

4.5. 気候変動適応策の現地実装支援のためのプロトタイプ開発

(土木研究所) 伊藤 弘之、藤兼 雅和、大沼 克弘、大原 美保、海野 仁、Abdul Wahid Mohamed RASMY、河元 隆利、吉野 広郷、望月 貴文、傳田 正利、牛山 朋來、宮本 守、Maksym Gusyev、南雲 直子、玉川 勝徳、筒井 浩行、Ralph Allen Acierto、柿沼 太貴、会田 健太郎、沼田 慎吾、Shrestha Badri Bhakta

4.5.1. 目的と計画

アジア・太平洋諸国において気候変動による影響が懸念されており、これらの地域での気候変動適応策の実施に貢献するために、当該地域で水災害を引き起こすハザードの将来変化を予測するとともに、現地の研究者・実務者と協力して影響評価研究を実施する土台を形成することを目的とする。そのために、ミンダナオ島（フィリピン）ダバオ川流域およびジャワ島（インドネシア）の河川流域を対象とし、水災害リスク解析を実施するとともに、対象地域の現況に応じた気候変動適応策ニーズ・能力の把握や現地実装支援を実施する。これらを通じて気候変動適応策実装のためのプロトタイプを開発する。

将来の水災害リスクの評価においては、降雨等気候条件を適切に設定することが重要となる。一般に将来気候予測は GCM（全球気候モデル）に温室効果ガス排出シナリオ（RCP）等に基づく条件を入力して計算されるが、予測結果には排出シナリオだけでなく GCM 等予測方法自体にも不確実性が内在することが分かっている。このため、適応策についての的確な検討を進めるため、ベースとなる将来気候データの作成と併せて、その不確実性について評価・把握することとする。将来予測結果の不確実性については、対象地域の気候特性に合う GCM の選択、統計的バイアス補正を行ったうえで、個々の GCM による将来予測結果を比較・評価する。また、対象流域における解像度の高い降雨条件等を作成するため、MRI-AGCM の計算結果を使用し、地形特性の反映や気象現象の物理的整合性を確保できる力学的ダウンスケーリングを行う。

次に、降雨等条件から水災害ハザードを評価するためには流出・氾濫等の解析が必要となる。将来の水災害ハザードの評価においては、降雨条件の変化だけでなく気温、蒸発散現象等の熱エネルギー収支の変化を考慮した流出解析を行う必要がある。このため、水・エネルギー収支を考慮した陸面モデルと RRI モデルの流出・氾濫機能を結合した WEB-RRI モデルを開発し、対象流域に適用する。WEB-RRI モデルに将来の降雨等気候条件を通年で入力することにより、渇水、洪水を一連の現象として計算し、想定される氾濫面積や浸水深等から農業・家屋被害額の推定やリスク評価を行う。

適応策の検討においては、気候変動の影響が社会経済全般に及ぶことから、対象国の関係政府機関や研究者、NPO 等が一堂に会した場で、それぞれの情報や知見を持ち寄り、共有することにより検討を進める必要がある。このため、UNESCO-IHP、WMO 等国際機関が主導する国際洪水イニシアティブ（IFI）の活動として「水のレジリエンスと災害に関するプラットフォーム」の設立や活動支援を併せて行うとともに、データの収集・統合の仕組み作り、当該研究成果としての水災害リスク情報の提示等を行うことにより、適応策に関わる議論を効果的に進めることとしている。

4.5.2. 2021 年度の計画達成状況

4.5.2.1. ダバオ川（フィリピン）及びソロ川（インドネシア）を対象とした詳細将来降水データの作成

(1) フィリピンにおける力学的ダウンスケーリングを用いた将来降雨予測に関する検討

フィリピン・ミンダナオ島のダバオ川流域を対象に、力学的ダウンスケーリングのためモデルを構築した。領域気候モデルとして、Weather Research and Forecasting (WRF) モデル ver.3.7.1 を用いた。最初に構築したモデル領域は、通常行われる方法である 2 重ネスティングとし、外側を

15 km メッシュの 100×100 格子 (1500 km 四方)、内側を 5 km メッシュの 79×79 格子 (390 km 四方) とした。鉛直層は 40 層である。積雲パラメタリゼーションは Kain&Fritsch を用いた。

力学的ダウンスケーリングの対象となる気候モデル実験は、MRI-AGCM3.2S 過去気候 (1979～2003) と将来気候 RCP8.5 (2075～2099) の各 25 年間、および MRI-AGCM3.2H (60 km 解像度) の過去気候 (1979～2003) と将来気候 RCP8.5 と RCP2.6 (2075～2099) の各 25 年間である。令和 2 年度までにこれらすべての気候モデルのダウンスケーリング計算を完了した。計算の結果、MRI-AGCM3.2S のダウンスケーリングは、過去気候の夏季の月降水量が著しく過小評価となり、観測の差が大きくなってしまった。バイアス補正によってもこの差の補正が難しいため、MRI-AGCM3.2S の結果は本研究では使用しないこととした。

1 回の計算は 11 月 1 日～次の年の 1 月 1 日までの 14 ヶ月間とし、最初の 2 ヶ月を捨てた 1 年間で解析に用いた。得られた降水量は、地上雨量計に対してバイアスが残っていたため、クウォンタイルマッピングによるバイアス補正を行った。バイアス補正手法は Inomata et al.(2010)の手法に基づいて、それぞれのモデル格子点と、空間補間した雨量計の値に対して実施した。基準として用いた雨量計は、ミンダナオ島内 10 地点の 1986 年～2010 年の 25 年間である。

表 4.5-1 : 年最大 24 時間降水量イベントの上位 5 事例 2 重ネスティング KF スキーム

	3.2H KF past					3.2H KF RCP8.5				
	year		max 1d	Downscaling	GCM	year		max 1d	Downscaling	GCM
1st	2001	1/11,18z	135.45	Typhoon	NE monsoon	2078	3/29,15z	224.87	Typhoon	Typhoon
2nd	1991	4/16,12z	134.81	Typhoon	NE monsoon	2092	12/16,03z	160.73	Typhoon	N monsoon
3rd	1990	11/1,09z	122.94	Typhoon	Vortex	2085	12/26,21z	159.96	Typhoon	Typhoon
4th	1987	6/28,15z	115.75	Typhoon	S monsoon	2086	12/10,09z	134.68	Typhoon	Vortex
5th	1986	1/8,06z	100.08	Typhoon	Vortex	2085	1/10,21z	115.56	Typhoon	Vortex

表 4.5-1 は、力学的ダウンスケーリングによって得られた降水量から、年最大 24 時間降水量の上位 5 事例を表示したものである。過去および将来ともにすべて台風イベントによってもたらされていることがわかる。なお、6 カラム目および最終カラムの GCM と書かれた枠は、ダウンスケーリング前の GCM における同日同時刻の降水事例を調べたものである。それによると、過去気候では 5 事例のうち 3 つがモンスーンによる降水事例、2 つが渦を伴う事例であった。後者を台風として数えても、2/5 が台風に起因する降水事例であるため、ダウンスケーリング後の台風の個数は多過ぎると言える。将来気候については、上位 5 個のうち、台風性が 2 つ、モンスーン性が一つ、渦を伴う事例が 2 つであった。なお、過去気候の上位 25 位までを調べた結果、GCM では 5 事例が台風性であったのに対し、ダウンスケーリングでは 20 事例が台風性であった。

フィリピン大気地球物理天文局 (PAGASA) の資料によると、フィリピン周辺では、夏季は太平洋高気圧に伴う南東風が卓越するため、ほとんどの台風はルソン島やその北方に進行する。そのため、ミンダナオ島に台風が来るのは冬季に限られる。また、ミンダナオ島は北緯 6 度～9 度と赤道に近いので、近くで台風が発生することは稀である。1979 年～2003 年の 25 年間にミンダナオ島に実際に上陸した台風は 6 回であった。従って、表 4.5-1 に示されたダウンスケーリング計算結果は、台風の発生回数が多過ぎると考えられた。

表 4.5-2 : 年最大 24 時間降水量イベントの上位 5 事例 1 重領域、積雲スキーム無し

	3.2H NC past					3.2H NC RCP8.5				
	year		max 1d	Downscaling	GCM	year		max 1d	Downscaling	GCM
1st	1982	3/10,06z	149.54	Typhoon	Typhoon	2091	1/6,06z	262.24	NE monsoon	NE monsoon
2nd	2002	3/9,09z	143.11	Typhoon	NE monsoon	2096	1/11,12z	210.9	NE monsoon	NE monsoon
3rd	1995	3/8,21z	99.81	Typhoon	NE monsoon	2078	3/30,00z	161	Typhoon	Typhoon
4th	1993	2/5,12z	88.93	NE monsoon	NE monsoon	2092	1/22,12z	127.57	NE monsoon	NE monsoon
5th	1992	3/20,09z	85.59	NE monsoon	NE monsoon	2087	2/11,12z	116.12	Typhoon	NE monsoon

ダウンスケーリングにおける台風発生数が過多になる問題を解決するため、令和 3 年度にモデル設定を変更してダウンスケーリング計算を行った。新しいモデル領域は 1 重の 5 km メッシュ 150×150 格子、鉛直 40 層、積雲パラメタリゼーションを使用しない設定で、再計算を行った。

モデル領域設定は図 4.5-1 の通りである。新しいモデル設定による計算では、表 4.5-2 のように台風発生回数が大幅に減少した。過去実験では、ダウンスケーリングでは上位 5 位のうちの 3 回が台風性であり、GCM の 1 回よりは多いが、最初のモデル設定による実験の 5 回に比べて半減した。また、25 位までを調べると 5 回が台風性であった。これは前回の 20 回から大幅に減少し、観測値の 6 回に近い値に落ち着いた。前回モデル設定に比べて後者の設定によるダウンスケーリング結果は、現実的な台風発生頻度に近づいたと考え、今後の解析に使用することとした。

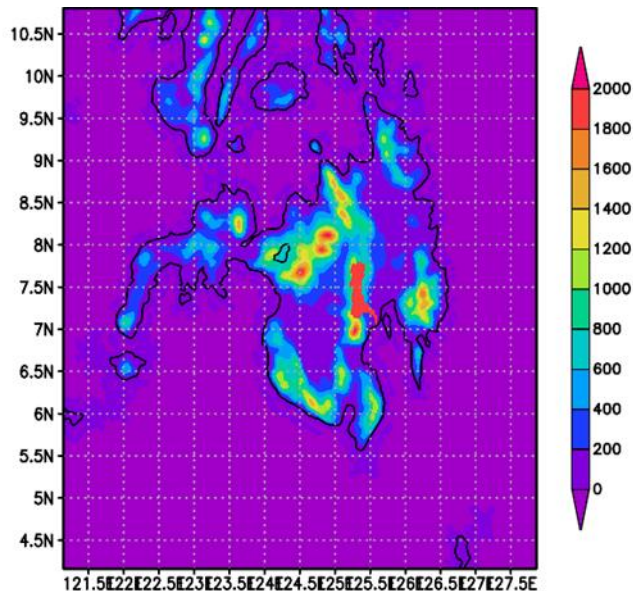


図 4.5-1 : フィリピン・ミンダナオ島を対象とした領域モデル領域。中央部の赤い部分はダバオ川流域

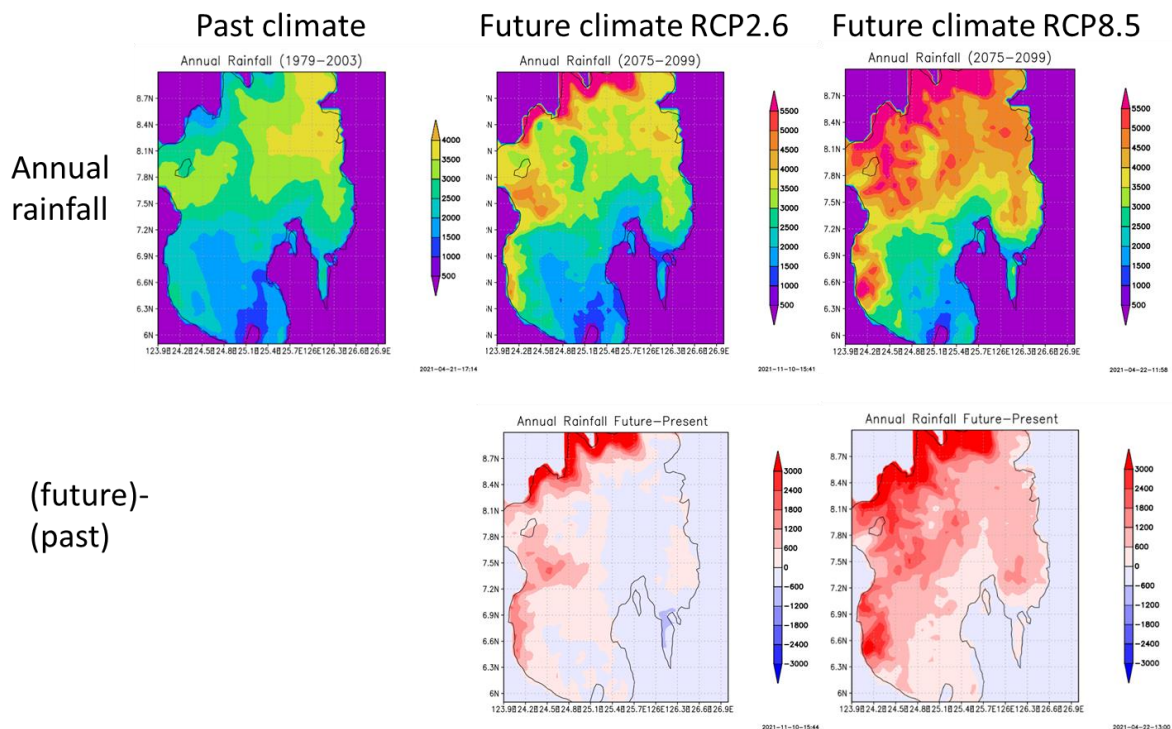


図 4.5-2 : フィリピン・ダバオ川流域を含むミンダナオ島の年降水量分布（上段）と、将来気候と過去気候の差（下段）。左から過去気候、将来気候 RCP2.6、将来気候 RCP8.5 である。

令和 3 年度は、バイアス補正の基準となる雨量観測データの変更を試みた。これまで、ミンダナオ島内に 10 点ある地上雨量計データを用いていたが、研究対象となるダバオ川流域内には河口の 1 点しか観測点が存在しないため、代表性に疑問があるためである。今回、マイクロ波衛星観

測と地上雨量計による補正を組み合わせた雨量プロダクトである CHIRPS データを基準として用いてバイアス補正を行った。

図 4.5-2 に、バイアス補正後の年降水量の分布を示す。過去気候では、ミンダナオ島北部の北緯 8.3° 付近にかけて東西に延びる帯状の多雨域が見られる。一方、将来気候は島の北岸ほど雨が多くなる傾向があった。将来気候の島の北岸の降水量については、ダバオ川流域とは関係が小さいため今回は議論しないことにする。下段の将来と過去の差に見られる通り、島の北部から西部で将来降雨量が増加している。一方、対象となるダバオ川流域は島の中央部であるが(図 4.5-1 参照)、ここでは過去と将来の変化はそれほど大きくなく、RCP2.6 では将来やや減少、RCP8.5 では将来やや増加傾向となっている。

続いて図 4.5-3 に、ダバオ川流域平均雨量の季節変化を示す。上段はバイアス補正前の値である。過去気候月雨量は観測に比べて過大評価しており、特に 1 月～5 月でその差が大きい。しかし、6 月以降は概ね観測に近い値を示した。ダウンスケーリング結果は観測よりも降水量の季節進行が早かったと思われる。下段は、クオインタイルマッピングによるバイアス補正後の値である。観測と過去気候は補正処理の結果ほぼ一致した。左の RCP8.5 では 7 月～9 月の夏季の月雨量が 100 mm 程度増加し、夏季の平均雨量が増えることを示した。一方、右の RCP2.6 では 6 月 9 月 11 月の月雨量がわずかに増加したが、その増加幅は 50 mm 以下と小さかった。それに対して、1 月～4 月の乾季の雨量が 20～50 mm 程度減少していた。この冬季の月雨量の減少が、図 4.5-2 に見られるダバオ川流域の雨量の減少に影響したものと考えられる。

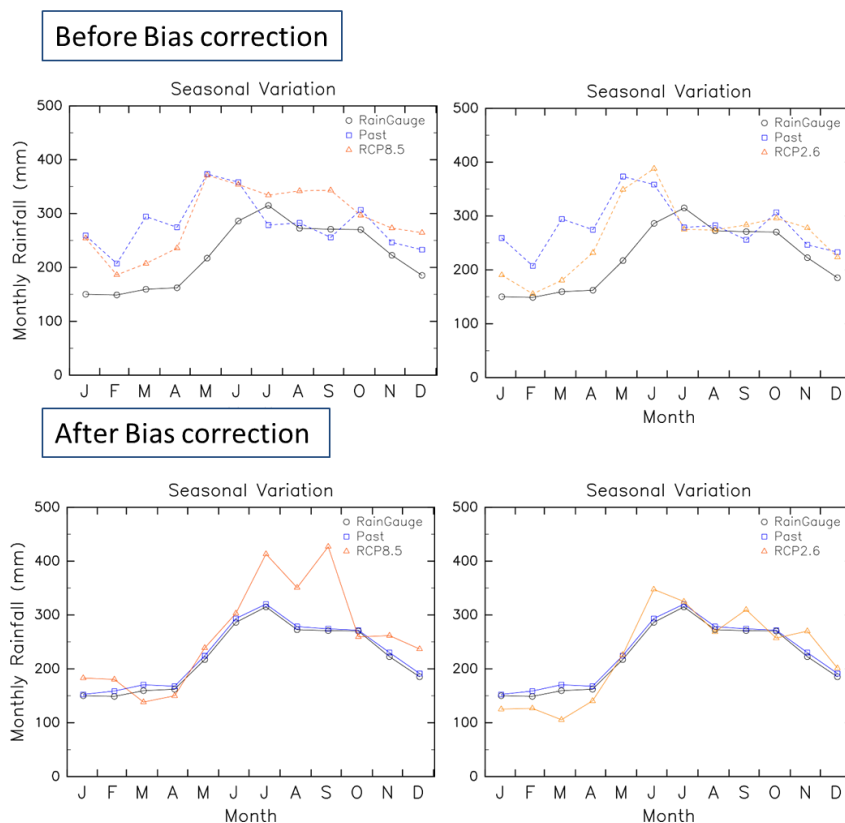


図 4.5-3：ダバオ川流域平均降水量の季節変動。黒線が CHIRPS 雨量、青が過去気候、赤が将来気候 (RCP8.5 または RCP2.6)。上段はバイアス補正前、下段はバイアス補正後。左列は MRI-AGCM3.2H (RCP8.5)、右は MRI-AGCM3.2H の結果である。

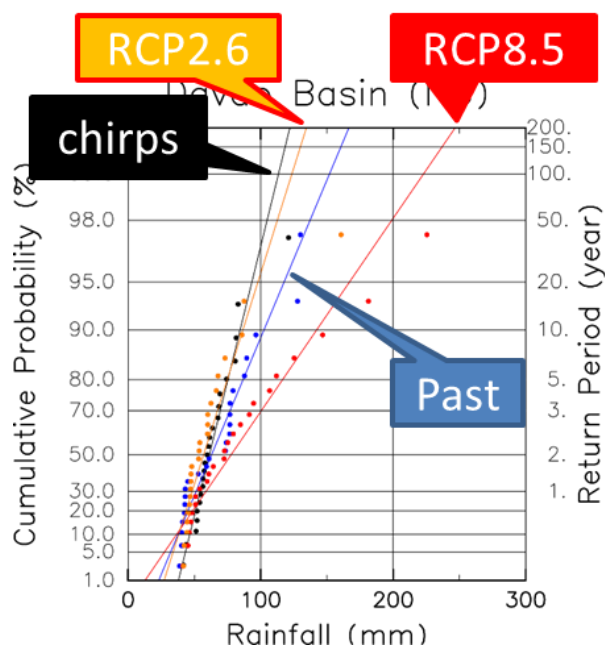


図 4.5-4：ダバオ川流域における年最大 24 時間雨量の頻度解析。MRI-AGCM3.2H のダウンスケーリング（バイアス補正後）から求めた結果である。黒は CHIRPS 雨量、青は過去気候、赤は RCP8.5、オレンジは RCP2.6 である。

(2) インドネシアにおける力学的ダウンスケーリングを用いた将来降雨予測に関する検討

インドネシア・ジャワ島のソロ川流域の力学的ダウンスケーリング結果について示す。領域気候モデルとして、ダバオ川流域と同様に WRF モデル ver.3.7.1 を用いた。

最初に積雲パラメタリゼーションを用いた 2 重ネスティングによるモデル領域を用いたダウンスケーリング計算を行った。結果を図 4.5-5 に示す。各パネルの左上に示した名前が積雲パラメタリゼーションのスキーム名である。最初の 5 つが積雲パラメタリゼーションを用いたものであるが、計算結果（青点）はいずれも黒点で示した雨量計観測値に一致せず、適切なモデル設定とは言えなかった。6 番目の設定は、積雲パラメタリゼーションを用いない設定であるが、これが唯一観測降雨を良く再現することが分かった。そこで、このモデル設定によりダウンスケーリング計算を行った。このモデル領域は、格子間隔 5km の 99×99 格子（490 km 四方）、鉛直層は 40 層とした。

計算対象は、MRI-AGCM3.2S 過去気候（1979～2002）と将来気候 RCP8.5（2075～2098）、および MRI-AGCM3.2H の過去気候、将来気候 RCP8.5 と RCP2.6 のそれぞれ 24 年間である。ソロ川では 11 月～4 月が雨季となっており、この期間の計算を連続的に行うため、1 年分の計算を 6 月 1 日から次の年の 8 月 1 日まで続けて行った。なお、解析に用いるのは最初の 2 ヶ月を捨てた 8 月 1 日からの 1 年間である。力学的ダウンスケーリングによって得られた降水量は、地上雨量計に対してバイアスが残ったため、クウォンタイルマッピングによるバイアス補正を行った。このとき用いたのは、ソロ川流域内の 44 地点の地上雨量計の 1981～2005 年の 25 年間のデータである。手法としては、ダバオ川流域と同様に Inomata et al.(2010)の手法を用いた。

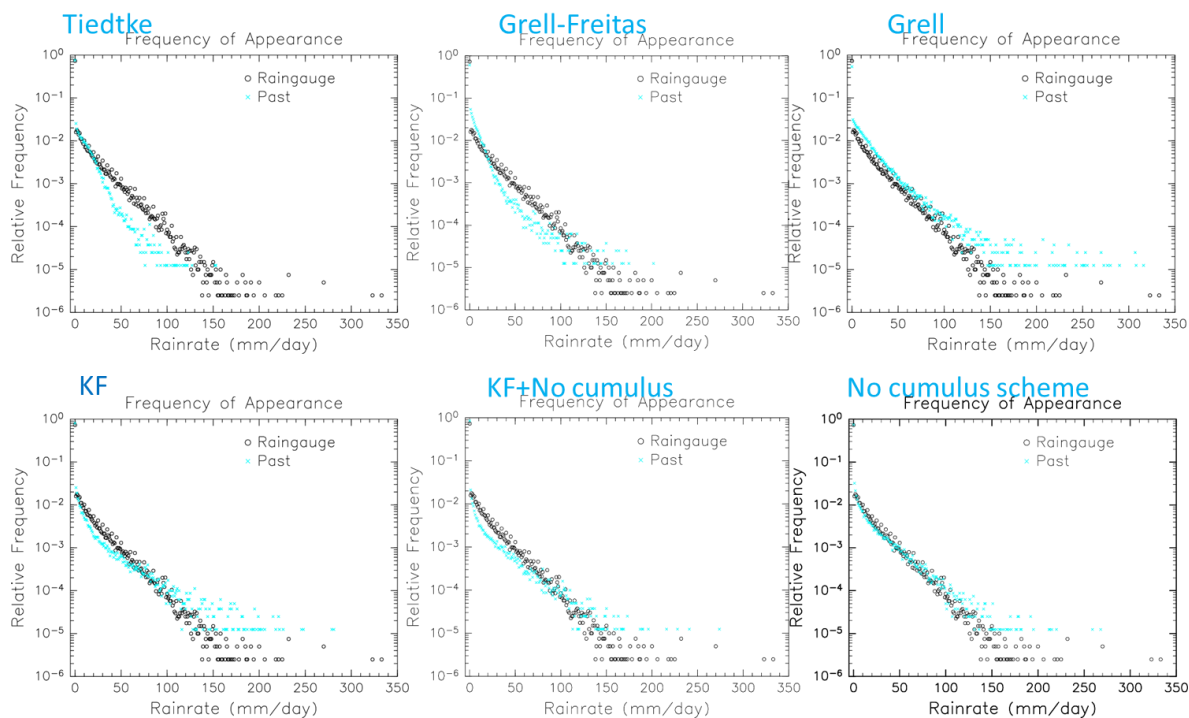


図 4.5-5 : 1979～1983 年の MRI-AGCM3.2S ダウンスケイリングによる雨量計観測点における日雨量の出現頻度。横軸は日雨量、縦軸は出現頻度（対数軸）を示す。各パネルの左上に用いた積雲スキームを示した。

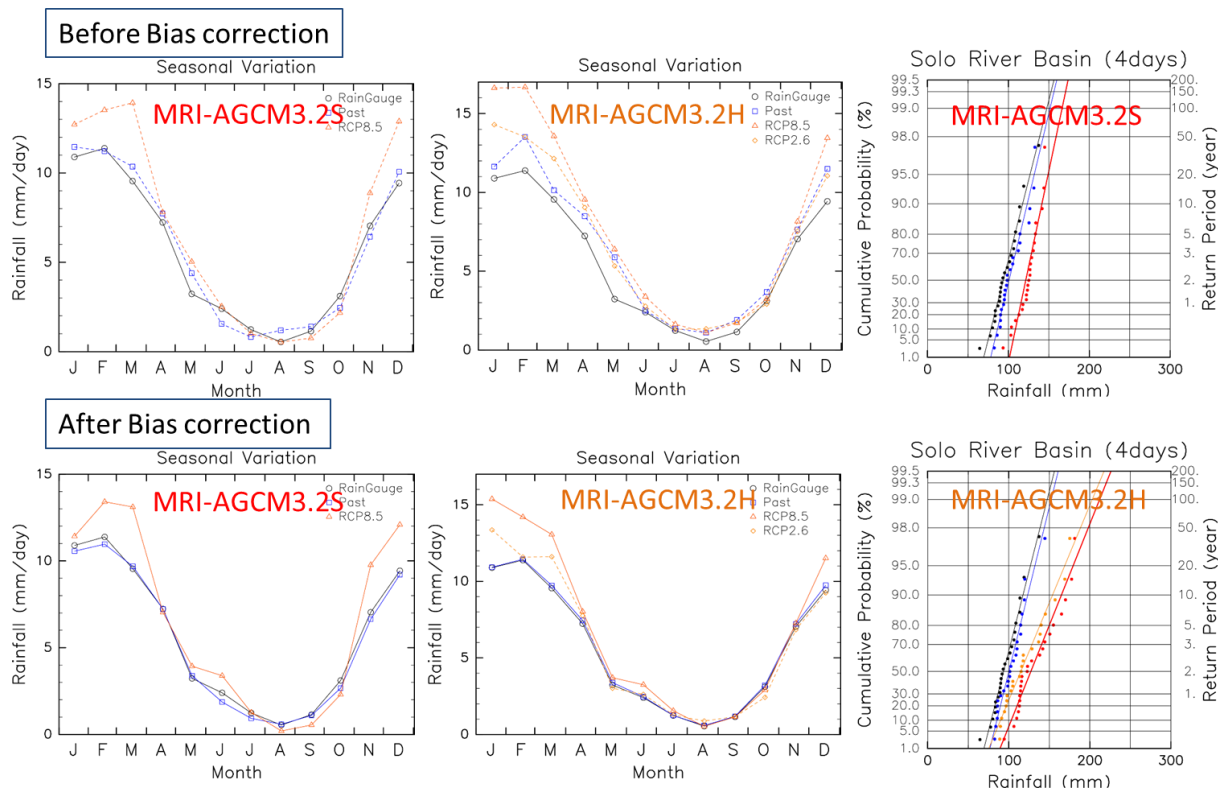


図 4.5-6 : インドネシア・ソロ川流域平均の月別降水量変化（左、中央）とソロ川流域平均雨量の年最大 96 時間雨量の頻度解析（右）。黒線が雨量計、青が過去気候、赤が将来気候（RCP8.5）、オレンジは将来気候（RCP2.6）である。左・中央図については、上がバイアス補正前、下がバイアス補正後である。右図の頻度解析結果の直線は Gumbel 直線にフィッティングしたものである。

図 4.5-6 の左・中央は降水量の季節変化を示している。ジャワ島では主に北半球の冬季の 11 月

～4月にかけて降雨がもたらされ、北半球夏季の5月～10月は乾季となる。上段の2枚の図はバイアス補正前の月平均雨量である。MRI-AGCM3.2S、3.2Hともに青色の過去気候の値は雨量計観測値に非常に近い値となっており、今回のダウンスケーリングのモデル設定が適切であったことを示唆している。

図の左、中央の下段は、バイアス補正後の値である。11月～3月の雨季には将来月雨量が増加する傾向が、RCP8.5の3.2S、3.2Hともに明瞭である。一方乾季には、RCP8.5では3.2S、3.2Hともに5～7月の乾季前半には増加する傾向が見られ、9、10月の乾季後半には減少する傾向であった。乾季後半の月雨量がRCP8.5シナリオでは将来さらに小さくなること示され、渇水の可能性が増大することが示唆される。このように、RCP8.5の月雨量は、3.2S、3.2Hでほぼ同じ傾向であることから、当該地域におけるMRI-AGCMの解像度による計算結果の不確実性は小さいことがわかった。

また、3.2HのRCP2.6については、雨季雨量の過去気候に対する増加幅がRCP8.5よりも小さいが、いずれにしても過去気候に比べて雨量が増加していた。一方、乾季の雨量は過去気候とほぼ同じ値であった。RCP2.6については、過去気候と将来気候RCP8.5の中間的な特徴を示した。

図4.5-6右は、ソロ川流域平均雨量の年最大96時間雨量の頻度解析結果である。ただし、雨量計は日雨量データであるため日最大値から作成し、過去気候・将来気候は3時間毎データから作成した。上図はMRI-AGCM3.2S、下図はMRI-AGCM3.2Hの結果である。両者ともに、過去気候の年最大96時間雨量は、雨量計による年最大4日雨量と良く一致した。また将来気候における極端降雨は過去気候に比べて増加する傾向が見られた。しかし、その増加幅は3.2Sと3.2Hとで異なり、3.2Hの方が特に長いリターンピリオドにおいて大きな増加幅であった。この結果から、頻度解析の豪雨の増加率は、MRI-AGCMの解像度による計算結果の不確実性が大きいことを示した。なお、3.2Hにおいて、RCP8.5の結果はRCP2.6のものよりもわずかに大きかったが、本質的な違いは小さいため、ソロ川においては洪水リスクに関する温室効果ガス排出シナリオによる違いは小さいものと考えられる。

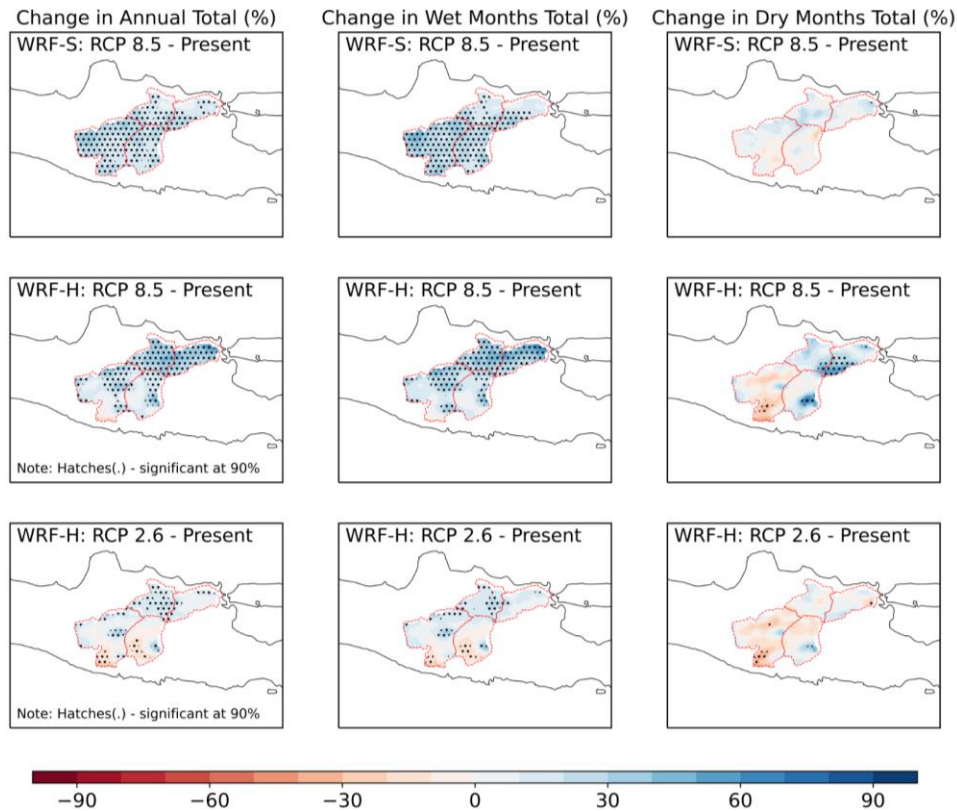


図 4.5-7：インドネシア・ソロ河流域の（将来気候）－（過去気候）の雨量変化（%）、図中の黒点は有意水準 90%を超える領域である。左列：年平均、中央列：雨季、右列：乾季である。また、上段：3.2S、中段：3.2H の RCP8.5、下段：3.2H の RCP2.6 である。

図 4.5-7 は、ソロ河流域内の過去気候と将来気候の雨量の差の空間分布を示したものである。上段と中段は、それぞれ 3.2S および 3.2H の RCP8.5 シナリオの将来気候と過去気候の差を示したものである。年平均と雨季には、流域内の多くの地域で雨量が増加している。しかしながら、雨量増加が有意であるのは、3.2S では上流側（西側）であり、3.2H では下流側（東側）という違いが見られた。なお、乾季については、3.2S では現在と将来の違いは小さいのに対して、3.2H では上流側では減少し、下流側では増加するという場所によって異なる振幅の大きな分布が見られた。一方、下段の 3.2H の RCP2.6 の結果は、増加減少幅は RCP8.5 に比べて小さくなり、空間分布は 3.2H の RCP8.5 の結果と似通っていた。流域平均で見たときには、洪水リスクが将来増加するが、空間分布については GCM によって洪水リスクが増大する場所が異なるという結果になった。このような GCM についての不確実性の理解については、今後の課題である。

(3) CMIP5 統計的ダウンスケーリングと不確実性の検討

将来の水災害リスクの評価においては、降雨等気候条件を適切に設定することが重要となる。一般に将来気候予測は GCM（全球気候モデル）に温室効果ガス排出シナリオ（RCP）等に基づく条件を入力して計算されるが、予測結果には排出シナリオだけでなく GCM 等予測方法自体にも不確実性が内在することが分かっている。このため、適応策についての確かな検討を進めるため、ベースとなる将来気候データの作成と併せて、その不確実性について評価・把握することとする。将来予測結果の不確実性については、山本ら（2012）によりデータ統合解析システム（DIAS）上に実装されたツールを用いて解析する。DIAS では、CMIP5 に収録されているすべての GCM 出力がアーカイブされており、あわせてアーカイブされている地球観測データや再解析結果と比較して、対象地域の気候特性に合う GCM を容易に選択する機能が提供されている。また、長期の地上観測雨量データを登録すると、選択された GCM のバイアス補正を統計的に実行できる。

本検討では、ミンダナオ島（ダバオ）を対象に、

- a) CMIP5 出力降雨のモデル間の不確定性の確認
- b) 対象地域の気候特性を表現できる CMIP5 モデルの選択
- c) 選択されたモデルの降水量の統計的なバイアス補正とダウンスケーリング手法
- d) ダバオ川流域を対象とした確率降雨の将来変化（RCP2.6、RCP8.5 での比較）
- e) ミンダナオ島内の地上観測地点における月平均降水量の将来変化（RCP8.5 での比較）
- f) 将来の月平均降水量（7月、8月）の不確定性の背景にある気候学的なメカニズムの検討を実施した。

a) CMIP5 出力降雨のモデル間の不確定性の確認

CMIP5 はモデル間で異なった時間解像度、空間解像度、物理プロセス等を有することからモデル間に不確定性が生じる。

ここでは、CMIP5 が出力している降水量に着目しモデル間の違いを定性的に示す。ミンダナオ島においては、12月、1月、2月で北東モンスーンにより顕著な降雨がもたらされる。そこで1月の降水量に着目し観測降雨とモデル間の比較を行った。

図 4.5-8 に衛星によって観測された雨（GPCP）の1986年～2005年の20年平均の1月の降水量分布を示す。図 4.5-9 に44のCMIP5の1986年～2005年の20年平均の1月平均降雨分布を示す。

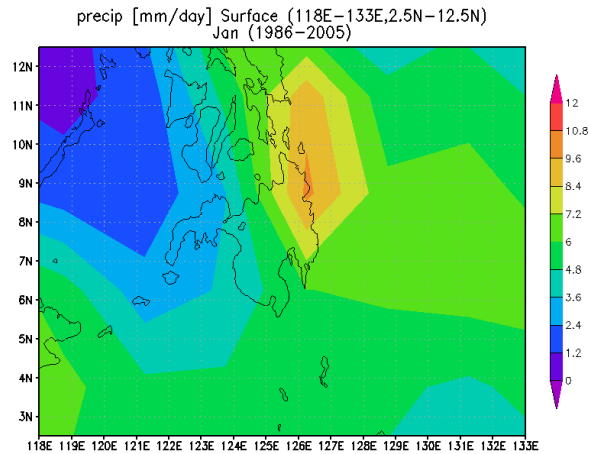


図 4.5-8 : GPCP (1986 年～2005 年 (20 年間)) における 1 月の平均降水量分布

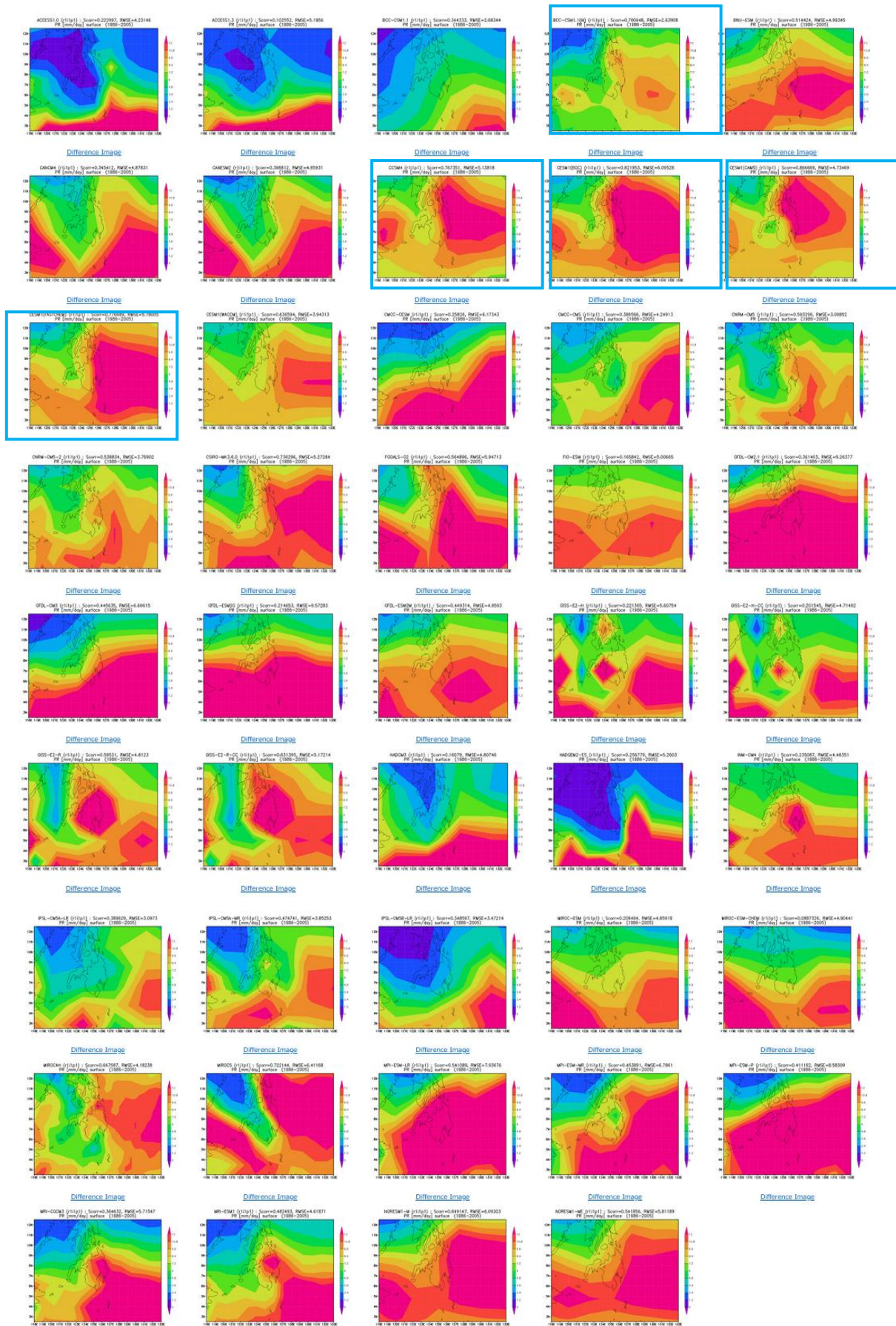


図 4.5-9 : 44 の CMIP5 出力 (1986 年～2005 年 (20 年間)) における 1 月の平均降水量分布

図 4.5-8 に示すように観測 (GPCP) ではミンダナオ島北東部に強い降雨域が示されている。南東部には強い降雨域は示されていない。図 4.5-9 に示す CMIP5 の各出力を見ると、図中に水色の四角で示したモデルのようにミンダナオ島北東部の降雨域を表現できるモデルもあれば、表現できていないモデルもあり、モデル間で不確実性が高いことが示されている。このように CMIP5 ではモデル間におけるばらつきが多いため、対象地域の気候を表現していないモデルは解析対象から外す必要がある。

b) 対象地域の気候特性を表現できる CMIP5 モデルの選択

CMIP5 モデルの選択は、対象としている地域の気候を表現できる能力に基づき選択する。本検討では、グローバルな観測データや再解析データと CMIP5 の各気象要素を比較し、空間分布の類似性と降雨強度の類似性の高いモデルを対象地域の気候を表現する適切なモデルとして選択した。類似性の検討には、降雨、上向き長波放射 (OLR)、海面気圧 (SSP)、気温 (850hPa 面)、東西風、南北風、海面温度 (SST)、ジオポテンシャル高度の 8 つの気象要素に着目した。局所スケールの気象要素 (降雨) の領域を、東経 118 度～133 度、北緯 2.5 度～12.5 度とし、他 7 つの気象要素は総観スケールでの循環や周囲の影響を考慮するため、東経 85 度～東経 155 度、南緯 5 度～北緯 30 度の領域を設定し、その領域内で観測と類似するモデルを選択することとした (図 4.5-10)。

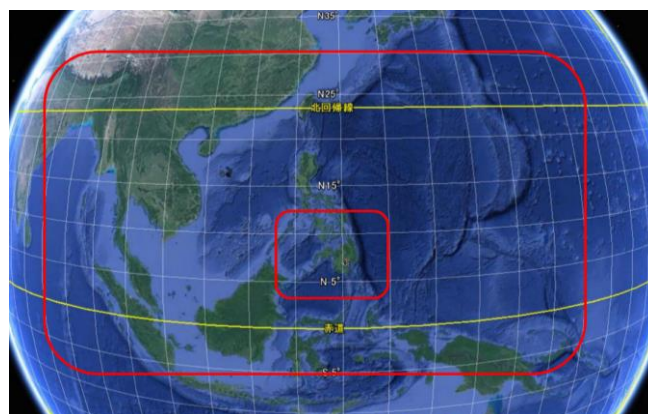


図 4.5-10 : CMIP5 選択で対象とした領域 (内側の赤線が降雨を対象とした局所スケール、外側の赤線が他の気象要素の対象スケールを示す。)

CMIP5 から、1) アンサンブル rli1p1 (初期状態 (r)、初期化方法 (i)、物理プロセス (p) の違いを番号で定義) が historical、rcp8.5 それぞれで利用可能なモデル、2) 月平均雨量が historical、rcp8.5 それぞれで利用可能なモデルの各条件に合致するモデルを選択し、気象要素ごとに 12 ヶ月それぞれの空間分布の類似性の指標：空間相関 (s_corr) と、降雨強度の類似性の指標：平均二乗誤差 (RMSE) を設定し、 s_corr が全モデルの平均より大きく、RMSE が全モデルの平均より小さい場合に 1 のスコア、どちらか一方が平均より良い場合は 0 のスコア、 s_corr が平均より小さく、RMSE が平均より大きい場合は -1 のスコアを与えた。このスコアリングを 8 つの要素で計算しスコアの高いものは再現性が高く、低いものは再現性が低いと見なし、表 4.5-3 に示す上位 6 つのモデルを選択した。また、44 のモデル出力とそのスコアリング結果を表 4.5-4 に示す。

表 4.5-3：選択した上位 6 つのモデル

番号	Models	Total Score
1	CCSM4	5
2	CESM1(BGC)	5
3	CESM1(CAM5)	7
4	CMCC-CMS	7
5	CNRM-CM5	7
6	FGOALS-g2	5

表 4.5-4：44 のモデル出力とそのスコアリング結果

	Total Index Precip	Total Index Air Temp	Total Index OLR	Total Index SLP	Total Index Zonal wind	Total Index Mridioal Wind	Total Index SST	Total Index GPH	Grand Total
ACCESS1.0	-1	1	-1	1	1	0	1	1	3
ACCESS1.3	0	1	0	1	1	-1	1	1	4
BCC-CSM1.1	1	-1	1	1	1	0	1	1	5
BCC-CSM1.1(m)	1	-1	0	0	-1	-1	1	-1	-2
BNU-ESM	1	0	1	1	1	0	0	0	4
CanCM4	-1	0	0	1	1	0	1	1	3
CanESM2	-1	0	0	1	1	1	1	1	4
CCSM4	1	1	1	0	0	1	1	0	5
CESM1(BGC)	1	1	1	0	0	1	1	0	5
CESM1(CAM5)	1	0	1	1	1	1	1	1	7
CESM1(FASTCHEM)	1	1	1	0	0	1	1	0	5
CESM1(WACCM)	1	1	1	1	-1	-1	1	1	4
CMCC-CESM	-1	0	0	1	1	0	1	1	3
CMCC-CMS	1	1	1	1	1	1	1	0	7
CNRM-CM5	1	1	0	1	1	1	1	1	7
CNRM-CM5-2	0	1	0	1	1	1	1	1	6
CSIRO-Mk3.6.0	-1	-1	-1	0	-1	-1	1	0	-2
FGOALS-g2	1	0	1	0	1	1	1	0	5
FIO-ESM	1	0	1	0	0	0		0	2
GFDL-CM2.1	0	0	0	1	0	-1	1	-1	0
GFDL-CM3	1	0	-1	1	1	0	1	0	3
GFDL-ESM2G	0	0	-1	1	-1	0	1	0	0
GFDL-ESM2M	0	0	1	0	0	1	1	1	4
GISS-E2-H	1	-1	0	1	0	-1	1	1	2
GISS-E2-H-CC	0	0	-1	1	0	-1	0	1	0
GISS-E2-R	0	0	0	1	1	0	1	1	4
GISS-E2-R-CC	0	0	0	1	1	0	1	1	4
HadCM3	-1	0	-1	-1	-1	-1	0	0	-5
HadGEM2-ES	-1	1	0	1	-1	-1	0	-1	-2
INM-CM4	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-2
IPSL-CM5A-LR	0	0	0	-1	0	0	1	0	0
IPSL-CM5A-MR	0	0	-1	-1	0	0	1	0	-1
IPSL-CM5B-LR	1	0	-1	-1	0	1	1	-1	0
MIROC-ESM	0	1	0	-1	-1	-1	0	0	-2
MIROC-ESM-CHEM	0	1	1	-1	-1	-1	0	0	-1
MIROC4h	1	1	0	-1	1	-1		0	1
MIROC5	0	-1	1	0	1	0	-1	1	1
MPI-ESM-LR	-1	1	-1	1	0	1	1	1	3
MPI-ESM-MR	0	1	-1	1	1	1	1	1	5
MPI-ESM-P	-1	1	-1	1	1	1	1	1	4
MRI-CGCM3	0	0	1	-1	1	1	1	0	3
MRI-ESM1	1	0	1	-1	1	1	1	0	4
NorESM1-M	1	-1	1	0	-1	-1	0	0	-1
NorESM1-ME	1	-1	1	0	-1	-1	0	0	-1

c) 降雨の統計的バイアス補正とダウンスケーリング手法

本検討では、データ統合・解析システム (DIAS) 上に実装されている CMIP5 データ解析ツール (CMIP5 Tool) を用いた。Nyunt ら (2013) の手法が実装されており、ミンダナオ島で観測した地点の長期の雨を登録することで、観測地点ごとに降雨量の統計的バイアス補正とダウンスケーリングを同時に実施できるものである。

一般に GCM は多くの小雨の日を出力すること、また、豪雨の再現性が低く降雨の季節変化も適切に表現できない場合がある。これらのバイアスはそれぞれ性質が異なるため、Nyunt らは降雨を豪雨、通常降雨、無降雨日の 3 分類しバイアスを補正している。具体的には、豪雨は、対象

期間の上位 1 パーセント以上の雨を抽出し、それが、一般化パレート分布 (GPD) にフィットするように補正。無降雨日は、観測降雨で無降雨日数を算定し、同じ日数を GCM に適用。残りを通常の雨とし、ガンマ分布にフィットするように修正する手法である。

バイアス補正にはフィリピン国大気地球物理天文局 (PAGASA) より提供されたミンダナオ島内の10地点の観測データを使用した。雨量観測地点を図 4.5-11に、雨量データを図 4.5-12に示す。期間は最長で1980年～2016年の37年間である。

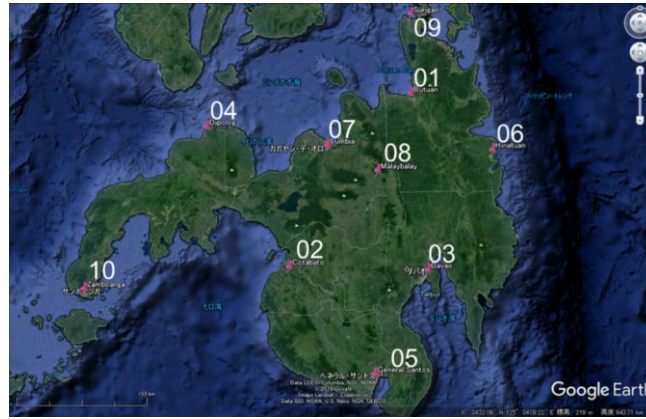
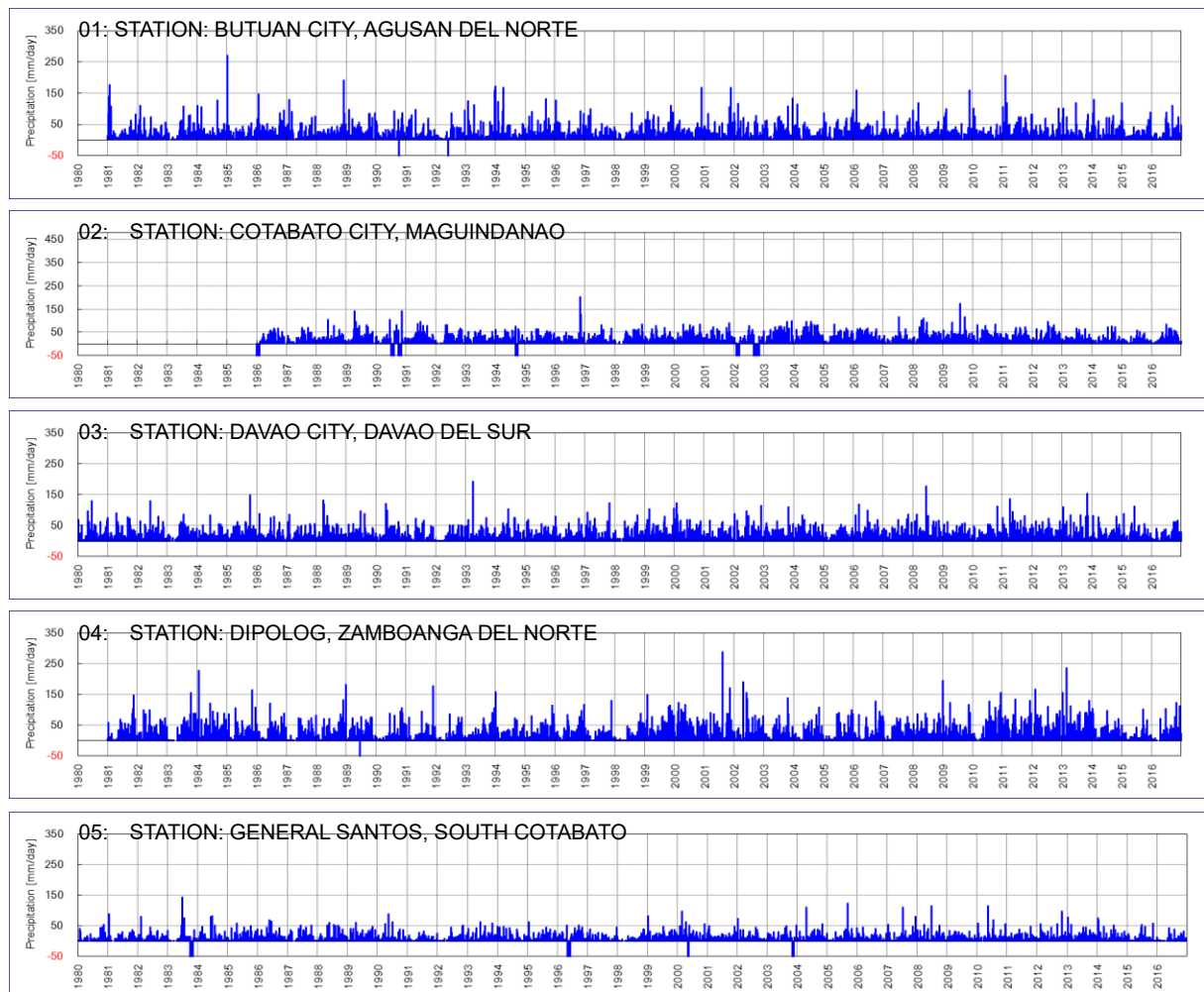


図 4.5-11 : PAGASA より提供された雨量観測地点



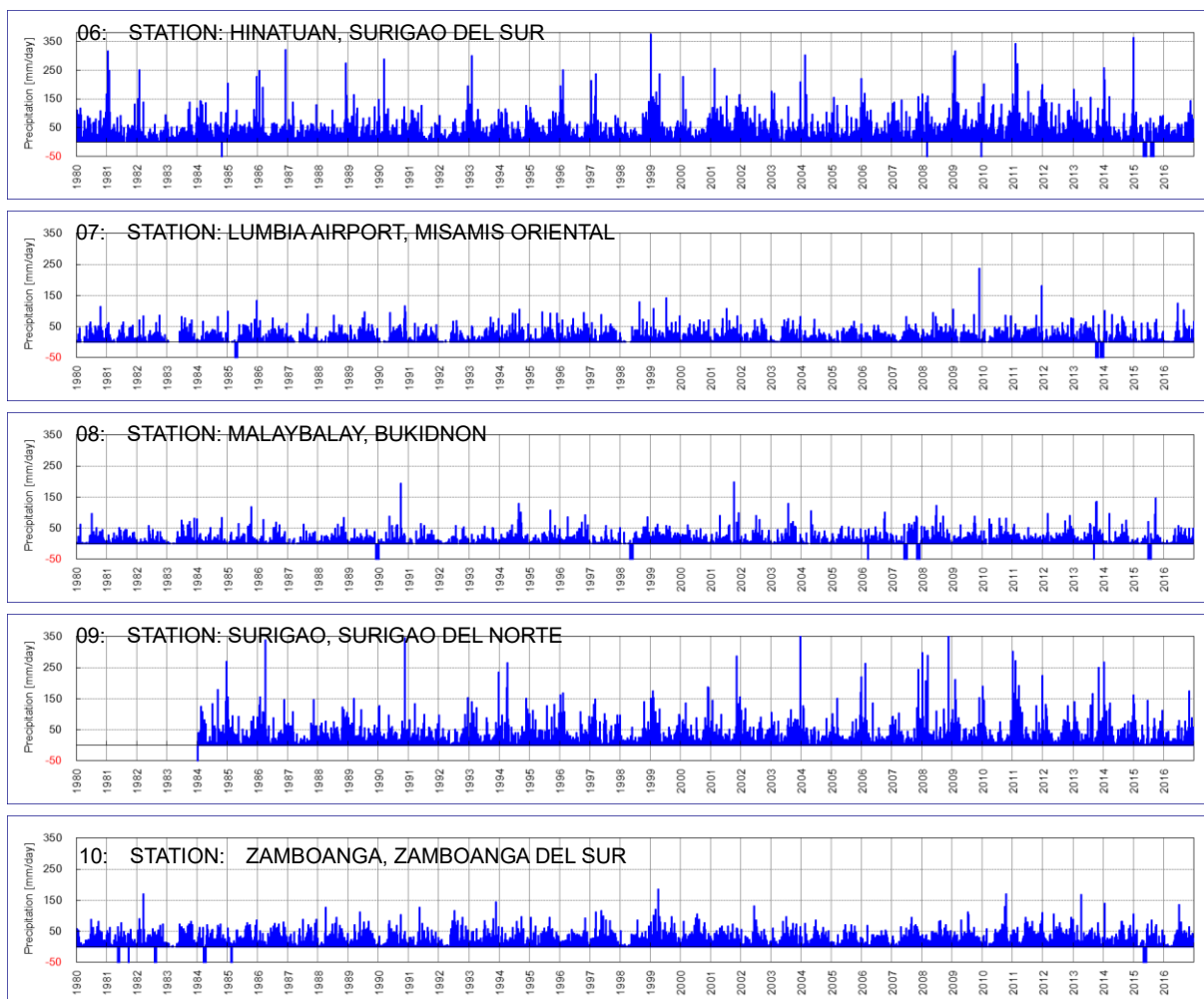


図 4.5-12 : PAGASA より提供された 1980 年～2016 年の 10 地点の雨量データ

d) ダバオ川流域を対象とした確率降雨の将来変化 (RCP2.6、 RCP8.5 での比較)

選択した上位6つのモデルを対象に、降雨の統計的バイアス補正とダウンスケーリングをしダバオ川流域を対象とした確率降雨の将来変化をRCP2.6、 RCP8.5で比較した。バイアス補正には PAGASAより提供されたミンダナオ島内10地点の地上観測データをティーセン分割し、ダバオ川流域内平均の雨量データを作成し使用した。バイアス補正の期間は、力学的ダウンスケーリングに合わせ現在気候、将来気候ともに25年とした。なお、力学的ダウンスケーリングでは MRI-AGCM3.2S現在気候 (1979年～2003年) と将来気候RCP2.6、 RCP8.5 (2075年～2099年) の各25年間としているが、統計的ダウンスケーリングではCMIP5が可能な現在気候 (1981年～2005年) と将来気候RCP2.6、 RCP8.5 (2075年～2099年) の各25年間とした。CMIP5はモデル毎に複数のアンサンブル計算が行われているが、本解析では `rlilp1` を対象とした。結果を図 4.5-13に示す。図の左が現在気候 (1981年～2005年) におけるバイアス補正後の確率降雨、真ん中が将来気候RCP2.6 (2075年～2099年) におけるバイアス補正後の確率降雨、右が将来気候RCP8.5 (2075年～2099年) におけるバイアス補正後の確率降雨を示す。図中の黒線は過去のダバオ側流域平均の観測降雨での値を示す。

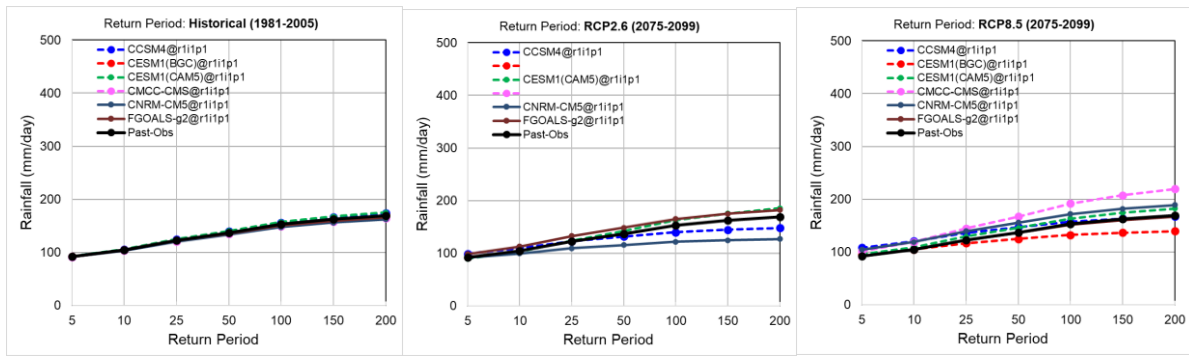


図 4.5-13: ダバオ川流域を対象とした確率降雨 (左: 現在気候 (1981 年~2005 年)、中: 将来気候 RCP2.6 (2075 年~2099 年)、右: 将来気候 RCP8.5 (2075 年~2099 年))、図中の黒線は過去のダバオ側流域平均の観測降雨での値を示し、他の線は選択された 6 つのモデルを示す。なお、CESM1 (BGC) と CMCC-CMS では RCP2.6 では出力が無いため図中には表示していない。

図 4.5-13 より、選択された 6 つのモデルのうち、RCP2.6 では将来 2 つのモデル (CESM1 (CAM5) と FGOALS-g2) が増加傾向、2 つのモデル (CCSM4 と CNRM-CM5) が減少傾向を示した。なお、CESM1 (BGC) と CMCC-CMS は RCP2.6 では出力されていないため図中には表示していない。RCP8.5 では将来 5 つのモデル (CCSM4、CESM1 (CAM5)、CMCC-CMS、CNRM-CM5、FGOALS-g2) が増加傾向、1 つのモデル (CESM1 (BGC)) が減少傾向を示した。

例えば 100 年確率降雨に着目すると、過去の観測 (黒線) は 150 mm/day であるのに対し、RCP2.6 の増加傾向の 2 つのモデル CCSM4 と CNRM-CM5 は 165 mm/day であった。RCP8.5 では、増加傾向を示す 5 つのモデルのうち CMCC-CMS が 192 mm/day と最も大きな値となった。減少傾向を示すモデルでは RCP2.6 では CNRM-CM5 で 122 mm/day、RCP8.5 では 132 mm/day となった。

また、FGOALS-g2 のように RCP2.6 では 100 年確率降雨で 165 mm/day であるが、RCP8.5 では 151 mm/day と RCP8.5 で減少傾向を示すモデルもあった。

以上のことから、RCP8.5 は RCP2.6 と比較し 将来の確率降雨は増える傾向にあるものの、モデルによっては逆の挙動を示すなど確率降雨の将来変化の不確実性が高いことが示された。

e) ミンダナオ島内の地上観測地点における月平均降水量の将来変化 (RCP8.5 での比較)

選択した上位 6 つのモデルを対象に、ミンダナオ島内の地上観測地点における RCP8.5 シナリオでの月平均降水量の将来変化を行った。バイアス補正の期間は、現在気候 (1986 年~2005 年) と将来気候 RCP8.5 (2081 年~2100 年) の各 20 年間とし、アンサンブル r11p1 を対象とした。

バイアス補正をした将来 (RCP8.5 シナリオ) における 2081 年~2100 年の 20 年間の各月の平均日雨量とバイアス補正をした過去 (1986 年~2005 年「黒線」) との関係を図 4.5-14 に示す。図 4.5-14 より、ミンダナオ島では島内の観測地点間で降雨パターンが異なることが示された。例えば季節変動に着目すると、北東部の 01、06、09 地点 (図中の赤丸、赤四角の地点) では 12 月・1 月・2 月 (DJF) に降水量多く、島中部の 02、08、07 地点 (図中の青丸、青四角の地点) では 6 月、7 月、8 月 (JJA) に降水量多く、南部の 03、05、10 地点 (図中の緑丸、緑四角の地点) では年間を通して変動幅が小さいものの、JJA に多い傾向、北西部の 04 地点 (図中の黄丸、黄四角の地点) では、6 月、11 月に 2 ピークの傾向があることが示された。

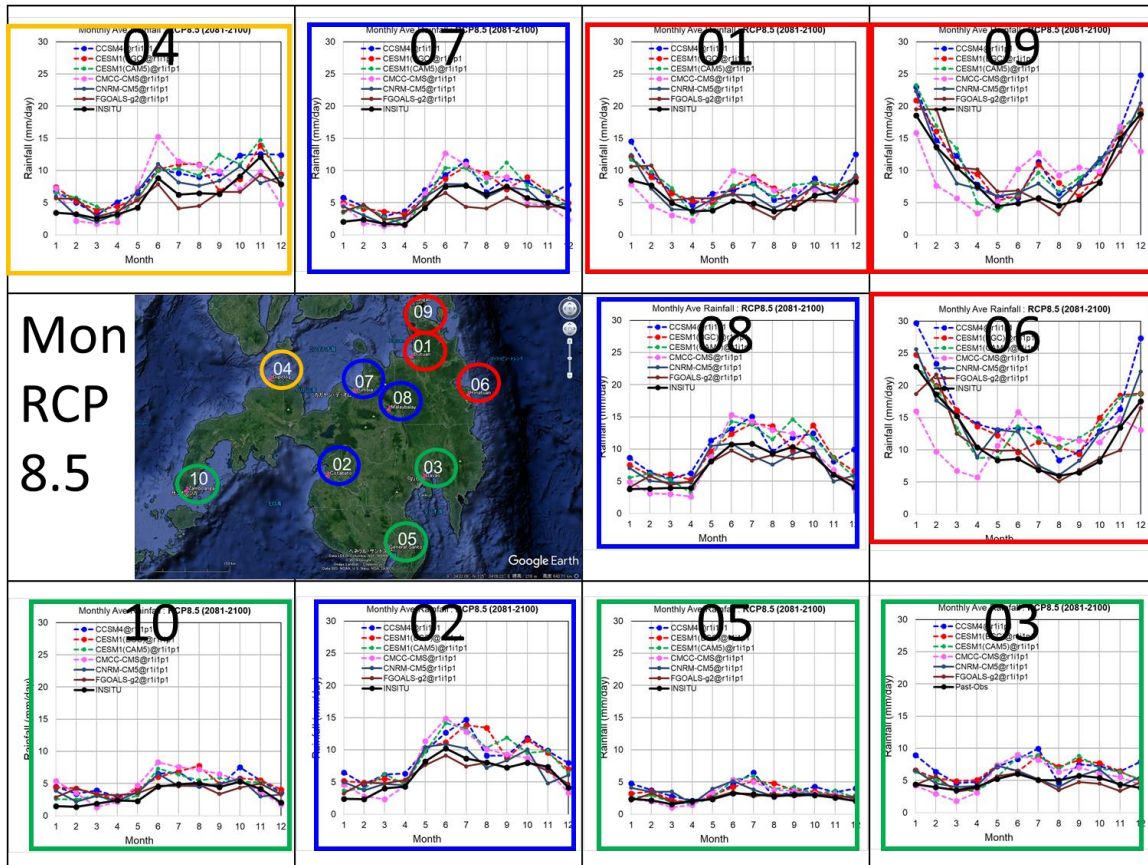


図 4.5-14: 過去 (1986 年～2005 年「黒線」) と将来 (2081 年～2100 年) 「CCSM4:青点線、CESM1(BGC):赤点線、CESM1 (CAM5):緑点線、CMCC-CMS:ピンク点線、CNRM-CM5:紺実線、FGOALS-g2:茶実線」における各月の平均日雨量を示す。

ミンダナオ島において、12月、1月、2月は北東モンスーン、6月～8月は南西モンスーンにより降雨がもたらされること、また、島内には山脈が複雑に位置し、降雨は地形的な影響を強く受けていることが考えられる。

f) 将来の月平均降水量 (7月、8月) の不確定性の背景にある気候学的なメカニズムの検討

各地点において選択されたモデル間で月平均降水量に幅があり不確定性があること、また選択されたモデルで各月の降水量は将来 (RCP8.5 2081-2100) 増加傾向にあるが、特に7月～8月では FGOALS-g2、CNRM-CM5 が減少傾向にあることが示された。

そこで将来の月平均降水量が過去と比較し減少傾向にある CNRM-CM5 と FGOALS-g2 において、将来増加傾向にある他のモデル (CCSM4、CESM1 (BGC)、CESM1 (CAM5)、CMCC-CMS) との違いを気候学的な背景をもとに検討することとした。

ミンダナオ島における 6月～8月の降雨は南西モンスーンによりもたらされることから、総観スケールにおける選択された GCM の東西風、南北風の将来における強弱を確認することとした。

図 4.5-15 に東西風 (Zonal wind 850 hPa) における将来 (RCP8.5 2100-2081) と過去 (Past 1986-2005) における 6月、7月の平均の差画像を、図 4.5-16 に南北風 (Meridional wind 850 hPa) における将来 (RCP8.5 2100-2081) と過去 (Past 1986-2005) における 6月、7月の平均の差画像を示す。

図 4.5-17 において、将来、東西風の場合がマイナス (青) を示すと西風が弱まること、プラス (赤) を示すと西風が強まることを示す。同様に、図 4.5-16 において将来、南北風の場合がマイナス (青) を示すと南風が弱まること、プラス (赤) を示すと南風が強まることを示す。将来の月平均降水量が減少傾向を示す FGOALS-g2、CNRM-CM5 では、図中で黄色枠で示すミンダナオ島の領域では将来成分が弱まる青色を示すことから、両モデルにおいて将来の南西モンスーンが弱まることにより将来の降雨が減少傾向を示したと考察する。

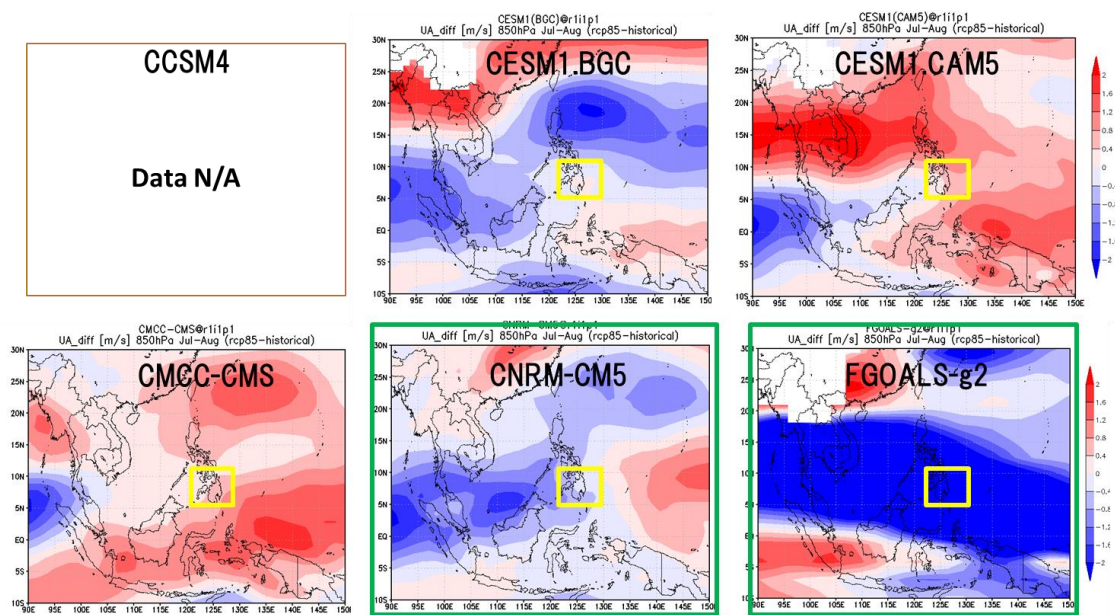


図 4.5-15：東西風（Zonal wind 850 hPa）における将来（RCP8.5 2100-2081）と過去（Past 1986-2005）の各平均の差画像（JJA で将来月平均降水量が減少傾向を示す FGOALS-g2、CNRM-CM5 を緑線で示す。また、図中の黄四角はミンダナオ島を示す。なお、CCSM4 では当該期間に東西風のデータが無いため N/A と示す）。

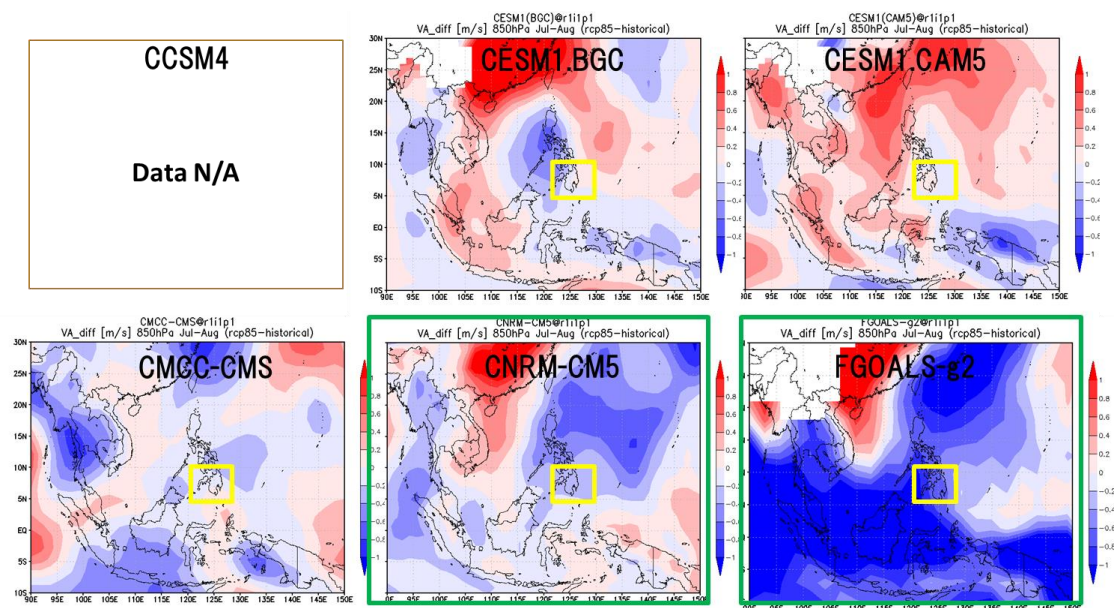


図 4.5-16：南北風（Meridional wind 850 hPa）における将来（RCP8.5 2100-2081）と過去（Past 1986-2005）の各平均の差画像（JJA で将来月平均降水量が減少傾向を示す FGOALS-g2、CNRM-CM5 を緑線で示す。また、図中の黄四角はミンダナオ島を示す。なお、CCSM4 では当該期間に南北風のデータが無いため N/A と示す）。

以上のように、本検討ではミンダナオ島地域の気候特性に合う CMIP5 モデルを選択し、10 地点における長期の降雨観測データを用いて、選択されたモデルに対し統計的なバイアス補正とダウンスケーリングを行い将来の月平均降雨の予測結果を比較した。その結果、将来、7月、8月の月平均降水量が減少傾向を示す FGOALS-g2、CNRM-CM5 において、将来の南西モンスーンが弱まることにより降雨が減少傾向を示すことを考察した。

4.5.2.2. WEB-RRI モデルの開発と洪水・濁水被害リスクの推定

(1) ダバオ川流域を対象とした洪水被害リスクの推定

フィリピン・ダバオ川流域を対象に降雨流出氾濫（WEB-RRI）モデルを構築すると共に、より詳細な浸水状況を把握するために、バラングイスケールの RRI モデルを構築した。そして、前述（4.7.2.1）のダウンスケーリング結果を用いて将来の洪水被害リスクの推定を行った。

本検討では流域スケールとバラングイスケールの 2 種類のモデル構築を行った。流域スケールでは、ダバオ川流域のみではなく他の流域からの洪水流の流入も考慮し、ダバオ川流域周辺の流域を含むエリア（流域面積 3,644 km²）を MERIT Hydro データを用いて 6 s 格子（約 180 m）モデルを構築した。バラングイスケールに関しては、より詳細な洪水状況を把握するために 3 つのバラングイ（Mandug、Ma-A、10-A）を対象に IfSAR データを用いて 40 m 格子のモデルを構築した。各モデルの領域や流量観測点を図 4.5-17 に示す。

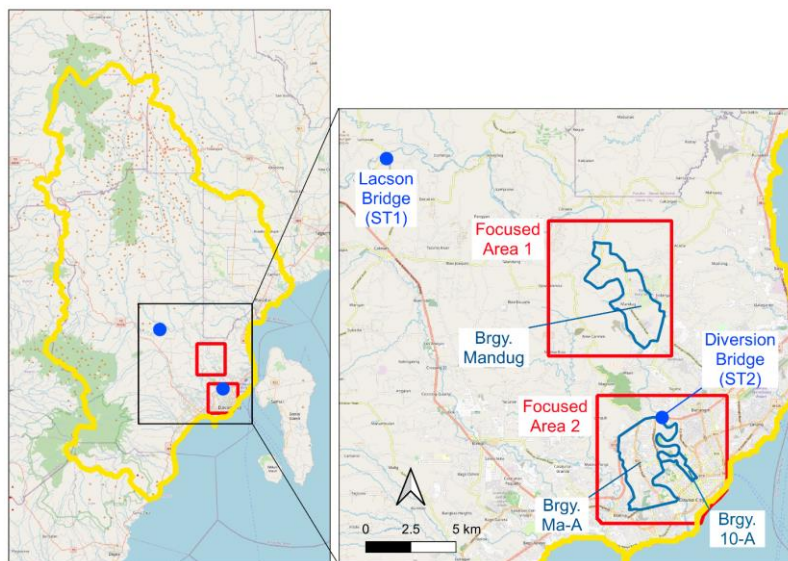


図 4.5-17 : WEB-RRI モデルによる流域スケール（左図の黄色枠線）と RRI モデルによるバラングイスケールモデル（右図の赤色枠線）の概要図。

モデルの再現性に関しては、対象エリアは現地雨量データが乏しいことから CHIRPS の衛星雨量データを用いて Lacson 地点（図 4.5-17 の ST1）における計算流量と実測流量を比較することで、WEB-RRI モデルの河道・斜面粗度係数等のパラメータを同定した後、2008 年の洪水イベントで同定したモデルの妥当性を確認した。その結果、対象イベントのピーク流量や波形を再現できるモデルが得られた（図 4.5-18）。流域スケールモデルからバラングイスケールモデルへのデータの受け渡し方法として、流域スケールモデルで得られた計算流量をバラングイスケールモデルの上流端境界条件として与えた。

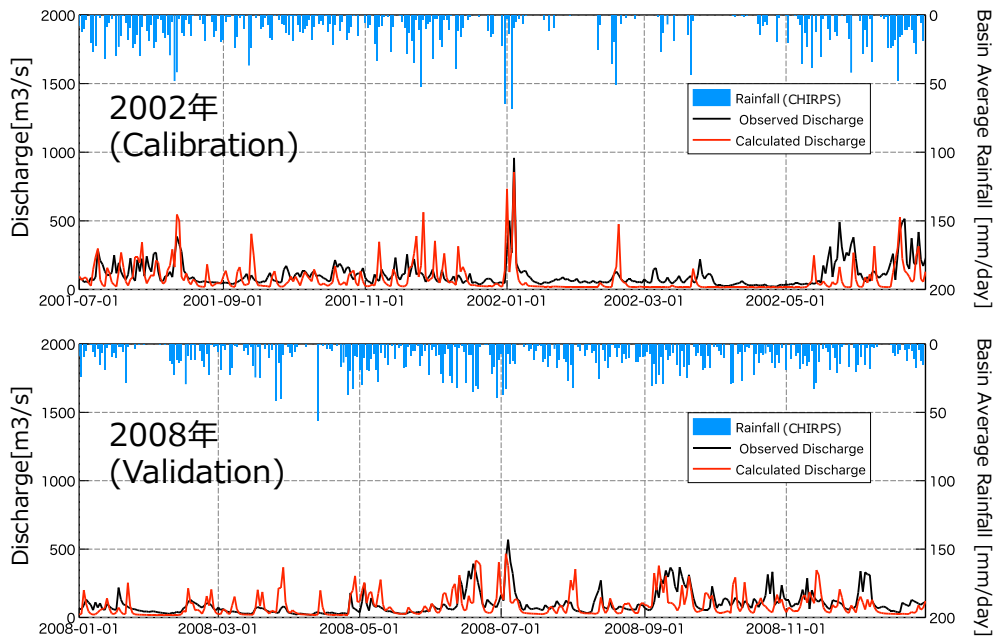


図 4.5-18 : Lacson 地点における WEB-RRI モデルパラメータのキャリブレーションおよび検証結果。

次に、前述 (4.7.2.1) のダウンスケーリング結果を用いて将来の洪水被害リスクの推定を行った。具体的には、過去気候と将来気候における洪水被害リスクの比較を行うために、過去気候 25 年間 (1979～2003 年)、RCP8.5 シナリオの 25 年間 (2075～2099 年) のうち、それぞれ 24 時間降雨量が最大となった年のイベントを対象とした。なお、過去気候のダバオ流域における年最大 24 時間降雨量は 127.7 mm、将来気候は 225.4 mm であり、降雨パターンも異なる (詳細は 4.7.2.1)。まず、流域スケールの最大浸水深の計算結果を図 4.5-19 に示す。将来気候は過去気候より年最大 24 時間降雨量が約 1.8 倍と大きいことや降雨がダバオ川流域に集中していることから、過去気候に比べ将来気候では浸水域が広くかつ浸水深が深いことが分かる。これらの得られた計算流量を用いてより詳細なバランガイスケールモデルによる最大浸水深の計算結果を図 4.5-20 に、流域スケールモデルとバランガイスケールモデルの計算結果を比較した図を図 4.5-21 に示す。図から、より詳細に浸水状況が表現できていることが見て取れる。過去気候の場合、対象とするバランガイ地域においてはいずれも河川からの氾濫は発生せず、河川沿いの窪地等に降雨の集積によって浸水深が 0.5 m 程度の浸水が見られた。将来気候では、いずれの地域においても河川からの氾濫が発生しており、上流の Mandug エリアでは河川敷に 5.0 m 以上の浸水が発生しているが、市街地は高台になっていることからほとんど浸水は見られなかった。一方、下流の Ma-A エリアでは、河川周辺やエリアの中心に位置する市街地が 2.0 m 以上の浸水が発生することが分かった。なお、過去・将来気候におけるピーク流量の差としては、Mandug エリアの上流において、過去気候 1,087m³/s、将来気候 2,883 m³/s と約 2.6 倍の差であった。

以上の検討から、2つのスケールの異なる WEB-RRI モデルと RRI モデルを組み合わせることで全体の水収支を考慮しつつより詳細な浸水状況を表現することが可能となった。そして、過去気候および将来気候における洪水シミュレーションを実施し、将来気候において浸水が発生するエリアや浸水深等の洪水情報を抽出することが可能となり、将来への洪水被害リスクの軽減に資する知見が得られた。

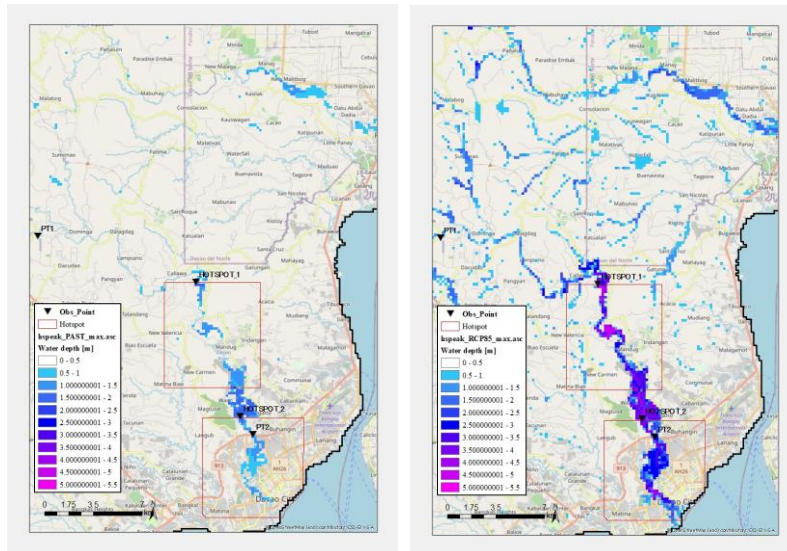


図 4.5-19 : WEB-RRI モデルによる流域スケールの過去気候と将来気候における最大浸水深。

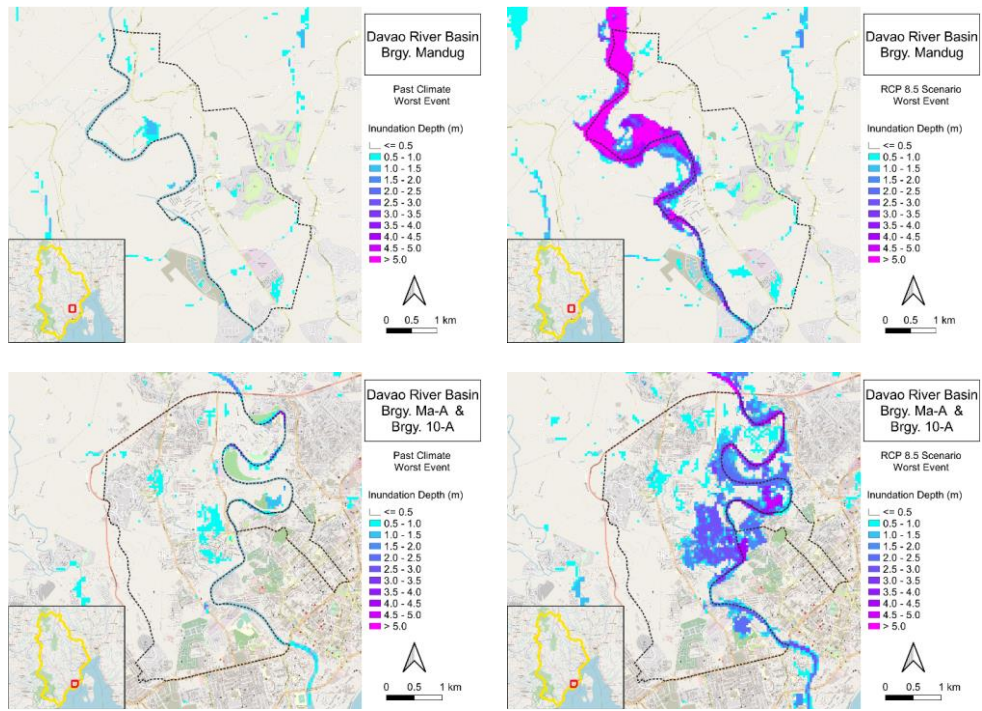


図 4.5-20 : RRI モデルによるバラングイスケールの過去気候と将来気候における最大浸水深。

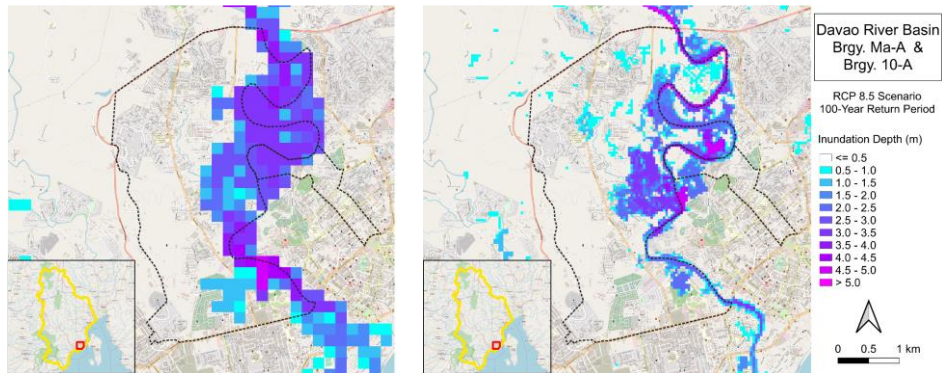


図 4.5-21 : 流域スケールモデル (左図) とバラングイスケール (右図) の最大浸水深。

(2) ソロ川流域を対象とした洪水被害リスクの推定

This research has developed a new model (Fig.4.5-22), Water and Energy Budget-based RRI (WEB-RRI), by integrating the hydro-SiB2 model with the RRI-model's 2-D flow equations to incorporate water and energy budget processes, land-vegetation-atmosphere interactions, multi-layer soil moisture dynamics, and 2-D lateral water flows to improve interception, ET, infiltration processes, runoff, and inundation processes. The use of the hydro-SiB2 model will also enable the WEB-RRI model to be used for drought assessment and to be coupled with atmospheric models for flow forecasting as well as the assessment of future climate change scenarios. For more details about model formulation, its structure, its major components, and model validation can be found in Rasmy et al., 2019. The model was applied for assessing the impact of climate change on water resources and hydrological extremes and to develop appropriate adaptation and mitigation strategies under the TOUGOU Framework.

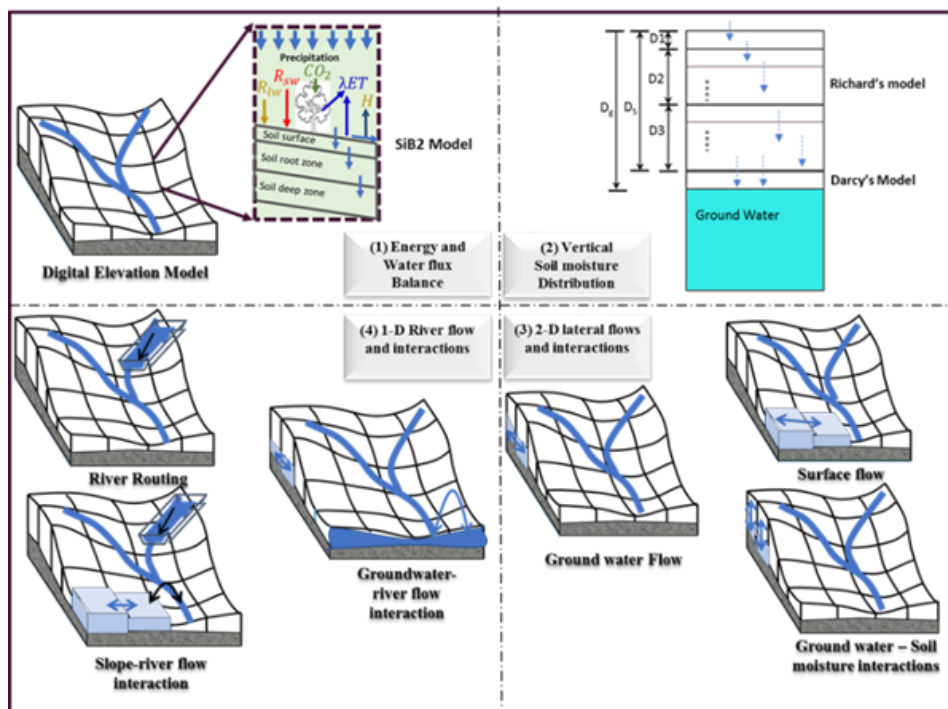


Fig. 4.5-22: Schematic diagram of the Water and Energy Balanced based Rainfall-Runoff-Inundation (WEB-RRI) model and its four major modules: (1) the SiB2 module for vertical energy and water flux transfer between land and atmosphere for each model grid, (2) the vertical soil moisture distribution module based on Richard's equation and Darcy's equations for groundwater recharge, (3) the 2-D diffusive wave lateral flow module for surface flow and groundwater flow, and (4) the 1-D diffusive wave river flow module

The Solo river basin (Fig. 4.5-23) is located in the Java island of the Indonesian and it is the longest river (~ 600 km) on this Island. The river originates in the hills of the south (i.e. mount Lawu and Sewu) and flows through two main provinces such as Central Java Province and East Java Province and finally discharges into the Java Sea at Surabaya. It has a catchment area of about 16000 km² and the annual average rainfall is about 2000 mm. The Wonogori dam is located upstream of the solo river with a capacity of 730 million m³ to store water for multipurpose activities. The basin plays an important role in agricultural production, particularly for rice farming and other cash crops (e.g. coffee). Brantas River Public Corporation or Perum Jasa Tirta I (PJT1) is responsible for managing the water resources of this basin mainly for irrigation, flood control, and hydropower generation. In recent 30 years, the agricultural developments in this basin have reached a significant level, however, very limited studies have been conducted in this basin in the past.

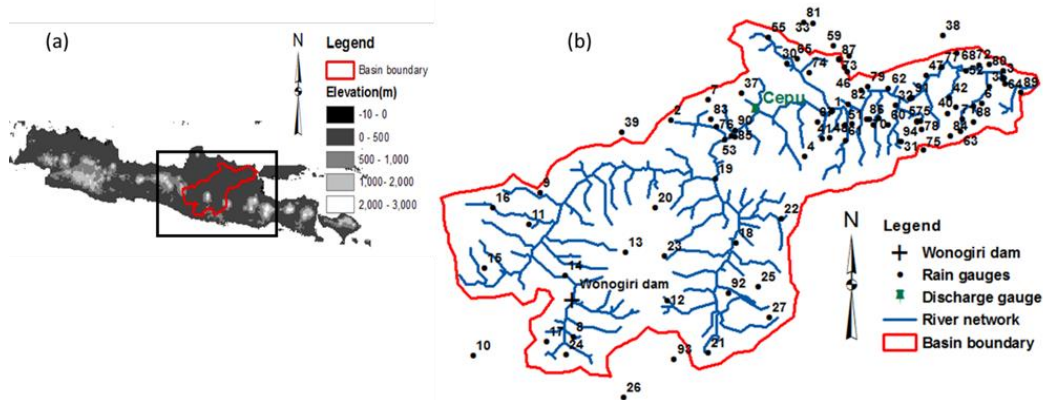


Fig. 4.5-23: Locations of the study area and gauges: (a) a map of Java Island of Indonesia with the demarcation of the Solo River basin boundary and (b) dam, daily rain gauges, and the Cepu discharge point

a) Model calibration and validation

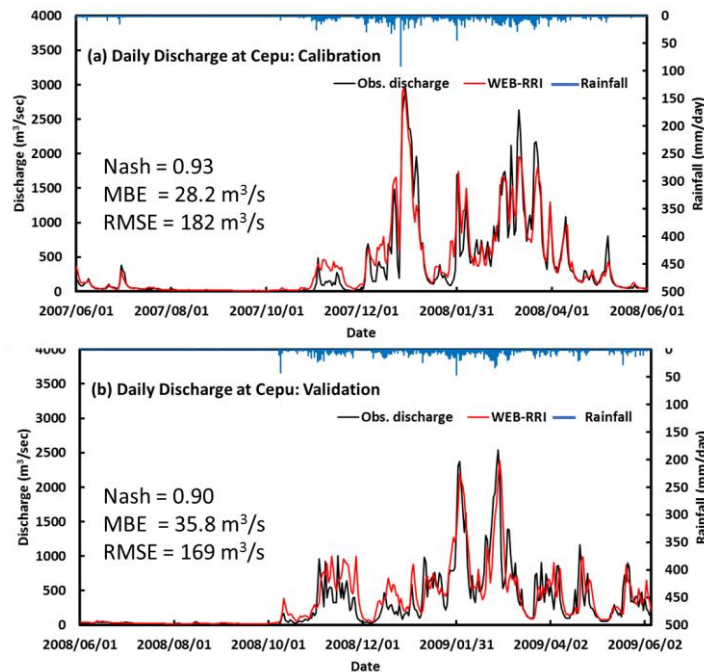


Fig. 4.5-24: Comparison between observed discharge and simulated discharge at the Putupaula gauging station: (a) model calibration for 2007-2008 and (b) model validation for 2008-2009

For the WEB-RRI model calibration, the model was set up to simulate the hydrological response of the basin from June 2007 to May 2008 that included a historical flood event. Fig. 4.5-24 compares the observed daily discharges with the WEB-RRI simulated daily discharges from June 1, 2007 to May 31, 2008, for model calibration and from June 1, 2008 to May 31, 2009, for model validation in the Solo River basin. The flow data from the Wonogiri dam was used as a boundary condition to simulate basin hydrological responses. In 2007, there were two flood peaks at the beginning of January and March during the calibration run. The model reproduced the hydrological responses of the basin satisfactorily, compared to the observed records at the Cepu station with Nash equal to 0.93, MBE equal to 28.2 m³/s, and RMSE equal to 169 m³/s. Particularly, the base flow during the dry period (June to October) and the peak flow during the wet period were well-calibrated in the model. For the validation of the soil and river parameters, the parameters were kept constant and the model was used to simulate the basin hydrological responses for

2008, and the results were compared with the observed river discharges at the same location. During the validation experiments, the results also showed very good agreement with the observed discharges (Nash = 0.90, MBE = 35.8 m³/s, and RMSE = 169 m³/s). In addition, the simulated peak discharges during the flooding periods and the low flows during the dry periods were well reproduced by the WEB-RRI model for validation experiments.

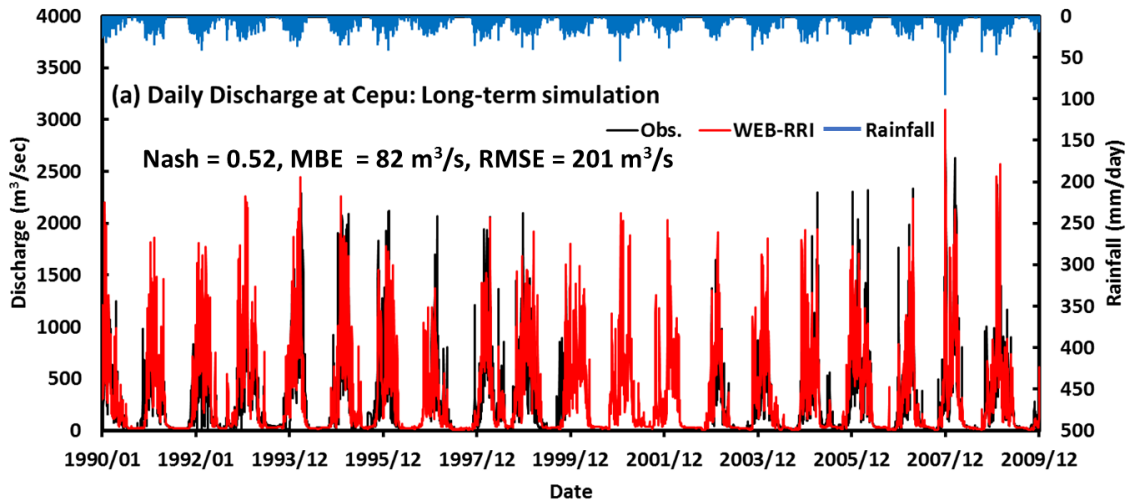


Fig. 4.5-25: Comparison between long-term observed discharges and simulated discharges from 1990 to 2009 (20 years) at the Cepu station in the Solo River basin

Furthermore, a long-term model validation experiment was conducted by simulating the hydrological responses of the Solo basin for about 20 years, and the simulated river discharges were compared with the observed discharges. Fig. 4.5-25 compares the model simulated discharges with the observed discharges at the Cepu gauging station from 1981 to 1999 for 20 years. As shown in Fig. 4.5-25, the model-simulated discharges matched the observed discharges during the simulation period, and the model performance indices were well estimated (i.e., Nash = 0.52, MBE = 82 m³/s, RMSE = 201 m³/s).

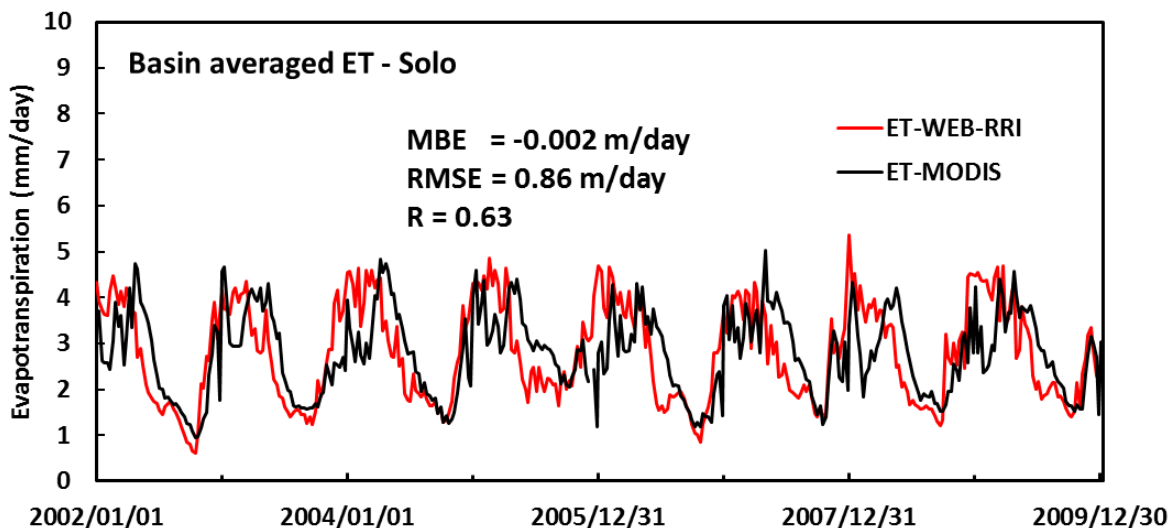


Fig. 4.5-26: Comparison between basin averaged 8-day WEB-RRI model simulated ET fluxes with 8-daily MODIS ET from 2002 to 2009 for the Solo River basin

The accurate estimation of the ET component of the water budget in DHM is crucial for simulating accurate soil water storages, flood peaks, low flows for drought estimation, and climate-change impacts based on global warming scenarios. To investigate the WEB-RRI performance in estimating the ET

component of the water budget, ET products from the MODIS were obtained and processed at a basin scale for the Solo basin. The SiB2 model is capable of calculating ET fluxes individually from four different ET components (i.e., soil evaporation, evaporation from ground intercepted water, evaporation from vegetation intercepted water, and transpiration from vegetation). This capability of individually simulating each ET component is a great advantage and provides an opportunity to investigate changes in land-use or irrigation practices under changing climate conditions in future WEB-RRI model application studies. To compare the MODIS-net ET estimates with the model-estimated ET fluxes, the arithmetic sum of all four ET components of the WEB-RRI model was calculated and averaged on an 8-day basis at a basin scale.

Fig. 4.5-26 compares the 8-day averaged model-simulated ET fluxes with the MODIS-observed 8-daily ET fluxes for 8 years (2002-2009). As shown in the figure, the MODIS fluctuates between ~0.5 mm/day to 5 mm/day, and the model-simulated ET fluxes and its trend agreed well with both MODIS estimated ET fluxes. The overall model performance indices for the ET fluxes agreed better with the MODIS data (i.e., MBE = 0.002 mm/day, and RMSE = 0.86 mm/day, R=0.63) for the whole period. A portion of the errors was also attributed to irrigation practices conducted for agricultural activities (paddy cultivation) in the middle to lower reaches during the dry period. In general, the model-simulated results confirmed that vegetation phenology and soil moisture dynamics were reliably incorporated within the model, and their effects were reasonably simulated in estimating the ET fluxes. Therefore, the WEB-RRI model has the potential to estimate ET fluxes reasonably well and could be improved further with improved model input data. These results further confirm that the WEB-RRI model can be implemented for estimating past, monitoring present or predicting future agricultural droughts as well as for land-use and climate-change impact assessment studies.

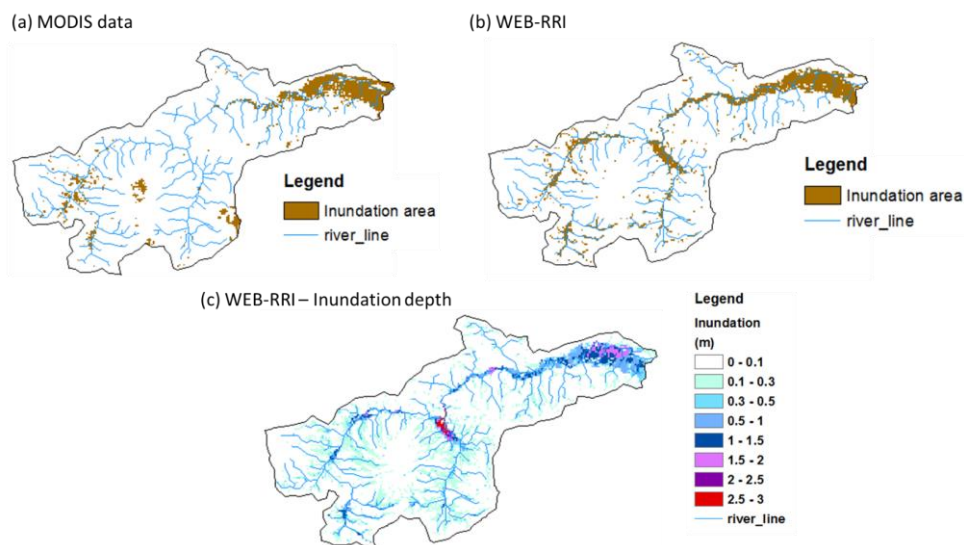


Fig. 4.5-27: Comparison of flood inundation extents for the 2007 flood event in the Solo River basin: a) MODIS data, b) WEB-RRI model-simulated inundation extents, and c) WEB-RRI model-simulated inundation depth (m)

A major flood event was reported from December 27, 2007 to January 6, 2008 and the MODIS surface reflectance data were used to estimate the flood inundation extents during this period and compared with the model-simulated flood extents. Fig. 4.5-27 shows the maps comparing flood inundation extents from MODIS data and the simulated maximum flood inundation extents from the WEB-RRI model for the 2007-2008 flood event in the Solo River basin, respectively. As plotted in Fig. 4.5-27 (a), most of the observed inundation area was located along the main river of the basin and downstream of the basin. Generally, the model-simulated inundation extents (Fig. 4.5-27 (b)) matched the inundation extents obtained from MODIS data.

b) Climate change simulation using MRI-3.2H downscaled data

The MRI 3.2H outputs of RCP2.6 and RCP8.5 emission scenarios . As same as previous, the output from MRI 3.2H model that was downscaled to 4 km was used to simulate the past and future status of the hydrological responses of the Solo River basin. The basin was assumed to have no dam (i.e. natural flow conditions) because of the unknown dam operation rule in the future climate and thus no boundary condition was provided.

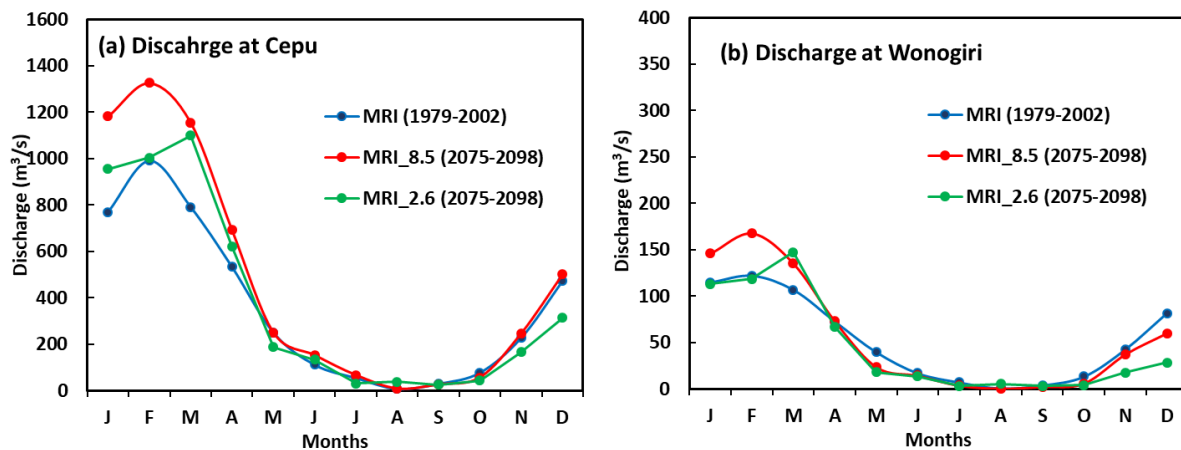


Fig. 4.5-28: The simulated monthly climatology of discharges for the past and future climates (a) at Cepu discharge location and (b) at the Wonogiri dam location

Monthly discharges in the historical and future climates under the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios were estimated, and changes in monthly discharge were investigated. Fig. 4.5-28 (a) and (b) show the monthly mean discharge for the historical and the future climate scenarios at the Cepu discharge location and the Wonogiri dam location. Table 4.5-5 shows the projected changes (%) in mean monthly discharge for each scenario at both locations. The results show that the Cepu location will experience an increase in river flow from January to April under both global warming scenarios. Especially, RCP8.5 projected higher discharges (~ 40% higher than those in the historical period) than RCP2.6 (~ 20% higher than those in the historical period) at the Cepu discharge location. The Cepu location is also predicted to experience a reduced flow during the September-October period, which is the dry season in the basin. During this period, RCP2.6 projects drier flow conditions (~ 30% lower than the flow in the historical period) than RCP8.5 (~ 30% lower than the flow in the historical period). RCP2.6 also projects lower flow conditions (~ 30%) during the November-December period, which is the onset of the rainy period in the basin, indicating the drier discharge climate in the future under RCP2.6. However, RCP8.5 projects a slightly wetter discharge climate (~7%) during that period. Overall, the annual climatological changes in discharge at the Cepu location under the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios are predicted to be positive with change rates ~ 6.9% and 31.2%, respectively.

Similarly, the results at the Wonogiri dam location show that the Wonogiri basin will experience a marginal annual flow increase (~ 7%) under the RCP8.5 scenario, and the decreased flow conditions (~ -13.5 %) under the RCP2.6 scenario due to less rainfall projection under the RCP scenario compared to the historical climate. As discussed in Section 4.1.2, the significant reduction in the rainfall amount over the Wonogiri sub-basin under the RCP2.6 scenario, particularly during November and December, is predicted to result in a significant reduction in dam inflow down to 60%, compared to the dam flow under the historical climate during these months. Moreover, as listed in Table 4.5-5, the river flow will also reduce in other months (except March and August) under the RCP2.6 climate. The Wonogiri basin will also experience a drier flow under the RCP8.5 scenario from May to December. Therefore, a significant reduction in the Wonogiri sub-basin inflow will adversely impact water availability for agriculture and power-generation activities and thus sustainable development of the basin.

Table 4.5-5: The rates of change in projected mean monthly discharge (%)

Location	RCP	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Cepu	2.6	24.0	1.3	38.8	16.5	-25.4	19.8	-44.1	391.1	-13.5	-44.1	-27.5	-33.6	6.9
	8.5	53.6	33.9	46.0	29.8	-0.2	36.6	20.8	7.3	-11.4	-27.3	8.1	6.0	31.2
Wonogiri	2.6	-1.6	-2.9	38.3	-8.2	-54.8	-19.5	-58.4	620.8	-17.8	-70.5	-58.7	-65.4	-13.5
	8.5	27.3	37.7	26.8	0.4	-40.5	-15.9	-49.1	-34.2	-40.9	-55.8	-12.6	-26.3	7.7

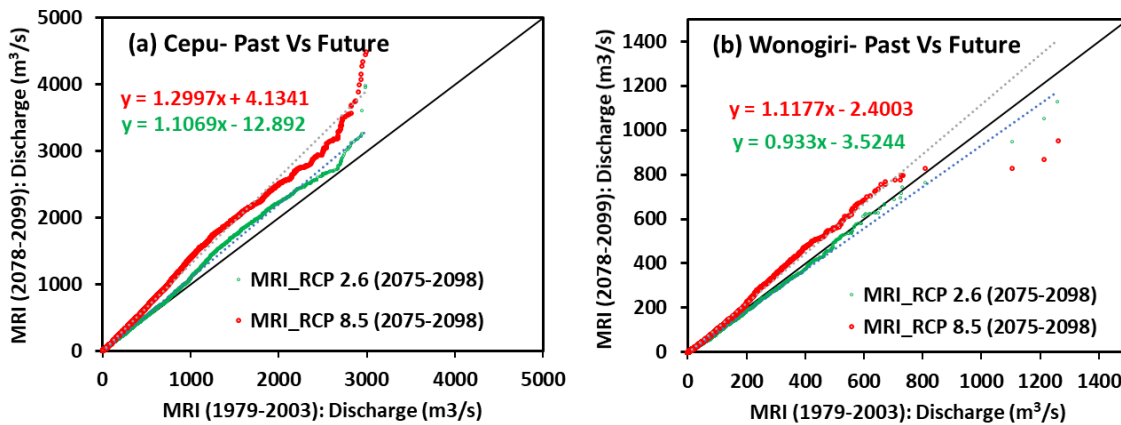


Fig. 4.5-29: Innovative trend analysis of future discharges under RCP 2.6 and RCP8.5 scenarios a) at the Cepu discharge location and b) at the Wonogiri discharge location

To investigate the effect of global warming on simulated daily discharges, including extremes, at the Cepu and Wonogiri discharge locations, daily averaged discharges were calculated for the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios, and trend analysis was performed using an innovative trend analysis method. The plot of the results from the innovative trend analysis method indicates no trend if the data points are laid on a 1:1 line, a positive trend if the data points exist in the top triangle, and a negative trend if the data points exist in the bottom triangle. As indicated in Fig. 4.5-29 (a), at the Cepu discharge location, both RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios show a positive trend in the future climate: the positive trend is clearly visible in a hydrological regime above ~ 1000 m³/s for RCP 2.6 and above ~ 100 m³/s for RCP8.5. The calculated slopes are ~ 1.1 and 1.3 for RCP2.6 and RCP8.5, respectively. The slopes of the trends become upward suddenly for the discharges higher than ~ 2700 m³/s for both scenarios, and the daily averaged extreme discharge will become 1.3 times higher than the historical extremes for RCP2.6 and 1.5 times higher than the historical extremes for RCP8.5, indicating that the flood intensity and frequency will be higher for both climate scenarios compared to the past climate. In addition, a larger increase is found under the RCP8.5 scenario. Fig. 4.5-29 (b) is the same plot as Fig. 4.5-29 (a), but for the Wonogiri dam outlet. Though the discharge at Wonogiri under RCP8.5 will increase (i.e., the slope is ~ 1.12), the discharge under RCP2.6 will decrease (i.e., the slope is ~ 0.93) in the future climate. It is also important to note that extreme discharges (three extreme discharge points are under the 1:1 line) under both scenarios will be less frequent at the Wonogiri dam location.

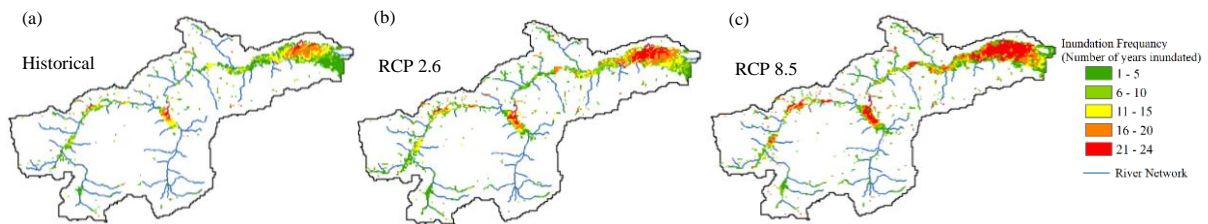


Fig. 4.5-30: Comparison in inundation frequency (the number of years with inundation events) during the study period: a) the historical climate period, b) the future climate under RCP2.6, and c) the future climate under RCP8.5

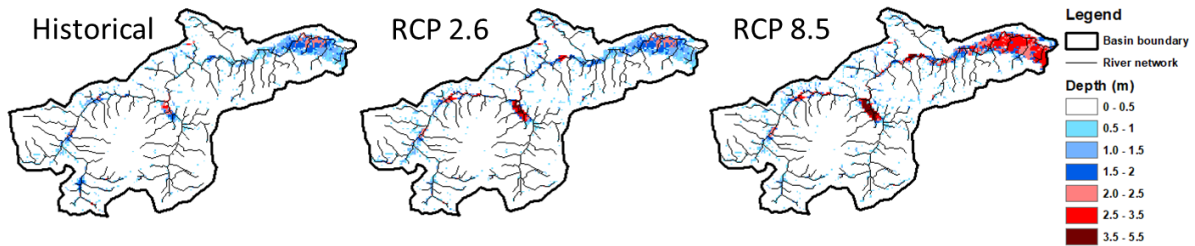


Fig. 4.5-31: Comparison in all-time maximum flood inundation extent in the Solo River basin during a) the historical period, b) the future climate under RCP2.6, and c) the future climate under RCP8.5

Fig. 4.5-30 shows inundation frequency (i.e., the number of years with inundation events) during the study historical period and the future climate period under the RCP 2.6 and 8.5 scenarios. The results reveal that flood events will frequently occur in the future under both climate RCP scenarios in most areas of the basin, particularly in its farthest downstream areas and areas immediately upstream of the confluence point of major tributaries located in the middle region of the basin. The results also show that the inundation frequency in the basin in the future is comparatively higher under the RCP8.5 scenario than under the RCP2.6 scenario.

To investigate the severity of the flooding condition in the basin under future climate, all-time maximum inundation depth at each grid cell was also estimated from the WEB-RRI simulated results corresponding to the historical as well as RCP 2.6 and RCP8.5 scenarios for future climates and plotted in Fig. 4.5-31. As shown in the figure, both global warming scenarios show increased inundation extents for all-time flood depth, indicating that it is likely that flood inundation area and flood risks will increase in the basin under both future climate scenarios. As expected based on the results of future changes in rainfall and discharge, the basin will experience higher inundation depths ($> 2\text{m}$) in more areas under the RCP8.5 scenario compared to the RCP2.6 scenario. The maximum inundation extents were estimated to be $\sim 160\text{ km}^2$ for the historical period, 320 km^2 for RCP2.6 (i.e., 2 times larger than for the historical period), and 966 km^2 for RCP8.5 (i.e., 6 times larger than for the historical period). In addition to the all-time maximum inundation depth, we also analyzed flood inundation areas (inundation depth $> 0.5\text{ m}$) with different levels of flood inundation depth and durations for a flood event in each year during both historical and future climate periods, as shown in Fig. 4.5-31. The figure shows that not only will flood depth be greater in future flood events, but also flood duration will be longer in the future under the climate change scenarios. The results show that larger areas will be inundated with greater flood depths and longer flood durations in future flood events under both RCP climate scenarios. Flood inundation depth and duration under the RCP 8.5 scenario will be greater and longer in more flood-prone areas in future floods, compared to those under the RCP 2.6 scenario. The results of this study conclude that the basin will experience frequent flooding with greater flood depths and longer flood durations, and the severity will increase as the global climate gets warmer. It should be noted that the WEB-RRI model simulation in this study did not take into account the influence of present flood control structures.

c) Assessment of flood damage in Solo River basin of Indonesia

Floods are the most frequently occurring water-related disasters in many countries, which can cause serious damage to physical properties and loss of lives. Recently, the risk of flood disaster has been increasing by rapid development and urbanization activities, which is expected to increase more in the future by climate change impact. Previous studies have also reported changes in precipitation pattern and intensity, and also changes in river runoff due to climate change. The flood impact on different sectors in the flood-prone areas can be more serious in the future because of extreme weather events due to climate change. It is thus essential to understand flood impact on different sectors under climate change scenarios for establishing disaster risk reduction activities and adaptation measures. The quantification of flood damage considering climate change impact is also crucial for managing flood risk in the future.

In this context, this study focused on quantitative assessment of flood damage to agricultural crops and residential households (building and assets) under climate change scenarios using MRI-AGCM3.2S and MRI-AGCM3.2H climate model outputs for the Solo River basin in Indonesia (Fig. 4.5-32a). Flood damage assessment method for agricultural crops (rice crops) and residential households was developed by integrating hydrologic-hydraulic model outputs and flood damage estimation model. Flood characteristics such as flood depth, duration and extent areas were calculated using the water and energy budget-based rainfall-runoff-inundation model (WEB-RRI model) developed by Rasmy et al. (2019). The values of WEB-RRI model parameters were calibrated and validated by comparing the calculated discharge with observed discharge for past floods. The calculated flood extent areas were also compared with observed satellite-based flood extent areas for the past flood. Then, WEB-RRI model was run using MRI-AGCM3.2S and MRI-AGCM3.2H climate model outputs for historical climate (1979–2002) and future climate (2075–2098) periods, which were dynamically downscaled to 5 km domain using weather research forecasting model and statistically corrected the bias using long-term ground-observed rainfall data. The details of WEB-RRI model calibration and validation and WEB-RRI model simulation for climate change scenarios can be found in the past annual reports (i.e., fiscal years 2019 and 2020) and in the previous section of this report. The downscaling and bias correction of MRI-AGCM climate model outputs can also be found in past annual report (i.e., fiscal year 2020) and in the previous section of this report. To estimate flood damage quantitatively, a grid-based approach was developed by integrating WEB-RRI model outputs, exposed elements, and flood damage functions. To assess flood damage, paddy fields in the study area were extracted from the land cover map produced by the Ministry of Environment and Forest, Indonesia (Fig. 4.5-32b) and the number of distributed houses were estimated based on the LandScan 2013 global population data and the average household size (Fig. 4.5-32c). The flood damage to households was also estimated using the projected population for the future. The flood damage curves for rice crops presented in Shrestha et al. (2016) and for residential areas presented in Budiyo et al. (2016) were applied to quantify the damage. The damage assessment method was validated by comparing the calculated damage with reported data for past floods, and after validation of damage assessment method, flood damage to agricultural crops and residential households was assessed for historical and future climate periods under climate change scenarios using MRI-AGCM3.2S and MRI-AGCM3.2H climate model outputs.

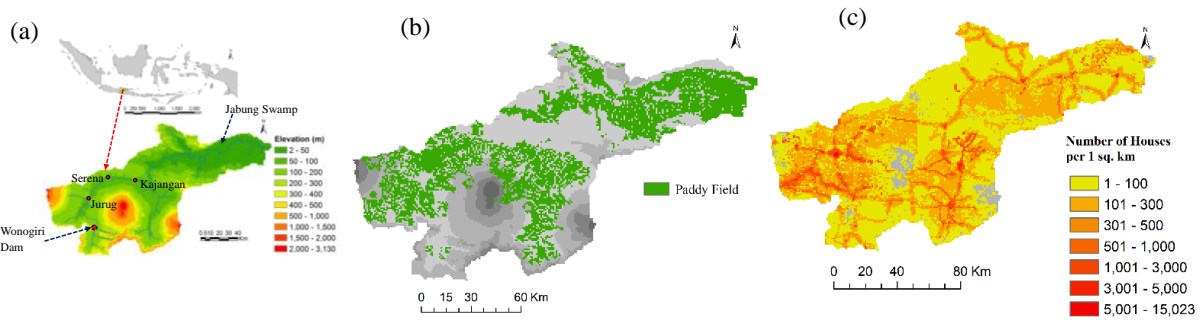


Fig. 4.5-32: (a) Location of study area and topographical distribution, (b) Extracted paddy areas using 2010 Land Cover map produced by the Ministry of Environment and Forest, Indonesia (<https://geoportal.menlhk.go.id/webgis/index.php/en/>), and (c) Estimated number of houses using LandScan 2013 global population data produced by Oak Ridge National Laboratory (<https://landscan.ornl.gov/>).

Fig. 4.5-33 shows the calculated maximum flood inundation depth and estimated values of the rice crop and household (building and assets) damage during 2007 flood event. The results show that flood damage was more serious in agricultural and residential areas located in the farthest downstream areas of the basin and areas immediately upstream of the confluence of the Madiun River, where the flood depth and duration were greater and longer. Table 4.5-6 compares the calculated results of agricultural crops and household damage with reported data, and it was found that calculated damage values were reasonably agreeable with reported data.

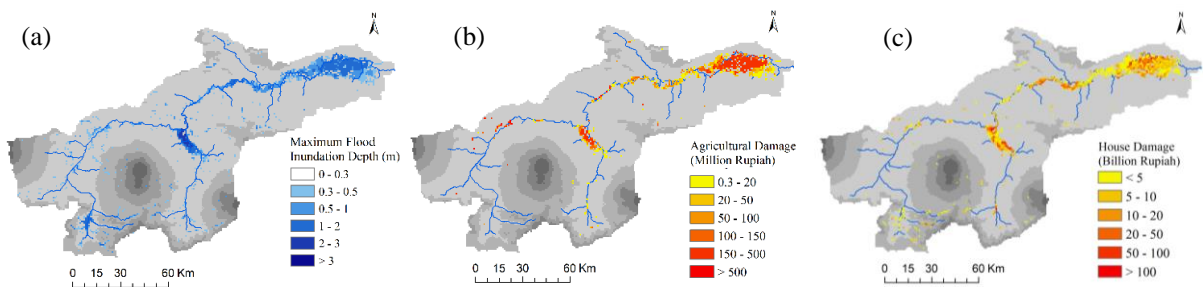


Fig. 4.5-33: Calculated results for 2007 flood event: (a) maximum flood inundation depth, (b) rice crop damage, and (c) household (building and assets) damage.

Table 4.5-6: Comparison of calculated results of flood damage to rice crop and household with reported data.

	Agricultural Damage		House Damage	
	Value of rice crop damage (bil. Rp)	Damage rice crop area (ha)	Houses Inundated (number)	Affected Population (number)
Calculated	89.1	73,324	172,535	638,392
Reported	93.3 ^a	60,630 ^b	165,117 ^c	898,000 ^d

^a Hidayat F, Sungguh H M, Harianto. 2008. Impact of climate change on floods in Bengawan Solo and Brantas River Basins, Indonesia. Proceeding of the 11th International Riversymposium September 1-4, 2008 Brisbane, Australia.
^b Directorate of Food Crop Protection (DFCP), Indonesia. 2010. Indonesia broad flood damage in rice plant: Solo River Basin. Flood Damage Data Published by the Directorate of Food Crop Protection.
^c Directorate General of Water Resources (DGWR) (2013). River management in Indonesia. DGWR.
^d Valiant R. (2008). Background paper on the Bengawan Solo River Basin. The 3rd General Meeting of NARBO.

Fig. 4.5-34 compares the calculated results of the annual average of damage agricultural area and damage value of rice crop loss between past climate period and future climate period (using MRI-AGCM3.2S climate model outputs) with different scenarios of growth stage of rice crops. Fig. 4.5-35 shows the spatial distribution of estimated average annual damage value of rice crop for past and future climate periods if flooding occurred/will occur during the maturity stage of the rice crops. The calculation

for the future period is based on the current condition, and flood damage for a future period was calculated by only considering climate change impact. The results show that the average annual flood damage to rice crops for future climate period is about two times higher than that for the past climate period, and rice crop damage can be more serious in the future due to climate change. Fig. 4.5-36 compares the calculated flood inundation areas and estimated rice crop damage between the worst cases from the past climate period (1979–2002) and future climate period (2075–2098). The comparison of worst cases shows that the flood damage to rice crops in the future climate period in the case of worst scenarios is 1.1 times higher than the past climate period.

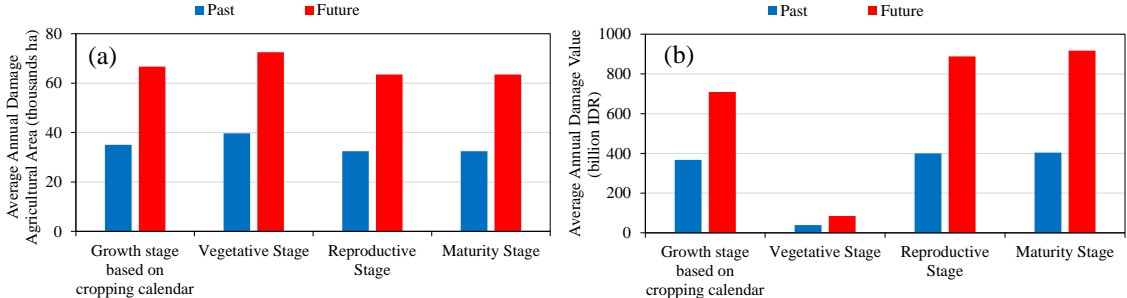


Fig. 4.5-34: Calculated average annual damage (a) agricultural area and (b) value of rice crop loss for historical (past) and future periods using MRI-AGCM3.2S outputs (average annual damage: average of study period (Past: 1979–2002), (Future: 2075–2098)).

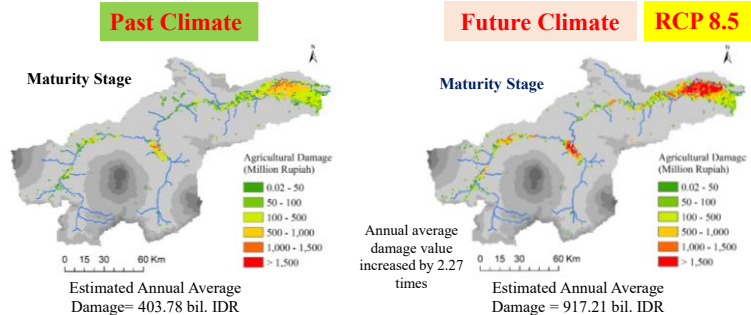


Fig. 4.5-35: Spatial distribution of calculated average annual agricultural damage (rice crops damage) for past and future climate periods using MRI-AGCM3.2S outputs (For case: if flooding occurred/will occur during the maturity stage of the rice crops).

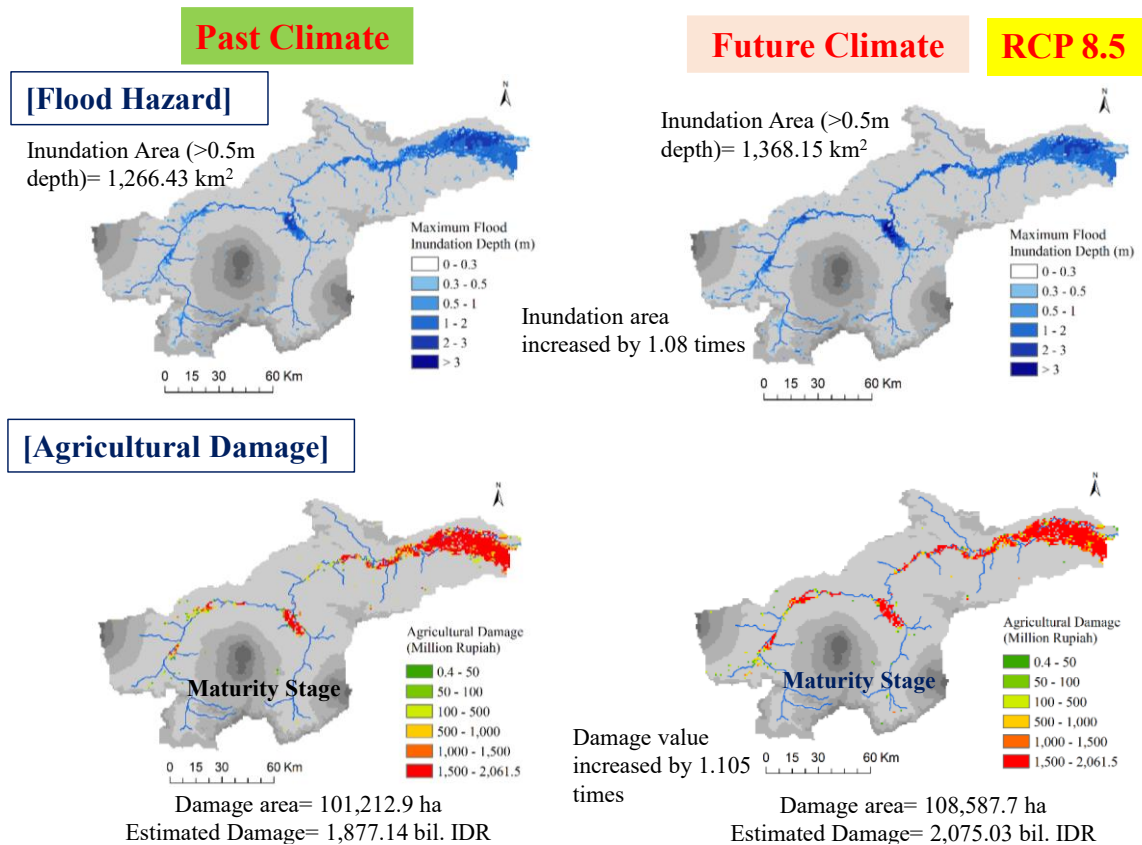


Fig. 4.5-36: Comparison of calculated flood inundation areas and estimated rice crop damage between the worst cases from the past climate period (1979–2002) and future climate period (2075–2098) (using MRI-AGCM3.2S climate model outputs).

Fig. 4.5-37 compares the calculated results of the annual average of damage agricultural area and damage value of rice crop loss between past climate period and future climate period (using MRI-AGCM3.2H climate model outputs). The results show that flood damage to rice crops under RCP 8.5 scenario will be more serious in the future than RCP 2.6 scenario.

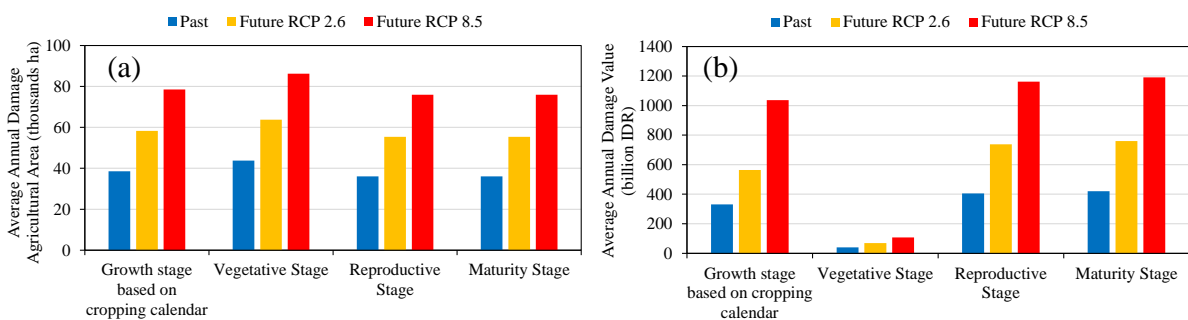


Fig. 4.5-37: Calculated average annual damage (a) agricultural area and (b) value of rice crop loss for historical (past) and future periods using MRI-AGCM3.2H outputs (average annual damage: average of study period (Past: 1979–2002), (Future: 2075–2098)).

Fig. 4.5-38 compares the calculated flood inundation areas and estimated rice crop damage between the worst cases from the past and future climate periods using MRI-AGCM3.2H climate model outputs. The comparison of worst cases shows that the flood damage to rice crops in the future climate period in the case of worst scenarios is 1.11 times higher than the past climate period under RCP 2.6 scenario, while it is 1.66 times higher under RCP 8.5 scenario.

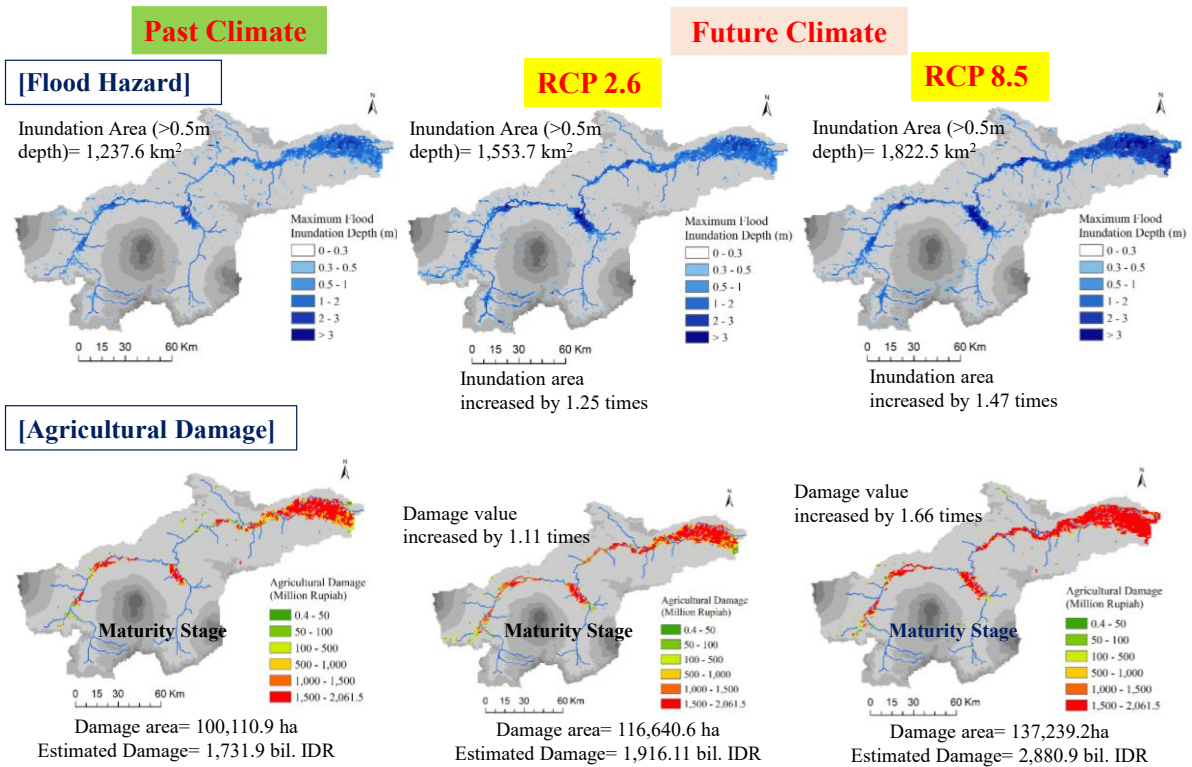


Fig. 4.5-38: Comparison of calculated flood inundation areas and estimated rice crop damage between the worst cases from the past climate period (1979–2002) and future climate period (2075–2098) (using MRI-AGCM3.2H climate model outputs).

Fig. 4.5-39 shows the calculated results of the annual average of household damage value and number of inundated houses for past and future climate periods (using MRI-AGCM3.2S climate model outputs) and percentage increase in damage household value and inundated house number in the future. The estimated flood damage to households were also based on current conditions. The estimated value of household damage for future climate period is comparatively higher (about twice) than that in the past climate period. The results of household damage show that flood damage to residential areas will also be more serious in the future due to climate change impact. Fig. 4.5-40 compares the calculated household damage between the worst cases from the past climate period (1979–2002) and future climate period (2075–2098), and the comparison of worst cases shows that the flood damage to households in the future climate period in the case of worst scenarios is 1.16 times higher than the past climate period.

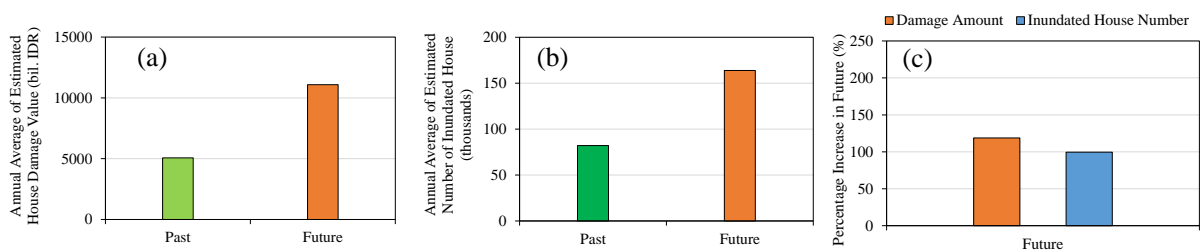


Fig. 4.5-39: Calculated results of the annual average of the estimated value of household damage (a) and the estimated number of inundated houses (b) for the past and future climate periods, and percentage increase in the future (c) (using MRI-AGCM3.2S climate model outputs) (houses estimated based on LandScan 2013 global population).

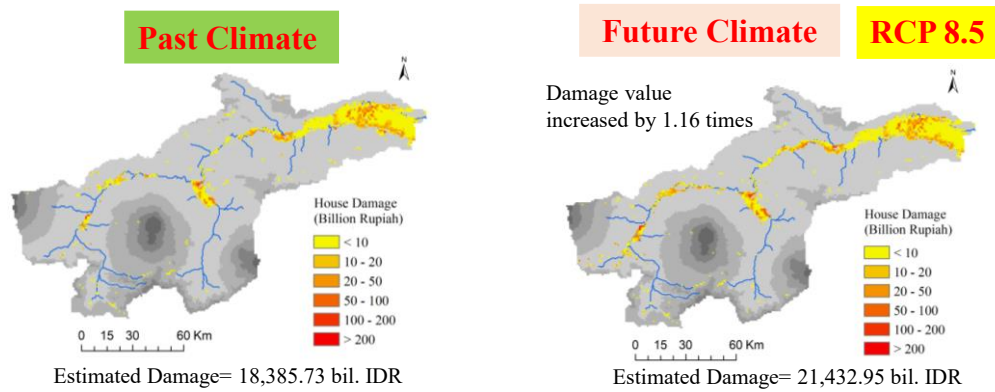


Fig. 4.5-40: Comparison of calculated household damage between the worst cases from the past climate period (1979–2002) and future climate period (2075–2098) (using MRI-AGCM3.2S climate model outputs) (houses estimated based on LandScan 2013 global population).

Fig. 4.5-41 compares the calculated results of the annual average of household damage value and number of inundated houses for past and future climate periods (using MRI-AGCM3.2H climate model outputs) and percentage increase in damage household value and inundated house number in the future. The results of house damage estimation show that flood damage to residential households under RCP 8.5 scenario will also be more serious in the future than RCP 2.6 scenario.

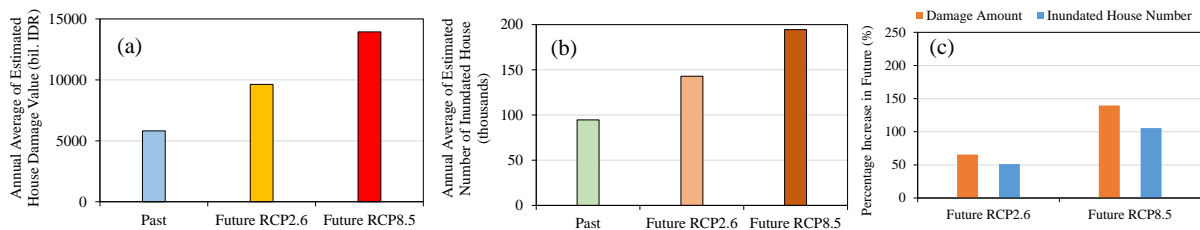


Fig. 4.5-41: Calculated results of the annual average of the estimated value of household damage (a) and the estimated number of inundated houses (b) for the past and future climate periods, and percentage increase in the future (c) (using MRI-AGCM3.2H climate model outputs) (houses estimated based on 2013 LandScan population).

Fig. 4.5-42 compares the calculated household damage between the worst cases from the past and future climate periods using MRI-AGCM3.2H climate model outputs, and the comparison of worst cases shows that the flood damage to households in the future climate period in the case of worst scenarios is 1.46 times higher than the past climate period under RCP 2.6 scenario, while it is 1.96 times higher under RCP 8.5 scenario.

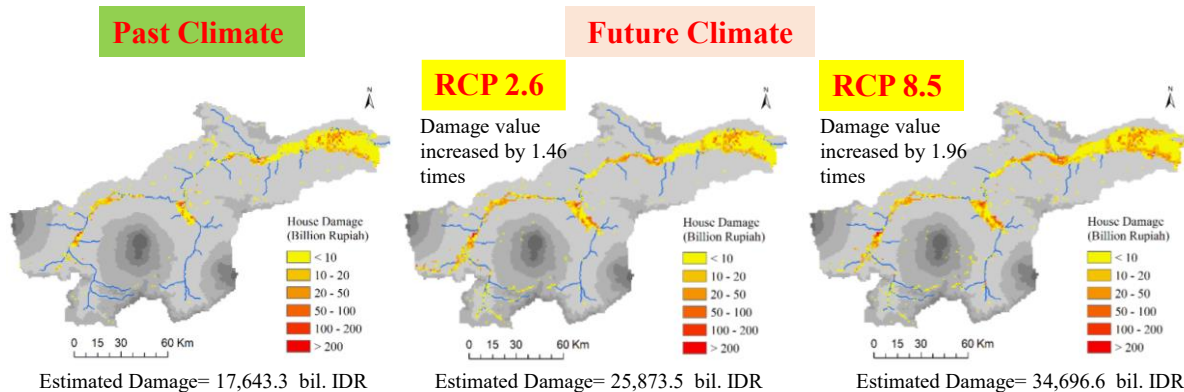


Fig. 4.5-42: Comparison of calculated household damage between the worst cases from the past climate period (1979–2002) and future climate period (2075–2098) (using MRI-AGCM3.2H climate model outputs) (houses estimated based on LandScan 2013 global population).

The findings show that the flood inundation areas and flood damage to agriculture and residential sectors will increase more in the future due to climate change impact. The quantitative estimation of flood damage to rice crops and households in this study under climate change scenarios can be useful information for planners, developers, policy makers and decision-makers to establish policies required for flood damage risk reduction and adaptation measures in the study basin. Identifying areas of risk based on the quantification of flood damage also provides essential information for designing future development activities in the areas. The presented quantitative flood damage assessment framework for agricultural crops and residential households in this study can be applied in other areas and in data-scarce river basins, and can also be applied to quantify damage in terms of economic loss.

(3) ソロ川流域を対象とした渇水被害リスクの推定

a) 渇水被害リスクの推定方法

インドネシア国ソロ川流域を対象に、過去気候（1979年11月 - 2002年9月）および将来気候（2075年11月 - 2098年10月）におけるダム流入量、貯水量、放流量、灌漑可能面積を算出し、気候変動に伴うソロ川流域の渇水被害リスクについて推定した。ソロ川は流域面積約 16,100 km²、流路延長約 600 km で、インドネシア国のジャワ島最大の河川である（図 4.5-43）。ソロ川流域は熱帯モンスーン帯に属し、11月から4月までの雨季と5月から10月までの乾季に分かれる。ソロ川流域の上流部には Wonogiri（ウォノギリ）ダムが位置する。Wonogiri ダムは、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 24,492 ha（2010 - 2014 年の実績）の農地に灌漑用水を供給している。

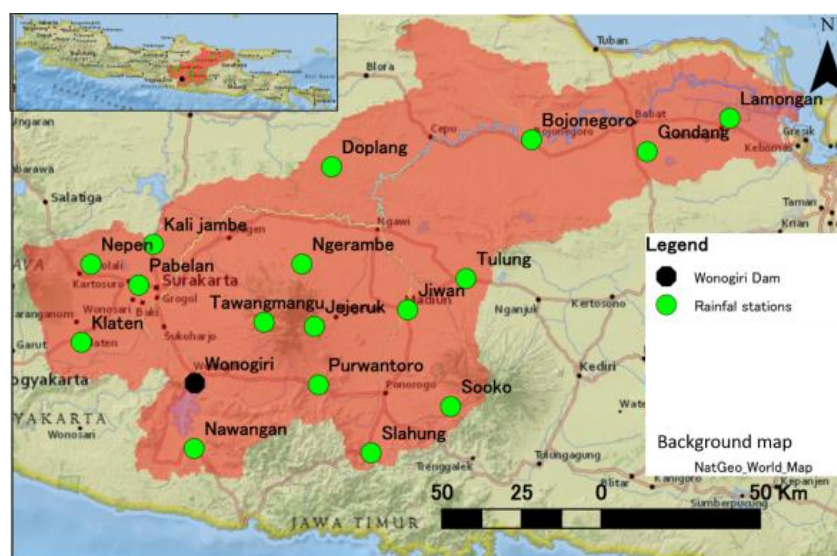


図 4.5-43 : インドネシア国ソロ川流域

ソロ川流域の渇水被害リスクを推定するにあたり、4.7.2.1 章の通り、全球気候モデルの出力値を活用し、気候データを作成した。用いたデータは、20 km 解像度の超高解像度大気大循環モデルである MRI-AGCM3.2S ならびに 60 km 解像度の高解像度大気大循環モデルである MRI-AGCM3.2H のデータである。MRI-AGCM3.2S については温室効果ガス排出シナリオとして、RCP8.5 を採用した。また、MRI-AGCM3.2H については、温室効果ガス排出シナリオとして、RCP8.5 および RCP2.6 を採用した。これらのデータについて、力学的ダウンスケーリングとバイアス補正を行い、5 km 解像度の気候データを作成した。

次に、4.7.2.2 章の通り、気候データをもとに WEB-RRI モデルを用いて流出解析を行い、過去気候と将来気候における貯水池流入量を予測した。さらに、貯水池流入量と貯水池からの放流可能量との差分を積分し、貯水量の変化を求めた。放流可能量は、貯水池に貯留があり、放流可能な期間については計画放流量と同量とし、貯留がなく、放流が不可能な期間についてはゼロとし

た。また、計画放流量は、Wonogiri ダム貯水池運用規則で定められている各月の灌漑用水供給量と下流河川の維持流量との合計値とした。ここで、渇水リスクを評価するため、水充足率を導入した。水充足率とは、計画放流量に対する放流可能量の割合と定義する。水充足率は、半月単位で計算し、1年当たり3期間設定されている各作付け期間で平均した。さらに、水充足率に比例して灌漑可能面積が変化すると仮定し、灌漑可能面積から渇水被害リスクを予測した。なお、渇水被害リスクの予測に当たり、以下を仮定した。

- 将来気候における灌漑に必要な水量は、過去気候における水量に対し、将来気候と過去気候の蒸発散量の差分を灌漑面積全体で積分した水量を加えて求めるものとした。
- 灌漑可能面積は、水充足率、つまり、計画放流量に対する放流可能量の割合に比例するとした。
- 単位面積あたりのコメ収穫量は、過去気候と将来気候で同一とした。
- 貯水池および灌漑施設は将来にわたり良好に維持管理され、各施設の機能が将来にわたり維持されるとした。

b) 渇水被害リスクの推定結果

過去気候と将来気候における、Wonogiri ダム年平均流入量を比較する(図 4.5-44)。3.2S / RCP8.5 および 3.2H / RCP8.5 では将来、Wonogiri ダム上流域の年平均降水量が増加すると見込まれることから、年平均流入量も将来、増加する結果となった。一方、3.2H / RCP2.6 では将来、Wonogiri ダム上流域の年平均降水量が減少すると見込まれることから、年平均流入量も将来、減少する結果となった。3.2H / RCP2.6 のケースで Wonogiri ダム上流域の降水量が減少する理由としては、将来風の吹き方が変わるため、ジャワ島付近の風の収束が弱まることが考えられる。ジャワ島付近の降水は、ジャワ島の北側からと南側からの風の収束によって雨域が形成されるが、特にインド洋からの南風が弱まるため、ジャワ島南部で降水量が減少するものと考えられる。

次に、半月ごとの流入量を比較する(図 4.5-45)。3.2S / RCP8.5 では将来、乾期のうち8月～10月には減少するものの、雨期を中心に流入量が大きく増加することから、年平均でも大きく増加すると推定された。3.2H / RCP8.5 では将来、11月、12月を中心に流入量が減少する一方、雨期の1月から3月にかけて流入量が大きく増加することから、年平均でも若干増加すると推定された。3.2H / RCP2.6 では将来、11月、12月を中心に流入量が大きく減少する一方、雨期の流入量の増加は3月前半から4月前半に限られることから、年平均では減少すると推定された。

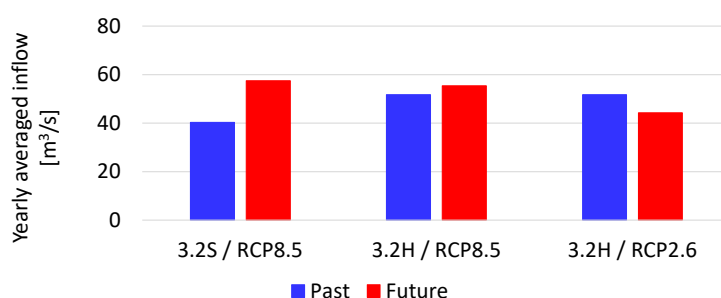


図 4.5-44 : Wonogiri ダム年平均流入量の比較 (過去気候、将来気候)

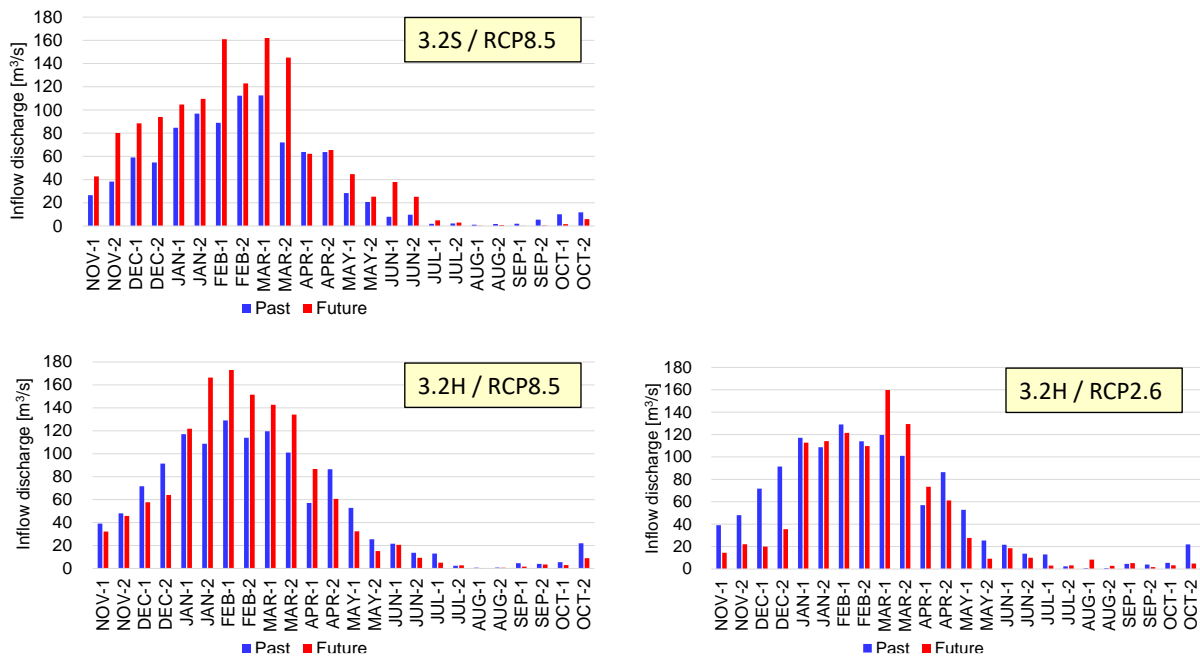


図 4.5-45 : Wonogiri ダム半月平均流入量の比較 (過去気候、将来気候)

Wonogiri ダムへの流入量、Wonogiri ダムからの放流可能量、Wonogiri ダムの貯水量を半月単位で計算し、過去気候と将来気候における年間の水充足率を比較する (図 4.5-46)。3.2S / RCP8.5 では将来、年平均流入量が大きく増加することから、水充足率も 79.29 % (過去) から 90.61 % (将来) へと大きく増加した。3.2H / RCP8.5 では将来、年平均流入量が若干増加することから、水充足率も 89.88 % (過去) から 92.93 % (将来) へと若干増加した。3.2H / RCP2.6 では将来、年平均流入量が減少することから、水充足率も 89.88 % (過去) から 81.84 % (将来) へと減少した。3.2H / RCP8.5 では将来、11 月、12 月を中心に流入量が大きく減少する一方、雨期の増加は 3 月前半から 4 月前半に限られることから、年平均では減少する結果となった。以上より、RCP8.5 の排出シナリオでは将来、水充足率が向上する一方、RCP2.6 の排出シナリオでは、水充足率が低下するという対称的な推定結果が得られた。

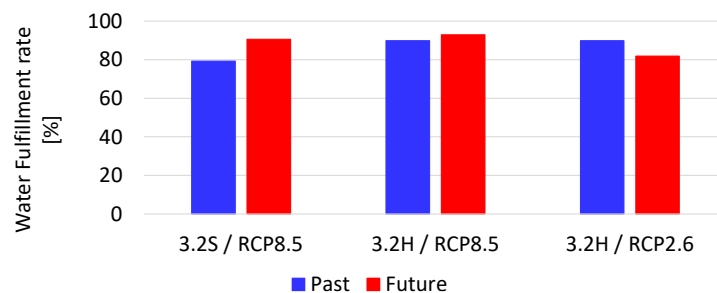


図 4.5-46 : Wonogiri ダム下流取水地点における水充足率の比較 (過去気候、将来気候)

Wonogiri ダム下流の灌漑区域では、11 月から 2 月までを I 期 (MT1)、3 月から 6 月までを II 期 (MT2)、7 月から 10 月を III 期 (MT3) とし、年間を通じて水稻を作付している。なお、水源が確保できない年については、III 期にキャサパ、コーンなどの裏作作物を作付けしている。過去気候、将来気候における年別、期別の水充足率を元に、作付け可能な面積を推定した結果を図 4.5-47 に示す。なお、当該区域の水田の灌漑面積は、最大で 24,492 ha (2010 - 2015 各年の計画値) である。作付け可能面積は、過去気候では II 期、I 期、III 期の順で広い結果となる。将来気候では、3.2S / RCP8.5 および 3.2H / RCP2.6 のケースで、II 期、I 期、III 期の順で広い結果となる一方、3.2H / RCP8.5 のケースでは、II 期、III 期、I 期の順で広い結果となった。II 期の作付け可能面積が広い理由は、雨期にダムに貯留した水を十分活用できるためと考えられる。I 期における作付け可能面積の欠損は、11 月、12 月に貯水池への流入が十分回復せず、作付けを開始できる

面積が限られたことによると考えられる。Ⅲ期における作付け可能面積の欠損は、当該期は元々乾期作であり、Ⅲ期初頭にダムに貯留されている水量に応じて作付面積が抑制された結果と考えられる。将来気候における作付け可能面積の推定値は、3.2S / RCP8.5 および 3.2H / RCP8.5 のケースで過去気候における推定値を上回る一方、3.2H / RCP2.6 のケースでは過去気候における推定値を下回る結果となった。3.2S / RCP8.5 および 3.2H / RCP8.5 のケースでは、8月から10月にかけて貯水池への流入量が減少するにもかかわらず、ダムの貯留効果により将来、灌漑可能面積の増大が予測される結果となった。

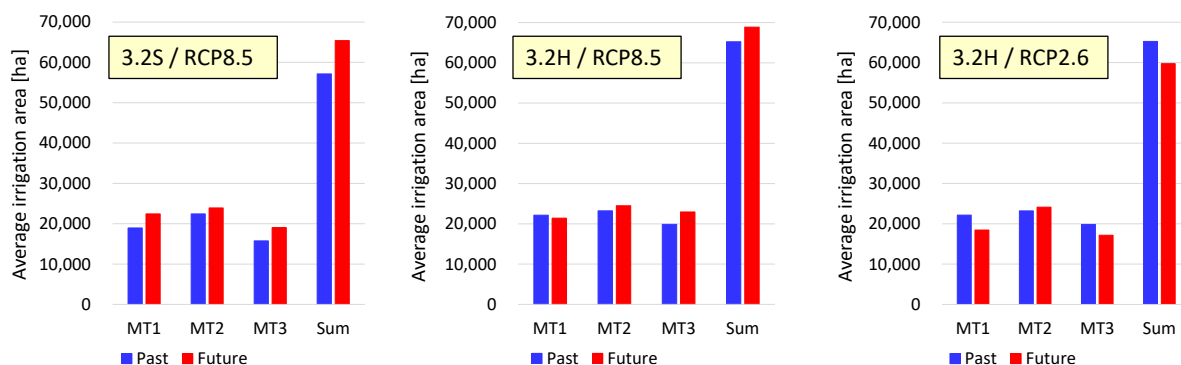


図 4.5-47 : Wonogiri ダム下流灌漑区域における灌漑可能面積の比較 (Ⅰ期、Ⅱ期、Ⅲ期、通年)

過去気候、将来気候におけるコメ出荷額を予測した結果を、図 4.5-48 に示す。ここで、単位面積あたりのコメ生産高は、Wonogiri ダム下流の灌漑区域の位置する 5 県 (Kab. Klaten、Kab. Sukoharjo、Kab. Wonogiri、Kab. Karanganyar、Kab. Sragen) における 2010 年 - 2014 年の実績値の平均より、1 ヘクタールあたり 5.865 トンとした。また、単位重量あたりのコメ価格は、農場出口で取引されるモミの形状のコメの取引価格で、インドネシア全土における 2015 年各月の価格の平均値より、1 トンあたり 4.70 百万ルピアを採用した。Wonogiri ダム下流の灌漑区域におけるコメ出荷額は、例えば 3.2S / RCP8.5 のケースでは、過去気候で 1.58 兆ルピアと予測されるのに対し、将来気候で 1.80 兆ルピアと予測され、渇水被害リスクは将来、低減するものと推定された。また、3.2H / RCP8.5 のケースでも、コメ出荷額は将来増大し、渇水リスクは低減すると推定された。一方、3.2H / RCP2.6 のケースでは、過去気候で 1.80 兆ルピアと予測されるのに対し、将来気候では、1.65 兆ルピアと予測され、渇水被害リスクは将来、増大するものと推定された。

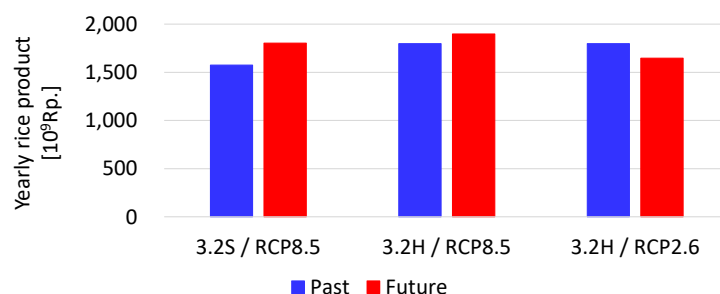


図 4.5-48 : Wonogiri ダム下流灌漑区域における年間コメ出荷額の比較 (過去気候、将来気候)

(ア) 社会経済への影響

前述の通り、Wonogiri ダム下流の灌漑区域におけるコメ出荷額は、3.2S / RCP8.5 および 3.2H / RCP8.5 のケースで増大する一方、3.2H / RCP2.6 のケースでは減少すると推定された。ここでは、当該地域のコメ出荷額の変化が社会経済に及ぼす影響について試算する。ここで、試算には産業連関表を用いた。産業連関表とは、ある地域において、一定期間 (通常 1 年間) に、産業 (企業)、政府、家計などの経済主体が行った財貨 (モノ)、サービスに関する取引を行列形式でまとめた表である。インドネシア国中部ジャワ州では、同州統計局により産業連関表が作成され、2021 年 12 月時点では、1988 年、1993 年、2004 年、2008 年、2013 年の産業連関表が Web で入手可能である。

2013年版産業連関表を用いて、コメ生産額の増減が中部ジャワ州内の社会経済に及ぼす効果を試算し、表 4.5-7 にまとめた。例えば、3.2S / RCP8.5 のケースでは、コメ生産量の増加に伴う直接効果が 2,271 億ルピア生じるとともに、他産業の生産誘発効果が 571 億ルピア生じ、合計 2,841 億ルピアの経済効果が生じると試算された。また、3.2H / RCP8.5 のケースにおいても、合計 1,251 億ルピアの経済効果が生じると試算された。一方、3.2H / RCP2.6 のケースでは、コメ生産量の減少に伴う直接効果がマイナス 1,517 億ルピア生じるとともに、他産業の生産誘発効果がマイナス 381 億ルピア生じ、合計マイナス 1,898 億ルピアの経済効果が生じると試算された。経済効果の合計のうち、付加価値の増分が占める割合は、各産業を加重平均すると 72.9% である。入手したデータからは発生した付加価値のうち消費に転換される割合が不明で、付加価値の変化がもたらす生産誘発効果は試算できないものの、消費に転換される割合を一定値に仮定して試算すると、経済効果がさらに拡大すると考えられる。

表 4.5-7：コメ生産量の増減に伴う経済効果（単位：百万ルピア）

	直接効果	1次生産誘発額	合計	付加価値の増分
AGCM3.2S / RCP8.5	227,079	57,052	284,131	207,005
AGCM3.2H / RCP8.5	99,971	25,117	125,088	91,133
AGCM3.2H / RCP2.6	-151,689	-38,111	-189,800	-138,279

次に、コメの生産額の増減がもたらす生産誘発効果を産業別に試算する（図 4.5-49）。試算に用いた産業分類は、コメ生産をはじめとする 19 分類である。コメの生産は、商業、交通、通信、金融、不動産などのサービス部門の生産を誘発する一方、コメ以外の品目の農産物の生産を誘発する効果は微少であることがわかった。

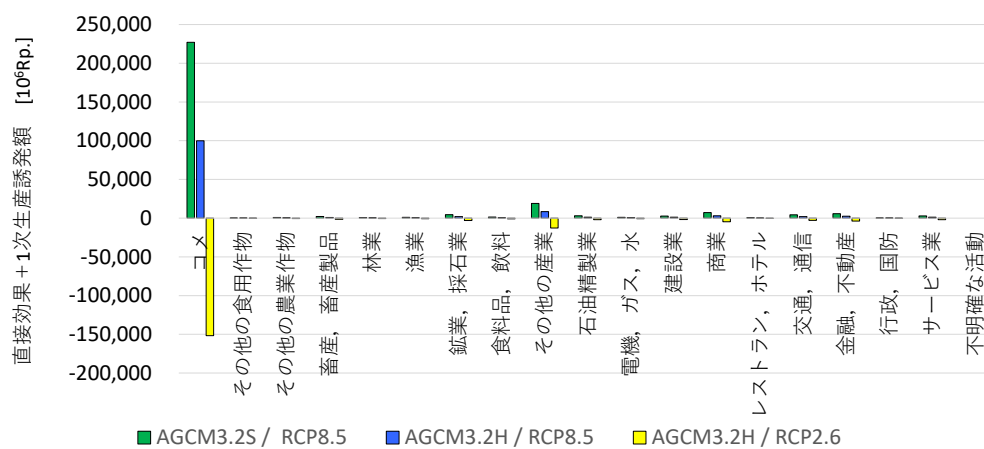


図 4.5-49：コメの生産額の増減に伴う産業別生産誘発効果

(イ) まとめ

インドネシア国ソロ川流域を対象に、過去気候(1979年11月-2002年9月)および将来気候(2075年11月-2098年10月)におけるダム流入量、貯水量、放流量、灌漑可能面積を算出し、気候変動に伴うソロ川流域の渇水被害リスクについて推定した。解析の結果、3.2S / RCP8.5 および 3.2H / RCP8.5 のケースでは将来、降水量が増加し、また、貯水池への流入量も増大することから、収穫量も増大すると推定された。一方、3.2H / RCP2.6 のケースでは降水量が減少し、また、貯水池への流入量も減少することから、収穫量も減少すると推定された。なお、本検討では、将来における灌漑水量の変化のうち、蒸発散量の変化を見込んではいないものの、田面に直接作用する降水量の変化については見込んではいない。今後は必要となる灌漑水量の変化について精査するとともに、将来気候の予測結果に基づく貯水池の運用の高度化について検討を進めたい。

4.5.2.3. 気候変動適応策の実装のためのプラットフォームにおける活動

(1) フィリピンにおける活動

フィリピンのダバオ市における気候変動適応策の実装を目的として、①「知の統合システム (Online Synthesis System for Sustainability and Resilience: OSS-SR)」の開発、②科学技術と地域社会・コミュニティを繋ぐ「ファシリテーター」の育成、に取り組んだ。OSS-SRの開発についてダバオ市では、リアルタイム洪水監視・予測と気候変動影響の定量的評価に関する科学的な情報および知見を OSS-SR で閲覧できる機能を開発した。さらに、これらに関連する 10 コマの入門講義とそれらに対する試験、4 コマの実践研修を学習可能な eラーニング機能も OSS-SR に開発した。eラーニング機能はユーザーがいつでも利用可能であるが、OSS-SR の機能や関係する科学技術に関する理解をより一層深め、現地で科学技術と地域社会を相互に繋ぐファシリテーターとして活躍する人材を育成することを目的として、ワークショップを 2 度開催した。1 回目のワークショップでは、2021 年 4 月 19 日から 5 月 14 日までの約 1 か月をかけて気候変動、洪水管理、災害リスク軽減に関する計 10 コマの入門講義について概要説明セッションや質問セッションを開催し、多様な分野から 29 名のステークホルダーが参加した。2 回目のワークショップでは、2022 年 1 月 17 日から 28 日までの約 2 週間で OSS-SR の活用方法やハザードマップ作成、危機管理計画、リスクコミュニケーションなどに関する 4 コマのハンズオントレーニングを実施し 31 名のステークホルダーが参加した。このように OSS-SR を活用した能力開発プログラムで学んだ人材がファシリテーターとして地域社会とのサイエンスコミュニケーションを促進し防災リテラシーを向上させることで気候変動適応策の実装を推進した。

(2) インドネシアにおける活動

インドネシアにおいては、気候変動適応策の実装のためのプラットフォーム活動の一環として、前述のソロ川流域の気候変動影響評価の研究結果等を活用し、インドネシアの行政担当者を対象とした eラーニング・ワークショップ「気候変動下における水災害レジリエンスと持続可能な開発」を開催した。この eラーニングの目的は、気候変動に適応した水関連災害のレジリエンスの確保や持続可能な開発のための担当者の人材育成及び関連行政機関間の連携の強化であり、インドネシア側は、公共事業・国民住宅省 (PUPR)、国家防災庁 (BNPB)、気象気候・地球物理庁 (BMKG)、環境・森林省 (KLHK)、農業省 (KP)、国立航空宇宙研究所 (LAPAN) の計 6 機関から合計 35 名の行政担当者が参加した。また実施にあたり、日本側から内閣官房水循環政策本部事務局、国土交通省、気象庁、水資源機構、JAXA、東北大学に協力をいただいた。

eラーニングは、「コース 1. 気候変動の科学」、「コース 2. 政府の取組」、「コース 3. 運営管理方法」の 3 つのコースで構成し、「コース 1. 気候変動の科学」ではソロ川流域の気候変動影響評価をケーススタディとした気候変動解析モデルや解析結果の評価方法等について、「コース 2. 政府の取組」では流域治水や健全な水循環に向けた日本政府の取組等を事例とした気候変動の適応策を検討する際の政府の役割や取り組むべきアクションについて、「コース 3. 運営管理方法」ではインドネシアのダム再生プロジェクトであるスタミダムやビリビリダムを事例としたダム等の施設の改良・管理計画の立案方法や運用の改善方法等について意見交換を行った。

また、同 eラーニングは母語での習得に配慮して、英語表記に加えてインドネシア語音声での解説を収録した教材を自習用に提供するとともに、課題の提出についてもインドネシア語で回答を受付けた。また、コース毎に開催した協働ワークショップは、インドネシア語・日本語の同時通訳を用いて行った。

eラーニングの参加者 32 名が合格の基準を満たし、修了証明書が手交された。これら受講者には、eラーニング・ワークショップを通じて学習した気象、水文、リスクマネジメント等の分野の科学的知見を踏まえ、持続可能性とレジリエンスを高める政策の立案と実行をリードするファシリテーターとして活躍することが期待されている。このような能力開発プログラムを通じ、分野横断的な政策立案が求められる気候変動適応策の検討にあたり、特に省庁間の連携に焦点を当てたプラットフォームの枠組みの実装に貢献した。

4.5.3. 5か年の達成状況

4.5.3.1. ダバオ川（フィリピン）及びソロ川（インドネシア）を対象とした詳細将来降水データの作成

フィリピン・ダバオ川流域については、MRI-AGCM3.2S 過去気候（1979～2003）と将来気候 RCP8.5（2075～2099）の各 25 年間、および MRI-AGCM3.2H（60 km 解像度）の過去気候（1979～2003）と将来気候 RCP8.5 と RCP2.6（2075～2099）の各 25 年間のダウンスケーリング計算を行った。

領域気候モデルとして、Weather Research and Forecasting（WRF）モデル ver.3.7.1 を用いた。モデル領域は、通常行われる方法である 2 重ネスティングとし、外側を 15km メッシュの 100×100 格子（1500 km 四方）、内側を 5 km メッシュの 79×79 格子（390 km 四方）とした。鉛直層は 40 層である。積雲パラメタリゼーションは Kain&Fritsch を用いた。

3.2H の RCP8.5 と RCP2.6 では、クウォンタイルマッピングによるバイアス補正後に概ね雨量計観測値に近い値を示した。一方、3.2S の RCP8.5 は、過去気候の夏季の雨量が極端な変動を示し、バイアス補正によってもこの差の補正が難しいため、以後の議論から除外することとした。また、年最大降水量イベントに着目し、生起する台風イベント数とフィリピン大気地球物理天文局（PAGASA）の公表資料を比較し、現実的な台風発生頻度となるようモデル設定を変更するなど、精査を行った。

ダバオ川流域における解析の結果、将来気候と過去気候の月雨量の傾向は異なり、RCP8.5 では乾季の雨量は変化しないものの、雨季には雨量が増加した。一方、RCP2.6 では雨季の雨量には変化しないものの、乾季の雨量が減少した。また、極端雨量の頻度は RCP8.5 では将来増加、RCP2.6 では将来減少という結果になった。

また、併せて、同流域で使用した力学的ダウンスケーリングのモデルについては、CMIP5 統計的ダウンスケーリングを用いた不確実性の検討を行い、その妥当性についても考察を行った。

インドネシア・ソロ川流域では、MRI-AGCM3.2H の過去気候、将来気候 RCP8.5 と RCP2.6 のそれぞれ 24 年間のダウンスケーリング計算を行った。領域気候モデルとして、Weather Research and Forecasting（WRF）モデル ver.3.7.1 を用いた。モデル領域は、格子間隔 5 km の 99×99 格子（490 km 四方）、鉛直層は 40 層とし、積雲スキーム無しという設定でダウンスケーリング計算を行い、雨量計観測値に非常に近い値を算出することができた。

流域平均月雨量は、雨季には増加し、RCP8.5 で乾季後半に減少するという結果が得られた。また、年最大 96 時間雨量の頻度解析から、1/10～1/200 極端雨量が将来増加することが明らかになった。

4.5.3.2. WEB-RRI モデルの開発と洪水・濁水被害リスクの推定

フィリピン・ダバオ川流域及びインドネシア・ソロ川流域を対象に降雨流出氾濫（WEB-RRI）モデルを構築し、前述のダウンスケーリング結果を用いて将来の洪水・濁水被害リスクの推定を行った。また、ダバオ川流域においては WEB-RRI モデルの計算流量を境界条件とするバランガイスケールの RRI モデル（40 m 格子）を構築した。

ダバオ川流域に関しては、現地雨量データが乏しいことから CHIRPS の衛星雨量データを用いて Lacson 地点における計算流量と実測流量を比較することで、WEB-RRI モデルの河道・斜面粗度係数等のパラメータを同定した後、2008 年の洪水イベントで同定したモデルの妥当性を確認した。そして、得られた WEB-RRI モデルの計算流量をバランガイスケールの RRI モデルの上流端境界条件として使用することで、より詳細な浸水状況を表現することが可能となった。そして、構築したモデルを用いて、過去気候および RCP8.5 シナリオの将来気候における洪水シミュレーションを実施した。その結果、過去気候に比べ、将来気候においては河川からの氾濫が発生し、河川周辺や一部の市街地が浸水することが分かった。これらの計算結果から浸水が発生するエリアや浸水深等の詳細な洪水情報を抽出することが可能となり、将来への洪水被害リスクの軽減に資する知見が得られた。

ソロ川流域に関しては、WEB-RRI により算出される浸水エリア、浸水深さ、継続期間等を用い

て、将来の洪水・渇水被害影響予測を行った。RCP8.5 シナリオにおいて Cepu 地点及び Wonogiri 地点において 11 月～7 月にかけて流量が増加する一方、乾季にあたる 8 月～10 月には流量の減少が示された。将来気候においては極端降雨が増加し、RCP2.6、8.5 シナリオともに、想定される最大浸水面積、想定浸水深は増大する結果となり、洪水リスクも増加する傾向を定量的に示すことができた。また、想定浸水域内の水田や家屋に着目し、稲作や家屋の経済損害額を推計するスキームを検討し、洪水による経済被害額の推計を行った。

また、過去気候（1979 年 11 月-2002 年 9 月）および将来気候（2075 年 11 月-2098 年 10 月）におけるダム流入量、貯水量、放流量、灌漑可能面積を算出し、気候変動に伴うソロ川流域の渇水被害リスクについて推定した。また、貯水池への流入量も増大することから、収穫量も増大すると推定された。一方、3.2H / RCP2.6 のケースでは降水量が減少し、また、貯水池への流入量も減少することから、収穫量も減少することが推定される。

4.5.3.3. 気候変動適応策の実装のためのプラットフォームにおける活動

フィリピン・ダバオ市及びインドネシア・ソロ川流域における気候変動適応策の実装支援を目的として、「水のレジリエンスと災害に関するプラットフォーム」の主要関係者と実施計画について協議を行い、適応策策定のための手段として、水災害リスク軽減のためのデータ、知識、情報、経験、ノウハウ、技術を集結した「知の統合システム (Online Synthesis System for Sustainability and Resilience: OSS-SR)」を構築し、これをオンライン学習の場で活用することにより、最新科学技術を社会に翻訳する能力を持つファシリテーターを育成する取組をプロトタイプとして進めることとした。

フィリピンのダバオ市においては、OSS-SR の開発について、リアルタイム洪水監視・予測と気候変動影響の定量的評価に関する科学技術的な情報および知見を OSS-SR 上で閲覧できる機能を開発した。さらに、これらに関連する 10 コマの入門講義とそれらに対する試験、4 コマの実践研修を学習可能な e ラーニング機能も開発した。e ラーニング機能はいつでも利用可能であるが、OSS-SR の機能や関係する科学技術に関する理解をより一層深め、現地で科学技術と地域社会を相互に繋ぐファシリテーターとして活躍する人材を育成することを目的として、ワークショップを 2 度開催した。1 回目のワークショップでは、気候変動、洪水管理、災害リスク軽減に関する計 10 コマの入門講義について概要説明セッションや質問セッションを開催し、多様な分野から 29 名のステークホルダーが参加した。2 回目のワークショップは、OSS-SR の活用方法やハザードマップ作成、危機管理計画、リスクコミュニケーションなどに関する 4 コマのハンズオントレーニングを実施し 31 名のステークホルダーが参加した。このように OSS-SR を活用した能力開発プログラムで学んだ人材がファシリテーターとして地域社会とのサイエンスコミュニケーションを促進し防災リテラシーを向上させることで気候変動適応策の実装を支援した。

インドネシアにおいては、気候変動適応策の実装のためのプラットフォーム活動の一環として、前述のソロ川流域の気候変動影響評価の研究結果等を活用し、インドネシアの行政担当者を対象とした e ラーニング・ワークショップ「気候変動下における水災害レジリエンスと持続可能な開発」を開催した。この e ラーニングの目的は、気候変動に適応した水関連災害のレジリエンスの確保や持続可能な開発のための担当者の人材育成及び関連行政機関間の連携の強化であり、インドネシア側は、公共事業・国民住宅省 (PUPR)、国家防災庁 (BNPB)、気象気候・地球物理庁 (BMKG)、環境・森林省 (KLHK)、農業省 (KP)、国立航空宇宙研究所 (LAPAN) の計 6 機関から合計 35 名の行政担当者が参加した。また実施にあたり、日本側の体制として内閣官房水循環政策本部事務局、国土交通省、気象庁、水資源機構、JAXA、東北大学に協力を得た。これら受講者には、e ラーニング・ワークショップを通じて学習した気象、水文リスクマネジメント等の分野の科学的知見を踏まえ、持続可能性とレジリエンスを高める政策の立案と実行をリードするファシリテーターとして活躍することが期待されている。このような能力開発プログラムを通じ、分野横断的な政策立案が求められる気候変動適応策の検討にあたり、特に省庁間の連携に焦点を当てた適応策の検討や実装に貢献した。

4.6. 南太平洋島嶼国に対する沿岸ハザードの影響評価

Audrius Sabūnas、森 信人（京都大学防災研究所）

The compounding effects of storm surges and sea level rise (SLR) are expected to accelerate coastal hazards and inundation. Therefore, projecting the compound effects in coastal territories is important for impact assessments and adaptation. Small island states in the South Pacific are one of the areas that are the most highly impacted by climate change. Storm surges are caused mostly by tropical cyclones (TCs), which may result in a significant portion of the population being temporarily displaced by infrastructure damage, flooding and erosion. Meanwhile, SLR is changing coastlines permanently and may result in a lasting displacement of the exposed population. This study focuses on Viti Levu, the largest and most populous island in Fiji, and estimates the impact of SLR and storm surge on the coasts and population, by using data from observations and future projections to estimate the angle of approach, occurrence frequency, and intensity of TCs. Based on the findings of this study it can be inferred that while Fiji has had a long record of TCs that hit its islands, SLR may become a more significant phenomenon that shapes climate-related migration. While a milder increase in the climate radiative forcing (+2K scenario) will increase the exposed population less dramatically compared with a sharper increase (+4K scenario), we conclude that either scenario would result in a significantly higher number of the population exposed during future storms (図 4.6-1) .

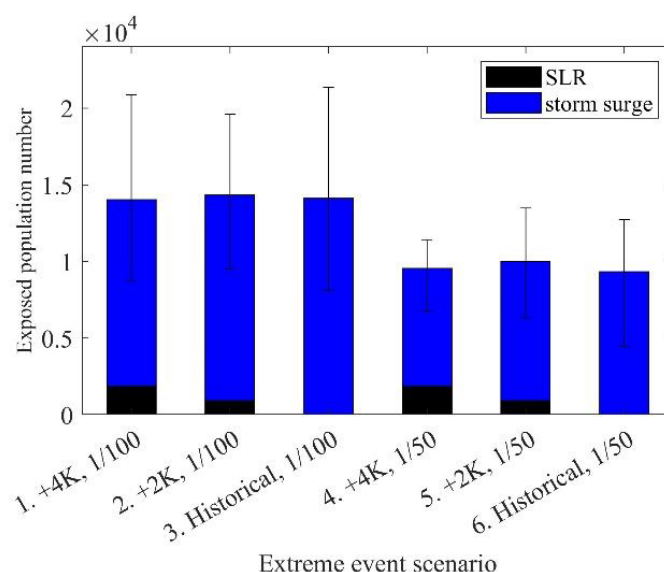


図 4.6-1 : Weighted average value of exposed population numbers under different storm intensity and climate scenarios (50- and 100-year events under the +4K, +2K and historical climate conditions) and individual contribution of SLR and storm surge (error bars: max and min values under different wind directions).

f. 考察

タイのチャオプラヤ川上流域を対象として東南アジア域での水管理を考慮した陸面モデルの高度化に取り組み、MRI-AGCM3.2S の陸面過程モデル SiB0109 および陸面過程モデル SiBUC の流出特性の違いを分析した。その結果、MRI-SiB では、浸透計算に重力排水を導入すること、SiBUC で使用している土壌パラメータを適用することにより、予測精度が向上することを見出した。また、SiBUC では、浸透計算において土壌第 2 層への直接浸透を導入すること、土壌層厚を元の設定よりも薄く設定することにより、予測精度が向上することを見出した。今後、改良した陸面ス

キームを AGCM の実装し、その効果を分析する必要がある。また、チュラロンコン大学 (タイ)、インドネシア科学院、トイロイ大学 (ベトナム) と連携し、チャオプラヤ川流域 (タイ)、バタンハリ川流域 (インドネシア)、紅河流域 (ベトナム) を対象として、領域テーマ C で作成される気候変動予測プロダクトを用いて、水害を引き起こすハザードの将来変化を予測した。d4PDF や RCM による将来気候シナリオデータを用いて流量計算を実施した結果、いずれの流域も流量極値が増加傾向を示すことがわかった。紅河流域は 1971 年の既往最大洪水に対応する治水整備が進み洪水リスクは低いこと、一方でチャオプラヤ川流域は 2011 年チャオプラヤ川大水害の再現期間 100 年程度であり水災リスクが高いことがわかった。バタンハリ川流域では、森林伐採や土地利用変化に伴う水文過程の変化を予測する洪水ハザードモデルを開発し、気候変動に加えて土地利用変化の将来変化も予測して洪水ハザードへの影響を評価した。また、フィジーおよびキリバスの高潮・波浪の将来変化を分析し、高潮、波浪による水災リスクが高まることを明らかにした。南太平洋の小島嶼国は、陸地面積に対する海岸線の割合が高いため、気候変動による影響が最も大きい地域の一つである。フィジーで最大かつ最も人口の多いビチレブ島に焦点を当て、観測と将来の予測に基づき、海面上昇と高潮が海岸と人口に与える影響を推定した。将来の気候の変化が穏やかな場合 (2K) には、被ばく人口がそれほど劇的に増加しない。しかし、放射強制力の急激な増加 (4K) では影響人口が著しく増加すると予想される。

また、東南アジア域の水工学分野の研究者や技術者を対象として、MRI-AGCM や NHRCM 等の気候変動シナリオデータやそれらを用いた水災害および水資源予測に関する影響評価技術の普及を図った。その一環として、2019 年 1 月 23 日から 25 日にかけてバンコクで開催された国際会議 THA2019 International Conference on Water Management and Climate Change towards Asia's Water-Energy-Food Nexus and SDGs、および 2022 年 1 月 26 日から 28 日にかけてオンラインで開催された国際会議 THA2022 Moving towards a sustainable water and climate change management after COVID-19 においてデータ利用ワークショップを開催した。今後とも、気候変動シナリオデータやそれらを用いた水災害および水資源予測に関するワークショップを開催し、現地での気候変動適応策の立案に資する技術協力を進める必要がある。

気候変動適応策の現地実装支援に関する技術開発として、ダバオ川流域 (フィリピン、ミンダナオ島) およびソロ川流域 (インドネシア、ジャワ島) を対象とし、水災害リスク解析を実施するとともに対象地域の現況に応じた気候変動適応策ニーズ・能力の把握や現地実装支援を実施して、気候変動適応策実装のためのプロトタイプを開発した。将来の水災害リスクの評価においては、対象地域の気候特性に合う GCM の選択、統計的バイアス補正を行ったうえで、個々の GCM による将来予測結果を比較・評価した。また、対象流域における解像度の高い降雨条件等を作成するため、MRI-AGCM の計算結果を使用し、地形特性の反映や気象現象の物理的整合性を確保できる力学的ダウンスケーリングを行った。次に、水・エネルギー収支を考慮した陸面モデルと RRI モデルの流出・氾濫機能を結合した WEB-RRI モデルを開発し、対象流域に適用して渇水、洪水を一連の現象として予測シミュレーションを実施し、想定される氾濫面積や浸水深等から農業・家屋被害額のが将来増加する可能性があることがわかった。

適応策の検討においては、気候変動の影響が社会経済全般に及ぶことから、対象国の関係政府機関や研究者、NPO 等が一堂に会した場で、それぞれの情報や知見を持ち寄り共有して検討を進める必要がある。そのため、UNESCO-IHP、WMO 等国际機関が主導する国際洪水イニシアティブ (IFI) の活動として「水のレジリエンスと災害に関するプラットフォーム」の設立や活動支援を行った。次に、適応策策定のための具体的な手段として、水災害リスク軽減のためのデータ、知識、情報、経験、ノウハウ、技術を集結した「知の統合システム (Online Synthesis System for Sustainability and Resilience: OSS-SR)」を構築した。また、OSS-SR を用いて、フィリピン・ダバオ市およびインドネシア・ソロ川流域における気候変動適応策の実装支援を目的として e ラーニング・ワークショップを開催することができた。

g. 引用文献

- Kure, S. and Tebakari, T., 2012: Hydrological impact of regional climate change in the Chao Phraya River Basin, Thailand. *Hydrological Research Letters*. Vol. 6, pp. 53-58.
- Tachikawa Y. and Toan D. D., 2016: User Manual for Distributed flow routing model: 1K-FRM, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/document/1K-FRM-ver138.pdf>. (2022年2月15日確認.)
- Tanaka T., Kiyohara K., Tachikawa Y., 2020: Comparison of fluvial and pluvial flood risk curves in urban cities derived from a large ensemble climate simulation dataset: a case study in Nagoya, Japan, *Journal of Hydrology*, vol. 584, 124706, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124706>
- 山本浩大・佐山敬洋・Apip・寶馨, 2019: 湿潤熱帯流域における降雨流出氾濫モデルの適用性に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学).
- Eva Mia Siska Yamamoto, Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Apip, 2020: Comparison of runoff generation methods for land use impact assessment using the SWAT model in humid tropics, HRL.
- Takahiro Sayama, Ryoko Araki, Kodai Yamamoto, Apip, 2021: Characteristics of soil and hillslope responses in humid tropical forests in Sumatra, Indonesia, HRL.
- Kodai Yamamoto, Takahiro Sayama, Apip, 2021: Impact of Climate Change on Flood Inundation in a Tropical River Basin in Indonesia, PEPS.
- 山本浩大, 2021: 京都大学博士学位論文.
- EMS Yamamoto, Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Apip, 2021: Mapping of Mature and Young Oil Palm Distributions in a Humid Tropical River Basin for Flood Vulnerability, IOP Conf. Series.
- 山本昭夫, 喜連川優: マルチ気候モデルによる気候変動予測のための可視化・解析システムの構築, 情報処理学会第74回全国大会, 2012, P4-402.
- Cho Thanda NYUNT, Toshio KOIKE, Patricia Ann J. SANCHEZ, Akio YAMAMOTO, Toshihoro NEMOTO, Masaru KITSUREGAWA: Bias correction method for climate change impact assessments in the Philippines, 水工学論文集第57巻, 2013年69巻4号 p. I_19-I_24, https://doi.org/10.2208/jscejhe.69.I_19
- Budiyono, Y., Aerts, J. C. J. H., Tollenaar, D. and Ward, P. J., 2016: River flood risk in Jakarta under scenarios of future change. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 757-774.
- Rasmy, M., Sayama, T. & Koike, T., 2019: Development of water and energy Budget-based Rainfall-Runoff-Inundation model (WEB-RRI) and its verification in the Kalu and Mundeni River Basins, Sri Lanka. *Journal of Hydrology*, 579, 124163.
- Shrestha, B.B., Okazumi, T., Mamoru, M. and Sawano, H., 2016: Flood damage assessment in the Pampanga River basin of the Philippines. *Journal of Flood Risk Management*, 9, 355-369.

h. 成果の発表

< 査読付き論文 (受理・印刷済み) >

- Shrestha B.B., Rasmy M., Kawamoto T., Fujikane M. 2022. Quantitative assessment of flood damage to residential buildings and agricultural crops in the Solo River basin of Indonesia. The 9th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER 2022), submitted (2021/11)
- Takahiro Sayama, 2021. Characteristics of soil and hillslope responses in humid tropical forests in Sumatra, Indonesia, *Hydrological Research Letters*, Volume 15, Issue 2, pp. 23-30, doi.org/10.3178/hrl.15.23.
- Eva Mia Siska Yamamoto, Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Apip, 2021, Mapping of Mature and Young Oil Palm Distributions in a Humid Tropical River Basin for Flood Vulnerability Assessment, IOP Conference Series Earth and Environmental Science 789(1):012034, doi: 10.1088/1755-1315/789/1/012034
- Tinumbang A.F.A., Yorozu K., Tachikawa Y., Ichikawa Y., Sasaki H., Nakaegawa T., 2021, Analyzing the uncertainty in the pmpestimation method under future climatic conditions, *Journal of Japan Society of Civil Engineering B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 77, No. 2, pp. I_253-I_258.

Meema T., Tachikawa Y., Ichikawa Y., Yorozu K., 2021, Uncertainty assessment of water resources and long-term hydropower generation using a large ensemble of future climate projections for the Nam Ngum River in the Mekong Basin, *Journal of Hydrology: Regional Studies* Volume 36, 100856, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100856>

< 査読付き論文（投稿中） >

MOHAMED RASMY, TOMOKI USHIYAMA, RALPH ALLEN ACIERTO, BADRI BHAKTA SHRESTHA, YOSUKE TOMIZAWA, KATSUHIRO ONUMA, HIROYUKI ITO, TOSHIO KOIKE, Quantifications of climate change impacts on hydro meteorological characteristics using downscaled MRI-AGCM climate model outputs and Water and Energy Budget-based Rainfall-Runoff-Inundation (WEB-RRI) model in the Solo River Basin Indonesia, *Journal of Hydrometeorology*, submitted (2021/12)

Shrestha B.B., Rasmy M., Kawamoto T., Fujikane M. (2022): Exposure analysis and assessing households flood damage with adaptation options in the Solo River basin of Indonesia. Annual Meeting of Japan Geoscience Union (JPGU2022), 2022 (submitted).

Shrestha B.B., Rasmy M., Ushiyama T., Acierito R.A., Kawamoto T., Fujikane M., Ito H.: Assessment of flood damage to agricultural crops under climate change scenarios using MRI-AGCM outputs in the Solo River basin of Indonesia. The 9th International Conference on Flood Management (ICFM9), 2023 (submitted)

< 学会発表 >

Ralph Allen Acierito, Tomoki Ushiyama, (2021) Comparison of PMP Estimates in Solo River: Towards Creating an Ensemble of Worst-case Extreme Rainfall Scenarios under Climate Change, the Fifth Convection-Permitting Modeling Workshop 2021 (CPM2021), online.

Ushiyama, T., Dynamic Downscaling of Philippines and Indonesian River Basin, International Workshop on Adaptation Research for Climate Change in Asia (ARCC2021), Nov. 16, 2021, online.

Eva Yamamoto, Takahiro Sayama, Kodai Yamamoto, Susumu Kozan, Mariko Ogawa: Understanding floods and fires risks in tropical peatlands as part of humid tropical river basins using SMAP and Sentinel-1 data, AGU Fall Meeting, Dec. 13, 2021.

Kodai Yamamoto, Takahiro Sayama, Eva Yamamoto, Apip, Prediction of Future Land Use and Climate Change Impact Assessment on Flood Damage of Tropical Agriculture, AGU Fall Meeting, Dec. 16, 2021.

< その他 >

佐山敬洋, 2021: 気候変動適応策としての流域治水, 第4回統合プレミアムセミナー, 2021年10月6日

< 査読付き論文（受理・印刷済み） > : 5 件

< 査読付き論文（投稿中） > : 3 件

< 口頭発表 > : 4 件