

チュニジア国

農業省

チュニジア国

メジェルダ川に係る気候変動影響を考慮した

統合流域管理・洪水対策検討調査

メジェルダ川流域気候変動影響評価

最終報告書

平成 25 年 5 月
(2013 年)

独立行政法人
国際協力機構 (JICA)

国立大学法人 東京大学

環境
JR
13 - 133

チュニジア国

農業省

チュニジア国

メジェルダ川に係る気候変動影響を考慮した

統合流域管理・洪水対策検討調査

メジェルダ川流域気候変動影響評価

最終報告書

平成 25 年 5 月
(2013 年)

独立行政法人
国際協力機構 (JICA)

国立大学法人 東京大学

チュニジア国

メジェルダ川に係る気候変動影響を考慮した統合流域管理・洪水対策検討調査：
メジェルダ川流域気候変動影響評価目次

目次	1
略語対照表	2
I 業務の概要	5
(1) 本業務の背景、経緯、目的	5
(2) 調査対象地域	6
(3) 業務実施の方針	8
II 業務の内容	10
(1) 計画降雨、基本高水、既存ダムの操作を考慮した計画洪水流量の策定	10
1 計画降雨と基本高水流量の策定	10
1) 計画降雨の策定	10
2) 基本高水流量の策定	27
2 計画洪水流量の策定	35
1) シディサレムダム操作の導入	35
2) ダム操作を導入した場合のダム下流の洪水計画流量	35
(2) メジェルダ川流域における気候変動影響評価	37
1 温室効果ガスの排出シナリオの選択	37
2 GCM の選択	37
3 選択された GCM の降雨のバイアス補正	41
4 降雨の変化の評価	48
5 計画洪水の変化の評価	51
(3) ダム操作の最適化	53
1 水文モデル	53
2 グローバル最適化システム	54
3 Rolling horizon アプローチ	54
4 ISOS 手順	55
5 ISOS デモンストレーション	55
III 結論と提言	59
参考文献	60
付表・付図	61

略語対照表 Abbreviations

Abbreviation	English	French	Japanese
AfWCCI	GEOSS African Water Cycle Coordination Initiative	Initiative Africaine de la Coordination du Cycle de l'Eau	アフリカ水循環調整イニシアチブ
AIEM	Advanced Integral Equation Model	Modèle Avancé d'Equation Intégrale	表面散乱モデル
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS	Radiomètre Avancé à Balayage en Hyperfréquence	改良型高性能マイクロ波放射計
BATS	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme	Processus d'Echange entre la Biosphère et l'Atmosphère	陸面過程モデル
CMIP3	The 3rd phase of Coupled Model Intercomparison Project	La 3 ^e phase du Projet d'Inter-comparaison de Modèles Couplés	第3次モデル相互比較プロジェクト
C/P	Counterpart	Homologue	カウンターパート
DB	Database	Base de données	データベース
DEM	Digital Elevation Model	Modèle Numérique d'Altitude	数値標高モデル
DHM	Distributed Hydrological Model	Modèle Hydrologique Distribué	分布型水循環モデル
DMRT	Dense Medium Radiative Transfer	Modèle de Transfert Radiatif de Matériau Dense	放射伝達モデル
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture	国際連合食糧農業機関
FPAR	Fraction of Photosynthetic Active Radiation	Fraction de Rayonnement de Photosynthèse	光合成有効放射吸収率
F/R	Final Report	Rapport Final	ファイナル・レポート
GBHM	Geomorphology-Based Hydrological Model	Modèle Hydrologique à base de géomorphologie	分布型流出モデル
GCM	General Circulation Model	Modèle de la Circulation Générale	大気循環モデル
GEO	Group on Earth Observations	Groupe sur l'Observation de la Terre	地球観測作業部会
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems	Réseau Mondial des Systèmes d'Observation de la Terre	全球地球観測システム
GOJ	Government of Japan	Gouvernement du Japon	日本国政府

GPS	Global Positioning System	Système de Positionnement Global (GPS)	全球測位システム
GSMaP	Global Satellite Mapping of Precipitation	Global Satellite Mapping of Precipitation	全球降水マップ
IC/R	Inception Report	Rapport de Commencement	インセプション・レポート
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC)	気候変動に関する政府間パネル
IT/R	Interim Report	Rapport Intérimaire	インテリム・レポート
JCC	Joint Coordinating Committee	Comité de Coordination Conjoint	合同調整委員会
JICA	Japan International Cooperation Agency	Agence Japonaise de Coopération Internationale	国際協力機構
LAI	Leaf Area Index	Indice de Surface Foliaire	葉面積指数
LDAS-UT	Land Data Assimilation System by Coupling AMSR-E and SiB2	Système d'assimilation des données à la surface des terres émergées et Biosphère Simple 2	陸面データ同化
LSM	Land Surface Model	Modèle de la Surface de Terre	地表面モデル
M/M	Men Month	Homme Mois	人/月
NCDC	National Climatic Data Center	Centre National de Données Climatologiques	アメリカ国立気候データセンター
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	Administration Nationale Océanique et Atmosphérique	米国海洋大気庁
PDM	Project Design Matrix	Matrice de Conception du Projet	プロジェクト・デザイン・マトリックス
PO	Plan of Operation	Plan d'Exécution	実行計画
P/R	Progress Report	Rapport d'Avancement	プロGRESS・レポート
R/D	Record of Discussions	Procès-Verbaux	協議議事録
RMSE	Root Mean Squared Error	Erreur Quadratique Moyenne	2乗平均平方根誤差
RTM	Radiative Transfer Model	Modèle de Transfert Radiative	放射伝達モデル
SiB2	Simple Biosphere 2	Biosphère Simple 2	単純植生モデル2
SWI	Soil Wetness Index	Indice d'Humidité de Sol	土壌湿潤指数
USGS	United States Geological Survey	Commission Géologique des Etats-Unis	アメリカ地質調査所
WEB-DHM	Water and Energy Budget based Distributed	Modèle Hydrologique Distribué, basé sur le budget	分布型水循環モデル

	Hydrological Model	d'eau et d'énergie	
WMO	World Meteorological Organization	Organisation Météorologique Mondiale	世界気象機関
WRF	Weather Research and Forecasting Model	Modèle Recherche Et Prévision Météo	次世代メソスケール数値天気予報モデルシステム
WSP	Water Security Plan	Plan de Sécurité de l'Eau	水の安全保障計画

I. 業務の概要

(1) 本業務の背景、経緯、目的

チュニジア共和国は、国土全域の年間平均降雨量が 500mm と少なく、国土の半分が半乾燥気候条件下にある。メジェルダ川を含む同国北部では、9 月～3 月の雨季には、数年に 1 度大規模な集中豪雨に見舞われており、河川が急激に増水して周辺に洪水の被害をもたらしている。特に近年では、集中豪雨が頻発し、2000 年、2003 年、2004 年、2005 年、2009 年及び 2012 年に同国北部に位置するメジェルダ川下流域で、大雨の影響による大規模な洪水・氾濫被害が発生した。なかでも 2003 年 1 月に発生した大洪水では 10 名の死亡者、27000 人の避難者が発生したほか、湛水期間が 1 ヶ月以上続いたため、農作物、家屋等への被害のほか、交通遮断等も含めた社会的・経済的に甚大な損害を蒙った。直近では、2012 年 2 月には北西部における豪雨により、メジェルダ川沿いの複数の地域で洪水が発生し、6 名の死亡者が出るなど多数の被害を出した。こうした大規模洪水は、農作物、インフラ設備や家屋等の物質的損失に留まらず、経済活動の停滞や災害をきっかけとした貧困の増加等、経済的・社会的損失を伴うことから、同国が持続可能な開発を達成する上でのリスク要因の一つとなっている。

チュニジア国政府はこれまでも洪水対策を実施しており、「第 11 次 5 ヶ年社会経済開発計画（2007 年～2011 年）」においても重点分野として都市部の洪水被害軽減を掲げ、雨水排水路の整備、既存排水路の清掃等の都市洪水対策を計画している。また、こうした事業は都市開発事業、都市交通開発事業との間で相乗効果をもたらすことが期待されている。

深刻な洪水被害に見舞われているメジェルダ川流域の状況を改善するため、チュニジア国政府の要請に基づき JICA は「メジェルダ川総合流域水管理計画調査」（以下、開発調査）を 2006～2008 年の 26 ヶ月間にわたり実施した。開発調査では堤防・遊水池などの構造物対策と洪水予警報・避難水防体制・組織能力開発・氾濫原土地利用規制管理などからなる非構造物対策による、同川流域の洪水防御に重点を置いた総合流域水管理のためのマスタープランが策定された。2009 年にはチュニジア国政府より同調査において提案されたプロジェクトに関するフィジビリティ調査（FS 調査）が要請され、「メジェルダ川総合流域管理・洪水対策事業準備調査」（以下、準備調査）が 2010 年 9 月～2012 年 5 月まで実施された。準備調査では同マスタープランでもっとも経済効果が高いとされる最下流域（D2 ゾーン）を対象として、基礎情報の収集と基本的な対策案の検討が行われた。

準備調査の結果を受け、その内容を補完し、より詳細な事業計画を立てることを目的に、「メジェルダ川に係る気候変動影響を考慮した統合流域管理・洪水対策検討調査」（以下、準備調査 2）が 2012 年 7 月より実施されることとなった。一方、メジェルダ川流域は半乾燥地帯に位置しつつも地中海性の擾乱の影響で豪雨による洪水が頻発する特殊な流域であるため、洪水流出解析が容易でなく、また IPCC 第 4 次報告書において、同流域を含む北アフリカ地域は今後気候変動により受ける影響が大きいとされていることから、より専門性の高い、洪水流出解析及び今後の気候変動による雨量・洪水パターンへの影響等の分析については、準備調査 2 とは別に実施することとなった。（以下、気候変動影響評価調査）

本調査は上述の気候変動影響評価調査に該当し、調査内容は下記の3項目である。

- (1) 計画降雨、基本高水、既存ダムの操作を考慮した計画洪水流量の策定
- (2) 将来気候変動影響の評価
- (3) 水利施設の最適運用に係る検討

このうち、調査項目(1)については、その結果が準備調査2に受け渡され、準備調査2で形成した事業計画の諸元や事業効果を検証するための前提条件となった。また、調査項目(2)(3)については、チュニジア国政府による今後のメジェルダ川洪水管理に資する重要な知見が得られた。

業務全体の作業フローを図I-(1)-1に示す。

(2) 調査対象地域

チュニジア国メジェルダ川下流域（アリアナ県、マヌーバ県、ビゼルテ県）とする。ただし、「水利施設の最適運用に係る検討」の対象となる貯水池は、メジェルダ川中流域に存在するシディサレムダムを含む。（図I-(2)-1、図I-(2)-2参照）。

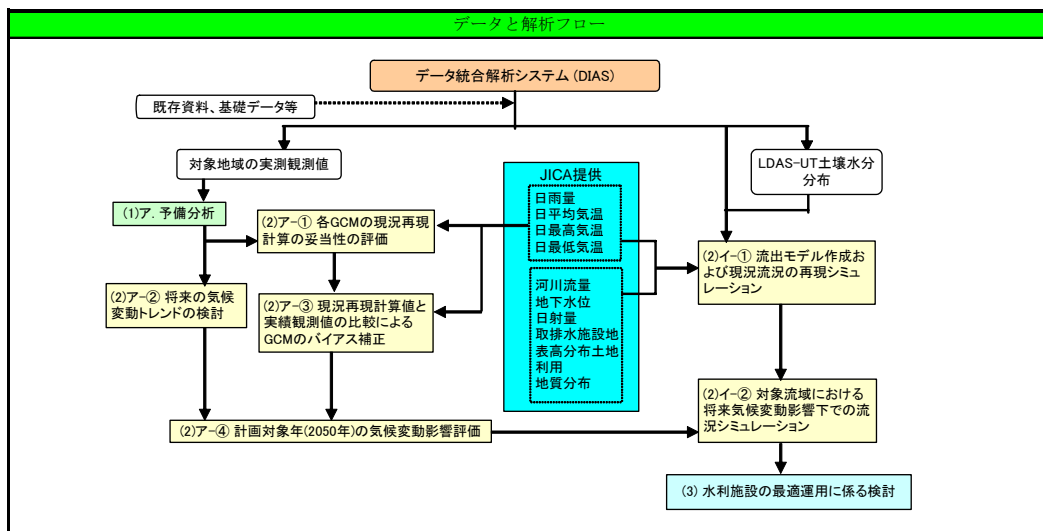


図 I - (1) - 1 『チュニジア国メジェルダ川流域気候変動影響評価』業務のフローチャート

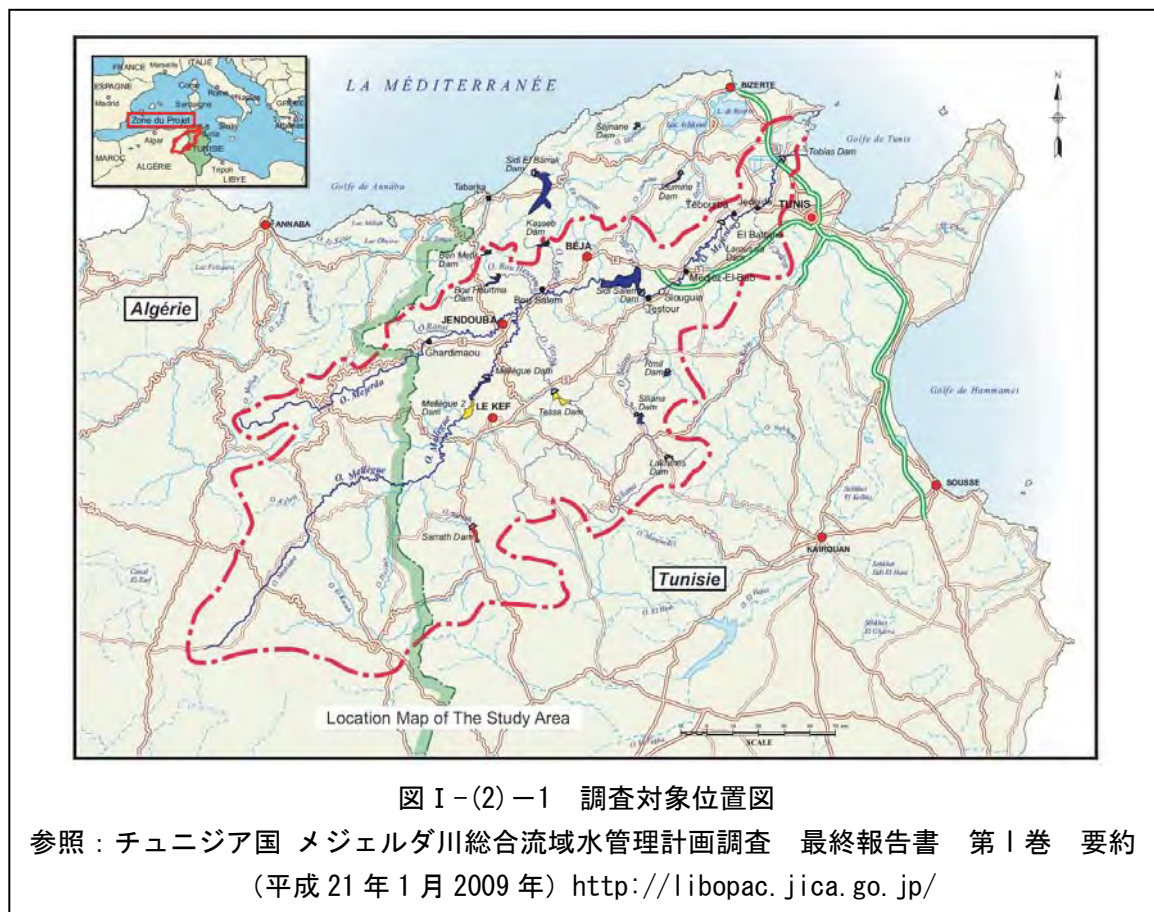


図 I - (2) - 1 調査対象位置図

参照：チュニジア国 メジェルダ川総合流域水管理計画調査 最終報告書 第Ⅰ巻 要約
(平成 21 年 1 月 2009 年) <http://libopac.jica.go.jp/>

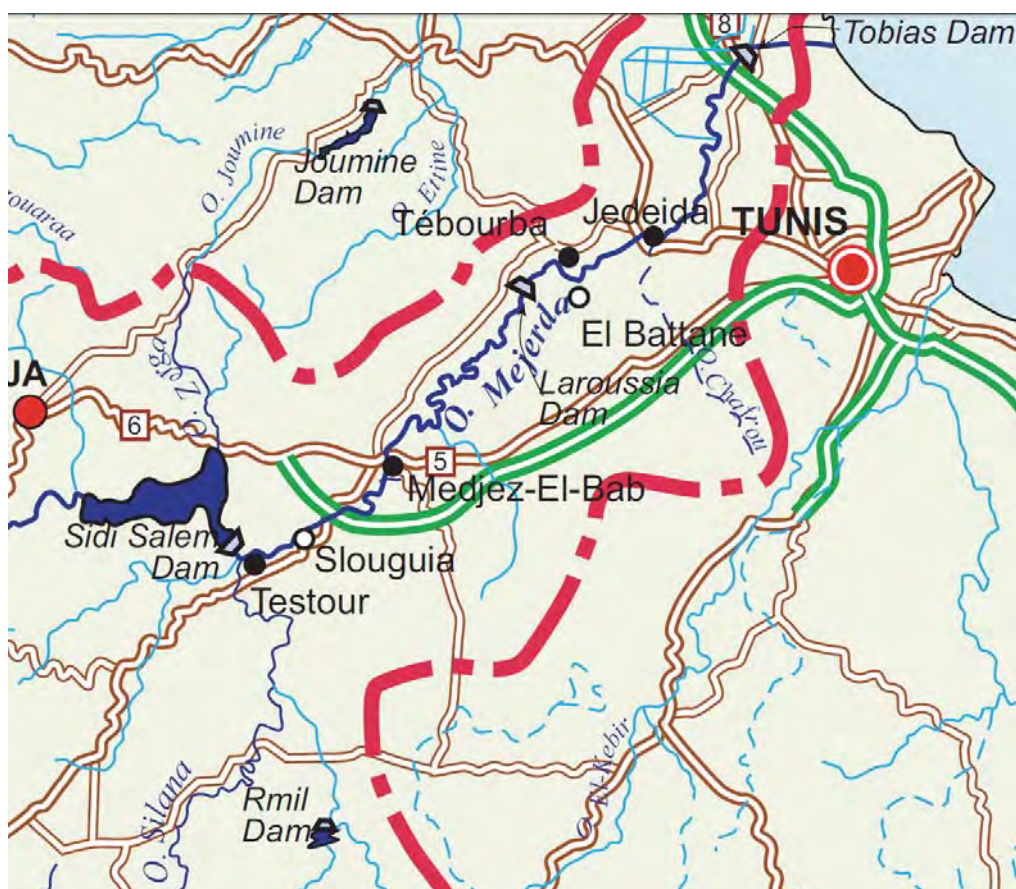


図 I-(2)-2 下流域の拡大図

(3) 業務実施の方針

1. 計画降雨、基本高水、既存ダムの操作を考慮した計画洪水流量の策定

計画降雨の算定においては、降雨の確率分布特性に加え、降雨継続時間、降雨の時空間分布の変動特性を考慮する。基本高水算定のための流出解析に当たっては、水資源の気候変化の影響評価において、低水から洪水まで長期連続的な解析が必要であること、水利施設の望ましい運用のために観測値による流出予測が必要なことから、同じ雨量でも河川流量の立ち上がりやピーク流量に大きな影響を与える流域土壌水分状態の正確な表現が不可欠である。地形や土壌、植生分布、気象条件の分布を考慮することも必要であり、長期にわたってチューニングすることなく土壌水分量と河川流出量を計算できる分布型水循環モデルを用いることが肝要である。また計画洪水流量の策定に当たって、既存のシディサレムダムの操作を考慮する。

2. 将来気候変動影響の評価

気候変化の影響評価に当たっては、General Circulation Model(以下 GCM)を用いるのが一般的である。しかし、物理的、生物化学的諸過程に未解明な面があること、計算機能力の制約から諸過程を表現するための十分な空間分解能を取れないことなどから、GCM には不確実性があり、とりわけ降水量の推定値には大きなバイアスがある。したがって、単一の

GCMによる定量的な評価は不適切であり、現段階では対象地域の気候特性を適切に表現できる複数のGCMを用いて、得られる結果の類似性を検討し、推定の幅を考慮することが必要である。

また、水循環解析で対象とする空間スケールは、一般に、GCMのグリッドサイズより小さいため、空間的ダウンスケーリングが必要で、また定量的な解析のためには、観測データを用いたバイアス補正も不可欠となる。空間的ダウンスケーリングには、メソスケールの非静力学モデルを用いた力学的手法も多用されているが、複数のGCMの力学的ダウンスケーリングは計算コストが高いのが欠点である。本対象流域には多数の降水観測点があり、長期のデータの利用が可能である。そこで、各降水量観測地点に対応するバイアス補正済のモデル出力値を空間的に内外挿することによって空間分布を表現することとする。

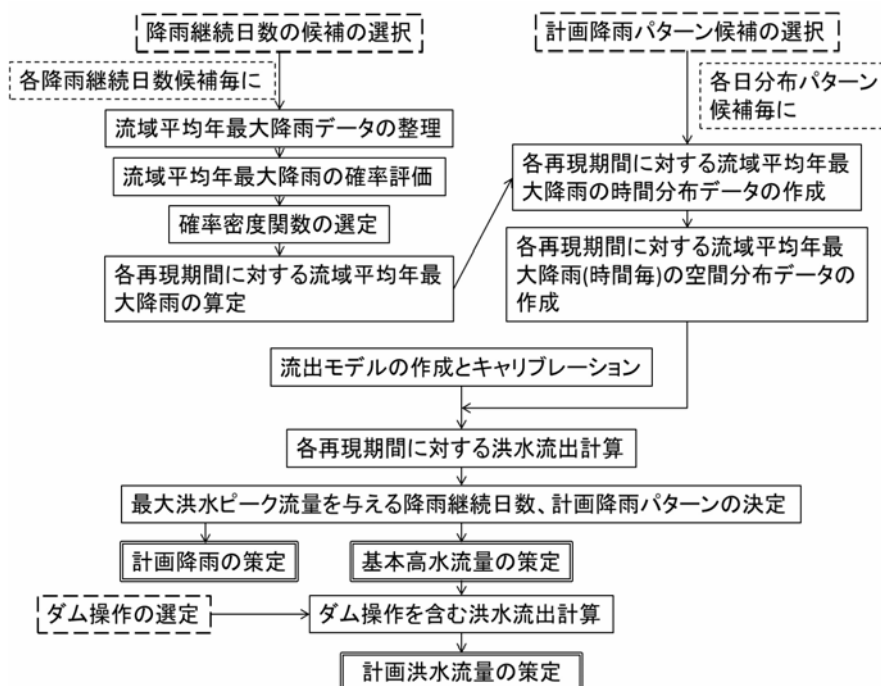
3. 水利施設の最適運用に係る検討

現存の水利施設の最適運用に係る検討を行う。本手法は、メジェルダ川流域の流路延長が長いことに着目して、洪水到達時間を洪水予測のリードタイムとして用い、シディサレムダムへの流入量を予測し、洪水被害軽減により高い重みをおいた評価関数を最適化する手法とする。

Ⅱ. 業務の内容

(1) 計画降雨、基本高水、既存ダムの操作を考慮した計画洪水流量の策定

本報告では、図Ⅱ-(1)-1 に示すフローチャートに沿って、計画降雨、基本高水流量、計画洪水流量を策定した。



図Ⅱ-(1)-1 計画降雨、基本高水流量、計画洪水流量を策定の流れ

1. 計画降雨と基本高水流量の策定

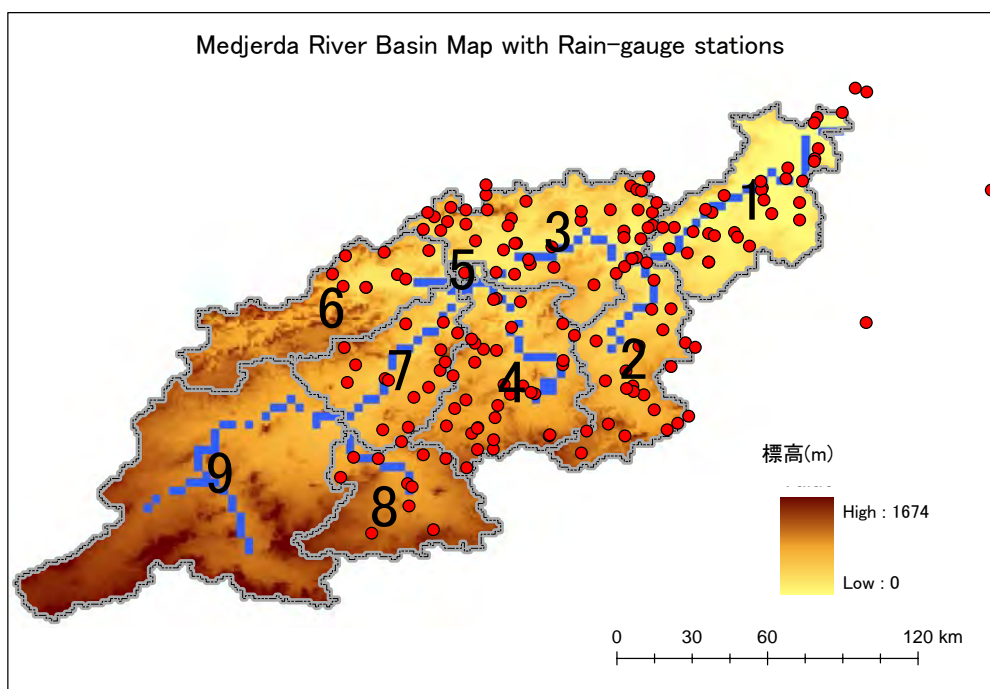
本検討では、メジェルダ川流域に洪水をもたらした過去の事例に対して、2通りの日降雨量の境界値を用いて、それぞれの降雨継続日数を設定した。次に、それぞれの降雨継続日数に対応する流域平均降雨量を確率評価して計画降雨量を算定した。この計画降雨量を過去の洪水事例における流域平均日降水量を用いて各日に割り当て、さらに洪水流出計算に用いるために時間分解した後、過去の洪水事例の日降水量の空間分布特性を用いて、時間降水グリッドデータセットを作成した。

一方、メジェルダ川の流域地質特性、土壌特性、土地利用特性や、水循環分布特性を表現できる分布型流出モデル（WEB-DHM）を観測データにより校正して、特に洪水流出特性の再現性を確認した後、計画降雨を入力して、洪水流量を算定した。それぞれの降雨継続日数、降雨の時空間分布に対応する洪水流量の中で最大値を基本高水流量とした。

1) 計画降雨の策定

a. データと流域区分

図Ⅱ-(1)-2 は本検討に利用可能な雨量観測地点と、主要な支川を考慮したサブ流域区分を示す。メジェルダ流域における雨量観測地点では、日雨量でデータが整備されており、本検討では 44 の雨量観測地点において、計画降雨算定には 1950 年 1 月より 2007 年 12 月までの日雨量観測データを用い、気候変動予測モデルのバイアス補正には 1981 年月 から 2000 年 12 月 までのデータを使用した。サブ流域 9 のアルジェリア側では雨量観測点数は 3 と少ないものの、他の領域では十分な数の日雨量観測点がある。そこで、観測雨量を用いて、まず流域平均雨量並びにサブ流域平均雨量は観測雨量の単純平均より求め、流出解析に用いる分布雨量は、流域を覆う 0.05 度メッシュの各グリッドと各雨量観測点の距離の自乗の逆数の重みを用いて算定した。



図Ⅱ-(1)-2 メジェルダ川流域の雨量観測点とサブ流域区分

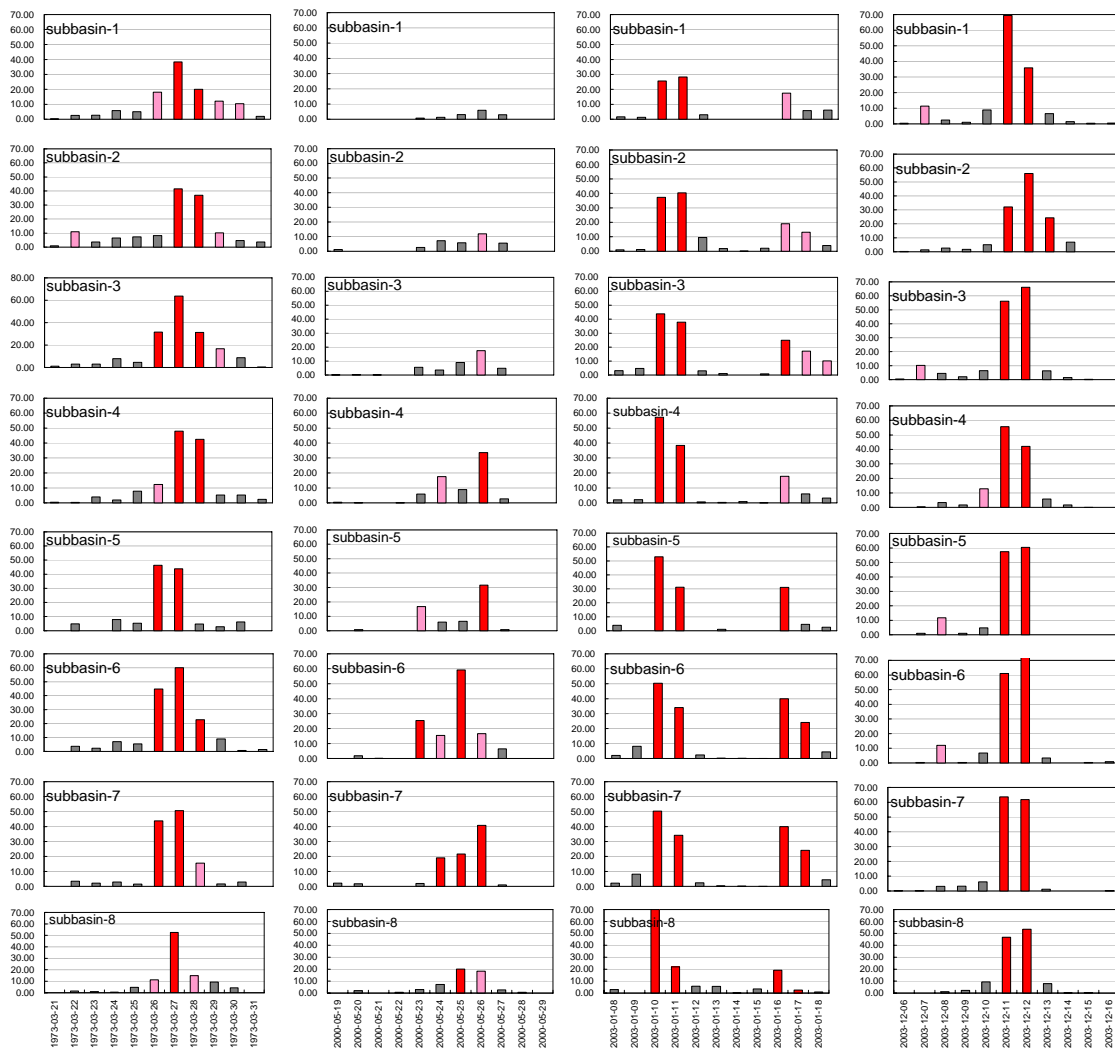
b. 降雨継続日数と年最大降雨データ

降雨継続日数の算定のために、既往洪水時（1973 年 3 月、2000 年 5 月、2003 年 1 月、2003 年 12 月）のデータをもとに、

1. 20mm/日以上 of データ（図Ⅱ-(1)-3 赤棒）より、降雨継続日数を決定
2. 10mm/日以上 of データ（図Ⅱ-(1)-3 ピンク棒）より、降雨継続日数を決定

の 2 通りで検討を行なった。

その結果、降雨発生日のサブ流域間の差を考慮すると、1.（20mm/日）の場合 4 日、2.（10mm/日）の場合 5 日となった。



図Ⅱ-(1)-3 既往4洪水時の各サブ流域(1~8)平均のハイトグラフ
 (赤棒は20mm/日以上の日々の降雨量、ピンク棒は10mm/日以上20mm/日以下の日の降雨量を示す)

表Ⅱ-(1)-1に、データを収集した1950年から2007年までの年最大1日雨量、年最大4日間雨量、および年最大5日間雨量を示す。

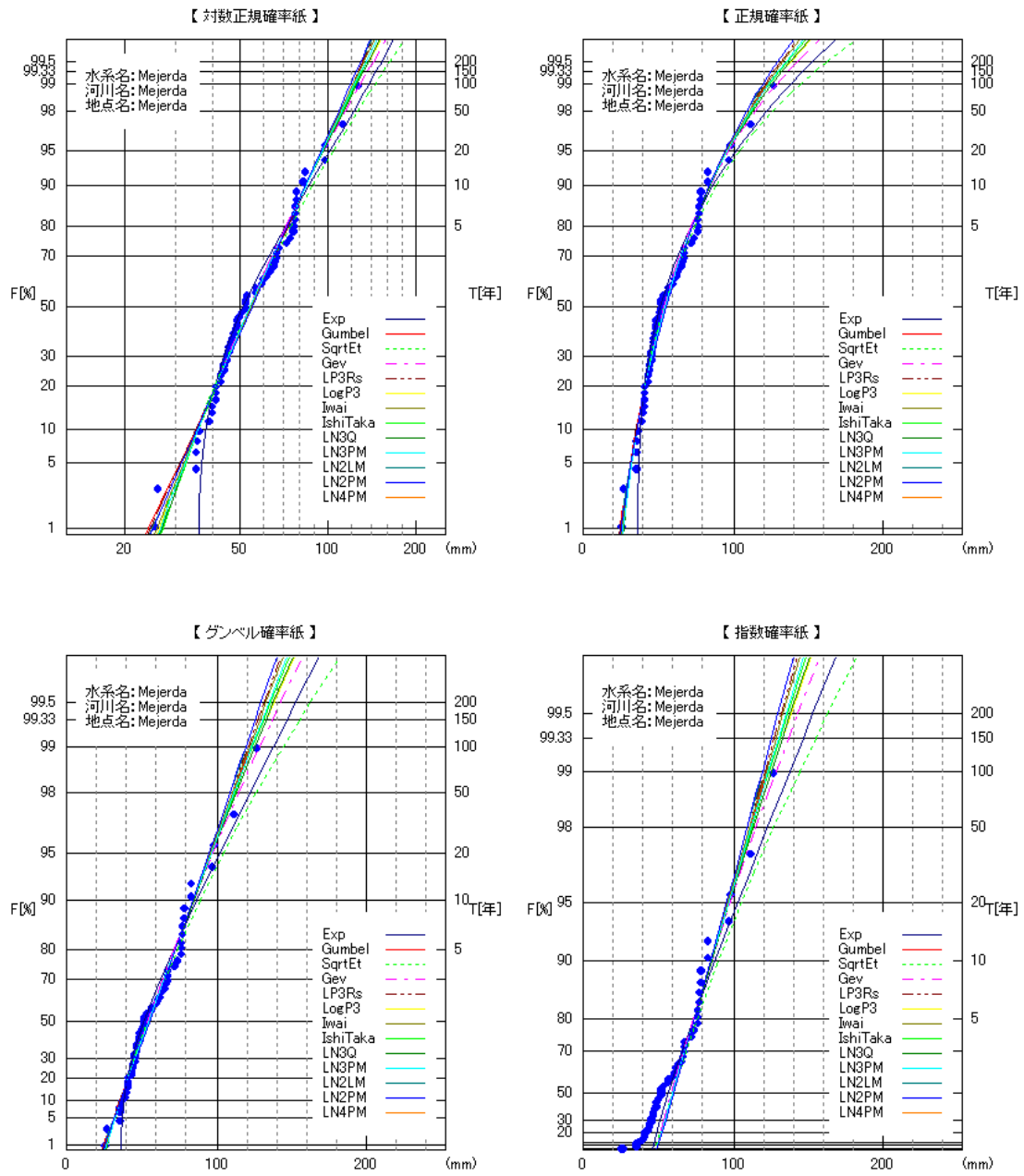
表Ⅱ-(1)-1 1950年～2007年の年最大1日雨量、年最大4日間雨量、年最大5日間雨量

year	1日間雨量[mm]	4日間雨量[mm]	5日間雨量[mm]
1950	28.73	42.97	52.75
1951	23.53	56.14	66.31
1952	36.16	82.43	89.58
1953	44.70	77.57	77.79
1954	20.89	47.24	52.01
1955	25.94	52.09	54.41
1956	31.70	67.17	70.45
1957	43.04	78.11	80.77
1958	28.65	48.60	54.77
1959	30.91	65.86	68.86
1960	14.91	26.12	26.30
1961	26.18	48.52	48.55
1962	33.92	78.14	85.82
1963	22.85	48.32	51.25
1964	46.59	76.36	76.62
1965	12.29	35.59	40.94
1966	23.51	56.43	56.65
1967	12.77	36.05	38.85
1968	19.40	41.16	43.68
1969	40.49	82.83	100.18
1970	27.44	51.80	51.92
1971	32.58	61.63	62.46
1972	30.66	52.38	55.62
1973	50.16	111.97	118.64
1974	23.70	59.18	63.01
1975	34.98	75.66	77.32
1976	27.94	73.75	75.85
1977	16.96	40.34	42.70
1978	17.18	41.33	50.54
1979	37.09	77.08	77.92
1980	24.46	46.89	47.35
1981	10.55	50.65	52.58
1982	25.16	52.66	59.18
1983	20.08	44.01	44.43
1984	38.84	98.02	100.38
1985	13.74	97.34	104.47
1986	17.18	39.91	42.86
1987	20.94	40.97	41.84
1988	25.64	43.93	46.41
1989	15.28	38.84	40.13
1990	32.22	67.36	81.41
1991	26.22	46.13	54.58
1992	34.84	63.26	65.54
1993	10.88	25.44	31.28
1994	17.44	45.78	51.92
1995	13.39	35.09	41.02
1996	26.58	66.93	70.17
1997	20.30	45.03	47.59
1998	28.55	45.39	47.51
1999	21.24	42.77	49.64
2000	21.27	49.47	62.63
2001	22.33	35.14	35.56
2002	22.09	45.86	49.93
2003	55.02	126.41	128.40
2004	43.05	72.08	76.72
2005	35.98	65.04	69.11
2006	33.69	60.36	68.52
2007	26.12	76.65	86.48

c. 流域平均年最大降雨の確率評価のための確率密度関数の選定

表Ⅱ-(1)-1 の年最大4日雨量、5日雨量を用いて、それぞれの再現期間に対する計画降雨を推定するために、適合する確率密度関数を選定した。用いた確率密度関数は、指数分布 (Exp)、ガンベル分布 (Gumbel)、平方根指数型最大値分布 (SqrtEto)、一般化極値分布 (Gev)、対数ピアソン III 型分布(対数空間法) (LogP3)、岩井法 (Iwai)、石原・高瀬法 (IshiTaka)、対数正規分布 3 母数クォンタイル法 (LN3Q)、対数正規分布 3 母数 (Slade II) (LN3PM)、対数正規分布 2 母数 (Slade I、L 積率法) (LN2LM)、対数正規分布 2 母数 (Slade I、積率法) (LN2PM) の 11 種類(すべて毎年確率)である、結果を、表Ⅱ-(1)-2 と表Ⅱ-(1)-3、各確率密度関数の適合度の状況を図Ⅱ-(1)-4、5 に示す。

適合度評価の SLSC、安定度評価のジャックナイフ法の結果を合わせて評価した結果、平方根指数型最大値分布 (SqrtEto) の Jackknife 推定誤差が他と比べて極めて小さく、SLSC も 0.03 程度と低いことが分かった。本解析は、データを収集した 1950 - 2007 年を対象に行なったものであるが、「メジェルダ川総合流域水管理計画調査」(JICA、2009 年)において 1968-2005 年を対象に行なった場合の結果と比較しても、SqrtEto による推定結果は似通っている。したがって、安定度が高い平方根指数型最大値分布 (SqrtEto) を採用することとした。



図Ⅱ-(1)-4 4日間雨量の各分布適合度

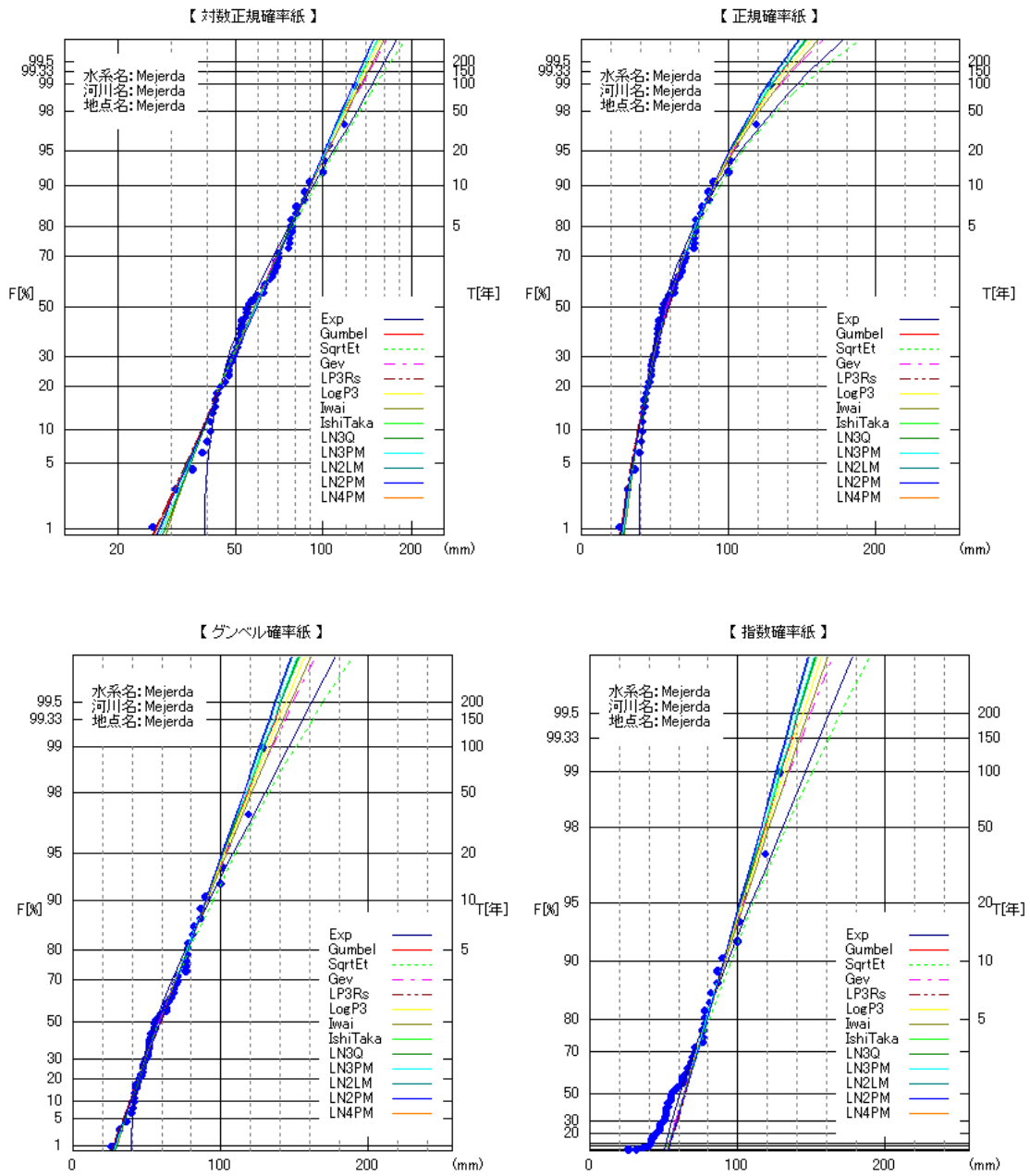


図 II-(1)-5 5日間雨量の各分布適合度

d. 確率降雨の日、時間分布データの作成

日雨量データの作成

平方根指数型最大値分布 (SqrtEto) で推定した4日雨量、5日雨量に対する確率降雨を、過去の洪水4ケース(1973年3月、2000年5月、2003年1月、2003年12月)の降雨の日分布の比率を用いて各日に配分した。その結果を表Ⅱ-(1)-4に示す。

表Ⅱ-(1)-4の見方を、1973年3月の降雨を例にとって説明する。この時の5日間合計降水量は118.64mmであり、その内訳は、3/26に22.36mm、3/27に50.16mm、3/28に28.29mm、であった。降雨継続日数を4日間とすると、3/26-29のそれぞれの日の、全降水量(111,97mm)に占める割合は、3/26より順に、0.20、0.45、0.26、0.09であった。降雨継続日数を5日間とすると、対象日は3/26-3/30までの5日間となり、それぞれの日の割合は表中のようになった。一方、4日間雨量の100年確率降水量は、144.50mmであったので、このうち、3/26に降ると仮定される降雨量は、144.50mmに先の0.20をかけて、28.86mmとなる。同様にして、他の日の確率降水量を求めた。

表Ⅱ-(1)-4 再現期間ごとの年最大降雨の日分布

流域平均	1日雨量	4-day	5-day	確率雨量											
				100年		50年		20年		10年		5年		2年	
				4-day	5-day	4-day	5-day	4-day	5-day	4-day	5-day	4-day	5-day	4-day	5-day
雨量積算値	118.64	1.00	1.00	144.50	150.70	126.80	132.70	104.90	110.30	89.30	94.40	74.30	78.90	53.90	57.90
1973/3/26	22.36	0.20	0.19	28.86	28.40	25.32	25.01	20.95	20.79	17.83	17.79	14.84	14.87	10.76	10.91
1973/3/27	50.16	0.45	0.42	64.73	63.71	56.80	56.10	46.99	46.63	40.00	39.91	33.28	33.36	24.15	24.48
1973/3/28	28.89	0.26	0.24	37.28	36.70	32.71	32.31	27.06	26.86	23.04	22.99	19.17	19.21	13.91	14.10
1973/3/29	10.56	0.09	0.09	13.63	13.42	11.96	11.82	9.90	9.82	8.42	8.41	7.01	7.03	5.08	5.16
1973/3/30	6.67	0.06	0.06	0.00	8.47	0.00	7.46	0.00	6.20	0.00	5.30	0.00	4.43	0.00	3.25
雨量積算値	48.34	1.00	1.00	144.50	150.70	126.80	132.70	104.90	110.30	89.30	94.40	74.30	78.90	53.90	57.90
2000/5/23	4.61	0.10	0.10	14.97	14.36	13.13	12.65	10.86	10.51	9.25	9.00	7.70	7.52	5.58	5.52
2000/5/24	8.50	0.19	0.18	27.61	26.50	24.23	23.33	20.04	19.39	17.06	16.60	14.20	13.87	10.30	10.18
2000/5/25	11.69	0.26	0.24	37.97	36.44	33.32	32.09	27.56	26.67	23.46	22.83	19.52	19.08	14.16	14.00
2000/5/26	19.69	0.44	0.41	63.96	61.38	56.12	54.05	46.43	44.93	39.53	38.45	32.89	32.14	23.86	23.58
2000/5/27	3.86	0.08	0.08	0.00	12.02	0.00	10.58	0.00	8.80	0.00	7.53	0.00	6.29	0.00	4.62
雨量積算値	89.79	1.00	1.00	144.50	150.70	126.80	132.70	104.90	110.30	89.30	94.40	74.30	78.90	53.90	57.90
2003/1/8	2.25	0.03	0.03	0.00	3.77	0.00	3.32	0.00	2.76	0.00	2.36	0.00	1.97	0.00	1.45
2003/1/9	2.34	0.03	0.03	3.86	3.92	3.38	3.45	2.80	2.87	2.38	2.46	1.98	2.05	1.44	1.51
2003/1/10	45.88	0.52	0.51	75.73	77.00	66.45	67.80	54.97	56.36	46.80	48.23	38.94	40.31	28.25	29.58
2003/1/11	35.80	0.41	0.40	59.09	60.08	51.85	52.90	42.89	43.97	36.52	37.63	30.38	31.46	22.04	23.08
2003/1/12	3.53	0.04	0.04	5.83	5.93	5.12	5.22	4.23	4.34	3.60	3.71	3.00	3.10	2.18	2.28
雨量積算値	128.40	1.00	1.00	144.50	150.70	126.80	132.70	104.90	110.30	89.30	94.40	74.30	78.90	53.90	57.90
2003/12/10	7.98	0.06	0.06	9.12	9.36	8.00	8.24	6.62	6.85	5.64	5.87	4.69	4.90	3.40	3.60
2003/12/11	54.92	0.43	0.43	62.78	64.46	55.09	56.76	45.58	47.18	38.80	40.38	32.28	33.75	23.42	24.77
2003/12/12	55.02	0.44	0.43	62.89	64.57	55.19	56.86	45.65	47.26	38.86	40.45	32.34	33.81	23.46	24.81
2003/12/13	8.49	0.07	0.07	9.71	9.97	8.52	8.78	7.05	7.30	6.00	6.24	4.99	5.22	3.62	3.83
2003/12/14	1.99	0.02	0.02	0.00	2.34	0.00	2.06	0.00	1.71	0.00	1.46	0.00	1.22	0.00	0.90

時間雨量データの作成

時間雨量は、上述の4ケースの日雨量分布の分布形を保つように、内挿補完した。内挿方法は次の通りである。

- 1) 日界(0時、24時)の雨量を決める。

これは、着目日と隣接する日の時間雨量 P_{h0} の平均とする。

但し、着目日もしくは隣接する日の雨量が0mmのときは、日界の時間雨量を0mmとする【例外1】。

- 2) 図Ⅱ-(1)-6の基本原理解に基づき、12時の時間雨量を決める。

このとき、12時の時間雨量がマイナスになる場合は0mmとする【例外2】。

※降雨パターンが極端なM字のとき、マイナスになることがある。

- 3) 着目する期間を午前と午後に分ける。
- 4) 0時と12時の時間雨量から、午前の均等な時間雨量を計算する（0時と12時の時間雨量の平均値）。同様に、午後の均等な時間雨量を計算する。
- 5) 午前と午後の雨量の合計が日雨量と等しくなるように比例配分する。これは、12時の時間雨量をマイナスから0mmに上げたことによって増えてしまった雨を補正するためのものである。
- 6) 基本原理（期間は午前/午後）に基づいて6時および18時の時間雨量を決める。このときは、マイナスの雨量は発生しないと想定する。
- 7) 0、6、12、18、24時の時間雨量が決まったので、残りを線形補間する。

T : 期間

r_m : 期間平均雨量(単位時間)

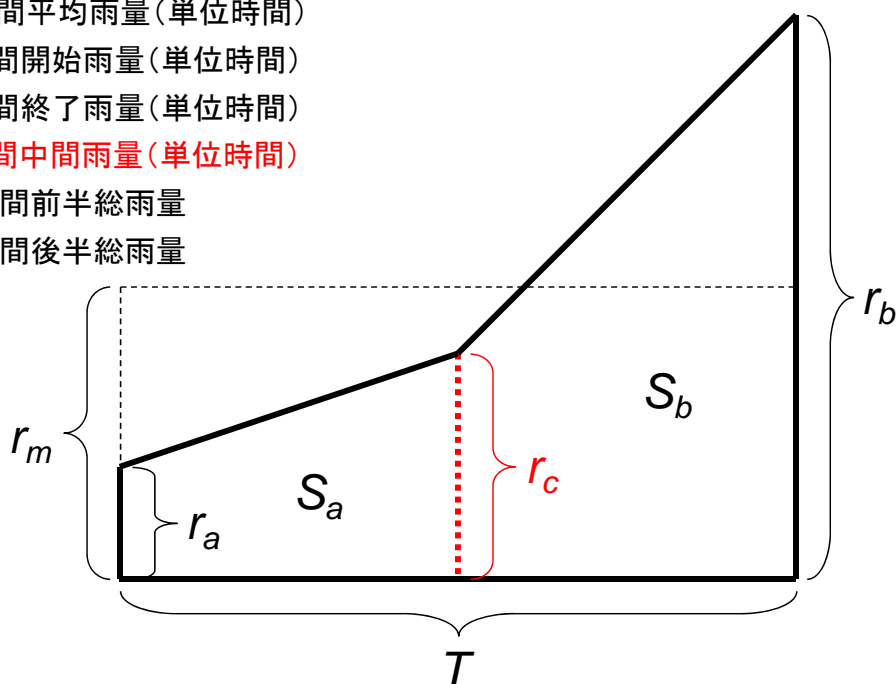
r_a : 期間開始雨量(単位時間)

r_b : 期間終了雨量(単位時間)

r_c : 期間中間雨量(単位時間)

S_a : 期間前半総雨量

S_b : 期間後半総雨量



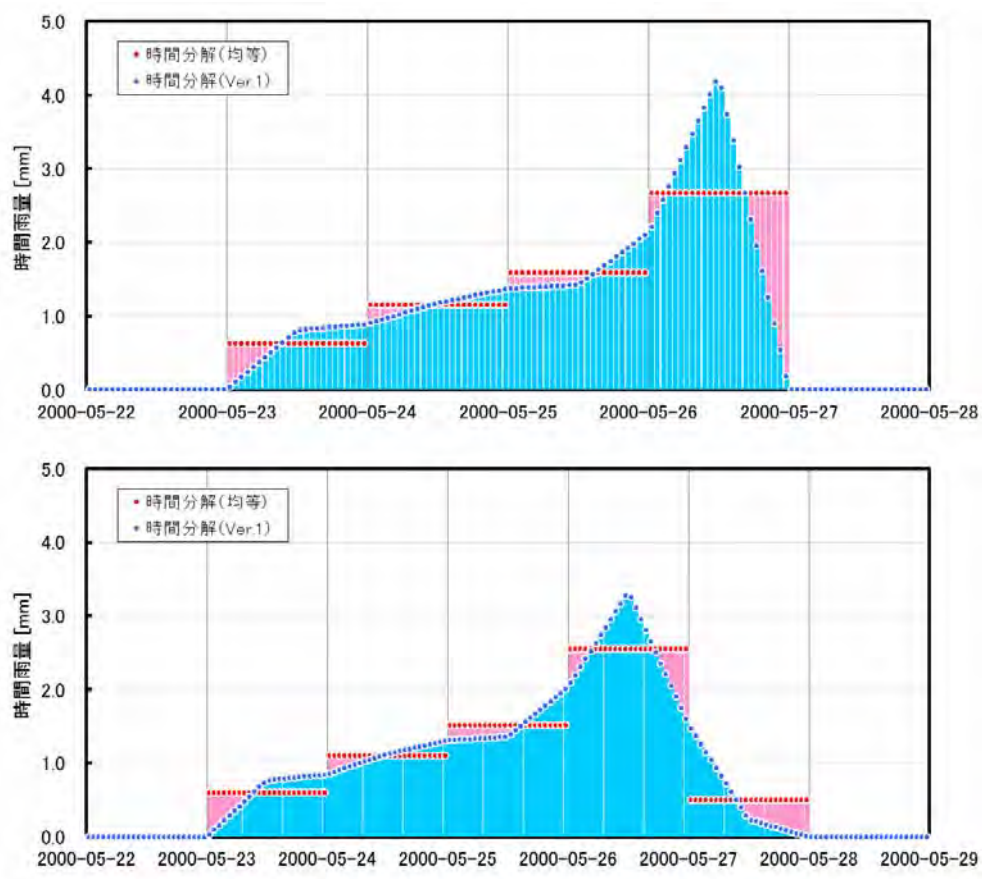
$$\text{期間総雨量} = r_m \cdot T = S_a + S_b = (r_a + r_c) \cdot T/2 \cdot 1/2 + (r_c + r_b) \cdot T/2 \cdot 1/2$$

$$= r_a \cdot T/4 + r_c \cdot T/2 + r_b \cdot T/4$$

$$r_c = 2 \cdot r_m - r_a/2 - r_b/2 = 2 \cdot r_m - (r_a + r_b)/2$$

図Ⅱ-(1)-6 時間雨量への内挿方法の概念図

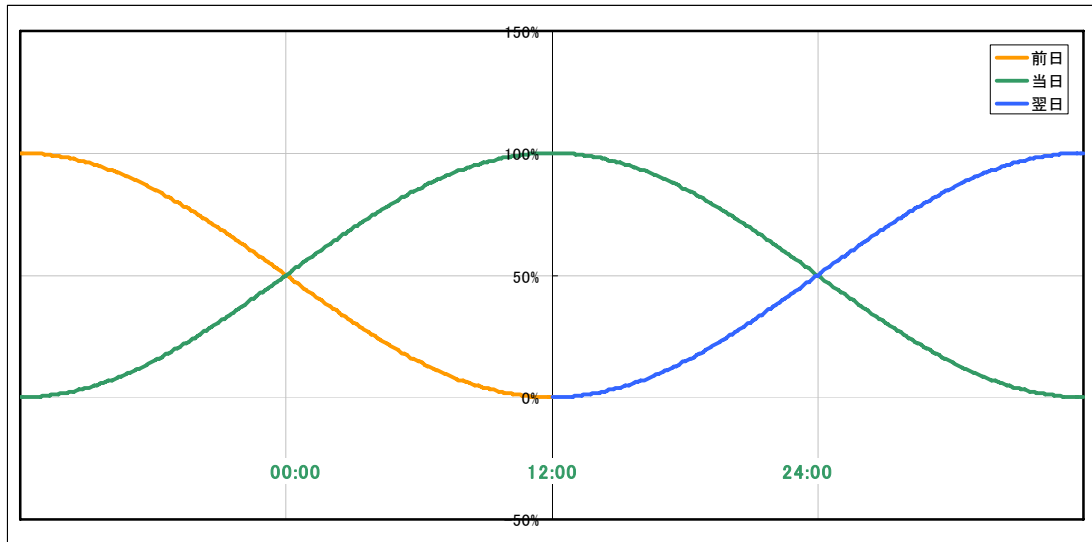
これによって求めた時間雨量の一例を図Ⅱ-(1)-7に示す。



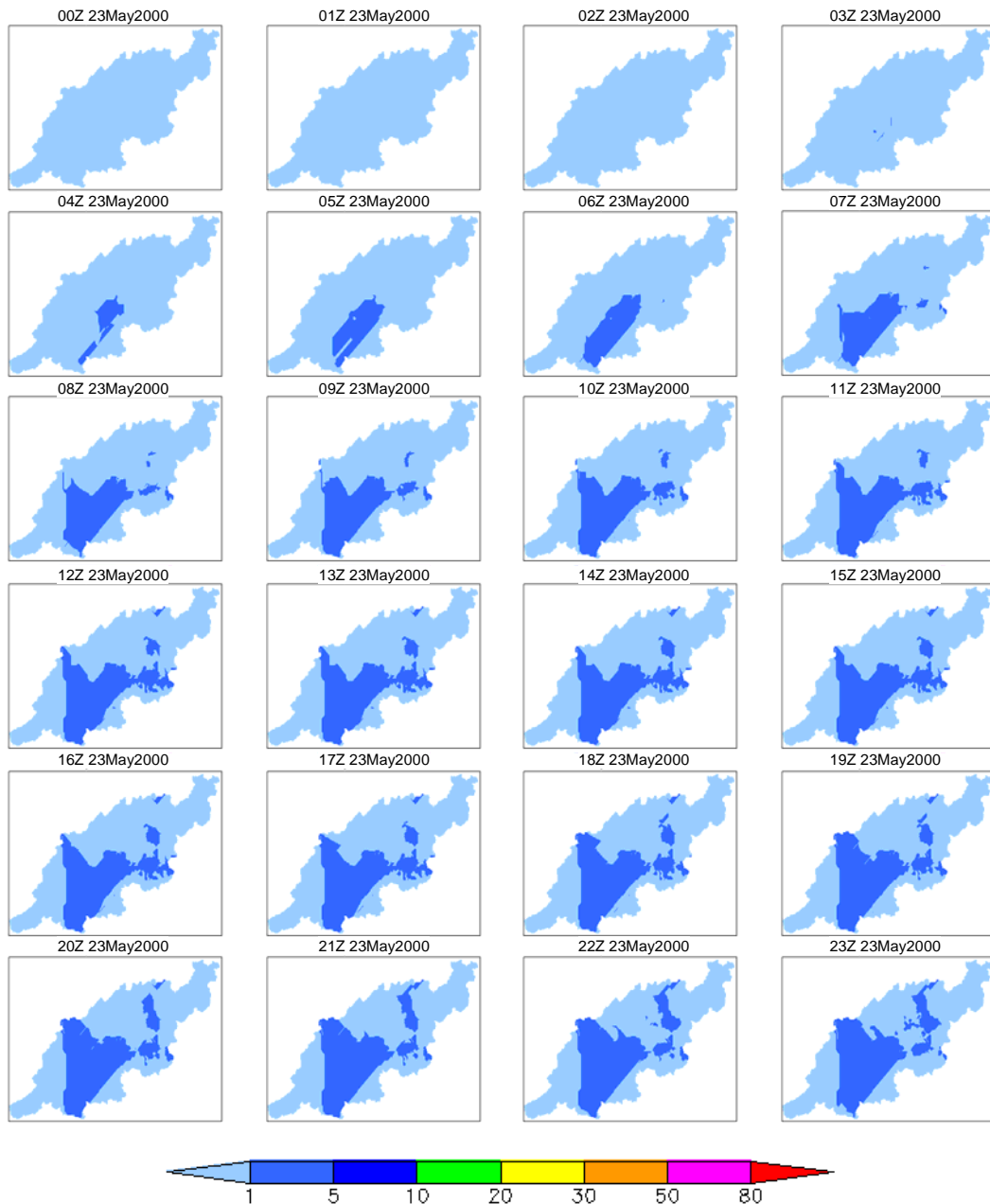
図Ⅱ-(1)-7 2000年5月洪水時の時間ハイトグラフの想定(上:4日降雨、下:5日降雨)

e. 計画降雨の空間分布データの作成

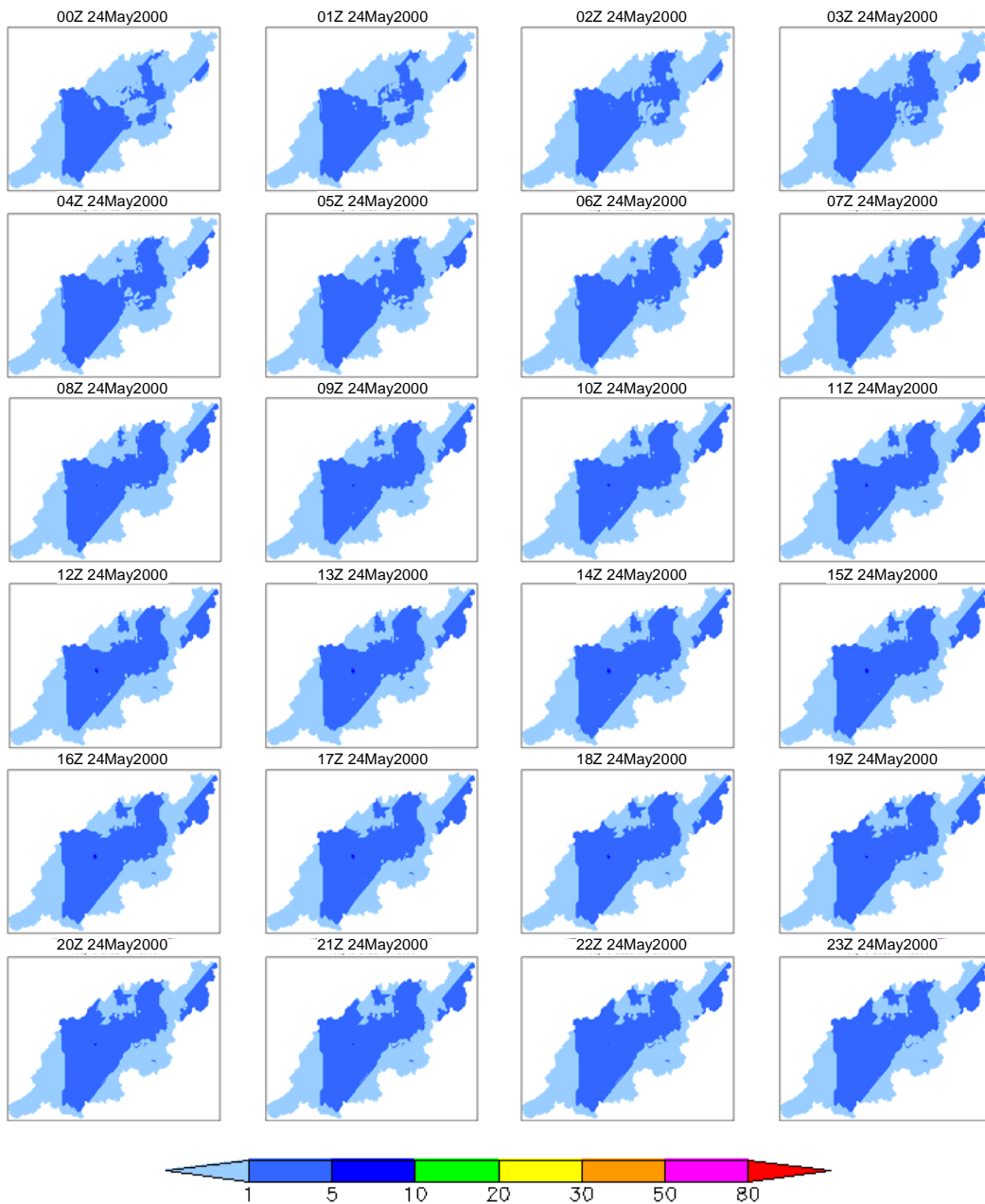
対象地域では降雨の空間分布の時間変動が顕著であり、基本高水流量の算定には、その特性を考慮する必要がある。そこで、図Ⅱ-(1)-2に示す雨量観測所のデータを内外挿して(欠測がある場合は最も近い雨量観測データで補完)、格子日雨量データを作成し、各日流域平均雨量に対する各格子での雨量の比率を計算する。これに上述のdで求めた4つの洪水ケース、2つの降雨継続日数の計画降雨の時間変動を乗じて、降雨の時間空間分布格子データを作成する。さらに、日界における空間分布の不連続を解消するため、図Ⅱ-(1)-8に示す、前日、当日、翌日の重みを各格子時間雨量データに乗じて、各再現期間に対する降雨の時空間分布データを作成する。図Ⅱ-(1)-9a~9dは、4日継続雨量の100年確率降雨の空間分布を表す一例である。



図Ⅱ-(1)-8 日界における連続性を改善するための重み



図Ⅱ-(1)-9a 4日降雨100年確率降雨の時空間分布(2000年5月のケース:1日目)



図Ⅱ-(1)-9b 4日降雨 100年確率降雨の時空間分布 (2000年5月のケース: 2日目)

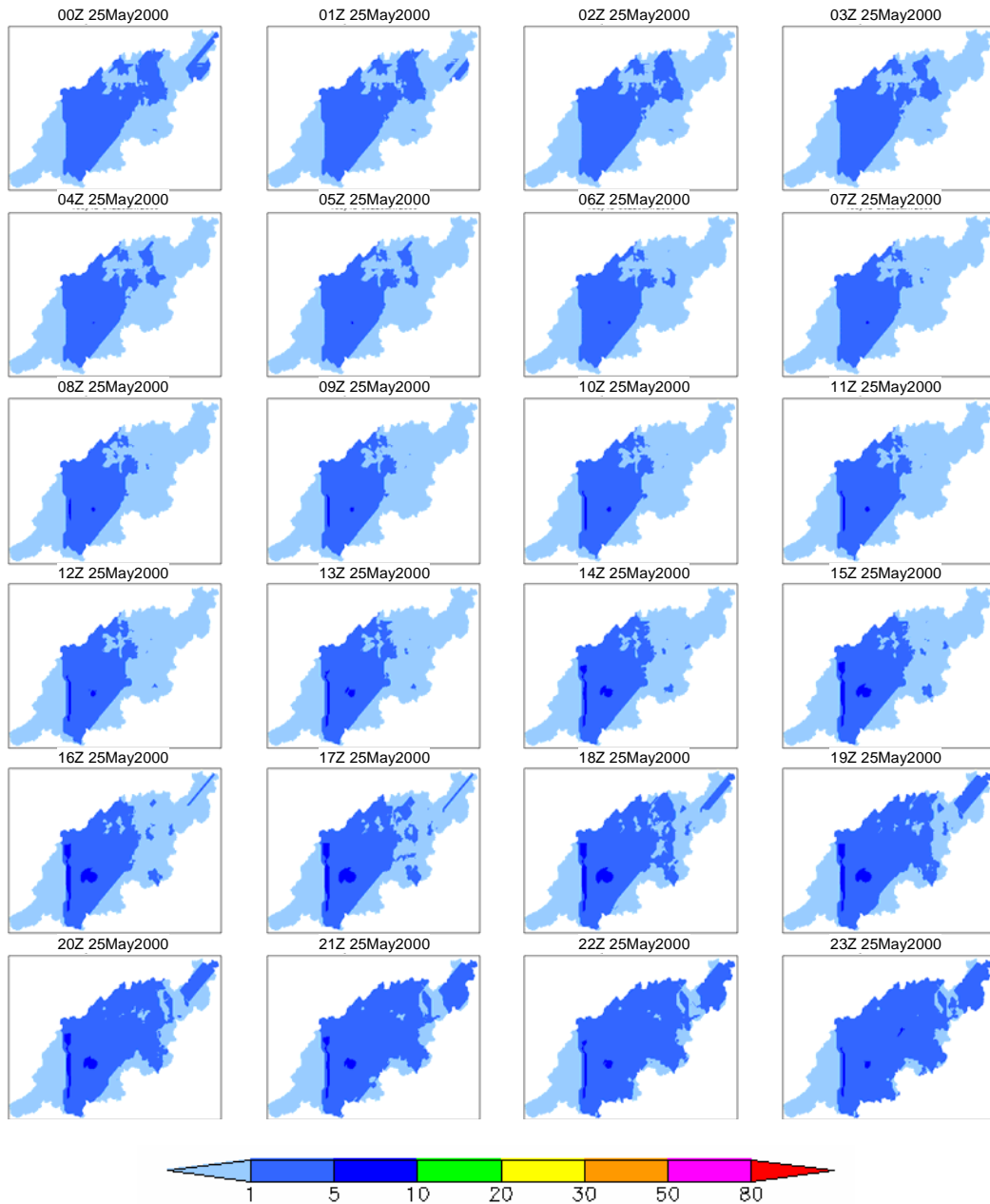
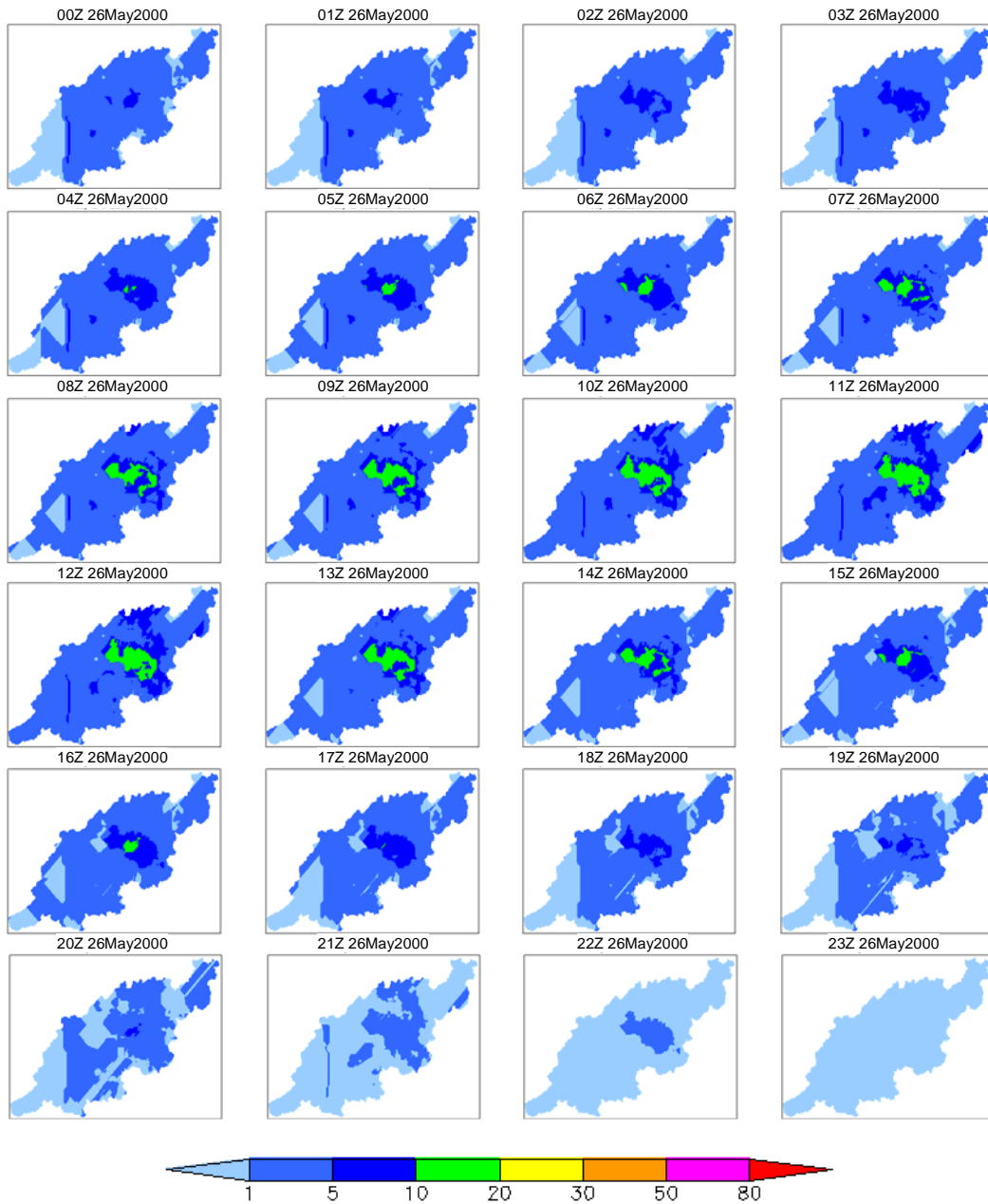


図 II-(1)-9c 4日降雨 100年確率降雨の時空間分布 (2000年5月のケース: 3日目)



図Ⅱ-(1)-9d 4日降雨100年確率降雨の時空間分布(2000年5月のケース:4日目)

2) 基本高水流量の策定

a. 流出モデル概要と用いるデータ

分布型水循環モデルは、流域から大陸スケールで、空間不均一性を考慮した水の流出過程や河道流下過程を再現できる有効なツールである。中でも、大気大循環モデルに組みこまれる陸面スキームと、斜面－河道系の分布型流出モデルを融合した、Water and Energy Budget-based Distributed Hydrological Model (WEB-DHM) (Wang *et al.*, 2009) は、大気－陸面相互作用、土壌水、河川流出量等を高い精度で計算し、かつ広域に適用可能なスキームを実現しており、本検討に必要な機能を備えている。さらに WEB-DHM は土壌水分の変化と連動して不圧地下水の水位の変動と河川への流出を表現して、不飽和帯と地下水面の相互作用を組み込んでおり、これは土壌水の鉛直浸透と地下水流出の精度向上に貢献しており、半乾燥帯で河道と周辺地域での水のやり取りを、乾燥地、沖積地で分けて考えなければならぬ、本対象流域の解析に有用である。

モデルの全体構造

WEB-DHM の構造を図 II-(1)-10 に示し、その概略を以下に記述する。

- (i) 流域はサブ流域に分割され、各サブ流域は流出点からの距離により flow interval という区分に細分割される。
- (ii) Simple Biosphere Model 2 (SiB2, Sellers *et al.*, 1996) を用いた陸面過程計算のための仮想場としてグリッドが存在する。均一な土地利用と土壌タイプをもつ各グリッド内で、大気陸面間のフラックス（水、エネルギー、CO₂）が計算される。
- (iii) 流出計算は、各グリッド内を流れる河道とその両側を挟む複数の斜面要素で行われる。Geomorphology Based Hydrological Model (GBHM, Yang *et al.*, 2000) を用いて各斜面要素からの表面流出・中間流出・地下水流出が計算される。その後、flow interval 毎にまとめられた仮想的な河道に沿って上流側から逐次流下計算が行われる（図 II-(1)-11）。

不飽和土壌および地下水の構造と計算

陸面過程の計算のため、不飽和土壌は SiB2 の三層構造が踏襲されている。第一層は土壌から直接蒸発が起こる層、第二層は植物の根が張り土壌水分が蒸散する層、そして第三層は最も深い不飽和領域である。斜面水文過程における不飽和土壌での水分移動は、鉛直方向の浸透流と斜面方向の側方流がある。側方流は斜面勾配と各層における透水係数より計算される。また、鉛直方向の浸透流は、以下の鉛直一次元の Richards 式によって導かれる。

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} = - \frac{\partial q_v}{\partial z} + r(z,t) \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 z は地表面からの深さ、 $\theta(z,t)$ は体積含水率、 $r(z,t)$ は蒸発散量、そして q_v は以下の式で表わされる鉛直方向の土壌水分量フラックスである。

$$q_v = - K(\theta, z) \left[\frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} - 1 \right] \quad (2)$$

$K(\theta, z)$ は透水係数、 $\psi(\theta)$ は毛管吸引力である。(1)式の陰関数を微分法で解くために、第二層と第三層はさらに細かく分割されている。各土壌層間の水分交換が行われると、

不飽和領域から飽和領域に補充される水分量が求まる。

地下水層は、各グリッドに対応する貯水池として存在し、それぞれが河道とつながっている。ただし、地下水は斜面方向に流れると仮定されており、各グリッド間の地下水

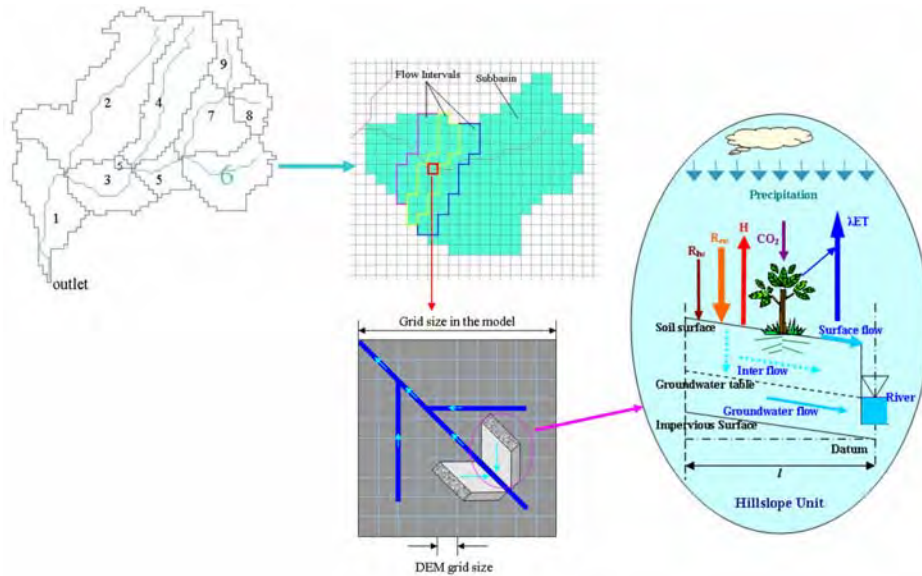


図 II-(1)-10 WEB-DHM の構造の概略(出典 : Wang *et al.*, 2009)

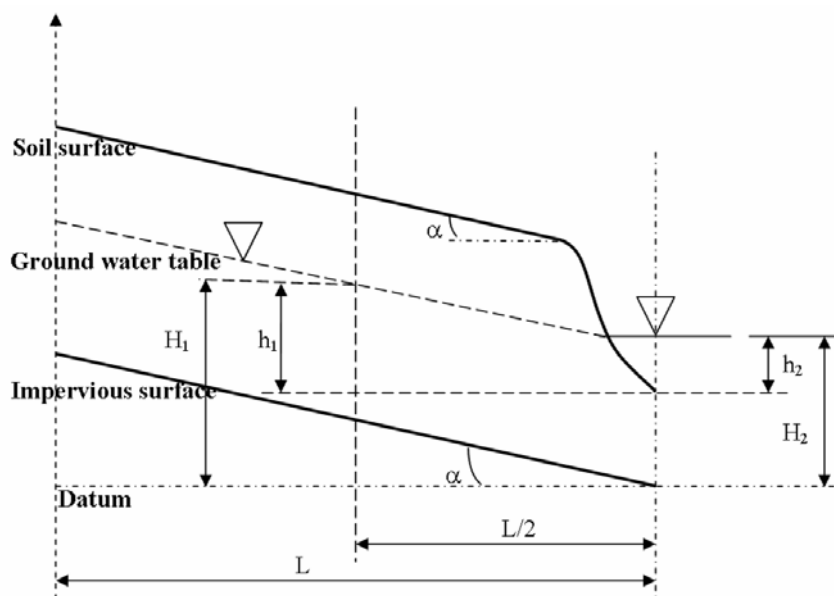


図 II-(1)-11 斜面要素の概念図(出典 : Yang *et al.*, 2000)

の流れはない。地下水層と河川との水分のやり取りは、質量保存則と以下の式によって示される Darcy の法則を用いて計算される。

$$q_G(t) = K_g \frac{H_1 - H_2}{l/2} \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (3)$$

ここで、 $q_G(t)$ は単位幅あたりの地下水層と河川との移動水分量、 K_g は地下水層の透水係数、 H_1-H_2 は地下水層と河川との水頭差、 l は斜面の長さ、 h_1 、 h_2 はそれぞれ河床からの地下水層と河川の水位である（図Ⅱ-(1)-11）。多くの流出モデルは地下水層から河川への水の流れが一方向であるが、式(3)は、ゆっくりとした不圧流れを適切に表現している。

用いたデータ

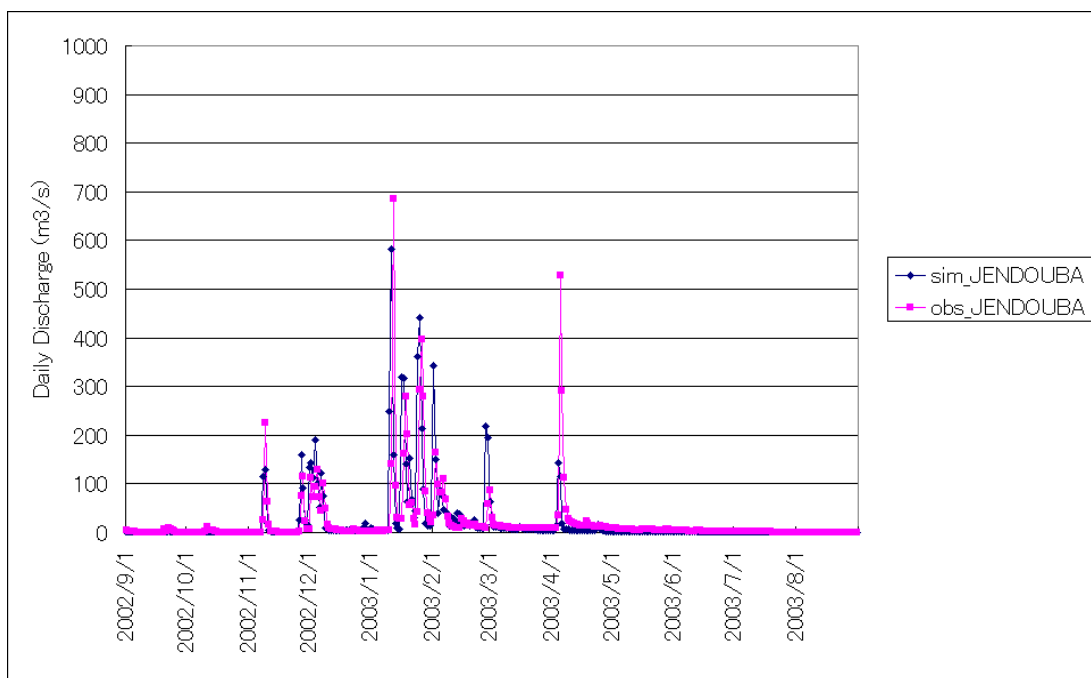
メジェルダ川流域の分布型水循環モデルの構築と検証に用いたデータを示す。

- ・ 河川流量と降雨量：地上観測データ（Bou Salem と Jendouba における 2002 年 9 月～ 2003 年 8 月のデータ）
- ・ 大気データ：長期再解析データ（Japanese 25-year Reanalysis Project (JRA25), <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/jra/download/download-e.html>)
- ・ 地形データ：デジタル地形データ：(hydro1k, <https://lta.cr.usgs.gov/HYDRO1K>)
- ・ 植生データ：衛星解析プロダクツ（葉面積指数(LAI)と光合成有効放射吸収率(FPAR), <http://cliveg.bu.edu/modismisr/>)
- ・ 土地利用：衛星解析プロダクツ：United States U. S. Geological Survey (USGS) , http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/Land_Cover_Products
- ・ 土壌：デジタル土壌データ (Food and Agriculture Organization (FAO), <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>

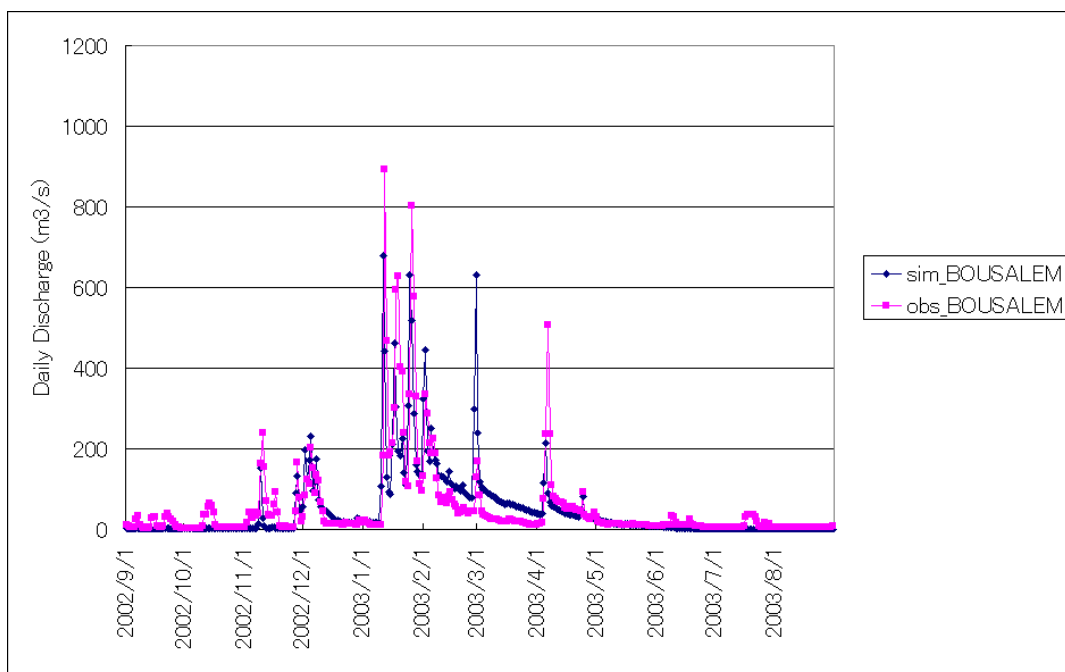
b. 流出モデルのキャリブレーション

まず始めに WEB-DHM でのキャリブレーションによく用いられるパラメータ（土壌各層の透水係数・空隙度・異方性係数、および表面貯留量）をそれぞれ動かし、河川流量に対する感度をみた。本流域では透水係数をもっとも感度の高いパラメータであったため、主に透水係数を調整することでキャリブレーションを行なった。本流域では深層土壌や地下水層と河道との間の水の交換が非常に盛んに行われていることがモデル計算結果の解析からわかったため、表層のみならず根系層および深層の透水係数に関しても慎重に調整を行った。

その上で、2002年9月から2003年8月までの Bou Salem と Jendouba の観測点において観測された河川流量と、モデルで計算された河川流量がなるべく近くなることを目標とし、モデル内部であらかじめ分割されたサブ流域ごとにパラメータを調整した。特に上記 2 地点において 2003 年 1 月に観測された 3 つのピーク流量が正しく再現できることを重視した。上記 2 地点以外の流量観測点も必要に応じて適宜参照して、各サブ流域の低水流量の確認等に用いた。モデルキャリブレーション結果を図Ⅱ-(1)-12～15 に示す。また、図Ⅱ-(1)-12～15 に用いたデータを付表 1a～1c に示す。



図Ⅱ-(1)-12 Jendouba でのキャリブレーション結果 (2002 年 9 月～2003 年 8 月)



図Ⅱ-(1)-13 Bousalem でのキャリブレーション結果 (2002 年 9 月～2003 年 8 月)

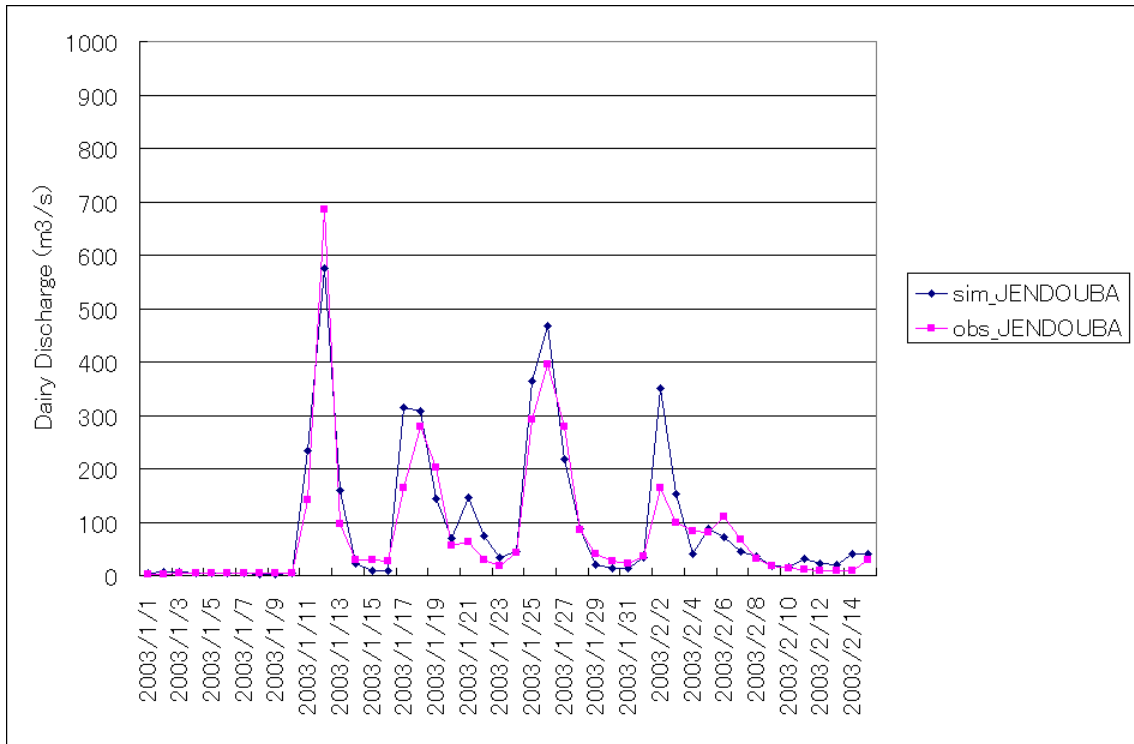


図 II-(1)-14 Jendouba でのキャリブレーション結果 (2003 年 1 月洪水)

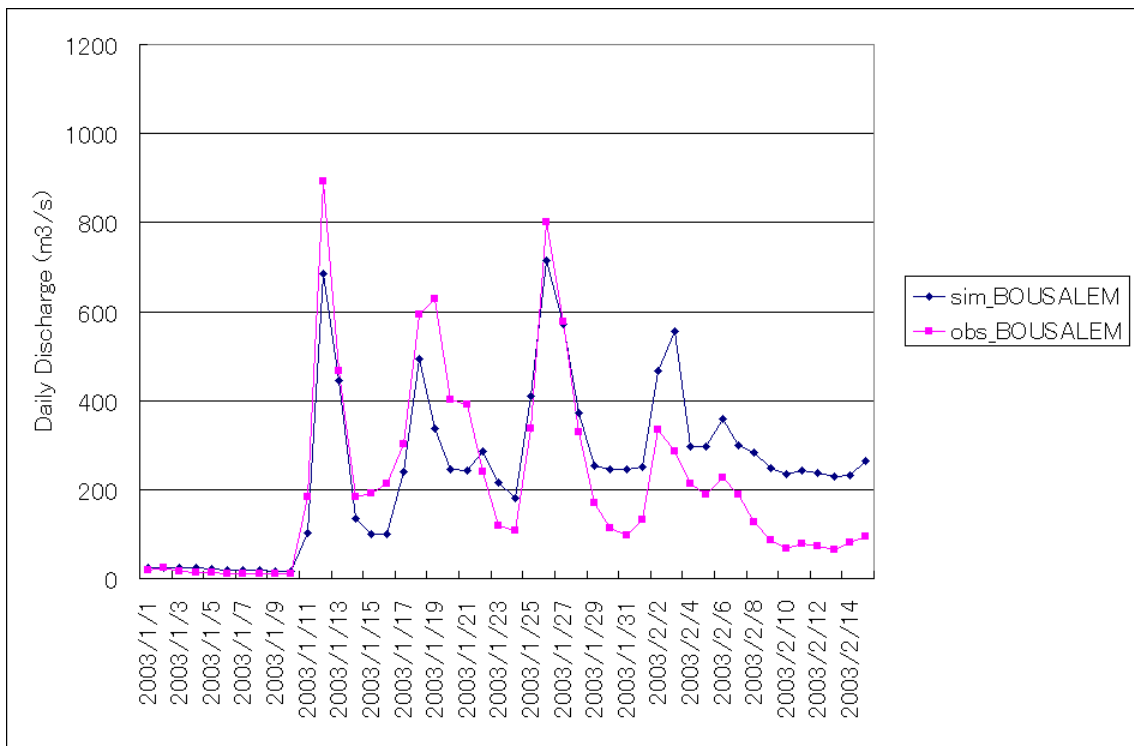


図 II-(1)-15 Bousalem でのキャリブレーション結果 (2003 年 1 月洪水)

c. 降雨パターンと降雨継続日数の選択

キャリブレーションを完了した WEB-DHM に、1)-e で求めた過去 4 つの各洪水ケース (1973 年 3 月、2000 年 5 月、2003 年 1 月、2003 年 12 月) の降雨時空間分布の計画降雨を入力し、洪水ピーク流量の比較を行う。図 II-(1)-16 は 4 日降雨の事例で、2000 年 5 月の降雨パターンのケースが最も大きな洪水ピークを形成することが分かる。

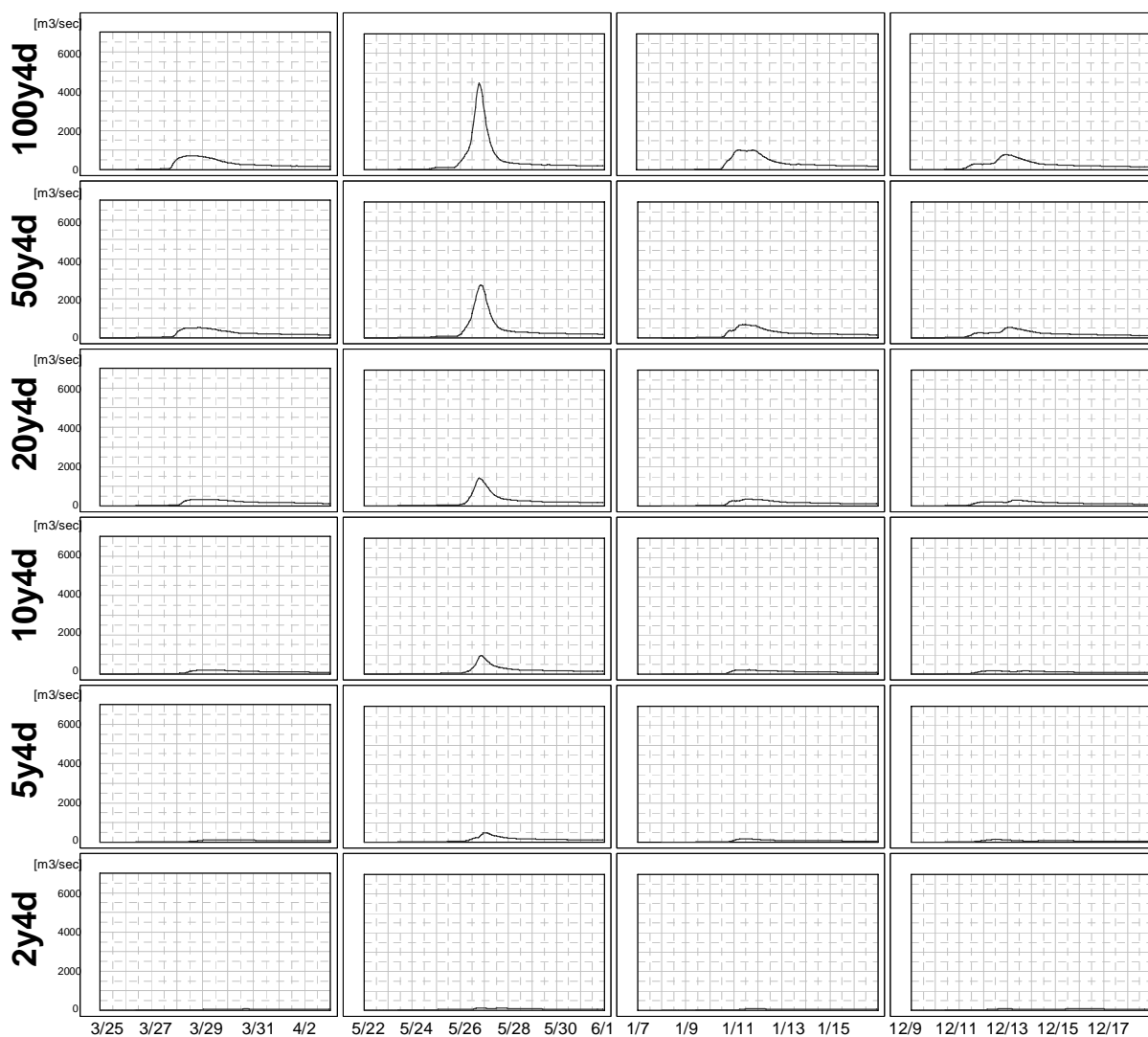
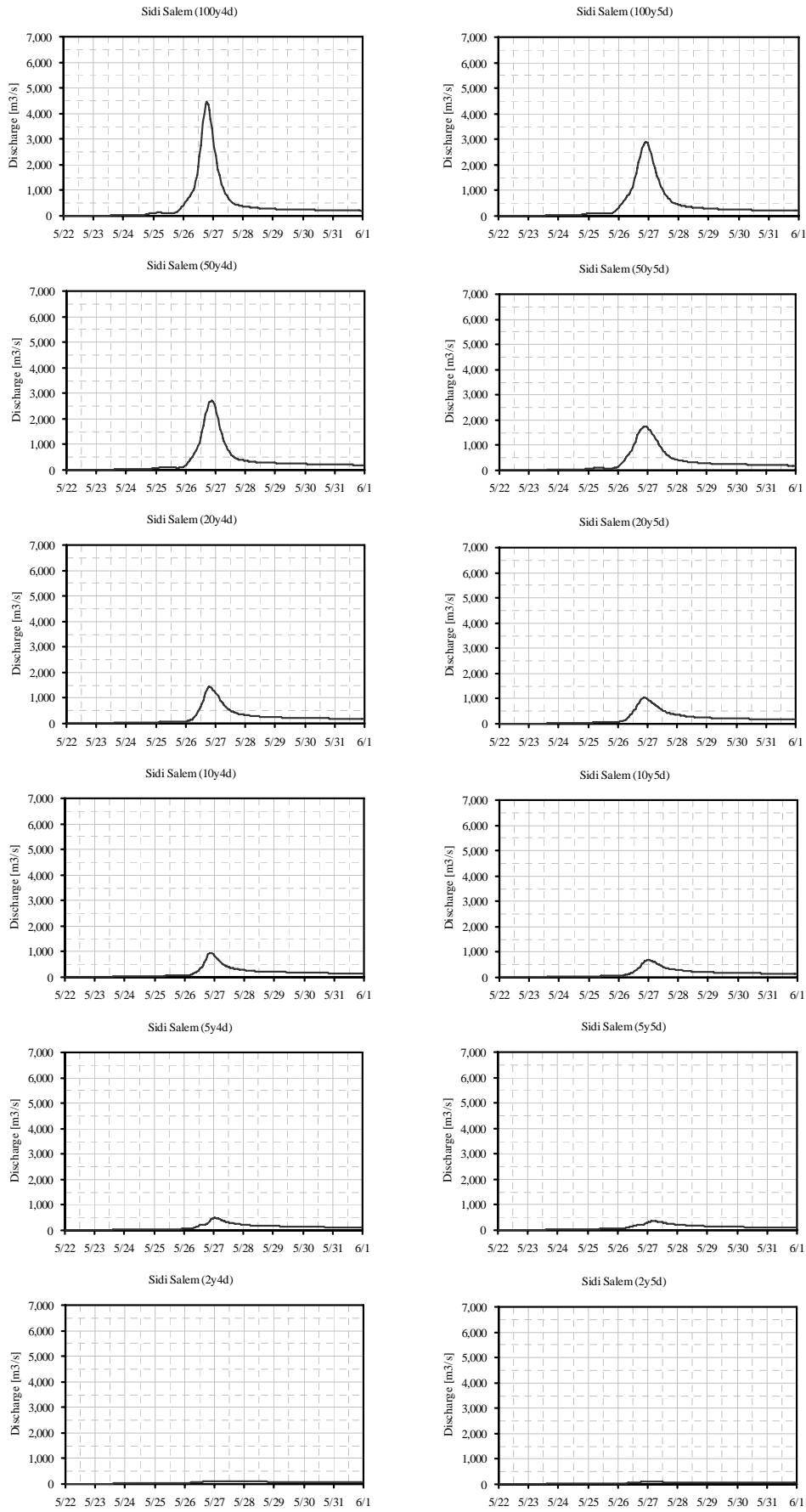


図 II-(1)-16 4日降雨4洪水ケース(左列から、1973年3月、2000年5月、2003年1月、2003年12月)の降雨パターンを用いたシディサレムダム地点の洪水流量(m^3/sec)

そこで、2000年5月の降雨時空間分布パターンを用いて、4日降雨の場合と5日降雨の場合で、シディサレムダム地点の洪水ピーク流量を比較した。図 II-(1)-17 がその結果で、4日降雨用いた場合の方が洪水ピーク流量は大きくなることが分かった。



図Ⅱ-(1)-17 シディサレムダム地点の2000年5月降雨パターンの洪水波形
(左：4日間降雨、右：5日間降雨)

以上の検討により、最大の洪水ピーク流量を与える4日間降雨継続日数、2000年5月の降雨の時空間分布パターンを用いて算定した各再現期間に対する洪水ピーク流量を表Ⅱ-(1)-5に示し、これを洪水計画の基本とする。

表Ⅱ-(1)-5 各再現期間に対応する各地点の洪水ピーク流量
(地名、河川名は図1-(2)-2を参照)

	ピーク流量			
	SidiSalem	Larrousia	Chafrou	Siliana
100y4d	4,463	5,707	347	1,547
50y4d	2,717	3,595	136	1,132
20y4d	1,438	1,959	40	650
10y4d	951	1,171	29	375
5y4d	494	552	15	181
2y4d	124	135	0	36

なお、各地点における状況は、次のとおりである。

Sidi Salem: Sidi Salem ダムへの流入量

Larrousia : Larrousia ダムへの流入量

Chafrou : Chafrou 川と Medjerda 川の合流点

Siliana : Siliana 川と Medjerda 川の合流点

2. 計画洪水流量の策定

1) シディサレムダム操作の導入

既存貯水施設の効果的な操作を盛り込み、シディサレムダム下流の計画洪水流量を策定する。

ダム操作方針は、水位が 116m に達した時点から 6 時間かけて段階的に底部放流管を全開にし、水位が 115m になったら 2 時間かけて同放流管を閉じる。なお、10 年確率については、バルブの開度を全開の一つ手前で止めるという検討も行う。

2) ダム操作を導入した場合のダム下流の洪水計画流量

各再現期間に対応するシディサレムダムへの洪水入流量にダム操作を加えて算出したダム下流地点の洪水流量をシディサレムダムからの放流量とともに図 II-(1)-18 に示す。

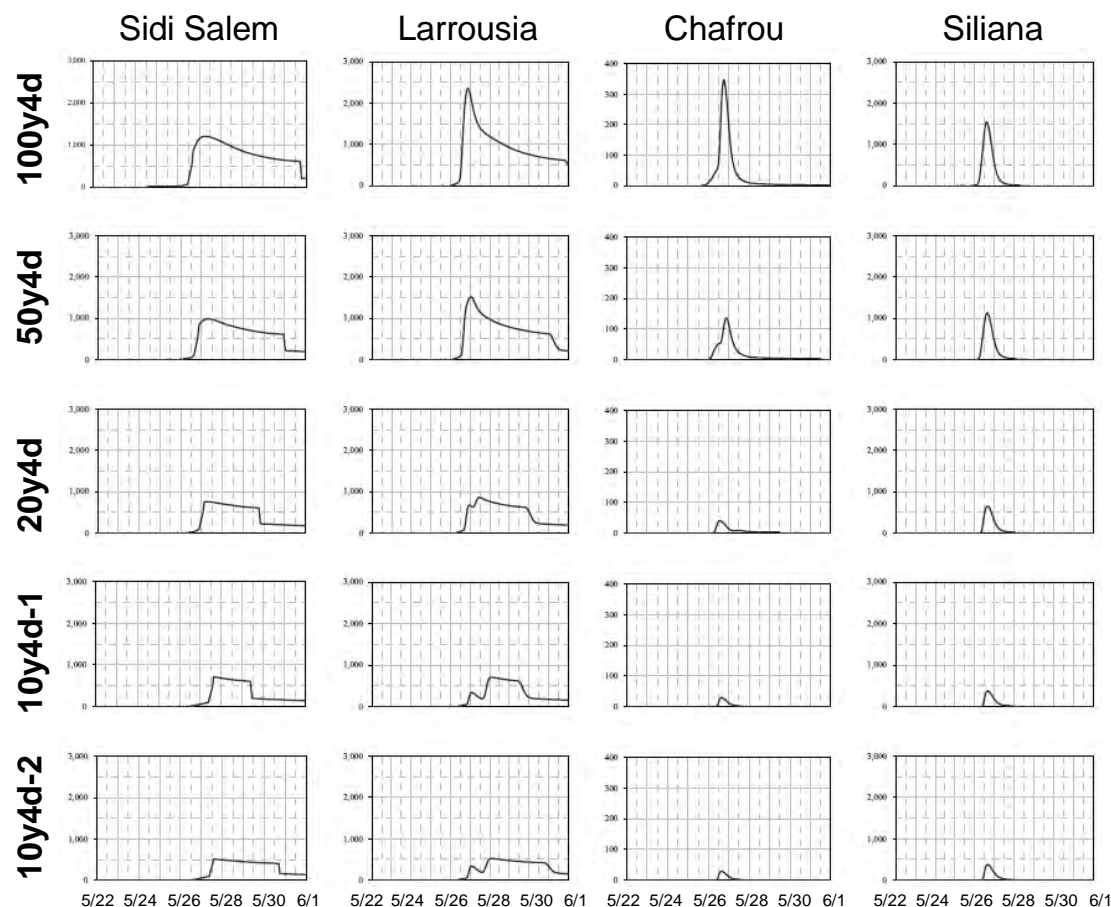


図 II-(1)-18 各再現期間に対応するシディサレムダム放流量と下流各地点の洪水流量) :
左列から、Sidi Salem, Larrouisia, Chafrou, Siliana、また、上段から、100y4d,
50y4d, 20y4d, 10y4d-1(バルブ全開時), 10y4d-2(バルブの開度を全開の一つ
手前で止めた時) (m³/sec)

以上の結果、各地点の各再現期間に対応する計画洪水流量は、表Ⅱ-(1)-6に示す。

表Ⅱ-(1)-6 各再現期間に対応するシディサレムダム下流各地点の計画洪水流量
(地名、河川名は図Ⅰ-(2)-3を参照)

	ピーク流量			
	SidiSalem	Larrousia	Chafrou	Siliana
100y4d	1,202	2,361	347	1,547
50y4d	980	1,517	136	1,132
20y4d	754	859	40	650
10y4d-1	713	706	29	375
10y4d-2	516	522	29	375

(2) メジェルダ川流域における気候変動影響評価

気候変動解析のフレームワークを図 II-(2)-1 に示す。これは次の5つの要素で構成されている。

1. 温室効果ガスの排出シナリオの選択
2. GCM の選択
3. 選択された GCM の降雨のバイアス補正
4. 降雨の変化の評価
5. 計画洪水の変化の評価

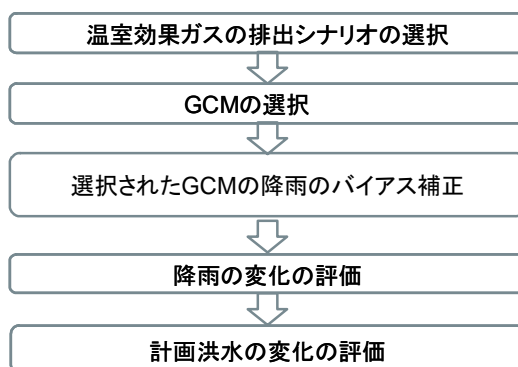


図 II-(2)-1 気候変動解析のフレームワーク

1. 温室効果ガスの排出シナリオの選択

IPCC により 2000 年に発行された IPCC 排出シナリオ(SRES)には、将来の気候変動予測に IPCC の第 3 次評価報告書(TAR)と第 4 次評価報告書(AR4)とで使用されたものが用いられている。排出シナリオは、将来の温室効果ガス、エアロゾルや他の大気の汚染物質とともに将来の土地利用や土地被覆の情報が記述され、4つのシナリオ(A1, A2, B1, B2)が設定されている。これらの各シナリオでは、可能な人口動態、社会経済、政治的、技術的な未来を記述している。本検討では SRES A1B シナリオを使用した。A1B は、非常に急激な経済成長、21 世紀の中間において世界人口がピークに達しその後低下の傾向、新技術やより効果的な技術の導入が記述されているシナリオである。シナリオは全てのソース間でのバランスを考慮している(ここでバランスは、1つのエネルギー源に過度に依存しないように、同様の改善率が全てのエネルギー供給とエンドユーザの技術に適用されると定義される)。このシナリオは、低人口増加、非常に高い GDP 成長、非常に高いエネルギー利用変化、中程度のリソースの可用性と技術変化の急速でバランスのとれた速度と方向 (IPCC Working Group III, 2000) によって特徴付けられている。

2. GCM の選択

GCM 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をする。もし GCM が対象としている領域の現在気候を表現できない場合、それは更なる検討に使用すべきではない。領域の選択は、これらの広範な総観スケールの現象に基づいている。流域と同様に設定し

た領域に固有の気候システムを考慮すべきである。

選択された GCM では、流域スケールでの降水の季節パターンを再現することができなければならない。現在のグローバルなデータセットと GCM モデル間の誤差は、空間相関(Scorr)と平均 2 乗誤差(RMSE)を用いて算定した(式 4, 式 5)。降水量の誤差推定のために GPCP データセットを、他の気象変数の誤差推定のために JRA25 を使用した。

$$Scorr = r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)S_x S_y} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{si} - R_{obs})^2} \quad (5)$$

小スケールでの降雨の GCM での再現能力を評価し、再現能力が悪い GCM を除去するために、追加で次の 3 つのスクリーニング手法を適用した。

- a) 流域における長期の流域での観測降雨の平均(climatology)と GCM との比較をし、もし GCM が季節変動を表現できない場合は除去する。
- b) もし GCM が無降雨の補正を実施したにもかかわらず、微量の降雨を出力している場合は除去する。
- c) 流域内における観測降雨が不均一に分布している場合、流域を分割して長期の観測降雨の平均(通常は、標高や土地利用に関連して、降水が多い地域、中程度の地域、少ない地域強度)を算定し、モデル選択時に考慮する。

結合モデル相互比較プロジェクト 3 (CMIP3) で利用可能なモデルにおける GCM の選択は、このマルチモデル解析のために極めて重要である。表 II-(2)-1 に示すように、降雨、上向き長波放射、海面気圧、東西風、南北風、海面温度、気温の 7 つのパラメータを適切な GCM を選択するために使用した。

本検討では、データ統合解析システム(DIAS)上にアーカイブされている CMIP3 データと、同システムに実装されている、モデルの評価、選択、ダウンロードに関するソフトウェアを利用した。

表 II-(2)-1 GCM 選択に使用した7つのパラメータとそれぞれの季節・領域

パラメータ	ターゲット季節	領域スケール	局所スケール
降水	冬 (10月 -1月)		5°E- 15°E 25°N - 39°N
外向き長波放射	冬 (10月 -1月)		5°E- 15°E 25°N - 39°N
海面気圧	冬 (10月 -1月)	30°W- 50°E 20°N - 50°N	
東西風	冬 (10月 -1月)	30°W- 50°E 20°N - 50°N	
南北風	冬 (10月 -1月)	30°W- 50°E 20°N - 50°N	
海面温度	夏 (5月 -8月)	30°W- 50°E 20°N - 50°N	
気温	夏 (5月 -8月) 冬 (10月 -1月)		5°E- 15°E 25°N - 39°N

また、表 II-(2)-2 に示すように、局所スケールの気象パラメータ(降雨)の領域を、東経 5 度～15 度、北緯 25 度～39 度とし、大きなスケールでの循環や周囲の海洋の影響を考慮するため、西経 30 度～東経 50 度、北緯 20 度～50 度の領域を設定した(図 II-(2)-2)。

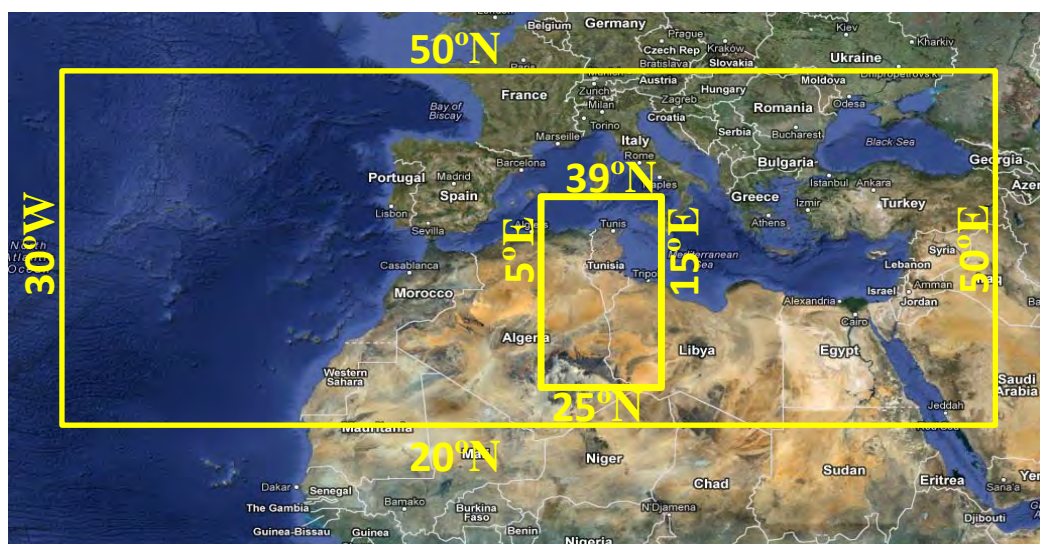


図 II-(2)-2 GCM 選択に使用した領域

各 GCM において空間相関と RMSE の値が全ての GCM において平均をとった値よりもどちらとも大きい場合は 1 のスコアを与え、どちらかが平均を上回ったものはスコアに 0 を与えた。このスコアリングを 7 つの要素に適用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し、表 II-(2)-2 に示す上位 10 のモデルを選択した。

表 II-(2)-2 GCM のスコアと上位 10 のモデル

No	GCM Ranking	5E-15E		30W-40E		30W-40E		5E-15E		Grand Total Index
		25N-39N	25N-39N	20N-50N	20N-50N	20N-50N	20N-50N	25N-39N	25N-39N	
Model name	Precipit	OLR	PressSea	SST	ZonalWin	MeriWind	Air Temp	AirTemp		
1	bccr_bcm2_0	1	1	0	1	1	1	1	1	7
2	cccma_cgcm3_1	1	1	0	1	1	1	0	1	6
3	ingv_echam4	0	0	1	1	1	1	0	1	5
4	miroc3_2_hires	1	0	1	0	1	0	1	1	5
5	mpi_echam5	0	0	1	1	1	1	1	0	5
6	ukmo_hadcm3	1	1	1	0	1	1	0	0	5
7	ukmo_hadgem1	-1	1	1	1	1	1	1	0	5
8	cccma_cgcm3_1_t63	1	0	0	0	1	1	0	0	3
9	gfdl_cm2_1	-1	1	1	1	0	0	0	1	3
10	mri_cgcm2_3_2a	0	1	1	1	1	0	0	-1	3
11	gfdl_cm2_0	1	0	0	-1	0	0	1	0	1
12	giss_model_e_r	0	1	0	-1	0	0	1	0	1
13	miroc3_2_medres	0	1	0	1	0	0	0	-1	1
14	cnrm_cm3	0	0	-1	-1	0	0	1	1	0
15	giss_model_e_h	0	1	-1	0	0	-1	1	1	0
16	miub_echo_g	1	0	0	-1	0	0	0	0	0
17	ncar_ccsm3_0	0	1	-1	-1	0	0	0	1	0
18	csiro_mk3_5	-1	-1	-1	1	0	0	1	0	-1
19	csiro_mk3_0	-1	0	-1	0	1	0	-1	-1	-3
20	giss_aom	-1	0	-1	0	-1	-1	0	1	-3
21	inmcm3_0	-1	0	-1	0	-1	-1	0	1	-3
22	ipsl_cm4	0	0	-1	0	0	-1	0	-1	-3
23	ncar_pcm1	0	0	-1	0	-1	-1	0	-1	-4
24	iap_fgoals1_0_g	0	0	-1	-1	-1	-1	0	-1	-5

表 II-(2)-2 に示す 7 つのパラメータを用いて選択した上位 10 のモデルのうち、ukmo_hadgem1 と gfdl_cm2_1 の 2 つのモデルは表 II-(2)-3 に示すように雨季における降雨の再現が悪いため除外をした。また、bccr_bcm20 と ukmo_hadcm3 の 2 つについてはモデルの出力結果が不完全であったために除外をした。

表 II-(2)-3 雨季における降雨のスコア

model	5E-15E & 25N-39N		Oct		Nov		Dec		Jan		Average 4 month		S_corr Index	RMSE Index	Total Index Precip
	S_corr	RMSE	S_corr	RMSE	S_corr	RMSE	S_corr	RMSE	S_corr	RMSE	S_corr	RMSE			
1	bccr_bcm2_0	0.96872	0.24326	0.96444	0.37114	0.90929	0.51771	0.86463	0.577913	0.92677025	0.427508	1	1	1	
2	cccma_cgcm3_1	0.96676	0.20113	0.95024	0.38398	0.92669	0.36117	0.90249	0.348677	0.93654425	0.3237375	1	1	1	
3	cccma_cgcm3_1_t63	0.96752	0.21654	0.96038	0.28705	0.94855	0.35204	0.90318	0.362201	0.94490775	0.30445575	1	1	1	
4	cnrm_cm3	0.86434	0.38458	0.9363	0.51278	0.90315	0.63841	0.84625	0.598258	0.887511	0.533507	0	1	0	
5	csiro_mk3_0	0.92652	0.46213	0.90261	0.68082	0.83501	0.66315	0.76123	0.705902	0.856343	0.6279985	0	0	-1	
6	csiro_mk3_5	0.88431	0.63161	0.85477	0.78266	0.79394	0.70339	0.69582	0.736808	0.8072085	0.71361725	0	0	-1	
7	gfdl_cm2_1	0.94633	0.25597	0.96329	0.34783	0.89737	0.56844	0.85395	0.488814	0.9152345	0.415287	1	1	1	
8	gfdl_cm2_0	0.89816	0.53141	0.92648	0.73926	0.86989	0.78988	0.77901	0.666212	0.8680865	0.681691	0	0	-1	
9	giss_aom	0.90472	0.41939	0.90955	0.67065	0.9057	0.63434	0.85113	0.642466	0.89277175	0.59171075	0	0	-1	
10	giss_model_e_h	0.84383	0.5915	0.92515	0.42553	0.8962	0.42831	0.85166	0.439001	0.87921125	0.47108475	0	1	0	
11	giss_model_e_r	0.847	0.67726	0.88605	0.47348	0.9093	0.39966	0.88084	0.408311	0.8807955	0.489677	0	1	0	
12	iap_fgoals1_0_g	0.95457	0.57582	0.92503	0.65602	0.90999	0.61532	0.87582	0.63443	0.916352	0.6203975	1	0	0	
13	ingv_echam4	0.92901	0.55898	0.95203	0.55458	0.92246	0.6893	0.90557	0.594831	0.9272675	0.59942225	1	0	0	
14	inmcm3_0	0.94487	0.59185	0.85366	0.96564	0.88449	0.83999	0.86181	0.722015	0.8862075	0.7798755	0	0	-1	
15	ipsl_cm4	0.9166	0.69832	0.87238	1.00189	0.91362	0.82208	0.91169	0.74262	0.90357475	0.84122675	1	0	0	
16	miroc3_2_hires	0.88981	0.49489	0.97874	0.21243	0.96324	0.28352	0.95752	0.285954	0.94732775	0.319198	1	1	1	
17	miroc3_2_medres	0.90762	0.37245	0.94492	0.58999	0.90741	0.70287	0.85413	0.677073	0.90351975	0.58559575	1	0	0	
18	miub_echo_g	0.93605	0.33656	0.94933	0.37966	0.92565	0.55765	0.89445	0.592521	0.92636825	0.46659675	1	1	1	
19	mpi_echam5	0.90883	0.40746	0.93518	0.51303	0.89236	0.6853	0.79993	0.573776	0.88407275	0.54489225	0	1	0	
20	mri_cgcm2_3_2a	0.91446	0.49038	0.93822	0.65917	0.92151	0.79298	0.84277	0.569821	0.90423925	0.62808575	1	0	0	
21	ncar_ccsm3_0	0.93857	0.37967	0.94462	0.62965	0.91634	0.66505	0.89861	0.614014	0.924538	0.57209675	1	0	0	
22	ncar_pcm1	0.96076	0.25267	0.94725	0.68616	0.91448	0.727	0.88475	0.637442	0.926806	0.57831825	1	0	0	
23	ukmo_hadcm3	0.97537	0.31166	0.97109	0.27328	0.94985	0.41353	0.89013	0.443964	0.94661075	0.36060875	1	1	1	
24	ukmo_hadgem1	0.92952	0.75825	0.87507	0.7476	0.87186	0.51806	0.86614	0.500818	0.8859925	0.631182	0	0	-1	

最終的に cccma_chcm31, cccma_chcm31_t63, miroc3_2_hires, mpi_echam5, mri_cgcm2_3_2a, ingv_echam4 の 6 つのモデルが本検討のために選択された。図 II-(2)-3 に GCM のモデルの 10 月～1 月の平均降雨の空間分布と GPCP の分布を示す。選択された 6 つのモデルが GPCP

と同様の分布を示していることがわかる。

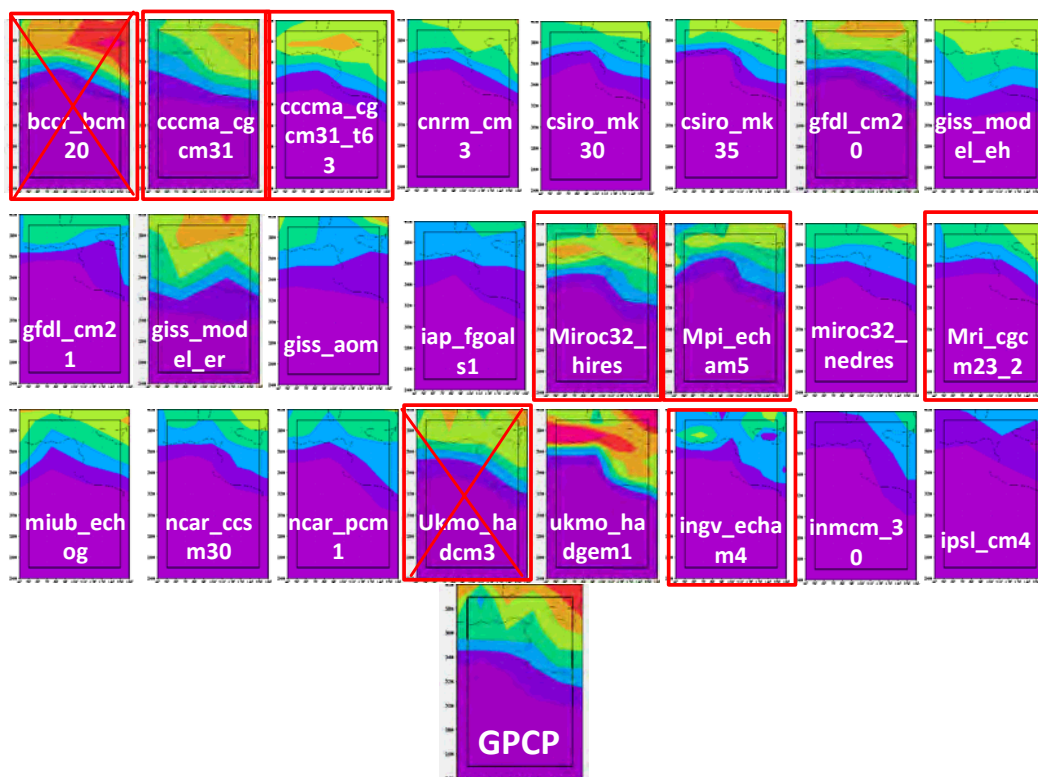


図 11-(2)-3 24GCM の 10 月～1 月の平均降雨の空間分布と GPCP の分布

3. 選択された GCM の降雨のバイアス補正

GCM の降水の出力は、バイアスを補正すること無しに水文モデルや影響評価モデルにダイレクトに使用することはできない (Ines and Hansen, 2006, Feddersen and Andersen, 2005, Sharma et al., 2007). バイアス補正無しにダイレクトに使用した場合、降雨のバイアスを増幅してしまう結果を導く可能性がある。そのため、事前に降雨のバイアス補正をする必要がある。

水文学的な研究の中で GCM アウトプットを使用するためには、適切なダウンスケーリングが必要となる。一般的には、統計的ダウンスケーリングと力学的ダウンスケーリングの 2 つの方法がある。力学的ダウンスケーリングでは GCM アウトプットを初期条件・境界条件とし高解像度の数値気象予測モデルに入力しダウンスケーリングをする。統計的ダウンスケーリングは多数の地上観測データと GCM の統計的な関係を用いて、バイアス補正と同時にダウンスケーリングをする。本プロジェクトでは、統計に基づく簡略化した統計的ダウンスケーリング方法を用いる。

降水の妥当なバイアス補正には、無降雨日、豪雨日、通常降雨日に分けて実施する必要がある。GCM に組み込まれている積雲パラメタリゼーションの限界により、一般に GCM は多くの小雨の日を出力する。また、豪雨の再現性も低く、降雨の季節変化も適切に表現できていない場合がある。これらのバイアスはそれぞれ性質が異なるために、3 つに分けて、

バイアス補正を実施する必要がある。明確に雨季や乾季に分けることができる流域であれば、それぞれでバイアス補正を実施すべきで、これは対象の流域の気候条件に応じて、1ヶ月もしくは2ヶ月ごとのスケールで実施すべき場合もある。

このような無降雨日、豪雨日、通常降雨日毎に3つのプロセスによるバイアス補正の方法を図 II-(2)-4 に示す(Nyunt, et al., 2012).


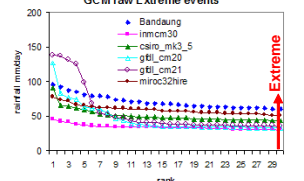
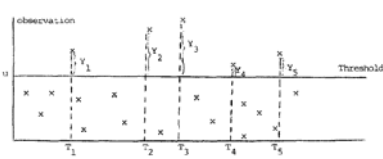

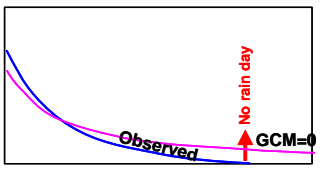

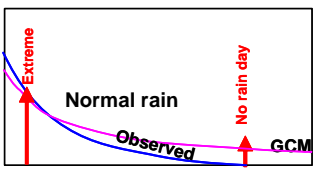
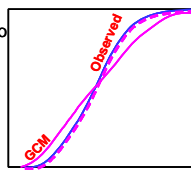
降雨タイプ	閾値	相関
豪雨 	<ul style="list-style-type: none"> - Larger than minimum of annual maxima of station - count the number of extreme events in station (eg. Top of 30 rainfall by ranking all rainfall) - apply same number of extremes in GCM 	Generalized Pareto Distribution <ul style="list-style-type: none"> -Non every year statistics -Extreme (long or short tailed) fitting -Peak over threshold method  <p>Fig. 2. Illustration of threshold model.</p>
無降雨 		Ranking order statistics <ul style="list-style-type: none"> - frequency of no rain day in GCM is same as station - less than no rain day threshold change zero rainfall.
通常の雨 		Gamma Distribution <ul style="list-style-type: none"> - monthly CDF of GCM mapping to monthly CDF of station - inverse of Gamma CDF in each month is corrected rain 

図 II-(2)-4 無降雨、通常降雨、豪雨の3つのバイアス補正の方法

STEP 1: 豪雨の補正

GCM から出力される豪雨と観測値を比較した場合、ほとんどの GCM で豪雨が過小評価されている。そのため、適切な補正方法を適用し観測値と合うように補正をする必要がある。

20 年間の観測における各年最大の降水量のうち最小の値を求め、その値以上の降水を豪雨と判定した。対象の期間の GCM が観測値に一致する期間の各年の日最大雨量をピックアップし、それを超える降雨を豪雨とした。確率分布には式(6)で示される一般パレート分布 (GPD) を適用した。

$$F(x) = 1 - \left[1 - \frac{\kappa(x - \xi)}{\alpha} \right]^{1/\kappa} \quad (6)$$

ここで、 α はスケールパラメータ、 κ は形状パラメータで、積率法を用いて次式で求められる。

$$\alpha = \frac{1}{2} \mu \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} + 1 \right) \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (8)$$

ここで、 μ は標本平均値、 σ^2 は標本の分散である。 ξ は局所パラメータで局所パラメータ κ に対する感度解析を行い、安定した値をとる限界値を用いて ξ の推定値とした。バイアス補正後の、それぞれのある確率年 T に対する降水強度 X_T は次式で求められる。

$$X_T = \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \left[1 - (\lambda T)^{-\kappa} \right] \quad (9)$$

STEP 2: 無降雨日の補正

多くの GCM の特徴として、非現実的な多くの小雨日が出力される。これらは GCM に組み込まれている積雲パラメタリゼーションの限界により生じる。そのため、次の 4 ステップを適用し無降雨日の補正を実施した。

- a) 観測値、GCM 出力を降雨強度の強い順に並び替える。
- b) 観測値の降雨が 0mm/day になる順位を求める。この順位を GCM で無降雨日の閾値とする。
- c) 閾値以下の GCM の値を 0mm/day とする。
- d) 過去の GCM の閾値を将来の GCM の降雨にも適用する。

STEP 3: 通常の降雨の補正

無降雨と豪雨が定義されると、それ以外は通常の降雨となる。通常の降雨の補正は、観測雨量の積算値の確率分布に式(10)のガンマ関数を適用して、GCM の出力を補正する。

$$F(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right); x \geq 0 \quad (10)$$

ここで、 α と β はそれぞれ形状パラメータ、スケールパラメータである。

過去の通常の降雨から得られるガンマ分布の逆関数を過去の GCM の補正に使用した。これを将来の GCM の通常の豪雨にも適用した。

空間的ダウンスケーリングは、図 II-(2)-5 に示す 44 の雨量計データの各々を用いてバイアスを補正した結果を、距離の 2 乗に反比例する重みを適用し空間的な補正済みの GCM 降水分布を作成した。

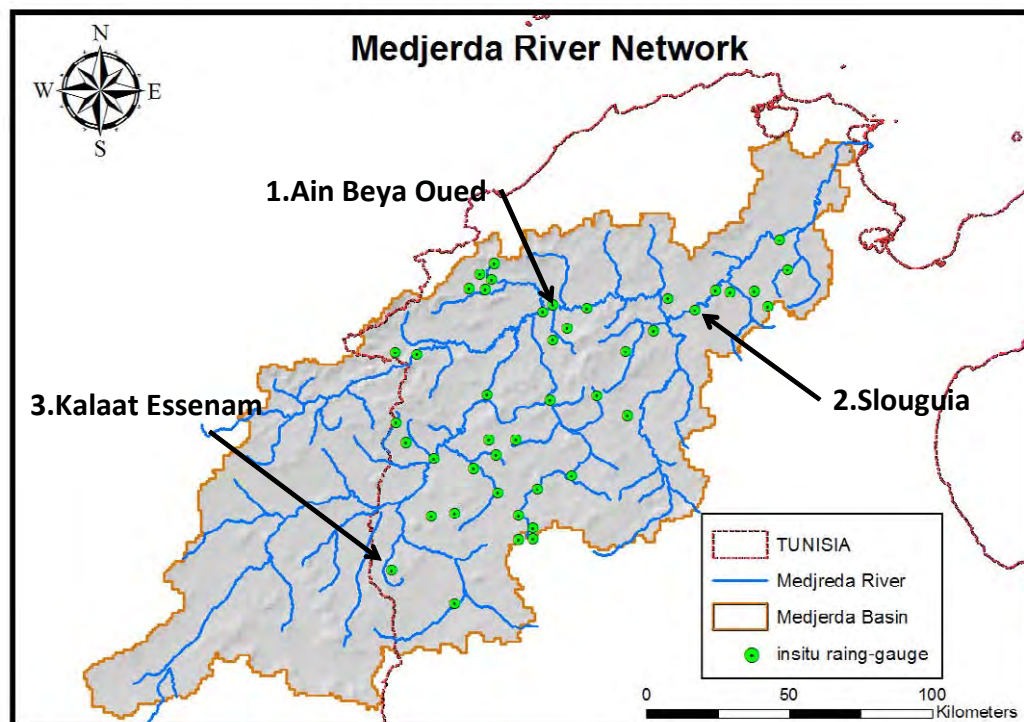


図 II-(2)-5 メジェルダ川流域における雨量計の分布

図 II-(2)-6, 7, 8 に流域の中間に位置し流域内で最大の降雨を観測している Ain Beya Oued 観測地点、また、流域内で乾燥地域となる下流部に位置する Slougua 観測地点、流域の上流部に位置する Kalaat Essenam における、月平均降雨と、1981-2000 年の日降水量の順序統計値の中から上位 70 位のバイアス補正前後の降雨の最大値からの順序統計結果を示す。

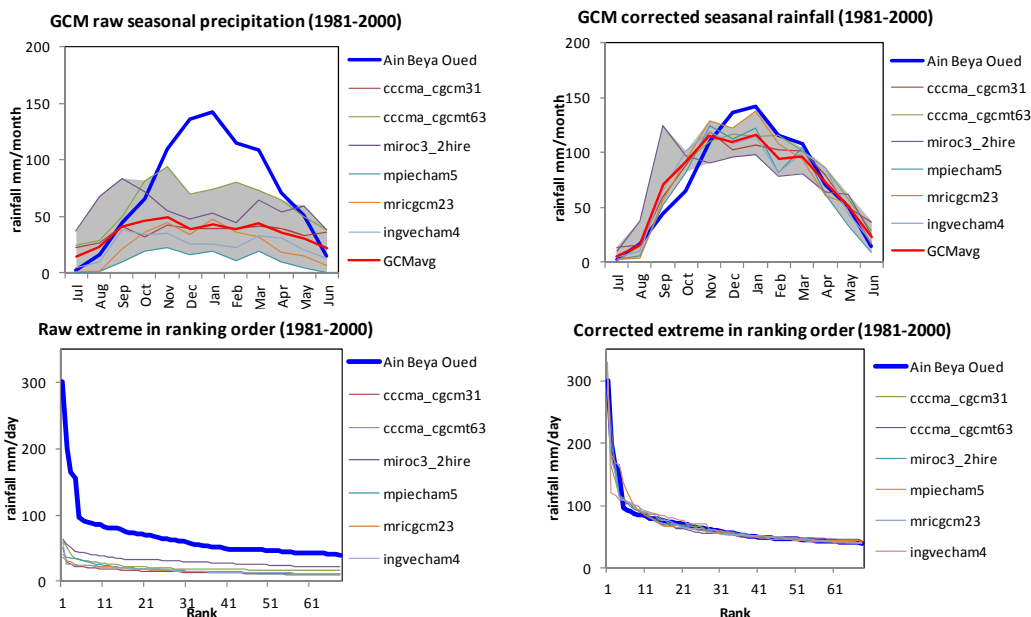


図 11-(2)-6 Ain Beya Oued 観測地点における月平均降雨(上段)と上位 70 位の豪雨(下段)のバイアス補正前(左)後(右)の降雨

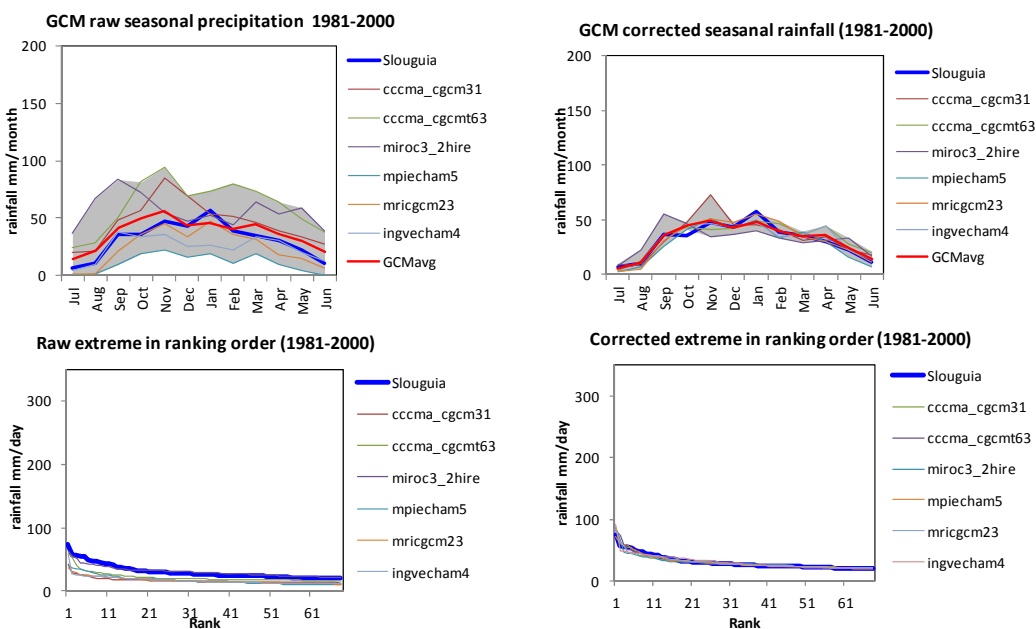


図 11-(2)-7 Slouguia 観測地点における月平均降雨(上段)と上位 70 位の豪雨(下段)のバイアス補正前(左)後(右)の降雨

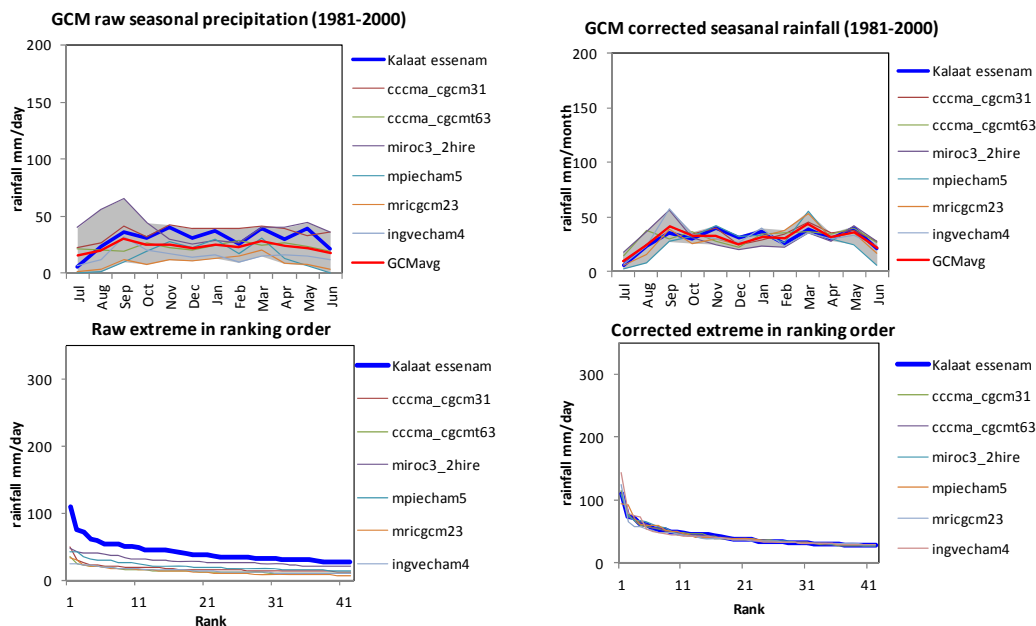


図 II-(2)-8 Kalaat Essesnam 観測地点における
月平均降雨(上段)と上位 70 位の豪雨(下段)のバイアス補正前(左)後(右)の降雨

豪雨に関しては、図 II-(2)-9 に示すようにバイアスが補正されたモデル出力が観測降雨を用いて算定した確率年と合うことが示された。

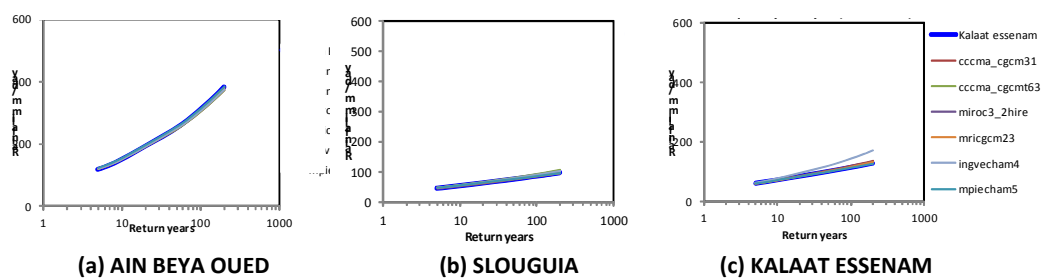


図 II-(2)-9 豪雨におけるバイアス補正済みの GCM と観測降雨との比較

観測降雨から計算した流域内における月平均降雨分布と、Cccmacgcm31, Cccmacgcm63, Miroc32_hires, Mpiecham5, Mricgcm23, ingv_echam4 の各 GCM におけるバイアス補正前後の流域内月平均降雨分布を図 II-(2)-10a, 10b に示す。これらの図よりそれぞれのモデルにおいてバイアス補正が適切に実施されていることがわかる。

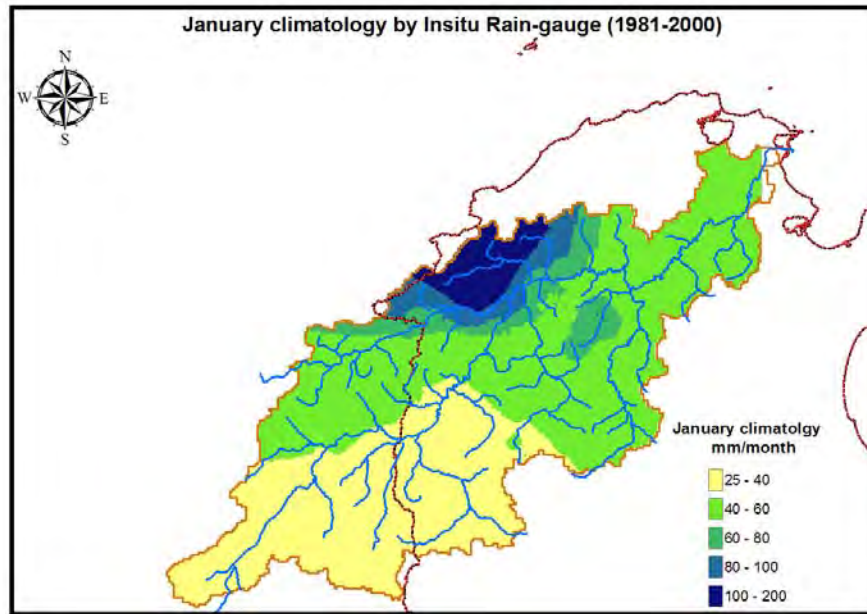


図 11-(2)-10(a) 1981年～2000年の1月における観測降雨の月平均降雨分布

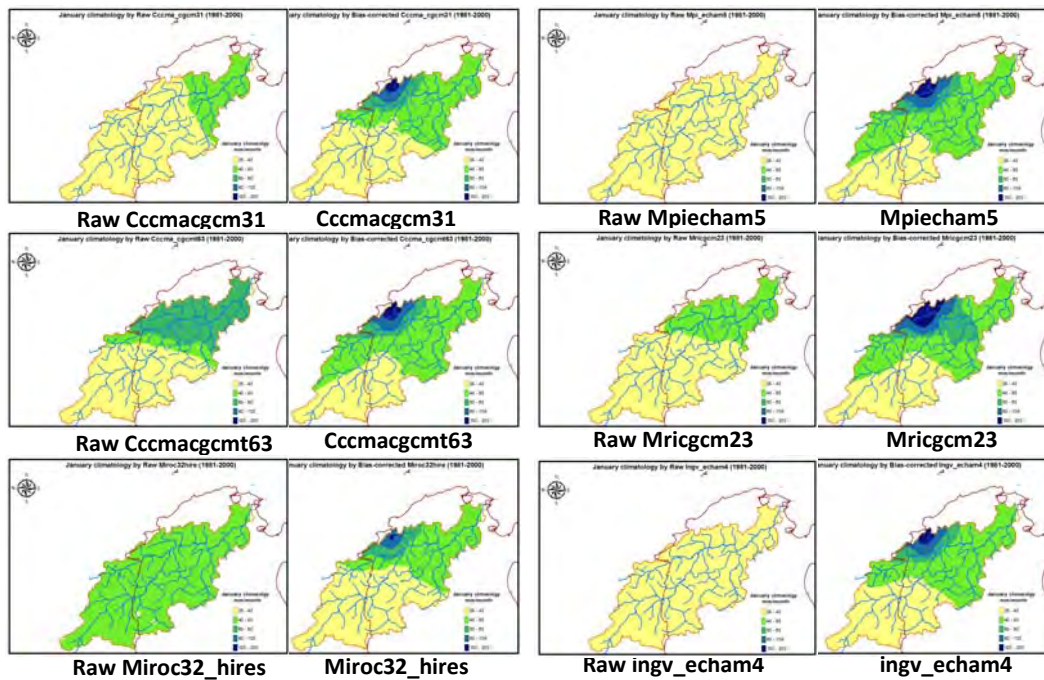


図 11-(2)-10(b)

Cccmacgcm31, Cccmacgcm63, Miroc32_hires, Mpiecham5, Mricgcm23, ingv_echam4 の各 GCM の 1981 年～2000 年の 1 月におけるバイアス補正前(左)と補正後(右)の流域内月平均降雨分布

4. 降雨の変化の評価

3つの観測地点における、年平均降雨、無降雨日数、季節降雨、年間最大連続無降雨日の過去と将来の比較を図 II-(2)-11, 12, 13, 14, 15 に示す。図に示すように選択された全てのモデルで、例外無く乾燥傾向にあることが示された。

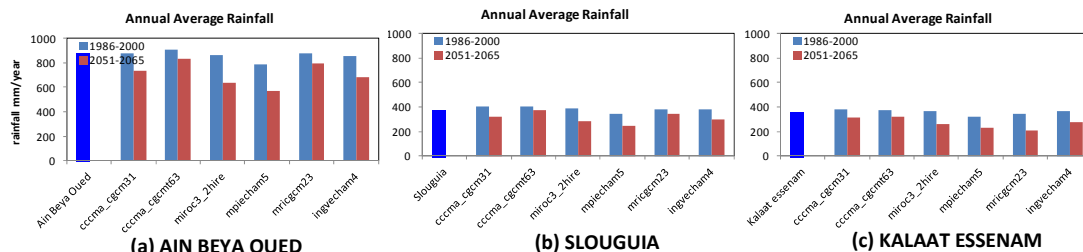


図 II-(2)-11 年平均降雨の過去(水色)と将来(赤)の比較

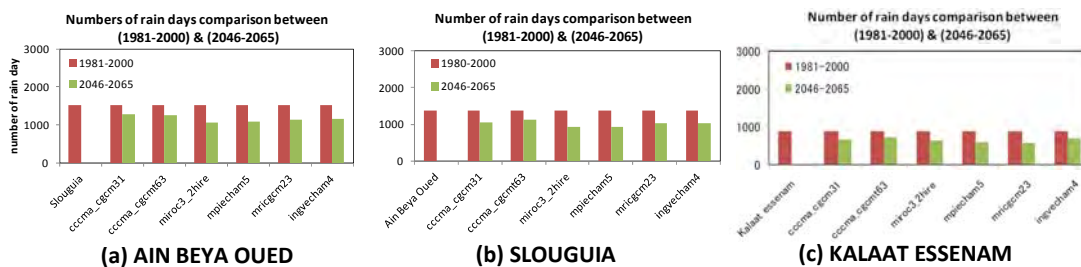


図 II-(2)-12 過去の補正後の降雨日(赤)と将来の補正後の降雨日(黄緑)

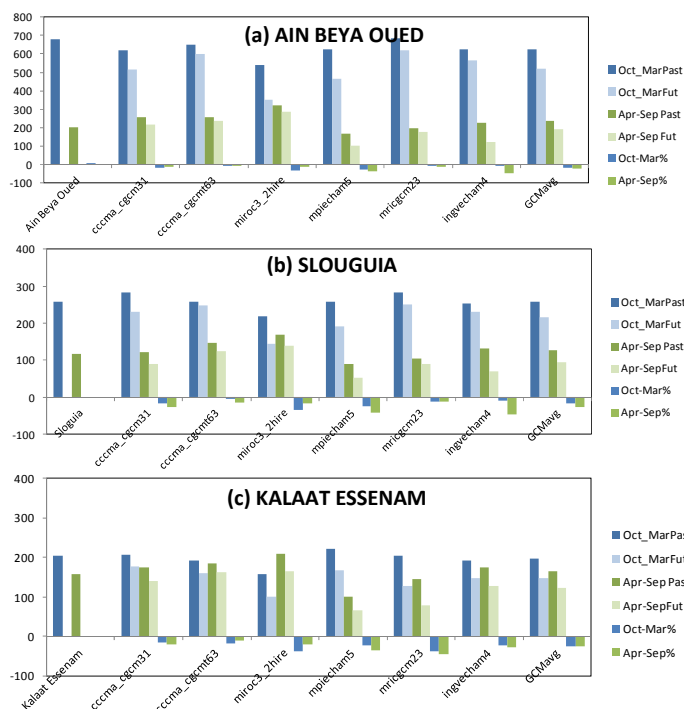


図 11-(2)-13 季節降水量(mm)の変化 (青:過去の雨季(10月~3月), 水色:将来の雨季(10月~3月), 黄緑:過去の乾季(4月~9月), 薄黄緑:将来の乾季(4月~9月)), なお、青のマイナス値は雨季の将来から過去を引いた値、緑のマイナス値は、乾季の将来から過去を引いた値を示す。

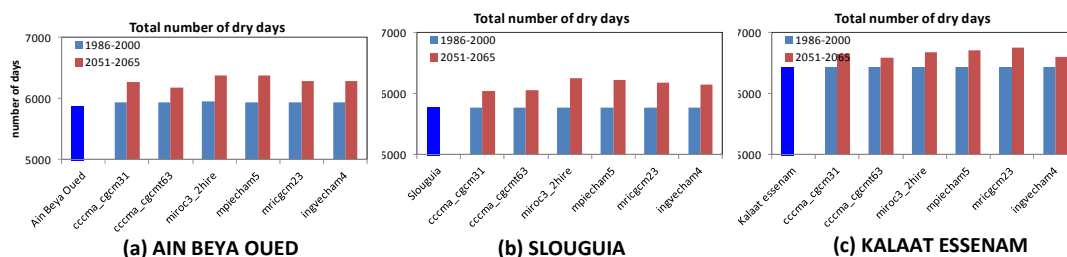


図 11-(2)-14 無降雨日の過去(水色)と将来(赤)の比較

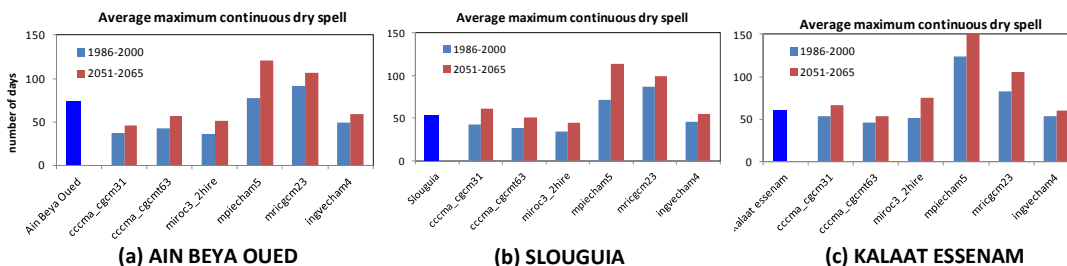


図 11-(2)-15 年間最大連続無降雨日の過去(水色)と将来(赤)の比較

図 II-(2)-16 に雨季と乾季における季節降雨の空間分布の変化を示す。季節降雨は流域全体で雨季、乾季ともに減少する傾向にある。最も大きな減少は流域上流部における乾季にて発生することが示された。

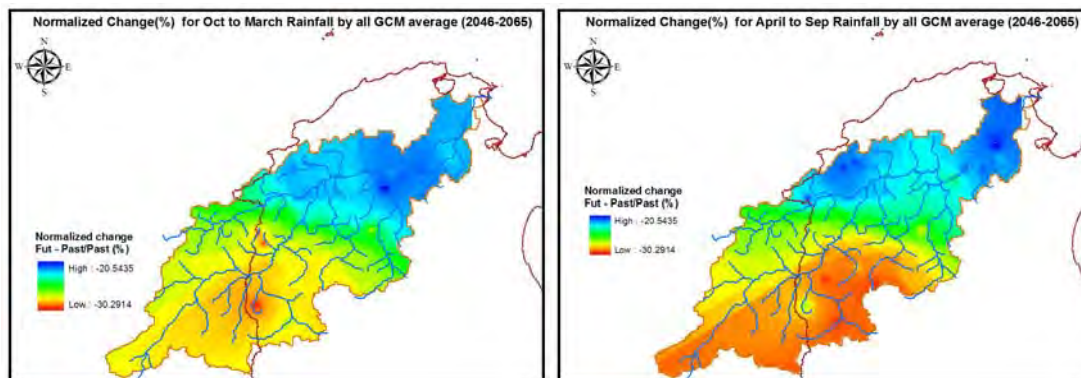


図 II-(2)-16 雨季(左)と乾季(右)における季節降雨の空間分布の変化

一方で豪雨の変化では不確実性があることが示された。各モデル出力の将来と地上観測から得られた現在における確率年と豪雨の関係を図 II-(2)-17 に示す。

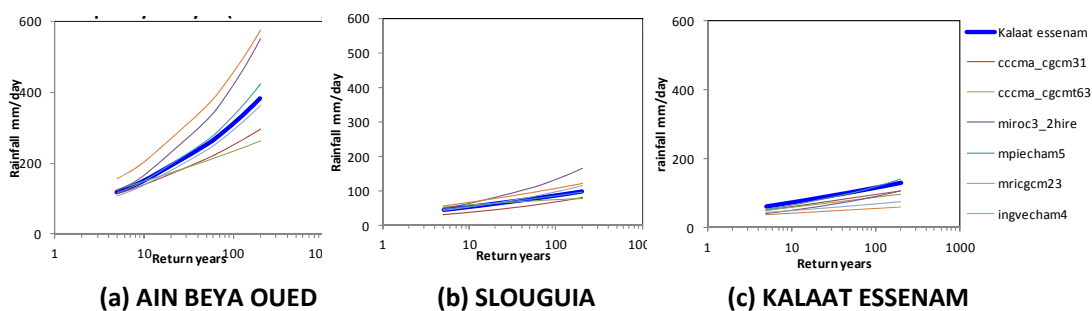


図 II-(2)-17 各モデル出力の将来と地上観測の現在における確率年と豪雨の関係

図 II-(2)-17 に示すように、豪雨イベントの傾向については、砂漠地域に存在する Kalaat Essenam 地点において全てのモデルで減少傾向を示したものの、Ain Beya Oued と Slouguaia においてはモデル間で異なる傾向を示した。図 II-(2)-18 より、50 年確率雨量、100 年確率雨量は流域中部で増加傾向に、また、上流部では減少傾向にあることが示された。ただし、モデル間のばらつきは、無視できないほどに大きい。

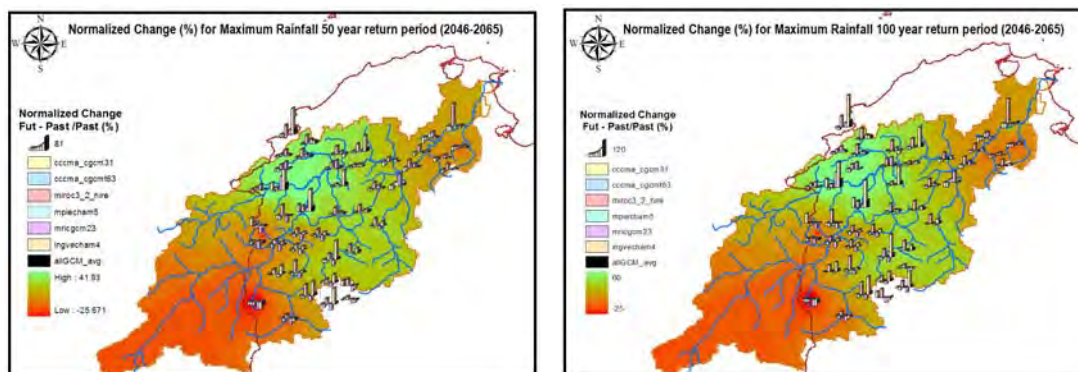


図 II-(2)-18 50年確率(左)と100年確率(右)における豪雨回数の変化

5. 計画洪水の変化の評価

II-(1)-1 章で議論したように本流域においては降雨継続日数として4日が計画降雨として使われた。そこでまず、表 II-(2)-4 に示すように、それぞれの確率年における現在の日降雨と将来の日降雨との比率をGCM毎に推定した。

表 II-(2)-4 各確率年における現在と将来の日降雨の比率

Return years	obs [mm/d]	cccma_cgcm31	cccma_cgcm63	miroc3_2hire	mpiecham5	mricgcm23	ingvecham4
2.00	90.24	0.91	1.03	0.86	0.91	0.93	0.92
5.00	119.31	0.91	0.97	0.95	0.94	0.95	0.96
10.00	150.93	0.91	0.93	1.00	0.96	0.96	0.99
50.00	252.05	0.91	0.84	1.18	1.01	0.99	1.07
80.00	290.97	0.91	0.81	1.24	1.03	1.01	1.11
100.00	311.26	0.91	0.80	1.28	1.04	1.01	1.12
150.00	351.44	0.92	0.78	1.34	1.07	1.03	1.15
200.00	382.76	0.92	0.77	1.39	1.08	1.04	1.18

次に表 II-(2)-5 に示すように、この比率を計画降雨と各GCMの将来の4日降雨に適用した。

表 II-(2)-5 比率を計画降雨と各GCMの将来の4日降雨に適用した結果

Return years	past	future					
		cccma_cgcm31	cccma_cgcm63	miroc3_2hire	mpiecham5	mricgcm23	ingvecham4
2	53.9	49.3	55.5	46.6	48.9	50.2	49.5
5	74.3	68.0	71.9	70.3	69.9	70.7	71.6
10	89.3	81.4	82.8	89.4	85.3	85.6	88.4
50	126.8	115.5	106.3	149.2	128.2	125.7	136.3
100	144.5	126.7	112.9	172.3	143.3	139.5	153.5

表 II-(2)-5 で得られた各モデルの各再現期間に対応する降水量を、II-(1)-1 項で求めた計画雨量の代わりに用い、同じ時間、空間降雨パターンを用いて、同章で得られたWEB-DHMに入力して、洪水波形を求め、図 II-(2)-19 に示す。

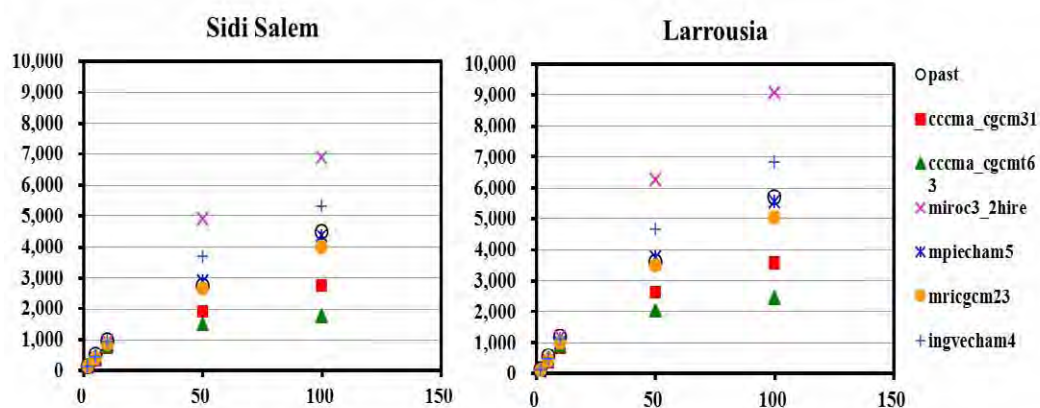


図 II-(2)-19 GCM 毎の計画洪水の比較: Sidi Salem (左), Larrouisia (右)

図 II-(2)-19 にみられるように、各 GCM による洪水流量の予測の不確実性については、10 年以下の低い再現期間の中小洪水に対する洪水流出率が低いため大きな影響は見られないが、50 年を超えるような大洪水では、洪水流出率が高くなるため、非常に大きい。これは、本河川のように半乾燥帯の河川における気候変化の予測の不確実性の現れ方の違いとして理解される。

(3) ダム操作の最適化

異なる利害関係者からの様々な要求のバランスをとるために、流域内におけるダム放流のリアルタイム最適化手法が必要となる。リアルタイムでダムの水を放流する政策を決定することは極めて有効であるために、最適化手法はシミュレーションモデルと組み合わせ、ダム運用の課題解決に用いられる。異なる面積を持つ流域においては、防災のために有効なダム運用のために必要なリードタイム(下流における洪水地点までの到達時間)は、シミュレーションモデルに入力する降雨の選択と関連して異なってくる。大河川の流域は、通常、上流から下流へ流下時間が大きいために、上流部で降雨の観測を用いて下流のダムへの流入予測が可能で、それを用いたリアルタイム運用が可能となる。

本章では、分布型水文モデルとグローバル最適化システムと、準リアルタイムでダムの放流を決定するための手法(これを「rolling horizon アプローチ」とよぶ)を組み合わせ、統合シミュレーションと最適システム(ISOS, Wang et al., 2013)、を紹介する。図 II-(3)-1 にダム操作の最適ルールを計算するためのフローチャートを示す。

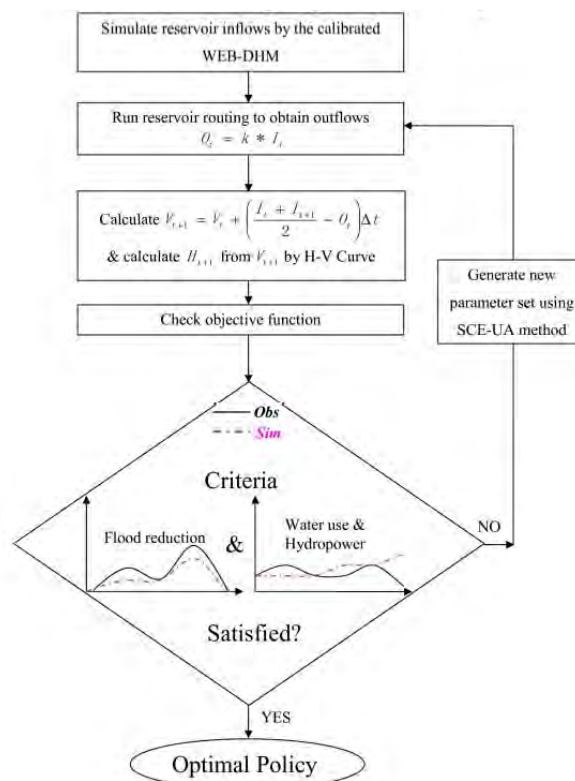


図 II-(3)-1 ダム操作の最適ルールを計算するためのフローチャート

1. 水文モデル

ISOS は II-(1)-1 章で開発された WEB-DHM を主要シミュレータとして使用した。Sidi Salem Dam に適用するために、簡単な貯留関数を WEB-DHM に追加した(Yang et al., 2007)。図 II-(3)-1 において次回の時間ステップの貯留量は、現在の時間ステップのダムの水位から水位-貯留量関数(H-V カーブ)を用いて計算する。

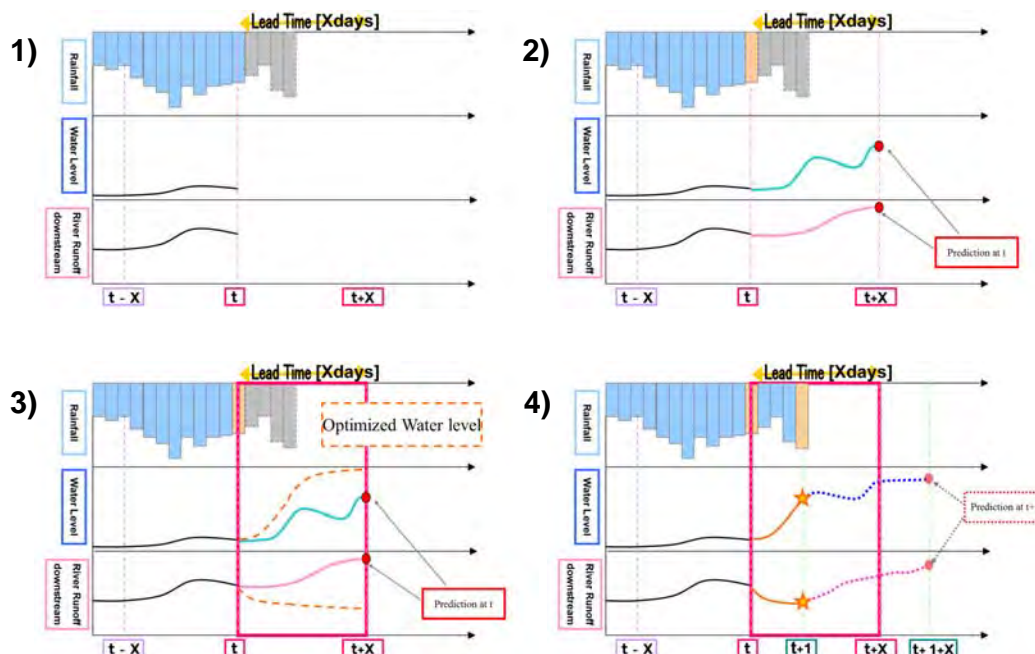


図 II-(3)-2 Rolling horizon アプローチ 1) 初期状態、 $t+X$ までのダム流入量、貯水位予測、3) 予測値に基づく最適操作案、4) $t+1$ までの操作の決定と $t+1+X$ までの予測

2. グローバル最適化システム

ISOS の中では、グローバル最適化スキームとして遺伝的アルゴリズムの一種である Shuffled Complex Evolution (SCE) (SCE, Duan et al., 1992, 1993, 1994) を使用した。SCE 手法は次の 4 つの概念で構成される。

- 1) 決定論と確率論的アプローチの組み合わせ;
- 2) 全体的な改善のために、パラメータ空間に広がる点が集まった集合のシステムティックな展開
- 3) 相互比較による遺伝的解析
- 4) 集合体の相互のシャッフル。

SCE 方式は、洪水制御と水使用量の両方を目的関数とする最適化に良好な近似ができるパラメータセットを得ることが期待されている。

3. Rolling horizon アプローチ

ダムの運用には rolling horizon アプローチを採用した。図 II-(3)-2 に示すように次の 3 つのプロセスで構成される。

- 1) 限られた予測値を用いて、予測上での放流を算定
- 2) 予測期間の中から、流下時間などを考慮した決定段階における現在の放流の実施、また、
- 3) 次の期間への移動と更新された流入量予測と貯水池貯留を最適運用の終了時まで(1)と(2)を繰り返す

4. ISOS 手順

ISOS の手順は次のように記述できる：

- 1) WEB-DHM における土壌の水文パラメータの分布は各ダムの上流でキャリブレーションされ、また、このキャリブレーションされたモデルは、ダム最適化の間、ダムへの流入量を予測する。
- 2) 各最適化実行の間、目的関数の最適化のために、ダムの水位と下流での観測点での洪水の両方を考慮した SCE で生成された新しい最適化パラメータを用いてダムからの放流量の最適値が計算される。
- 3) 各最適化実行の後、上流からダムまでの流下時間などを考慮して、統合的な最適運用値が決定される。
- 4) Steps (2) と (3) が事前に定義した、洪水軽減と水利用に関する基準に達するまで繰り返される。

5. ISOS デモンストレーション

ISOS をメジェルダ川流域に適用した。2003 年 1 月の洪水の最初のピークを対象として、Sidi Salem ダムの水位 (H) が 115m を超えることなく、洪水終了後に 115m に近づくようにすること、下流への放流量 (Q_{out}) が 800 m³/s を超えないことを目的として、SCE を用いてダム流入量に対する放流量の比を最適化した。最適化のための評価関数は下記の通りとし、洪水、利水について同じ重みを用いた。

$$0.5 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{out} - 800)^2}{N}} + 0.5 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H - 115)^2}{N}} \quad (11)$$

図 II-(3)-3 の赤線で示すように、3 日間の洪水予測を毎日実施して、Sidi Salem ダム運用の洪水制御と水利用を最適化するための放流量を計算した。洪水の流下時間を考慮し、3 日間の予測に基づく最適化の上で、最初の日だけの値を最適な運用値として用い、図 II-(3)-3 の赤丸のダムで示されるダム放流と、図 II-(3)-4 の青丸で示される貯水池水位が、決定段階に使われた。

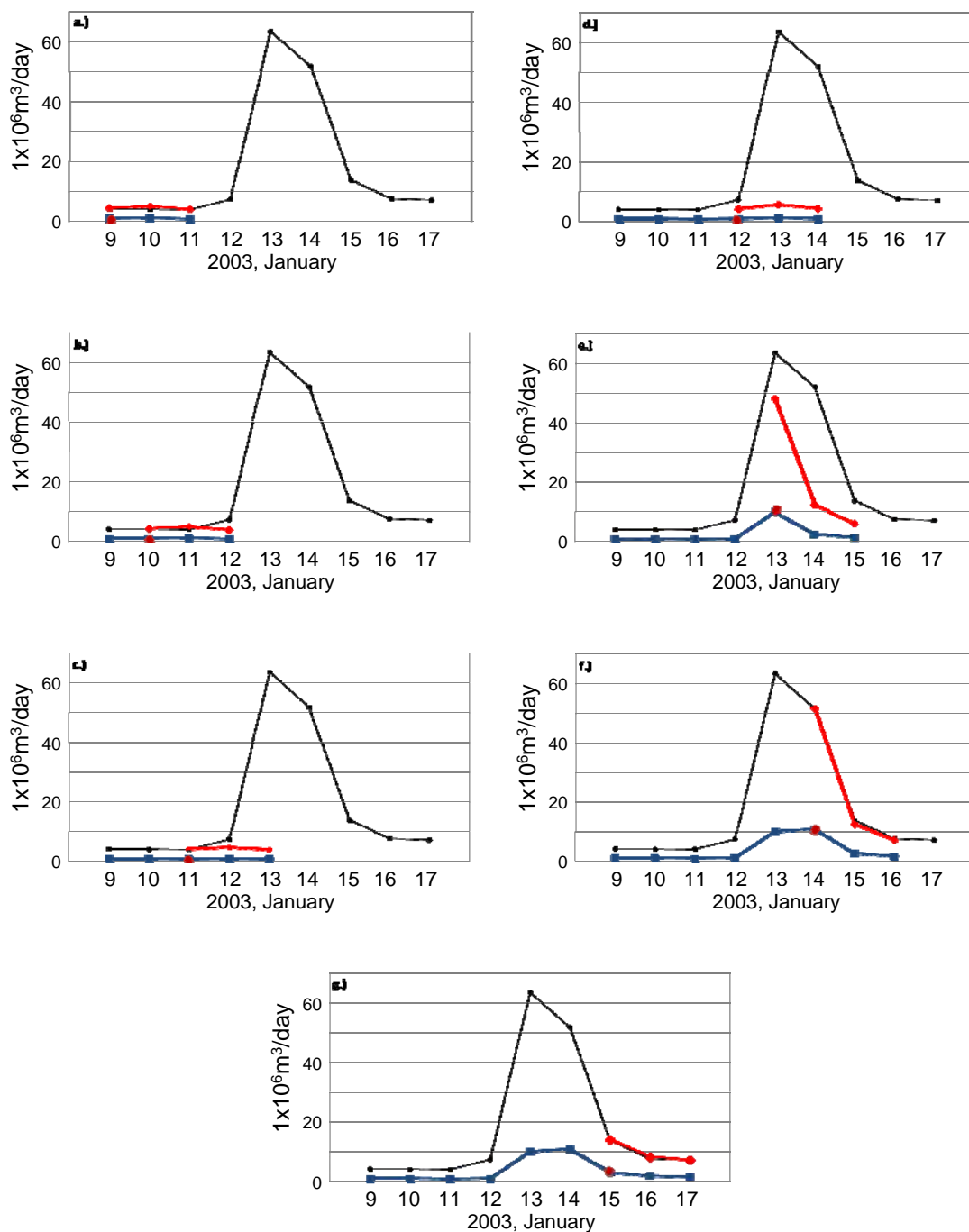


図 11-(3)-3 ダム流入量(観測：黒線、予測：赤線)と放流量(青線、赤丸が1日予測に基づく放流決定量)

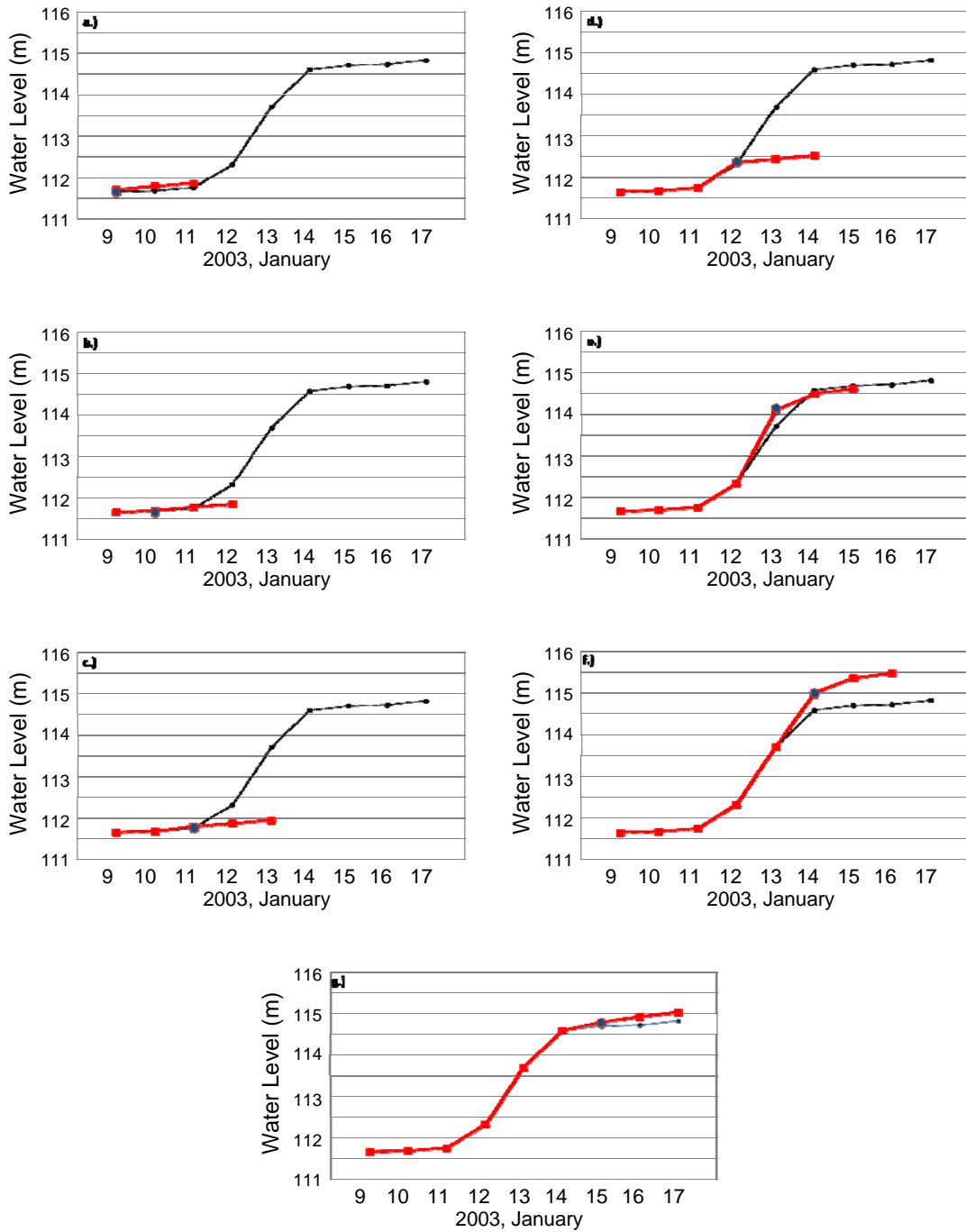


図 11-(3)-4 貯水位(観測：黒線、予測：赤線、青丸：1日予測に基づく放流決定量)

図 II-(3)-5 に最適化の結果を示す。赤色で示された予測流入量がオレンジ色で示された観測流入量と傾向が合っていることがわかる。図 II-(3)-5 の水色線に示すように、実際にはダムから多量の放流がなされているが、ISOS はダム放流を減らし、水を貯留し、ダムの水位を最大値の 115m に最適化することができることを示している。

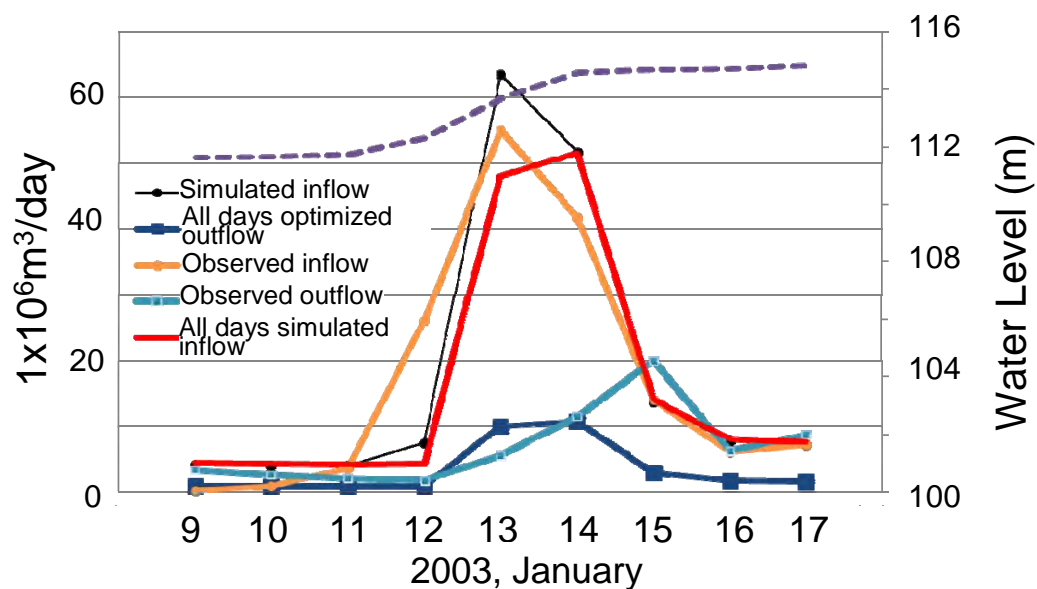


図 II-(3)-5 ダム操作の最適化の結果

Ⅲ. 結論と提言

本業務では、以下の3つの結論を得た。

- (1) 雨量観測データの統計的解析と、長期にわたってチューニングすることなく土壌水分量と河川流出量を計算できる分布型水循環モデル（WEB-DHM）を用いて、計画降雨、基本高水、既存ダムを考慮した計画洪水流量を設定した。
- (2) 地上観測データおよび地球規模データセットを用いて、GCMのバイアス補正とダウンスケーリングを行った上で、将来の気候変化の影響評価を行ったところ、明瞭な渇水化傾向が示される一方で、豪雨および洪水の変化については不確実性が高く、特に再現期間の大きな大洪水については、GCM間の不確実性による影響が大きく現れることが示された。
- (3) 洪水の流下時間を考慮したダムの最適操作は、渇水対策と洪水対策を両立させる上で有効である事例が示された。

上記の結論に基づき、半乾燥帯地域に位置しつつも豪雨発生頻度が近年多いメジェルダ川流域における河川水資源管理において、以下を提言する。

- (1) 降雨の時空間分布を長期にわたって、高い精度で観測し、そのデータをリアルタイムで利用できる体制を早急に構築すること。
- (2) 地中海側から内陸側にかけて気候傾度の非常に大きな環境下にあるメジェルダ川の河川水文特性の理解を高め、顕著な渇水化傾向の中で発生する大洪水に対して、水利用・洪水対策の観点から、長期的な河川水資源計画と短期的な適応策を準備すること。
- (3) 観測体制の設計・管理、気候変化の予測モデル出力の効果的利用、低水から洪水まで長期にわたって河川流量や土壌水分をシミュレーションできる分布型流出モデルの開発・適用、ダムの最適運用等に関する能力開発を推進すること。

参考文献

- 1) Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK.: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* 28(4): 1015-1031, 1992.
- 2) Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK. : Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications* 76(3): 501-521, 1993.
- 3) Duan Q, Sorooshian S, Gupta VK.: Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology* 158: 265-284, 1994.
- 4) Feddersen H., and U. Andersen: A method for statistical downscaling of seasonal ensemble predictions. *Tellus*, 57A, 398-408, 2005.
- 5) Ines A. V. M., and J. W. Hansen: Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies, *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 44-53, 2006.
- 6) IPCC: IPCC Special Report on Emissions Scenarios, Chapter 4, IPCC WG III, COP 6, Hague, 2000.
- 7) NYUNT, C.T., T.KOIKE, P.A.J. SANCHEZ, A. YAMAMOTO, T. NEMOTO and M. KITSUREGAWA: Bias Correction Method for Climate Change Impact Assessments in the Philipines, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol.69, No.4. I_19-I_24, 2013
- 8) Sellers, P. J., D. A. Randall, G. J. Collatz, J. A. Berry, C. B. Field, D. A. Dazlich, C. Zhang, G. D. Collelo, and L. Bounoua: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs, Part I: Model formulation, *J. Clim.*, 9, 676-705, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<0676:ARLSPF>2.0.CO;2.
- 9) Sharma D, Das Gupta A, Babel MS: Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping river basin, Thailand. *Hydrol Earth Sys Sci* 11(4):1373–1390, 2007.
- 10) Yang, D., S. Herath, and K. Musiak (2000), Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability, *Hydrol. Processes*, 14, 403-416, doi:10.1002/(SICI)1099-1085(20000228)14:3<403::AID-HYP945>3.0.CO;2-3.
- 11) Yang, K., T. Watanabe, T. Koike et al.: Autocalibration System Developed to Assimilate AMSR-E Data into a Land Surface Model for Estimating Soil Moisture and the Surface Energy Budget, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.85A, pp 229-242, 2007.
- 12) Wang, L., T. Koike, K. Yang, T. J. Jackson, R. Bindlish, and D. Yang, Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99), *J. Geophys. Res.*, 114, D08107, doi:10.1029/2008JD010800, 2009.
- 13) Wang L., T. Koike, M. Ikeda, C. T. Nyunt, D. N. Tinh, O. Saavedra, T. V. Sap, L. C. Nguyen, K. Tamagawa, T. Ohta: Optimizing multi-dam releases in large river basins by combining distributed hydrological inflow predictions with rolling horizon decision making, *Journal of Water Resources Planning and Management*, submitted, 2013.