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

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APHRODITE¹⁾から得られる降水量を用いてバイアス補正²⁾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 o	f calculated	rice-crops	damage areas	and amount	of damage	with reported	values.
---------------	--------------	--------------	------------	--------------	------------	-----------	---------------	---------

Damaged Ri (ł	ce Crop Area na)	Rice Crop Damages (billion Rp)		
Calculated	Reported ^{*1}	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.

D : () (Damaged Rice	Estimated rice-	
District	Calculated	Reported ^{*1}	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 km² 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 5 5
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

Table 1.5-4 : Comparison of calculated damage with reported damage value				
Rice Crop Damages in Cambodian Floodplain (million USD)				
<i>Reported</i> ^{#1}	Calculated UsingCalculated UsingICHARM's Damage CurveMRCS's Damage Curve			
178.8	189.132	207.22		

^{#1} "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 ^{#1}	ADB ^{#2}	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

^{#1} "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 m³、有効貯水容 量 6.15 億 m³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 300km²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¹⁾。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
ຮື ¹²⁰⁰	Inflow, cms	Mean	Std	Min	Max	1981 1981 1982 1983 1983
€ 1000	1th day	265.3	128.0	56.0	573.6	1985
H AN	95th day	56.4	19.4	22.6	102.3	1987
V 41	185th day	25.1	7.5	12.2	45.7	1989
flo	275th day	12.3	3.6	8.2	22.1	
.= E ⁶⁰⁰	355th day	8.1	2.1	5.4	14.6	1992
/onogiri Da	7-d Nur	ay low nber o	flow = f days l	5.3 cm pelow	0.355:	1994 1995 1996 1997 1998
3 ₂₀₀	89	(1ª), 7:	1 (2 nd) a	and 70	(3rd)	
0	110 - 110 -	138	226	2271	316 - 3316 - 346 - 361 -	2003 2003 — — Mean

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



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(RCP 8.5 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 [km²]	比率	面積 [km ²]	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壤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 km³ 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 km² 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 (R²), 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, R² 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, R² 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cl、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 9th, 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.

- 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.
- 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, 7th 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