

第 8 章 気候変動影響評価

8.1 気候変動影響評価の検討方針

気象は毎日変化するものであり、毎月・毎年異なるものである。これに対し、気候とは特定の地域における長期の平均的な気象の振る舞いを表すものであり、固有で一定のパターンを示すものである。気候が一定のパターンで変化がないという考え方は水文学的検討の根幹にあり、過去の実績データに基づくことが基本である。

千年、1 万年単位で見れば気候は自然に変動するものである。しかし、ここ百年間の人類の活動に起因して気候変動は加速している。マニラ首都圏の Water Security Plan（WSP）の計画対象年は 2040 年であり、現在から約 30 年後に過ぎないが、現在の気候と計画対象年の気候が同じであるという保証はない。気候変動影響評価の検討は、将来の気候に適応する WSP を策定するうえで重要となる。

人間活動による温暖化ガスの排出が気候に影響を及ぼすことは、もはや一般的に共有されている認識である。将来への温暖化ガスの排出シナリオを設定することが、気候変動影響評価のための最初の取り組みとなる。

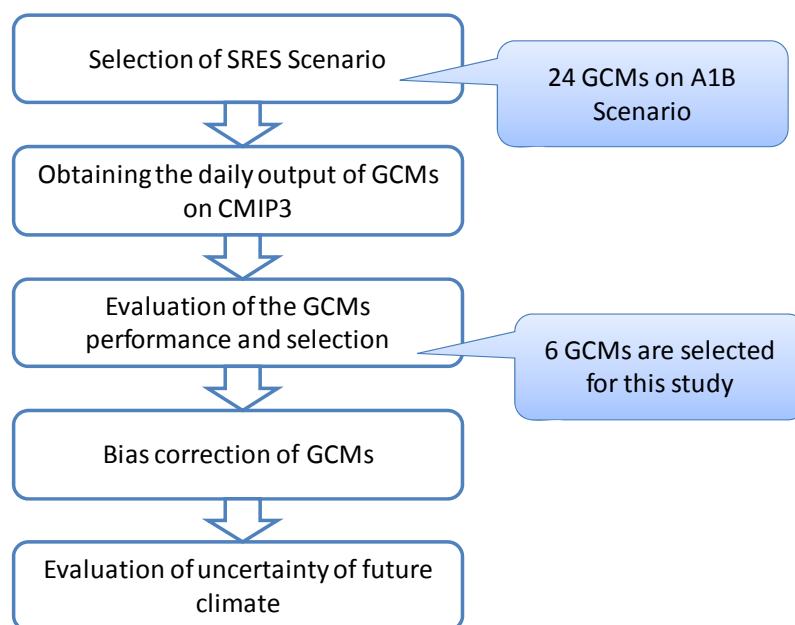
全球気候モデル（General Circulation Model: GCM）は、将来の気候がどのように変化するかを検討するのに最も期待されるツールであり、最も進んだ技術である。GCM は様々な国で開発され、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC）の第 4 次報告（Forth Assessment Report: AR4）に多くのモデル検討成果が提示されている。その出力結果の大部分が第 3 次結合モデル相互比較プロジェクト（Phase 3 of Coupled Model Intercomparison Project: CMIP3）に収められている。本調査では、これらの GCM の結果に基づいて調査対象地域の気候変動影響の検討を行う。

GCM が将来の気候変動のシナリオを物理的基礎式に基づきながら描くツールとして、最も有望なものであるということは広く認識されている。しかし、実際の局所的な気候とシミュレーションの結果の間には無視できない開きがあり、これがバイアスと呼ばれる。このため、流域スケールの水文学的検討に GCM の出力結果を適用するためにバイアス補正を行う。バイアス補正の手法としては、東京大学小池教授が提案している手法を採用する。

CMIP3 には 24 の GCM の結果が収集されており、そのうちの 17 のモデルについて日データが提供されている。CMIP3 と同様の各 GCM の日データセットは、我が国ではデータ統合・解析システム（Data Integration and Analysis System: DIAS）に収められている。本調査において利用する GCM の出力結果は、東京大学地球観測データ統融合連携研究機構（The Earth Observation Data Integration & Fusion Research Initiative: EDITORIA）と JICA との協力により提供されたものである。

全ての GCM がそれぞれ異なる将来の気候変動シナリオを示している。GCM は現時点での最先端技術を集約したものであるが、それでも将来の気候を評価することは困難な状況である。このような将来推定における不確実性を定量的に見積もることが必要である。このため、複数モデルの結果を用いてマルチモデル・アンサンブル分析を行う。

下図に気候変動影響評価のフローを示す。



出典：JICA 調査団

図 8.1 気候変動影響評価の検討手順

8.2 温暖化ガス排出シナリオの選定

将来の気候変動影響評価を数値モデルで検討するにあたり、大気中の温室ガスや他の汚染因子などの濃度を境界条件として設定する必要がある。

「排出シナリオに関する特別報告書（Special Report on Emission Scenarios: SRES）」は、IPCC によって 2000 年に発行され、第 3 次及び 4 次 IPCC 報告書で用いられる将来の排出シナリオについてまとめたものである。SRES では、将来にわたって大気に排出される温暖化ガス、エアロゾル、他の汚染物質について設定するとともに、土地利用や土地被覆の変化についてもまとめている。4 つのシナリオグループが作成されており、それぞれのシナリオは人口動態や経済政策、社会及び技術的観点での可能性のある将来像を描いたものである。4 つの SRES のシナリオについて表 8.1 に示す

表 8.1 SRES シナリオ

Scenario family	SRES Emissions Scenarios	CO ₂ Stabilization
A1	A future world of very rapid economic growth, global population that peaks in mid-century and declines thereafter, and rapid introduction of new and more efficient technologies. The A1 scenario family develops into three groups that describe alternative directions of technological change in the energy system. -A1F1: fossil-intensive -A1T: non-fossil energy sources -A1B: balance across all sources	A1F1: Not stabilise A1T:650 ppm A1B:750 ppm
A2	A very heterogeneous world with continuously increasing global population and regionally oriented economic growth that is more fragmented and slower than in other Scenario family.	Not stabilise

B1	A convergent world with the same global population as in the A1 storyline but with rapid changes in economic structures toward a service and information economy, with reductions in materials intensity, and the introduction of clean and resource-efficient technologies.	550 ppm
B2	A world in which the emphasis is on local solutions to economic, social, and environmental sustainability, with continuously increasing population (lower than A2) and intermediate economic development.	650 ppm

出典： Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment (TGICA), IPCC

本調査では、最も現実的と思える社会条件設定であり、もっともらしい物理的設定となっている A1B シナリオを採用する。A1B シナリオについては、全ての GCM での検討がされており、IPCC での議論の中心的な役割を果たしていたこと、また、そのためデータの整備状況が最も良いということも A1B シナリオを選択する理由である。

8.3 全球気候モデル (Global Circulation Models: GCM)

世界各国では、様々な研究機関が将来の気候変動を予測するための枠組みを設定するために、それぞれの評価目的を持って GCM を開発している。前述のとおり、これら GCM の一部の結果は入手が可能であり、検討の目的に応じた適切な GCM を選定することが重要である。

GCM の選定は、検討対象である領域における気候の再現能力に重点を置いて行う。検討対象領域の気候値を再現できない場合は、選定の対象から除外する。この気候値再現性を評価するための領域範囲は、総観規模（1,000 km～10,000 km）とすべきである。また、対象流域スケールでの気候現象についてもモデル再現性を確認する必要がある。

流域スケールで見た場合に降雨の季節性を表現できる GCM を抽出すべきである。モデル出力の降雨の気候値空間分布パターンの再現性を評価するのに、再解析値とモデル出力のグリッドごとの相関係数を算出して用いる。一方、全体的な量の差異を評価するのに二乗平均誤差（RMSE）を用いる。Global Precipitation Climatology Project（GPCP）のデータセットを用いて、月平均雨量のモデル再現能力の評価を行った。また、他の気象変数については、長期再解析プロジェクト（Japanese Re-Analysis 25 years: JRA25）の成果を観測値として用いた。

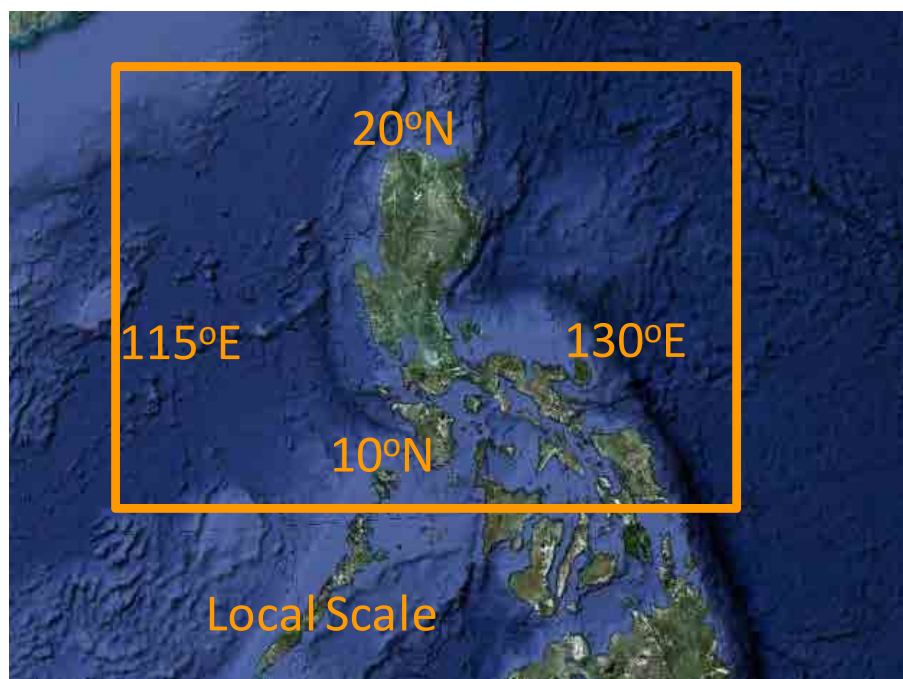
GCM の降雨の地域特性の再現能力を持たない GCM は選定対象から除外する。この選出のために、以下に示す選定基準を設けた。

- 1) 長期の平均的な降雨量（気候値）で観測値と GCM 出力結果の比較を行う。GCM が雨季や乾季などの季節的な降雨の変動を表現できていない場合は、その GCM を選定の対象から除外する。
- 2) もし、無降雨日に関するバイアス補正を施したあとでも GCM が不合理な長期の乾季を呈していた場合、その GCM は除外する。
- 3) 最後に、観測降雨分布の不均一性が流域内で激しい場合、評価範囲を分割する必要がある。

CMIP3 に収められているものから適切な GCM を選定することは、複数モデルでの分析において重要なことである。多くの GCM は、洪水時の降雨強度が低い、季節的な降雨特性の表現能力が低い、無降雨日が少なく非常に少ない雨量が長期に継続するような振る舞いをするという問題を抱えている。適切な GCM を選出するにあたり 7 つの気象変数を用いた。す

なわち、降雨量、外向き長波放射、海面温度、海面更正気圧、気温、南北風および東西風である。

局所的なスケールの気象現象（降雨）の再現性評価のための評価領域は、東経 115 度から 130 度、北緯 10 度から 20 度の範囲とした。降雨再現性評価の領域について下図に示している。



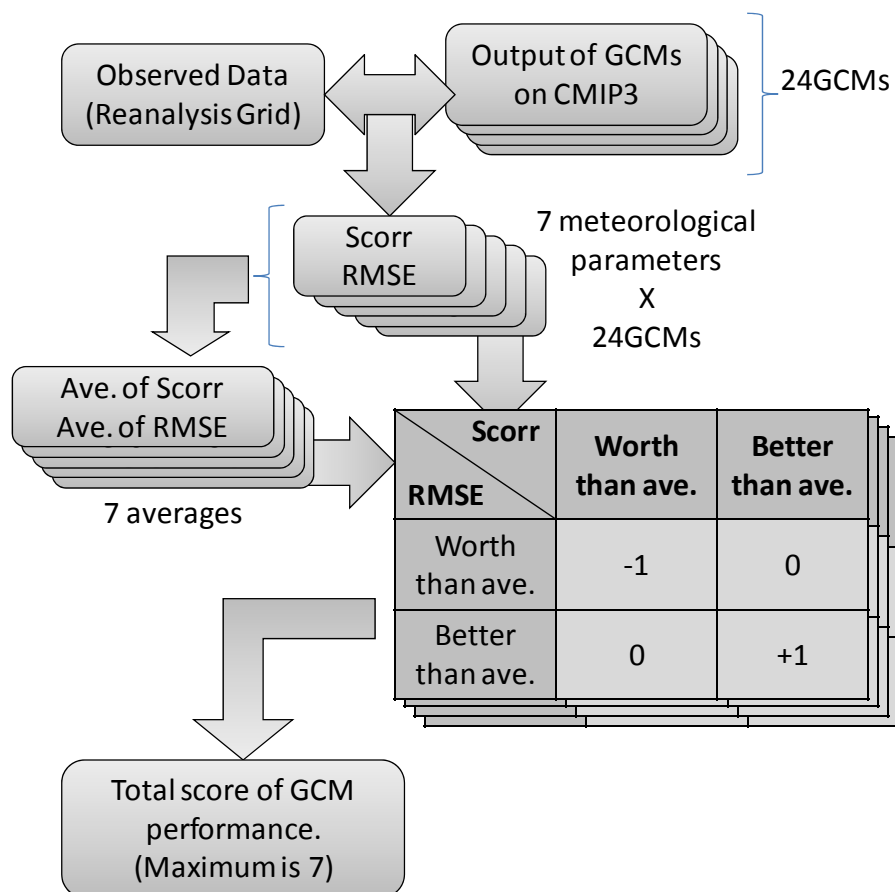
注： 大規模循環や周辺海域のモデル再現性を評価するための領域については、東経 80 度から 160 度、北緯 0 度から 20 度とした。ベンガル湾、インド洋、フィリピン海やジャワ海がこの領域に含まれる。

出典： JICA 調査団

図 8.2 局所的な気象現象（降雨）ための評価領域

モデル再現性を評価するのに用いた気象変数は、海面更正気圧、気温、南北風および東西風、外向き長波放射、海面温度である。この領域は、東南アジアモンスーン（東経 90 度から 130 度、北緯 0 度から 10 度の範囲）、インド夏季モンスーン（東経 40 度から 80 度、北緯 5 度から 20 度）、東アジアモンスーン（東経 110 度から 140 度、北緯 20 度から 45 度）といった夏季アジアモンスーンの範囲をカバーするものである。

水資源管理に関する検討を行うことから、検討対象領域においては GCM の降雨の季節性（雨季・乾季）の再現性について、5 月から 11 月の雨季における空間的な相関係数（scorr）及び二乗平均誤差（RMSE）で評価した。それぞれの GCM で算出される相関係数及び二乗平均誤差を用いて、相対的にモデルの良し悪しを評価する簡単な指標を用いた。すなわち、全 GCM の scorr の平均値を上回る scorr を与えるモデルに 1 点、下回る場合に 0 点を与える。同様に RMSE の全モデル平均値との比較で 1 点、0 点を与える。両指標で 1 点を獲得したモデルについて、RMSE と scorr をまとめた評価として 1 点とし、いずれか一方が 1 点の場合に 0 点、両指標共に平均を下回る 0 点の場合には、-1 点とする。この両指標評価をまとめた指標値を気象変数 7 つについて全て合計したものを GCM の総合指標値とする。この評価手法の手順について簡単に示したものが、図 10.3 である。



出典：JICA 調査団

図 8.3 GCM の評価手順

上記の評価システムを用いて、気候変動影響の検討に用いる 6 つの GCM が選定された。選定過程は以下のようであった。

- 選定過程 1：日データが入手可能なモデルとして 16 の GCM が選出された。
- 選定過程 2：さらに、7 つの気象変数を用いての雨季の評価結果が正となるなったモデルとして 13 の GCM が抽出された。
- 選定過程 3：さらに、降雨量に対する評価結果が +1 となったモデルとして最終的に 6 つの GCM が選出された。

選出された 6 モデルについて表 8.2 に示す。

表 8.2 選定過程と選定された GCMs

GCM	1st Screening	2nd Screening	3rd Screening	Selected
	Daily Data Availability on CMIP3	Ground Total Score for Wet Season (May - Nov)	Evaluation Score for Precipitation of Wet Season (May - Nov)	
gfdl_cm2_0		7	1	✓
gfdl_cm2_1		7	1	✓
cccma_cgcm3_1		5	0	
ipsl_cm4		5	1	✓
ncar_ccsm3_0	missing	5	1	
ukmo_hadgem1	missing	5	0	
bccr_bcm2_0	incomplete	4	0	
cccma_cgcm3_1_t63		4	-1	
giss_aom		4	1	✓
ingv_echam4		4	1	✓
csiro_mk3_0		3	0	
miub_echo_g	incomplete	3	1	
mpi_echam5		3	-1	
cnrm_cm3		2	0	
csiro_mk3_5		2	0	
miroc3_2_medres		2	1	✓
mri_cgcm2_3_2a		2	-1	
miroc3_2_hires		0	0	
giss_model_e_r		-1	1	
ukmo_hadcm3	missing	-2	-1	
iap_fgoals1_0_g		-4	0	
inmcm3_0	missing	-5	0	
giss_model_e_h	missing	-6	0	
ncar_pcm1	missing	-6	-1	

Passed the screening
 Excluded by previous screening

出典：JICA 調査団

8.4 バイアス補正及びダウンスケーリング

8.4.1 バイアス補正、ダウンスケーリング手法

全球気候モデルは将来の気候状況を評価するのに効果的なツールである。しかしながら、GCM にはバイアスが含まれており、各モデルの 20 世紀再現計算実験での降雨量や気温の計算結果には観測値との誤差がある。したがって、将来の水文環境への気候変動の影響評価を行うためには、バイアス補正を施した GCM の出力結果を流出解析モデルに適用することが必要である。

一般に認識されている GCM のバイアス及び問題点とは以下のとおりである。

- a) モデルごとに結果が大きく異なる。
- b) 季節的な変動がうまく表現されていない。
- c) 高強度降雨の再現性に乏しい。
- d) モデルでは無降雨日が殆ど無く、少雨が連続している。

上記の GCM の出力結果の問題点を補うために、統計的なバイアス補正手法が採用された。詳細のバイアス補正手法について 8.4.3 に記述している。

GCM の出力結果を水文学的検討に用いるためには、もうひとつ克服すべき大きな問題がある。GCM のグリッドサイズは流域スケールの検討を行うためには粗すぎる。本調査で選出されたモデルのうち、最も粗いグリッドサイズは 250 km 程度となっており、検討対象エリアが全て一つのグリッドで包含される。降雨現象は局地性の強い現象であるため、空間的なダウンスケーリングは、GCM 出力結果の水文検討への適用において重要なプロセスである。

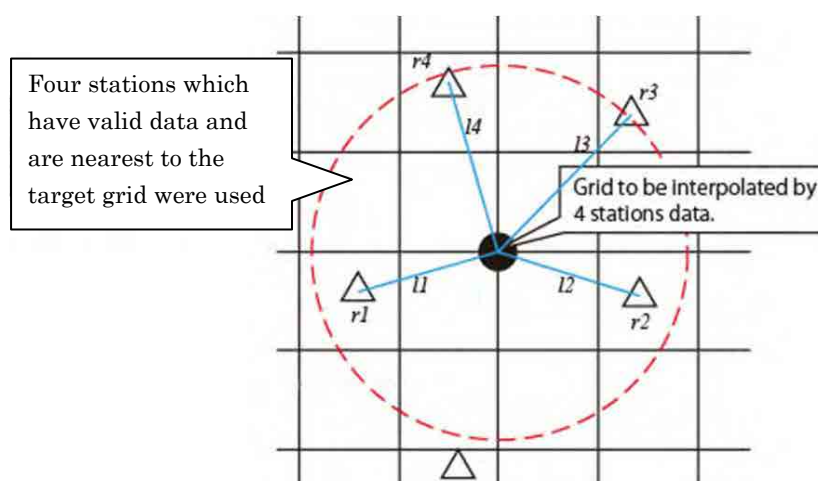
現状の評価とバイアス補正のために、地上観測雨量データからグリッド降雨データを作成した。空間的ダウンスケーリングは、このグリッド雨量に合わせたバイアス補正を実施することで同時に達成される。グリッド雨量作成手順について 8.4.2 に詳述している。また、日気温データについてもダウンスケーリングを実施しており、これについては 8.4.4 に詳述している。

8.4.2 グリッド雨量データの作成

緯度経度方向で 0.05 度のグリッドに対して、グリッド降雨データを地上雨量観測記録から作成した。0.05 度は約 5km グリッドである。あるグリッドの雨量は近くの 4 つの観測所データから空間内挿して作成した。観測記録には欠測が多く含まれているが、そのような場合は有効なデータを持つ次に距離の近い観測所のデータを用いた。空間内挿手法は距離の重みつけ方法を用いた。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{r_i}{l_i^2}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{l_i^2}}$$

ここに $r =$ 求めるグリッド雨量[mm]
 $r_i =$ i 番目の地上雨量観測所での観測結果 [mm]
 $l_i =$ 内挿するグリッドと i 番目の地上観測所との距離[km].



出典：JICA 調査団

図 8.4 グリッド雨量データ作成に用いた空間内挿手法

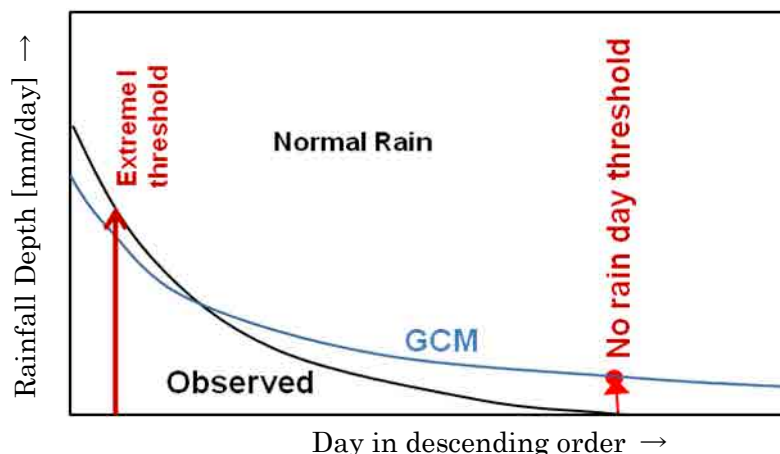
このような空間内挿手法を用いることのメリットとして下記のような点があげられる。

- 欠測を内挿値で埋めることができる。
- 雨量観測所の無い区域を埋めることができる。
- 観測データに問題のある観測所が浮き出すので、見つけ出すことが容易となる。
- グリッドデータである GCM の出力結果との比較など作業が容易となる。

8.4.3 降雨のバイアス補正

全球気候モデルが算出する降雨量をバイアス補正することなく、流域単位の水文検討や流出モデルの境界条件にそのまま用いることはできないことは一般的によく知られている（Ines and Hansen, 2006, Feddersen and Andersen, 2005, Sharma et al., 2007）。GCM の出力結果を水文検討に用いるためには、適切なダウンスケーリングも必要となる。ダウンスケーリングには、統計的ダウンスケーリングと動的ダウンスケーリングの大きく 2 種類の方針がある。動的ダウンスケーリングは、更に細かい空間解像度での気候モデルを用いて、GCM の出力結果を初期条件、境界条件に与えるものである。統計的ダウンスケーリングは、大域的な粗い解像度での GCM の出力結果と局所的な空間解像度での観測結果との統計的な関係を見出すものである。本調査では統計的ダウンスケールを行った。

合理的な降雨のバイアス補正を行うためには、無降雨日数に関するバイアス、平常時降雨のバイアス、高強度降雨のバイアスをそれぞれ分けて考える必要がある。微物理モデルの適用は困難なため、GCM は無降雨日が殆ど無く、微小な降雨日が長く続くという不合理な結果を与えがちである。また、高強度降雨については、その降雨強度が小さい降雨しか出力されないという問題もある。そのため、図 8.5 に示すように降雨を 3 つのタイプに分けてバイアス補正を検討することが必要となる。雨季と乾季の差が激しい流域を取り扱う場合は、その季節ごとにバイアス補正を分けて考える必要がある。季節的な降雨特性の差異をバイアス補正で考慮するためには、月単位もしくは 3 ヶ月ごとなどの時間スケールで検討することが必要である。



出典：JICA 調査団

図 8.5 バイアス補正における 3 つの降雨タイプの領域

無降雨日のバイアス補正

どの GCM も非合理的に無降雨日が殆ど無く、微小な降雨がだらだらと継続するような結果となっている。これは、GCM のパラメタライゼーションの不足に起因しているものと考えられている。この無降雨日に関するバイアスを補正するには、降雨を順序良く並び替えたものについて実測データと GCM 計算結果とで比較することで行う。

- 1) 観測値と GCM 出力結果をそれぞれ降順で並び替える
- 2) 無降雨日の閾値を観測データで 0 mm/day となる順位から設定する。観測値で 0 mm/day となる順位の現在気候での GCM 出力雨量を閾値とする。
- 3) この閾値以下の GCM（現在気候）出力降雨を無降雨日とし 0 mm/day と補正する。
- 4) 将来気候の GCM 無降雨日の補正は、そのモデル現在気候計算結果から設定された閾値を適用することで行う。

高強度降雨のバイアス補正

ほとんどの GCM において、高強度降雨は観測値に比べて小さな降雨となっている。高強度降雨の適切なバイアス補正は、観測値での高強度降雨の頻度分布に適合するように行うべきである。

観測データの各年から年最大雨量を抽出する。年最大雨量のうち最小のものを高強度降雨日として抽出するための閾値とする。GCM の現況気候及び将来気候の計算結果における高強度降雨日は、観測データで抽出された高強度降雨日の日数と等しくなるように上位の降雨から抽出する。

適切な確率分布関数 (PDF) を観測データと GCM 計算結果での高強度雨量データから作成し、これらの PDF の関係を用いて高強度降雨のバイアス補正を行う。

平常時雨量のバイアス補正

平常時降雨は、前述の無降雨日と高強度降雨のそれぞれの閾値で挟まれる範囲となる。この平常時雨量を月毎に仕分け、降順で並び替える。この降雨出現順位は、累積確率分布 (CDF)

とみなすことができる。平常時降雨のバイアス補正は、観測値と GCM 出力結果の CDF を比較することで行う。

空間的なダウンスケーリングは、100 km オーダーの GCM 出力結果を上記のバイアス補正により、降雨観測所地点の観測データに合わせることで行われる。

8.4.4 気温のバイアス補正

(1) グリッド気温データの作成

気温の空間的分布は降雨量と比べると局所性は殆ど無く、気温分布に大きく影響を与えているのは標高である。気温低減率を 100m 標高差あたり 0.6 度として、グリッド気温データを地上観測データから作成した。グリッドサイズは降雨と同じく 0.05 度グリッドとした。グリッド気温データ作成手順について、以下に述べる。

- 1) 空間内挿したいグリッドから最も近い 4 つの地上観測所データを得る。
- 2) 対象グリッドの標高を DEM（数値標高データ）から取得し、 Z_{grid} [El.m] とする。
- 3) 内挿に用いる気温観測所の気温データを Z_{grid} まで標高を変えた場合に考えられる仮想的な気温データを気温減率 0.6 度/100m を用いて推定する。

$$T_{i_corrected} = T_{i_observed} + 0.006 (Z_i - Z_{grid})$$

- 4) 内挿対象のグリッドの気温データは、上記 3) と同様に作成された 4 点の標高補正気温データを用いて逆距離荷重法で得られる。

$$T_{grid} = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{T_{i_corrected}}{l_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{l_i}}$$

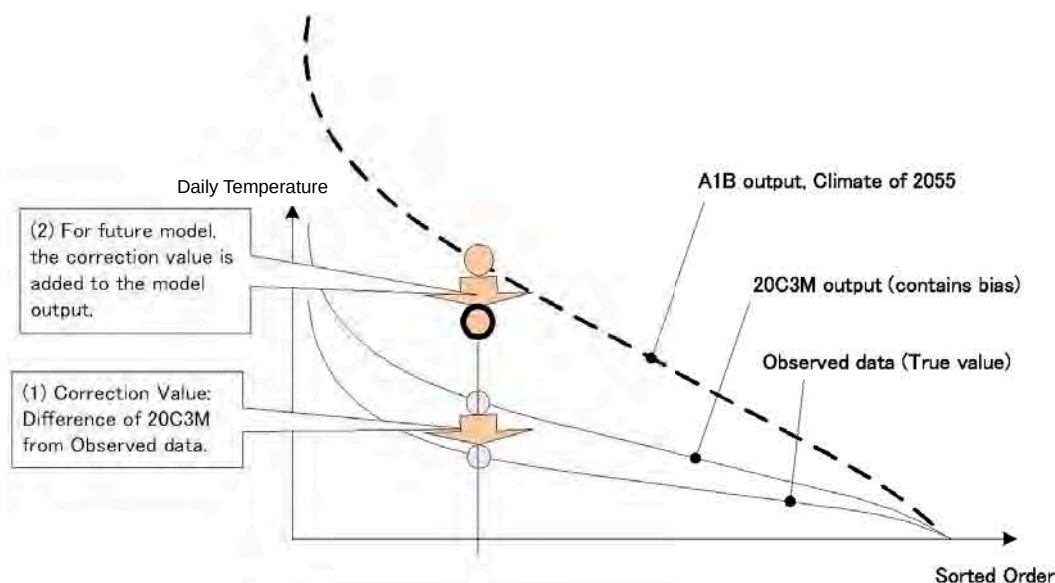
ここで、 l_i : 観測所 i からの内挿対象グリッドまでの距離

(2) GCM 出力の気温に関するバイアス補正

気温の観測記録と GCM の 20 世紀再現実験結果（20C3M）の出力結果それぞれの累積密度関数（CDF）を作成した。作成された CDF の差を観測値とモデル計算値のバイアスとし、この差分を GCM の将来計算結果（A1B）の累積密度関数に適用することで将来気候条件下の日気温のバイアス補正とした。手順を以下に示す。

- 1) GCM の出力グリッドを本調査で作成したグリッドと一致させた。
- 2) 1981 年から 2000 年の 20 年について、観測グリッド気温データと 20C3M 計算結果から月平均気温を算出した。
- 3) ある月について全ての日気温データを降順で並び替えた。例えば 4 月を対象とした場合、20 年間で 600 の日雨量データが降順で並ぶこととなる。
- 4) 並び替えられた気温データのある順位の 20C3M での気温と観測値での同順位の気温との差分を、このランクの気温におけるバイアスとする。
- 5) 20C3M の計算結果を降順で並び替え、4) で求めたランクごとのバイアスを差し引くことで、平均気温や気温の出現分布は観測記録と完全に一致することとなる。

- 6) 将来（2046 年から 2065 年）の GCM の計算結果から同様に月ごとにデータを全て降順で並び替え、ランクごとに 4) で求めたバイアスを差し引くことで、将来気温のバイアス補正とした。



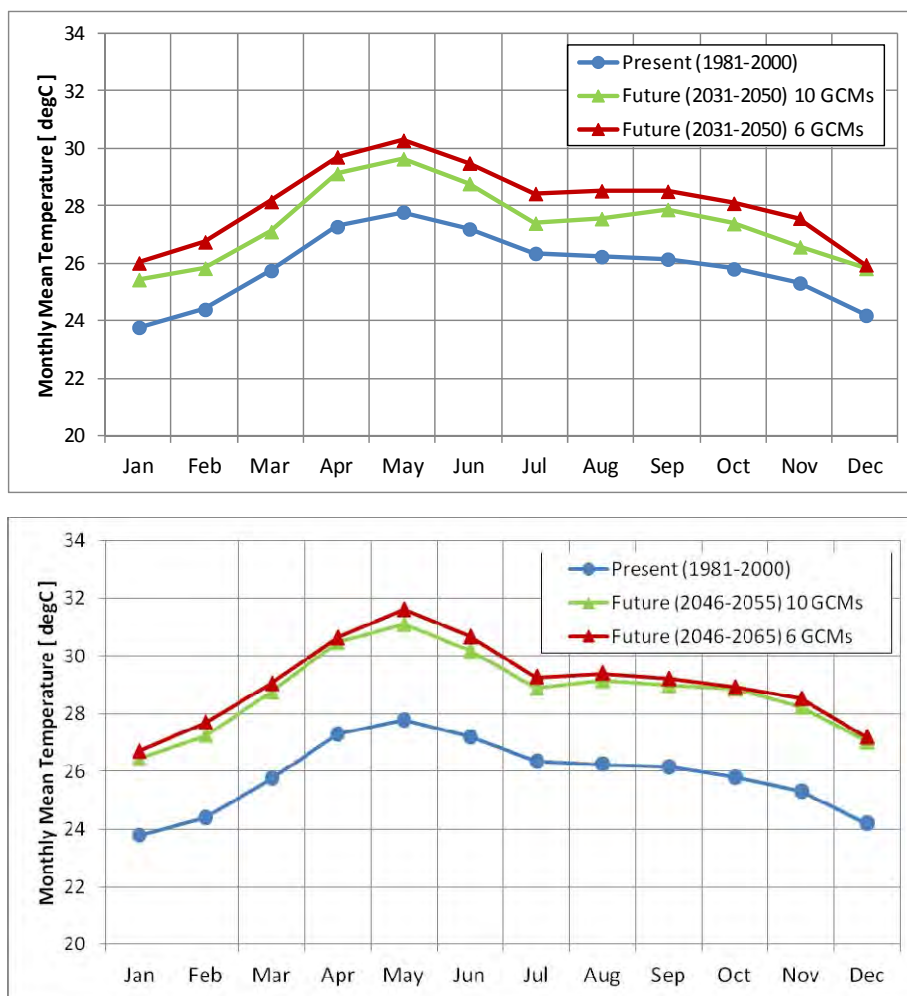
出典：JICA 調査団

図 8.6 GCM の将来予測出力結果（2046 年から 2065 年）の気温のバイアス補正手法

(3) 気温への影響評価のための GCM の選定

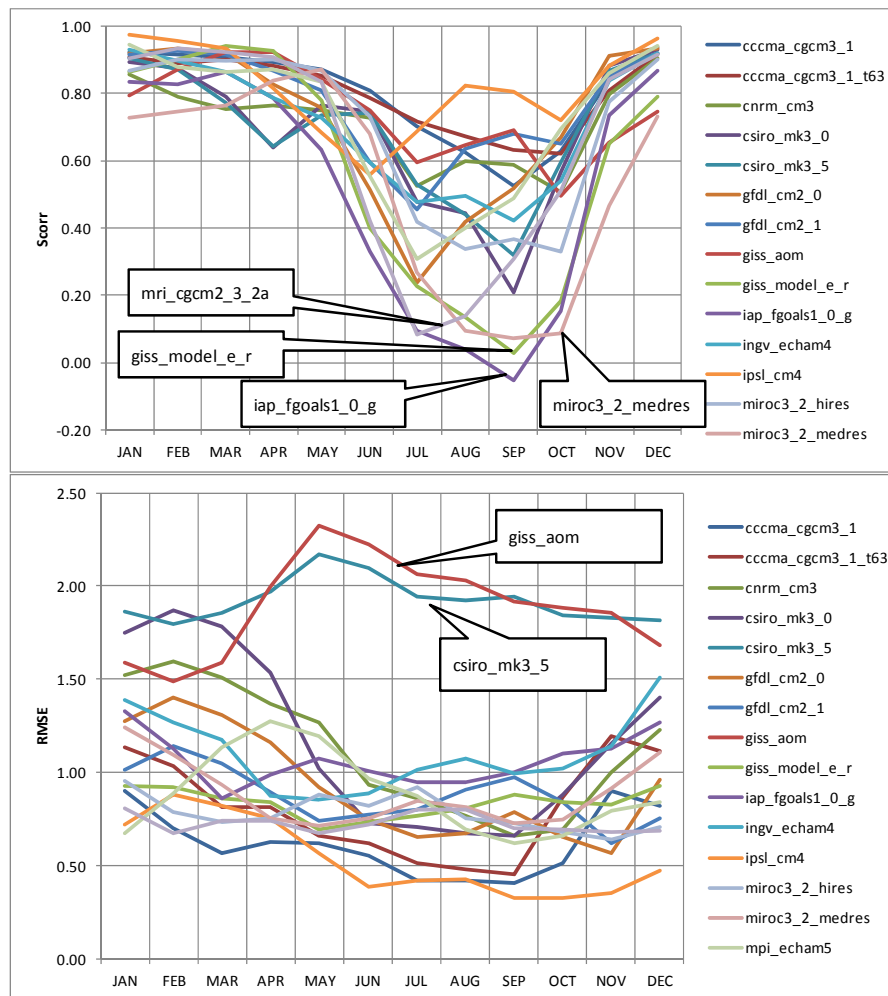
現況気候の再現性の観点から 6 つの GCM が選定された。GCM の選出にあたっては、雨季の降雨の再現性に優先順位をおいて選出された。この 6 モデルについて日気温のバイアス補正と計画対象年の気候推定を実施した。6 つの GCM から推定された将来気温をアンサンブル平均したものをさらにパッシング・マリキナ流域について流域平均したものを図 8.7 に示す。すべての期間、季節について、将来は気温が上昇すると予測されることが分かるが、2055 年気候で現状から 3 度上昇するという結果は極端な結果と思われ、慎重に考慮する必要がある。

図の 8.8 には、観測結果に相当する JRA 再解析値での気温分布の気候値と GCM の気温分布気候値との空間的な相関係数（Scorr）及び平均自乗誤差（RMSE）を示している。非常に大きなモデルごとの評価結果のばらつきがあるとともに、幾つかのモデルでは気温に関して再現性が非常に低くなっていることに留意する必要がある。よって、改めて気温の再現性に着目しての GCM の再選定を行うこととした。気温の GCM の選定プロセスの詳細を表 8.3 に示している。このように気温の再現性に着目して選出された 10 種類の GCM での将来気温予測結果と、降雨に着目した 6 つの GCM の気温の評価結果について図 8.7 に示している。計画対象年次（2040 年）の気候値で見れば、通年的に約 1.2 度の気温上昇となっている。この気温に着目した将来気候の推定結果は灌漑用水需要の算出に用いている。



出典：JICA 調査団

図 8.7 パッシング・マリキナ流域での降雨再現性で選出した 6 つの GCM での将来気温評価結果と気温再現性で選定した 10 の GCM での将来気温評価結果の比較



出典：JICA 調査団

図 8.8 気温再現性に関する全ての GCM の評価結果

表 8.3 気温に関する GCM の選定過程

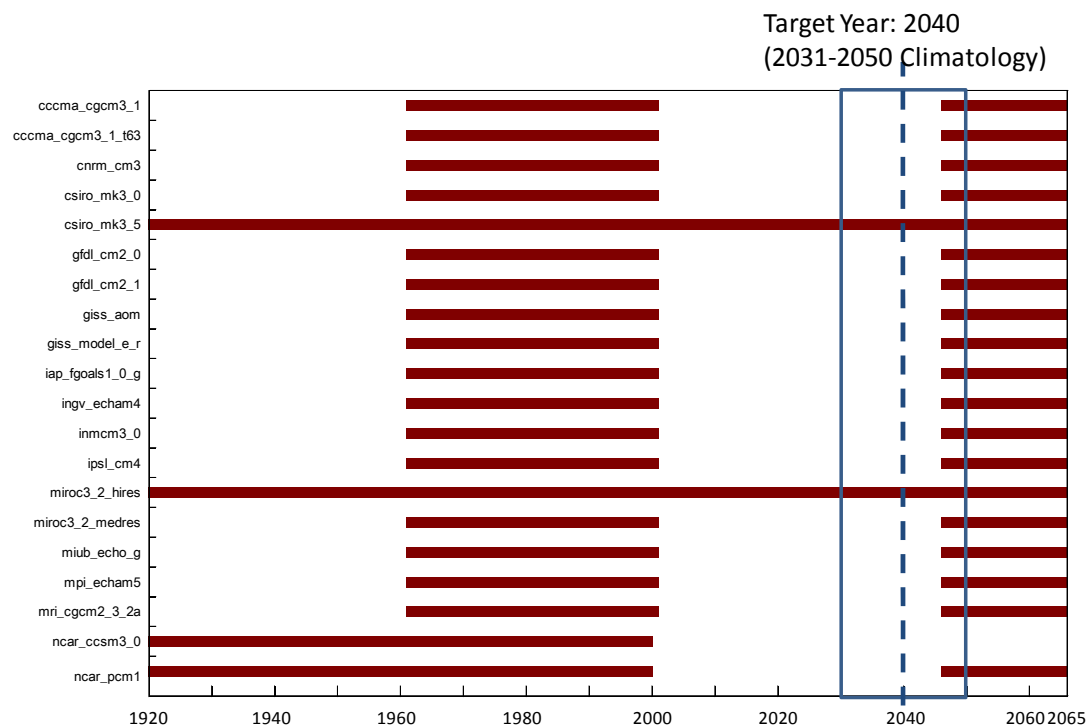
Model	Scorr	RMSE	Overall Evaluation	Current Selection
cccma_cgcm3_1	✓	✓	✓	
cccma_cgcm3_1_t63	✓	✓	✓	
cnrm_cm3	✓	✓	✓	
csiro_mk3_0	✓	✓	✓	✓
csiro_mk3_5	✓			
gfdl_cm2_0	✓	✓	✓	✓
gfdl_cm2_1	✓	✓	✓	✓
giss_aom	✓			
giss_model_e_r		✓		
iap_fgoals1_0_g		✓		
ingv_echam4	✓	✓	✓	✓
ipsl_cm4	✓	✓	✓	✓
miroc3_2_hires	✓	✓	✓	
miroc3_2_medres		✓		✓
mpi_echam5	✓	✓	✓	
mri_cgcm2_3_2a		✓		

注： チェックマークのあるものが各指標から選出される GCM。最終的に相関係数と平均自乗誤差の両指標を満足する GCM が選定され、“Overall Evaluation”の欄に示されている。一方、“Current Slection”には、降雨の再現性で選出された 6 モデルが表示されている。

出典： JICA 調査団

8.5 計画対象年の気候推定

本調査が対象とする計画年次は 2040 年である。気温及び降雨の 2031 年から 2050 年の 20 カ年の日データが計画年次における気候変動影響評価のために不可欠である。しかしながら、GCM による計算結果として、日データが入手可能な期間は大部分のモデルにおいて 2046 年から 2065 年の 20 カ年に限られる。つまり、2040 年の計画対象年次を検討するために必要となる 2031 年から 2050 年の 20 カ年の日雨量データのうち、最初の 15 カ年が不明となっている。一方、世界各国で検討された GCM のうち、2 つの GCM では現状計算から連続的に日データが入手可能となっている。各 GCM の日データ存在状況を図 8.9 に示す。



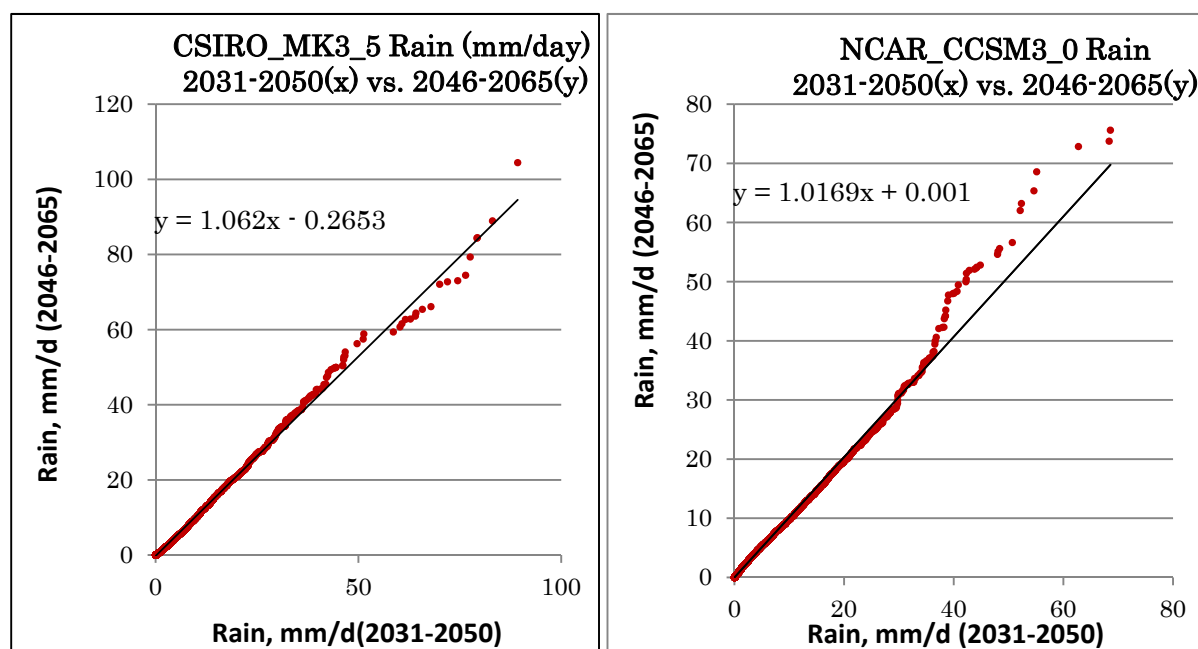
出典：JICA 調査団

図 8.9 CMIP3 における日データ存在状況と本調査の計画対象年次を評価するために必要な期間

本調査において別途実施されている「気候変動影響評価及び流出解析」業務では、2040 年気候の推定方法として、以下の方法を提唱している。

1. 対象とする 20 カ年（2031 年から 2050）の出力結果が存在する 2 つの GCM（csiro_mk3_5, ncar_ccsm3_0）の結果について、2031-2050 の気候値と 2045-2065 の気候値を比較する。
2. 降順に並び替えられた日雨量データ同士を両期間の同ランクについて比較したスクATTERプロットを作成する。図では横軸に 2031-2050 年のデータ、縦軸に 2046-2065 年のデータをプロットしている。
3. 回帰直線を 2 つの期間を比較したプロットから作成する。
4. 回帰直線の勾配が 2 つの期間の気候の差異ととらえ、2055 気候のバイアス補正済み降雨で実施した流出解析結果にこの勾配を乗じることで 2040 年気候の河川流量推定とする。

図 8.10 は「気候変動影響評価及び流出解析」業務の報告書より、2 つの GCM から作成した回帰直線を引用したものである。



出典：「気候変動影響評価及び流出解析」業務

図 8.10 計画対象年次を含む 20 カ年のデータが入手可能な 2 つの GCM の 2031-2050 年及び 2046-2065 年の比較結果と回帰直線

一方、IPCC のデータ配信センター(<http://www.ipcc-data.org>)では、全てのモデルの月平均値の入手が可能となっている。本調査における流出解析の目的は、対象河川における低水流況の定量的な評価である。月単位という時間解像度は水収支解析において十分な時間解像度であり、それぞれの GCM での 2040 年気候における月平均値と 2055 年気候での月平均値の比を用いて流出解析結果を補正することは、現状で入手可能な情報を最大限用いての計画年次流況の推定といふことができる。実施のプロセスについては第 9 章で述べる。

8.6 気候変動の影響評価

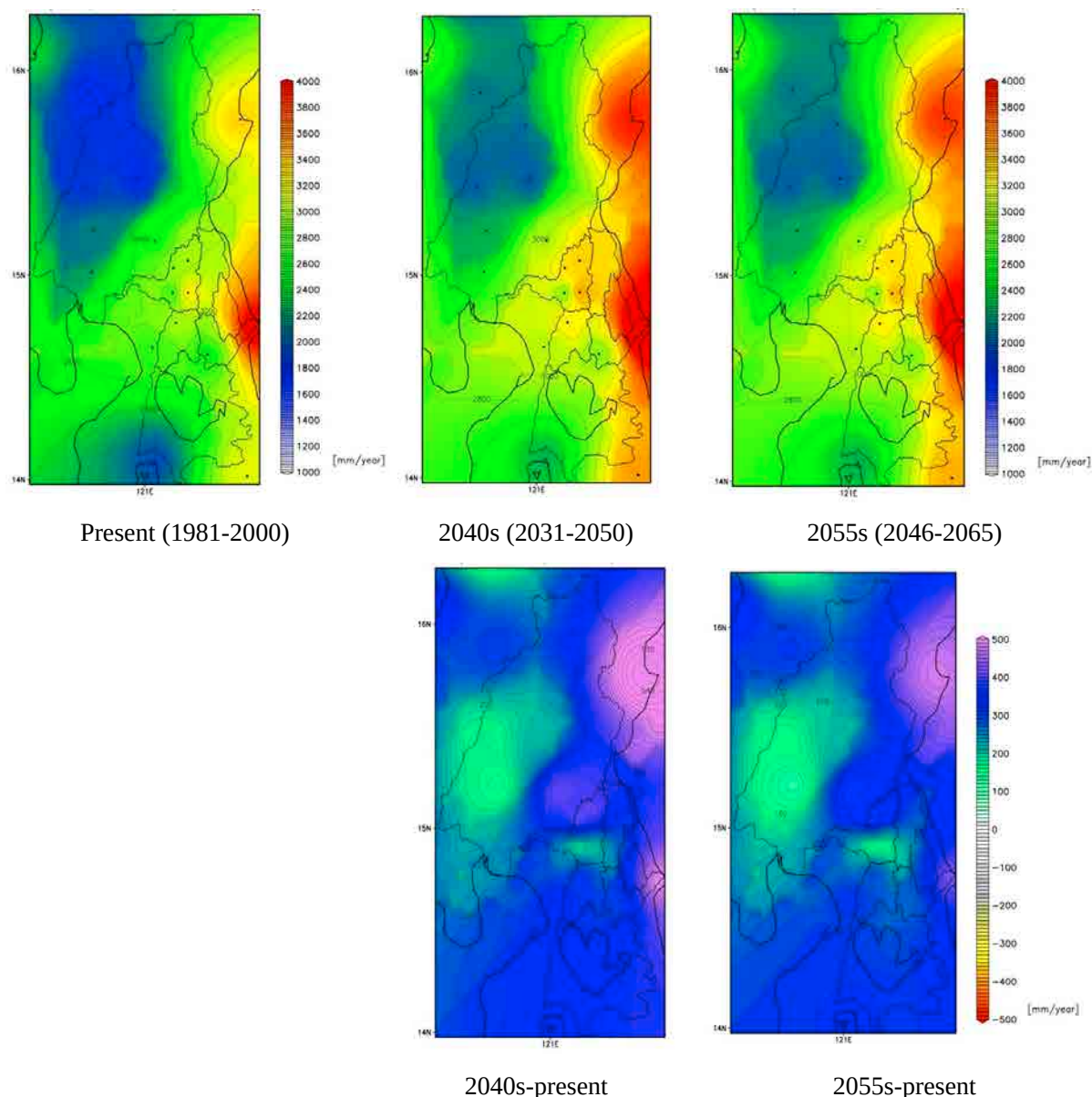
8.6.1 降雨に対する気候変動影響評価

降雨のバイアス補正は、本調査において別途実施された「気候変動影響評価及び流出解析」業務（以降で「流出解析業務」と称する）において実施されており、その過程の詳細は流出解析業務報告書で詳述されている。降雨の 2040 年における状況を把握するために、同報告書で作成されたバイアス補正済みの 2050 年気候（2046 年から 2065 年）降雨データに対し、対象モデルそれぞれの 2040 年気候（2030 年から 2050 年）における月平均値との月平均値から計画年次降雨を推定した。

年間雨量について、現状（1981 年から 2000 年）、2040 年気候、2055 年気候の差を図 8.11 に示す。また、季節ごとの比較を図 8.12 および 8.12 に示す。これらの図で用いているデータは、降雨の再現能力で選定された 6 つの GCM の出力についてバイアス補正を行い、その結果をアンサンブル平均したものである。

これらの図によれば、年間降雨量は対象領域全域にわたって増加することが予測される。特に雨季（6月から11月）の将来に向けての降雨の増加量は乾季のものと比べて特に大きいと考えられる。

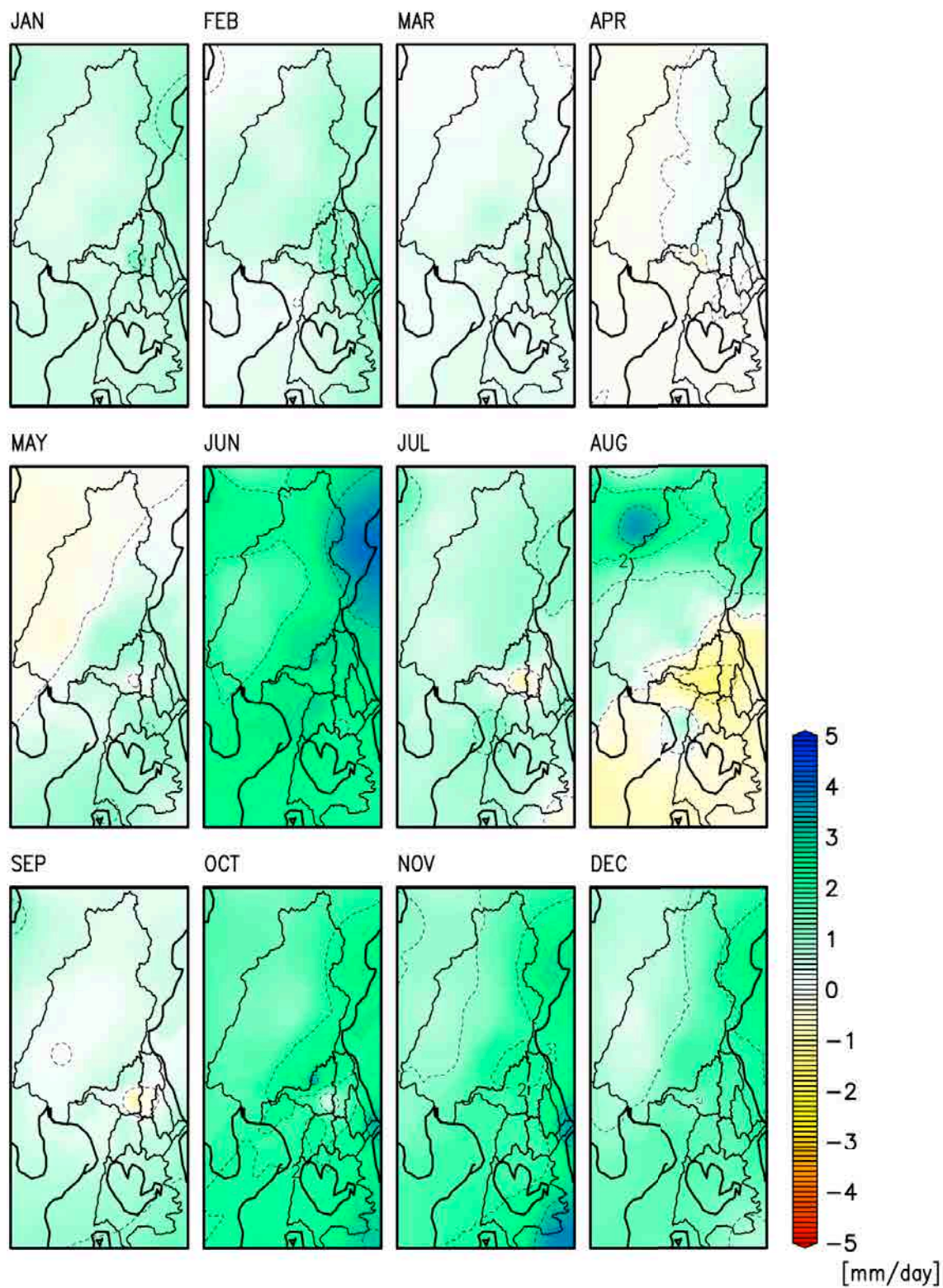
フィリピン海に面する地域の年間降雨量の増加量はおよそ 500mm/yr と推定され、この地域の年間降雨量の 10%から 15%に相当する。対象領域の西側に位置するパンパンガ川流域では、およそ 100mm/yr の増加が見込まれ、これはパンパンガ川流域のおよそ 6%に相当する。全体的に見て、現状で降雨量の多い地域ほど将来に向けての降雨の増加量が多くなっている。2040年気候と 2055年気候での比較では大きな差異が認められない。



注： 上段の図は現状、2040年気候、2055年気候の年間雨量分布を示しており、下段の図は現状からのそれぞれの年次への差分[mm/yr]を示している。

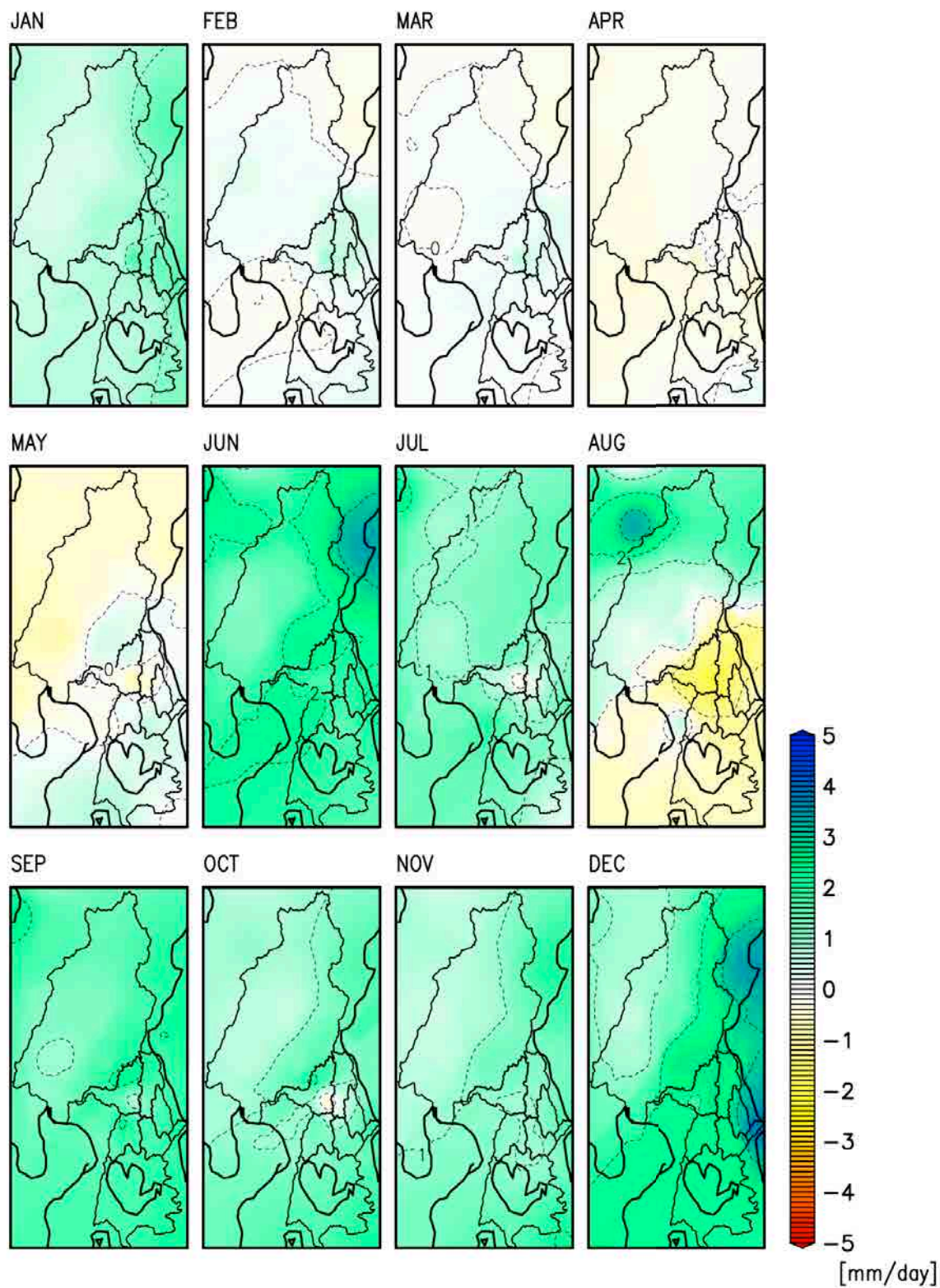
出典： JICA 調査団

図 8.11 現在（1981-2000）、2040年気候（2031-2050）及び2055年気候（2046-2065）の年間降水量の比較



出典：JICA 調査団

図 8.12 2040 年気候と現況気候での月平均雨量の差分



出典：JICA 調査団

図 8.13 2055 年気候と現況気候での月平均雨量の差分

8.6.2 地表気温に対する気候変動影響評価

現状、2040 年気候及び 2055 年気候での年間平均気温の比較を図 8.14 に示す。これらは気温の再現性で選出された 10 の GCM のバイアス補正結果のアンサンブル平均値で作成している。2040 年気候のデータは、IPCC データ配信センターから入手される月平均気温データを用いた簡易な推定である。

計画対象年次である 2040 年気候下での年間平均の地表気温は現況から 1.8～1.9 度上昇すると推定された。現況気候からの計画対象年次気候の差を図 8.14 に示す。月平均値での 2040 年気候に向けての現況からの気温上昇を図 8.15、2055 年気候に向けての差を図 8.16 に示す。

8.6.3 可能蒸発散能に対する気候変動影響評価

流出解析モデルでは、植生分布やエネルギー収支の影響を考慮して地表面上の水分量を追跡してシミュレーションしている。蒸発散量は地表面状況などにも大きく影響を受けている。ここでは、気候変動の影響評価としてわかりやすく評価するために、気温上昇によりどれだけの可能蒸発散能が増加するかを評価した。日気温データから算出が可能なハーモン式を用いて日可能蒸発散能を推定した。

Estimation of potential evapotranspiration – Harmon's Equation

$$E_t = 0.14 D_0^2 P_t \text{ [mm/day]}$$

ここで、 E_t は日可能蒸発散能、 D_0 は日中時間の 12 時間に対する比、 P_t は、日平均気温に対する飽和蒸気圧である。

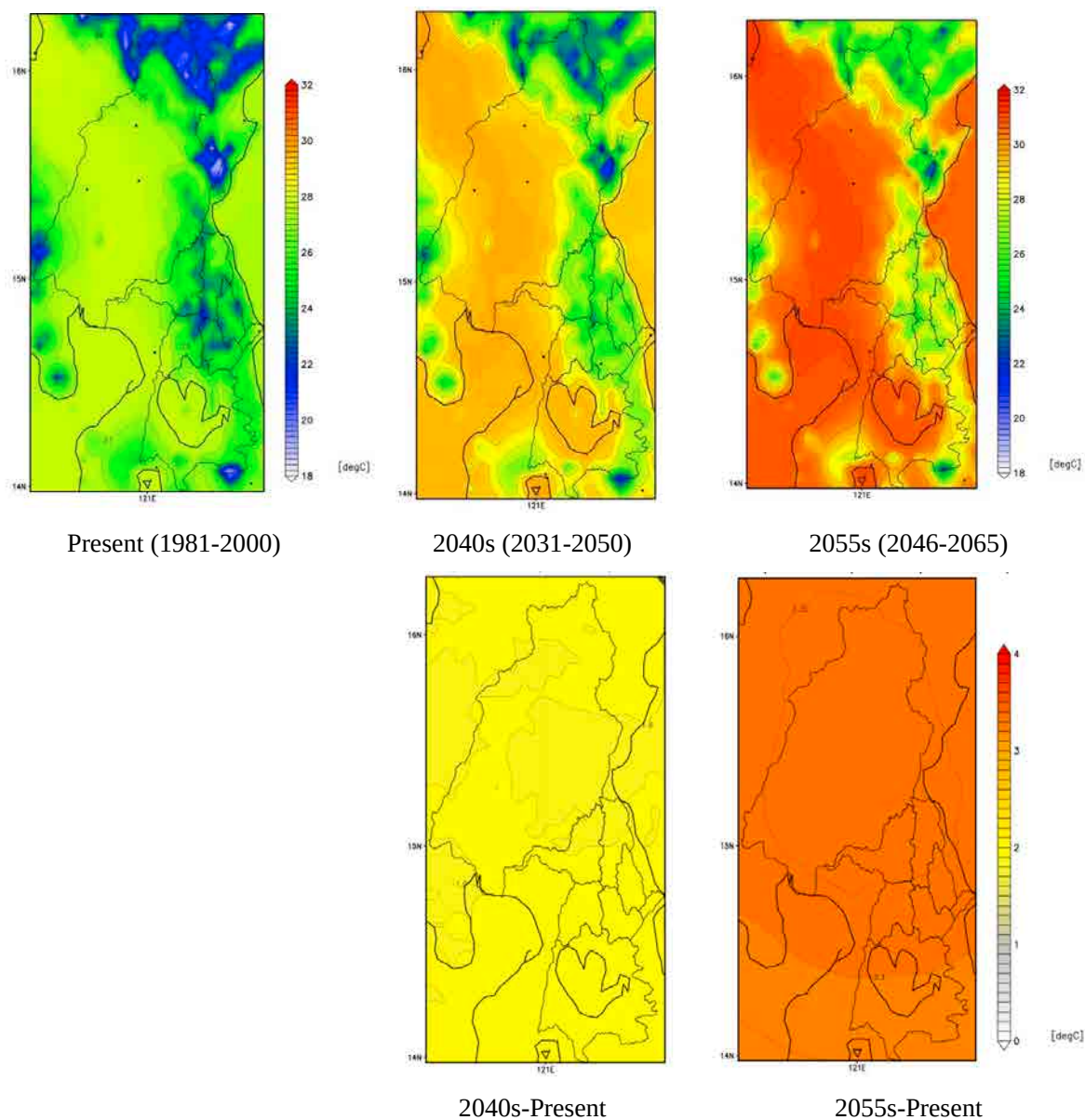
日中時間は対象地点の緯度から以下のように求められる。

$$D = 24 - \frac{24}{\pi} \frac{\arccos\left(\sin\left(0.8333 \frac{\pi}{180}\right) + \sin\left(L \frac{\pi}{180}\right) \sin(P)\right)}{\cos\left(L \frac{\pi}{180} \cos(P)\right)} \text{ [hr]}$$

$$P = \arcsin[0.39795 \cos(0.2163108 + 2.0 \arctan(0.9671396 \tan(0.00860(J - 186)))]$$

ここで、 L は緯度[deg]、 J は 1 月 1 日からの経過日数である。

将来に向けて可能蒸発散能は対象領域全域にわたって増加すると推定される。気温も増加するため当然の帰結である。年間可能蒸発散能での各年代の比較を図 8.17、月平均値での比較結果を図 8.18、図 8.19 に示している。2040 年気候において、年間可能蒸発散能の増加量は平地で 140 mm/yr、山地で 80 mm/yr と推定される。2055 年気候では気温上昇の予測値が大きいことから、年間可能蒸発散能の現況気候からの増加量は 2040 年気候の約 2 倍となっている。



注： 図の上段は現況、2040 年気候、2055 年気候での年間平均地表気温について抽出された 10 の GCM でのアンサンブル平均値を示している。下段は現況からの各年代までの気温上昇量を示している。

出典： JICA 調査団

図 8.14 現況（1981-2000）、2040 年気候（2031-2050）、2055 年気候（2046-2065）での年間平均地表気温アンサンブル平均値の比較

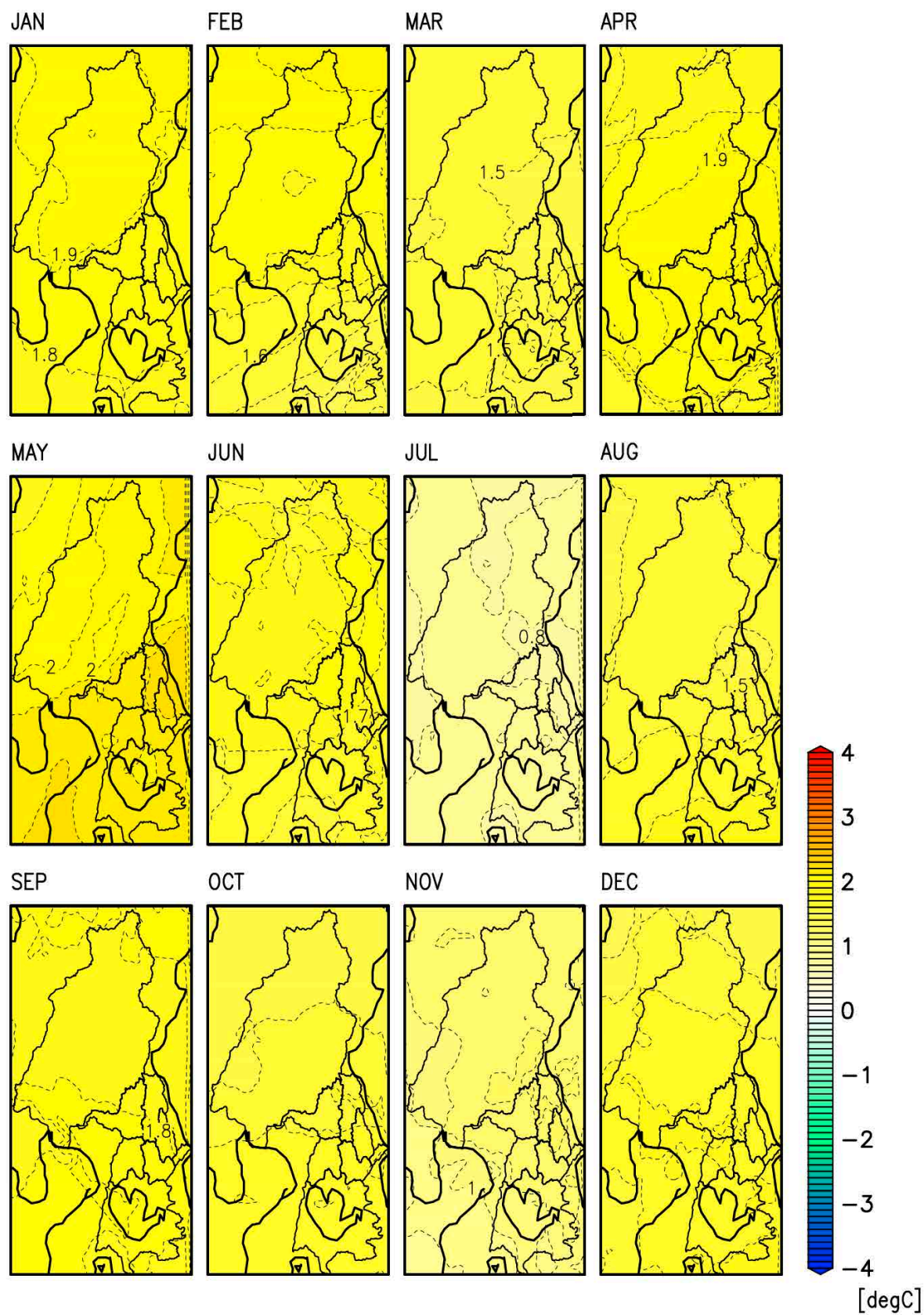


図 8.15 2040 年気候各月平均気温アンサンブル平均値の現況気候からの気温上昇量の比較

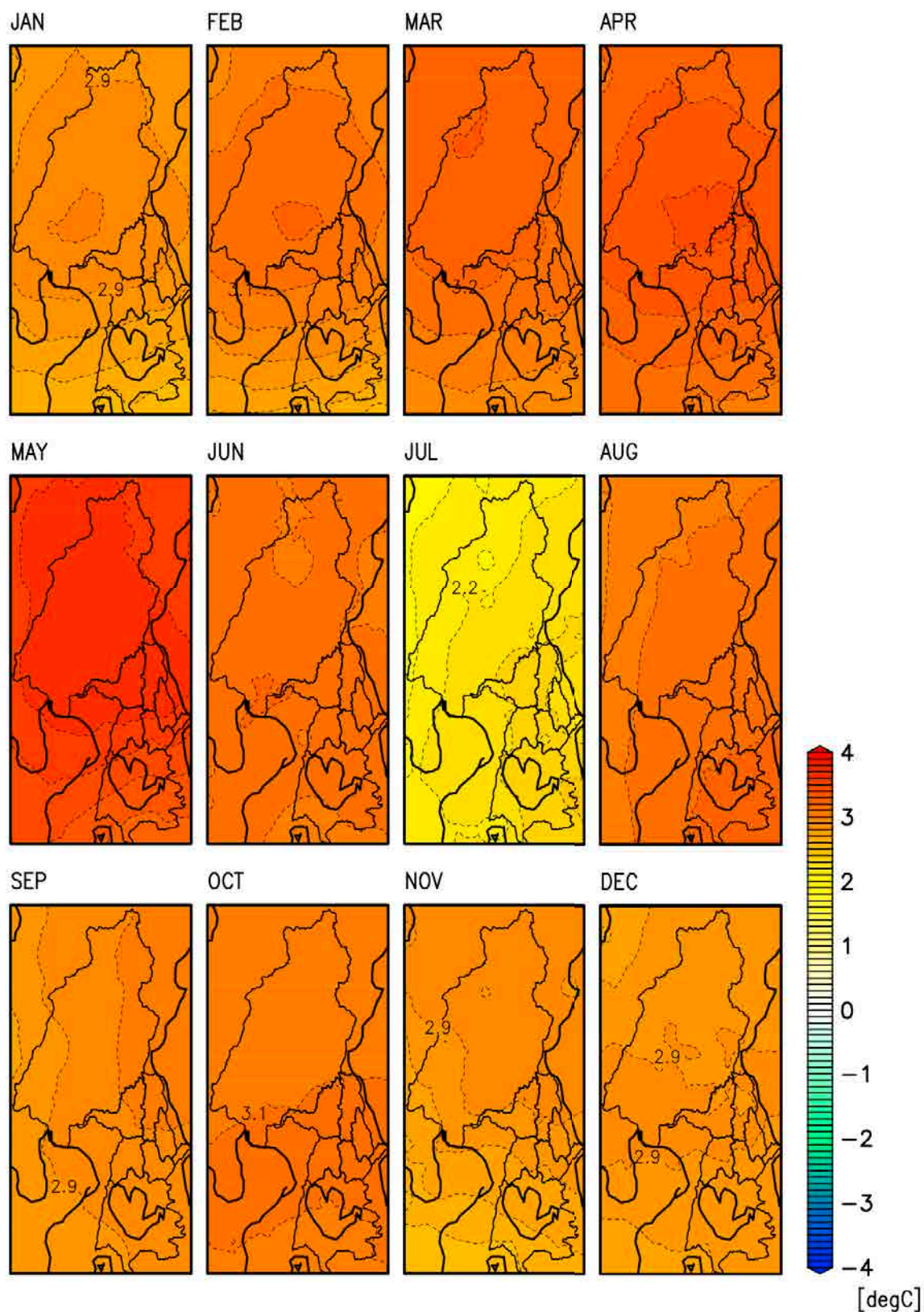
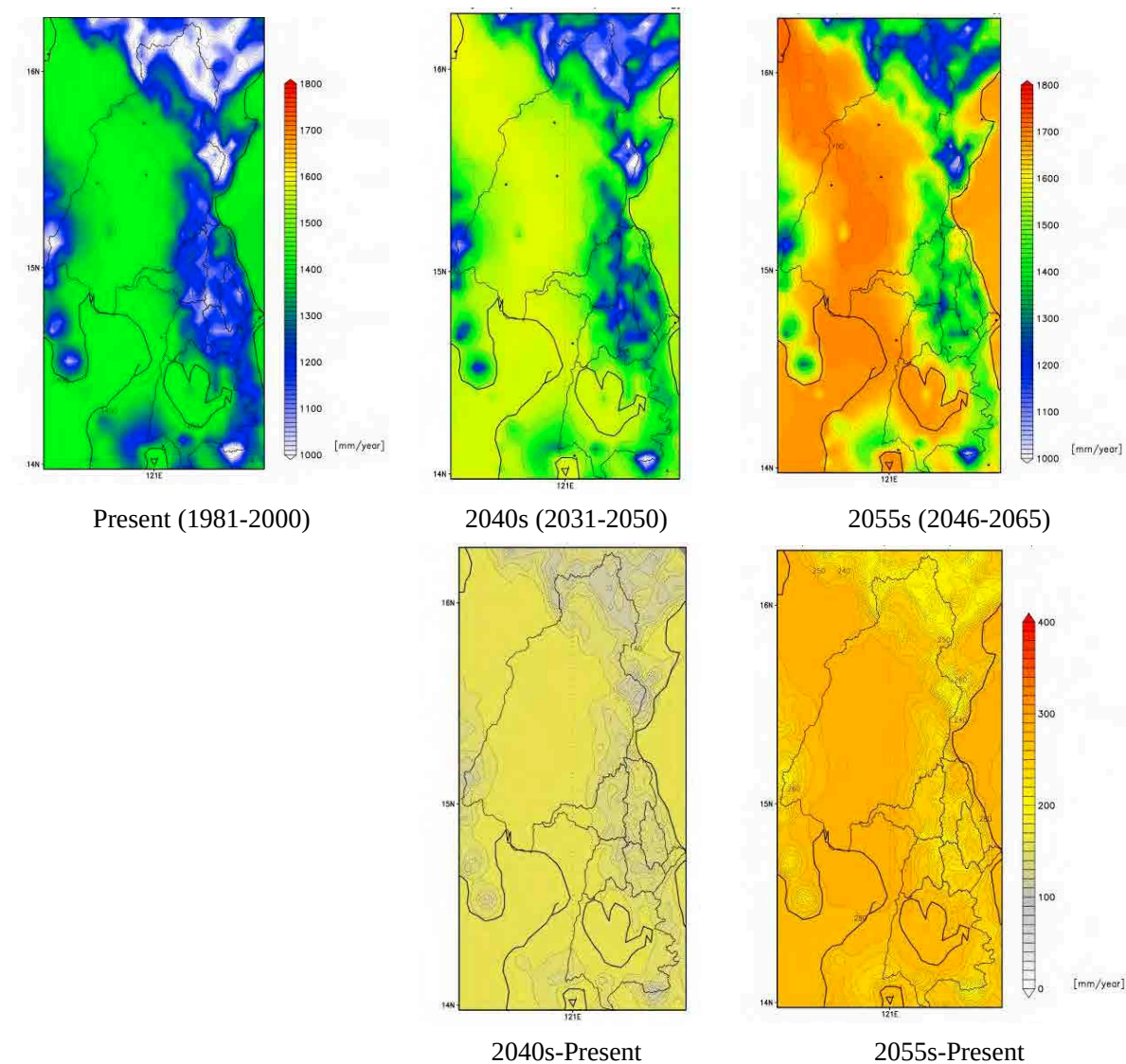


図 8.16 2055 年気候各月平均気温アンサンブル平均値の現況気候からの気温上昇量の比較



注： 図の上段は現況、2040 年気候、2055 年気候での地表気温の再現性から抽出された 10 の GCM より算出した年間平均可能蒸発散能のアンサンブル平均値を示している。下段は現況からの各年代までの可能蒸発散能の増加量を示している。

出典： JICA 調査団

図 8.17 現況（1981-2000）、2040 年気候（2031-2050）、2055 年気候（2046-2065）の年間平均可能蒸発散能のアンサンブル平均値の比較

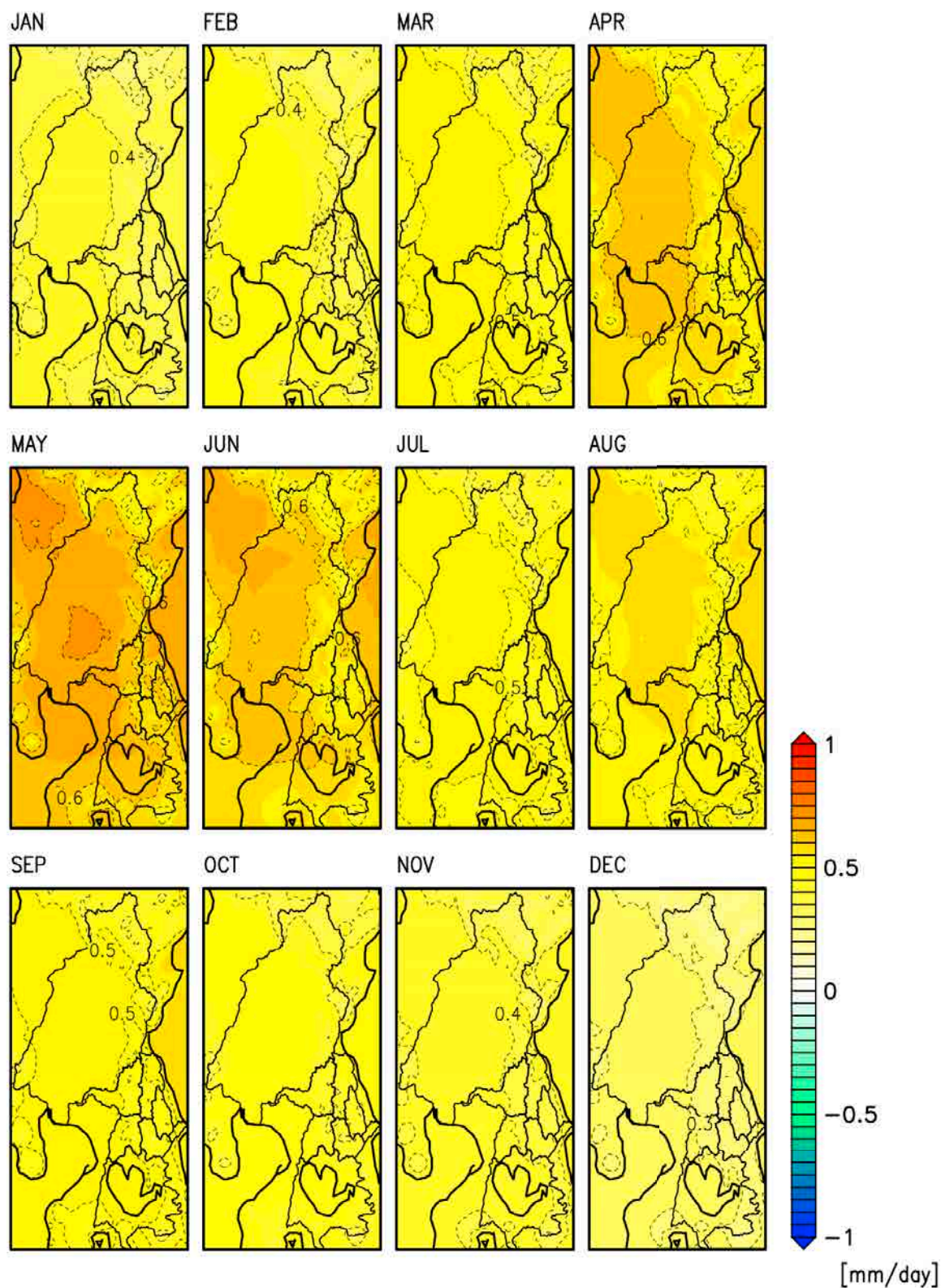


図 8.18 2040 年気候各月平均気温アンサンブル平均値の現況気候からの可能蒸発散能増加量の比較

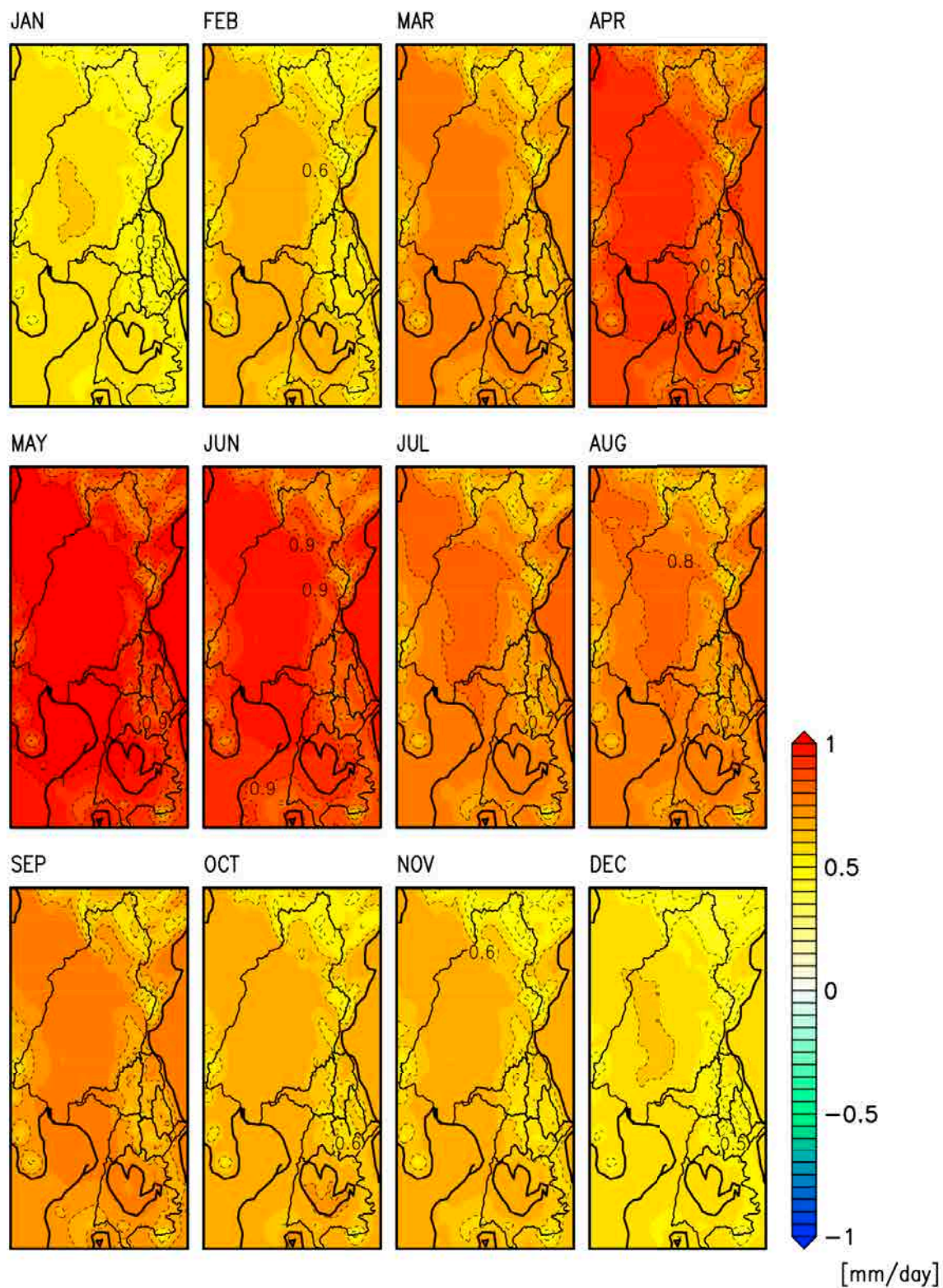
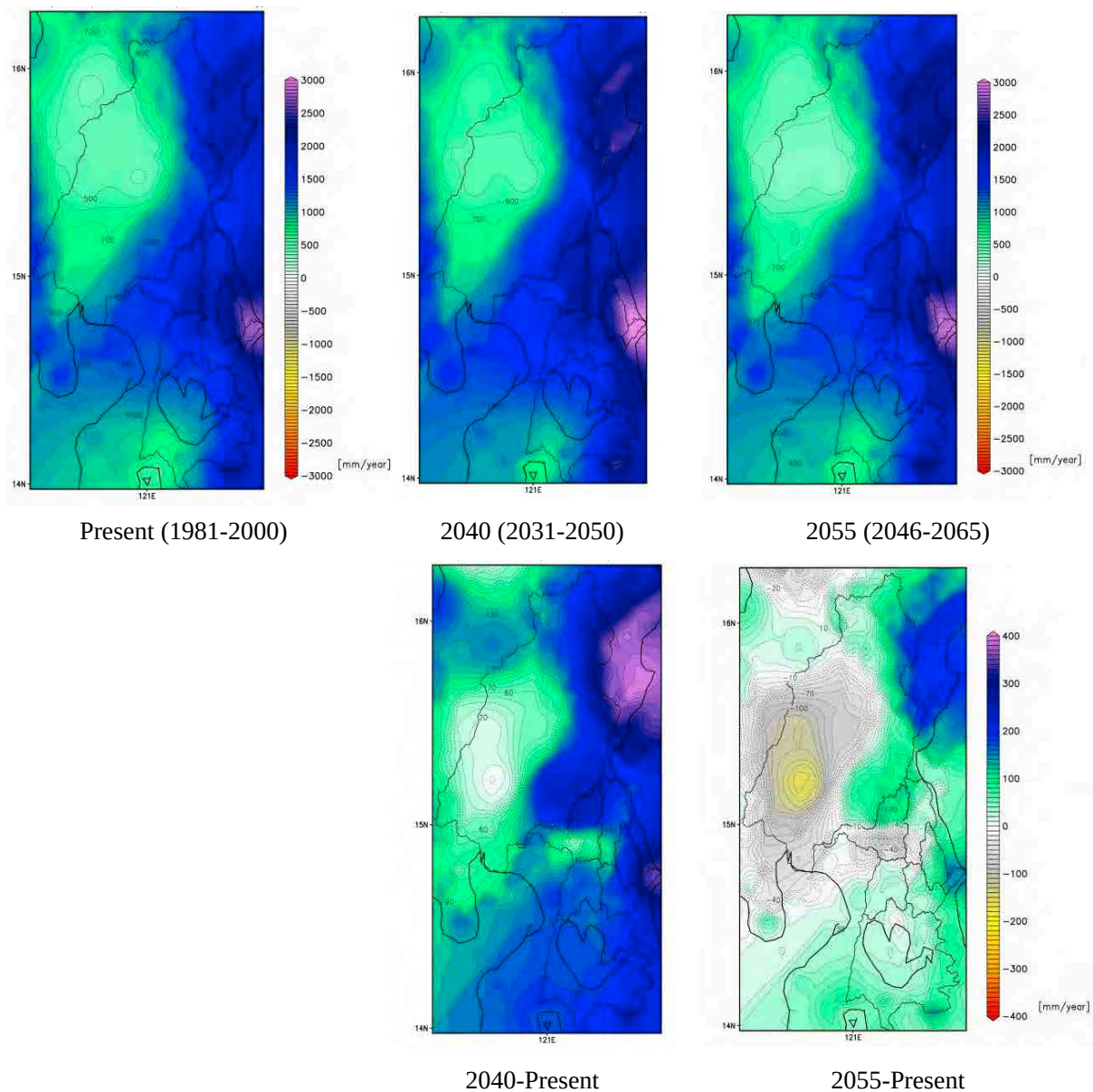


図 8.19 2055 年気候各月平均気温アンサンブル平均値の現況気候からの可能蒸発散能増加量の比較

8.6.4 P-E（降雨量－可能蒸発散能）への気候変動影響評価

降雨量から可能蒸発散能を差し引いた P-E は水資源に与える気候変動のインパクトの総括的な指標と見なせる。2040 年気候及び 2055 年気候の現況気候からの変化を図 8.20 に示す。また、図 8.21 に各月平均値の現況気候から 2040 年気候の変化分、図 8.22 には 2055 年気候の変化分を示す。

年間の P-E は、現況気候から比べて 2040 年気候では増加することが予測されるが、パンパンガ川流域西側の増加量は少なく、現況気候のものと大差がない。一方、2055 年気候ではパンパンガ川流域のほとんどすべての区域で現況気候と比べて P-E が減少し、乾燥のインパクトが与えられると見られる。ここでの比較では、「可能」蒸発散能を用いていることに留意する必要がある。つまり、水が常時十分にあれば蒸発できる量を示しているものである。実際に蒸発する量は流出モデルの内部で算出され河川流量に反映される。これについては次章で述べる。



注： 図の上段は現況、2040 年気候、2055 年気候でアンサンブル平均された平均年間降雨量から可能蒸発散能を差し引いたもの（P-E）を示している。下段は、現況からの各年代までの P-E の増加量を示している。
出典： JICA 調査団

図 8.20 現況（1981-2000）、2040 年気候（2031-2050）、2055 年気候（2046-2065）の P-E（降雨量－可能蒸発散能）年間平均値のアンサンブル平均値の比較

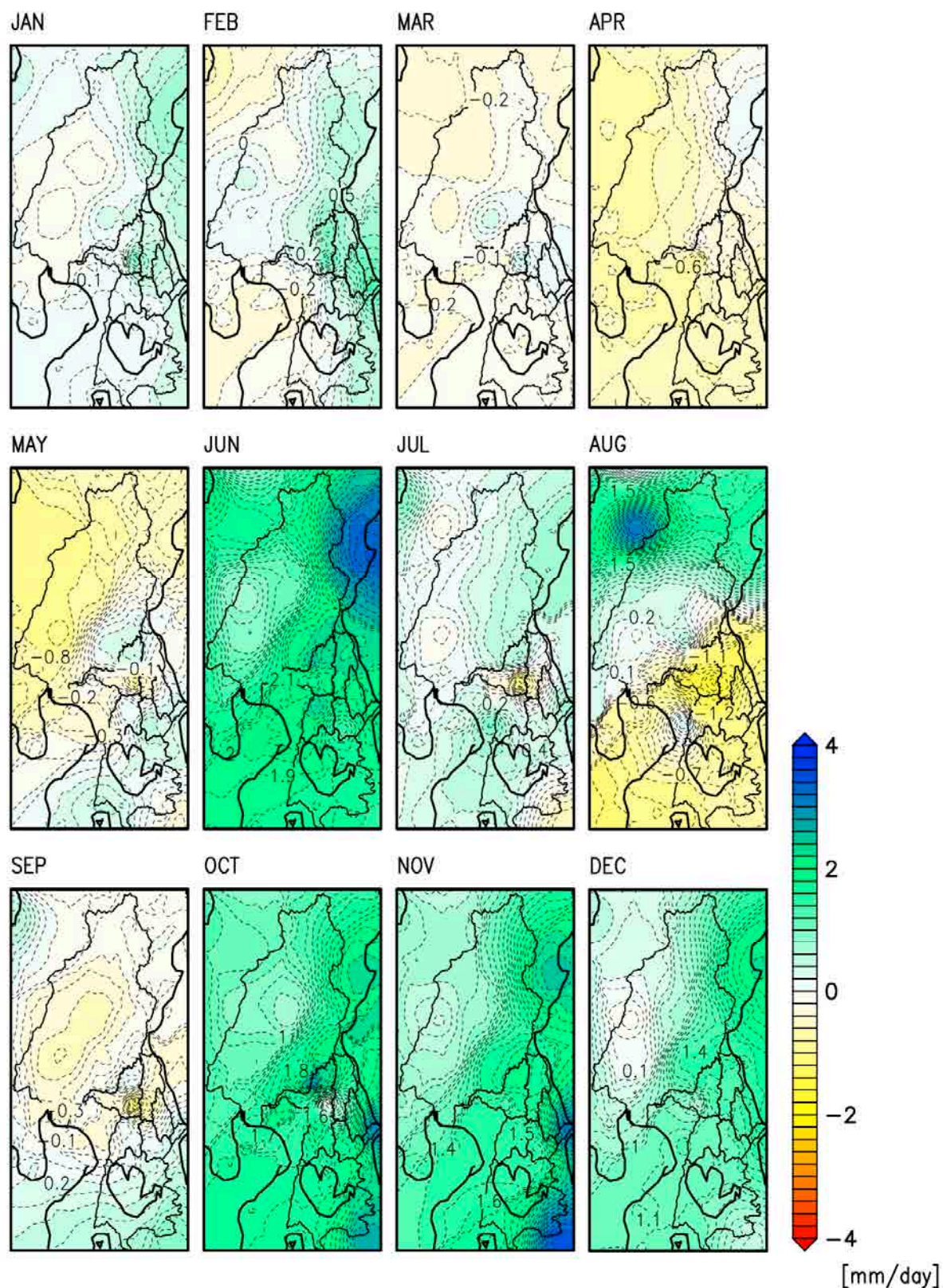


図 8.21 2040年気候各月平均の P-E アンサンブル平均値の現況気候からの可能蒸発散能増加量の比較

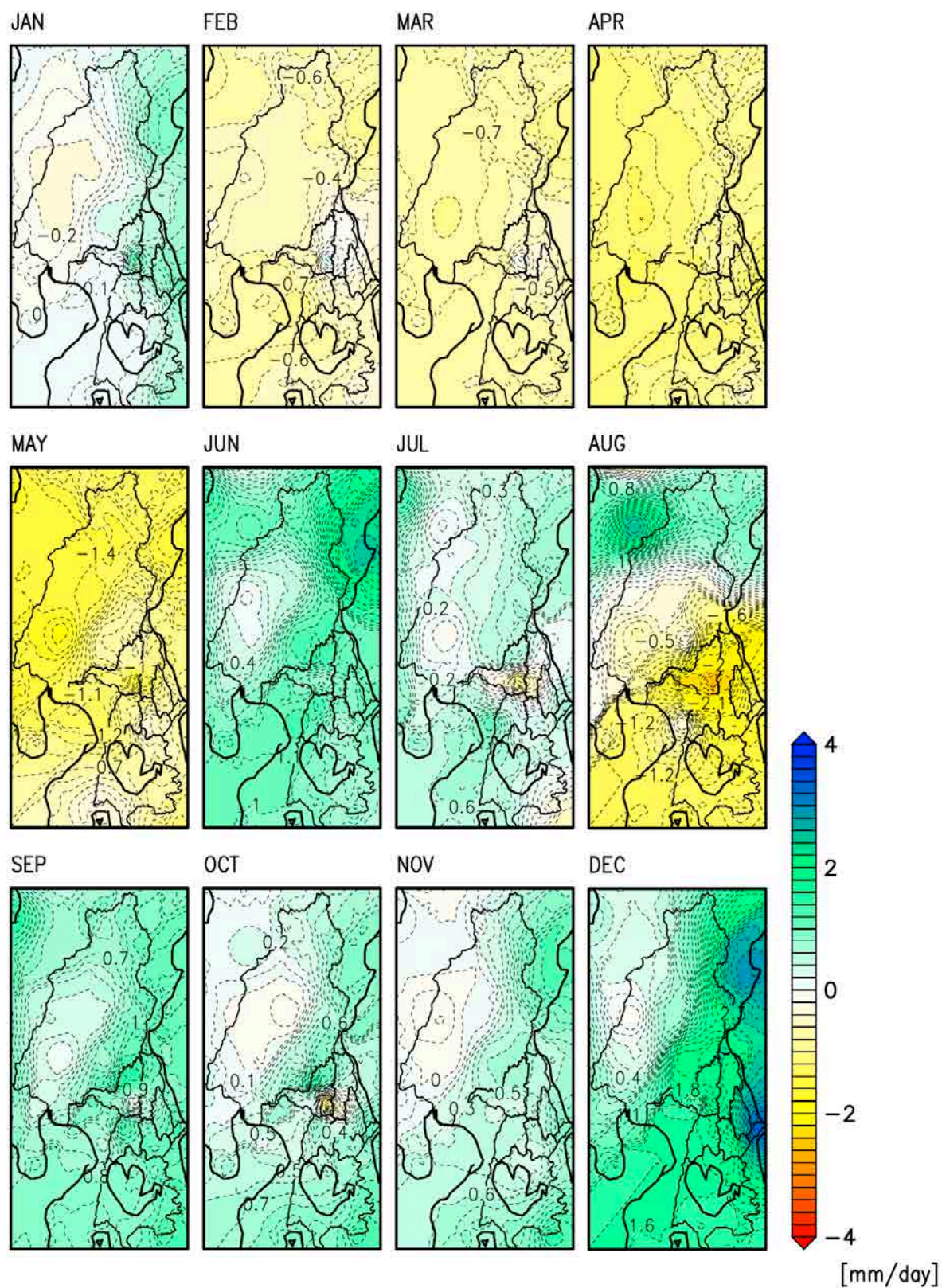


図 8.22 2055 年気候各月平均の P-E アンサンブル平均値の現況気候からの可能蒸発散能増加量の比較

8.6.5 対象流域に気候変動が与える影響

対象 6 流域の流域平均値を各月ごとに算出した。対象とした気象項目は、これまで面的に評価してきた項目と同じく、降雨量、気温、可能蒸発散能および P-E（降雨量－可能蒸発散能）である。評価結果を図 8.23 から図 8.26 に示す。2040 年気候、2055 年気候の評価値は選定された GCM でのアンサンブル平均値であり、降雨については降雨の再現性で選定した 6 つの GCM、気温、可能蒸発散能については気温の再現性で選定した 10 の GCM のアンサンブル平均値である。

(1) 降雨量

各対象流域について、降雨の季節変動はバイアス補正によって再現されていることが分かる。将来に向けての降雨の季節変動の変化は大きくなく、将来も現況の季節変動をなぞるような降雨傾向になると見られる。各月の降雨量は現況に比して増加すると見られ、特に 5 月から 11 月にかけての雨季での降雨増加量が多い。

流域ごとでの将来に向けての変化の仕方に大きな差は認められない。これは GCM のグリッドサイズが対象流域のサイズに比べて粗いため、局所的な流域間の差異が十分に評価できていない可能性もあり、留意する必要がある。しかしながら、GCM による予測は、現時点で最先端の技術であり、これらの出力を十分に活用して得られた評価結果は将来十分に生じ得ると考えてよい。

(2) 地表気温

対象流域での平均気温の上昇量は 2040 年気候に向けて 1.5 度から 1.8 度程度、2055 年気候に向けて 3 度程度と見積もられる。年間を通じてほぼ一様に気温が上昇すると予測され、気温の上昇パターンや季節変動について、流域間の差異は特に無い。

(3) 可能蒸発散能

可能蒸発散能の将来に向けての変化は、地表気温で述べたものと同様である。地表気温から可能蒸発散能を算出しているため、当然の帰結でもある。2040 年気候に向けての可能蒸発散能の現在気候からの増加量は、0.2 mm/day から 0.5 mm/day であり、2055 年気候までの増加量は 0.8 mm/day から 1.0 mm/day である。

(4) P - E（降雨量－可能蒸発散能）

P-E は、後に述べる水文学的な検討での外力としての対象流域の気候に与えられる気候変動影響評価の指標として考えることができる。1 月から 4 月の乾季では、将来において P-E の値が負となっている。P-E が負となるのは、将来において乾燥の圧力が大きくなるという意味であり、水資源計画において留意すべきである。アゴス川流域では P-E が負となるのが 3 月、4 月の 2 ヶ月だけであり、他の流域よりも乾燥の圧力は少なめである。

全体を通じて雨季の P-E は増加する。すなわち、入力される水が増加するということであり、将来の変化は水資源管理上好ましい。

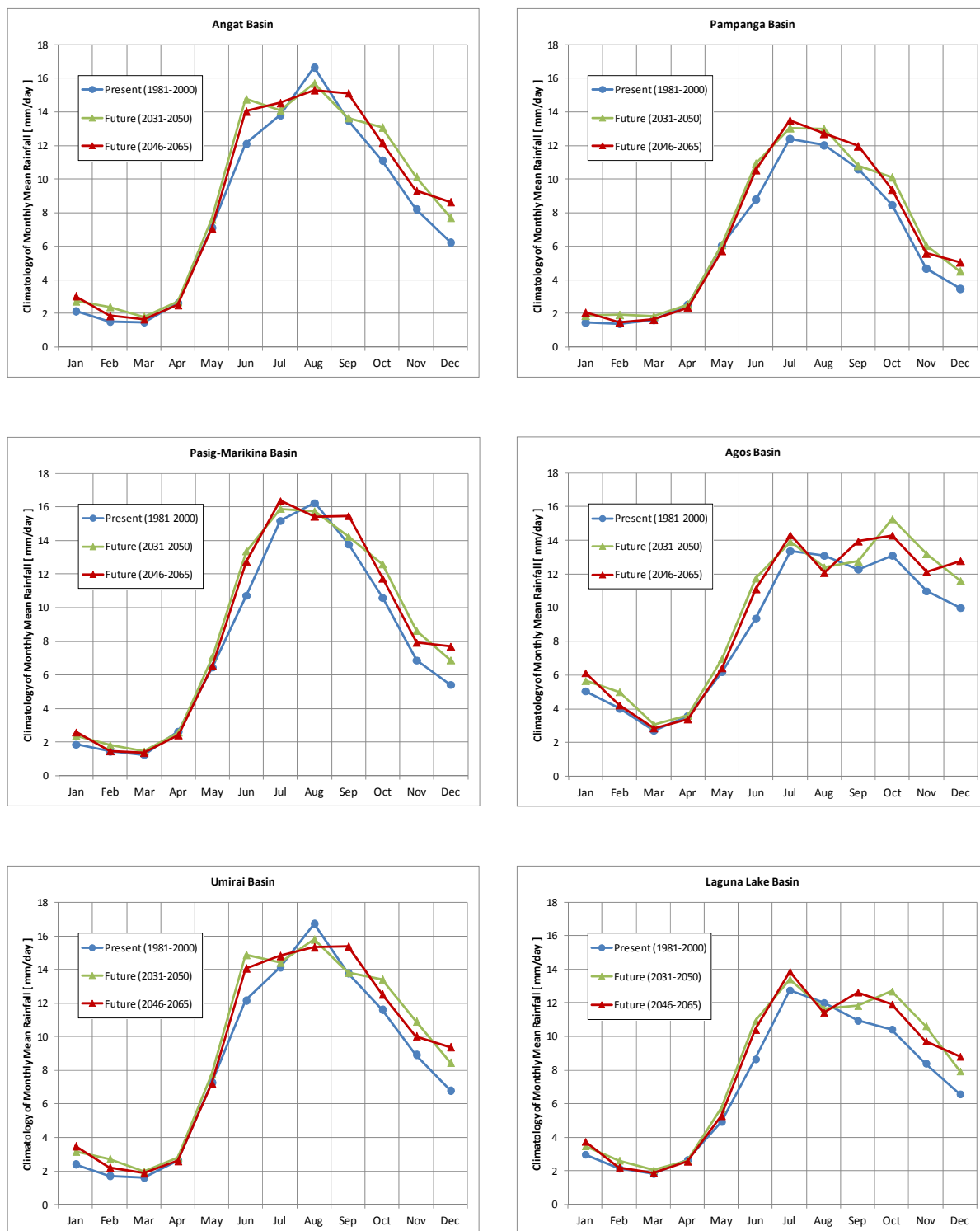


図 8.23 降雨の流域平均値における気候変動影響評価結果

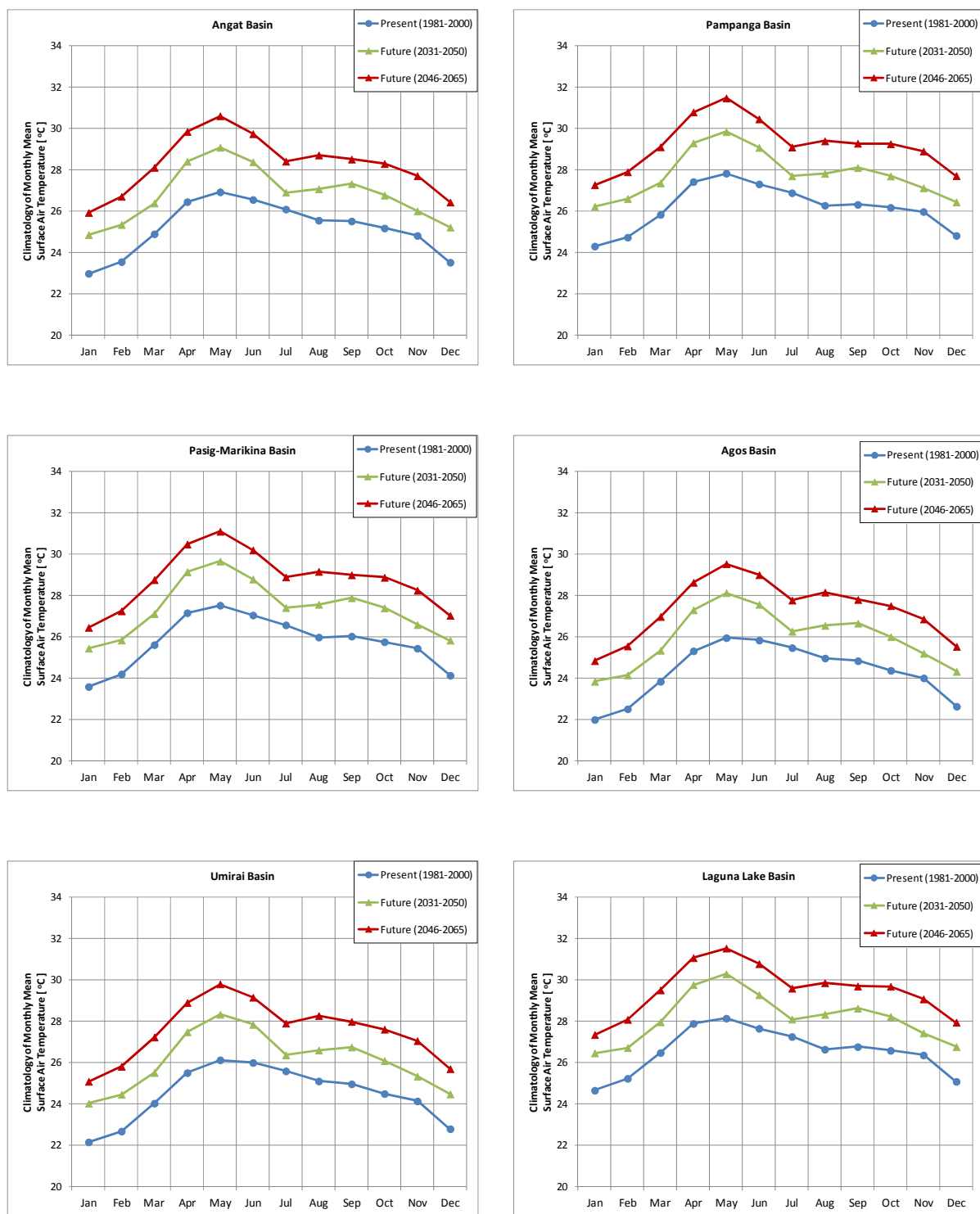


図 8.24 地表気温の流域平均値における気候変動影響評価結果

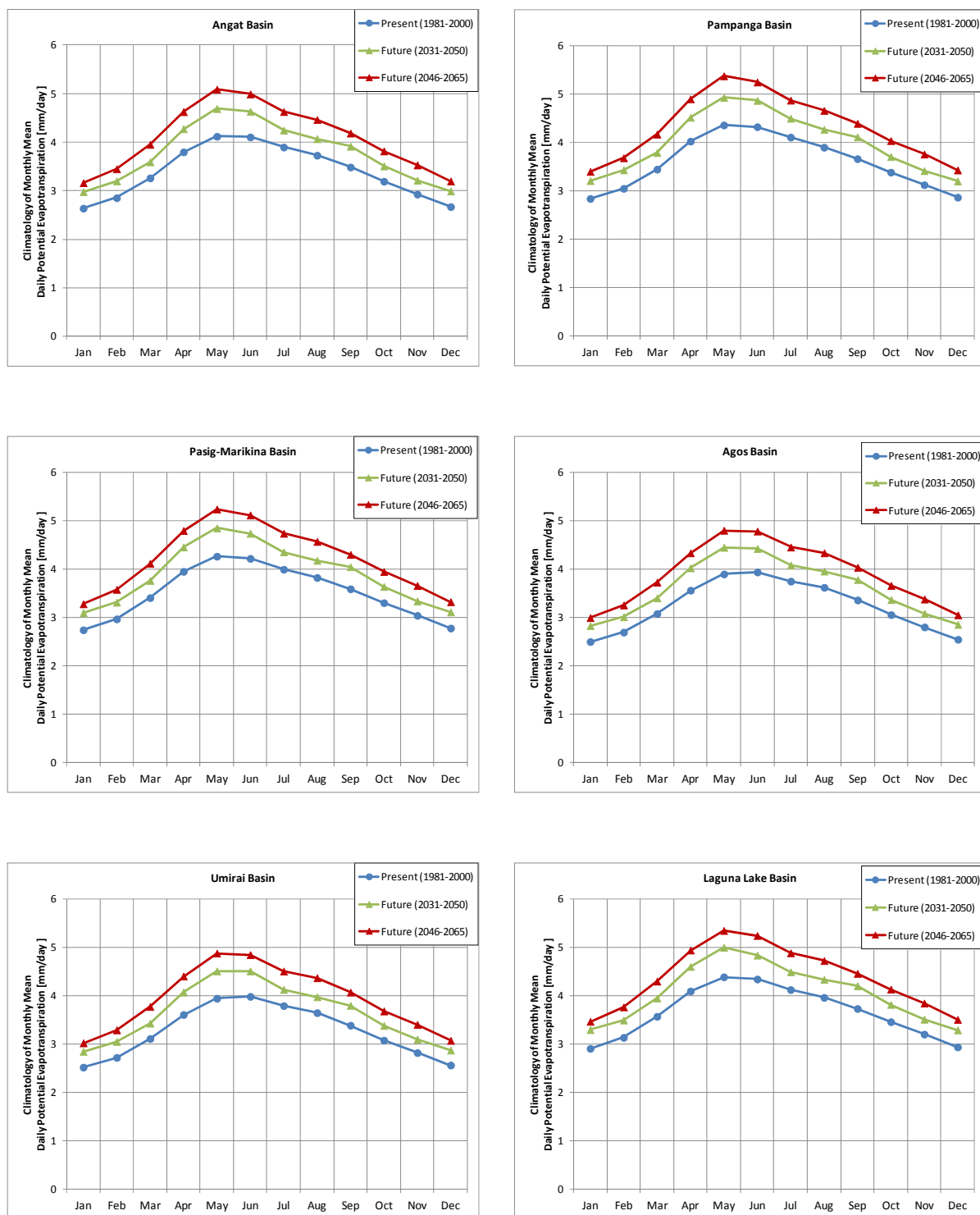


図 8.25 可能蒸発散能の流域平均値における気候変動影響評価結果

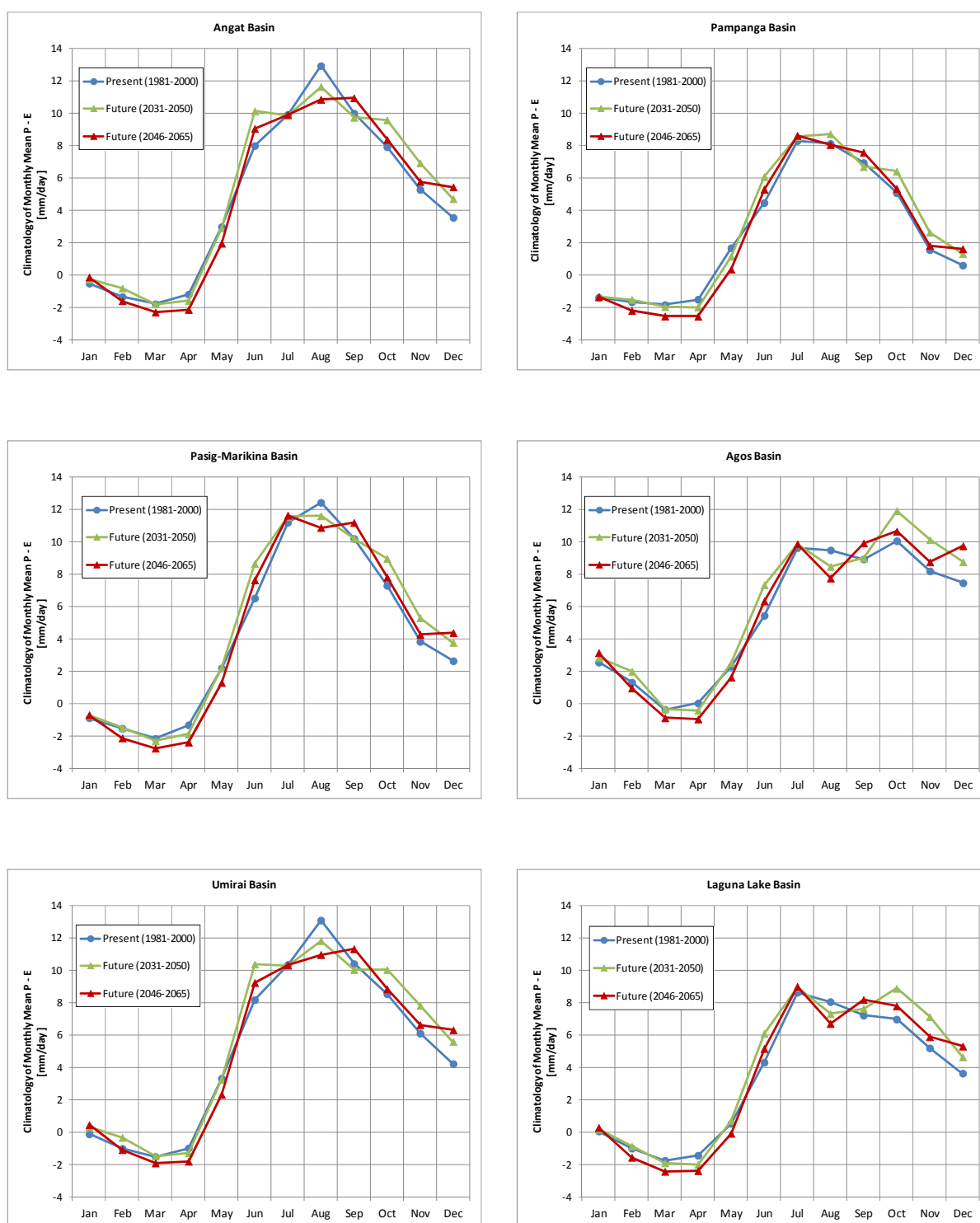


図 8.26 P-E（降雨量－可能蒸発散能）の流域平均値における気候変動影響評価結果