

河川および水資源分野における不確実性を考慮した気候変動適応策に関する取り組み

DEVELOPMENT OF CLIMATE CHANGE ADAPTATION PLANNING THROUGH CONFRONTATION OF UNCERTAINTY IN RIVER AND WATER RESOURCES SECTOR - INITIAL EFFORTS

小川田 大吉*・松村 明子**・マルティン ゴメス ガルシア**
Daikichi OGAWADA, Akiko MATSUMURA and Martin GOMEZ GARCIA

The demand for climate change impact assessment and development of adaptation plans will become more crucial in the consultant business. A number of projects have already been formed that include climate change adaptation as a substantial theme in both of domestic and international markets. The authors have been participating in such projects for nearly 10 years. In this paper, Kenya National Water Masterplan 2030 project was reviewed as an important practical initiative for the climate change adaptation planning and the development of techniques and methodology which are crucial to conduct, such as bias correction, impact assessment and handling of uncertainty in future projection.

Keywords : climate change, impact assessment, adaptation plan, uncertainty, bias correction, Kenya national water masterplan

1. 気候変動適応策に関連する技術的課題

(1) 将来の気候変化の世界的な認識

気候変動は、すでに国内、海外で重要なキーワードとなっている。産業革命以降の化石燃料の消費を前提とした生活様式は、大気のパランスに影響を与え、温暖化ガスの排出量が森林や海洋への吸収されるスピードを上回ってきた。これにより、陸域と海上を合わせた全球平均の地表気温は、1880 年から 2012 年の期間に 0.85 度上昇している¹⁾。この約 130 年間で 0.85 度の気温上昇は、約 2 万 1000 年前の最終氷期から次の間氷期に移る約 1 万年間での 4~7 度の全球平均気温上昇と比べて約 10 倍も早い²⁾、といえ、そのインパクトの大きさが理解できるだろう。

問題は、今後の気温上昇である。IPCC 第 5 次評価報告書 (AR5) の基礎情報として開発、利用されている各国の気候予測数値モデル (General Circulation Model: GCM) の第 5 期結合モデル相互比較計画 (CMIP5) によれば、モデルごとの相違、また、温暖化ガス排出シナリオによって差があるものの、1850 年から 1900 年の全球平均気温を基準とした 21 世紀末の気温上昇は、RCP2.6 シナリオ以外の RCP4.5、6.0、8.5 シナリオで 1.5 度以上となる可能性が高いと見られている³⁾。RCP2.6 シナリオは、温暖化ガスの排出と吸収 (削減) の収支がマイナスに転じるという野心的なシナリオであり、緩和策の

目標とすべきだが、適応策としてはより状況の悪い RCP4.5 以上を念頭におくべきである。

このように予測されている気温上昇だが、社会にどのような影響が現れると予想されているのだろうか。

すでに氷河の減退、豪雨や熱波、干ばつなどの極端現象の頻度、強度の増加が現実として認知されているが、さらなる気温上昇によって、それらが加速することが予想されている。AR5 の第 2 作業部会報告書では、11 の分野のリスクが整理されている⁴⁾。

(2) 適応策策定のために開発すべき技術

1) リスクの想定

上述のような気候変動リスクは、マクロ的にまたは地域ごとに観測、経験されてきた事実や気候モデル予測を用いて影響予測したものなど、定性的、定量的な評価や見解を合わせて整理されたものである。根拠や予測確度の中ぐらひであっても、科学者間の見解の一致度が高いものは記述されている。現状で生じている影響の延長線として考えても、いずれのリスクも十分にありえると思えるものである。

社会に対するリスクが予見されている、また、すでに生じているならば、解決しなくてはならない。表 1 は、IPCC の AR5 の第 2 作業部会報告書より、様々なセクターで予見されるリスクを要約して整理したものである。

* 技術本部 中央研究所

** 技術本部 中央研究所 総合技術開発第 1 部

表－１ AR5 WG2 で挙げられている主要なリスク
(AR5 の第 2 作業部会報告書⁵⁾より要約)

分野	リスク
淡水資源	●ほとんどの乾燥亜熱帯地域で再生可能な地表水と地下水資源が著しく減少。 ●産業分野間の水資源の競合を激化。
陸域及び淡水生態系	●気候変動に加え、生息地の改変、乱獲、汚染など他のストレスが働く場合、多くの生物種の絶滅リスク増大。 ●今世紀中に、淡水域の生態系に急激で不可逆的な地域規模の変化が起こる高いリスクをもたらす。
沿岸システム及び低平地	●21 世紀以降の海面水位上昇により、沿岸及び低平地で浸水、沿岸域の氾濫、海岸侵食のような悪影響増大。
海洋システム	●漁業生産性やその他の生態系サービスの持続的供給に課題を生じる。 ●海洋酸性化で特に極域生態系やサンゴ礁など海洋生態系に相当のリスク。
食料安全保障及び食料生産システム	●熱帯及び温帯地域の主要作物（小麦、米、トウモロコシ）は、気温上昇が 2 度以上になると、生産に負の影響。 ●食料安全保障のあらゆる側面において気候変動の影響を受ける。
都市域	●気候変動の多くの世界的なリスクは、都市域に集中している。
農村域	●農村域への主要な影響は、世界全体での食料及び非食料作物の生産地域の移転など、水の利用可能性および供給、食料安全保障、並びに農業所得への影響を通して現れる。
主要な経済部門及びサービス	●殆どの経済部門について、人口、年齢構成、収入、規制及びガバナンスといった駆動要因の影響が気候変動の影響に対して相対的に大きくなると予測。 ●気候変動による世界経済への影響については、推計が困難。
人間の健康	●主に既存の健康上の問題を悪化させることで、人間の健康に影響を与える。 ●現状をベースラインとしたときに比べ、気候変動下では、多くの地域、特に低所得の開発途上国において、健康被害の増大をもたらす。
人間の安全保障	●人々の強制移転が増加すると予測。 ●貧困や経済的打撃といった紛争の駆動要因が増幅。暴力的紛争のリスクを間接的に増大させる。 ●多くの国々の重要なインフラや領域保全に関わる国家安全保障政策に影響を及ぼすと見られる。
生計及び貧困	●経済成長が減速し、貧困削減がより困難となり、食料安全保障が更に悪化。既存の貧困の罣は長引き、新たな貧困の罣は、都市域や新たな飢餓のホットスポットに作り出されると予測される。

気候変動の影響の現れ方は、場所や状況に特有のものであり、あらゆる状況に対応できる単一の適応策、リスク低減の方策は存在しない。地域ごと、流域ごと、都市ごとのリスクを定性的にでも見出すことが重要となる。

2) 将来外力の適切な評価

気候変動を考慮していない既往の計画では、降雨や気温、水温、流量など観測値をベースに検討されている。前提として、観測から得られる気候条件は、普遍が暗黙の前提だった。観測値にも誤差はつきものだが、計画の基礎情報としての役割に異論を持たれるものではない。つまり、社会的な合意を得ることができている。一方、将来の気候変動を対象としたとき、悪化するだろうという定性的な方向性は確からしくても、どの程度変化するのか、一つの値に絞り込むことが難しい。また、悪化の度合いは、年代を追うごとに変化する。50 年のライフサイクルを持つ構造物に対して、いつの時点の外力を考慮すべきかという疑問も生まれる。リスクに対する適応策の具体的な事業実施に結びつけるためには、定量的に、かつ、説得力を持って将来の外力を評価することが最初の難関である。

気候予測モデル（GCM）の結果は、現状で頼ることができる重要な将来の予測情報である。しかし、モデルの空間解像度はグローバルスケールの評価では十分であっても、流域圏や都市、地域の評価のためには粗すぎる。また、数値モデルの限界により、例えば、雨季乾季の再現性であるとか、長期間の月平均降雨量などの統計的特性において、実際の気象現象から誤差のあるデータとなっていることがわかっている⁶⁾。現実の観測値と相互比較できるようにするために、GCM の空間的ダウンスケーリング、バイアス補正という技術が必要となる。ダウンスケーリング、バイアス補正のいずれにおいても、現実との物理的な整合を完全に確保できる手法はなく、必ず不整合な部分が残る。補正手法の特質に通じておき、対象とするリスクの評価に利用できるかを判断できなくてはならない。

3) 気候変動下でのハザード評価技術

気候の将来値が評価できたとして、淡水域、沿岸、海洋、食料、都市域、農村域などにどのような影響、被害を生じるのかを定量的に評価することが必要である。基本的には、現時点で適用しているモデルを用いて、気候変動下の気象条件を入力することで、将来のハザードを評価できると考えられる。しかし、ここにも新たな注意が必要となる。

例えば、洪水の評価を考えてみる。洪水時には、大気が水蒸気で飽和していると考えて蒸発を考慮しないことが一般的である。仮に蒸発量を考慮したとしても、被害をもたらす規模の降雨と比べて無視できるものである。しかし、将来気候においては、年間を通じた気温、蒸発の変化により、降雨前の地下水位や表層土壌の飽和度が現状と異なっているかもしれない、流出形態が変化する可能性がある。つまり、降雨の変化だけでなく、気温上昇時の流域の平常時の水循環像を評価しておくことが重要かもしれない。となると、概念度の高いパラメータで構成される流出モデルでは、気温、土壌水分量などが変化

すると予想される将来の条件を適切に反映できている保証が少なく、社会に対する説得力が十分ではないと考えるべきである。このように、基本的には従前からの技術の延長であるが、モデルについても気候変動下のリスクを表現できているか再度確認しておく、または、モデルの改良が必要である。

ハザード評価は、モデルだけでなく、設定する条件やデータも重要である。例えば、将来の上水供給計画を考える場合、水源地点の水資源賦存量を評価する際、将来気候での流出解析を行う必要がある。さらに忘れてはならないのが、需要側の設定である。気温が上昇すれば、水需要が増加する⁷⁾。また、事業効果の評価においては、気温上昇に伴う水処理薬品注入量の増加も考慮する必要がある。

現状の実績データ、観測データを用いていた設定を見直し、将来変化による影響を適切に条件設定することが必要である。

4) 不確実性への対応

定量的な将来外力の設定ができ、変化した気候下でのリスク評価できる技術があったとしても、さらに困難となるのが、将来予測の不確実性である。

将来気候を予測する GCM は、欧米、日本、中国、オーストラリアなどで開発されており、CMIP5 に収集されているモデルは 49 となっている。いずれのモデルも現状の気候を再現できるように検証が続けられているが、それぞれの将来予測値がすべて異なっている。そして、将来の年代を追っての変化の仕方は、大筋で一致しているとしても、定量的に見たときのばらつきが大きい。最も正しいモデルはどれなのか、複数予測の平均値が最も期待値が高いのか、最も厳しい状況を予測しているモデルを用いれば安全なのか、といったアプローチが思いつくが、これは、従来型の計画手法のように、一つの最も適切な将来予測を起点にするという考え方から導かれるアプローチであり、不確実性への対応を避けたものである。ここで、大きなパラダイムの変換が必要となる。すなわち、あらゆる可能性をすべて評価し、対策の効果の現れ方を見ることである。より多くの将来オプションで効果を発揮する可能性のある対策を見出すのである。

5) 気候変動適応策に関わる技術開発

気候変動への適応は、重要度が高い。具体的な地域、地点の事業のためには、AR5 のように科学者が全球スケールで評価してきた情報を、地域や都市、流域スケールに翻訳する必要がある。社会への説得力を持った適切な気候外力の翻訳と影響評価技術が不可欠である。そして、気候変動適応策の特有の困難である不確実性と向き合っていく必要がある。この章で述べた、これから拡大する気候変動適応策のニーズに対応するために必要な技術開発について、表 2 にまとめた。いずれも様々な評価実施例があるものの、改善の余地があり、実践的な取り組みを重ねながら改良していくことが必要である。

表 2 気候変動適応策に係る技術開発

適応策策定のために不可欠なタスク	タスク実行のために必要な技術
対象地域、都市、流域圏などでのリスクの抽出と適応策を描く	● GCM 出力の地域レベルへの翻訳技術、影響評価モデルでの評価をもとにリスクを想定する。 ● 経済や社会構造への影響まで示せることが望ましい。 ● 適応策は、異分野へも好影響を与えているかどうかというコベネフィットが重要となっている。
将来気候情報を対象地域や対象課題に対して適切に翻訳する	● GCM の大量のデータファイルを取り扱うノウハウと技術は、最も基本的で不可欠。 ● モデルグリッドの空間解像度と気象現象のスケールをよく把握した上でのダウンスケーリング、バイアス補正技術。 ● 対象地域の対象リスクに関連する気象現象に関する GCM の再現性能を評価し、不要な不確実性を排除する技術。
リスク評価 (モデルの適用)	● 降雨や気温の変化が対象リスクに与える影響を適切に評価する技術。必要に応じて、モデルの改良を実施。
不確実性を考慮したプロジェクト効果の評価	● 気候条件だけでなく、社会的、経済的な不確実性を考慮し、想定しうる将来オプションについて全てプロジェクト効果を評価し、整理する技術。 ● 不確実性を考慮した多数のケース評価結果より、対策のロバストネス、コベネフィット性などを評価し、意思決定者への判断材料を作る技術。 ● 将来の気候変化の進行を踏まえた、事業の適切な投入時期、実施スケジュールを設定する技術。

2. これまでの取り組み例 ケニア全国水資源での気候変動影響評価

(1) ケニア全国水資源マスタープラン 2030 策定プロジェクト

筆者らは、これまで様々な実践的業務を通じて、バイアス補正、ダウンスケーリングなどの技術を試行錯誤で培ってきた。その中で、特に技術的に重要な契機となったプロジェクトとして、国際協力機構 (JICA) によるケニア全国水資源 2030 策定プロジェクト (以下、ケニア全国水資源プロジェクトと略す) について紹介する。

ケニア全国水資源プロジェクトは、フェイズ 1 と 2 に分けて実施され、全体で 37 ヶ月を費やした。フェイズ 1 は、2010 年 10 月から 2012 年 12 月までの約 2 年をかけて実施され、基礎的な検討が行われた。この中で、著者らは、ケニアの水

資源への気候変動影響評価を担当した。

JICA は気候変動の主流化を目指しており、実効性のある基本計画に気候変動の影響を組み込むという取り組みを実践していた。その中でも、ケニア全国水資源プロジェクトは、パイロット的な取り組みであった。

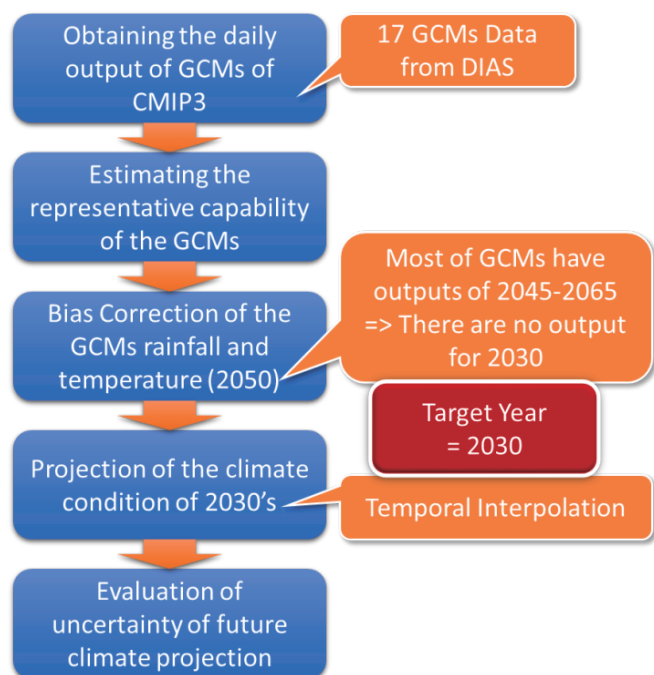
(2) ケニアの水資源に対する影響評価の検討方針

ケニア全国水資源計画の目標年次は、ケニアの国家ビジョン⁸⁾に合わせ、2030年に設定されていた。直近までの観測データに基づいた現況の水文情報を基本とし、計画目標年次の2030年時点の気候、水文情報を気候予測情報から設定することが与えられたタスクで最も重要なものであった。

日本国内では、世界的にも高解像度で高性能と言われる気象研究所のGCM20、NHRM20（当時）を用いて影響評価を議論することが通常であった。最も精度が期待できる一つの将来予測を用いて計画策定するという考え方は、用いるのが過去の実績観測値とモデル予測計算という面で異なるものの、一つの将来予測を用いるという面では計画策定の考え方は従来と変わらないものである。GHG 排出シナリオの相違は考慮できても、モデル予測の不確実性は考慮できない。

一方、ケニア全国水資源では、世界各国で開発された多くのGCMの結果を利用し、その予測情報のばらつきを認識した上で、将来の水資源計画を策定したいと考えた。将来の降雨、蒸発散、水資源賦存量、河川流量などの不確実性がどの程度あるのかを定量評価することを目指した。

ケニア全国水資源での気候変動影響評価の検討フローを図－1に示している。



図－1 ケニア全国水資源での気候変動影響検討フロー

(3) 将来気候予測情報の収集とモデル性能評価

1) GHG 排出シナリオ

将来気候予測情報は、検討していた2010年当時に入手できる最新のものとして、CMIP3のGCMの情報を収集した。CMIP3は、IPCCのAR4の基礎情報となった気候予測モデルの計算結果を集約したプログラムである。GHG 排出シナリオは、2000年に発行されたSpecial Report on Emissions Scenarios (SRES)⁹⁾にある中で、全てのモデルが計算を実施しており、また、複数あるシナリオの中で、最も中庸な設定であるA1Bシナリオを用いることとした。

SRESは、将来の社会的・経済的な状況を想定し、その将来像から想定される排出量の道筋を設定したものである。A1Bシナリオは、高い経済成長と地域格差の縮小を仮定し、全てのエネルギー源のバランスを重視した将来像を想定している。

排出シナリオが異なることで、気候予測は大きく異なる。異なる排出シナリオの予測結果の大幅な相違をそのまま持ち込んで、計画にならない程の不確実性の幅を持ち込むことが容易に予想された。また、他のSRESシナリオでのGCM計算は、あまり実施・公開されておらず、サンプル数が異なるシナリオでの結果を取りまとめるアイディアがなく、A1Bシナリオのみを選択することとした。

2) 将来気候予測情報の収集

CMIP3に収集されているGCMは、18のモデル開発グループによる25モデルがあった。そのうち、A1Bシナリオで日解像度のデータを公開しているのが17モデルであった。GCMの計算結果は、全球をカバーする空間データに時間軸を持った3次元データである。大気や海洋の鉛直方向も考えれば、4次元であるが、水資源プロジェクトのためには、地表面層のみのデータが必要である。1層のデータといえど、全球のデータ容量は膨大で、複数のGCMのデータを取得するには、良好で太いネットワーク環境が必要である。

表－3 収集したCMIP3のGCMデータの諸元

項目	取得データの諸元
空間範囲	● 南緯 10 度～北緯 10 度 ● 東経 25 度～50 度
期間	● 現況(20c3m データ): 1981 年～2000 年 (20 年間) ● 将来(SRES A1B データ): 2046 年～2065 年 (20 年間)
気象変数	● pr(地上雨量)、olr(外向き長波放射)、slp(海面更正気圧)、tas(地上気温)
空間解像度	● GCM それぞれの解像度。1.25 度～3 度以上で粗い。
収集 GCM モデル数	● 17 モデル(日データが入手可能なもの)

ケニア気象局から観測雨量、気温データを提供してもらうための条件として、ケニア気象局内で作業し、加工前の観測

データは、外部に持ち出せないという制約があった。ケニア気象局のネットワーク回線は、非常に細く、不安定なため、1 次配布サイトである PCDMI からのダウンロードは、一つのファイルを取得するまでにネットワークが切断されてしまう状況だった。

データ取得の困難は、プロジェクト進捗上、致命的な問題であったが、データ統合・解析システム DIAS¹⁰⁾ からデータのダウンロードをさせていただくことで解決することができた。DIAS には、必要な空間範囲と期間を切り出した上でダウンロードできるアプリケーションが用意されていた。ケニアの気候場を評価するために十分な範囲として、南緯 10 度から北緯 10 度、東経 25 度から 50 度の範囲に絞り込むことで、不安定かつスピードのないケニア気象局のネットワークでも全データを取得することが可能となった。

3) GCM の性能評価

GCM での計算データには、年月日が付随しているが、その年月日の実際の気象と比較できるものではない。天気予報や再解析値と異なる。現況気候再現計算セットである 20c3m データでは、現在の土地利用、GHG 濃度などの境界条件を与えて大気と海洋の力学的モデルをシミュレーションしている。GCM の再現性は、特定の日時での比較ではなく、年間雨量の長期平均値、1 月、2 月、3 月などの月別の月雨量の長期平均値などの統計的な値、すなわち気候値で比較するものである。

現況の気候の再現性の悪いモデルは、将来の予測の信頼性も低いと考えられ、将来想定に不要な不確実性を加えていると考えられる。そのため、GCM の現況気候の再現性を評価し、再現性の悪い GCM を除外することとした。現況気候のモデル再現性がうまく合わせられていたとしても、将来の予測が確からしいという保証はないが、これを確認することはできない。したがって、最善の GCM を選ぶのではなく、ケニアの現況気候の再現性が悪いモデルを除外するのが性能評価の目的である。

現況気候の真値に用いるデータには、実績の気象観測に相当するグリッドデータを用いた。降雨には、複数の観測情報を組み合わせた GPCP version 2.2^{11),12)} を用いた。また、

外向き長波放射、海面更正気圧、地上気温には、NCEP による再解析値¹³⁾を用いた。

性能評価のための前処理として、観測グリッドデータと GCM の空間範囲と解像度（表－3 と同様）、データ期間（1981 年～2000 年）を合わせ、各グリッドの月気候値を算出した。性能評価の指標には、同位置のグリッドで比較した自乗平均平方根誤差（RMSE）と相関係数を用いた。

評価例として、降雨の相関係数、気温の RMSE の評価結果をプロットしたものを図－2 に示している。降雨の評価結果からみれば、giss_model_e_r と giss_aom というモデルがいずれの月においても他のモデルに比べて著しく相関係数が低いことがわかる。同様に地表面気温についても、iap_fgoals1_0_g と csiro_mk3_5 というモデルの誤差が他のモデルに比べて著しく大きいことがわかる。このように、気象変数 4 種類（pr, olr, slp, tas）の評価指標 2 種類（RMSE, 相関係数）の 8 つの評価結果より、著しく評価結果の悪いモデルを見出し、どの評価でも除外対象とならなかったモデル 11 種類を選定し、さらなる検討のための対象モデルに選出した。

4) バイアス補正と計画対象年気候のプロジェクション

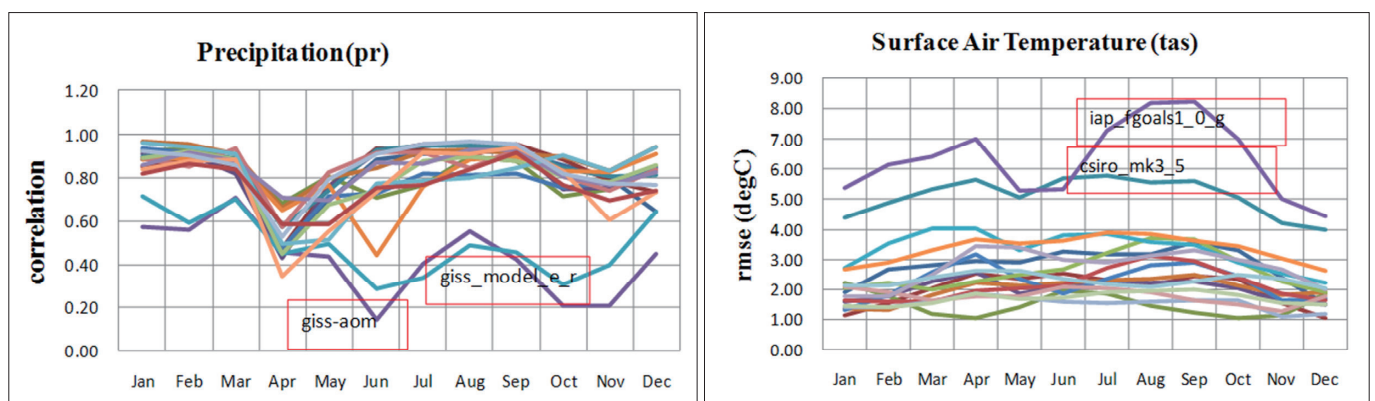
① バイアスとは

GCM では、計算コストや計算機能力との兼ね合いで、数百 km サイズのグリッドで全球の大気と海洋を計算している。粗い空間解像度では、実際の地形効果や積雲対流の物理プロセスをそのまま解くことができず、各種の経験モデル、概念モデルを導入している。このため、このようなことを一因として、GCM では現実の気象観測値と統計値が異なる部分があり、これをバイアスと呼んでいる。

水文モデルへの入力に用いることを考えたときに問題となる、GCM の降雨データのバイアスは、以下のように整理できる¹⁴⁾。

1. モデルごとの予測結果の差異が大きい
2. 降雨の季節的な特徴の再現性が低いものがある
3. 高強度降雨がデータ中に現れにくい
4. 全く雨の降らない日がほとんどなく、微小な降雨量データが続く

1 のモデルごとの予測結果の差異は、これを不確実性と捉え、多数のシナリオの元でどのようなハザードが起きるか、対



図－2 GCM の性能評価結果の例

策の効果はどうなるのかという検討材料にすることができる。対象地域の気候再現性が悪いモデルは、不要な不確実性を加えるため、これを除外することは、前節で述べた。モデルごとの予測結果に相違があることは、バイアス補正の対象ではない。

2の降雨の季節性の再現性に問題のあるモデルは、同じくモデル評価で除外されている。しかし、雨季、乾季の時期を定性的に再現できていても、雨量の値まで再現できるものは少ない。水資源対策を議論するためには、月平均雨量などの統計値を一致させなくては、定量的な議論ができない。

3の高強度降雨がGCMのデータ中に現れないことについては、モデルの対流スキームがうまく豪雨の形成を取り扱えていないという問題があるが、点で観測している雨量データと比較して高強度降雨の生起頻度が異なるという議論には注意しなくてはならない。GCMが与える雨量データは、百キロスケールのグリッド空間平均降雨と考えるべきで、点で観測される雨量とは、降雨のDepth-Area関係のために異なっているのは当然である。この空間解像度による雨の特性の相違を補正するのは、ダウンスケーリングというテーマとなるが、雨の空間分布を取り扱うことは、今も変わらず困難な点が多い。バイアス補正により、グリッド雨量と地点雨量の高強度降雨生起頻度を合わせることは可能である。面から点へのダウンスケーリングも同時にできているという解釈も可能である。しかし、この場合でも、降雨の空間分布の補正はできておらず、空間分布までのダウンスケーリングができていないことはあまり認識されていない。

4の無降雨日日数が少ないというのは、GCMのグリッドが広範囲であることを考慮しても不自然な微小降雨が継続するものである。水資源計画では、渇水が将来どのようなようになるかを知ることが重要である。現況気候を再現したGCMの雨、観測雨量のそれぞれを日雨量の大きな順に並び替え、同じ無降雨日日数となるように、GCMの雨量のしきい値を見出す。このしきい値を将来気候のGCMのデータにも適用し、将来の無降雨日を議論するということが行われている。

② バイアス補正手法の概要

バイアス補正手法は数多くの手法が提案されている。当時の検討では、上述に述べたバイアスの特性に対応して補正を行った。バイアス補正は、GCMの現況気候再現計算の雨量データ R^{G20c} を観測雨量 R^{obs} の特性に合わせる関数 $R^{obs} = \hat{R}^{G20c} = F(R^{G20c})$ を見出し、この変換関係が将来気候のGCM雨量データ R^{Gfut} にも適用できるという仮定で $\hat{R}^{Gfut} = F(R^{Gfut})$ のようにして将来降雨を得るものである。補正すべき統計的特性として、以下の4つの統計的特性が、 R^{G20c} と R^{obs} で一致するようにした。ここで、 $\hat{R}$ は、バイアス補正を施した雨量を意味している。

1. 季節性降雨特性の補正として、1月、2月、3月、...、12月のそれぞれの20年間平均月雨量が一致すること。
2. ある月、例えば4月の降雨を20年間データから取り出した600日(=30日×20年間)の日雨量データの生

起頻度分布形状が一致すること。

3. 毎年最大雨量の生起確率分布を一致させること。
4. 無降雨日日数を合わせること。

1の平均月雨量の一致は、2の月ごとの日雨量生起頻度分布形状を一致させることで自動的に達成される。本プロジェクトでは、飯泉らによって考案された累積密度関数(cumulative density function: CDF)法¹⁵⁾を適用し、その後、高強度の補正、無降雨日の補正を行った。

③ 観測グリッドデータの作成

バイアス補正のための真値となるデータとして、地上観測データより空間内挿を施し、0.1度のグリッドデータを作成した。対象とした気象変数は、日雨量と日平均気温であった。基礎データには、ケニア気象局より提供を受けた120箇所の降雨観測データ、35箇所の気温観測データを用いた。空間内挿には、Inverse Distance Weighted Method (IDW)法を用いた。気温観測所の空間密度が粗い点については、SRTMの地標高データに0.6度/100mの気温減率を用いて地標高補正を施している。

GCMデータについては、モデルごとに空間解像度が異なるが、Bi-Linear法で0.1度グリッドに空間内挿を施し、観測データとグリッド諸元を一致させた。

④ CDF法による季節性パターン、平均月雨量、日雨量の生起頻度の補正

CDF法によるバイアス補正は、月ごとにデータを切り分け、それぞれのデータを値の大きい順に並び替え、同じデータ順位での値を比較し、その差分をバイアス誤差とみなすものである。GCMの現況気候、観測値ともに、1981年から2000年の20年間を対象としている。将来については、GCMの2046年から2065年の20年間を用いる。手順を以下に述べる。また、図-3にバイアス誤差の模式図を示している。

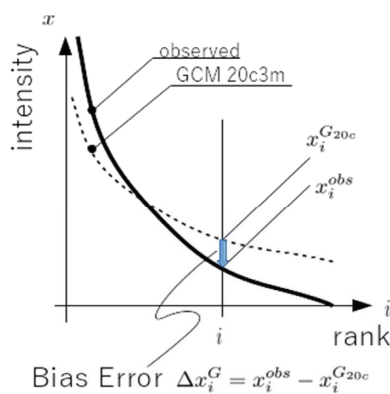


図-3 CDF法でのバイアス誤差

1. 対象月のデータを観測データ、GCMデータそれぞれから抽出する。例えば、4月の場合は、サンプルが30日×20年間の600日分となる。
2. 抽出したデータを値の降順に並び替える。 i 番目の観測データを x_i^{obs} 、GCMデータを x_i^{G20c} と表すこととする。

3. i 番目の GCM データのバイアス誤差 Δx_i^G を以下のよう
に求める。この誤差は将来 GCM の同月の i 番目デー
タ $x_i^{G_{fut}}$ にも当てはまると仮定する。

$$\Delta x_i^G = x_i^{obs} - x_i^{G_{20c}}$$

4. 補正後の現在気候 GCM のデータ $\hat{x}_i^{G_{20c}}$ は、以下のよう
になる。

$$\hat{x}_i^{G_{20c}} = x_i^{G_{20c}} + \Delta x_i^G$$

5. i 番目の将来気候の GCM データ $\hat{x}_i^{G_{fut}}$ は、以下のよう
になる。

$$\hat{x}_i^{G_{fut}} = x_i^{G_{fut}} + \Delta x_i^G$$

この方法では、同生起確率のモデルと観測値の差分を、その生起確率におけるモデルのバイアスとみなすもので、将来もこの差分のバイアスが当てはまるという仮定をしている。当然、将来の GCM 予測計算でこの仮定が成り立つ保証はないが、他のバイアス補正手法でも同様の仮定をしている。

バイアスをモデルと観測値の差分と捉えるのか、比と捉えるのかという問題がある。気温については、摂氏 0 度と絶対零度を基準とした数値で結果が異なることは非合理であり、比よりも差分として捉えることが適切である。降雨については、ゼロというデータが多分に含まれるという点で、他の気象変数と性質が異なっている。差分で捉えるのでは、将来 GCM データの補正でマイナスを生じうる。したがって、降雨のバイアスは比で扱う例が多い。

本検討の対象であるケニアでは、大部分が半乾燥地帯にある。国土はちょうど赤道をまたぐように位置しており、熱帯収束帯 (ITCZ) に気候が支配されている。黄道が赤道を往復するのに呼応して、雨季が 2 回ある。ケニア北部の乾燥地帯では全く雨の降らない月があれば、その翌年の同月で大きな雨が降るというような状況が見られる。このような気候特性のため、比を用いるとバイアス補正で 10 倍以上引き伸ばすということがあった。このような補正はあまりにも非合理的であると考え、差分でバイアスを捉えることとした。このバイアス補正で、将来降雨補正值がマイナスとなる場合は、ゼロに置き換えることとした。

他の地域のデータで開発した手法は、必ずしも全ての地域で当てはまるものではない。その地域の気候特性や、取り組んでいる課題で重要となるテーマに応じて、手法を検討することが必要と考える。

⑤ 高強度降雨のバイアス補正

将来気候では、高強度降雨の生起頻度が変わるのではな
いかという議論があり、その観点でのバイアス補正を導入した。

観測雨量、GCM 現況、GCM 将来雨量のそれぞれについて、毎年最大雨量を抽出し、カンプロットで経験的頻度分布を作成した。同生起確率の降雨量を比較し、GCM 現況と観測データの差分をバイアスと捉え、同生起確率の GCM 将来雨量にバイアスを与えた。基本的に、CDF 法と同様の手順である。高強度降雨のバイアス補正では、GCM 現況、将来それぞれのデータにおいて、最小の毎年最大日雨量をしきい値とし、しきい値を上回る降雨を対象としている。

⑥ 無降雨日の補正

GCM データで無降雨日が見られず、微小雨量が継続するという問題の補正について述べる。CDF 法で行ったように、20 年間のデータから、ある月 (例えば、4 月なら 600 日分のデータ) の観測値と GCM (現況) を抜き出し、それぞれを値の大きさ順で並び替える。このとき、観測値で無降雨となる順位 i_{dry} を見出す。この順位 i_{dry} に対応する現況 GCM (CDF バイアス補正前) の雨量 $R_{i_{dry}}^{G_{20c}}$ をモデルデータにおけ

る無降雨日のしきい値 $\epsilon_{dry} = R_{i_{dry}}^{G_{20c}}$ とする。将来 GCM データ (CDF バイアス補正前) の同じ月について日雨量を並び替え、 $R_i^{G_{fut}} = 0$ (if $R_i^{G_{fut}} < \epsilon_{dry}$) とする。

⑦ 2030 年気候データの推定

ケニア全国水資源の計画対象年は、2030 年である。一方、検討当時の CMIP3 にある GCM データの将来データは、2046 年から 2065 年の 20 年間であった。気候の議論は、一つの年のデータではなく、20 年～30 年程度の期間の統計特性で行うため、2030 年気候として、2021 年から 2040 年に相当する気候データを推定する必要があった。

CMIP3 での GCM 日データが提供されているのが 2046 年から 2065 年であり、月データ (平均値) は、必要な 2030 年気候の期間でも入手が可能であった。そこで、2030 年気候に対応する 2021 年から 2040 年の 20 年間の月平均値のデータを入手した。

上記 CDF 法や高強度降雨のバイアス補正で述べたバイアス量 (モデルと観測値の差分) と月気候値の変化量が比例するという仮定を行い、2030 年気候のバイアス量を求めることとした。この考え方の模式図を図 4 に示している。

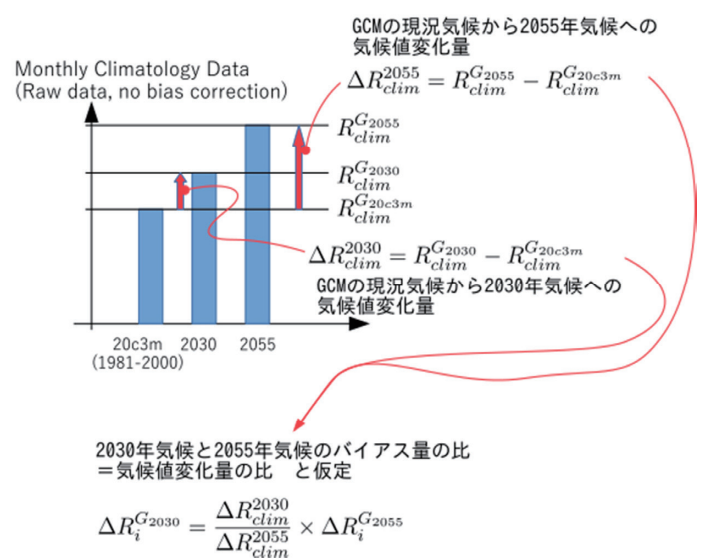


図 4 2030 年気候データの推定方法

⑧ 観測値の時間分布、空間分布をベースにしたバイアス補正データの作成

2030 年気候の月ごとの日雨量生起頻度に対応するバイアス量 $\Delta R_i^{G_{2030}}$ が求められる。この 2030 年気候のバイアス量を観測データに加えることで、2030 年気候データを作成した。

バイアス補正では、GCM が与える時系列データをベースに補正することが多い。将来の気候変動の結果、降雨の季節性が大きく変化するかもしれない、降雨の連続期間が今よりも長くなるかもしれないなどの懸念に対する答えが GCM の時系列データに含まれていると期待してのことである。しかし、問題は、粗い面から細かい領域へのバイアス補正ができたとしても、その細かいグリッドの集合で得られる空間分布を与える意味でのダウンスケーリングができていないことである。

GCM のグリッドサイズは 100km~300km サイズであり、このグリッドでの 20 年間最大日雨量のデータが与えられれば、GCM 時系列をベースに補正すると、グリッドに含まれる高解像度の 0.1 度グリッド全てで、そのグリッドにおける 20 年間最大日雨量を生じることになる。このような広範囲で同じ日に最大降雨を生じることは、現実的にありえない。これは、日単位でデータを眺めた時に問題となるもので、平均月雨量や平均年間雨量などの等雨量線図などは、ある程度長い期間での平均的な空間分布が再現され、現実的なダウンスケーリングができており、問題とはならない。

本検討では、将来気候の気候値マップを作成するだけでなく、流出解析に降雨や気温データを利用することがバイアス補正の目的である。GCM データの時系列をベースとしたバイアス補正では、降雨の空間分布が非現実的となるため、観測データをベースとした気候プロジェクションを行った。これにより、GCM が表現しているかもしれない降雨の連続日数などの将来変化などが反映されないという指摘がありえる。しかし、水資源や洪水に関するプロジェクトでは、現在の観測値や計画値との比較のことができることが絶対的に重要と考え、代替手法を考案し適応したものである。

5) 気候変化の評価

得られた 2030 年気候データ、2055 年気候データ、そして観測データを整理し、ケニアの気候変化を評価した。

図-5 には、ケニア東部の Garissa で年間雨量の変化を整理した図を示している。図の横軸は年代を示し、縦軸は年間雨量を表している。1990 年には観測値から算出された 20 年間平均の年間雨量として約 395mm/年 がプロットされている。2030 年気候、2055 年気候については、モデルの性能評価をパスした 11 の GCM 全てについて年間雨量をプロットしており、さらに、11 のサンプルから算出した t 分布の分布形状とアンサンブル平均値、95% 信頼区間が示されている。

この図より、Garissa における年間雨量の気候変動影響の特徴として以下のようなことが見出される。

- 年間雨量は、2030 年気候、2055 年気候に関する全ての GCM 予測値が現在より増加する。

- t 分布による生起確率の評価結果によれば、年間雨量が増加する確率はほぼ 100% である。
- 2055 年予測年間雨量のばらつき（信頼区間の幅）は、2030 年よりも大きい。つまり、遠い将来ほど予測の不確実性が広がっていることがわかる。
- 11 の GCM の予測アンサンブル平均値でみれば、2030 年気候の年間雨量は約 440mm/年 となり、現況の 395mm/年 に対して 10% 程度の増加が期待できる。

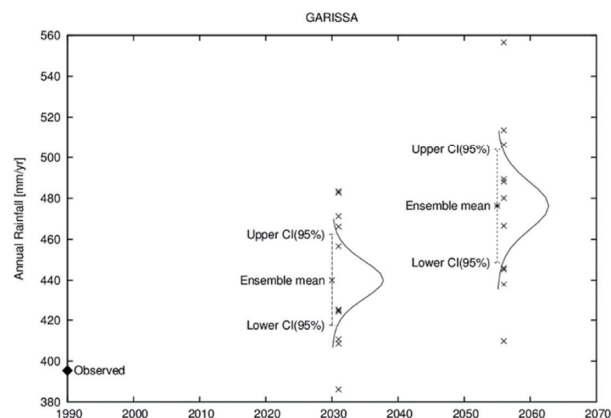


図-5 Garissa の年間雨量の将来予測結果

Source: JICA ケニア全国水資源 2030 プロジェクト報告書

この 1 地点に対する評価をケニア全土で作成したグリッドデータに適用することで、全土での年間雨量に関する気候変動影響が評価される。図を図-6 に示している。

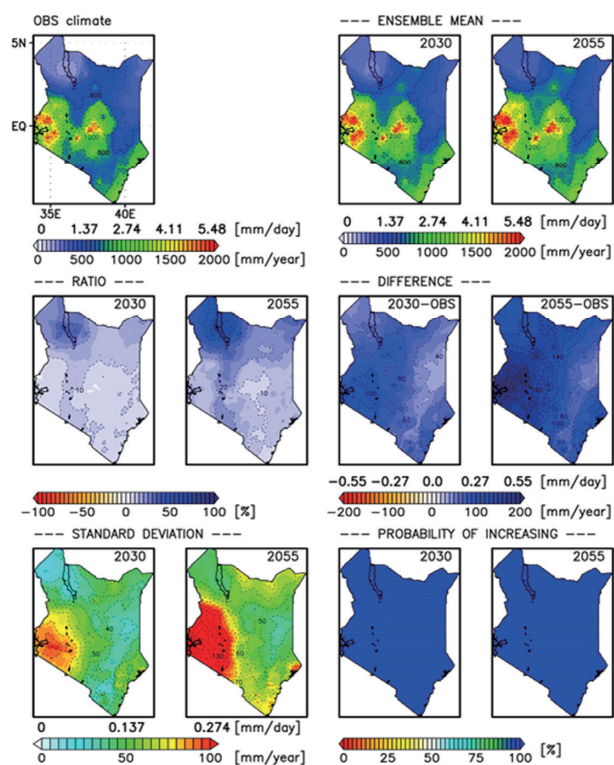


図-6 ケニア全土の年間雨量の気候変動影響マップ

Source: JICA ケニア全国水資源 2030 プロジェクト報告書

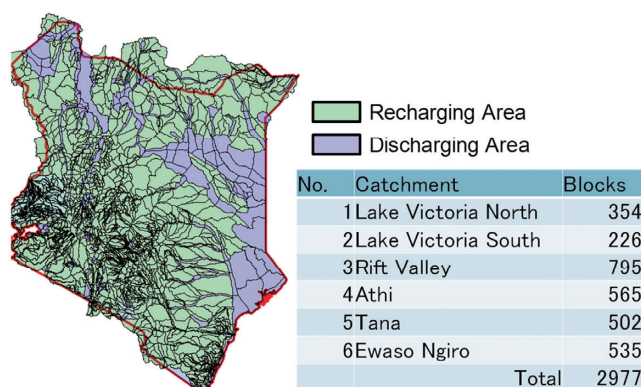
図－6 では、上段に現在気候、2030 年気候、2055 年気候の年間雨量分布が示されている。将来の雨量データは、11 の GCM のマルチモデルアンサンブル平均値を用いている。中段に現在気候から将来に向けた変化の比と差を示している。下段には、マルチモデルのデータから算出した標準偏差の分布と、t 分布で評価した現在気候から年間雨量が増加する確率を評価している。

このような評価から、ケニア全土の気候変動による年間雨量がどのように変化するかを様々な視点で定量的な情報で与えることができています。

6) 全国を対象にした流出解析

ケニア全土を対象に流出解析モデルを構築した。モデルには、日本工営が開発した分布型物理モデルである SHER モデル (Similar Hydrologic Element Response Model) を適用した。水資源に対する気候変動の影響を評価するためには、河川流だけに着目するのではなく、降雨と蒸発、土壌水分、地下水の影響を物理的に表現できるモデルである必要がある。SHER モデルは、水文過程を同一にまとめられるような斜面要素で分割することが特徴である。ケニアの大地溝帯周辺では、切り立った山岳地形となっており、グリッドベースの分布型モデルでモデリングするためには、最低でも 500m グリッドで作成する必要がある、58 万 km² の全国土をカバーするには 232 万グリッドを必要とする。その点、SHER モデルの斜面要素では、地形に応じて要素の大きさを柔軟に変えられるため、全体で 3000 要素の分割で対応できた。流出解析は、国境に限らず、集水域を漏らさないように作成した。計算精度は、グリッドベースのものと遜色がない¹⁶⁾。

ケニア全土の要素分割状況を図－7 に示している。



図－7 ケニア全土 SHER ブロック分割状況

Source: JICA ケニア全国水資源 2030 プロジェクト報告書

全国の河川流量観測データと比較し、キャリブレーションを行った。キャリブレーションは、表層土壌と帯水層の透水係数を中心に調整することで行った。つまり、局所の観測値に合わせるために局所の要素ごとにパラメータを合わせるのではなく、土壌、地質特性ごとのパラメータを見出し、同じ考え方で全国の河川流況を再現できるようにした。

7) 水資源賦存量の評価

① 水資源賦存量の推定方法

SHER モデルでは、地下水流動もモデル化されているが、簡易なモデルとなっている。ケニアでは地下水が貴重な水資源であるため、地下水については詳細な 3 次元地下水モデルとして世界的デファクトスタンダードとなっている USGS の MODFLOW を利用した。SHER モデルで算出された帯水層への涵養量 (河川などへの流出も含む) を上面境界条件として MODFLOW に与えた。

水資源賦存量は、年間降雨量から年間蒸発量を差し引いて得られる。蒸発散量は、実測の困難な水文学量で、日射と風による蒸発、植生からの蒸散量で構成されている。蒸発散量の推定では、まず気象データに基づく可能蒸発散量を算出し、これを流出モデルの境界条件に与え、表層土壌の水分量と比較し、実際に蒸発できる量を推定する。

② 可能蒸発散量の推定

検討当初は、蒸発の物理的な評価式である Penman-Montheith 法で必要となる気象変数が入手できないことから、日平均気温から算出できる Hamon 法を用いて可能蒸発散量を推定していた。SHER の流出解析モデルでケニア全国の河川流量をまんべんなく再現できるようにキャリブレーションした結果、河口からの全流出量を上回る涵養量を地下帯水層に与えなくてはならないものとなった。これは、水文学的に不合理な結果であった。

ケニア気象局では、WMO に観測情報を提供する 24 の代表観測所 (Synoptic weather stations) での 1960 年から 1990 年の各種気象変数の気候値を整理していた。ここでは、日最高気温、最低気温、相対湿度、日射量、風速など、Penman-Montheith 法での評価に必要な変数の気候値があった。問題は、日単位の可能蒸発散能の時系列にすることである。以下の手順で、Penman-Montheith 法相当の可能蒸発散能の日データを作成した。

1. 先に求めていた Hamon 式による蒸発散可能量より、1981 年から 2000 年の月別可能蒸発散能の気候値を代表観測所地点ごとに求める。i 番目の観測所の m 月の Hamon 式による可能蒸発散能の気候値を E_{im}^H と記す。
2. ケニア気象局で整理された各種気象変数の月別気候値に Penman-Montheith 法を適用する。これを E_{im}^{PM} と記す。
3. i 番目の観測所の m 月の可能蒸発散能の補正率 α_{im}^E を、それぞれの手法による可能蒸発散能の気候値の比とする。すなわち、

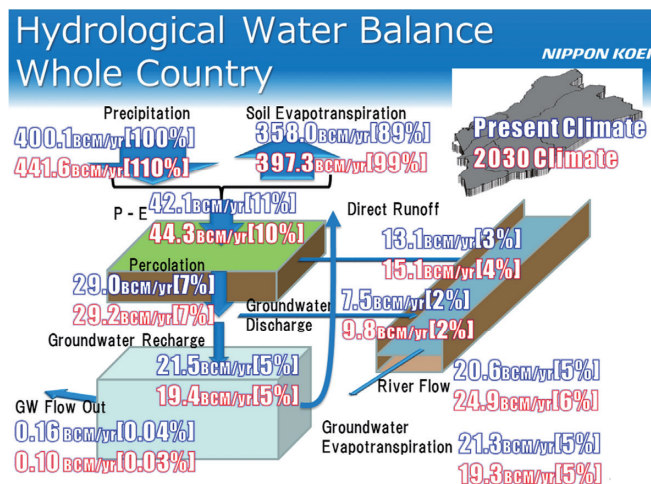
$$\alpha_{im}^E = E_{im}^{PM} / E_{im}^H$$

4. 24 箇所の観測所の m 月の補正率を元に、IDW による空間内挿で可能蒸発散能の補正率の空間分布を作成する。
5. 補正率グリッドを先に求めていた Hamon 式による可能蒸発散能の日データに乗じて、Penman-Montheith

法相当の可能蒸発散能を求める。

蒸発散量の修正前で評価したケニア全国平均の水収支では、現況気候で降雨を 100% としたときの蒸発散量（ポテンシャルでなく、実際に蒸発できる量）が 81% となっていた。日本国内の同様の検討では、降雨の 1/3 から 1/4 程度が蒸発散量と言われている¹⁷⁾が、半乾燥地帯とはいえ、かなり大きな蒸発散量と感じられていた。しかし、可能蒸発散能の修正後は、さらに SHER モデルで評価された全国平均の年間蒸発散量は、年間降雨の 89% と見積もられた。SHER モデルでは、地表より 2m が大気との水分のインタラクションが生じる層厚としてモデリングしており、さらに深い 5m までの層からの樹木の根を通じた蒸発散量を MODFLOW で追加して評価することで、河川流量を含めた全体の水収支の妥当なバランスを再現することができた。

最終的に評価されたケニア全国平均の水収支図を図－8 に示している。図では、現況気候での年間雨量を 100% としたときの各項目の割合を示している。また、全国水資源マスタープランの計画対象年である 2030 年については、性能評価を満足した 11 の GCM での評価結果のアンサンブル平均値を、現況気候の降雨量に対する比で示している。この結果に基づいて、ダム、上水、工業用水、農業用水などの水資源利用、開発、管理計画が策定された。



図－8 ケニア全国平均の水収支評価結果

Source: JICA ケニア全国水資源 2030 プロジェクト報告書

3. 振り返りと今後の課題

筆者らが経験してきた気候変動適応策に関する業務や研究開発の中でも特に重要だったケニア全国水資源マスタープランでの取り組みを中心に、技術的な取り組みを整理して紹介した。このプロジェクトに従事した 2012 年では、IPCC のレポートは第 4 次報告書（AR4）が最新の情報であり、その後も継続して世界中で研究開発が進められており、その知見はさらに充実し、高度化してきている。しかし、水資源の影響評価の基本となる事項は、この業務で全て実施したと考えている。手

本となる検討例がない中で、実行力のあるマスタープランを検討するという事は、非常にチャレンジングであり、困難の連続であった。

ケニア全国水資源では、将来気候の気候条件、水資源、水収支がどうなるのかという適応策のための基本的な事項を定量的に評価し、マルチモデルアンサンブルで不確実性の幅を様々な評価指標で整理した。将来の水資源に関わるシナリオとして、11 の GCM に基づいて気象データ、水文データを作成した。これら全てのケースを活用して、水資源計画、灌漑計画などを実施すべきと考えていたが、これは、既往の計画策定にかかるコストが 11 倍になるもので、さらに、それらの取りまとめが加わるため、時間的制限内では実施不可能と判断された。その結果、アンサンブルデータの平均値で議論がなされたものである。

気候変動に関する議論で最も重要であり、困難な点は、不確実性が非常に大きい事象を対象に計画値をどのように設定するかということである。現在、JICA の地球環境部と JICA 研究所から委託を受けた共同研究業務においてこの不確実性を考慮した堅牢な意思決定を如何にするかというテーマに取り組んでいる。将来の気候シナリオだけでなく、社会的な条件の不確実性も無視できるものでなく、可能な限りのオプションを設定し、全てを定量評価することが基本となる。この不確実性を考慮した計画論は、気候変動以外の計画論にも通用することができる。既往の計画手法では、もっともらしい、また、確からしい外力設定を一つか数ケース設定する。この予測が外れれば、「想定外」となり、その計画の有効性が揺らいでしまう。気候変動以外のテーマについても不確実性を考慮することで、より社会の堅牢性を高める計画につながると考えている。

将来気候シナリオは、SRES から RCP にかわり、将来社会の想定と温暖化の進行度を切り分けて議論できるようになった。世界の共通認識を醸成しやすいように、シナリオ設定の工夫は、今後も続けられるはずである。気候シナリオの正しい理解のために、最新の情勢については継続的に把握していく必要がある。

ダウンスケーリング、バイアス補正についても、まだ課題がある。特にダウンスケーリングでは、非常に粗い解像度の GCM の情報から、空間と時間の詳細化を行うものであるが、現状のいずれの手法も課題がある。将来の気候シナリオの作成は、今後も変わらず、気候変動適応における必須の技術であるため、さらに研究を深めていく必要がある。

謝辞：ケニア国「全国水資源マスタープラン 2030 策定プロジェクト」の実施にあたりご支援、ご協力いただいたケニアおよび日本両国の関係機関、ならびに本稿の執筆に際しご理解、ご協力いただきました国際協力機構（JICA）に感謝申し上げます。また、気候変動に関する多大な研究成果をもとに科学的・技術的なご指導をくださった ICHARM 小池センター長に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf
- 2) Physical Sciences - Environmental Sciences, Michael E. Mann, Zhihua Zhang, Malcolm K. Hughes, Raymond S. Bradley, Sonya K. Miller, Scott Rutherford, and Fenbiao Ni, Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia, PNAS 2008 105 (36) 13252-13257; published ahead of print September 2, 2008, doi:10.1073/pnas.0805721105 <http://www.pnas.org/content/105/36/13252.abstract>
- 3) IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf
- 4) IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_en.pdf
- 5) IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_en.pdf
- 6) 例えば、Wilby, R., Charles, S., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., and Mearns, L.: Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, IPCC task group on data and scenario support for impacts and climate analysis, 2004. http://www.ipcc-data.org/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf
- 7) 例えば、坂口勝俊、岸本卓也、鳴海大典、下田吉之、水野稔 (2004) : 大阪府域を対象とした上水消費量に関する気温感応度、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集
- 8) <http://www.vision2030.go.ke/>
- 9) IPCC SRES (2000), Nakićenović, N.; Swart, R., eds., Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- 10) データ統合・解析システム DIAS, <http://www.diasjp.net/>
- 11) Adler, R.F., G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, P. Arkin, E. Nelkin 2003: The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). J. Hydrometeor., 4, 1147-1167
- 12) Huffman, G.J, R.F. Adler, D.T. Bolvin, G. Gu 2009: Improving the Global Precipitation Record: GPCP Version 2.1. Geophys. Res. Lett., 36, L17808, doi:10.1029/2009GL040000
- 13) NCEP Reanalysis Derived data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>
- 14) 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、土木学会論文集 B1 (水工学)、vol.69(2013) No.4 P.I_19-I-24 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/69/4/69_4/_article/-char/ja/
- 15) 飯泉仁之直、西森基貴、石郷岡康史、横沢正幸 2010: 統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門、農業気象 66、131-143
- 16) 公益社団法人 雨水浸透技術協会 2000: 都市域における水循環系の定量化手法・水循環系の再生に向けて・
- 17) 例えば、国土交通省水管理・国土保全局水資源部による平成 28 年版 日本の水資源の現況 http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_fr1_000036.html