PDO, 2013). The Pantabangan Dam is operated by National Irrigation Administration (NIA) and has a primary purpose to supply irrigation water to the UPRIIS, which consists of five NIA districts with total irrigated area of about 150,000 ha and river water diversion structures, see Rizal dam in Figure 1.5-9A. In 2001, Casecnan trans-basin water diversion tunnel was constructed to increase Pantabangan reservoir water inflows (Figure 1.5-9A). In the Pampanga river basin, we utilized available data of JICA (2011) study and conducted second drought field survey to gather additional water supply, water demand and drought damage data. From the second survey, we also investigated past drought mitigation measures that were taken by NIA to reduce drought impacts on farmers during historical droughts.



Figure 1.5-9 : National Irrigation Administration (NIA) water distribution system in the Pampanga river basin with the Casecnan trans-basin tunnel (A) (modified from JICA (2011)). The observed Pantabangan inflows and BTOP simulated discharges with ground based precipitation at dam site (B) and zoom-in on the one year results of the 1985-1986 period (C).

For the Pantabangan Dam, we obtained a daily historical record of precipitation, reservoir inflow, water level and dam discharge data from 1980 to 2012 (PDO, 2013). These collected data were utilized with the BTOP model, which was previously developed with about 0.45-km grid size (15 arc-second) for the detailed simulations in the Pampanga river basin. The BTOP model, which was developed from globally available data sets, simulated river discharge and dam inflows with local daily ground base precipitation data collected at the Pantabangan Dam Office (PDO, 2013). The BTOP simulated discharges demonstrated a satisfactory match with the observed Pantabangan inflows for the calibration period from 1980 to 1999, see Figure 1.5-9B. An enlarged view on the simulation period between 1985 and 1986 is demonstrated in Figure 1.5-9C. The discrepancy between simulated discharges and observed inflows may be due to the precipitation data measured only at one rain gauge station located at the Pantabangan Dam office. After the model calibration, we conducted the BTOP model simulation from 1980 to 2012 including Casecnan trans-basin tunnel inflows. As a result, we observed the importance of the Casecnan inflows from year 2002 to replenish Pantabangan water storage during wet seasons. From these preliminary results, we concluded that the Pantabangan reservoir has sufficient capacity to meet the UPRIIS irrigation water demand especially during dry seasons. For the climate change impact assessment of the reservoir system, we need to investigate future available water due climatic variability and future anthropogenic water demand in the

Pampanga river basin.

#### 1.5.2.2 Development of Agricultural Flood Risk Assessment Model in Pampanga River Basin

In this study, agriculture damage estimation method was developed for flood risk assessment. The flood damage assessment in the Pampanga river basin of the Philippines was conducted by considering three major factors of risk: hazard, exposure and vulnerability. The hazard characteristics were analyzed by Rainfall Runoff Inundation model (Sayama et al. 2012). Agriculture damage refers here as damage occurring to rice-crops. The rice-crops damage curves were originally developed by combining flood damage matrix of BAS (2013) and height of rice crops according to IRRI (2009).

## (a) Agricultural damage curves

The flood damage curves for rice-crops were originally developed as a function of flood depth, flood duration and growth stage of the rice crops. Fig. 1.5-10 shows the developed rice-crops flood damage curves.



Figure 1.5-10 : Developed flood damage curves for rice-crops (Shrestha et al. 2014).

#### (b) Agricultural damage estimation

Based on developed flood damage curves and flood inundation characteristics, the agricultural damages can be estimated by following equations.

$$Loss Volume = Rice Yield \times Damaged Area \times Yield Loss$$
(1)  
$$Damage Value = Loss Volume \times Farm Gate price$$
(2)

The values of farm gate price equal to 17 Peso/kg (BAS, 2013) and rice yield equal to 4,360 kg/ha (BPAO, 2011) in case of the Pampanga river basin of the Philippines were used in the calculation. According to cropping calendar published by National Irrigation Administration, Upper Pampanga River Integrated Irrigation Systems (NIA-UPRIIS) in 2013, the stage of rice crops during September 2011 flood period was maturity stage. Thus, the damage curves of maturity stage are used to estimate the production loss of rice crops for September 2011 flood event as well as for certain return period flood events such as 50- and 100-years return periods.

The agricultural flood damage assessment was conducted in the Pampanga river basin of the Philippines for flood events of September 2011, 50- and 100-years return periods (Fig. 1.5-11). The damaged rice field area estimated in the Pampanga river basin during flood events of September 2011, 50- and 100-year return periods are found to be 45,900, 52,800 and 78,100 hectares, respectively, while the values of agricultural damage are 1,461.2, 1,777.8, 2,888.5 million Pesos, respectively. The damaged rice field area is the total area of rice crops damages where flood water depth is greater than 0.5m in case of maturity stage, which can be estimated by using flood damage curves.



Figure 1.5-11 : Calculated agricultural damages for September 2011 flood, 50 and 100 years return period flood cases ( $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ ).

## 1.5.2.3 フィリピンパンパンガ川流域における住家のリスク評価手法に関する現地調査

農村地域の水害常襲地帯において住家の水害リスクを評価する際には、地域住民は、高床式住 居に住むなど日頃から水害に適応した暮らしを営んでいるため、現地の実情を正しく理解した上 で定量的な評価を行う必要がある。今年度は、農村地域の水害常襲地帯の実情を踏まえた住家の 水害リスク評価手法の構築に向けて、フィリピン共和国パンパンガ川流域の洪水常襲地帯を対象 として、水害による住家の被害状況と居住生活への影響を把握するための現地調査を行った。

平成26年3月及び7月に、パンパンガ川流域に 位置するブラカン州カルンピット市及びパンパン ガ州カンダバ市内の洪水常襲地帯において、地域 住民を対象とした訪問面接式のアンケート調査を 行い、2011年、2012年、2013年の水害での住まい の被害程度や避難行動、生活への支障などの実態 を把握した。図1.5-12には、パンパンガ川流域内 での両市の位置を示した。回答数は、平成26年3 月の調査で37、平成26年7月の調査で61である。 また、現地の自治体へのヒアリング調査も行い、 水害時の生活支障に対する公的支援(公助)につ いても把握した。これらの調査に基づき、①浸水 深さと避難率の関係、②浸水深さと家屋及び家財 の被害率との関係、③被害程度と公助の関係につ いて分析した。

アンケートの回答は、構造種別及び1階建て・2 階建て・高床式などの階数別に整理し、分析を行った。この結果、①浸水深さと避難率の関係については、2階建てでは床上の浸水深さが50cm以上の場合に特に自宅外への避難が行われたが、1階建てでは50cm 未満でも自宅外への避難が行われて





いた。また、自宅外に避難していない場合でも、屋根の上で水がひくまで生活したり、家財を1 階から2階に移動したりするなど、浸水により日常生活への支障が発生している状況が確認された。②浸水深さと家屋及び家財の被害率との関係については、被害率を「建物及び家財の資産価値に対するこれらの被害額の割合」として定義し、床上での浸水深さとこの被害率との関係を図 1.5-13の通りに算出した結果、両者には明確な関係は見られなかった。この理由として、住居が水害に適応しており、浸水後も補修等を行わずに継続居住するため損失が少ない、保有する家財が少ない又は浸水前に2階等に移動させるため家財被害も少ない、などの状況が確認された。



①1階建てコンクリート壁住宅 ②2階建てコンクリート壁住宅 ③高床式コンクリート壁住宅 図 1.5-13:家屋建物及び家財の被害率と床上での浸水深さの関係

#### 1.5.2.4. 広域の洪水被災リスク評価に向けたカンボジア洪水多発地域の家屋様式に関する検 討

本研究では、メコン川下流地域の家屋を対象に、広域の洪水被災リスクを評価するために、洪 水氾濫や被災状況に関する現地調査を実施し、その結果を踏まえた技術開発に取り組んでいる。

カンボジア洪水多発地域の集落(図 1.5-14:メコン川右岸、カンダル州最北部のムクカンプル 郡ロカコンムオイ及びロカコンピー)を対象に、平成 25 年度に実施した家屋と洪水氾濫・被災状 況に関する現地調査、及び、平成26年度に追加で実施した調査で得られたデータを整理・解析し た。その結果、調査地域の主要な家屋様式が高床式であること、家屋床高の下限値は建築面積か ら推定できること、建築面積は光学衛星画像等の高空間分解能の衛星観測から把握できること等 を明らかにした。これらの知見は、衛星観測から多数の家屋と床高の広域分布(曝露度・脆弱性) を把握し、洪水被災リスクを評価するために役立つ。

2013 年 12 月の 12 日間に 400 を超える家屋を訪問し、家屋の素材・構造、築年数、建築費用、 建築面積、床高といった特徴量、過去(直近の2013年と近年最大規模と言われる2011年)の洪 水氾濫水深(年最大値)や被災状況(家屋修繕費用)について、聞取り及び計測により調査した。

調査した家屋の約9割は高床式の家屋であり、そのうち約8割は床高2m以上である(図1.5-15)。 床高の度数分布(図1.5-15)によると、地床式の家屋(床高0.3m未満)を除けば、2.3m付近に 極大を持ち、最大値は約4.5 m である。分布形状は左右非対称であり、分布の裾野の広がりは、 床の低い側は狭く、高い側は相対的に広い。2011年と2013年の洪水では、大半の家屋の床は氾 濫水面よりも高く、洪水後の家屋修繕費用も殆ど生じていない。



図 1.5-14: 現地調査対象地域 (黄色の実線で囲まれた領域)。

家屋の床は建築費用が高く、建築面積が広いほど高い傾向にある(図 1.5-16、1.5-17)。但し、 住人の考え方や好みにも依るため、建築費用や建築面積との関係では床高にばらつきが認められ る(図 1.5-16、1.5-17)。建築費用と建築面積は独立ではなく、費用が高いほど面積も広い傾向に ある。建築費用は住民の記憶に基づく数値であり、一程度の不確かさを含むと考えられる。建築 面積と床高は何れも計測値であり、建築面積が広いほど床高の下限値も大きいことが明確である (図 1.5-17 青の点線)。

大半の家屋の輪郭は矩形であり、建築面積の平方根(家屋の水平規模の目安)の最小値(約3.7m) は光学衛星画像の分解能(数十cm)より一桁大きい。従って、衛星画像から多数の家屋の位置と 輪郭(建築面積)を把握でき、そして、衛星画像から把握した各家屋の建築面積をもとに最低床 高を推定できると考えられる。最低床高とは、家屋の建築面積に対して、少なくともその高さよ りも床が高いことを示す数値である。



図 1.5-16:家屋の建築費用(横軸)と床高 (縦軸)の関係(上図)及び費用の度数分 布(下図)。上図、赤丸は費用 1,000 USD (米ドル)刻みで求めた層別平均



図 1.5-17:家屋の建築面積(横軸)と床高 (縦軸)の関係(上図)及び面積の度数 分布(下図)。上図、赤丸は面積 10 m<sup>2</sup>刻 みで求めた層別平均。青の点線は、地床 式家屋を除いて面積 10 m<sup>2</sup>刻みで床高の 最小値(青のバツ印)を抽出し、べき乗 型の関数形をあてはめた結果

#### 1.5.2.5 現地政府機関との意見交換および現地視察

海外の流域を対象として洪水・渇水リスク評価を行うためには、気象・水文データだけでなく、 被害データなど多くの種類のデータが必要となる。これらのデータ、特に被害データについては、 国外の研究機関に提供をためらう現地政府機関も多いため、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、現地視察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視察を 実施している。平成 26 年度においては、下記のような意見交換や現地視察を行った。

インドネシアについては、平成26年5月20日に、インドネシア公共事業・住宅省水資源総局 長 Hasan 総局長、Arie 局長、並びにJICA 専門家の守安邦弘氏がICHARM を来訪し、創生プロ グラムで実施している渇水推定結果などについて意見交換を行った(図 1.5-18(a))。また、平成 27年2月7日から11日にかけて、ジャカルタの公共事業・住宅省を訪問して Basuki Hadimuljono 大臣および関係者に面会し、データの提供依頼や研究成果の共有についての意見交 換を行うと ともに、ソロ川上流部のウォノギリダム付近の視察を実施した(図 1.5-18 (b))。

フィリピンについては、平成26年7月7日から16日にかけて、PAGASA(フィリピン大気・ 地球・宇宙庁)やDPWH(公共事業道路省)、OCD(市民防衛局)、PDRRMO(州災害リスク軽減 管理事務所)などを訪問し、それぞれと意見交換を行うとともに、パンパンガ川流域現地を訪問 した(図1.5-18(c))。

タイについては、平成26年12月11日から12日にかけて、RID(王立灌漑局)やTMD(タイ気象 局)を訪問し、気象・水文データや被害に関するデータなどに関して意見交換を行った(図 1.5-18(d))。



(a)インドネシア公共事業・住宅省との意見交換



(c)PAGASA との打ち合わせ



(b) 公共事業・住宅省 Basuki 大臣 との面会



(d)タイ・王立灌漑局との打ち合わせ

図 1.5-18: 現地政府機関との意見交換

## f. 考察

(1)流域スケールでの影響評価基本技術に関する考察は、次のとおりである。

フィリピン・パンパンガ川流域:本流域におけるダウンスケーリング実験を用いて、25年間の 年最大 24 時間雨量の頻度解析を行った結果、MRI-AGCM3.2S 現在気候は地上雨量計の値と比較 して過小評価傾向となった。これらの降水量データを用いて洪水リスクを求めるためには、日降 水量別出現頻度などの特徴が地上雨量計と一致するようにデータの修正を行う必要がある。その ようなバイアス補正手法を今後開発し、洪水リスク評価に耐えうる降水量データを作成する予定 である。

<u>インドネシア・ソロ川流域</u>:降雨量と流量・氾濫量の関係分析からは,流量約3,000m<sup>3</sup>/sがCepu 地点の河道容量であると推察されるが,氾濫量との関係はより複雑で,特に2009年の実績洪水を 対象に観測雨量を入力した結果,特に回帰直線からの乖離が大きくなる結果となった。この原因 を明らかにするには降雨の時空間分布を調べる必要があると考えられる。また,最大氾濫量の頻 度解析結果について,現時点ではデータの量が十分ではなく定量的な評価は難しいが,最大氾濫 量 20 mm についてリターンピリオドを見ると,頻度が約2倍となる結果になった。

カンボジア・メコン川流域:1998 年から 2007 年までのクラティエ観測流量と APHRODITE に よる雨量を RRI モデルに入力し、対象領域内の流量再現性を確認した結果、ハイドログラフの逓 減部はモデルが過小評価傾向であった。RRI モデルで計算されるピーク時の浸水深の妥当性につ いては、今後メコン流域委員会(MRC)からも情報を収集しながら検証を進める。これらの検証が 終われば、別途 BTOP モデルで推定する将来気候に対するクラティエ地点の河川流量を RRI モデ ルに入力し、気候変動がメコンデルタ地帯における浸水に及ぼす影響を分析する予定である。

チャオプラヤ川流域における 2011 年洪水時の降雨量と氾濫量の統計的評価とその将来変化:

チャオプラヤ川流域では、将来に洪水の頻度が増加する。年最大氾濫量については6ヶ月雨量 の大小で評価するだけでは十分ではないため、直近1、2ヶ月間の雨量との関係についても分析す る予定である。統計解析については、1年の区切りでの年最大資料として解析を行ったが、閾値 超過資料としての解析も合わせて評価を行う予定である。

(2) 特定脆弱地域での影響評価に関する考察は次のとおりである。

<u>Socio-economic drought assessment using BTOP model</u>: As a result, we observed the importance of the Casecnan inflows from year 2002 to replenish Pantabangan water storage during wet seasons. From these preliminary results, we concluded that the Pantabangan reservoir has sufficient capacity to meet the UPRIIS irrigation water demand especially during dry seasons. For the climate change impact assessment of the reservoir system, we need to investigate future available water due climatic variability and future anthropogenic water demand in the Pampanga river basin.

<u>Development of Agricultural Flood Risk Assessment Model</u>: The results of flood damage provide a basis to identify areas at risk and these results can be useful for planners, developers, policy makers and decision makers to establish policies required for flood damage reduction. The results could also be useful to implement flood mitigation actions including agriculture land use regulation taking into account the risk areas of damages and adaptation measures. The developed methods of agriculture damage can also be applied to other river basins.

<u>パンパンガ川流域における住家のリスク評価手法に関する現地調査</u>:パンパンガ川流域のよう な農村地域の洪水常襲地帯においては、日本の「治水経済調査マニュアル」に定められているよ うな浸水深さと被害率との関係に基づくリスク評価は困難であることが示唆された。今後は、分 析結果を踏まえて、「被害」ではなく、浸水中の居住の可否などの「生活への支障」に着目したリ スク評価手法の開発を実施したいと考えている。

広域の洪水被災リスク評価に向けたカンボジア洪水多発地域の家屋様式に関する検討:家屋と 洪水氾濫・被災状況に関する現地調査で得られたデータを整理・解析した。今年度の解析結果は、 調査地域についての知見であり、他地域にも適用できるか否かについて注意する必要はあるが、 現地の資料やデータが充実していないカンボジアにおいて、家屋の洪水被災リスク評価に取り組 んでゆく際の手掛かりとなる重要な知見である。

<u>現地政府機関との意見交換および現地視察</u>:今後、関係政府機関と協力して引き続きデータ収 集並びに意見交換を実施する予定である。最終年度には、成果普及のためのワークショップ等を 実施する予定である。

## g. 引用文献

Bulacan Provincial Agricultural Office (BPAO): Final validation report for cereals, Bulacan Provincial Agricultural Office, Bulacan, the Philippines, 2011.

Bureau of Agricultural Statistics (BAS): Manual on damage assessment and reporting system. Bureau of Agricultural Statistics, Department of Agriculture, Philippines, 2013.

International Rice Research Institute (IRRI): Growth phases of an upland rice plant, IRRI, 2009.

Sayama, T., Ozawa, G., Kawakami, T., Nabesaka, S. and Fukami, K.: Rainfall-Runoff-Inundation analysis of Pakistan flood 2010 at the Kabul river basin, Hydrological Sciences Journal, Vol.57, no.2, pp.298-312, 2012.

佐山敬洋・建部祐也・田中茂信(2013):大流域を対象にした降雨流出氾濫現象の長期水収支解析,水 文・水資源学会 2013 年度研究発表会要旨集

Shrestha, B. B., Okazumi, T., Miyamoto, M., and Sawano H.: Development of flood risk assessment method for

data-poor river basins: a case study in the Pampanga river basin, Philippines, Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Flood Management, 2014.

- Gusyev M., Lee S., Okazumi T., and J. Magome (2014). Socio-economic drought characterization using hydrologic model with water infrastructure in the Pampanga River basin, the Philippines. Abstract HS10-A019, Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting 2014, Sapporo, July 28 August 1st, Japan.
- Japan International Cooperation Agency (JICA) (2011). The study on integrated water resources management for poverty alleviation and economic development in the Pampanga River basin. Final Report for the National Water Resources Board, the Republic of the Philippines, Japan.
- Mishra A.K and V.P. Singh (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391: 202-216. doi:10.1016/j.hydrol.2010.07.012
- Pantabangan Dam Office (PDO) (2013) Pantabangan hydrological data. Dam and Reservoir Division, Upper Pampanga River Integrated Irrigation Systems (UPRIIS), National Irrigation Administration (NIA). Personal Communication.
- Shukla S. and A.W. Wood (2008). Use of standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters* 35, L02405.

## h. 成果の発表

論文

- 1. 工藤俊, 佐山敬洋, 長谷川聡, 岩見洋一: 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, 土木学会論文集 B1(水工学), (印刷中)
- Shrestha, B. B., Okazumi, T., Miyamoto, M., Nabesaka, S., Tanaka, S. and Sugiura, A.: Fundamental analysis for flood risk management in the selected river basins in Southeast Asia, Journal of Disaster Research, Vol. 9, No. 5, pp.858-869, 2014.
- Shrestha, B. B., Okazumi, T., Mamoru, M. and Sawano, H.: Development of flood risk assessment method for data-poor river basins: a case study in the Pampanga river basin, Philippines, Proceedings of the 6th International Conference on Flood Management (ICFM6), 2014.
- 4. Takahiro Sayama, Yusuke Yamazaki, Yuya Tatebe, Akira Hasegawa and Yoichi Iwami: Assessment of climate change impact on large scale flooding - a case study in the Chao Phraya River Basin via new modeling technology, THA2015 International Conference on "Climate Change and Water & Environment Management in Monsoon Asia", 28-30 January 2015, Bangkok, Thailand, 2015.
- Okazumi, T., Miyamoto, M., Shrestha, B. B. and Gusyev M. 2014: Uncertainty estimation during the process of flood risk assessment in developing countries ? case study in the Pampanga river basin -, Journal of Disaster Research, Vol. 9, No. 1, pp.69-77

口頭発表

- 1. 牛山朋來, 宮本守, 長谷川聡, 上野山智也, 岩見洋一, フィリピン・パンパンガ川流域を対象とした力学的ダウンスケーリング, 日本気象学会春季大会, 2014年5月21日, 横浜
- 2. T. Ushiyama, M. Miyamoto, S. Hasegawa, T. Uenoyama, and Y. Iwami, Dynamic downscaling of rainfall in the Pampanga basin, Philippines, for flood risk study, AOGS2014, 1 Aug 2014, Sapporo.
- 3. 工藤俊, 佐山敬洋, 長谷川聡, 山崎祐介, 岩見洋一: インドネシア・ソロ川流域を対象とした洪水氾濫の気候変動影響評価, 水文・水資源学会 2014 年度研究発表会要旨集, pp.260-261, 2014.9
- 4. 佐山敬洋: タイ・チャオプラヤ川を対象にした大規模洪水氾濫現象の気候変動影響評価, RECCA-S8-創生D研究交流会, 2014年9月5日
- 5. Yamazaki Y., Sayama T., Tatebe Y. and Iwami Y., 2014: Impact of climate change on the probability of large-scale floods in the Chao Phraya River Basin, AOGS 2014 Annual Meeting
- 6. 山崎祐介,佐山敬洋,建部祐哉,岩見洋一,2014:チャオプラヤ川流域における将来の降水量と 洪水氾濫予測,水文・水資源学会2014年度研究発表会

- 7. 佐山敬洋,山崎祐介,建部祐哉,岩見洋一,2014:タイ・チャオプラヤ川を対象にした大規模洪水 氾濫現象の気候変動影響評価,RECCA-S8-創生D研究交流会
- 8. Shrestha, B. B., Okazumi, T., Mamoru, M. and Sawano, H.: Development of flood risk assessment method for data-poor river basins: a case study in the Pampanga river basin, Philippines, 6th International Conference on Flood Management (ICFM6), 16-18 September 2014, Sao Paulo, Brazil, 2014.
- 9. Shrestha, B. B., Sawano, H., Ohara, M. and Nagumo N.: Agricultural flood risk assessment in the Pampanga river basin of the Philippines, the Tokyo Conference on International Study for Disaster Risk Reduction and Resilience, 14-16 January 2015, Tokyo, Japan, 2015.

アウトリーチ

- 1. 上野山智也・岩見洋一・岡積敏雄・安田成夫: アジアにおける水災害リスク評価と適応策の研究, ~「気候変動リスク情報創生プログラム」における ICHARM の取組み~,土木技術資料 Vol.69, pp14-17,平成 26 年 6 月
- 2. 徳永良雄:アジアの水災害リスクの評価,第12回環境研究シンポジウム,気候変動と科学技術~ 考えよう地球の未来!~,2014.11
- 澤野久弥: Imperative Needs to Develop Water-related Disaster Risk Information / Side Event of 6th Asian Ministerial Conference on Disaster Risk Reduction / 23th June 2014 (Bangkok, Thailand)
- 4. 澤野久弥: Imperative Needs to Develop Water-related Disaster Risk Indicators / World Bank Public Seminar / 1st October 2014 (Tokyo, Japan)
- 5. 澤野久弥: Necessity of developing water related disaster risk information for IWRM / The Workshop on "River Basin Management using Science and Technology" / 24th November 2014 (Nay Pyi Taw, Myanmar)

## 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・牛山朋來・長谷川聡・郭 栄珠・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の方法を再検討し、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となる資料を収集した。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 組み合わせて用いている。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を入手し、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になるデータ種類と取得状況を表 1.5-1 と表 1.5-2 に示 した。研究に必要となる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。

			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		0	0	0	0	0
	流量データ		0	0	0	0	0
被害関数 関連	現地被害関数		0	0 (ベトナム)	〇 (パンパンガ川の 関数を適用)	0 (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 <sup>(どちらかー方で検</sup> <sup>証可能)</sup>	被害面積	×	〇 (精査中)	〇 (県単位)	調査中	調査中
		被害額	〇 (県単位)	調査中	〇 (流域単位)	調査中	調査中

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 (カンボジア)	וונסע	チャオプラ ヤ川	インダスル
	期間	1980- 2014年	1979- 2003年	1983- 1999年	1980- 2012年	1995- 2012年
BTOPモデル	雨量 データ	0	0	0	0	調査中
142.96	流量 データ	0	調査中	0	0	Δ
	ダムデータ	0	—	0	0	調査中
灌溉農地面積		0	0	0	0	調査中
渇水被害関連 データ(ダム有	毎年の灌漑面 積/収穫高	0 1989-2013年	_	×	〇 2007-2014年 (景早位)	調査中
解析用)	渇水被害デー タ	×	_	〇 (景早位)	〇 2002-2013年 (国早位)	調査中
農作物収穫高 (天水解析用)	毎年の収穫高	×	〇 2009, 2011, 2012 年(県早位)	×	〇 2007-2014年 (景早位)	調査中

表 1.5-2: 渇水リスク評価関連データ取得状況

#### 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 を用い、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&Fritcsh (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。



(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).



using IfSAR-DEM

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。



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 <sup>6</sup> 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。
- 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) 引き延ばされた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)		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 (%))			
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

畄付	現在	気候	将来気候		
牢[₩:m3/s =	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	
渴水流量	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 km<sup>2</sup> 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 elimatic 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. Figure1.5-10 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 Figure1.5-11 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 Table1.5-7 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	(SFA rcp8.	5/SPA_m01)	(SFA rcp8.	5-C1/SPA_m01)	(SFA rcp8.	5-C2/SPA_m01)	(SFA rcp8.:	5-C3/SPA_m01)
Period	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。



## 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 (Figure 1.5-16).

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 Figure 1.5-17). 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.



Figure 1.5-15 : The study area with meteorological and gauging stations.



Figure 1.5-16 : 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).





## (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-Fritcsh 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 Eextremes.
- 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 Philipines, Journal of Flood Risk Management.

## h. 成果の発表

論文 (受理、印刷済)

- 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.
- Badri Bhakta Shrestha, Toshio Okazumi, Mamoru Miyamoto, Hisaya Sawamo, 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. 牛山朋來, 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・シュレスタ,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.
- 大原美保,バドリ・バクタ・シュレスタ,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. 牛山朋來,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.
- 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.
- 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-rerated 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
- 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
- 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
- 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

 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

- 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
- 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
- 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
- Hisaya Sawano,2016 : Flood Disaster Risk Reduction, Asia Water Cycle Symposium 2016,Takeda Hall, University of Tokyo,1-2 March 2016

## 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:三宅且仁(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)小池俊雄・竹内邦良・三宅且仁・ 岩見洋一・澤野久弥・徳永良雄・千田容嗣・津田守正・海野 仁・菊森 佳幹・栗林大輔・ 大原美保・Shrestha Badri Bhakta・Abdul Wahid Mohamed RASMY・萬矢敦啓・宮本 守・ 牛山朋來・長谷川聡・郭 栄珠・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

(土木研究所水工研究グループ)工藤 俊

(山梨大学 生命環境部環境学科) 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。今年度は、渇水リ スク評価方法を見直し、灌漑面積の増減で表すこととした。

現在気候、将来気候での雨量評価では、フィリピン・パンパンガ川流域において、MRI-AGCM3.2S、 3.2Hの温暖化実験に対して力学的ダウンスケーリングを行ない、降水量のバイアス補正を行った 後、年最大 48 時間雨量の頻度解析を行った。

洪水リスク評価では、気候変動によるリスクを把握するために、ソロ川流域とメコン川流域を 対象に、RRI モデルを用いて現在気候と将来気候での洪水氾濫面積の変化の比較、及び稲作被害 関数を用いて農業被害面積と被害額の変化の比較を行った。

渇水リスク評価では、チャオプラヤ川流域、インダス川流域の代表的なダム地点で BTOP モデ ルを用いて将来気候の年間流量変化、流況(豊水流量、平水流量、低水流量、渇水流量)、ダム 貯水量の変化を調査するとともに、渇水による農業被害の影響を検討した。なお、インダス川流 域については流況等の調査までとした。また、メコン川流域においては、天水農業における渇水 による農業被害の影響を検討した。

## 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し、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った。リスク評価研究の方法の手順は、各河川 流域での水災害に関する知見を基に、リスク評価方法を図1.5-1のように考えた。

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 組み合わせて用いている。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、対象国の一つで得られた洪水と稲作被害との関係から被害関数を導き、各流域の過去の洪水被害状況で検証したうえで、現在/将来気候に適用し評価した。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灌漑面積の縮小率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

132

## 渇水リスク評価の概念図



図 1.5-3: 渇水リスク評価における実灌漑概念図

## d. 平成 28 年度研究計画

対象河川流域における各種 RCP シナリオ実験についてダウンスケーリングした結果から、現在 気候及び将来気候での超過確率に応じた外力シナリオを作成する。さらに、現地河川流域スケー ルで洪水リスク評価モデル及び渇水リスク評価モデルを構築し、現在気候と将来気候での洪水リ スクと渇水リスクを計算し、これらを比較して気候変動の社会経済への影響を評価するとともに、 不確実性を示す。これらの成果を現地行政機関に報告するワークショップを開催する。

## e. 平成 28 年度研究成果

## **1.5.1.** 現在気候、将来気候での雨量評価

## 1.5.1.1. 1.5.1.1 GCM による降水量予測値の不確実性を考慮した河川流域スケールでの利用手 法の開発

本研究は、特定脆弱地域のうち流域面積の小さいパンパンガ川流域について、GCM 温暖化実 験データの力学的ダウンスケーリングを行い、河川流域スケールでの降水量の将来変化を予測す る。さらに、降水量データを用いて流出氾濫計算を行い、洪水リスクの将来変化を予測する。

MRI-AGCM3.2S と 3.2H の温暖化実験データを用いてダウンスケーリングを行ない、現在気候 (3.2S、3.2H) および RCP8.5 将来気候(3.2S のマルチモデル平均 SST、c1、c2、c3 の SST ク ラスター、および 3.2H のマルチモデル平均 SST の、全部で 5 種類)のそれぞれ 25 年間につい て結果を得た。なお、3.2H は 3.2S と共通の YS 積雲スキームのみを用いた。領域モデルは Weather Research and Forecasting model (WRF) ver.3.4.1 を用い、水平解像度 15km と 5km へのダウン スケーリングを行った。積雲対流パラメタリゼーションは、オリジナルの Kain&Fritcsh (KF)ス キーム、気象庁において修正された KF スキーム (成田 2008)、Grell 3D スキームに浅い対流オ プションを加えたもの(Grell)の 3 種類を用いて行った。その結果、それぞれのダウンスケーリン グ結果は、いずれも弱い降水を過大に出力し、また KF スキームについては豪雨が過小に表現さ れるバイアスがあった。最終的に、豪雨の降水量の再現性が最も良い Grell スキームを採用した。

いずれの積雲対流パラメタリゼーションスキームを用いた場合でも、降水量に無視できないバ イアスが表れたため、バイアス補正を行った。バイアス補正手法は、猪股他(2009)の手法を基 にして、現地雨量計の22年間のデータを基準として行った。しかしながら、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雨量計の値に合うように補正を行った。 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水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。(a)、(b)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 1.5・4(a) の MRI-AGCM3.2S の結果では、現在気候(青)は、雨量計や ERA-interim とよく一致した。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) や C2 クラスターが大きかった。1/50 確率雨量は現在気候の 320mm から 470mm に増加した。 図 1.5・4(b)の MRI-AGCM3.2H の結果も似た傾向であり、1/50 確率雨量は 530mm に増加した。 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。(a) MRI-AGCM3.2S、(b)MRI-AGCM3.2H の結果。

### 1.5.2. 洪水リスク評価

#### 1.5.2.1. インドネシア・ソロ川流域を対象とした洪水リスクの分析

本節ではソロ川流域を対象として洪水リスクを分析する。これまで、現地観測雨量(2007年~2009年)、MRI-AGCM3.2S現在気候(1979年~2003年)、MRI-AGCM3.2S将来気候(2075年~2099年)を入力データとし、降雨流出氾濫(RRI)モデルから出力される流量及び氾濫量を用いて洪水リスク分析を実施してきた。なお、MRI-AGCM3.2S現在・将来気候のデータはAPHRODITE<sup>1)</sup>から得られる降水量を用いてバイアス補正<sup>2)</sup>を施した。RRIモデルは氾濫も扱うことができる一方で、これまでのモデル検証は観測流量と比較するのみであった。そこで、新たに氾濫量による検証を実施して、モデルが流出及び氾濫の双方を妥当に表現していることを確認した。また、流域特性の分析として4日積算雨量とピーク流量・最大氾濫量それぞれの関係を分析し既に報告した。4日という期間はピーク流量と相関が高い期間であるが、今回は新たに、最大氾濫量と関係が深い期間を調べて、積算雨量から氾濫量をどの程度推測できそうかを調べた。

最初に、衛星情報から推定した氾濫域を用いて、氾濫水の水位分布を推定する。ALOS/PALSAR から推定した氾濫域と SRTM による DSM を用いている。ALOS/PALSAR からの氾濫域推定手順 は以下の通りである。すなわち、反射波の後方散乱は陸域で大きく水域で小さくなることを利用 し、洪水前に比べて洪水後で後方散乱が小さくなる箇所を水域と判定した。水位分布の推定の具 体的な手順は、最初に氾濫域と陸域の境界における標高をその地点の水位とし、境界に沿った線 状の水位分布を得る。次に、それを重回帰式で内挿補間した。

図 1.5-5 に、モデルの検証に用いた洪水期間中の、2007 年 12 月 30 日における氾濫水の水位分 布と、水位及び地盤標高から計算される氾濫量を示す。上図は上記手法で推定されたもので、下 図は RRI モデルで計算されたものである。氾濫範囲及び氾濫量に若干の違いは見られるものの、



図 1.5-5:氾濫水の水位分布と氾濫量(2007 年 12 月 30 日) (上: ALOS/PALSAR 及び SRTM からの推定、下: RRI モデルによる計算結果)

両者に矛盾はなく妥当な氾濫シミュレーションができていることが確認できる。

次に、現地観測雨量、MRI-AGCM3.2S 現在・将来気候を入力した計算結果を用いて、年最大氾 濫量と積算雨量の関係を調べた。積算雨量の期間を変化させながら、年最大氾濫量との相関係数 が最も高くなる期間を調べたところ、13 日積算雨量と年最大氾濫量の相関係数は 0.95 となり最も 高い値を示した。図 1.5-6 は両者の関係を示す。両者にはこのように高い相関があることから、例 えば洪水発生時に現地調査やモデルによる、氾濫状況の把握がすぐには難しい場合でも、積算雨 量から最大氾濫量を概算できる可能性が示唆される。



図 1.5-6:13 日積算雨量と年最大氾濫量の関係

# 1.5.3. ソロ川流域での水災害リスク評価(気候変動下における農業リスク評価)

#### 1.5.3.1. Introduction

This study focuses on assessment of agricultural flood damage under climate change in the Solo River Basin of Indonesia. Flood damage to rice crops was calculated by a function of flood depth, duration and growth stage of rice plants. Flood hazard characteristics such as flood depth and flood duration were computed using rainfall runoff inundation model (RRI model) developed by ICHARM (Kudo et al., 2015). For the assessment, HydroSHEDS (SRTM) topographical and global land cover data were used. The flood damage assessment methodology was verified for past largest recorded flood in December 2007 and flood damage assessment was conducted for both present climate (1979-2003) and future climate (2075-2099) conditions using MRI-AGCM3.2S precipitation dataset. Statistical analysis was conducted using rainfall volume to identify flood hazard intensity for 50- and 100-year return period under present climate and future climate conditions, and flood damage was assessed for both return period cases with different rainfall patterns chosen from each climate scenario.

#### 1.5.3.2. Agricultural damage estimation

The flood damage curves developed by Shrestha et al. (2016), which are derived by using past flood damage data for the Philippines case, are used to estimate the yield loss in rice-plants due to flooding. Based on developed flood damage curves and flood inundation characteristics, the agricultural damages can be estimated by following equations.

$$Loss Volume = Rice Yield \times Damaged Area \times Yield Loss$$
(1)  

$$Damage Value = Loss Volume \times Farm Gate price$$
(2)

The values of farm gate price equal to 4650 Rupiah/kg and rice yield equal to 5,230 kg/ha in case of the Solo river basin of Indonesia were used in the calculation.

### 1.5.3.3. Results and Discussions

### (i) Verification

**Fig. 1.5-7** shows the calculated agricultural damage (rice-crops) in the case of 25 December 2007 to 2 January 2008 flood event. The calculated and reported rice-crops damage areas in the basin are 66,298 and 60,630 ha, respectively (Table 1.5-1). The calculated and reported amounts of rice-crops damage are 143.8 and 93.3 billion Rp, respectively. Table1.5-2 shows the comparison of calculated and reported rice-crops damage areas and estimated amount of damages in the Ngawi, Ponogoro, Bojonegoro and Madiun districts in the basin.

Fig. 1.5-8 shows the plotting of calculated damage area with reported damage area. The figure shows that the calculated damage area of rice-crops is agreeable with the reported values.



Fig. 1.5-7 : Distribution of calculated agricultural damage in the Solo River basin of Indonesia in the case of 25 December 2007 to 2 January 2008 flood event (at approximately 919 m X 919 m grid size).

Table 1.5-1	: Comparison	of calculated rice	-crops damage are	as and amount of c	lamage with	reported values.
-------------	--------------	--------------------	-------------------	--------------------	-------------	------------------

Damaged Ri (ł	ce Crop Area na)	Rice Crop (billio	Damages on Rp)
Calculated	Reported <sup>*1</sup>	Calculated	Reported*2
66,298	60,630	143.8	93.3

\*1: Directorate of Food Crop Protection, Indonesia; \*2: Hidayat et al. (2012)

 Table 1.5-2 : Comparison of calculated and reported rice-crops damage areas and estimated rice-crops damage in the Ngawi, Ponogoro, Bojonegoro and Madiun districts.

	Damaged Rice	Estimated rice-	
District	Calculated	Reported <sup>*1</sup>	crop damage (billion Rp)
Ngawi	6,925	5,997	8.319
Ponogoro	2,534	5,528	0.473
Bojonegoro	8,868	13,771	7.39
Madiun	1,774	2,873	0.287

\*1: Directorate of Food Crop Protection, Indonesia



Fig. 1.5-8 : Plotting of calculated and reported rice-crops damage areas.

#### (ii) Flood Damage Assessment under Climate Change

**Fig. 1.5-9** shows the comparisons of flood hazard and damage assessment for 100-year flood in the case of worst scenario. The results shows that rice-crop damage by flood will be increased by more than 29 % in the future. The results of flood damage assessment in this study can be useful to implement flood mitigation actions with taking into account the risk areas of rice-crop damage and adaptation measures.



Fig. 1.5-9 : Comparison of flood hazard and agricultural damage for 100-year flood under present climate and future climate conditions.

# 1.5.4. Agricultural Flood Damage Assessment for the Lower Mekong Basin (LMB) – SOUSEI Program

### 1.5.4.1. Introduction

In the Lower Mekong Basin (LBM) of Cambodia and Vietnam, we assessed the impact of present and future floods on the rice crop as to estimate the agricultural damages. The considered LMB was approximately 187,000 km<sup>2</sup> and it was about 24% of the total basin area of the Mekong River basin (**Fig. 1.5-10**). Flood characteristics such as flood depth, duration and distribution were computed using Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model to assess the flood hazards under present and future climatic conditions produced by MRI-AGCM3.2S. The damage assessment methodology for the rice crop was

verified for the severe flood event recorded in 2011. 50- and 100-year floods under present and future climate conditions were simulated and damage assessment was conducted to estimate the possible agricultural damages.



Figure 1.5-10: Study area and river gauging stations (a: Mekong River Basin, b: LMB Model area)

#### 1.5.4.2. Inundation Analysis

For hazard assessment under climate change, a hydrological simulation was conducted for the LMB area using selected MRI-AGCM3.2S experiments. An AMIP-type experiment was selected for the present climate (SPA m01: 1979-2003). Four members of RCP8.5 greenhouse gas emission scenario experiments with different sea surface temperature (SST) distributions were selected for the future climate ensembles (Named as SFA rcp8.5, SFA rcp8.5-C1, SFA rcp8.5-C2 and SFA rcp8.5-C3) for 2075-2099. 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. The BTOP model was calibrated for the discharge at Pakse station. Its discharge outputs at the Kratie station were obtained to utilize as the upstream discharge boundary condition for the 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 (Figure 1.5-10) 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. To assess the flood damages, flood hazard characteristics such as flood depths and flood durations were computed. The inundation area increment ratios 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.

 Table 1.5-3 : Summary results of frequency analysis

	5	1 2 2
MRI-AGCM	50 year return period	100 year return period
Experiment	rainfall (mm/4 months)	rainfall (mm/4 months)
SPA_m01	40.6	41.9
SFA rcp8.5	45.3	46.3
SFA rcp8.5-C1	42.4	43.6
SFA rcp8.5-C2	45.4	46.6
SFA rcp8.5-C3	45.6	47.3

The frequency analysis was conducted based on the 4-months rainfall of the basin since it shows the highest correlation with the peak inundation volume. The conducted frequency analyses for the 4-month rainfall based on Gumbel distribution for the present and future experiments are summarized in **Table 1.5-3** 

Flood hazard analysis was conducted to assess the flood damage for 50- and 100-year flood cases with different rainfall patterns chosen from each climate scenario.

#### 1.5.4.3. **Flood Damage Assessment**

### (a) Verification

For the verification of flood damage estimation, flood damage to agricultural (rice-crop) was assessed for 2011 flood case by using flood damage curves developed by ICHARM (Shrestha et al., 2016) and MRCS (MRCS, 2010). Based on flood damage curves and flood inundation characteristics, the agricultural damages can be estimated by following equations.

The values of farm gate price equal to 924 Riel/kg and rice yield equal to 2,500 kg/ha (Department of Rice Crop, Cambodia, 2013) in case of the LMB were used in the calculation. The global land cover data developed by the Global Land Cover by National Mapping Organizations were used to extract the paddy field.



Figure 1.5-11 : Calculated agricultural damage using ICHARM's damage curves and MRCS's damage curves

<b>Table 1.5-4</b> : Com	<b>Table 1.5-4</b> : Comparison of calculated damage with reported damage value			
Rice Crop Damages in Cambodian Floodplain (million USD)				
<i>Reported</i> <sup>#1</sup>	Calculated Using ICHARM's Damage Curve	Calculated Using MRCS's Damage Curve		
178.8	189.132	207.22		

<sup>#1</sup> "Flood Damage Emergency Reconstruction Project, Preliminary Damage and Loss Assessment", ADB, 2012

Figure 1.5-11 shows the calculated agricultural damage using ICHARM's damage curves and MRCS's damage curves and Table 1.5-4 shows the comparison of calculated damage amount with reported value for Cambodian floodplain. The comparison results show that the calculated damage using both curves are reasonably agreeable with reported data, however, damage estimation using ICHARM's damage curve shows a better approximation to the reported value. According to damage curves, damage occurs if the flood depth reaches over 0.5 m. Table 1.5-5 shows the comparison of calculated agricultural damage area with reported damage area at province level and there are some discrepancies between calculated and

reported damage area. In this study, agricultural damage was assessed using globally available topographical and land cover data. Damage assessment can be further improved by adjusting globally available topographical data with ground observed elevation data and also by using locally available land cover data to reflect actual local conditions.

### (b) Flood Damage Assessment under Climate Change

Flood damage to agriculture (rice crops) was assessed for 50- and 100-year flood cases with different rainfall patterns chosen from each present and future climate scenario. Figure 1.5-12 shows the comparisons of flood hazard and damage assessment for 100-year flood in the case of worst scenario. The results shows that flood damage to agriculture sector will be increased by more than 23 % in the future.

Province	Reported damage area (ha)			Calculated damage	Calculated damage
	MRC <sup>#1</sup>	ADB <sup>#2</sup>	Average	ICHARM's Damage Curve)	MRCS's Damage Curve)
Banteay Meanchey	18894	2000	10447	1620	1620
Battambang	35000	51000	43000	14580	13284
Kampong Cham	20049	23000	52698	58320	57996
Kampong Chhnang	11166	8000	9583	33048	33048
Kampong Thom	69396	36000	52698	30780	22356
Kampot	3254	-	3254	648	648
Kandal	5770	5000	5385	69984	68688
Kratie	5191	5000	5096	7452	7452
Phnom Penh	681	-	681	2268	1944
Pursat	17940	15000	16470	10368	8424
Prey Veng	47268	50000	48634	75816	75492
Siem Reap	15120	16000	15560	20412	18468
Svay Rieng	7761	10000	15560	12960	11016
Takeo	5566	5000	5283	44712	43416
Preah Vihear	2018	3000	2509	5832	2592

Table 1.5-5: Comparison of calculated agricultural damage area with reported damage area

<sup>#1</sup> "Annual Mekong Flood Report 2011", Flood Management and Mitigation Programme, MRC, 2014

#2 "Flood Damage Emergency Reconstruction Project, Preliminary Damage and Loss Assessment", ADB, 2012



**Figure 1.5-12**: Comparison of flood hazard and agricultural damage for 100-year flood under present climate and future climate conditions.

# 1.5.5. 渇水リスク評価

対象となる5流域におけるMRI-AGCM3.2S現在気候及び将来気候(RCP8.5)の年間降水量の変化 率及び月別降雨水量の特徴は、表1.5-6のとおりである。本年度は、これらの結果を参考にしてソ ロ川流域 Wonogiri ダム、チャオプラヤ川 Sirikit ダム及び Bhumibol ダムにおける年間流量の変化 や農業被害を検討した。メコン川流域では、天水農業への影響を、インダス川流域では、Tarbela ダムでの年間流量の変化を検討した。

表 1.5-6: アジア主要 5 流域における年間降水量変化率及び月別降水量の特徴

流域名	年間降水量変化率	月別降水量の特徴
パンパンガ川流域	+0.5±4.8%	台風性の降雨が多い特徴がみられるが、現在と将来では大き な変化は見られない。
ソロ川流域	+16±10%	雨季(冬場)にやや降水量が増加し、乾期(夏場)に若干減少す る特徴がみられた。
チャオプラヤ流域	+15±2.5%	雨季(夏場)に降水量が増加するが、乾季(冬場)は変化が見られない。
メコン川流域	+10±1%	
インダス川流域	+38±4%	月別の降水量が増加する傾向がみられた

### 1.5.5.1. ソロ川流域

### (1) 調查方法

ソロ川流域を対象に、分布型流出解析モデルである BTOP モデルを構築し、Wonogiri ダムへの 流入量を再現した。Wonogiri ダムはソロ川上流域に位置し、総貯水容量 7.35 億 m<sup>3</sup>、有効貯水容 量 6.15 億 m<sup>3</sup>を有する洪水調節、灌漑および発電を主目的とする多目的ダムで、下流地域の約 300km<sup>2</sup>の農地に灌漑用水を供給している。BTOP モデルの定数の同定には、Wonogiri ダム上流な らびにその近傍の3地点で実測された日降雨量とダム管理者がまとめた日平均流入量(実測値) を用いた。ダム流入量の実測値とBTOPを用いた計算値の比較を、図1.5-13に示す。

次に、気候モデルによる気候変動予測データを活用して、BTOP モデルで将来の水供給をシミュ レートした。気候変動予測データとしては、20km 四方の超高解像度大気大循環モデルである MRI-AGCM3.2S のデータを用いた<sup>1)</sup>。現在気候実験(1979-2003 年)では、観測された海面水温や 海氷の分布や温室効果ガス濃度などを境界条件とした。MRI-AGCM3.2S で得られた日降水量デー タは、現地観測雨量データを用いてバイアス補正した後に BTOP モデルの入力として用いた。将 来気候実験(2075-2099 年)では、RCP8.5 シナリオを用いた。将来気候実験では、海面水温や海 氷の分布の違いによる不確実性を考慮し、CMIP5 で海面水温を予測した 28 種類のモデルを対象 に、クラスター解析により 4 種類の異なる海面水温と海氷の分布を設定し、境界条件とした。こ れら 28 種類のモデル全てから求めた海面水温分布と比較すると、8 モデルからなる c1 は南北半 球ともほぼ一様に温暖化を示し、14 モデルからなる c2 は赤道太平洋付近でエル・ニーニョに似 た温暖化パターンを示し、6 モデルからなる c3 は南半球より北半球でより温暖化が進む海面水温 分布を示す。同じ RCP8.5 の温室効果ガス排出シナリオであっても、これら異なる海面水温や海氷 の分布によって、MRI-AGCM3.2S の応答が変化し、異なる将来降水量が求められる。 MRI-AGCM3.2S で得られた日降水量データは、現在気候実験と同様のバイアス補正した後に BTOP モデルの入力として用いた。

水供給のシミュレーションは、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と を組み合わせて実施した。貯水池運用モデルは、Wonogiri ダムの灌漑用水供給計画を参考とし、 放流量を設定した。同計画では、各月における Wonogiri ダム貯水量を多いほうからランク①、ラ ンク②、ランク③と3区分し、各月初頭の貯水量に対応する当該月の灌漑用水供給量ならびに灌 漑対象面積を定めている。貯水池運用モデルでは、日平均流入量と日平均放流量から、ダムの貯 留量の変化を求めた。ここで、ダムからの放流量は、ダム貯留量に応じた灌漑用水供給量と灌漑 用水取水後の本川下流への維持流量との合計値である。

現在気候と将来気候における比較では、貯水池運用モデルで計算した貯留量に対応する灌漑面 積を月別に求めて実施した。灌漑受益地では、11月から2月をⅠ期(WET)、3月から6月をⅡ期 (DRY)とし、作付け計画を策定している。そこで、Ⅰ期・Ⅱ期それぞれ各月において変化する 灌漑面積の平均値を求めて、将来気候における変化を期別に評価した。最後に、将来における渇 水リスクについて考察した。



図 1.5-13: Wonogiri ダム流入量の実測値と計算値

(2) 調査結果

#### a.流入量の比較

現在気候と将来気候における Wonogiri ダム日平均流入量を比較する(図 1.5.-14、15)。現在気候に比べ、将来気候の特に cl では、乾季に大きな流入量の発生が予測された。一方、雨季においても現在気候に比べ極めて大きな流入量を生じる日が予測され、大きな水災害の発生が懸念された。また、将来気候では現在気候に比べ、乾季のはじめと乾季の終わりに流入量が増加する傾向が見られ、乾季が実質的に短期化する傾向が見られた。乾季が短縮化する傾向は、渇水リスクの低下をもたらすものと考えられる。

### b.流況の比較

現在気候と将来気候における Wonogiri ダム地点の流況を比較する(図 1.5-16、17)。平均年最 大流入量、平均豊水流量の増加傾向、標準偏差も増加傾向(年変動が増加)がみられる。しかし ながら、厳しい渇水状況の出現日数の増大する傾向がみられる。

#### c.貯水量の比較

現在気候と将来気候における Wonogiri ダム貯水量を比較する(図 1.5-18、19)。現在気候に比 ベ、将来気候では乾季が短縮化することから、10月末ごろから貯水量の回復が始まり、年によっ ては 12月末までに貯水量が完全に回復する傾向が見られた。また、将来気候においては多くの年 で貯水量が満水状態となる期間が長期化し、無効放流の機会も増大することから、既存ダムのか さ上げ、新規ダムの建設などによる新たな水資源開発の可能性も示唆された。一方、雨季におけ る貯水位が高めに推移することから、洪水調節能力を上回る洪水の発生頻度も拡大することが危 惧された。

#### d.灌漑面積の比較

Wonogiri ダム下流域では、ダムの貯水量に応じて灌漑区域を変動させる計画となっている。11 月から2月までのI期(WET)と3月から6月までのII期(DRY)における平均灌漑面積を比較 する(図1.5-20、21,表1.5-7)。I期(WET)における灌漑面積は、c2では現在気候と同程度で あるが、c1、c3では若干増大する傾向が見られた。一方、II期(DRY)における灌漑面積は、c1、 c2、c3とも増大する傾向が見られ、ダムの貯水に大きく依存するII期(DRY)では、将来、渇水 リスクの減少が見込まれる結果となった。



図 1.5-14:現在気候 (AMIP) における Wonogiri ダム日平均流入量



図 1.5-15: 将来気候における Wonogiri ダム日平均流入量

	1400						1979
		Inflow					
	<u>1200</u>	iiiiow,	Mean	Std	Min	Max	1982
	5	cms					1984
	È	1th day	265.3	128.0	56.0	573.6	1985
	<b>Z</b> 1000		FC 4	10.4	22.0	102.2	1986
	ŝ	95th day	56.4	19.4	22.6	102.3	1988
	× ••••	185th day	25.1	7.5	12.2	45.7	
	≥ 000	,					
		275th day	12.3	3.6	8.2	22.1	
	E 600	355th day	8 1	2 1	5 /	1/ 6	1992
		SSStiruay	0.1	2.1	J. <del>4</del>	14.0	1994
6	2	L		-			
	400	7-d	ay low	110W =	5.3 cm	ns 👘	1996
	ē.	Nur	nber o	f days l	below	0:	1997
	8		lacth Ta	tond).		(01)	1998
	200	891	(1*), /1	L (Z'''') a	and 70	(3ra)	2000
		10					2001
		Colona and	-				2002
	0						2003
		91 91 91 91 91 91 91 91 91 91 91 91 91 9	82838	261381	43285	1912191	— — Mear
		,					

図 1.5-16:現在気候 (AMIP) における Wonogiri ダム地点の流況



(c)将来気候(RCP 8.5 c2)

(d) 将来気候 (RCP8.5 c3)

図 1.5-17: 将来気候における Wonogiri ダム地点の流況



(C)将来気候(RCP8.5 c2)

(d) 将来気候 (RCP8.5 c3)





図 1.5-20: 現在気候と将来気候における平均灌漑面積

	I期(WI	ET)	Ⅱ期(DRY)	
	面積 [km <sup>2</sup> ]	比率	面積 [km <sup>2</sup> ]	比率
AMIP	266.1	1.00	230.8	1.00
RCP8.5 -c1	276.5	1.04	259.0	1.12
RCP8.5 -c2	266.5	1.00	237.4	1.03
RCP8.5 -c3	274.0	1.03	238.6	1.03

表 1.5-7: 現在気候を基準とした将来気候における平均灌漑面積の変化

### 1.5.5.2. タイ・チャオプラヤ川流域

(1)調査方法

現在気候、将来気候での雨量評価は GCM データを活用し、ダウンスケーリング、バイアス補 正の後、通年の降雨データを用いた。気候モデルによる気候変動予測データを活用して、BTOP モデルで将来の水供給をシミュレートした。解析方法は、ソロ川流域と同様の方法を用いた。但 し、MRI-AGCM3.2S で得られた日降水量データは、AMIP を用いてバイアス補正した後に BTOP モデルの入力として用いた。渇水ハザード評価は、BTOP モデルを用いて貯水池への流入を計算 し、流況の変化を調査した。渇水リスク評価の指標として灌漑可能面積を用いた。灌漑可能面積 は、各気候シナリオにおいて Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの貯水位から放流量を推定し、それを 使って灌漑可能面積を算出した。なお、2011 年、2012 年乾季での灌漑面積は計画上最大で 11,978km2 であるが、ここでは用水補給が可能であれば灌漑区域が拡大すると仮定した。調査地 点は、タイ国の乾季における計画放流量は、Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの合計値で規定されて いることから Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの合計値とした。考察にあたり、タイの気候特性は雨 季と乾季がはっきり区別でき、12 月から3 月まではほとんど雨が降らないことや、収穫量は雨季 盛期の降水量と高い相関関係があることから雨季の流量にも着目することにした。

(2)調査結果

a.年間流入量

ここでは、Bhumibol ダムにおける現在気候、将来気候 15 日間ごとの平均流入量(m3/s)の変化を 示す(図 1.5-21、22)。2005 年以降はダムの放流計画において、乾季は 11 月 1 日から 4 月 30 日、 雨季は 5 月 1 日から 10 月 30 日までと定められていることから、図にはこれに従って雨季と表示 した。また、図 1.5-21、22 の横軸には年月を示したが、これらは将来起こり得る程度と頻度を読 み取るためのものであり、貯水量が低下する具体的な時期を示したものではない。

雨季においては、雨季の初期から現在気候の最大流入量を超える流量がすべてのシナリオで発 生する可能性がみられるこのような流量の発生する頻度が増加する傾向がみられる。乾季におい ては、乾季でも増水がみられた(RCP8.5-c1)。



図 1.5-22: 将来気候における流況(Bhumibol ダム)

b.流況

現在気候及び将来気候における流況(Sirikit ダム及び Bhumibol の豊水流量(95 日)、平水流量(185 日) 低水流量(275 日) 、渇水流量(355 日)の平均値を足したもの)を示す(表 1.5-8)。

各流量で現在気候を上回る値がみられる。ただし、RCP8.5-c2 シナリオ(赤道付近でエルニーニ ョに似た温暖化パターン)において Sirikit ダムの豊水流量、渇水流量の最小値で現在気候を下回 る値がみられた。

#### c.灌溉可能面積

灌漑可能面積の平均値、第一四分位数(25%)、第三四分位点(75%)、最大値、最小値を示す(表 1.5-9)。将来気候のすべてのシナリオで、平均値は増加傾向がみられ、25%値は現在気候の平均値 を上回っていた。将来気候の最悪の状況を調べるため、現在気候の平均値と各シナリオの最小値 との比較を行う。その結果、現在気候では 0.60 倍(5,846/9,673)であるが、将来気候: 0.66 (6,384/9,673) ~0.85(8,200/9,673)倍であった。したがって、渇水による灌漑可能面積の減少割 合が緩和される傾向がみられた。

表 1.5-8: 各シナリオにおける流況 (Sirikit ダム及び Bhumibol ダムの合計)(単位:m3/s)

流況/シナリオ	AMIP	RCP8.5-c1	RCP8.5-c2	RCP8.5-c3
豊水流量	365.7	522.1	553.0	586.5
平水流量	174.9	222.2	226.1	213.7
低水流量	100.3	117.9	110.5	109.0
渇水流量	75.9	83.9	81.6	80.6

表 1.5-9:現在気候及び将来気候における灌漑可能面積(Sirikit ダム及び Bhumibol ダム)

(単位:km2)

気候シナリオ	平均	25%	75%	最大値	最小値
AMIP	9,673	7,398	11,663	15,112	5,846
RCP8.5-C1	12,714	10,406	15,303	15,911	7,161
RCP8.5-C2	13,449	11,852	15,560	15,937	6,384
RCP8.5-C2	13,892	12,949	15,560	15,933	8,200

#### 1.5.5.3. メコン川流域

(1)調査方法

タイ東北部のメコン川を対象(図 1.5-23 参照)として、気候変動が米作に与える影響について 調査した。当該地域は、灌漑田に比べて天水田の比率が低いことから、降水状況から米作作付面 積を推定するモデル(農研機構・農工研究所)を活用し(図 1.5-24 参照)、将来の米作作付面積を 推定することとした。当モデルは、積算起算日(4月1日)からの積算雨量が閾値を超えると、 稲が育成するために十分な土壌水分が確保された見なし、作付けを開始することとなっている。 作付け開始後は1日あたり水田面積の1/30 ずつ作付け面積を増加させ、乾季に入る前までに稲の 育成および刈り取り期間を確保するため、9月20日までを作付け可能期間としている。当該モデ ルは、水田種類(完全降水依存型水田、部分降水依存型水田(完全降水依存型水田に連接し、完 全降水依存型水田からの水が供給される水田)、灌漑水田)ごとに、最大作付け可能面積および作 付け開始積算雨量を設けている。水田種類ごとの最大可能作付け面積は、西暦2000年前後の平均 的な作物別耕作面積を緯度経度0.25度(約9km)の解像度で記録している MERCA2000の値を、 地域全体の作付面積の推移がタイ国農協協力省の1980年から2013年の県別統計データと最も合 致するように、各メッシュに按分した。各メッシュに日雨量のデータの値を与えることにより、

各メッシュの日ごとの作付面積を計算した。現在気候における APHRODITE および AMIP の降水 量による作付面積年変動の計算結果は、実績値とよく一致していることが確認できる。



各水田種類の作付け開始積算降水量

水田の種類		作付け開始積算降水量
灌漑水田		500mm
天水	部分水源 依存型	341mm
	完全降水 依存型	625mm





図 1.5-24:作付け・収穫面積モデル(農研機構・農工研)

(2) 調査結果

対象地域全体の月別降雨量と米作作付け期間中(4月1日~9月20日)の積算雨量の対象期間 平均値の現在気候(1979~2003)と将来気候(2075~2099)の日変化を図1.5-25に示す。グラフ の上下の幅は、対象期間分のデータの標準偏差であり、年ごとのデータの変動幅の目安を示すも のである。作付け期間中の降水量が多いほど、作付け開始時期が早まるとともに、作付け面積が 増加することが想定される。降水量は将来の方が現在より概ね10%程度増加していることがわか

る。標準偏差も降雨量の増加に連動して10%増加している。



図 1.5-25:月別降水量と作付け期間中の積算雨量日変化

次に、現在気候と将来機能の対象地域の作付けの比較を示す(図1.5-26)。左の2本のグラフが それぞれ、現在の実績値(タイ国農業協力省)とAMIP(MRI-AGCM3.2の現在気候データの降雨 データ)を用いた作付け面積である。右側の4本のグラフは、RCP8.5地球温暖化シナリオにおけ るアンサンブル平均データ、および、3種類のSST(c1、c2、c3海水面温度分布)を用いた気 候予測モデルの将来降水量による米作作付け面積である。グラフ上のバーは、対象期間のデータ の標準偏差分の上下幅である。降雨量の増加にともない、すべてのSST分布に対して、現在気候 に比べて将来の方が増加する傾向となった。SSTの違いによる増加率の範囲は、6~9%程度であ り、大きくはなく、標準偏差も同程度である。



図 1.5-26: 現在気候と将来気候の米作作付け面積の比較

#### 1.5.5.4. Indus River Basin -Simulation of Tarbela Dam inflows in the Indus River basin-

Tarbela Dam with a live capacity of 11.96 km<sup>3</sup> is an integral part of the Indus Basin Irrigation System (IBIS) and supplies irrigation water for downstream barrages and canals of the IBIS to maintain agricultural activities in Pakistan (FAO, 2011). Since the construction of Tarbela Dam in 1976, Tarbela Dam has been providing irrigation water supply with electricity generation and flood control (WAPDA, 2017) resulting in the increase of downstream irrigated area from 1.18 million ha in 1980 to 21.48 million ha in 2008 (FAO, 2011). Tarbela Dam is situated on foothills of the Himalayas with normal reservoir water level at 340 m above sea level (masl) (Fig.1.5-27) and drains about 220000 km<sup>2</sup> of the upper Indus River basin with elevation range between 335 and 8238 masl (Immerzeel et al., 2010). From Immerzeel et al. (2010), the snowmelt processes is a major contributor of river discharge during summer seasons and the snowcover is replenished during winter seasons in the upper Indus River basin. These patterns of hydrologic cycle may be susceptible to climate change and these impacts on Tarbela Dam inflows are investigated with a distributed hydrologic BTOP model.

To simulate Tarbela Dam inflows, we utilize an existing BTOP model of the Indus river basin developed by Magome et al. (2015) as a part of the Global BTOP system with 600-arcsecond (about 20-km) grids (Fig.1.5-27). The 20-km grids of the Global BTOP were developed from 0.09- and 1-km digital elevation model (DEM) data using an upscaling algorithm to preserve topographic features during aggregation (Magome et al., 2015). In previous studies, the 20-km BTOP demonstrated a good statistical performance in the Rhine River basin compared with observed river discharge data at selected river gauging stations and 0.5-km grid BTOP model (Gusyev et al., 2016). The BTOP model includes a snow module with degree to simulate grid-based snowfall and degree-day-method snow melt based on temperature thresholds and degree-day-factor values by Georgievsky et al. (2006). For the upper Indus River basin, the snow module of BTOP model was updated to account for the direct runoff due to snow melt from each grid. The temperature threshold of snow melt process was selected at 4°C and the degree-day-coefficient was adjusted during the calibration. The statistical performance of BTOP model was evaluated with the index of agreement (IoA), root mean squared error (RMSE), mass balance error (MBE), coefficient of determination (R<sup>2</sup>), and the Nash–Sutcliffe efficiency (NSE).

Figure 1.5-28 demonstrates daily Tarbela Dam inflows for the 5-year calibration period of the 20-km BTOP model. The 20-km BTOP model was simulated for 47 years from 1961 to 2007) using daily APHRODITE precipitation (Yatagai et al., 2012) and temperature (Yasutomi et al., 2011) datasets to evaluate long-term trend and calibrated to daily observed Tarbela Dam inflows from 2002 to 2007. The 20-km BTOP simulated daily discharge was also cross-checked with the daily river discharge data of the Pertab Bridge gauging station for the same period. For daily Tarbela Dam inflows, the statistical performance of the BTOP model has NSE of 0.80, R<sup>2</sup> of 0.86, MBE of -23.5%, RMSE of 1039.23 and IoA of 0.94. In the Pertab Bridge gauging station, the BTOP simulated river discharge has NSE of 0.85, R<sup>2</sup> of 0.90, MBE of -19.46%, RMSE of 823.16, and IoA of 0.96. As a result, the 20-km BTOP model has demonstrated an excellent overall performance in both locations from January 2002 to December 2007 and is suitable to simulate Tarbela Dam inflows under present and future climates.

For the present climate, daily Tarbela inflows are simulated from 01-Jan-1979 to 31-Dec-2003 using calibrated 20-km BTOP model with the APRODITE precipitation and temperature datasets (Figure 1.5-29a). The initial conditions of the BTOP model was outputted from the calibration run on Dec-1978 for the present climate simulation. Four cases of daily Tarbela inflows are simulated from 01-Jan-2075 to 12-Dec-2099 for future climates (Gusyev et al., 2016; Hasegawa et al., 2016): 1) 28 CMIP5 model average (RCP8.5 ensemble average), 2) nearly uniform warming in both hemispheres (RCP8.5-cluster 1 of 8 CMIP5 models); 3) larger warming in equatorial Pacific (RCP8.5-cluster 2 of 14 CMIP5 models); and 4) larger warming in the Northern hemisphere (RCP8.5-cluster 3 of 6 CMIP5 models). For each of these four cases, daily 20-km MRI-AGM3.2S precipitation (01/2075 to 12/2099) was bias-corrected with the present climate APHRODITE precipitation (01/1979 to 12/2003) by Hasegawa et al. (2016) using a non-parametric

method while daily future temperature trend of 20-km MRI-AGM3.2S was estimated by adding monthly average values of a difference between future RCP8.5 (01/2075 to 12/2099) and present AMIP (01/1979 to 12/2003) temperature values to daily APHRODITE present climate temperature.

Figure 1.5-29 demonstrates daily Tarbela Dam inflows for the present and future climates simulated with calibrated 20-km BTOP model. Figure 1.5-29a shows simulated Tarbela inflow for the present climate and the BTOP simulated inflows with the RCP8.5 ensemble average case is demonstrated in Figure 1.5-29b. Other three cases demonstrated a similar pattern and are not shown. In four future cases, the winter (from November to February) mean daily inflows are increased largely while daily mean peak inflows are reduced by about 2,000 cms (Figure 1.5-29). Simulated present and future climate inflows demonstrate a shift in mean daily inflows from mid-July in the present climate to the end of May in the future climate. In addition, the second smaller peak is observed in early August in future climates indicating a shift in the snow melt hydrology.



Figure 1.5-27: Modelled area in the Indus River basin.

Fig. 1.5-28: Daily Tarbela Dam inflows simulated with 20-km BTOP model.



Fig.1.5-29: Daily Tarbela Dam inflows simulated for the (a) present (01/1979-12/2003) and (b) future (01/2075-12/2099) climates.

### 1.5.6. 各国政府への成果共有

本年度は、本プログラムの最終年度にあたるため、国際会議やワークショップなど様々な機会 を活用しながら、アジア5流域における研究成果を各国政府関係者に共有し、意見交換を行った。

平成29年1月9日には、IFI (国際共同イニシアチブ)の事務局である ICHARM が主体となっ て実施した IFI ワークショップと GEOSS シンポジウムのため来日したフィリピン公共事業庁の Emil K Sadain 次官らに、プロジェクトリーダーである三宅グループ長からフィリピン・パンパン ガ川における洪水および渇水リスク評価結果を説明した。また、平成29年2月25日には、タイ 王室灌漑局水管理水文部と、2月21日から24日まで横浜で開催された「台風委員会第49回年次 総会」で来日した機会を活用して意見交換を行った。さらに、3月2,3日にはパキスタンにおいて 政府関係者などを対象とした意見交換を行った。

なお、その他本原稿執筆時には、以下の意見交換の機会が予定されている。

- 3月17日にはカンボジア国家防災局を訪問し意見交換
- 3月21日にはインドネシア・ジャカルタにおいて、インドネシア公共事業・住宅省および JICA と「気候変動ワークショップ」を共催し、関係機関により意見交換



図 1.5-31:フィリピン公共事業道路局次 官の E,il K Sadain (左から3人目) とフ ィリピン PAGASA 研究開発補佐の Flaviana D. HILARIO (左から2人目) と の意見交換

### f. 考察

(1)現在気候、将来気候での雨量評価

フィリピン・パンパンガ川流域において、MRI-AGCM3.2S、3.2Hの温暖化実験に対して力学的 ダウンスケーリングを行ない、降水量のバイアス補正を行った後、年最大48時間雨量の頻度解析 を行った。その結果、いずれの場合も温暖化後に極端雨量が増加することを示した。これらの結 果をRRIモデルに導入することにより、洪水リスク評価が行われた。

(2) 洪水リスク評価

a.ソロ川流域

洪水氾濫面積が33%、農業(稲作)被害面積が29%、農業(稲作)被害額が25%増加することが予想された

b.メコン川流域

洪水氾濫面積が32%、農業(稲作)被害面積が23%、農業(稲作)被害額が27%増加するこ とが予想された

(3) 渇水リスク評価

#### a.ソロ川流域 (Wonogiri ダム)

流入量を比較した結果、将来気候では現在気候に比べ、乾季が実質的に短期化する傾向が見られた。また、貯水量を比較した結果、将来気候においては多くの年で貯水量が満水状態となる期間が長期化し、無効放流の機会の増大が予想された。さらに、灌漑面積を比較した結果、 ダムの貯水に大きく依存する2期(DRY)では、将来気候c1、c2、c3とも灌漑面積が増大する 傾向が見られ、渇水リスクの減少が見込まれる結果となった。 b.チャオプラヤ川(Sirikit ダム及び Bhumibol ダム) 流入量を比較した結果、ソロ川 Wonogiri Dam と同様、将来気候では現在気候に比べ、乾季 が実質的に短期化する傾向が見られた。また、現在気候の最大流入量を大幅に超える流量が頻 発する傾向がみられ、無効放流の機会の増大が予想された。一方、RCP8.5-c2 シナリオ(赤道 付近でエルニーニョに似た温暖化パターン)が生じた時に Sirikit ダムで一層渇水状況が深刻に なる可能性がみられた。厳しい渇水状況の頻度の増加が懸念されたが、全般的には渇水による 灌漑可能面積の減少割合は緩和される傾向がみられた。

c.メコン川流域

将来気候において、作付け期間中の降雨が増加することにより、米作作付け面積も増加化す る傾向となった。作付け面積の増加率の範囲は6~9%程度であり、降雨量の増加率(10%程度) に対して若干小さな値となった。また、実績データによると米作作付け面積と収穫面積・収穫 高の間には相関の高い線形関係が見られるが、これが将来気候にも適用できるかについては検 討が必要である。気温上昇により作付け後の減収面積が増加し、その結果収穫面積が減少する 可能性や稲の品種改良等の人為的な影響により減収面積が減少し、収穫面積が増加する可能性 等が考えられる。

### d. Indus River Basin

We utilize these calibrated parameters to simulate Tarbela Dam inflows under present and future climates. From these simulation results, future droughts may not be a major concern the snow-driven hydrology of the upper Indus River basin and the current snow module of the BTOP model should be further improved to include complex snow and glacier melt processes

### g. 参考文献

- Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, Hamada A, Yasutomi N and Kitoh A., 2012: APHRODITE: Constructing a Long-Term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia Based on a Dense Network of Rain Gauges, Bulletin of American Meteorological Society, 93, pp.1401-1415.
- Hironori Inomata, Kuniyoshi Takeuchi and Kazuhiko Fukami, 2011: Development of a Statistical Bias Correction Method for Daily Precipitation Data of GCM20, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.55, pp.247-252.
- 成田正巳, 2008: Kain-Fritcsh 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.
- Hidayat, F., Sungguh, H. M. and Harianto: Impact of climate change on floods in Bengawan Solo and Brantas River Basins, Indonesia, Proceeding of the 11th International Riversymposium, Brisbane, Australia, 1-4 September 2008. http://archive.riversymposium.com/index.php?element=HIDAYAT (Assessed online on 27 July 2015).
- Kudo, S., Sayama, T., Hasegawa, A. and Iwami, Y., 2015: Assessment of climate change impact on flood discharge and inundation in the Solo River Basin, Indonesia, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Hydraulic Engineering), Vol.59, pp.I\_1321-I\_1326.
- Shrestha, B. B., Okazumi, T., Miyamoto, M., and Sawano H., 2016: Flood damage assessment in the Pampanga river basin of the Philippines, Journal of Flood Risk Management, Vol. 9 (4), pp. 355-369.
- Department of Rice Crop, Cambodia (prepared by Romnea Pech), 2013: Overview of Rice Production in Cambodia, Department of Rice Crop, Directorate of Agriculture. http://www.agribenchmark.org/fileadmin/Dateiablage/B-Cash-Crop/Projects/Rice-Initiative/Presentations -WS-130319/country\_presentation\_KH\_130319.pdf
- Mekong River Commission Secretariat (MRCS), FMMP, 2010: Flood damages, benefits and flood risk in focal areas, Flood Management and Mitigation Programme. Component 2: Structural Measures and Flood Proofing in the Lower Mekong Basin, Report, Vol. 2C.
- Shrestha, B. B., Okazumi, T., Miyamoto, M., and Sawano H. 2016: Flood damage assessment in the Pampanga river basin of the Philippines, Journal of Flood Risk Management, Vol. 9 (4), pp. 355-369.
- Akio Kitoh and Hirokazu Endo, 2016: "Change in precipitation exterms projected by a 20-km mesh global atmospheric model, Weather and Climate Extremes 11, pp41-52.
- JICA : Project for the Comprehensive Flood Management Plan for Chao Phraya River in Kingdom of Thailand ,

Supporting Report, Sector G,p14,2013.9

椎貝博美,1993:新体系土木工学72水資源,p78,技報堂.

玉井信行,2004: 河川計画論,p228-229,東京大学出版会.

- Georgievsky, M.V., Ishidaira, H., and K. Takeuchi, 2006: Development of a distributed snow model coupled with a new method of degree-day factors estimation. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE 50: 49-54.
- Gusyev M.A., Gädeke A., Cullmann J., Magome J., Sugiura A., Sawano H. and K. Takeuchi, 2016: Connecting global and local scale flood risk assessment: A case study of the Rhine River basin flood hazard. *Journal* of Flood Risk Management 9(4): 343-354, doi: 10.1111/jfr3.12243
- Gusyev M.A., Hasegawa A., Magome J., Sanchez P., Sugiura A., Sawano H. and Y. Tokunaga, 2016: Evaluation of water cycle components with standardized indices under climate change in the Pampanga, Solo and Chao Phraya basins. Journal of Disaster Research 11(6): 1091-1102, doi: 10.20965/jdr.2016.p1091
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2011: Irrigation in Southern and Eastern Asia in figures: AQUASTAT survey 2011. FAO Water Report 37, 512 pp., ISBN 978-92-5-107282-0
- Hasegawa A., Gusyev M.A., and Y. Iwami, 2016: Meteorological Drought and Flood Assessment using the Comparative SPI Approach in Asia under Climate Change. Journal of Disaster Research 11(6): 1082-1090, doi: 10.20965/jdr.2016.p1082
- Immerzeel W.W.. Droogers P., De Jong S.M., and M.F.P. Bierkens (2010). Satellite Derived Snow and Runoff Dynamics in the Upper Indus River basin, Band 45/2010: 303-312.
- Magome J., Gusyev M., Hasegawa A. and K. Takeuchi, 2015: Global Hydrological Hazard Evaluation System (Global BTOP) Using Distributed Hydrological Model. Poster Presentation NH13C-1950, AGU 2015 Fall Meeting, San Francisco, Dec 14-18, USA.
- Pakistan Water and Power Development Authority (WAPDA), 2017: Main features of Tarbela Dam. Accessed on February 9<sup>th</sup>, WAPDA's web-site,

http://www.wapda.gov.pk/index.php/projects/hydro-power/operational/tarbela-dam/item/27-main-features

- Yasutomi, N., A. Hamada, and A. Yatagai, 2011: Development of a long-term daily gridded temperature dataset and its application to rain/snow discrimination of daily precipitation. Global Environ. Res., 15, 165–172.
- Yatagai A., Kamiguchi K., Arakawa O., Hamada A., Yasutomi N., and A. Kitoh, 2012: APHRODITE Constructing a Long-Term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia Based on a Dense Network of Rain Gauges. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1401–1415.

### h. 成果の発表

論文 (受理、印刷済)

- Akira Hasegawa, Maksym Gusyev, Yoichi Iwami, 2016: Meteorological drought and flood assessment using the comparative SPI approach in Asia under climate change, Journal of Disaster Research, Vol.11, No.6,pp.1082-1090, DOI: 10.20965/jdr.2016.p1082.
- Maksym Gusyev, Akira Hasegawa, Jun Magome, Patricia Sanchez, Ai Sugiura, Hitoshi Umino, Hisaya Sawano, Yoshio Tokunaga, 2016: Evaluation of water cycle components with standardized indices under climate change in the Pampanga, Solo, and Chao Phraya Basins, Journal of Disaster Research, Vol.11, No.6, pp.1091-1102, DOI:10.20965/jdr.2016.p1091.
- S. Kudo, T. Sayama, A. Hasegawa, Y. Iwami, 2016: Analysis of flood risk change in future climate in terms of discharge and inundation in the Solo River Basin, 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER2016), June 5-9, 2016, Kyoto, Japan, pp.p05-1-p05-6.
- 4. Y. Kwak, J. Magome, A. Hasegawa, Y. Iwami, 2016: Global flood exposure assessment under climate and socio-economic scenario for disaster risk reduction, 7th International Conference on Water Resources and

Environment Research (ICWRER2016), June 5-9, 2016, Kyoto, Japan, pp.s01-07-1-s01-07-6.

- 5. Tomoki Ushiyama, Akira Hasegawa, Mamoru Miyamoto, and Yoichi Iwami, 2016: Dynamical Downscaling and Bias Correction of Rainfall in the Pampanga River Basin, Philippines, for investigating Flood Risk Change on Global Warming. Hydrological Research Letters, Vol.10(3), 106-112. DOI: 10.3178/hrl.10.106.
- 6. Yoichi Iwami, Akira Hasegawa, Mamoru Miyamoto, Shun Kudo, Yusuke Yamazaki, Tomoki Ushiyama and Toshio Koike, 2017: Comparative study on climate change impact on precipitation and floods in Asian river basins, Hydrological Research Letters, Vol.11(1), 24–30, DOI: 10.3178/hrl.11.24
- Badri Bhakta Shrestha, Hisaya Sawano, Miho Ohara, Naoko Nagumo, 2016: Improvement of flood disaster damage assessment using highly accurate IfSAR DEM, Journal of Disaster Research, Vol.11, No.6, pp.1137-1149. DOI: 10.20965/jdr.2016.p1137.
- 8. Badri Bhakta Shrestha, Hisaya Sawano, Daisuke Kuribayashi, 2016: Flood risk assessment in the Solo River basin of Indonesia, Proceedings of the 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER 2016).
- Badri Bhakta Shrestha, Toshio Okazumi, Mamoru Miyamoto, Hisaya Sawano, 2016: Flood damage assessment in the Pampanga river basin of the Philippines, Journal of Flood Risk Management, John Wiley & Sons Ltd, Vol.9, No.4, pp.355-369. DOI: 10.1111/jfr3.12174.

### 口頭発表

- 1. 長谷川聡・Maksym Gusyev・岩見洋一, 2016: 比較 SPI を用いた将来の降水量変化の評価, 日本気 象学会 2016 年度春季大会, 5 月 18-21 日, 東京, Vol.109, p.235.
- 2. 長谷川聡・Maksym Gusyev・岩見洋一, 2016: 全球 d4PDF における比較 SPI を用いた将来の降水 量の評価,日本気象学会 2016 年度秋季大会, 10 月 26-28 日,名古屋, Vol.110, p.271.
- 3. 長谷川聡 2016: 気候変動評価のための SPI の改良, 平成 28 年度 SI-CAT/創生 D 研究交流会, 12 月 22 日, 東京.
- 海野仁・マキシム グシエフ・徳永良雄,2016: フィリピン国パンパンガ流域における渇水アセス メント,土木学会第71回年次学術講演会,9月7日-9日,仙台
- 5. Akira Hasegawa, Maksym Gusyev, Yoichi Iwami, 2016: Meteorological hazards of droughts and floods in climate projections by the time-slice experiments with MRI-AGCM3.2 using the comparative SPI, 7<sup>th</sup> International Conference on Water Resources and Environment Research(ICWRER2016), June 5-9, 2016, Kyoto, Japan, pp.s01-10-1-s01-10-2.
- Y. Yamazaki, T. Sayama, A. Hasegawa, Y. Iwami, 2016: Estimation of extreme rainfall and flood inundation probabilities of Chao Phraya River basin using MRI-AGCM3.2S projections, 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER2016), June 5-9, 2016,Kyoto, Japan, pp.s01-06-1-s01-06-2.
- J. Magome, A. Hasegawa, M. A. Gusyev, K. Takeuchi, 2016: Future projection of extreme hazards using a global BTOP with GCM output, 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER2016), June 5-9, 2016, Kyoto, Japan, pp.p-06-1-p-06-2.
- Tomoki Ushiyama, Akira Hasegawa, and Yoichi Iwami, Dynamic Downscaling and Bias Correction of Rainfall in the Pampanga River Basin, Philippines, for Flood Risk Change on Global Warming, The 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER2016), June 5-9, 2016, Kyoto, Japan.
- M. A. Gusyev, A. Hasegawa, J. Magome, H. Umino, H. Sawano 2016:Drought impacts in Asian river basins: Historical and climate change perspectives, 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER2016), June 5-9, 2016, Kyoto, Japan, pp.s02-08-1-s02-08-2.
- 10. E. D. P. Perera, T. Sayama, A. Hasegawa, J. Magome, Y. Iwami 2016:Lower Mekong Basin inundation analysis of multi-sea surface temperatureensemble experiments for RCP8.5 scenario, 7th International

Conferenceon Water Resources and Environment Research (ICWRER2016), June 5-9,2016, Kyoto, Japan, pp.p-08-1-p-08-2.

 Badri Bhakta Shrestha, Hisaya Sawano, Daisuke Kuribayashi, 2016 : Flood risk assessment in the Solo River basin of Indonesia, 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER 2016), June 5-9, 2016, Kyoto, Japan

アウトリーチ活動

- 1. 長谷川聡・岩見洋一 2016: 比較 SPI を用いた将来のアジアの気象学的渇水の変化,土木技術資料, Vol.58, No.12, pp.18-21
- 2. 澤野久弥、2016: "Expert consultation on establishing an information system on damage and losses from disasters in crops, livestock, fisheries, aquaculture and forestry", The Food and Agriculture Organization (FAO), June 9-10, 2016

# 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:三宅 且仁(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)

#### 1.5.1. 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(特定脆弱地域)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し、水災害リスク評価を行うものである。特 定脆弱地域としては、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 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流域を対象とする。

### 1.5.2. 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。リスク評価研究の方法の手順は、各河川流域 での水災害に関する知見を基に、リスク評価方法を図 S1.5-1 のように考えた。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て用いて 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 よる農作物被害については、対象国の一つで得られた洪水と稲作被害との関係から被害関数を導 き、各流域の過去の洪水被害状況で検証したうえで、現在/将来気候に適用し評価した。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形式となっている。



図 S1.5-1:リスク評価研究の方法

# 1.5.3. 5年間の成果

対象5河川流域を対象に洪水評価リスク及び渇水評価リスクの検討した結果を表 S1.5-1、表 S1.5-2 に示す。洪水リスク評価については、全般的に降雨量、氾濫面積及び農業被害の増大、渇 水リスク評価については、雨季(乾季)の時期及び期間の変化のある流域がみられた。

流域名	パンパンガ川	ソロ川	チャオプラヤ川	メコン川	インダス川
降雨の変化	(1/100)1.61倍 48時間雨量 344.8mm ⇒556.5mm	(1/100)1.25倍 4日雨量 106mm ⇒132mm	(1/100)1.14倍 6か月雨量 1382.1mm ⇒1575.0mm	(1/50)1.12倍 (1/100)1.11倍 年間雨量	(1/100)1.65倍 2週間雨量 75.7mm ⇒125.0mm
氾濫面積の変 化	(1/50)1.18倍 平均浸水時間 0.91倍 (1/100)1.22倍 平均浸水時間 0.90倍	(1/100) 1.06倍	(1/100) 1.06倍 河道付近での浸水回 数の増加	(1/50)1.30倍 (1/100) 1.32倍	融雪計算を含む 計算精度を検証 中
農業被害額	(1/100)1.20倍	(1/100)1.25倍	被害データを入手 後同様の手法で試 算可能	(1/50)1.31倍 (1/100)1.27倍	氾濫状況の算定 後に同様の手法 で試算可能

表 S1.5-1: 洪水リスク評価総括表(現在気候と将来気候との比較)

### 表 S1.5-2: 渇水リスク評価総括表

(a)灌漑農業

## (b)天水農業

	流域名	パンパンガ川	ソロ川	チャオプラヤ川	インダス川	流域名	メコン川
評価項目		(ለ* ንያለ* ንያ* ንያ* ል)	(97/\$°J9°&)	(3·1)\$7 k, 7° 27° k9° k)	(\$#^*7\$*\$)	評価項目	(東北タイ)
	雨季	・終わりの遅れ	・開始の早まり	<ul> <li>開始の早まり</li> <li>長期化</li> </ul>	・開始の早まり	Ì	・年降水量は増加傾向
年間流入量		・非常に大きな出水の 可能性	・非常に大きな出水の 可能性	・非常に大きな出水の 可能性	・ビークの二種化		
	乾季	·短縮化	・短縮化		・短縮化	降水重	
		・出水の可能性.	・大きな降雨、出水の 可能性	・大きな降雨、出水の 可能性			
	平均年最大流量	C1,3:大きな減少傾向	大きな増加傾向。	大きな増加傾向	・大きな減少傾向		
流況		C2:大きな増加傾向				作付け面積	・増加 (降雨量の増加にともな
	平均豊水流量	・減少傾向	·増加傾向	• 増加傾向	・増加傾向		い、将来気候では現在 気候よりも6~9%程度米 作の作付面着が増加)
	標準偏差	•同程度、減少傾向	・増加傾向 (年変動が増加).	- 増加傾向 (年変動が増加)	・将来的に増加傾向 (年変動が増加)		
年間貯水量	無効放流期間	•增大	·增大	•増大	・ダム操作ルールが明		
	貯水位の回復状況	・雨季初期におけるダ ム貯水量の急激な回 復	・雨季初期におけるダ ム貯水量の急激な回 復	・雨季初期におけるダ ム貯水量の回復	確なれば、左記計算が 可能	収穫面積 (収穫量)	-作付け面積の増加に 伴い、増収が予測
灌漑面積 (収穫量)	将来/現在の 灌漑面積比	0.96 (平均)	0.99~1.12	1.31~1.44	・年間貯水量が明確な れば、左記計算が可能		
		・若干減少	・現状と同じか君干筋大	※ダム運用による灌漑 面積の拡大可能性			