

土地改良事業計画設計基準 計画「排水」の改定 ー将来の降雨予測に基づく計画策定手法の導入ー

有 安 建 也／林 み ゆ き／田 澤 加奈子

1. はじめに

我が国の水田は、谷口などの低地から始まったとされ⁽¹⁾、その後、土木技術の進歩とともに、河川流域や低湿地の干拓、海岸部の干拓等にも広がっていった。このような水土の歴史を辿れば、我が国は、排水改良が不可欠な低平地に多くの農業生産基地を抱えており、排水事業が農地・農業用施設を守る重要な役割を担ってきたこと、また、それを通じて、農村地域の生命や財産をも守ってきたことがわかる。

農林水産省、都道府県等は、大雨による農地等への湛水被害を防止又は軽減するため、排水施設を整備するとともに、農業用ダム・ため池の洪水調節機能や水田の雨水貯留機能の強化・活用を推進している。

これまで、農業用の排水施設に係る土地改良事業（以下「排水事業」という。）の計画策定に当たっては、過去の実績降雨をもとに10年から30年に1回程度の確率降雨量を算出し、施設規模等を決定してきた。

しかし、近年、気候変動に伴い高強度降雨の発生頻度が増加傾向にあることや、各国の研究機関等において将来の気候予測を進め、日本においても気象庁や研究機関等で気候変動予測技術の開発が進んでいることから、農林水産省は、過去の実績降雨による従来の計画策定手法を見直し、将来の降雨予測も考慮した排水事業の計画策定手法の検討を進めてきた。そして、2025年4月に土地改良事業計画設計基準 計画「排水」（以下「計画基準（排水）」という。）を改定し、土地改良分野における新たな取組として、排水事業において将来の降雨予測に基づく計画策定手法を取り入れ、今後は、気候変動を踏まえた排水計画を策定し、排水

施設を整備することとしている。

本報では、気候変動の現状と対応、気候変動予測技術、複数のモデル地区における検証等を経て導入した新たな計画策定手法、計画基準（排水）の改定内容について紹介する。

2. 気候変動の現状と対応

（1）気候変動の現状

気候変動は、気温及び気象パターンの長期的な変化を指す。これらの変化は太陽活動の変化や大規模な火山噴火による自然現象の場合もあるが、1800年代以降は主に人間活動が引き起こしており、主な原因は化石燃料の燃焼とされている。気候変動に関する政府間パネル（以下「IPCC」という。）が、2021年から2023年にかけて公表した第6次評価報告書⁽²⁾では、人間活動が主に温室効果ガスの排出を通して地球温暖化を引き起こしてきたことには疑う余地がないと結論付けた。また、同報告書では、この10年間に行う選択や実施する対策は、現在から数千年先まで影響を持つことが報告されている。

（2）日本における気候変動

日本国内においては、文部科学省及び気象庁が、気候変動に関する最新の自然科学的知見を総合的に取りまとめ、国、地方公共団体及び事業者等が、気候変動への対策や影響評価の基盤情報（エビデンス）として使えるよう情報を提供している。「日本の気候変動2025－大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書－」（以下「日本の気候変動2025」という。）は、日本に

Ariyasu Tatsuya：農林水産省 農村振興局 整備部 設計課 事業調整管理官
Hayashi Miyuki：農林水産省 農村振興局 整備部 設計課 課長補佐（計画基準班）
Tazawa Kanako：農林水産省 農村振興局 整備部 設計課 計画基準第2係長

表－1 過去から将来までの変化（気温、降水を一部抜粋）

要素		20世紀初め (1910～1939)	近年 (1995～2024)	21世紀末	
				2℃上昇 シナリオ	4℃上昇 シナリオ
気温	年平均気温の 変化	(基準)	+1.3℃	+2.0℃ (2076～2095)	+5.1℃ (2076～2095)
	猛暑日の 年間日数	0.8日	3.0日	4.2日 (2076～2095)	18.8日 (2076～2095)
降水	日降水量 100mm以上の 年間日数	0.8日	1.2日	1.2日 (2076～2095)	1.4日 (2076～2095)

※将来予測モデルでは20世紀末から21世紀末の差で変化量を評価

おける気温、降水等の観測結果（過去～現在）と将来予測（未来）について記載している（表－1）⁽³⁾。なお、日本の気候変動2025では、将来予測について、IPCC 第5次評価報告書⁽⁴⁾で用いられた代表的濃度経路（RCP）シナリオを用いており、RCP2.6シナリオを「2℃上昇シナリオ」、RCP8.5シナリオを「4℃上昇シナリオ」と表記している。

農業は、気候変動の影響を受けやすく、既に全国で、気温の上昇による農作物の品質低下（コメの白未熟粒の発生、一等米比率の低下）等の影響が確認されるとともに、一部の地域や極端な高温年では収量の減少も見られる。また、農地・農業用施設に甚大な爪痕を残した令和2年7月豪雨、令和元年東日本台風、平成30年7月豪雨等の大規模な自然災害について一定程度温暖化の影響があったことが発表されている。

（3）気候変動に関する世界と日本の対応

気候変動に関する国際社会の取組としては、2015年にフランス・パリで開催されたCOP21においてパリ協定が採択され、「世界の気温上昇を産業革命前から2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をすることが世界共通の長期目標とされている。

気候変動への対策には、温室効果ガスの排出量を削減し、温暖化の進行を抑えるための取組「緩和策」と、既に顕在化あるいは、将来予測される影響に備えるための取組「適応策」の2つの柱がある。

日本は、地球温暖化対策の推進に関する法律（平成10年法律第117号）に基づき地球温暖化対策計画（平成28年5月13日閣議決定）を策定し、温室効果ガスの

削減目標とその達成のための施策等を定めている。また、2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言する等、温暖化の進行を抑えるための取組「緩和策」を力強く推進している。

あわせて、気候変動適応法（平成30年法律第50号）に基づく気候変動適応計画（平成30年11月27日閣議決定）を策定し、気候変動による生命・人間社会への影響を軽減するための取組「適応策」を進めている。

農林水産省では、「農林水産省気候変動適応計画」において分野・品目別対策を示しており、その中で、農業生産基盤の取組として、気候変動研究の進展に伴う新たな科学的知見等を踏まえ、中長期的な影響の予測・評価手法を確立し、将来予測に基づく施設整備を行う根拠を明確にした上で、今後の施設整備のあり方を検討するとした（2021年10月改定時に追記）。

2024年5月に改正された食料・農業・農村基本法（以下「改正基本法」という。）では、基本理念でもある第5条に、気候の変動その他の変化が生じる状況においても農業の持続的な発展を図ること等が位置付けられた。改正基本法を受け、2025年4月に策定された食料・農業・農村基本計画では、生産性向上に向けた取組の中で、気候変動により激甚化・頻発化する災害への対応として、農業・農村の強靱化に向けて、将来の降雨予測に基づく計画策定手法の見直しも踏まえた農業水利施設の整備、これらの農業水利施設や農地を活用した流域治水の取組を推進すること等が示され、気候変動への適応を推し進める動きが更に求められている状況にある。

3. 気候変動予測技術

(1) 気候変動予測の方法

温暖化に伴う気候変動は、将来の温室効果ガス等の排出量を複数シナリオに分け、各シナリオにおける温室効果ガス等が地球のエネルギーバランスに与える影響である「放射強制力^{注1}」を計算し、気温、降水量、海面上昇等の将来変化について気候モデルを用いて予測している。近年の気候変動予測における温室効果ガス等の放射強制力は、各国が政策的に緩和策を行うことを前提とした4つのRCPシナリオ（IPCC第5次評価報告書で公表）が広く使用されている（表-2）。

気候モデルは、地球とその周りの空間を三次元の格子状に区切り、その格子点において運動方程式等の基礎方程式に風向、気圧、水蒸気量を初期値として与え、これらの変化を計算することにより気候変動を予

測する。モデル計算は、地球全体を細かい格子に区切った高解像度のシミュレーションを行うには膨大な時間を要するため、一般的に、大きい格子から小さい格子へと段階的に計算していく。具体的には、将来予測では、熱を長期間蓄積する海洋の流れや、海洋と大気の熱や水等のやりとりが重要になるため、大きな格子（100～300km）の大気海洋結合モデルで海水温度の変化を含めた計算を行い、次に細かい格子（20～60km）の大気全球モデルで計算するが、その際の海水温度には大気海洋結合モデルの計算結果を使用する。さらに、地域ごとの評価を行うため、大気全球モデルの一部を切り出して、5km程度の格子の領域モデルに大気全球モデルの計算結果を与えて計算する（図-1）。これを力学的ダウンスケーリングと呼ぶ。

表-2 RCPシナリオの概要

シナリオ名	内容	気温上昇予測幅*
RCP8.5	高位参照シナリオ ・世紀末の放射強制力8.5W/m ² ・2100年における温室効果ガス排出量の最大排出量に相当するシナリオ	2.6～4.8℃
RCP6.0	高位安定化シナリオ ・世紀末の放射強制力6.0W/m ²	1.4～3.1℃
RCP4.5	中位安定化シナリオ ・世紀末の放射強制力4.5W/m ²	1.1～2.6℃
RCP2.6	低位安定化シナリオ ・世紀末の放射強制力2.6W/m ² ・将来の気温上昇を2℃より低く抑えるというパリ目標の下に開発された排出量の最も低いシナリオ	0.3～1.7℃

※1986～2005年平均を基準とした2081～2100年の世界平均気温

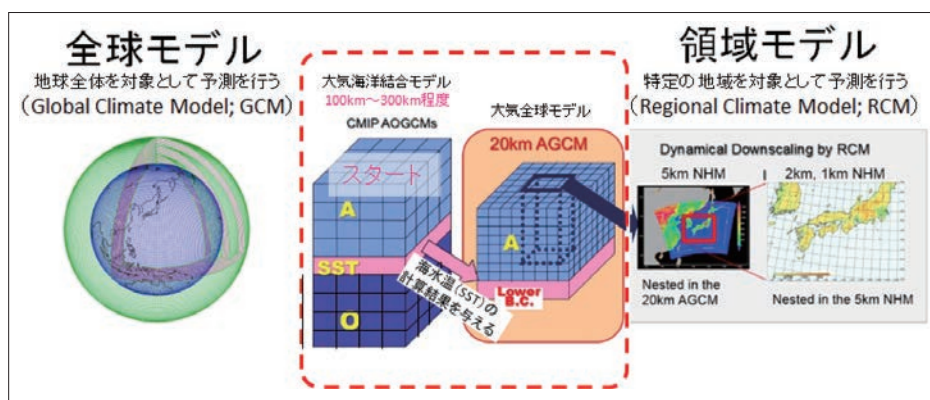


図-1 各気候モデルの関係図
(出典：気象庁 HP⁽³⁾⁽⁵⁾を基に加筆)

(2) 日本で利用されているデータセット

日本では、気象庁気象研究所が中心となり開発された大気全球モデル（気象研究所大気大循環モデル「MRI-AGCM」）と領域モデル（非静力学地域気候モデル「NHRCM」）を用いたダウンスケーリングが広く行われている。また、文部科学省の統合的気候モデル高度化研究プログラムでは、MRI-AGCMによって150年間の連続計算を行い、その結果を領域モデル「WRF」によりダウンスケーリングする取組も行われている。

発生頻度の低い異常天候や極端気象に伴う不確実性を評価するためには、多数の実験結果の統計分析（アンサンブル実験）が重要であり、アンサンブル実験の計算結果の集合体をデータセットと呼んでいる。文部科学省の気候変動リスク情報創生プログラムでは、これまでにない多数のアンサンブル実験を行い、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース⁽⁶⁾⁽⁷⁾」（以下「d4PDF」という。）を作成した。このd4PDFの出現により極端気象の再現と変化についての議論が可能となったことで、各省庁、自治体等における気候変動影響評価や気候変動を踏まえた計画策定の動きが加速化した。現在では、d4PDFから日本全国を対象に5kmの格子に力学的ダウンスケーリングした「全国5kmメッシュアンサンブル気候予測データ⁽⁸⁾」が作成され、日本全国を統一した実験設定で評価する等の場合に有用なデータとなっている。このうち、d4PDF（5km格子）はRCP8.5シナリオにおける4℃上昇時点（2090年頃）、d2PDF（5km格子）（以下「d2PDF」という。）は2℃上昇時点（2040年頃）の予測結果である。なお、d2PDFの正式名称は「d4PDF（2℃上昇実験）」である。

今後、IPCC第6次評価報告書に基づく気候予測データセットが開発される予定であり、気候変動による将来の気候予測に関する研究は、各研究機関において鋭意進められているため、最新の研究結果を注視していく必要がある。

4. 排水事業における将来の降雨予測に基づく計画策定手法の検討

(1) これまでの排水事業の計画策定手法

排水事業の計画策定においては、施設規模等を定め

る根拠となる計画基準値を決定する必要があるが、その検討は、事業の規模、効果及び所要経費に直接影響がある値を決定することになるため重要である。この計画基準値の一つである計画基準降雨は、計画排水量の算定の根拠となる降雨であり、これまでの計画基準（排水）では、最近年から遡った30年から50年程度の実測された過去の降雨資料（実績降雨）を用いて値を定めてきた。例えば、機械排水を行う低平地における排水計画では、その実績降雨を用いて日降雨量、2日連続降雨量、3日連続降雨量（以下「1～3日連続降雨量」という。）について各々の確率降雨量を求め、それぞれの差分から3日連続降雨量の日配分量を定めている。また、3日連続の降雨量パターンの発生頻度を分析し、頻度の高いパターンに先の日配分量を当てはめ計画基準降雨を決定している。

(2) モデル地区の選定

将来の降雨予測に基づく計画策定手法の検討に当たり、本州域から2地区（S地区、N地区）、北海道域から1地区（Y地区）、いずれも農地の大半が低平地に位置し、排水機場により機械排水が行われている3地区をモデル地区として選定した。

各モデル地区では、地域の実情に応じて異なる確率年（リターンピリオド）の降雨規模が設定されており、S地区は1/30年、N地区は1/15年、Y地区は1/10年の確率年で計画基準降雨が設定されている。今回の検討においても、各地区の計画で使用されている確率年で将来の降雨予測に基づく計画基準降雨を検討した。

(3) 気候予測データセットの選定

気候予測データセットは、複数のシナリオに基づき多数作成されており、ダウンスケーリングも2km、5km、20km等の格子で行われ、領域解像度、計算年、データ数等が異なっている。このうち、表-3では3種類のデータセットを示す。

今回の検討では、排水施設の標準耐用年数は20年、国営土地改良事業の一般的なサイクルは40年前後であり、2020年代に整備する排水施設の標準的な稼働期間は2020年代～2060年代であると想定されること、集中豪雨を評価するためには少なくとも5km程度の領域

表－3 日本で開発された代表的なデータセットの概要

データ セット名	NHRCM02		d2PDF		WRF02
領域 モデル	NHRCM		NHRCM		WRF
領域 解像度	2 km	2 km	5 km	5 km	2 km
計画年 (計算期間)	1980～1999 (20年)	2076～2095 (20年)	1951～2010 (60年)	2040頃の CO ₂ 濃度 定常(60年)	1950～2099 (150年)
シナリオ	過去	RCP8.5 RCP2.6	過去	2℃上昇時点 (RCP8.5)	過去 ～RCP8.5
データ数	1メンバ ×20年	4メンバ ×20年	12メンバ ×60年	12メンバ ×60年	1メンバ ×150年
対象地域	全国	全国	全国	全国	6流域*
作成年	2015	2015	2023	2023	2022
実験結果	過去実験値	将来実験値	過去実験値	将来実験値	過去～将来 実験値

※手取川流域、信濃川流域、利根川（鬼怒川）流域、肱川（野村ダム）流域、十勝川流域、伊勢湾流域

解像度が必要であり、また、データ数が多いものが不確実性を評価する上で有効であること等を踏まえ、データセットは、d2PDFを選定し、最新の研究成果が存在する地域ではそれらも参考とすることとした。

気候予測データセットには、過去の気候を再現する実験結果（以下「過去実験値」という。）、将来の気候を表現する実験結果（以下「将来実験値」という。）があり、今回の検討では、各地区の過去実験値及び将来実験値についてそれぞれ確率降雨量を求め、将来の降雨強度の変化傾向（変化倍率）を算出した。

（４）バイアス補正の手法選定

現在の気候モデルは、現実の大気や海洋の運動を完全に再現できるものではなく、実績降雨と過去実験値との間には、計算技術上の様々な仮定や近似に由来する系統的な誤差（バイアス）が存在するという特徴がある。また、この誤差は、将来実験値にも同じように現れるという前提をおくことにも留意が必要で、この誤差が気候変動の影響評価においては支障となるため、実験値のバイアスを適切に処理（以下「バイアス補正」という。）する必要がある⁽⁹⁾。

実績降雨、過去実験値、将来実験値の３つの母集団

の扱い方により幾つかのバイアス補正手法があるため、モデル３地区において、実績降雨（1980～2010年）、d2PDFによる過去実験値（1980～2010年）、d2PDFによる将来実験値（2040年）の３つのデータを用いて、「デルタ型」及び「複合型」の２種類のバイアス補正手法を比較した（図－２）が、３地区ともにデルタ型と複合型の場合で、変化倍率に大きな差異はなかった。実績降雨に基づく補正作業が伴うものの、当面の間、より実績降雨との整合性が高いと考えられる複合型を選択することとした。

（５）算定結果とその妥当性

気候予測データセットにd2PDFを、バイアス補正手法に複合型を採用して、１～３日連続降雨量それぞれで変化倍率を求め、その値をそれぞれの実績降雨による確率降雨量に乗じて、将来の降雨予測による確率降雨量を求めた。モデル３地区における算定結果は表－４のとおりである。例えばＳ地区については、１／30年確率の日降雨量の変化倍率は1.19倍となり、将来の降雨予測による確率降雨量は156.7mmとなった。また、２日連続降雨量は1.12倍の219.0mm、３日連続降雨量は1.12倍の250.3mmとなり、この結果

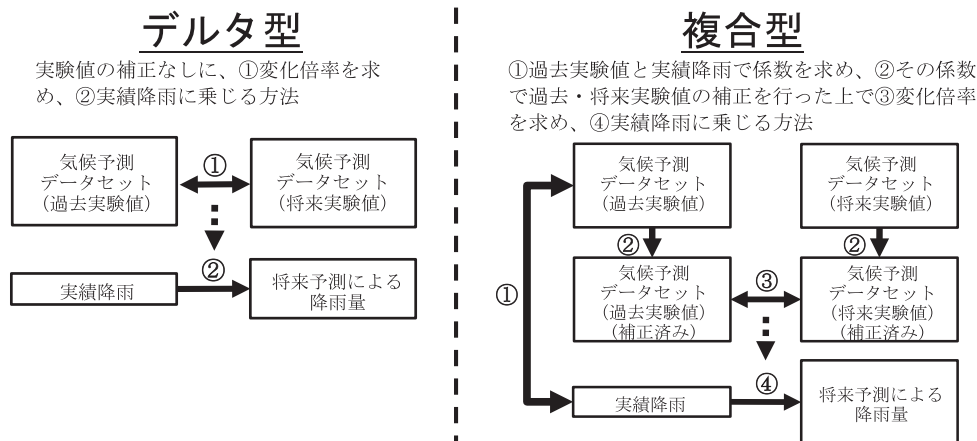


図-2 バイアス補正手法の比較

表-4 モデル地区における将来の降雨予測に基づく確率降雨量

地区名	連続降雨日数	実績降雨①	過去実験値②	将来実験値(2040年頃)③	降雨量変化倍率④ = ③ / ②	将来の降雨予測に基づく確率降雨量⑤ = ① × ④
S 1/30	1日	131.7	131.2	156.0	1.19	156.7
	2日	195.5	179.8	201.6	1.12	219.0
	3日	223.5	199.7	223.3	1.12	250.3
N 1/15	1日	124.4	133.4	152.1	1.14	141.8
	2日	179.8	179.5	192.5	1.07	192.4
	3日	204.2	200.8	216.4	1.08	220.5
Y 1/10	1日	104.3	93.9	107.3	1.14	118.9
	2日	121.8	116.7	133.5	1.14	138.9
	3日	127.2	127.4	144.4	1.13	143.7

※単位 mm、地区名下の数字は確率年

を使用して排水機場や排水路等の規模を決定していくことになる。

なお、算定結果の妥当性は、国土交通省の河川計画における降雨量変化倍率の決定根拠⁽¹⁰⁾を活用し、モデル地区の降雨量変化倍率が想定される範囲内(0.92～1.30)に収まっていることをもって確認した。

5. 土地改良事業計画設計基準 計画「排水」の改定

(1) 改定のポイント

モデル3地区において、将来の降雨予測に基づく計画策定手法を検討し、その妥当性を確認することができた。これを踏まえ、当該手法を位置付ける形で計画基準(排水)の改定を行った。

計画基準は、①基準本文、②基準の運用、③基準及び運用の解説、④技術書で構成されており、構成別に改定のポイントを示す。

①基準本文：事業計画作成のための調査項目である「気象及び水文」に「気候」を追加。気象も気候も大気現象を指す用語だが、気象は時々刻々と変化する瞬間的な大気現象を表すのに対して、気候はある程度長い期間における大気の状態を示す用語として一般的に用いられており、気候予測データは後者に該当するとして「気候」を追加した。

②基準の運用：計画基準値は、観測資料や気候予測資料を基に定めることを基本とするよう記載。これまで計画基準値は、実測された資料を基に定めるとし

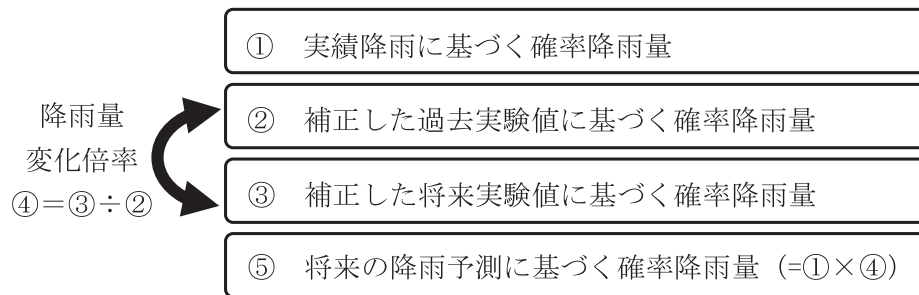


図-3 将来の降雨予測に基づく確率降雨量の算定手順

ていたが、今後は、実測された資料に加え、気候予測資料を基に、計画基準値を定めることになる。

③基準及び運用の解説：計画基準降雨は、気象観測資料を用いて確率統計解析により得られる実績降雨に基づく確率降雨量に、気温上昇時の気候予測資料により求めた降雨量変化倍率を乗じることを基本とし推定することを記載。これまでは実績降雨に基づく確率降雨量から計画基準降雨を定めていたが、今後は、実績降雨に基づく確率降雨量に、降雨量変化倍率を乗じて降雨予測に基づく確率降雨量を算定（図-3）した上で、計画基準降雨を推定することになる。なお、計画基準降雨は、地域の近年の降雨特性に依拠して定める観点も重要であるため、既往洪水による被害実態等を総合的に考慮し、適切な理由があれば、上記の降雨量変化倍率を用いずに近年の降雨資料を用いて推定することも可能であることを明記した。

④技術書：将来の降雨予測に基づく計画基準降雨の具体的な推定手法について新たに章を設けて記載。また、事業計画策定時の作業負担を軽減するため、確率降雨量算定までの流れを示したマニュアルを技術書に位置付け、算出プログラムを作成した。

（2）気象観測資料及び気候予測資料の入手

新たな計画基準（排水）では、気象観測資料の実績降雨について、既に温暖化の影響を含んでいる可能性がある近年の降雨資料を確率統計解析の対象としないよう留意する必要があるとしている。このため、気象観測資料の入手期間は、気候予測資料のd2PDFの過去実験値の計算期間（1951年～2010年）と合わせて、2010年から遡った30年から50年程度が必要と考えられ、事業の整備水準、計画対象地域における近年の降

雨特性等を踏まえて検討することとしている。

気候予測資料のd2PDFは、過去実験値は1951年～2010年の60年分のうち気象観測資料と同じ期間について、将来実験値は2040年頃の60年分について使用する。d2PDFは、過去及び将来実験に対して、アンサンブル実験数が12メンバ（シミュレーション）ずつあり、過去実験値及び将来実験値について、それぞれ720年分のデータがパッケージ化されている。また、データ統合・解析システムDIAS（事務局：国立研究開発法人海洋研究開発機構）を通じて公開されており、時間降雨量データを無料でダウンロードできる。

6. 今後の展開

今回の計画基準（排水）の改定を受けて、排水機場や排水路等の排水施設の規模に直接影響を及ぼす計画排水量の算定の根拠として、将来の降雨予測に基づく計画基準降雨を用いることが可能となった。気候変動への適応に向けて、土地改良分野として大きな一歩を踏み出した。

今後、排水改良を必要とする各地区において、将来の降雨予測に基づく計画策定が適正に行われるとともに、当該計画に対する地元関係者の合意のもと排水施設の整備が円滑に進められるよう、説明会や講習会における改定内容の周知に加え、先行地区の事例共有等を予定している。また、今回の改定において、気候予測資料はd2PDFを利用することとしたが、今後、新しいデータセットが開発されることも考えられるため、最新情報を継続的に収集し、適宜更新していく方針である。将来世代に対する気候変動への責任を果たせるよう、筆者らも上記フォローアップを通じて、適応の具体化を進めるとともに、農村地域の安心・安全を守る排水対策強化に貢献してまいりたい。

7. 参考文献

- (1) 水土の礎（一般社団法人農業農村整備情報総合センター）、<https://suido-ishizue.jp/daichi/part2/01/06.html>
- (2) IPCC 第6次評価報告書 統合報告書 政策決定者向け要約（気象庁）、https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/IPCC_AR6_SYR_SPM_JP.pdf
- (3) 日本の気候変動2025－大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書－（文部科学省、気象庁）、https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2025/pdf/cc2025_honpen.pdf
- (4) IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳（気象庁）、https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wgl_spm_jpn.pdf
- (5) Verification and Application of High-resolution AGCMs for Climatology (Ose, T., Mizuta, R., Nakaegawa, T., Kusunoki, S. and Takayabu, I.), https://www.mri-jma.go.jp/Dep/clg/tomoaose/ose_sub/Presentation_2013.pdf
- (6) Mizuta et al. (2017)、Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models、*Bulletin of the American Meteorological Society* 98 (7)、pp.1383～1398
- (7) Fujita et al. (2019)、Precipitation changes in a climate with 2-K surface warming from large ensemble simulations using 60-km global and 20-km regional atmospheric models、*Geophysical Research Letters* 46 (1)、pp.435～442
- (8) Kawase et al. (2023)、Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario、*Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 128 (18)、e2023JD038513
- (9) 気候予測データセット2022解説書（文部科学省、気象庁）、https://diasjp.net/ds2022/manual_chapter1.pdf
- (10) 「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言（気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会）、https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/index.html
- (11) 気候変動適応情報プラットフォーム A-PLAT（国立研究開発法人国立環境研究所）、https://adaptation-platform.nies.go.jp/climate_change_adapt/adapt/a-0105.html

【注】

注1) 放射強制力は、地球温暖化を引き起こす因子の強さのこと。数字が大きいほど地球温暖化を引き起こす力が強い状態を示す⁽¹¹⁾。正の放射強制力は温暖化、負の放射強制力は寒冷化を起し、CO₂が現在の倍になったときの放射強制力は約4 W/m²であるといわれている。