

気候変動を踏まえた 新しい洪水リスク解析

[降雨・流量編]

国土交通省北海道開発局、北海道、北海道大学 監修

気候変動を踏まえた新しい洪水リスク解析

国土交通省北海道開発局、北海道、北海道大学 監修

一般財団法人北海道河川財団

一般財団法人北海道河川財団

気候変動を踏まえた新しい洪水リスク解析 [降雨・流量編]

監修：国土交通省北海道開発局，北海道，北海道大学
発行：一般財団法人北海道河川財団

本書は、国土交通省北海道開発局および北海道が「平成 29 年度北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会」で議論された気候変動を踏まえた治水計画に関する検討内容を、技術の共有を目的に取りまとめたものです。

また、文部科学省 SI-CAT（気候変動適応技術社会実装プログラム）および平成 29 年度地球シミュレータ特別推進課題の支援を受けて実施された検討内容を使用しています。

編集スタッフ

山本太郎，千葉 学，戸村 翔（一般財団法人北海道河川財団）

吉田隆年，大村宣明，舩屋繁和，植村郁彦（株式会社ドーコン）

山田朋人，星野 剛（北海道大学大学院工学研究院）

時岡真治，岡部博一（国土交通省北海道開発局）

はじめに

平成28年8月、1週間に3個の台風が北海道に上陸し、さらに東北に上陸した台風第10号の影響により、道内の74河川が氾濫した。また、国道274号の大規模な被災をはじめ、多数の道路橋、鉄道橋の被災により、道内の交通網が寸断された。収穫目前であった作物は農地の表土ごと流され、全国の野菜価格の上昇をもたらした。

この災害の期間中、報道機関から多数の問合せを受けたが、最も回答が難しかったのが、「本州並みの豪雨が北海道でも降るようになったが、堤防の大きさは今のままでよいのか」など、気候変動に対してどのような対策をとっているのかという質問であった。整備途上である治水施設の整備を進め、それを上回る洪水に対しては、「施設の能力には限界があり、施設では防ぎきれない大洪水は必ず発生するもの」へと意識改革するため、リスクの周知、事前の行動計画の策定、行動のきっかけとなる情報の発信などハードとソフトを組み合わせた対策を進めていると回答したが、質問の本質に答えたものではなかった。

タイムラインの策定、市町村へのホットラインといったソフト対策の進展により、北海道豪雨災害時には、既往の洪水時と比較し、避難勧告の発令等は迅速に行われた。しかし、ソフト対策では、人命を救うことはできても、資産や農地を守ることはできず、北海道の使命である食料供給基地の役割を果たすことはできない。そのような中、国土交通省北海道開発局と北海道が共同で設置した「平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会」から、以下の今後の取組みに向けた明確なビジョンを与えられた。

- ・北海道は明治以降の治水事業により、順次社会を発展させてきたという歴史がある。しかし、今後は気候変動の影響により、必要な対策を講じなければ治水施設の安全度が低下していくという、これまでに経験したことのない困難な局面に直面している。
- ・今回、甚大な被害に見舞われ、日本でも気候変動の影響が特に大きいと予測されている北海道から、次の時代に向けて新たな水防災対策のあり方を発信する必要がある。
- ・過去の降雨や水害等の記録だけでなく、気候変動による将来の影響を科学的に予測し、リスク評価をもとに治水対策を講じるべきである。

この提言を踏まえ、新たに「北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会」を設置し、甚大な被害が生じた十勝川と常呂川を対象に、気候変動による降雨量、洪水量の変化、それに伴うリスクの変化を算定した。委員会での検討は、国立研究開発法人海洋研究開発機構の協力をいただき地球シミュレータを用いて約1万ケースの力学的ダウンスケールを行い、また、数万ケースの流出計算を実施するなど、北海道の産学官の総力を挙げた成果となっている。

検討結果は、気候変動の影響評価のみならず、大規模アンサンブル実験結果を用いることにより、膨大な標本を入手することができ、観測結果からシミュレーションに基づく計画論への転換の足が

かりにもなっている。

それらの検討は、全国に先駆けたものであり、他地域の参考となるものであるとともに、改善すべき点も多く残されている。気候変動への取組みは喫緊の課題であり、本分野の研究の発展に少しでも寄与できるように検討過程を本冊子として取りまとめることとした。些少なりとも参考になれば、望外の喜びである。

国土交通省北海道局 水政課 企画官 時岡真治

(前 国土交通省北海道開発局 建設部河川計画課 河川調整推進官)

目 次

はじめに	v
第1章 気候変動シナリオの選定	1
1.1 気候変動シナリオ	1
1.2 気候変動予測実験データの選定	2
第2章 予測降雨のダウンスケーリングとバイアス補正	5
2.1 ダウンスケーリング	5
2.2 ダウンスケーリング結果	12
2.3 バイアス補正	19
第3章 大量アンサンブルデータによる将来の確率降雨量の推定	23
3.1 確率評価手法	23
3.2 データのリサンプリングと将来降雨量の推定	25
第4章 予測降雨をもとにした河川洪水流量の算定	29
4.1 流出計算モデルの設定	29
4.2 流出計算の実施	31
参考1 検討の経緯	35
参考2 諸外国における気候変動適応策とリスク評価	41
付 録	67
参 考 文 献	77
おわりに	81
謝 辞	83

第1章

気候変動シナリオの選定

1.1 気候変動シナリオ

●●● IPCC での気候変動の評価

気候変動の予測は世界各国の科学者により最新の理論に基づいた研究が進められており、これらを包括的に評価する機関として IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 国連気候変動に関する政府間パネル) が国連環境計画 (UNEP) と世界気象機関 (WMO) により設立された。IPCC は5～6年ごとに科学的知見をまとめた評価報告書を公表しており、2013年に出された第5次報告書である AR5 (Fifth Assessment Report: Climate Change 2013) が最新の評価報告書である。本書では2017年4月時点での最新の評価報告書に基づくものとして AR5 をもとに将来降雨量の推定やリスク評価の検討を行うこととした。なお、AR5 では「気候システムの温暖化については疑いの余地がなく、中緯度の陸域のほとんどで極端な降水が強くなり、より頻繁となる可能性が非常に高い¹⁾」とされており、中緯度に位置する日本付近では気候変動によって極端現象が頻発する可能性が高い。近年の日本では台風や前線による豪雨、さらには線状降水帯による長期的および局所的な豪雨などの極端現象が多発しており、IPCC での予測である気候変動が進んでいる前提で検討を進めた。

●●● IPCC 最悪想定シナリオ

気候変動による気温の変化は、温室効果ガス濃度などの変化の程度によって複数のシナリオで予測計算がなされており、気候変動を想定した水文量の検討を行うためには、どのシナリオでの変化に基づくかを選定する必要がある。AR5 ではこの温暖化のシナリオを RCP (Representative

表1-1 RCP シナリオの概要と将来予測

略称		シナリオ (予測) のタイプ	世界平均地上気温	世界平均海面水位
	RCP 2.6	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℃以下に抑えるという目標のもとに開発された排出量の最も低いシナリオ	+0.3~1.7℃	+0.26~0.55m
	RCP 4.5	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℃	+0.32~0.63m
	RCP 6.0	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℃	+0.33~0.63m
	RCP 8.5	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℃	+0.45~0.82m

※出典：JCCCA, IPCC 第5次評価報告書特設ページ, 2014, <http://www.jccca.org/ipcc/ar5/rcp.html>, 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省, IPCC 第5次評価報告書 第1次作業部会報告書(自然科学的根拠)の公表について, 2015. 3, <http://www.env.go.jp/press/files/jp/23096.pdf> より作成.

Concentration Pathways) シナリオとしている。RCP シナリオは、将来の温室効果ガスの安定化に至る代表的濃度経路シナリオであり、表1-1に示すように、低位安定化シナリオ RCP 2.6, 中位安定化シナリオ RCP 4.5, 高位安定化シナリオ RCP 6.0, 高位参照シナリオ RCP 8.5 の4つがある。RCP 2.6 は将来の気温上昇を2℃以下に抑えるという目標のもとでの温室効果ガス排出量の最も低いシナリオであり、RCP 8.5 は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である。本書では気候変動を想定した洪水のリスク対策を考えていくために、洪水で生じ得る最大のリスクを把握する必要性から、IPCC AR5 の最悪想定シナリオである RCP 8.5 シナリオに基づいて検討を行った。

1.2 気候変動予測実験データの選定

●●● d4PDF 予測実験結果の降雨の活用

これまで日本を含む領域で気候変動を想定した気象予測実験(以下、予測実験)が表1-2のように行われている。北海道での気候変動を想定した降雨予測を行う際、これらの予測実験結果を活用して進めることとした。これらのうち、最新の IPCC AR5 の RCP 8.5 シナリオに基づいている点、大規模アンサンブル実験であるため発生頻度の低い極端気象についての統計的な議論が可能となる点に注目し、d4PDF (database for Policy Decision making for Future climate change, 地球温暖

表1-2 主な予測実験の概要

名称	気候変動シナリオ	ダウンスケージング手法	全球モデル	領域モデル	解像度	メンバ数など	実施機関
『地球温暖化予測情報第7巻』(2008)	SRES A1B/B1	力学的	CGCM	RCM20	20km	20年×2シナリオ ⇒40年分	気象庁
第7巻における予測データに基づき、北海道開発局では石狩川流域における気候変動に適応した治水利水対策検討(2010)を実施。							
『地球温暖化予測情報第8巻』(2013)	SRES A1B	力学的	AGCM	NHRCM	5km	20年 ⇒20年分	気象庁
北海道を対象とした力学的ダウンスケージング計算(2013)	全球平均地上気温2K上昇	力学的	MIROC MPI NCAR	JMA RSM WRF	10km	全球モデル3メンバ×領域モデル3メンバ×10年 ⇒90年分	気候変動適応研究推進プログラム(RECCA)
全球気候変動予測データ／地域気候変動予測データ(2014)	RCP 2.6/4.5/6.0/8.5	力学的	AGCM	NHRCM	20km	SST(海面水温)3メンバ×積雲対流スキーム3メンバ×20年×4シナリオ ⇒320年分	環境省 ※一部シナリオは積雲対流スキーム1メンバのみ、また未解析パターンあり
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(d4PDF)(2015)	RCP8.5	力学的	AGCM	NHRCM	20km	SST(海面水温)6メンバ×振動15メンバ×60年 ⇒5,400年分 大規模アンサンブル実験	文科省・気候変動リスク情報創生プログラムおよび海洋研究開発機構・地球シミュレータ特別推進課題
『地球温暖化予測情報第9巻』(2017)	RCP8.5 AR5	力学的	AGCM	NHRCM	5km	SST(海面水温)4メンバ×20年 ⇒80年分	気象庁

化対策に資するアンサンブル気候予測データベース²⁾をもとに降雨の推定を行った。d4PDFは将来実験と過去実験とで構成される。将来実験とは産業革命(1850年)以前に比べて全球平均気温が4℃上昇した世界を計算したもので、実験期間(2050年9月～2111年8月)を通して温暖化の程度は時間変化しない設定(2090年を想定)となっている。

1850～1900年の期間平均に対する2003～2012年(現在)の期間平均の上昇量は、0.78℃である。過去実験とは観測された海面水温SST(Sea Surface Temperature)と海水、温室効果ガス濃度変化、硫酸性エアロゾル濃度変化、オゾン濃度変化、火山性エアロゾル濃度変化を全球モデルに与えて1950年9月～2011年8月の60年を計算したものである。

第2章

予測降雨のダウンスケーリングとバイアス補正

2.1 ダウンスケーリング

●●● 力学的ダウンスケーリングと統計的ダウンスケーリング

気象シミュレーションの高解像度化を行うダウンスケーリングの手法は、力学的ダウンスケーリングと統計的ダウンスケーリングに大別される。力学的ダウンスケーリングは物理モデルをもとにした数値シミュレーションによるものであり、気象現象を空間的・時間的に逐次計算するため計算負荷が大きく、またモデルの系統誤差であるバイアスが含まれるが、物理過程を表したモデルに基づいた予測であり、将来の気候条件下で発生する現象の予測計算が可能である。統計的ダウンスケーリングは過去のデータから統計的に得られた関係性を用いる方法であり、計算負荷は小さいが、過去（現在）の観測データから導かれた関係性を将来気候に適用することとなり、気象場が変化した状況における予測に対しては信頼性が確保できない可能性がある。本書は将来の気象場で発生する降雨に基づく洪水リスク評価を目的としていることから、力学的ダウンスケーリングにより気象モデルの高解像度化を行った。

力学的ダウンスケーリングに適用できる領域気候モデルとしては、気象研究所非静力学地域気候モデル NHRCM (Nonhydrostatic Regional Climate Model) や、防災科学技術研究所の N-RAMS (modified RAMS)、アメリカ大気研究センター (NCAR)・アメリカ環境予測センター (NCEP) の WRF (Weather Research and Forecasting) などが知られている。この中で、本書では日本周辺領域を対象にモデルが調整され、高い再現性を有している NHRCM を用いることとした。

●●● ダウンスケーリングの水平解像度

気象現象の水平解像度は、図2-1に示すように、集中豪雨や前線は中規模スケール、台風などの現象は大規模スケールに含まれる。本書の契機となった平成28年8月北海道大雨豪雨災害のような北海道内の主要河川流域に大きな洪水流出をもたらす台風や集中豪雨などの解析を行う場合には、数十～数百 km(中～大規模)スケールの気象現象が対象となる。一般的に気象のシミュレーションでは解析対象とする気象現象の4～5倍細かい水平解像度が必要とされており、d4PDFの水平

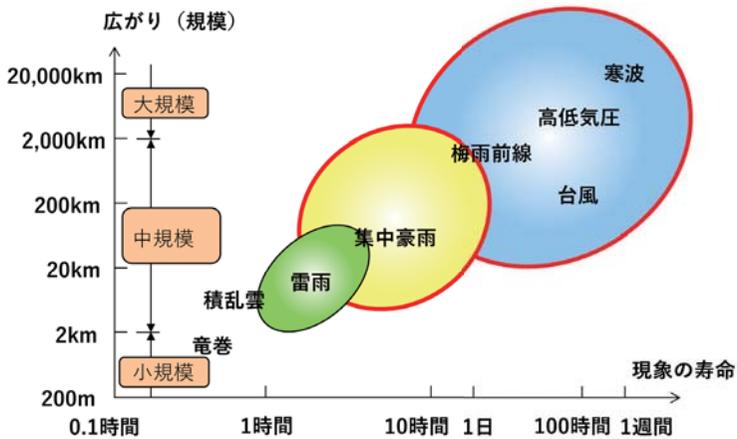


図2-1 気象現象の水平解像度および時間スケール

※出典：気象庁，数値予報モデルの種類，<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-4.html> を一部改変。

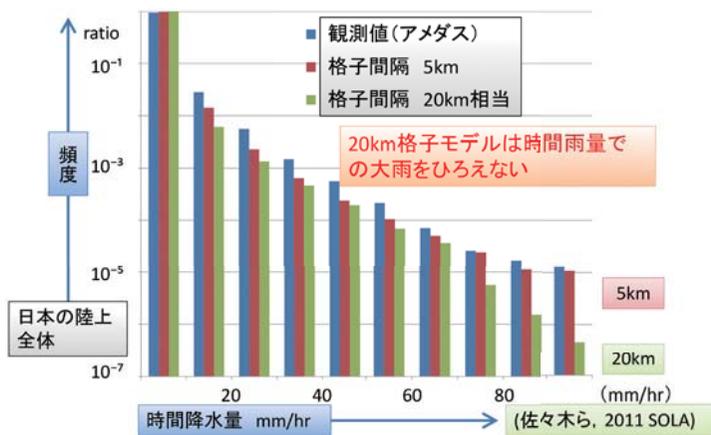


図2-2 対象とする気象現象および水平スケール

※出典：高藪，d4PDFの目的と概要，2015.12. https://www.jamstec.go.jp/sousei/jp/event/others/d4PDFsympo/pdf/1_Takayabu.pdf より作成。佐々木ら，Reproducibility of Present Climate in a Non-Hydrostatic Regional Climate Model Nested within an Atmosphere General Circulation Model, 2011, https://www.jstage.jst.go.jp/article/sola/7/0/7_0_173/_pdf.

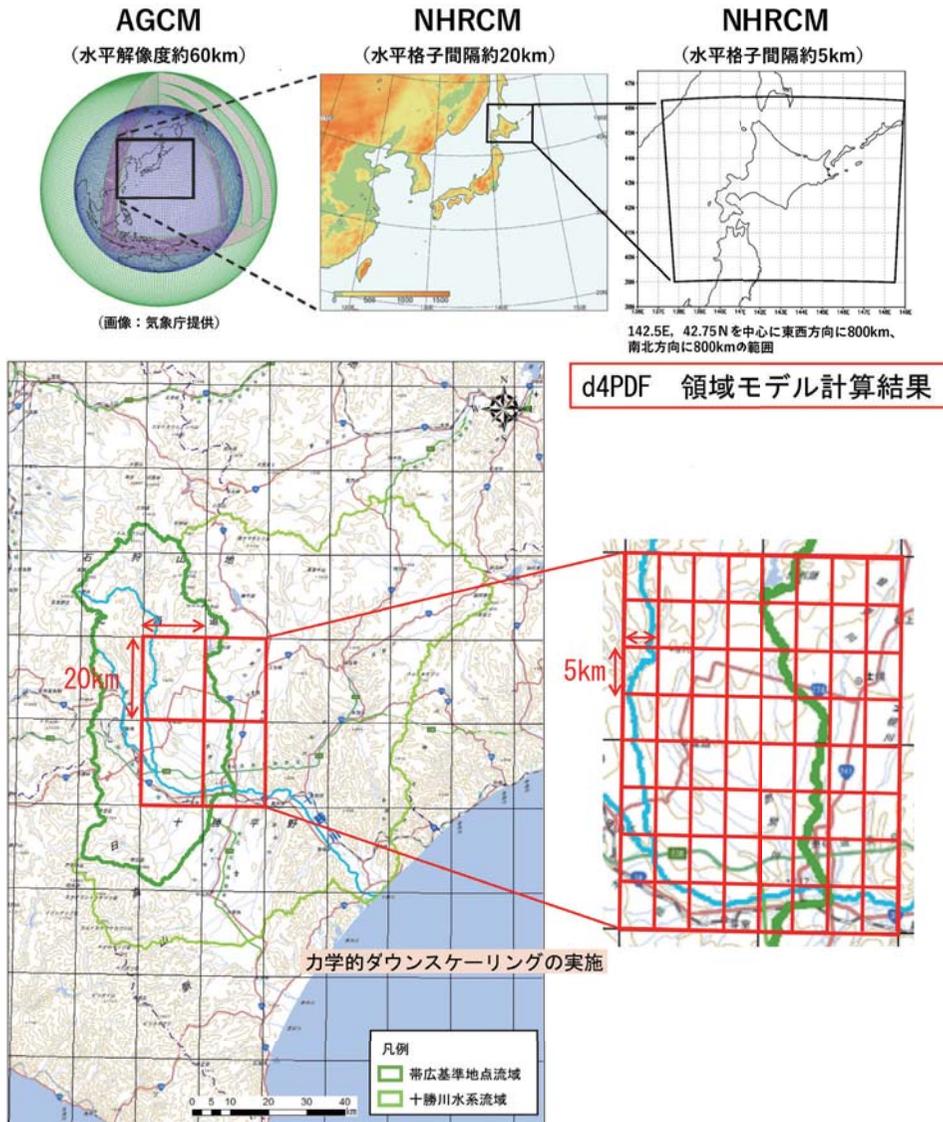
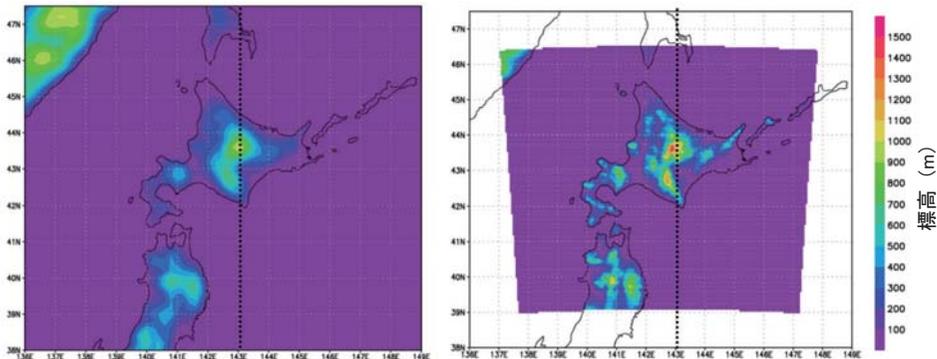


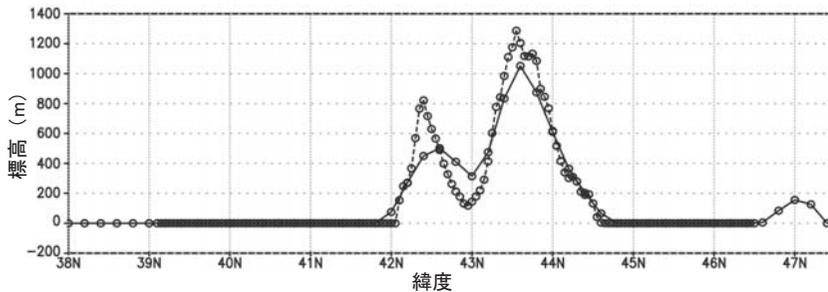
図2-3 ダウンスケーリングの概要

※出典：文部科学省ほか，d4PDF利用の手引き，2015.12，<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/design.html>より作成。

解像度20 kmでは集中豪雨や台風が十分に表現されない可能性がある。また，佐々木ら³⁾などの既往研究によれば，水平解像度20 kmの気象モデルでは時間雨量80 mmを超えるような大雨を十分に再現できず，アメダスによる極端降雨の観測実績の再現性を確保するためには水平解像度5 kmが必要であることが指摘されている(図2-2)。これらの観点から，本書ではd4PDFを水平解像度5 kmへのダウンスケーリングを行った(図2-3)。



(a) 左：20 km 解像度で表現される標高，右：5 km 解像度で表現される標高



(b) 経度 143 度での縦断標高図 (実線が 20 km 解像度，破線が 5 km 解像度を表す)

図2-4 水平解像度の違いによる地形表現の違い

●●● ダウンスケーリングにおける地形表現

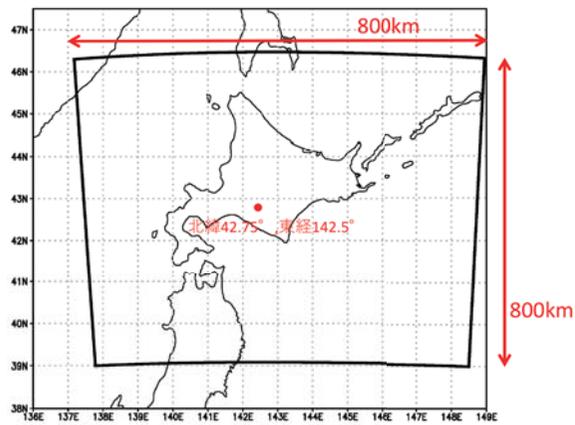
水平解像度 5 km のダウンスケーリングにおいては GTOPO30 の地形情報を用い、標高値を平均化した値を 5 km 解像度の各グリッドに与えた。水平解像度 20 km と 5 km それぞれで計算に用いられる標高値を図 2-4 に示す。同図より 20 km では表現されなかった地形起伏が 5 km ではより詳細に表現されていることがわかる。この地形表現の違いが後に述べる降雨分布の差に大きく影響したものと考えられる。

●●● ダウンスケーリングの計算範囲

本書で対象とした流域は、一級水系十勝川流域のうち帯広市街地を下流端とする帯広基準地点より上流域であり、流域面積は 2,678 km² である (図 2-5)。降雨継続時間は現行計画で既往降雨での一雨継続時間等を考慮し設定されている 72 時間として降雨を抽出した。ダウンスケーリングの計算範囲は、今後の北海道内の他河川でも気候変動によるリスク評価が可能なデータとなるよう、北海道全域をカバーする北緯 42.75° を中心とした南北方向 800 km、東経 142.5° を中心とした東西方向 800 km の範囲とした (図 2-6)。これは、北海道を対象としたの気象予測では南方から流入する水蒸気量が重要であることを考慮し、南側の海上を広く含めた範囲としたものである。



図2-5 十勝川流域図



142.5E, 42.75 Nを中心に東西方向に800km, 南北方向に800kmの範囲

図2-6 ダウンスケーリング計算範囲

●●● ダウンスケーリングの計算対象降雨

ダウンスケーリングの対象とする実験ケースは、d4PDFの将来実験5,400ケース、過去実験3,000ケースすべてとした。d4PDFの将来実験および過去実験データは通年データであり、平常時の降雨もすべて含まれる。d4PDFが有する将来実験5,400年分、過去実験3,000年分を対象としダウンスケーリング計算を実施するには計算量が膨大になる。そこで、本書では全期間を対象としたダウンスケーリング(以下、通年ダウンスケーリング)ではなく、降雨イベント期間を抽出したダウンスケーリング(以下、抽出ダウンスケーリング)(図2-7)により計算の効率化を図った。具体的には、降雨の確率評価に必要となる年最大となる降雨イベントをd4PDFの水平解像度20kmの気候モデルデータから抽出し、その降雨を含む一定期間(計算助走期間5日間+10日間)を対象にダウンスケーリングを実施した。

●●● ダウンスケーリングの実施にあたって

本書のダウンスケーリング計算は膨大な計算資源を必要とする。このため、平成29年度地球シミュレータ特別推進課題へ申請し、採択を受け、地球シミュレータを使用して計算を実施した。地球シミュレータの利用に際しては100を超える計算事例の並行した計算を数か月の期間実施することで過去・将来実験を合わせた8,400事例の計算を数か月のうちに実施することができた。

計算結果のデータ量は非常に膨大となり、15日間のダウンスケーリングおよび1年間を通したダウンスケーリング(付録を参照)などを合わせると1ペタバイトを上回る。これは結果の妥当性を検証するために、降雨量だけでなく、気候モデルで用いる複数の物理量(気温、気圧、風速など)の高さごとのデータを保存しているからである。これらのデータは転送に数か月の期間を要するうえ、データの損失を避けるための安全性の確保が必要となる。

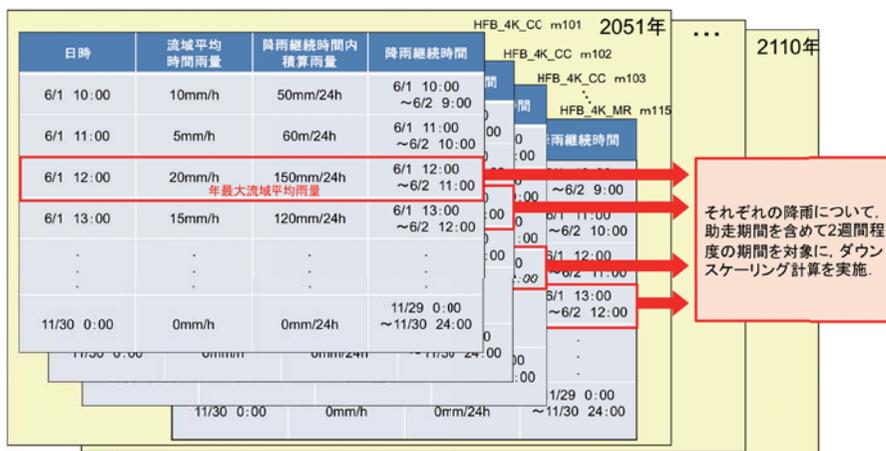


図2-7 抽出ダウンスケーリングの概要

●●● 年最大降雨のみ抽出する妥当性の確認

年最大降雨の発生期間を抽出したダウンスケーリングを実施するにあたり、同一年に降雨量の大きな降雨イベントが複数含まれる場合、最大雨量となるイベント以外は評価の対象とならないため、大雨の頻度が適切に評価されない可能性がある。そこで、d4PDFの水平解像度20 km メッシュデータから非毎年と毎年で抽出した最大降雨を比較し、毎年での最大降雨抽出の妥当性を検証した。ここで非毎年最大降雨とは、計算年によらない全期間の計算降雨データの大雨を降順に並べ、計算年分（過去実験3,000個、将来実験5,400個）抽出したものである。この結果を図2-8に示す。抽出された降雨のうち上位の雨量に大きな差は見られず、毎年と非毎年で抽出される降雨は概ね同一ものと考えられる。以上の検証により、毎年での最大雨量の抽出で問題ないことを確認した。

- ・十勝川（帯広基準地点）での72時間雨量を対象に実施
- ・非毎年降雨は以下の3通りの方法で抽出
 - ①全実験から上位5,400降雨
 - ②各SST（6メンバ）から上位900降雨
 - ③各SST（6メンバ）×各摂動（15パターン）から上位60降雨

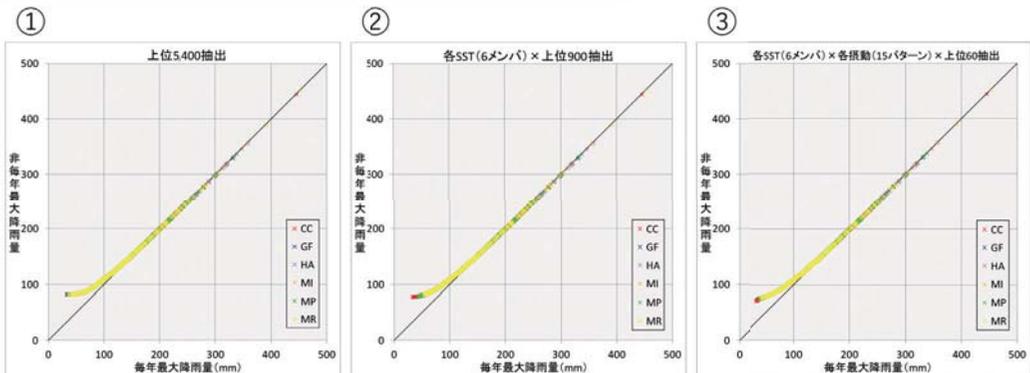


図2-8 毎年最大降雨量と非毎年最大降雨量の比較

●●● SSTごとの降雨の偏りの確認

d4PDFの将来実験は6種類の海面水温（SST）をもとに計算されたデータとなっている。そこで、抽出した年最大降雨に対して、SSTごとに偏りが生じていないかを確認した。各ケースの年最大流域平均72時間雨量を50 mmごとの階級に分け、それぞれの階級に含まれるケース数をSSTの種類ごとにカウントし、各階級の総ケース数に対する各SSTのケース数が占める割合を整理した（図2-9）。SSTメンバのうち、CC（アメリカ大気科学研究所のCCSM4）では250～400 mm程度の降雨の割合が比較的小さくなっており、MR（気象庁気象研究所のMRI-CGCM3）では450 mmを超えるような降雨が少数現れていることが特徴として確認された。しかし全体としては、抽出した降雨のうち各SSTの占める割合に大きな偏りは見られず、特定のSSTによる降雨が支配的となっていないことを確認した。

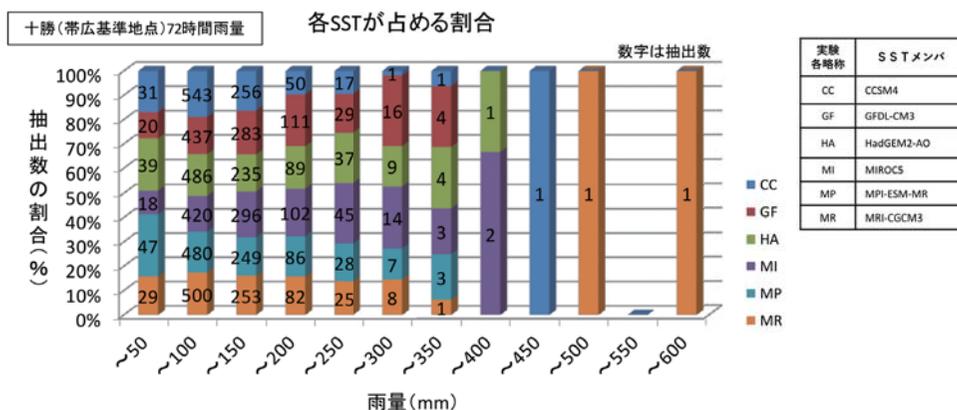


図2-9 各SSTが占める割合

2.2 ダウンスケーリング結果

●●● ダウンスケーリングによる降雨の空間分布の明瞭化

水平解像度20 km から5 km へのダウンスケーリングを、過去実験3,000 ケースおよび将来実験5,400 ケースに対して行った。各ケースの流域平均72 時間雨量を頻度分布として整理し、観測実績やダウンスケーリング前と比較したものが図2-10 である。ダウンスケーリングによって、過去実験・将来実験ともに流域平均72 時間雨量の中央値は大きくなり、規模の大きな降雨の頻度が増加する傾向となった。ダウンスケーリングによる降雨の空間分布の変化の一例として、将来実験

2 0 5 6 年
(MI m103) を取り上げる。図2-11 は、計算対象とした十勝川帯広基準地点流域において流域平均72 時間雨量が最大となる期間の積算雨量分布図である。ダウンスケーリング後の降雨の空間分布は、ダウンスケーリング前と比べて強雨となっている地域が明瞭になり、日高山脈の影響を強く受けた降雨が発生していることが確認できる。

図2-12 は、20 km 水平解像度での十勝川帯広基準地点流域の流域平均72 時間降雨量が200 mm を上回る事例で、5 km 水平解像度への変換後の平均的な変化を示したものである。同図より、5 km へのダウンスケーリングにより降雨の空間分布がより明瞭となり、日高山脈周辺の降雨が強化されていることがわかる。

●●● 20 km メッシュと5 km メッシュの比較

ダウンスケーリング前(20 km メッシュ)の流域平均72 時間雨量とダウンスケーリング後(5 km

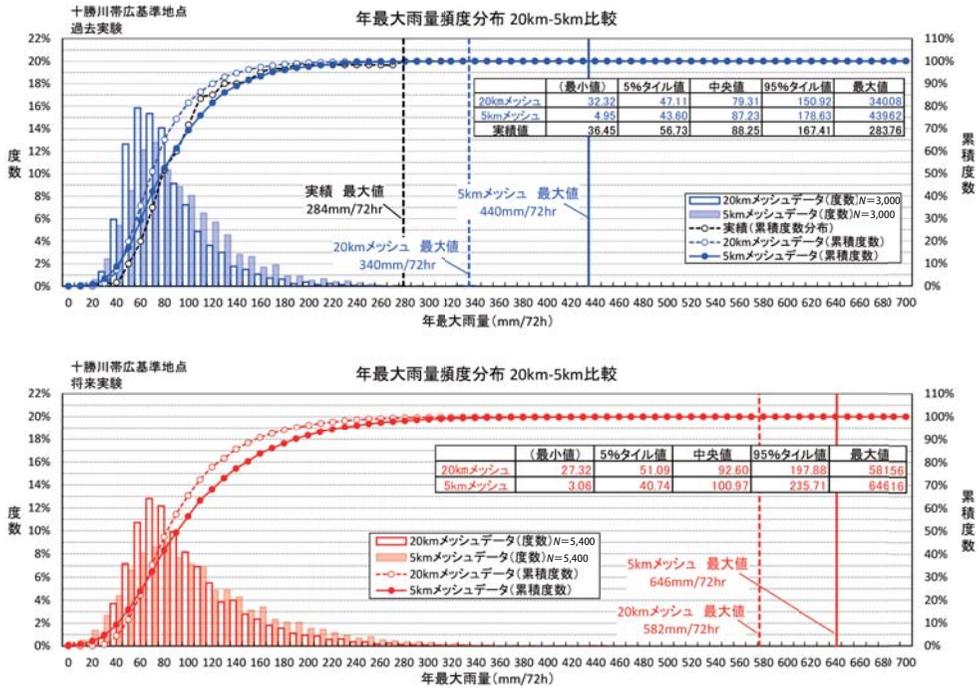


図2-10 20km データと5km データのダウンスケーリング結果比較 (上段：過去実験, 下段：将来実験)

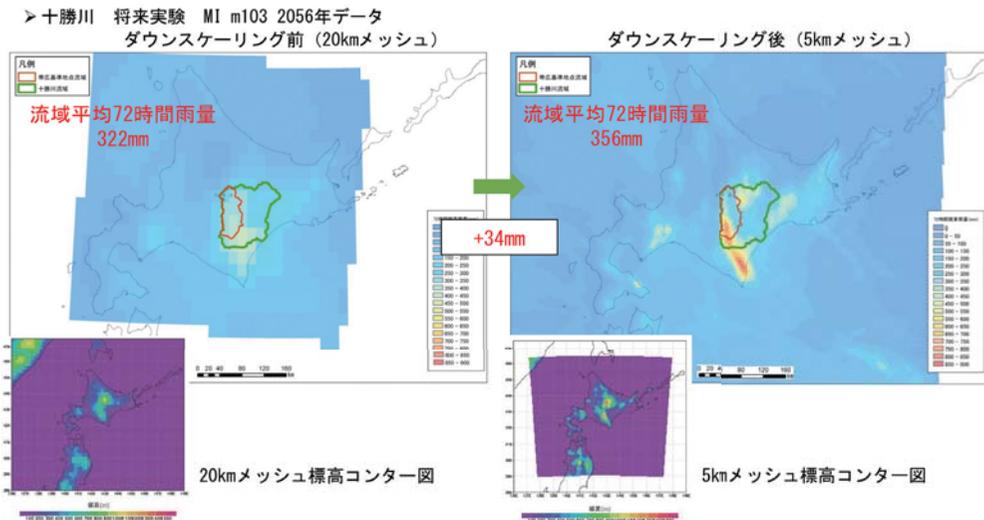


図2-11 ダウンスケーリング前後での雨量分布の変化

メッシュ) の各ケースの流域平均72時間雨量の変化量を整理したのが図2-13である。十勝川帯広基準地点ではダウンスケーリング後に72時間雨量が増加したケースが多く、変化量の平均値は過去実験で+10.5mm, 将来実験で+10.6mmであった。過去実験・将来実験ともに流域平均72時間雨量が10mm程度増加した。これらは、水平解像度の向上により地形の再現性が高まり、地形性

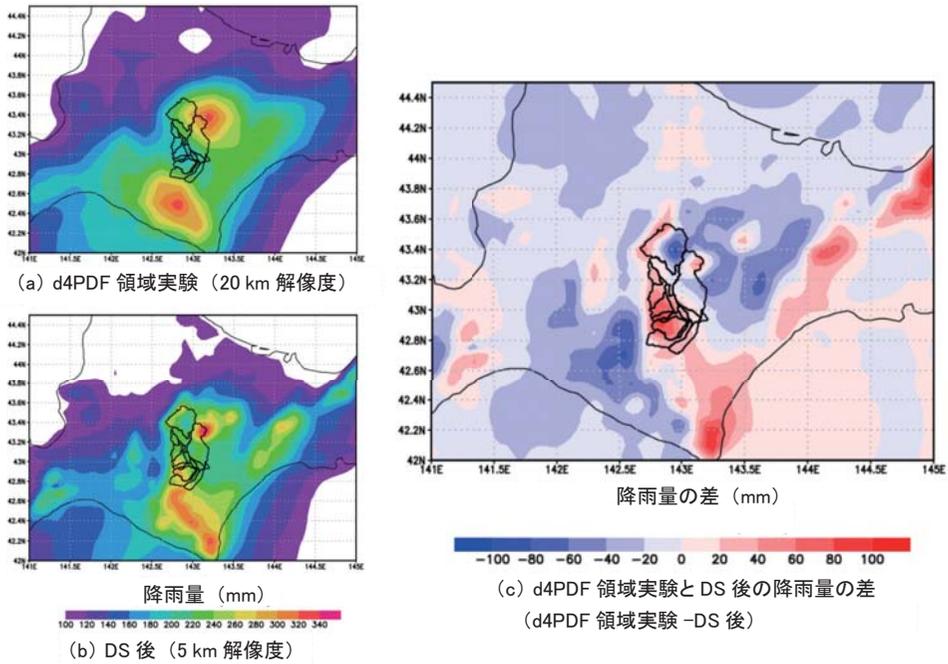


図2-12 水平解像度の違いによる降雨の空間分布の変化

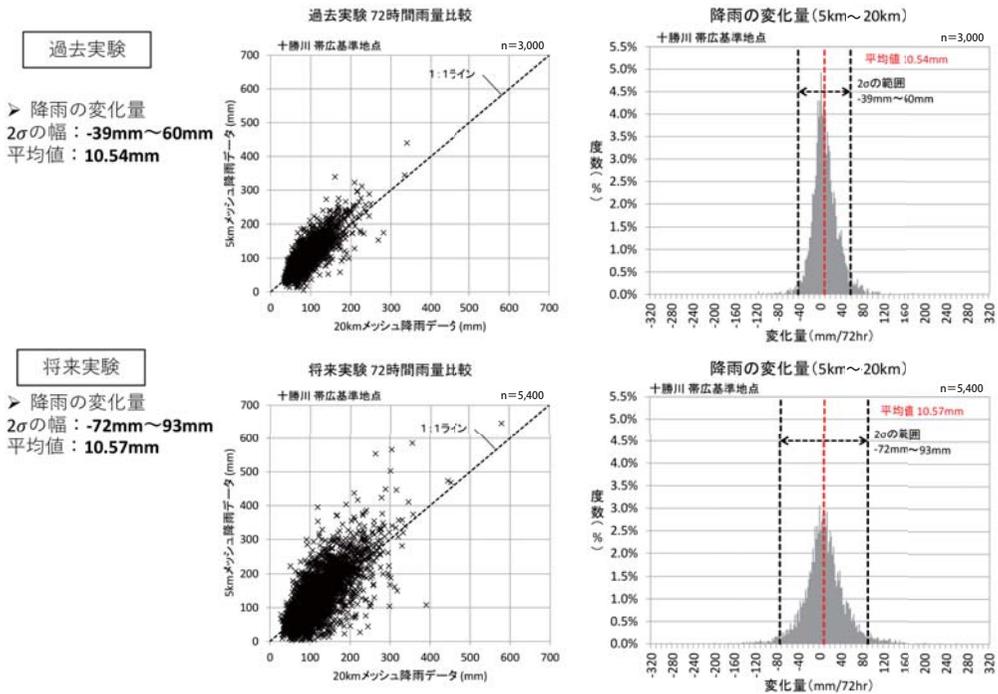


図2-13 ダウンスケーリング前後での流域平均72時間雨量の比較

降雨をより正確に把握できるようになった影響などが考えられる。

過去実験ダウンスケーリング前後データと観測実績の比較

ダウンスケーリングによる観測実績降雨の再現性の変化を検証するため、ダウンスケーリング前後の過去実験と観測実績を比較した。図2-10 上図より、頻度分布の中央値は実績降雨88 mm/72 hr に対して、過去実験のダウンスケーリング前で79 mm/72 hr、ダウンスケーリング後で87 mm/72 hr となり、ダウンスケーリングを実施することで実績降雨の再現性が向上することが確認された。

図2-14 には、十勝川帯広基準地点流域における1時間降雨強度のダウンスケーリング前後、およびレーダーアメダス解析雨量(2006～2016年)の頻度分布を示す。同図より、5 km へのダウンスケーリングにより強い雨の頻度が高まり、解析雨量に近づくことが確認できる。また解析雨量では、50 mm/hr を上回る降雨は同流域の年最大72時間降雨イベントでは発生せず、5 km へのダウンス

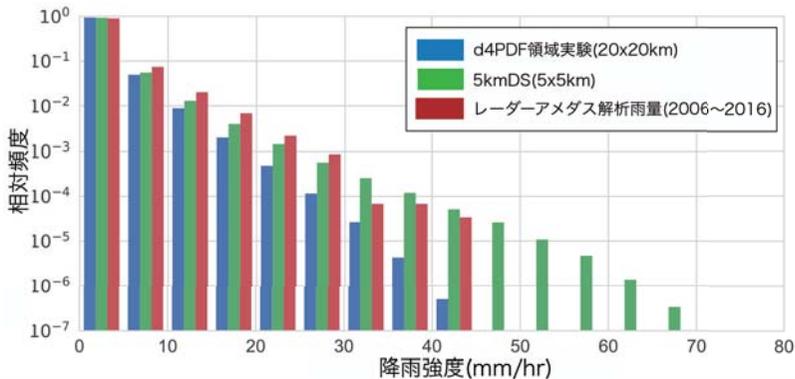


図2-14 1時間降雨強度の頻度分布(十勝川帯広基準地点流域での年最大72時間を対象に緯度経度0.05°に変換後の降雨データから流域内の全地点を集計)

ケーリング結果ではサンプル数が多いことからそれらの降雨が出現しているものと考えられる。

地域気候モデルの違いによる影響の把握

本検討にあたってはNHRCMを用い膨大なダウンスケーリングを実施したが、降雨量がどの程度地域気候モデルに依存するのかを把握するため、その他の地域気候モデル(気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)、WRF)との比較を数事例の降雨イベントで実施した(図2-15)。それぞれのモデルで設定した計算条件を表2-1に示す。この結果、いずれのモデルにおいても概ねNHRCMと同程度の降雨量を示すことがわかり、降雨量は使用するモデルに大きく依存しないことがわかった。

ダウンスケーリング後の過去実験と将来実験の降雨の時空間的な特徴

ダウンスケーリングの前後および実績値、過去実験、将来実験において、降雨の時空間的な特徴の違いを調べた。図2-16に1時間降雨強度を示す。同図より、将来気候においては1時間降雨強度の高い雨の頻度が高まることがわかり、過去実験における50 mm/hrの頻度は将来実験において

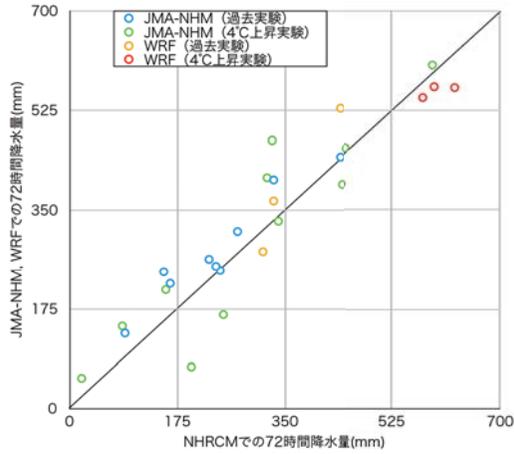


図2-15 地域気候モデル間での降雨量の比較（十勝川帯広基準地点流域）

表2-1 各地域気候モデルで設定した計算条件

	NHRCM	JMA-NHM	WRF
対流パラメライゼーション	Kain-Frichスキーム	Kain-Frichスキーム	Kain-Frichスキーム
雲物理過程	氷相を含むバルクモデル	氷相を含むバルクモデル	WRF Single-Moment 6-class scheme
乱流クロージャモデル	Improved Mellor-Yamada Level 3	Improved Mellor-Yamada Level 3	YSUスキーム
陸面モデル	MRI/JMA-SiB	平板モデル	Noahスキーム

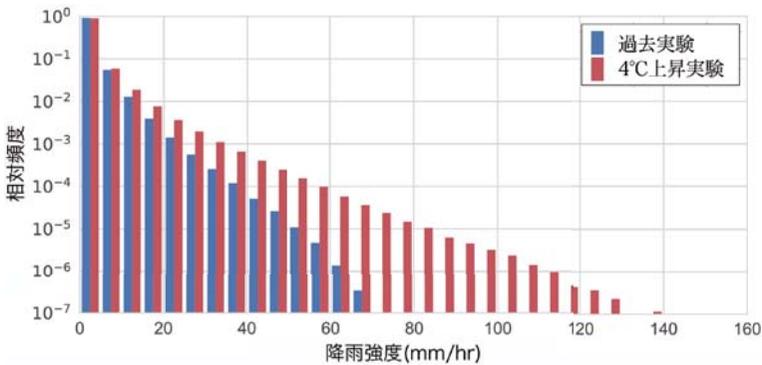


図2-16 1時間降雨強度の頻度分布（十勝川帯広基準地点流域）

は80 mm/hr と同程度になることが示された。

図2-17に降雨の時間的な特徴を示した。同図は流域平均のハイトグラフから変動係数を各降雨イベントで算出し、その頻度分布を示したものであり、値が小さいほど同程度の降雨強度が持続し、値が大きいほど短い時間に集中した大雨となることを意味する。同図より、実績降雨の時間的な特徴が20km, 5km 解像度で表現されていることがわかる。また、将来気候においてはより降雨が時間的に集中することがわかる。

図2-18に降雨の空間的な特徴の違いを示す。同図は流域内の各グリッドで72時間積算雨量を算出し、その変動係数を算出したものであり、値が小さいほどどの場所でも同程度の降雨がもたらされたこと、値が大きいほど降雨の偏在性が高いことを意味する。この図より、5 km 解像度は実績降雨の特徴をより表現していることがわかり、20 km 解像度では降雨の空間的な特徴が捉えきれないことがわかる。また、将来気候においては空間的な偏在性が高まり、より空間的に集中した降雨がもたらされることがわかる。

これらの時間的、空間的特徴を合わせて表現する手法、およびその結果に関しては、付録を参照されたい。

●●● ダウンスケーリング後の過去実験と将来実験の比較

将来気候における降雨の変化を検証するため、ダウンスケーリング後のデータで過去実験と将来

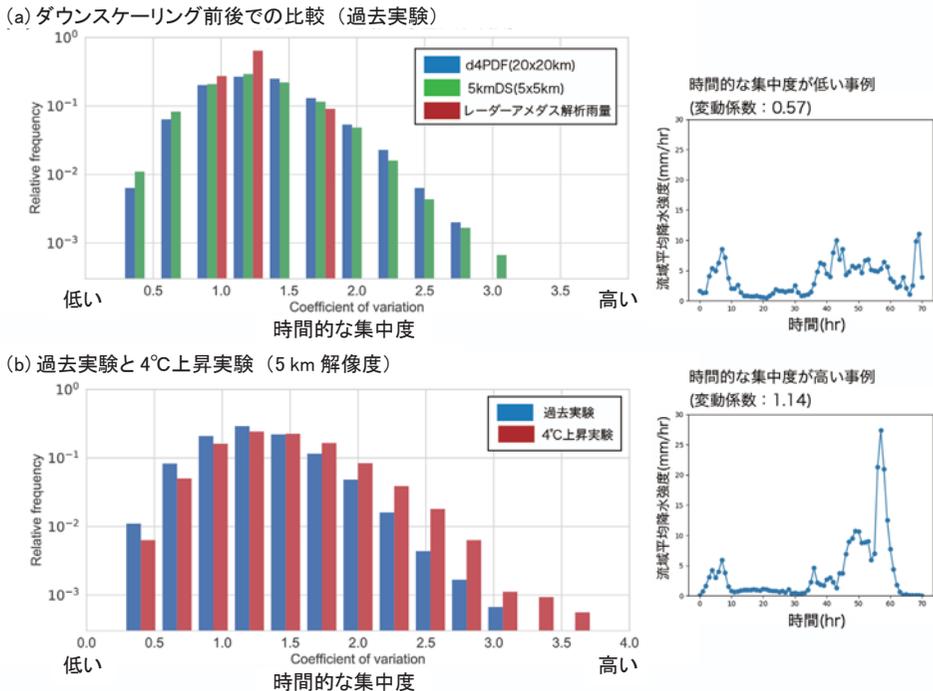
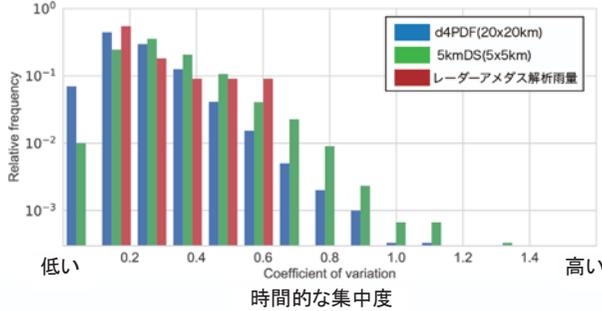


図2-17 降雨の時間的な特徴 (十勝川帯広基準地点流域)

(a) ダウンスケーリング前後での比較 (過去実験)



(b) 過去実験と4°C上昇実験 (5 km 解像度)

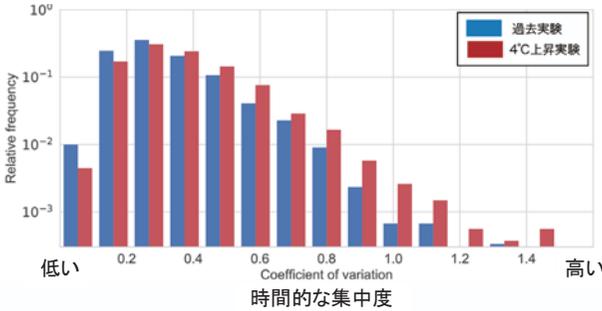


図2-18 降雨の空間的な特徴 (十勝川帯広基準地点流域)

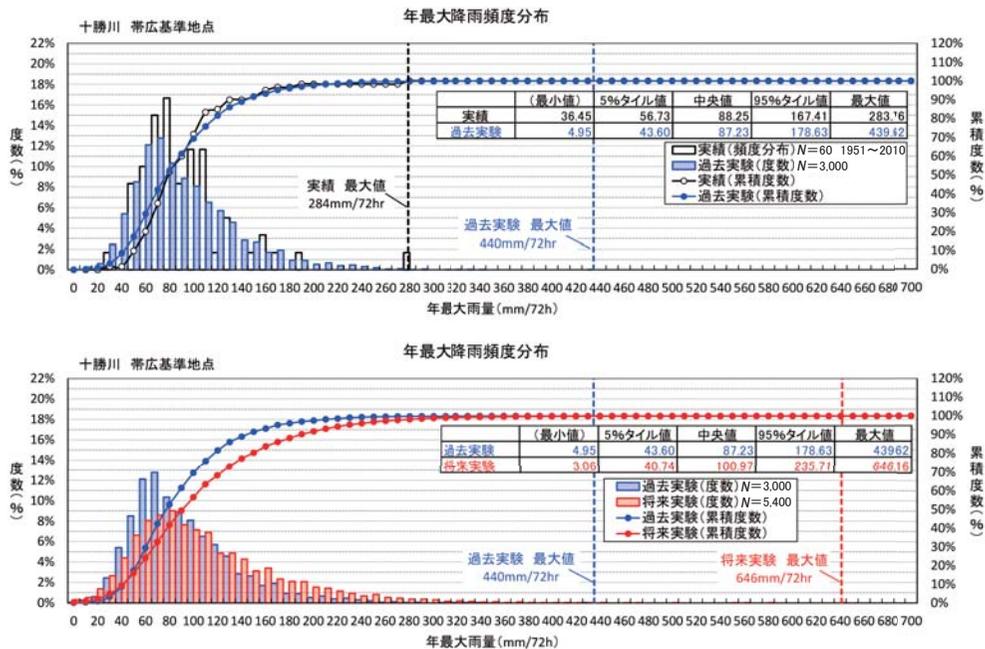


図2-19 実績値および5 km データ間のダウンスケーリング結果比較 (上段: 観測実績と過去実験, 下段: 過去実験と将来実験)

実験を比較した。各ケースの流域平均72時間雨量を頻度分布として整理したものが図2-19である。過去実験の中央値87 mm/72 hr に対して将来実験の中央値は101 mm/72 hr となり、気候変動後には降雨量が約1.2倍増加傾向になることが示された。

以上のように、20 km から5 km への力学的ダウンスケーリングによって降雨量の精度向上が図れること、降雨の空間分布が明瞭になることを確認した。

2.3 バイアス補正

●●● バイアス補正の必要性

バイアス補正は、数値計算モデルがもつ系統誤差（バイアス）を減らすため、実験や観測結果などによる関係式を用いて計算結果を補正するものである。d4PDFの20 km 領域モデルの過去実験のうち30年間（1979年9月～2009年8月）のデータを気象庁アメダス観測雨量データと比較すると、図2-20に示すように十勝川流域が位置するNP地域では、夏季出水期の降水量が少なくなる傾向が示された。d4PDFは単一の気候モデル（AGCM, NHRCM）を用いており、モデルの系統誤差を含んでいる可能性があることから、ダウンスケーリング後の降雨量に対してバイアス補正を行うこととした。

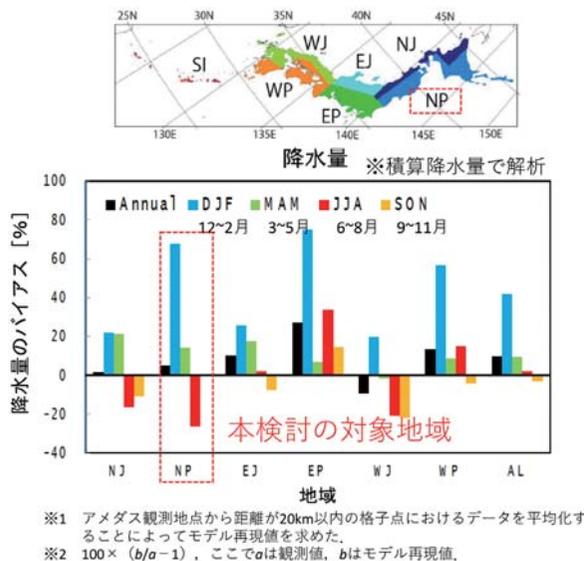


図2-20 地域ごとのバイアス

※出典：文部科学省ほか、d4PDF利用の手引き、2015.12、<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/design.html>。

●●● バイアス補正手法の選定

バイアス補正に関しては様々な手法が提案されている。気象研究所技術報告第73号⁴⁾では、バイアス補正手法として、最小二乗法によって1次関数 ($y = ax + b$) の関係式を求めて補正するピアニの手法⁵⁾、累積密度関数によって補正するクオンタイルマッピング法が示されている(表2-2)。本書では、大量アンサンブル実験データを用いることで得られる年最大降雨の頻度分布が重要となるため、補正前後でのケースごとの降雨量の大小関係が維持される手法としてピアニの手法を参考とし、回帰式を作成しバイアス補正を実施した(図2-21)。

表2-2 バイアス補正手法の比較

	ピアニの手法	クオンタイルマッピング
手法の概要	モデルによる計算値、観測値それぞれをソートし、小さい値から大きい値の順に並べる。ソートされた計算値、観測値をそれぞれ x 、 y の値と見なして xy 平面にプロットする。そして、 x と y についての線形関係を最小二乗法によって求める。この関係式を用いれば計算値 (x) が観測値 (y) に近似的に補正される。	モデルによる計算値、観測値それぞれについて累積密度関数を求め、等しい%タイル値を示すデータに対応させる。クオンタイルマッピングでは観測値の累積密度関数に数値を合わせるため、将来気候実験データに適用すると不具合が生じる場合がある。
概念図		
利点	補正前の計算値の大小関係が補正後も維持される。	モデルによる計算値が対応する%タイル値の観測値に置き換えられることによって、誤差が完全に解消される。
欠点	最小二乗法による近似を用いているため、誤差が完全に解消されるわけではない。	将来気候におけるモデル計算値と観測値との関係を現在気候のもので代用すると、補正前の計算値の大小関係が補正後に逆転してしまう現象が稀に見られる。

参考資料：『気象研究所技術報告第73号2015第4章将来気候予測』。

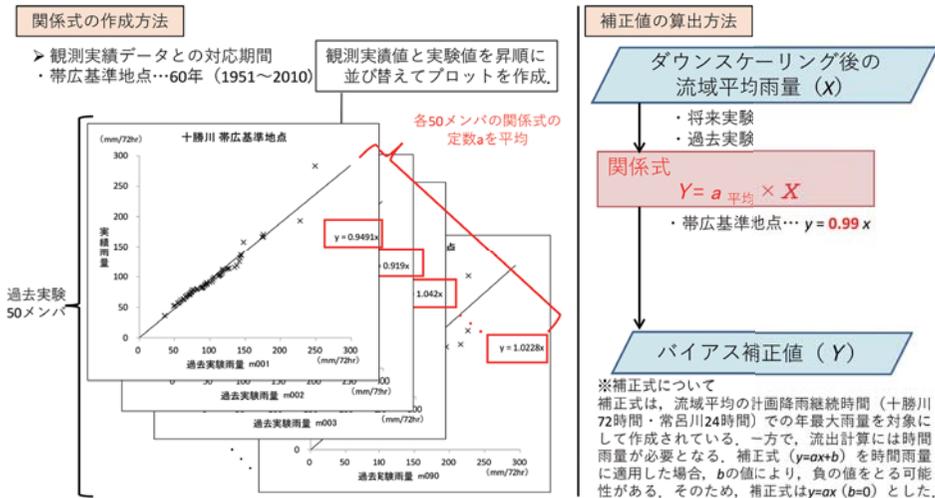


図2-21 ピアニの手法を参考としたバイアス補正の概要

●●● バイアス補正式

バイアス補正を行うための関係式作成の対象データは、過去実験3,000年分の年最大雨量と観測実績データの対応期間60年(1951～2010年)とした。観測実績データについては、観測所の時間雨量データからティーセン分割法によって流域平均時間雨量を算出し、降雨継続時間(72時間)内の年最大流域平均雨量を整理したものをを用いた。

過去実験50メンバ各々について関係式を作成し、50個の定数 a の平均値を算出してバイアス補正の関係式を作成した。なお、関係式の定数項 b については、降雨量が負の値となることがないように $b=0$ とした。補正係数が1.00に近いほど、モデルが有するバイアスが小さいことを示している。

●●● バイアス補正結果

補正係数の算出の結果、十勝川帯広基準地点では $a=0.99$ となった(図2-22)。この補正係数を用いバイアス補正を実施した結果、補正係数が1.00に近いため補正前後で大きな変化はないものの、流域平均72時間雨量の頻度分布の累積度数は補正後の過去実験がより観測実績に近づくことを確認した(図2-23)。

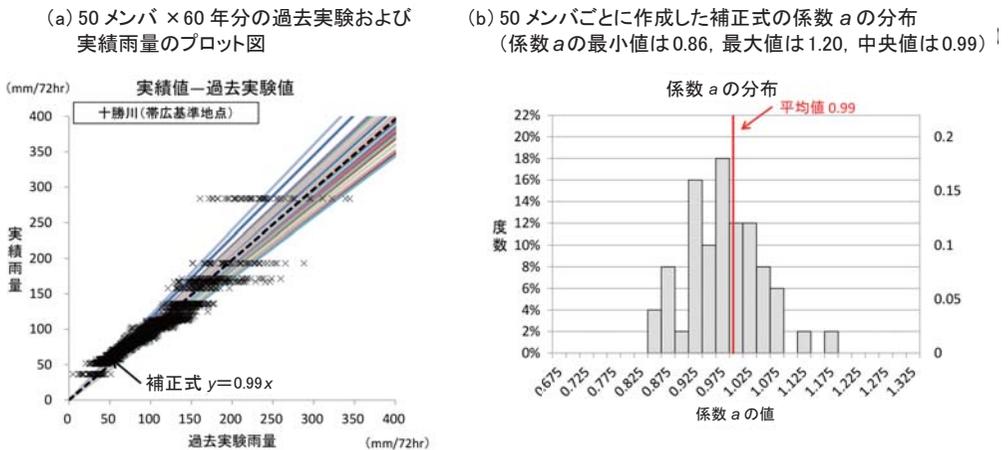
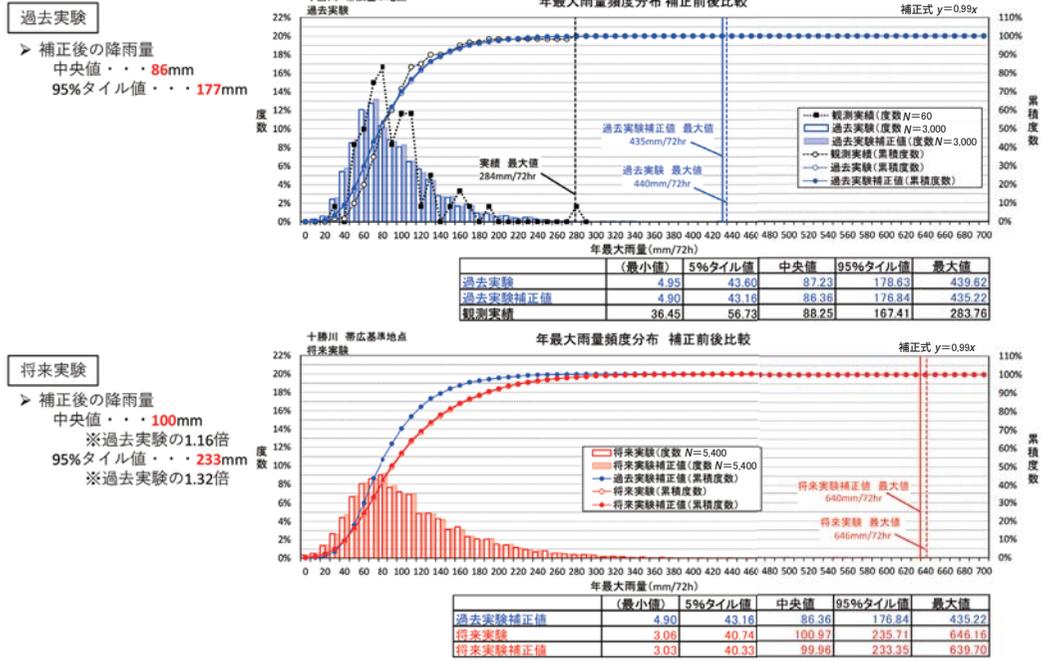


図2-22 バイアス補正係数の算出



第3章

大量アンサンブルデータによる 将来の確率降雨量の推定

3.1 確率評価手法

●●● 確率評価手法

これまでの治水計画における確率降雨量は過去の観測雨量の年最大値を用いて設定されてきたが、気候変動を考慮した治水リスクを評価するには将来の降雨予測データを使用する必要があるため、d4PDFをダウンスケーリングしたデータを使用した。d4PDFは、大量アンサンブル実験データであり、観測データからは数十年分しか得られなかった年最大降雨事例が大量アンサンブル実験データでは多数得られることから、確率評価を行うことで年超過確率降雨のとり得る幅が表現され、統計的に信頼性の高い結果を得ることが可能となる(図3-1)。

d4PDFの大規模アンサンブル実験データは、将来実験の場合2050年9月から2111年8月の60年を1単位として、6種類のSST昇温パターンに15種類の摂動を組み合わせた90メンバの降雨データがある。つまり60年の毎年連続データが90種類あり、年最大値を確率評価する場合には90通りの確率評価が可能となる。過去実験は1通りの観測SSTに50の摂動を組み合わせて計算した50通りである。

●●● 確率評価結果

確率評価に用いる分布関数は、一般極値分布であるGumbel分布(2母数)、GEV分布(3母数)の2通りとして、確率評価を行った。

十勝川帯広基準地点の過去実験(1951～2010年、50メンバ)に加え実績降雨(1951～2010年、1メンバ)の結果を併せて図3-2に示す。年超過確率1/150確率雨量で見ると、Gumbel分布では

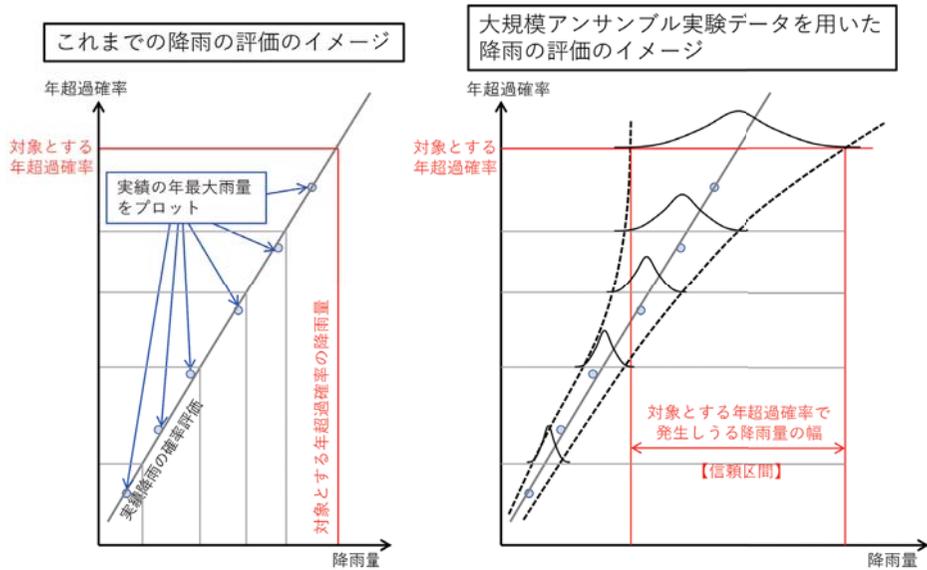


図3-1 降雨の評価イメージ

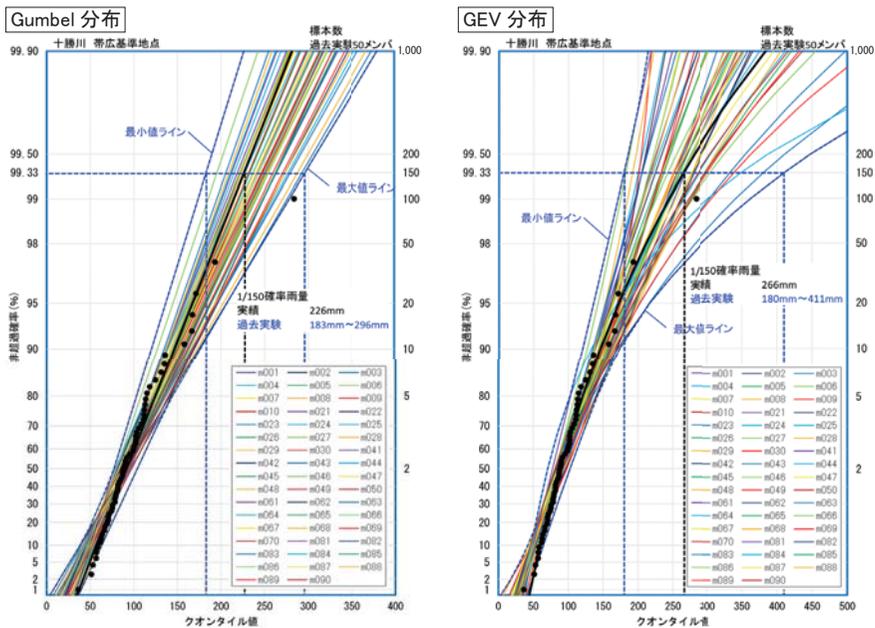


図3-2 過去実験降雨および実績降雨の確率評価結果（着色線：過去実験50メンバ，黒線・黒点：実績降雨1メンバ）

過去実験（50メンバ）が183～296mm，実績降雨（1メンバ）が226mmとなった。GEV分布では過去実験が180～411mm，実績降雨が266mmとなった。大量アンサンブルデータを用いることで、1つの年超過確率に対して確率雨量のとり得る幅を示すことが可能となった。また、実績降雨での確率雨量の評価値がこの幅の中に含まれていることが確認された。

3.2 データのリサンプリングと将来降雨量の推定

●●● リサンプリングを行う理由

大量アンサンブル実験データによる年超過確率1/150 確率雨量を分布図で表すと**図3-3**となる。大量のアンサンブル実験データを用いたにも関わらず、分布にばらつきが見られる。これは元のデータが大量にあっても、年最大値のメンバ数が50しかなく確率降雨量の分布を示すには標本数が十分ではないためである。後の検討において将来の気候における確率降雨量の起こり得る幅を用いるにあたり、特に95% タイル値など分布の端部の値を使用する場合もあることを考えれば、分布のばらつきを解消させることが望ましい。このためデータのリサンプリングを行った。

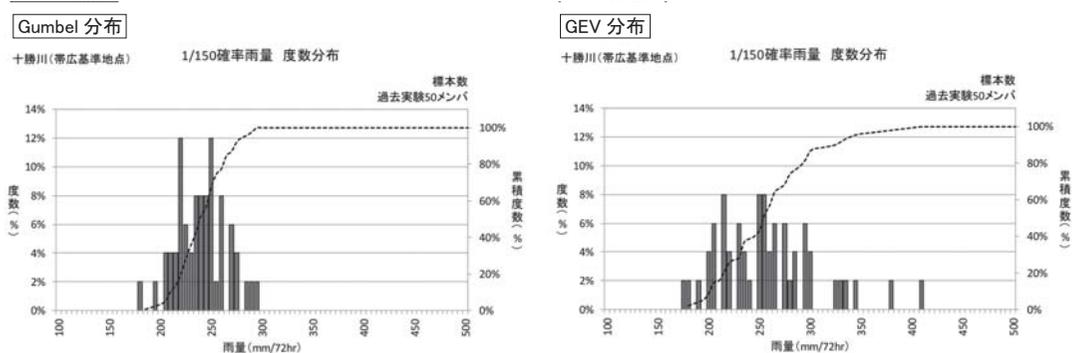


図3-3 リサンプリング前の雨量度数分布

●●● リサンプリングの方法

リサンプリングの方法は、過去実験(60年間×50メンバ)を例にすると、各年50通りの値から無作為に1個抽出して連続させ60年データにしたものを1つの標本(1メンバ)とした(図3-4)。リサンプリングの標本数は感度分析により決定した。リサンプリングの標本数を 1.0×10^2 、 1.0×10^3 、 1.0×10^4 、 1.0×10^5 、 1.0×10^6 とした確率評価を複数回試行し、1/150 確率雨量の95% 信頼区間を算出した。試行回数を10回とした場合の95% 信頼区間の試行ごとの変動を整理したのが**図3-5**である。このとき、標本数 1.0×10^5 以上で95% 信頼区間の変動が1.0mm以内となったことから、これをリサンプリングの標本数とした。

●●● リサンプリングの効果

リサンプリング結果を**図3-6**に示す。標本数は 1.0×10^5 個とし、将来実験は5,400 ケースから60 ケースを無作為抽出し1つの標本とした。リサンプリング前後を比較すると、GumbelとGEV いずれの分布形においても95% 信頼区間の幅は概ね一致している。標本数 1.0×10^5 個のリサンプリ

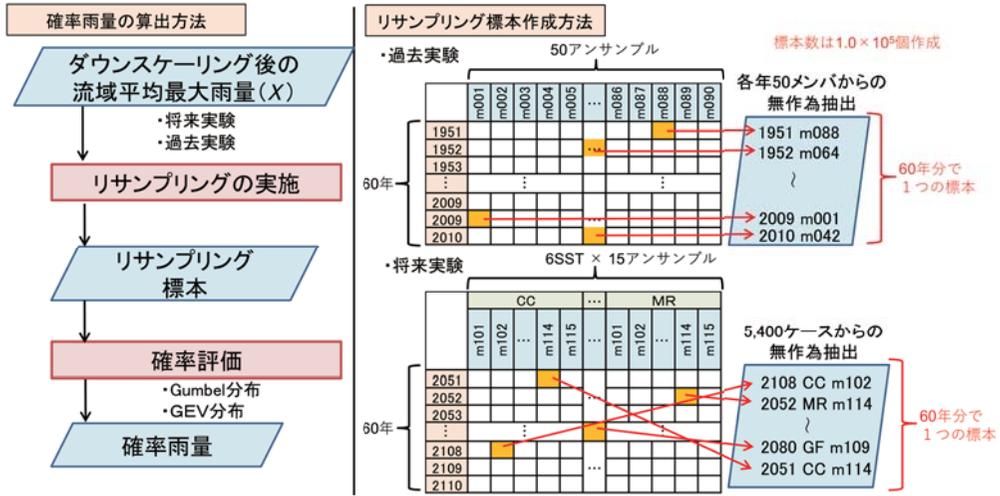


図3-4 リサンプリング方法

十勝川帯広地点 過去実験

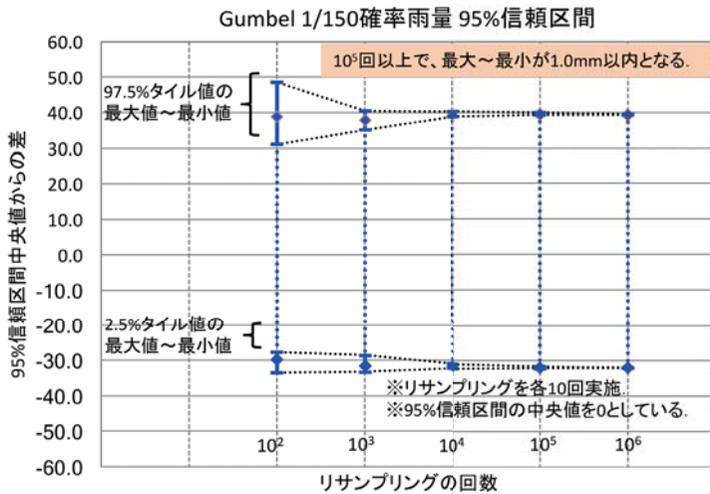


図3-5 リサンプリングの感度分析結果 (リサンプリング回数と95% 信頼区間中央値からの差)

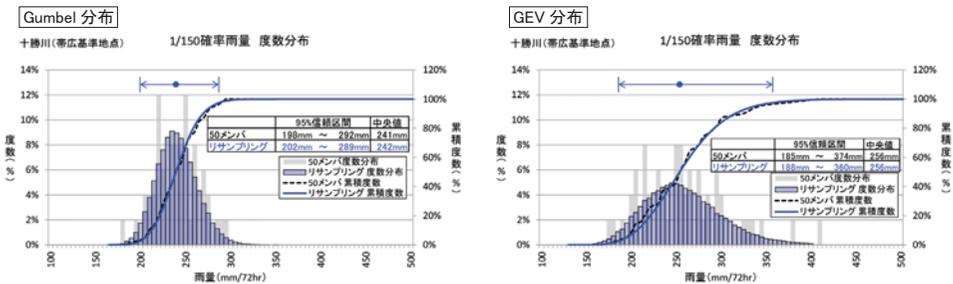


図3-6 リサンプリング結果

ングの実施によって、95% タイル値が収束し、分布の端部を評価できるようになった。

●●● 確率評価による将来降雨量の推定

リサンプリングした過去実験および将来実験データを用いた十勝川帯広基準地点での過去実験降雨および将来実験降雨の確率評価結果を図3-7に示す。GEV分布では、1/150確率雨量の過去実験の95%信頼区間は188～360mmとなった。一方、将来実験の95%信頼区間は252～517mmとなり、将来気候では降雨が大きくなる傾向が示された。度数分布で見ると、GEV分布では、将来

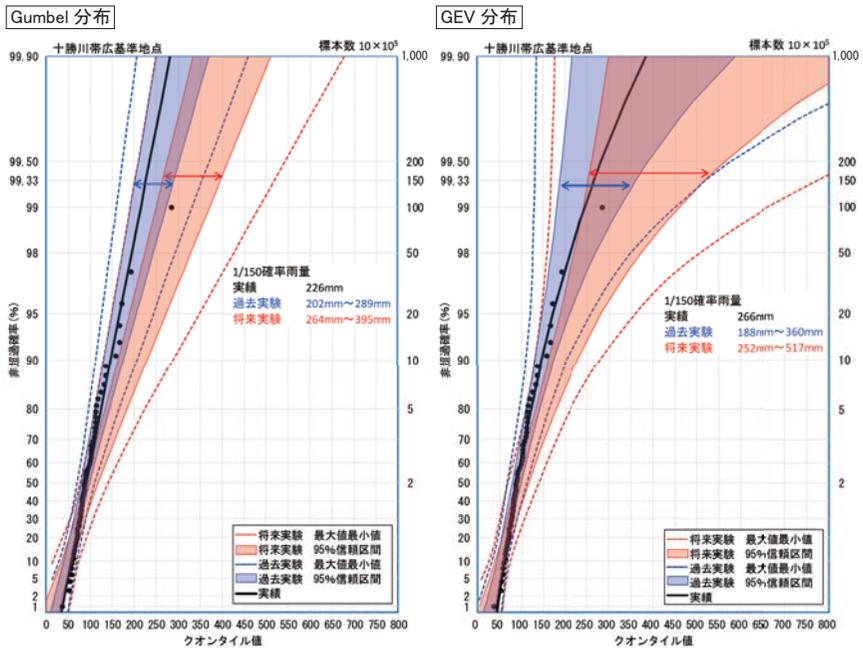


図3-7 過去実験降雨および将来実験降雨の確率評価①

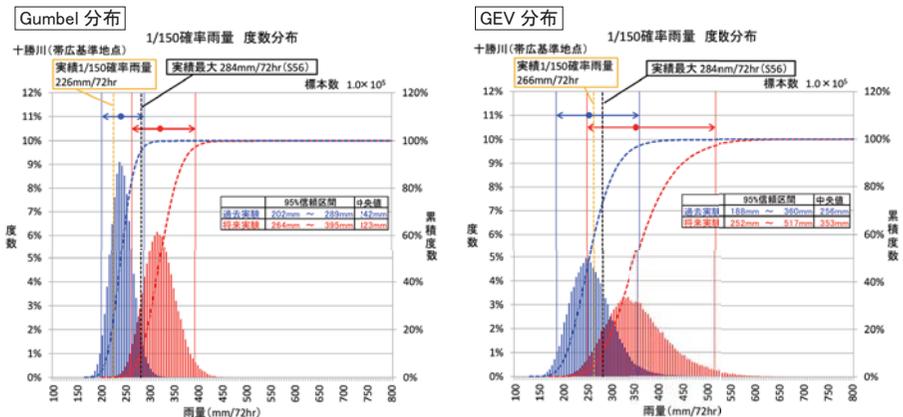


図3-8 過去実験降雨および将来実験降雨の確率評価②

実験の中央値 353 mm が過去実験の 95% 信頼区間内に含まれる。中央値では、年最大 72 時間雨量は、256 mm から 353 mm へと 1.38 倍増加する結果となった（図 3-8）。

1/150 確率雨量のとり得る幅として 95% 信頼区間を見ると、将来実験での降雨量が小さな部分と過去実験での降雨量が大きな部分が重なっており、現在気候でも将来の降雨量が生じる可能性があることが示された。

表 3-1 将来降雨量の推定結果

対象流域	降雨継続時間／確率規模	流域面積 (km ²)	過去実験 (mm)	将来実験 (mm)	変化
十勝川 帯広地点	72時間／1/150確率	2,678	256	353	1.38倍

第4章

予測降雨をもとにした河川洪水流量の算定

4.1 流出計算モデルの設定

●●● 流出計算モデルの選定

流出計算は、ダウンスケーリングにより得られた降雨の詳細な空間分布を活かすために分布型流出モデルによって行った。流出モデルは北海道の水文データをもとに星ら⁶⁾により構築され、道内河川の洪水予測に使用される分布型2段タンク貯留関数モデルを使用した。

●●● 流出計算モデルメッシュサイズの決定

流出計算モデルのメッシュサイズは、ダウンスケーリングした5 km メッシュデータの解像度を活かせることを基本とし、地形勾配や流域形状、河道網を勘案し、現在配信されているレーダー雨量のメッシュサイズと同様に1 km 分割とした(図4-1)。各メッシュの標高データは、国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル10 m メッシュ(標高)を用いて、1 km メッシュに該当する10 m メッシュ標高の平均値を設定した(図4-2)。分布型流出モデルの落水線は、各メッシュの地盤高をもとに設定したが、流域内すべてのメッシュの流出量が河川に流入するよう調整を加えている。河道追跡計算に用いる粗度係数は、山地流路の粗度係数0.030を採用した⁷⁾(図4-3)。等価粗度は、国土数値情報等の土地利用データをもとにした各メッシュの代表土地利用状況から、表面・中間流出の算出に必要な値を設定した(図4-4)。なお、等価粗度の設定は水理公式集(平成11年版)⁸⁾に基づいている。



※ d4PDFにおけるメッシュデータは緯度経度を基準に設定されている。5 kmメッシュは、緯度・経度方向ともに0.05度(=180秒)となっているため、実際には縦6 km×横4 kmの形に近いが、ここでは便宜上5 kmメッシュと表現している。一方で、流出モデルの1 kmメッシュは地域標準3次メッシュを使用している。地域標準メッシュは、できるだけ縦横の距離が等しくなるように設定されており、緯度方向45秒、経度方向30秒で設定されている。そのため、5 kmメッシュ(180秒×180秒)内には、1 kmメッシュ(45秒×30秒)は、縦6メッシュ、横4メッシュが含まれることになる

図4-1 各流域のメッシュ分割図(青線1 kmメッシュ)

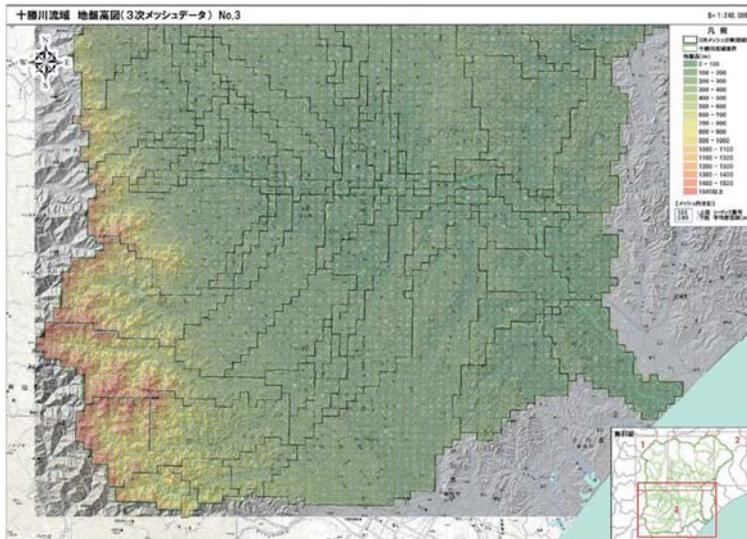


図4-2 地盤高図(十勝流域の一部を例に)

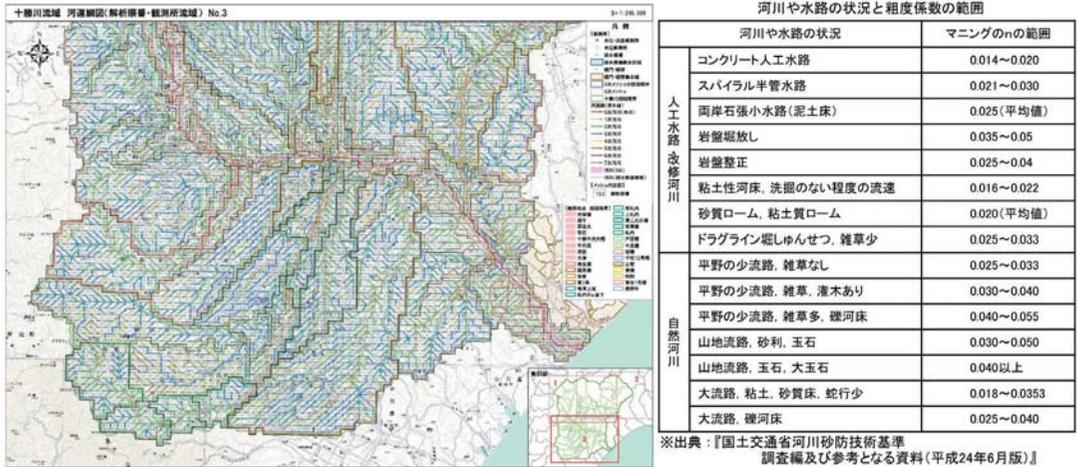


図4-3 河道追跡に用いる粗度係数の設定

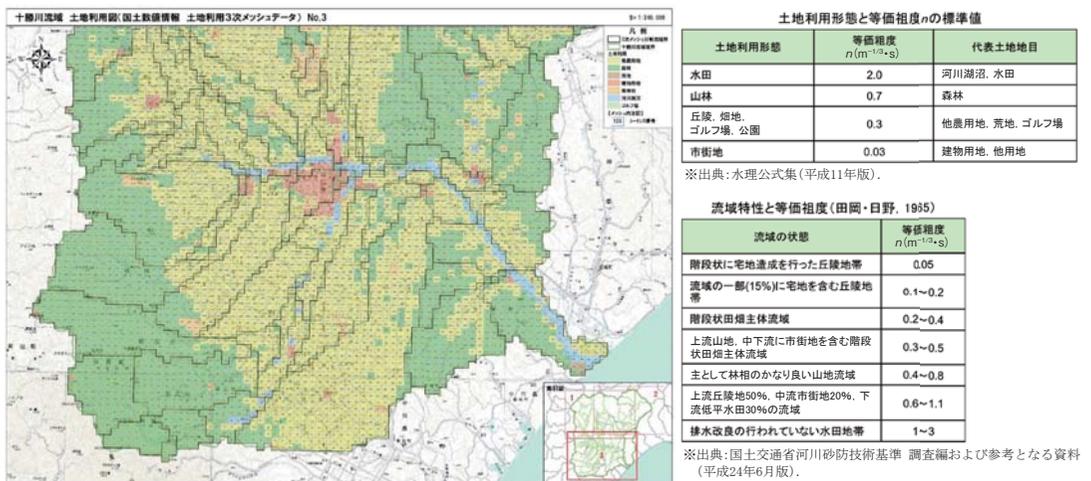


図4-4 等価粗度の設定

4.2 流出計算の実施

●●● 定数設定

流出計算モデルの定数設定にあたり、既往の大規模出水に最適化した定数では小規模な降雨を過大評価する傾向が確認された。そこで本書では、過去実験および将来実験の各ケースの降雨量に応じて流出モデルの定数 C_{11} および C_{12} を調整する方法を採用した。具体的には、降雨量の異なる既

往出水数例に対して再現計算を実施し、降雨量と定数の関係式を作成した(図4-5)。作成した関係式から、各ケースの流域平均72時間雨量に応じて定数を設定した。

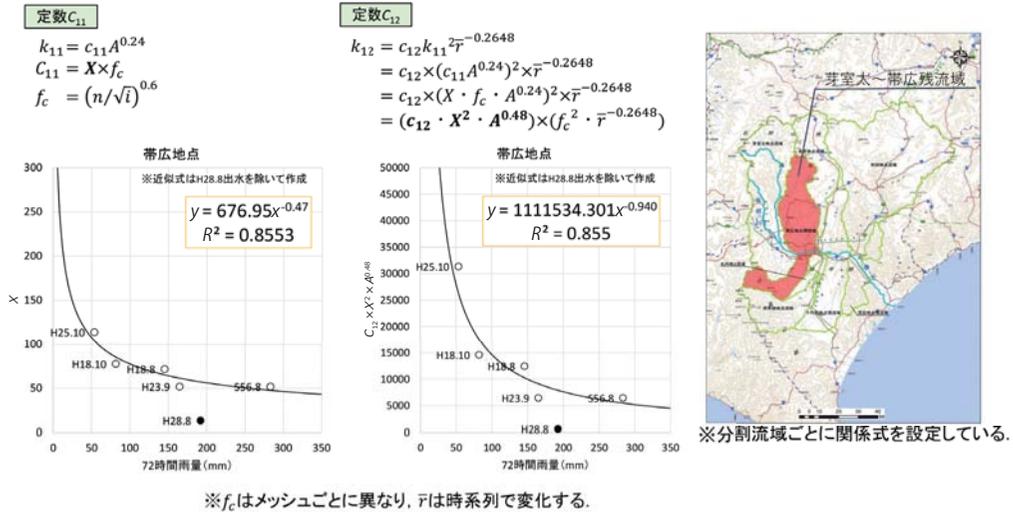


図4-5 モデル定数を設定するための関係式(芽室太～帯広地点残流域の例)

●●● 流出計算結果

流出計算より得られたピーク流量の頻度分布を作成した(図4-6)。流域平均72時間雨量とピーク流量の関係を整理し、年超過確率1/150雨量の95%信頼区間内に含まれる実験ケースのピーク流量の中央値で評価した(図4-7)。その結果、過去実験で2,900 m³/s、将来実験で4,900 m³/sとなり、約1.6倍に増加した。

これまで、大規模な降雨の観測データは限られており、治水計画において観測値を超える降雨量を扱う場合には、実績降雨波形を引き延ばす手法が用いられてきた。一方で、本書では大量アンサンブル実験データを用いることで、多数の降雨の時空間分布が得られ、引延しを行わなくとも大規模な降雨事例を複数得ることが可能となった。

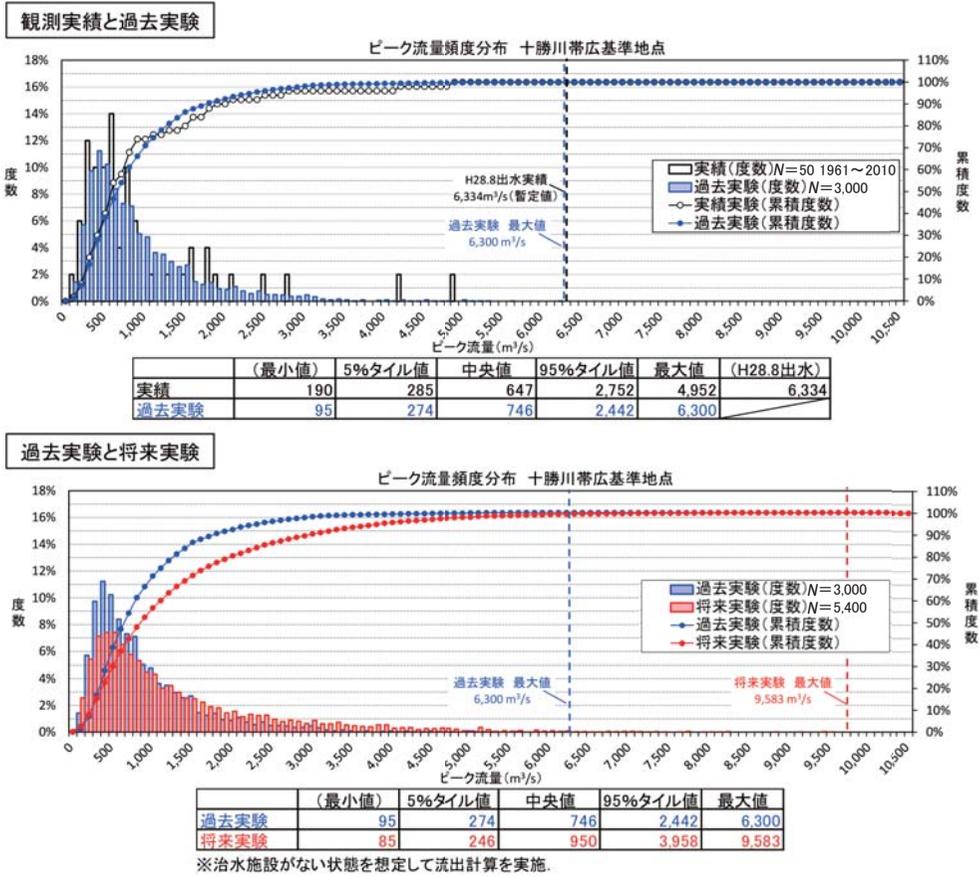


図4-6 ピーク流量の頻度分布

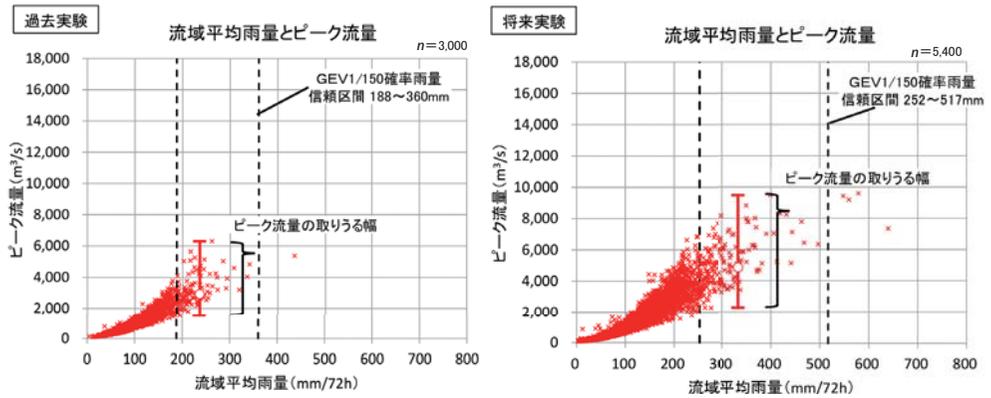


図4-7 気候変動による洪水流量の変化

表4-1 予測降雨をもとにした河川洪水流量算定結果

対象流域 ・地点	定数	過去実験 (m^3/s)	将来実験 (m^3/s)	変化
十勝川 帯広地点	C_{11} 関数化	2,917 (1,508~6,300)	4,852 (2,278~9,485)	1.66倍

※年超過確率1/150降雨量（GEV分布）の95%信頼区間内のピーク流量の中央値。

参考 1

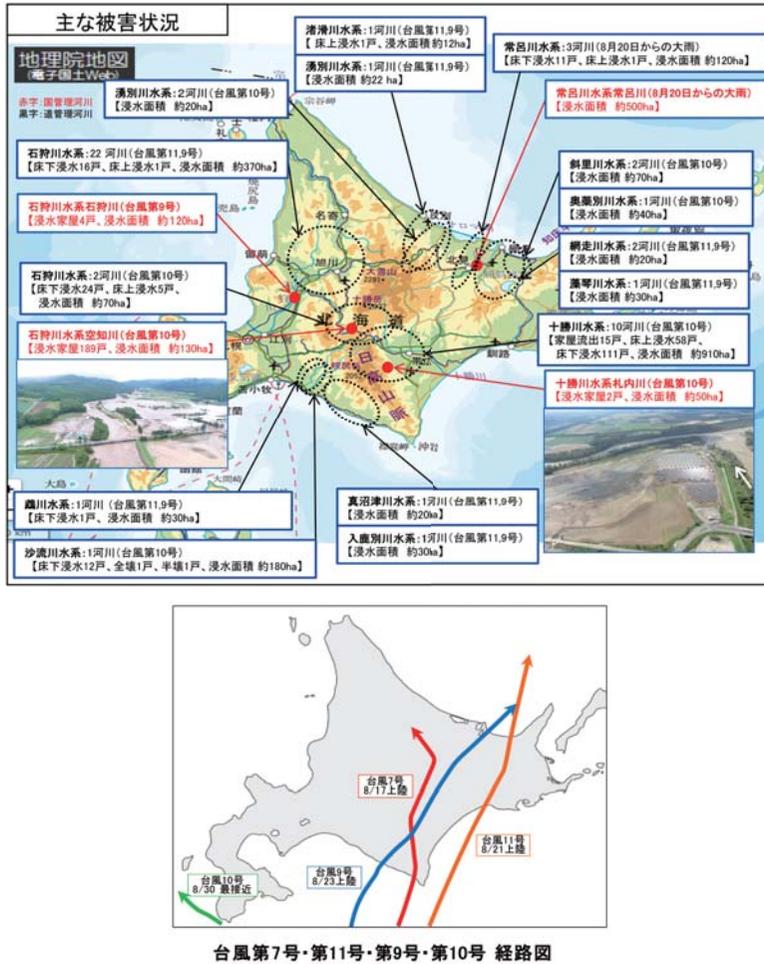
検討の経緯

1.1 平成28年8月北海道大雨激甚災害と本検討の始動背景

平成28年8月、北海道に観測史上初めて1週間に3個の台風が上陸し、さらにその1週間後には台風第10号が接近した。全道各地に記録的な大雨をもたらした。堤防決壊による大規模な浸水、幹線道路や橋梁・鉄道の被災、広範囲に及ぶ農業被害など、甚大な被害が発生した(図参1-1)。この平成28年8月北海道大雨激甚災害では、多くの地点で月降水量が観測1位を更新し、年間降水量に匹敵する地域もあるなど全道各地で記録的な豪雨になったこと、連続する豪雨で流域が湿潤状態となり、流出率が高い状況が発生したことなどが特徴的であった。

河川では、全道各地で計画高水位を超過した。国管理河川4河川で堤防が決壊し5河川で氾濫が発生するとともに、北海道管理河川においても5河川で堤防が決壊し79河川で氾濫が発生した。特に上流部や支川で甚大な被害を生じ、中小河川では河岸決壊などによる家屋や橋梁の流出といった被害が発生した。また幹線道路や鉄道の被災、多数の橋梁流出などにより、長期的・広域的に人流・物流を担う重要交通網が分断され、社会・経済に深刻な影響が発生した。さらに広範囲にわたる農業被害および食品加工場等の被災により、全国の市場で野菜価値が高騰するなど日本の食料供給へ大きな影響を与えた。死者・行方不明者6名、重軽傷者15名の人的被害があったほか、住宅の被害は全半壊126棟、一部損壊963棟、床上・床下浸水は1,262棟に及ぶ激甚災害となった。

この災害について、気象、治水、防災の観点から検証を行い、今後の水災害対策のあり方を検証するため、国土交通省北海道開発局と北海道は「平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会」を設置した。同委員会は次の時代に向けた先導的な水防災対策のあり方を検討し、「特に、日本の中で降雨量が少なかった北海道においては、過去の降雨や水害等の記録だけではなく、気候変動による将来の影響を予測・評価し、具体的なりスク評価をもとに、治水対策を講

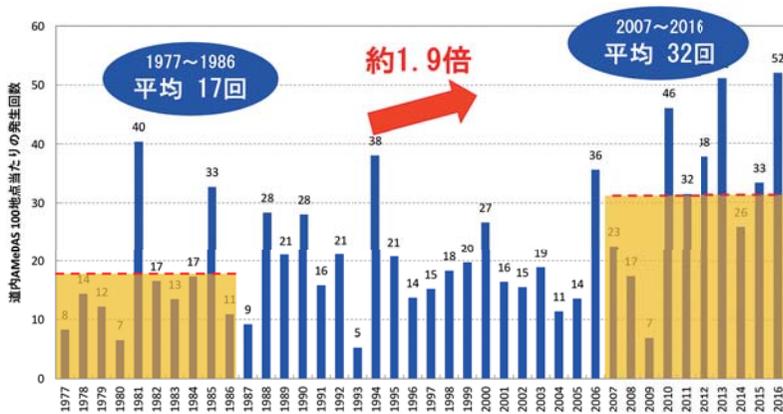


図参1-1 平成28年8月北海道大雨激甚災害での台風経路図と主な被害状況(平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策のあり方 [概要] より)

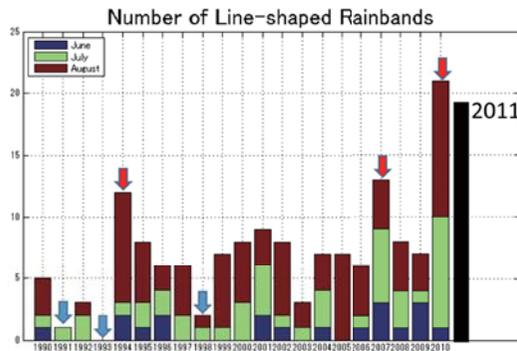
じるべきである」とする平成28年8月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方を取りまとめた。この「あり方」を踏まえ、平成29年6月に国土交通省北海道開発局と北海道は「北海道地方における気候変動予測(水分野)技術検討委員会(以下、技術検討委員会)」を設置した。技術検討委員会の目的は、北海道地方における気候変動の影響(降雨量、洪水流量の変化)を最新の知見に基づいて科学的に予測し、気候変動の影響によるリスクの変化(規模・形態・頻度の変化など)を算定し、社会と共有することであった。

1.2 近年の北海道の気象状況

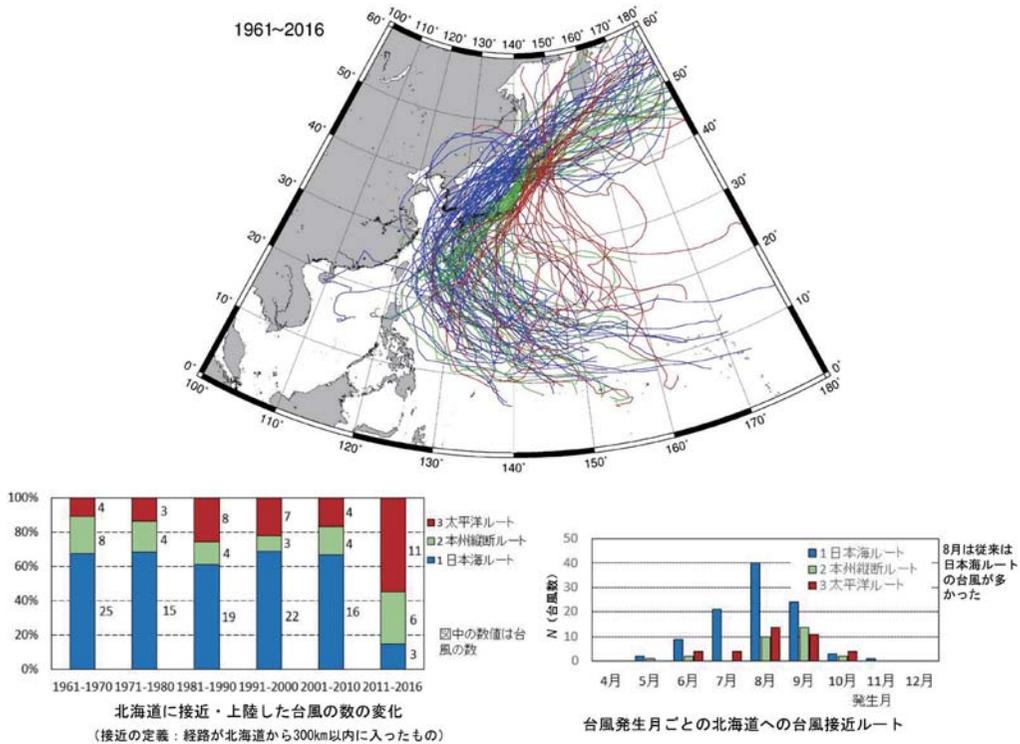
近年の北海道の気象変化として、時間雨量30mmを超える短時間雨量が約30年前の約1.9倍(図参1-2)、線状降水帯の発生回数が増加するなど(図参1-3)、極端な雨の降り方が既に顕在化していること、台風の経路について、勢力が減衰しにくい太平洋側からのルートで北海道に接近・上陸する割合が増加していること(図参1-4)などが現れている。



図参1-2 道内アメダス100地点当たりの時間雨量30mm以上の降雨発生回数(一般財団法人日本気象協会北海道支部資料を一部改変)



図参1-3 北海道における線状降水帯の発生回数と各年の月別積算回数(1990~2011)(山田朋人(北海道大学)作成資料より)



図参1-4 北海道に接近する台風の特徴 (山本太郎 (北海道河川財団) および山田朋人 (北海道大学) 作成資料より)

1.3 気候変動の影響予測

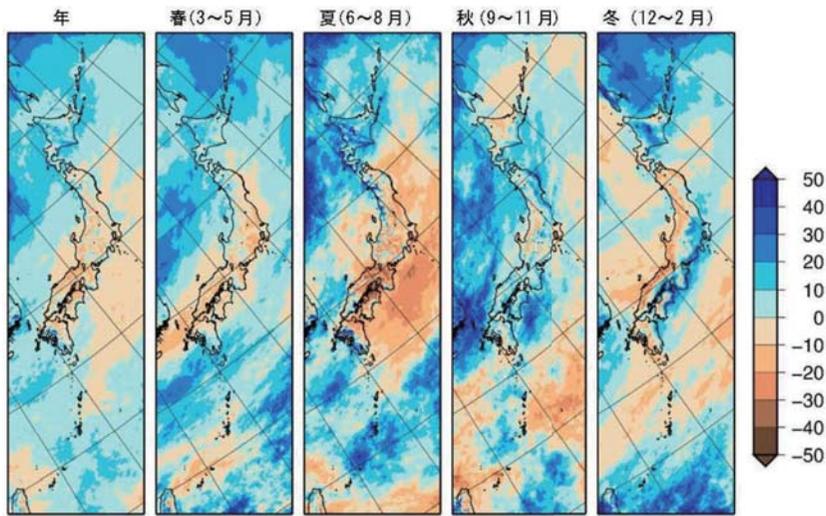
気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change, 以下「IPCC」) が取りまとめた第5次評価報告書 (Fifth Assessment Report: Climate Change 2013, 以下「AR5」) では、気候システムの温暖化については疑いの余地がなく、中緯度の陸域のほとんどで極端な降水が強くなり、より頻繁となる可能性が非常に高いことが示されている。

IPCC AR5の最悪想定シナリオに基づいた気象庁の最新の予測である「地球温暖化予測情報 (第9巻)」によれば、全国の将来気候における短時間強雨 (降水量30 mm/h以上、50 mm/h以上) の発生頻度は、ほぼすべての地域および季節で増加し、このうち、滝のように降る雨 (50 mm/h以上の短時間強雨) の年間発生回数は全国平均で2倍以上となる。将来気候 (2076～2095年) における年最大日降水量は全国的に増加し、ほとんどの地域で将来変化量が現在気候の年々変動幅より大きいことから、現在ほとんど観測されないような年最大降水量が将来気候では毎年のように出現する、と示されている。年降水量や季節ごとの3か月降水量の将来変化 (図参1-5) を見ると、北海道や東北地方では、全国的に将来変化率が高いことがわかる。

北海道の将来気候を示した『北海道の気候変化』によれば、北海道の年降水量は21世紀末に概ね

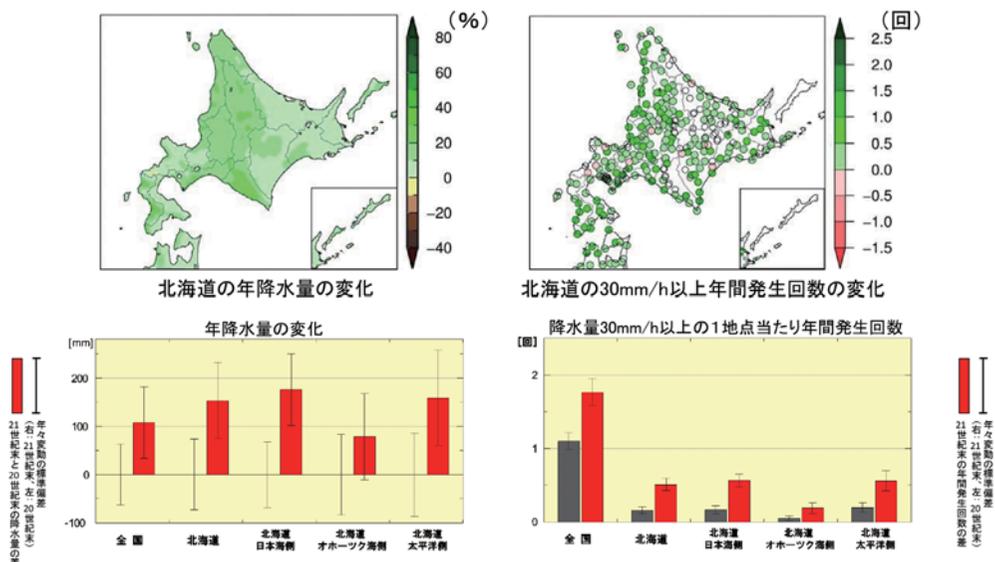
10% 増加すると予測されているが、地域ごとに見ると日本海側で増加する。降水量 50 mm/h 以上、100 mm/h 以上の年間発生日数および 30 mm/h 以上、50 mm/h 以上の年間発生回数も増加し、地域ごとに見ても各地域で増加傾向となり、21 世紀末には大雨や短時間強雨の頻度が増加することが予測されている。(図参 1-6)

以上のことから、全国で気候変動の影響が大きいと予測される北海道において、先導的に気候変動の適応策に取り組むことが必要となった。



図参 1-5 年降水量や季節ごとの3 か月降水量の将来変化(単位: %, 『地球温暖化予測情報第9 巻』より)

※将来変化率とは、現在気候に対する将来気候の変化率を指し、4 メンバの平均となっている。



図参 1-6 気象庁による北海道の気候変動予測(『北海道の気候変化(第2版)』より)

参考 2

諸外国における気候変動適応策と リスク評価

「世界は神が作ったが、オランダはオランダ人が作った」と俗にいわれるとおり、オランダは国際河川ライン川の河口デルタ地帯を次々と干拓し、河川氾濫や高潮による水害リスクと背中合せでその国土を広げてきた。このため歴史的に治水に対する意識が高く、早い段階から自らの国土を守るために気候変動適応への取組みが進められ、将来予測からリスク評価、計画立案および事業実施に至るまで体系的に適応策が展開されている。

一方、日本の治水分野では気候変動適応策の重要性は議論されているものの、具体的な取組みが十分になされるまでに至ってはいない。海外では各国で将来の気候変動予測に基づく計画や対策が試みられており、我々は、国家的な気候変動への取組みが見られ、先進的なリスクベースの治水対策を進めているオランダの気候変動適応策とリスク評価手法について調査を進めており、現時点でわかったことを整理する。

2.1 諸外国の気候変動適応への取組みとリスク評価事例

●●● 日本の気候変動適応策

我が国では、2008年6月に社会資本整備審議会（河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会）において、2007年のIPCC AR4¹⁾を踏まえた「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応のあり方について」²⁾が答申され、その後、気候変動の影響評価などに関する調査研究が進められてきたが、治水計画や施設整備へ反映された事例は乏しく、水災害分野における気

表参2-1 治水事業の責任者と治水事業の内容(参考文献³⁾をもとに作成)

	日本	アメリカ	イギリス	フランス	ドイツ	オランダ
治水事業の責任者	国	州政府 地方自治体	沿川の 土地所有者	河岸所有者	州 郡 自治体	国(政府) 水委員会
治水事業の内容	・基本的には、計画規模までの洪水の氾濫を許容しないという前提 ・構造物による氾濫防御対策が中心	・ミシシッピ川流域では下流の市街化した氾濫原では主に構造物対策、上流地区では、構造物と非構造物対策が併用される	・市街地では、洪水の氾濫を許容しないという前提 ・構造物による対策が行われるが、市街化の進んでいない氾濫原内の開発規制による流出抑制も実施される	・市街地では、洪水の氾濫を許容しないという前提 ・構造物による対策が行われるが、加えて土地利用規制による施策も推進される	・構造物による氾濫防御が中心であったが、近年は自然環境保全を考えて土地利用規制による非構造物対策も併用される	・地形条件から、構造物による対策を主軸として整備
日本との類似	-	×	×	×	△	○

※ 「治水事業の責任者」および「治水事業の内容」が同様・類似の場合は○、どちらか一方の場合は△、どちらも異なる場合は×とした。

候変動適応策の十分な実現には至っていない。

●●● 諸外国における気候変動適応への取組み

諸外国では、特にイギリス、オランダ、アメリカなどを中心とする欧米諸国で、2007年のIPCC AR4および2013年のIPCC AR5⁴⁾を受けて先進的な気候変動適応策が展開されている。

表参2-1は、諸外国における治水事業の責任者と治水事業の内容を示している。歴史的に州政府や沿川の土地所有者が治水事業の責任者となっている例が多いが、オランダは国が責任者となっている点や構造物主体の治水事業を実施している点で日本と類似している。

また、図参2-1に示すように、過去の大災害の経験からこれまで治水安全度を高め続けている点、気候変動予測から河川流量予測、対策の計画、リスク評価、適応策まで体系的に取り組まれている点などから、オランダに着目し調査を進めた。

●●● ヨーロッパにおける気候変動適応への取組み

ヨーロッパでは、2007年EU洪水指令⁶⁾で、洪水リスク管理対応を加盟国に求め、頻度の低い・中程度・高い3つのシナリオについての洪水ハザードマップと、洪水により影響を受ける可能性がある人数や地域の経済活動等を記載した洪水リスクマップの作成を指示した。EU加盟国では洪水ハザードマップと洪水リスクマップを明確に区別して作成・公表している。洪水ハザードマップは洪水による状況とその可能性を示し、洪水リスクマップはその影響や被害を示すものである⁸⁾。

IPCC	EU	イギリス	オランダ	アメリカ
	2000年 水枠組み指令		1993年洪水避難10,000人 1995年洪水避難250,000人	青字: 法例・基準 黒字: 計画・目標等 赤字: 近年の主な災害
2001年 第3次評価報告書 TAR	2001年 水枠組み指令 共通実施戦略	2002年 TE2100プロジェクト開始 流域洪水管理計画	2001年 マースプロジェクト (マース川の計画流量引上げ)	
2007年 第4次評価報告書 AR4	2007年 洪水指令	2006年 スターン・レビュー 計画政策声明「開発と洪水リスク」 「洪水・海岸防衛評価指針気候変動影響担当当局による経済評価の補足文書」 2007年豪雨災害(7月) 過去60年間で最悪の洪水 14万世帯、35万人以上が被災	2006年 河川空間拡張方針(Room for the River)(ライン川の計画流量引上げ) 国家気候変動・空間戦略プログラム	
	2009年 EU白書	2008年気候変動法2008 「Future Water」 「2007年洪水から学ぶこと」 2009年 イギリス気候変動予測プロジェクト	2009年 新水法、国家水計画(2009~2015)	2009年 大統領令「環境、エネルギーおよび経済効率化における連邦の純率力」
2013年 第5次評価報告書 AR5		2010年 洪水および水管理法 計画政策声明「開発と洪水リスク」改定 2012年 TE2100計画承認 全国計画政策枠組み、および技術指針 気候変動リスクアセスメント 2013年 国家適応プログラム(NAP)	2010年 新デルタ法 デルタプログラム開始 2012年 新デルタ法発効 2014年 デルタ決定(Delta Decisions) 内閣決定 2015年 国家水計画(2016~2021)決定	2012年ハリケーンサンディ 死者132人(米・カナダ) 2013年 大統領気候行動計画 USACE海上昇量考慮手法技術基準 2014年 全国気候変動影響調査 2015年 気候変動影響を考慮した基準洪水水位の設定に係る大統領令

図参2-1 諸外国における気候変動の検討経緯(参考文献⁵⁾をもとに作成)

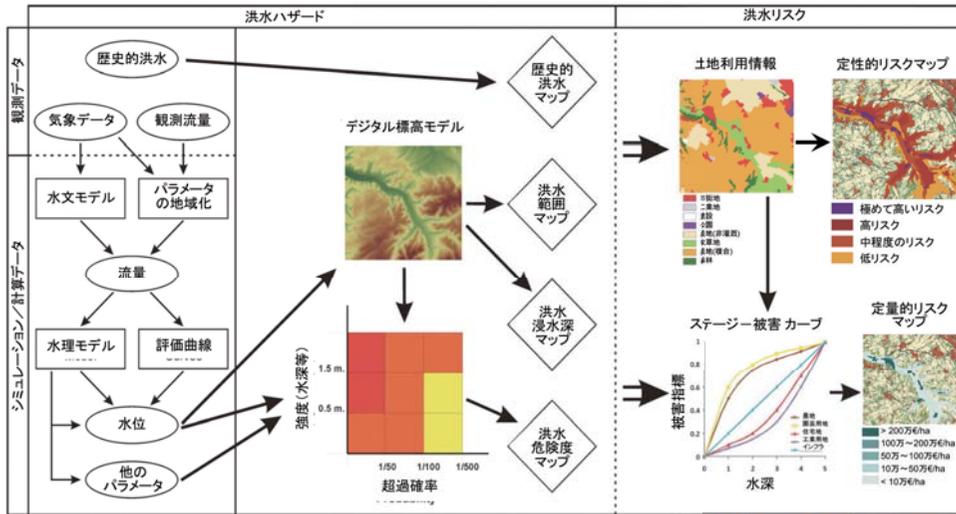
さらに2009年EU白書において、「後悔しない適応策を優先するべき」と位置づけ、リスク評価と適応策を具体的に展開している。



図参2-2 EU洪水指令(2007年)⁶⁾



図参2-3 EU白書(2009年)⁷⁾



※ 出典：H. de Moel, J. van Alphen, J.C.J.H. Aerts, Flood maps in Europe – methods, availability and use, 2009, <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/289/2009/nhess-9-289-2009.pdf>.

図参2-4 洪水ハザードマップと洪水リスクマップ (参考文献⁸⁾を一部改変)

2.2 オランダにおける治水対策と気候変動適応策検討の経緯

●●● 本検討での調査実施状況

前述したように、過去の大災害からこれまで治水安全度を高め続けている点、気候変動適応策に体系的に取り組まれている点から、我々はオランダに着目し調査を進めた。国内外の文献調査とともに、さらなる情報収集のため、当該国の気候変動予測やリスク評価の専門家あるいは論文の著者らに直接問い合わせ、オランダでのヒアリングを実施し、適宜必要な情報を付加した。その後も、フォローアップ調査によってさらに情報を付加している。ヒアリングの訪問機関を表参2-2に示す。

●●● オランダの国土とインパクト・レスポンス

オランダは、4つの河川(ライン川、マース川、スヘルデ川、エムス川)がヨーロッパを流れ、北海にたどり着くその三角州にできた低平地の国である。国土の1/4が標高0m地帯であり、そこに総人口1,700万人の約半数が居住している。オランダ人自ら行ってきた干拓による国土の確保・拡大とそのために必要であった合意形成の歴史がある。これが「世界は神が作ったが、オランダはオランダ人が作った」といわれる所以である。

オランダではこれまで数多くの大洪水の被害を受け、そのたびに大規模な治水事業を実施してき

た歴史がある。1953年の北海高潮⁹⁾では、オランダやイギリスで甚大な被害が発生した。オランダでは175,000 haが浸水、4,500戸の家屋が損壊、1,800人が死亡した(図参2-5、2-6)。

北海高潮による災害を受け、公共事業局担当大臣はデルタ委員会を設立し(2010年以降、デルタ

表参2-2 訪問機関およびヒアリングの主な内容

訪問機関	ヒアリングの主な内容
① 公共事業局 (治水事業の実施を担う行政機関)	気候変動適応策の実施状況 ・オランダの治水の歴史 ・各機関の概要と役割 ・安全基準の考え方 ・洪水予測の概要、近隣諸国との協調体制 ・デルタプログラムにおける気候変動適応策など
② デルフト工科大学、 HKVコンサルタント (リスク評価の研究者、専門家)	リスク評価手法の詳細 ・想定死者数の算定方法 ・氾濫シミュレーション方法
③ デルタ委員事務局 DeltaCommissionaris (デルタプログラムを進める独立機関)	デルタプログラム策定の背景、裏づけ ・デルタ委員の役割、権限 ・気候変動シナリオの取扱い ・許容リスクの決定
④ オランダ王立気象研究所 KNMI (日本の気象庁相当)	気候変動予測の詳細 ・降雨予測方法(バイアス補正, リサンプリング) ・流出計算方法



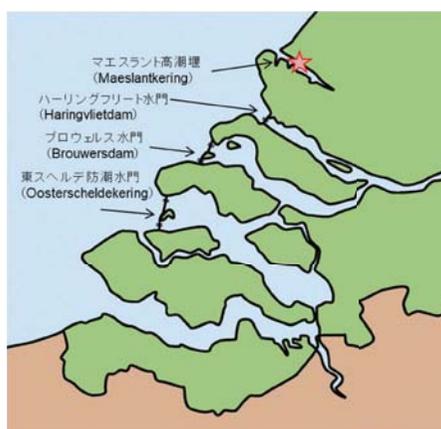
図参2-5 北海高潮による決壊および浸水状況⁹⁾



図参2-6 北海高潮災害氾濫区域図(参考文献¹⁰⁾をもとに作成)

プログラムの検討・更新に当たる、後のデルタ委員会と区別するために「第1次デルタ委員会」とも呼ばれる), 1958年には河口域の締切りと堤防・砂丘の補強のための原則を規定したデルタ法が国会で可決され, デルタプラン³⁾が開始された(プロジェクト名: Delta Plan, 事業名: Delta Works).

デルタプランでは40年間で総額55億ユーロ(約6,800億円)の巨費が投じられた。デルタワークスにより, マエスラント高潮堰(Maeslantkering)やハーリングフリート水門(Haringvlietdam), ブロウエルス水門(Brouwersdam), 東スヘルデ防潮水門(Oosterscheldekering)などの大規模な構造物に代表される数多くの水門や堰が建設された¹⁰⁾(図参2-7, 2-8, 2-9)。



図参2-7 デルタワークスで建設された代表的な構造物
(参考文献¹⁰⁾をもとに作成)



図参2-8 マエスラント高潮堰(2018年1月10日撮影, 片翼の幅210m, 回転半径250m)



図参2-9 マエスラント高潮堰¹¹⁾



図参2-10 東スヘルデ防潮水門 (2018年1月10日撮影, 延長9 km)

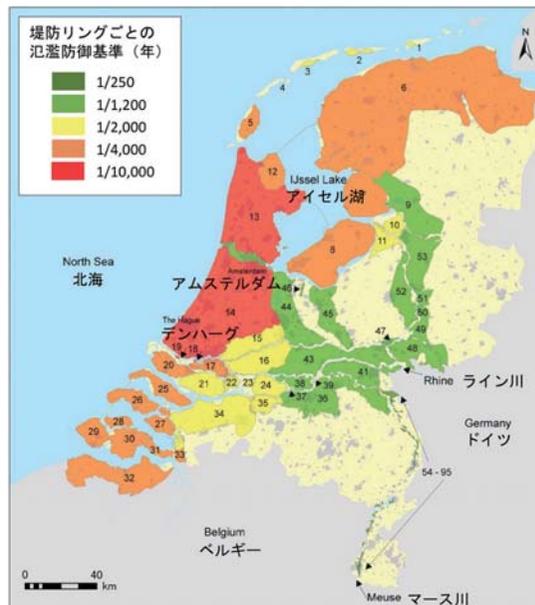


図参2-11 ハーリングフリート水門 (2018年1月10日撮影, 延長1 km)

デルタプランを契機として、オランダ全土を網羅する範囲で目標とする氾濫防御基準が設定された。原則として、背後地の土地利用状況や経済性、確率論的観点も考慮したうえで、年間確率 $1/250 \sim 1/10,000$ という高い水準で氾濫防御基準が設定された¹²⁾。氾濫防御基準は、堤防から越水を生じさせない水位の超過確率として表現され、法的に位置づけられた。

1993年の洪水では継続的な降雨によってマース川の水位が上昇し、浸水面積は約17,000 ha、10,000人が避難し、被害額は1億ユーロ(約120億円)以上となった¹³⁾。1995年洪水でも、13,000戸の家屋が浸水、堤防決壊が予想されたため250,000人が避難、被害額は4億ユーロ(500億円)となった¹⁴⁾。

これらの洪水を受けて、特別法として主要河川デルタ法が可決され、主要河川において150 km



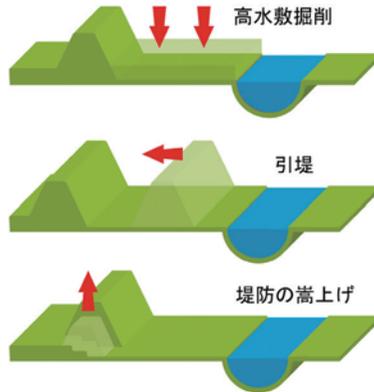
図参2-12 氾濫防御基準 (参考文献¹²⁾を一部改変)



図参2-13 Room for the Riverの2016年4月時点整備状況 (参考文献¹⁶⁾をもとに作成)

にわたる堤防強化がなされることとなった。また、今後の気候変動影響による水位上昇に対応するために、堤防強化のほかに河道断面積を増やすことが考えられ、新しい水管理のアプローチとして河川空間拡張プロジェクト (Room for the River¹⁵⁾) が開始され、2016年4月時点で整備はほぼ完了している¹⁶⁾。プロジェクトの総費用は約22億ユーロ (約2,700億円) であり、39の事業が実施された¹⁷⁾。

ドイツ国境付近のレントは、ライン川派川のワール川の蛇行箇所位置する。1995年洪水では、対岸の街ナイメーヘンで250,000人が避難した¹⁶⁾。Room for the Riverでは、350mの引堤が実施され、工事費のみで約3億5,800万ユーロ (約440億円) の費用が投じられた。



図参2-14 具体的な河川整備実施内容 (参考文献¹⁵⁾を一部改編)



図参2-15 引堤事業実施後のイメージ図¹⁶⁾

●●● オランダの気候変動への取組みの始まり「デルタプログラム」

2007年のEU洪水指令では、洪水リスクの評価・管理に関して法的枠組みが与えられ、気候変動影響を考慮することが明確に求められた。これを受け、オランダでは2007年内閣がWater Visionを発表し、持続可能な気候耐性の水管理を追求することを規定し、(第2次)デルタ委員会が設置され、2010年からデルタプログラム^{17),18)}が開始された(図参2-16)。

デルタプログラムは、現在および将来のためにオランダを安全で魅力的な場所とし続けることを目的として具体的な施策を示した計画である。デルタプログラムでは、EU洪水指令で求められた洪水リスク管理と水資源維持のための淡水確保の2つを目標としている。デルタ委員は、2つの目標に関するガイドラインであるデルタ決定を内閣に提出し、内閣は国家水計画¹⁹⁾に組み込んだ。2017年1月、政府は新しい氾濫防御基準を導入し、2050年までに新しい氾濫防御基準を満たすように氾濫防御システムが設計されることとなっている。

デルタ委員は、デルタプログラムを毎年更新し、議会に提出している(表参2-3)。オランダ王立気象研究所KNMI(日本の国土交通省に相当)が予測する最新の気候変動シナリオをもとに検討



図参2-16 デルタプログラム2011¹⁷⁾(左), 同2019¹⁸⁾(中央), 国家水計画¹⁹⁾(右)

表参2-3 デルタプログラムの変遷

	2011	2012	2013	2014
デルタプログラム				
気候変動シナリオ※	KNMI'06 →			KNMI'14
主な内容	課題分析	スケジュールリング	予算確保	デルタ決定・優先的な戦略
氾濫リスク管理関連	—	—	人的被害・経済的被害を考慮	リスクベース・アプローチ
	2015	2016	2017	2018
デルタプログラム				
気候変動シナリオ※	KNMI'14 →			
主な内容	デルタ決定最終提言	氾濫防御新基準	「2050年までに新基準を満たす」	法律改正・空間計画に重点
氾濫リスク管理関連	リスクレベルの提案	—	—	—

※表中のデルタプログラム2015²²⁾によれば、KNMI'14はKNMI'06と比較して海面上昇の最大値の予測が若干異なるもののほとんど違いがないシナリオである。

が行われており、デルタプログラム2011はKNMI'06²⁰⁾の最悪シナリオをもとに検討されているが、デルタプログラム2014からはKNMI'14²¹⁾が考慮されている。デルタプログラムおよびヒアリング結果によれば、KNMI'06とKNMI'14を比較すると、海面上昇の最大値の予測が若干異なるものの、ほとんど違いがないシナリオであるため、KNMI'06の最悪想定シナリオを元に検討が続けられた。仮に、2つの予測結果が大きく異なった場合、最新のKNMI'14をベースに検討を進めていたようである。KNMIは気候変動予測および将来流量予測を実施しているが、デルタプログラムは2100年あるいは2085年の予測値を参考に、2050年までに事業を実施し、「too little, too late」(少なすぎ、遅すぎ)とならないよう、リスクを低減させることを目指している。

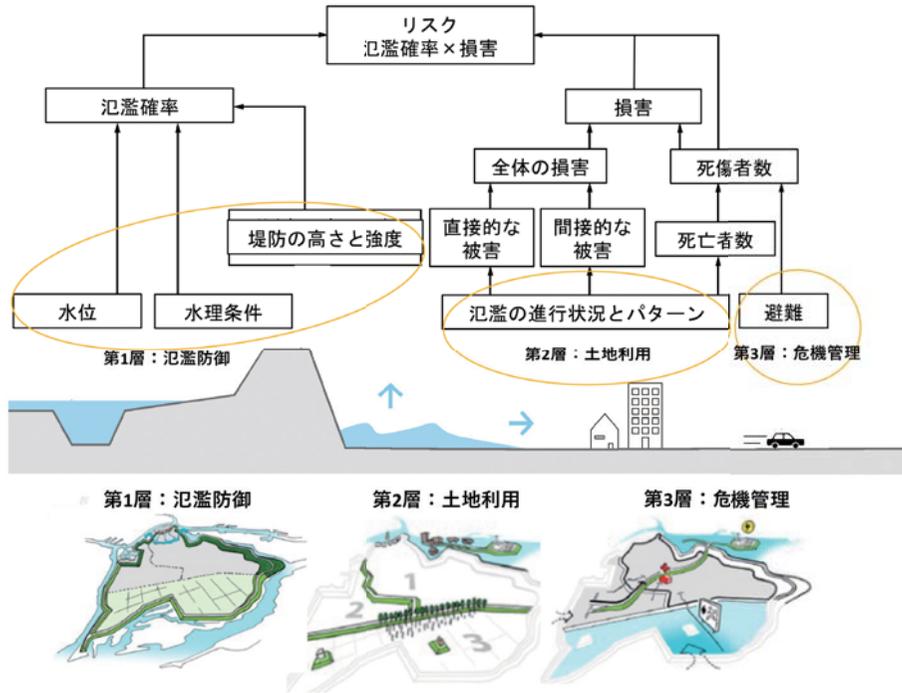
デルタプログラムでは、リスクベース・アプローチが適用されている。リスクベースの「リスク」とは、特定事象の発生の可能性(氾濫が発生する確率)とそれによって引き起こされる被害のかけ合わせである。リスクベース・アプローチを適用し、対策を講じることで、洪水による国民の死亡率を年間10万分の1以下にすることを目標としている。

年間死亡率10万分の1以下の目標を達成するために必要な対策は、重層的洪水リスク管理²³⁾により講じられる(表参2-4、図参2-17)。重層的洪水リスク管理とは3段階でリスクを低減していくリスク管理手法である。堤防の氾濫防御基準を満たすために最優先は第1層(予防策による氾濫防御)であり、基準を満たすためハード対策が行われている。デルタプログラムは2010年9月から毎年更新され、前述のように具体的な死亡率の目標値を定め、リスクを低減することを目指してきた。

2015年、国会に提出されたデルタ決定を受け、国家水計画が決定され、その中で、2050年までに洪水による国民の死亡率を年間10万分の1以下にすることを目標として、堤防の氾濫防御基準が適用された(図参2-18)。従来の基準は、堤防からの越水を生じさせない基準水位の年超過確率として表現されていたが、新基準では堤内地の人的・経済的リスク、洪水・高潮の予測精度や避難

表参2-4 重層的洪水リスク管理(参考文献²³⁾をもとに作成)

各層の詳細	
第3層： 	◎あらゆる氾濫に対応する危機管理 情報提供(洪水警報、リスクマップなど)、 避難施設の整備
第2層： 	◎氾濫被害を抑制する土地利用 氾濫流の抑止、 土地利用など
第1層： 	◎予防策を実施する氾濫防御 最優先 氾濫防御基準を満たすために、 定期点検(6年ごと)、ハード対策の実施



図参2-17 リスクベース・アプローチ概略図(上), 重層的洪水リスク管理概要図(下)
(参考文献^{19), 22)}を一部改変)

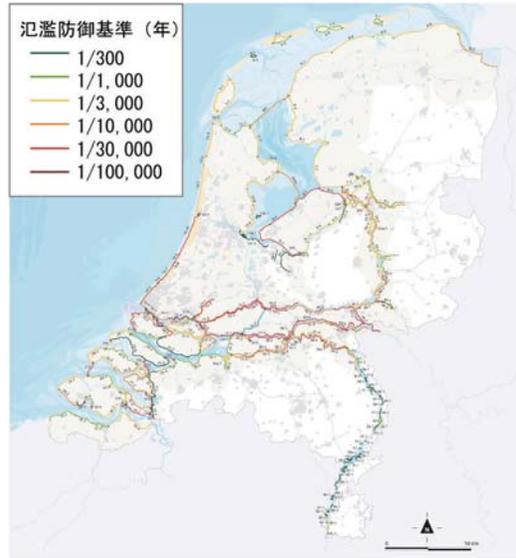
の可能性を考慮して地域ごとに設定された。つまり、これはオランダの治水が本格的にリスクベースに移行し始めたことを示している。

例として、オランダ北部の島々における氾濫防御基準の設定を示す。図参2-19に示すように、堤防区間4-1(フリーラント島)、堤防区間2-1(アメラント島)、堤防区間3-1(テルスヘリング島)は、人口が少ないほど氾濫防御基準が高く設定されており、人口と洪水防御基準が反比例していることがわかる。相対的に低い基準が設定された場合には、重層的氾濫リスク管理の第2層土地利用あるいは第3層により、許容リスクを満たしていくものと考えられる。

ハード整備を実施し、新しい氾濫防御基準を満たすことができれば、人的リスクは大きく低減できる(図参2-20)。オランダの治水分野における個人の許容リスクは、産業分野の危険に関する国家政策をもとに決定されている。産業分野における個人の許容リスク(許容される死亡リスク)は年間100万分の1以下となっており、非常に低いリスクレベルとなっている²²⁾。

治水分野の許容リスクは、年間10万分の1以下となっている。年間100万分の1以下とした場合、50億ユーロ(6,200億円)の追加費用が必要となることから、費用便益分析を踏まえた最適な安全基準として、個人リスクを年間10万分の1以下に設定したものである。

1ha当たりの年間経済損失を図参2-21に示す。新しい氾濫防御基準を満たすようハード整備が実施された場合、2050年には経済的リスクの総額を1/20に低減することができる²⁸⁾。



図参2-18 新しい氾濫防御基準 (参考文献¹⁹⁾を一部改変)



図参2-19 新しい氾濫防御基準：オランダ北部の例 (参考文献¹⁹⁾をもとに作成)

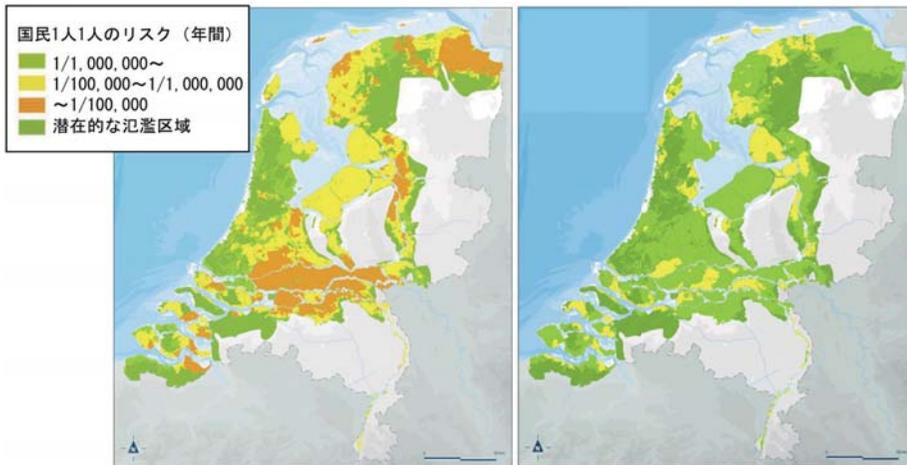
以上のように、オランダでは大洪水が発生し被害を受けるたびに、大規模事業を計画し、ハード整備を実施することで国土を守ってきた。

そして、2007年のEU洪水指令を契機に、ヨーロッパでは「洪水リスク管理」をキーワードとして、統合的な治水対策が行われ、オランダでは政府が主体となって先進的な氾濫リスク管理を行い、具体的な数値目標（許容リスク：年間10万分の1以下の死亡率）を決定し、「too little, too late」を避けるため早期に対策を講じている。

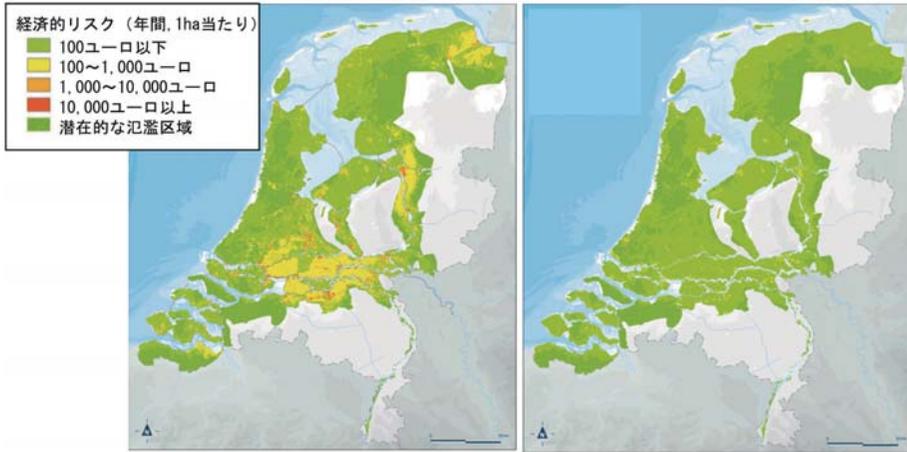
表参2-5 新しい氾濫防御基準：オランダ北部の例（参考文献²²⁾を一部改変）

区間	洪水防御基準（構造物による対策だけで達成する目標）	解説
2-1	1/1,000	地域の見解と政府の算定が一致
2-2	1/1,000	地域の見解を採用（避難率0%想定） 個々の島々の安全戦略として、重層的防御アプローチを検討する
3-1	1/3,000	地域の見解を採用（避難率0%想定） 個々の島々の安全戦略として、重層的防御アプローチを検討する
3-2	1/1,000	地域の見解と政府の算定が一致
4-1	1/300	地域の見解と政府の算定が一致
4-2	1/1,000	地域の見解と政府の算定が一致

我が国の災害対策あるいは治水対策は、想定される災害の「ハザードの大きさ」に焦点を当てるハザードベースである。我が国の今後の治水対策検討にあたり、オランダをはじめとするヨーロッパのリスクベースの考え方は重要な示唆を含んでいる。



図参2-20 国民1人1人の死亡リスク（左：現状のままの2020年，右：新しい氾濫防御基準を満たした場合の2050年）（参考文献²⁴⁾を一部改変）

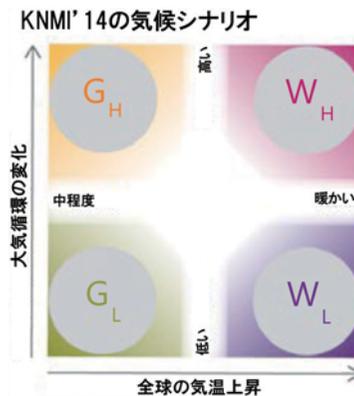


図参2-21 1 ha 当たりの経済的リスク (左：現状のままの2020年，右：新しい氾濫防御基準を満たした場合の2050年) (参考文献²⁴⁾を一部改変)

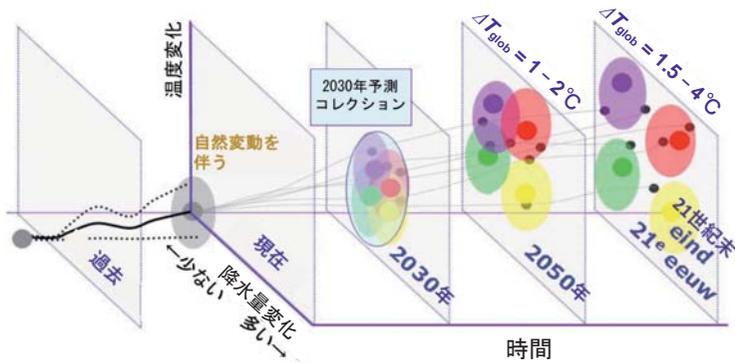
2.3 オランダのリスク評価事例

●●● オランダの気候変動予測

オランダ王立気象研究所 KNMI は、IPCC AR5 に基づいて2014年に気候変動予測 KNMI'14 を公表した。第5期結合モデル相互比較計画 CMIP5 における各国の予測245アンサンブルを用い、2050年時点の温度上昇および大気循環の強弱によって独自の4つの気候変動シナリオに分類した。

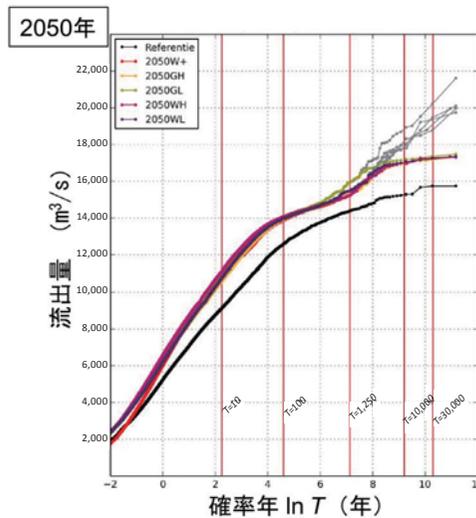


図参2-22 KNMI'14 独自の4シナリオ (参考文献²¹⁾を一部改変)

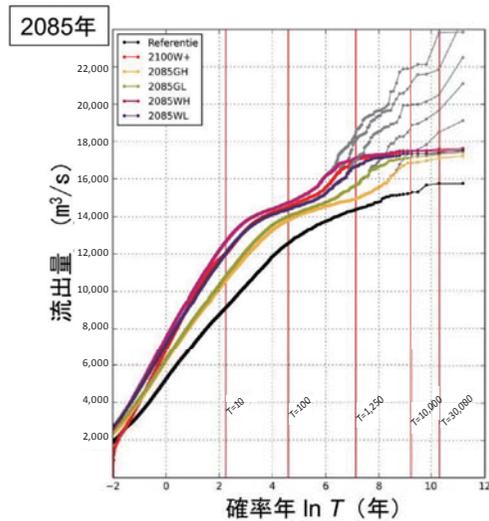


図参2-23 KNMI'14におけるシナリオ分類方法(参考文献²¹⁾を一部改変)

KNMIは気候変動予測だけでなく、将来流量予測も行っている。4つの気候変動シナリオについて、ライン川の将来流量($N=1/1,250$)を予測している。2050年予測では、シナリオによる差は小さいが2085年ではシナリオによって異なる予測となっており、すべてをカバーできる18,000 m³/sを採用している。なお、この流量はライン川上流にあるドイツでの氾濫を考慮し、流量が低減している。



図参2-24 ライン川ロビス地点の流量確率の2050年将来予測(灰色はドイツでの越流がない場合)(参考文献²⁵⁾を一部改変)



図参2-25 ライン川ロピス地点の流量確率の2085年将来予測（灰色はドイツでの越流がない場合）（参考文献²⁵⁾を一部改変）

※出典：KNMI, Deltares, Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas?, https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/069/858/original/samenvatting_grade_knmil4_definitief2.pdf?1495622007.

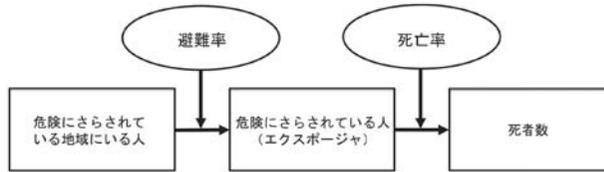
●●● オランダの人的リスク評価

参考2.2節に示したように、オランダでは将来の人的・経済的リスクを算定し、公表している。人的リスクは想定される死者数を示し、想定死者数の算定には「氾濫リスク分析²⁶⁾」という定量的なリスク分析が行われている。我が国と大きく異なる点として、避難率の決定方法および死亡率の算定方法が挙げられる。本検討では、死亡率の算定方法に関して調査することとした。オランダでのヒアリング調査は下記の人物に実施した。

ヒアリング対象者：

- ・ デルフト工科大学
S.N (Bas) Jonkman 教授
- ・ HKV コンサルタント リスク災害管理部門部長（兼デルフト工科大学 研究コーディネーター）
Bas Kolen 氏
- ・ HKV コンサルタント リスク災害管理部門
Bob Maaskant 氏
- ・ ヨンヘヤン RMC 代表取締役
Ruben Jongejan 氏

特定の地域で洪水が発生した場合の死者数は、危険にさらされている地域にいる人口（かつての「輪中」内の人口、現在は「堤防リング」と表現される）と避難率から、危険にさらされている人口（エクスポージャ、浸水区域内人口）を求め、領域ごとの死亡率を考慮し、想定される死者数を算定する。



図参2-26 氾濫リスク分析 (参考文献²⁶⁾を一部改変)

氾濫による死亡率は、2007年にS.N Jonkmanが提案した「人命損失の推定 理論と応用²⁷⁾」がベースとなっており、Jonkmanの方法を2009年にBob Maaskantら²⁸⁾が更新した方法が研究されている。

Jonkmanはアメリカやイギリス、オランダ、日本の過去の洪水データを用いて、流体力・流速・水位上昇率・浸水深などから3領域に分けて死亡率を算定した。3領域は決壊箇所付近の高速流を特徴とする【領域1】、水位上昇率が高い【領域2】、水深が支配的な【領域3】では、下記の算定式および死亡率関数により、推定することができる。なお、 h = 浸水深さ (m)、 v = 流速 (m/s)、 w = 水位上昇率 (m/hr)、 F_D = 氾濫による死亡率、 Φ_N は累積正規分布関数である。

【領域1】 高速流を特徴とする領域：

$$h \cdot v \geq 7 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{かつ} \quad v \geq 2 \text{ m/s}$$

$$F_D(h) = 1$$

【領域2】 水位上昇率が高い領域：

$$w \geq 0.5 \text{ m/hr}$$

$$F_D(h) = \Phi \left(\frac{\ln(h) - \mu}{\sigma} \right)$$

なお、 $\mu = 1.46$, $\sigma = 0.28$

【領域3】 水深が支配的な領域：

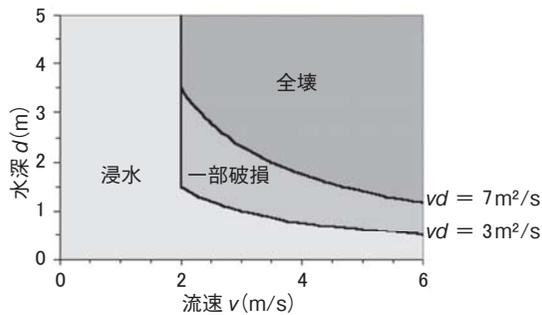
$$F_D(h) = \Phi \left(\frac{\ln(h) - \mu}{\sigma} \right)$$

なお、 $\mu = 7.6$, $\sigma = 2.75$



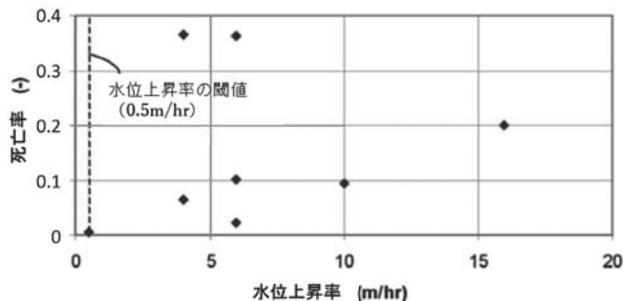
図参2-27 領域イメージ (参考文献²⁷⁾をもとに作成)

高速流を特徴とする【領域1】では、Jonkman は水深や流速と死亡率を直接結び付けることは難しいし、建物が倒壊した場合には屋内にいる人が死亡するとして、L.Clausen ら (1990 年)³⁵⁾ の家屋の倒壊基準を用いている。この基準によれば、流体力 (水深×流速) が $7 \text{ m}^2/\text{s}$ 以上のときに建物が倒壊し、流速が 2 m/s のときに一部破損あるいは全壊が起きることが示されている。この基準はレンガおよび石造りの家屋の倒壊基準であり、現在の基準に合わせる必要があることが示唆されている。

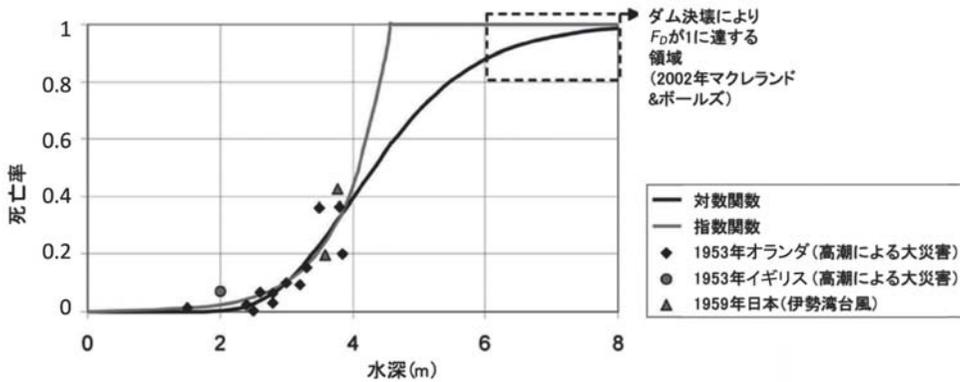


図参2-28 建物の倒壊基準 (参考文献²⁹⁾を一部改変)

水位上昇率が高い【領域2】では、水位上昇率に注目している。急激な水位上昇は建物の低層階にいる人が閉じ込められたり、高層階やシェルターまで水位が到達する時間がほとんどないため危険である。P.H. Waarts (1992 年)³⁰⁾ によれば、北海高潮での8地点での目撃情報から水位上昇率が高い【領域2】の閾値は $0.5 \sim 4.0 \text{ m/hr}$ から決定されている。死亡率関数の算定には、1953 年北海高潮 (オランダ・イギリス)、1959 年伊勢湾台風 (日本) のデータが用いられている。死亡率 0.6 以上では、ダムの決壊での水深と死亡率の変化³¹⁾を考慮している。課題として、水位上昇率が高い【領域2】での死亡率関数の適用のための閾値の根拠となる事例が少なく、情報の正確性が乏しい。

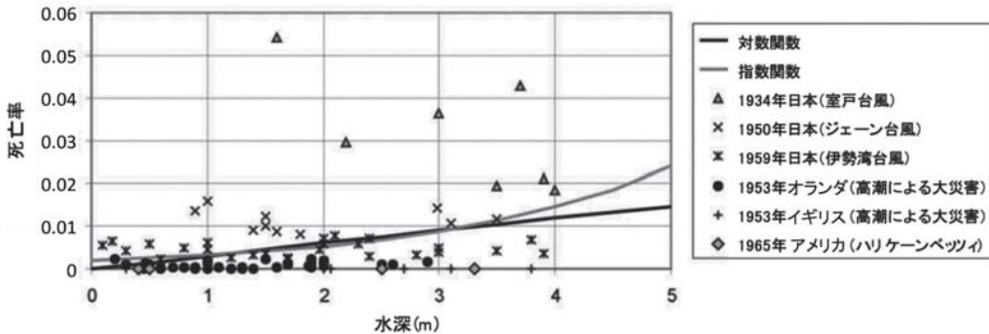


図参2-29 北海高潮での8地点の死亡率と水位上昇率 (参考文献²⁷⁾を一部改変)



図参2-30 水位上昇率 (0.5 m/hr) が高い【領域2】での死亡率関数 (参考文献²⁷⁾を一部改変)

水深が支配的な【領域3】では、水位の上昇率は0.5 m/hr よりも低いため、高層階あるいはシェルターにたどり着く可能性が高くなる。死亡率関数の算定には、1934年室戸台風(日本)、1950年ジェーン台風(日本)、1959年伊勢湾台風(日本)、1953年北海高潮(オランダ・イギリス)、1965年ハリケーンベッツィ(アメリカ)の洪水データが用いられている。データを見ると、死亡率0から0.02の間に集中しており、死亡率が算定されているものの、課題として観測値と関数の相関は低いことが挙げられている。



図参2-31 水深が支配的な【領域3】での死亡率関数 (参考文献²⁷⁾を一部改変)

以上のように、オランダでは流体力・流速・水位上昇率・浸水深が考慮された Jonkman の方法が使われてきた。2001年から公共事業局が実施した Floris プロジェクト^{32), 33)} (Flood risk and safety in the Netherlands) での人的なリスクの算定の際には、Jonkman の方法によって使用され、想定死者数が算定された。

●●● Floris プロジェクトと人的リスク評価手法の更新

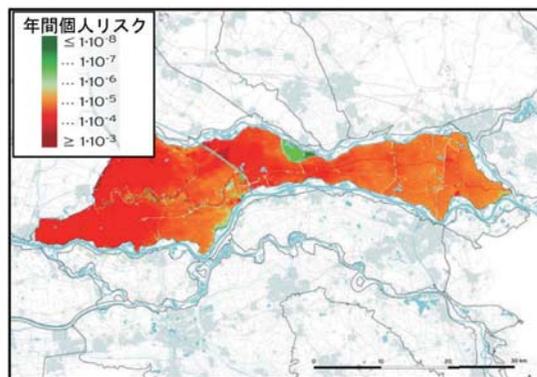
2001年堤防の弱部を見極め、氾濫確率(堤防の決壊確率)と氾濫の影響を把握することを目的に、

公共事業局は「Flood Risks and Safety in the Netherlands」³³⁾(通称 Floris, オランダの氾濫リスクと安全性)プロジェクトを開始し, 評価結果を2005年に公開した(第2期:2009年開始, 2014年結果公開).

2001年以前は水位・流量の超過確率のみの評価だったが, Floris プロジェクトでは堤防決壊メカニズムとして越流・越波, 侵食, すべり, パイピングの4パターンを考慮して, 堤防の決壊を確率的に評価し, 各堤防区間における氾濫確率を決定した. Floris プロジェクトでの公表結果を参考まで以下に示す(ベートゥヴェ/ティーレル-クレムボルガー地区).



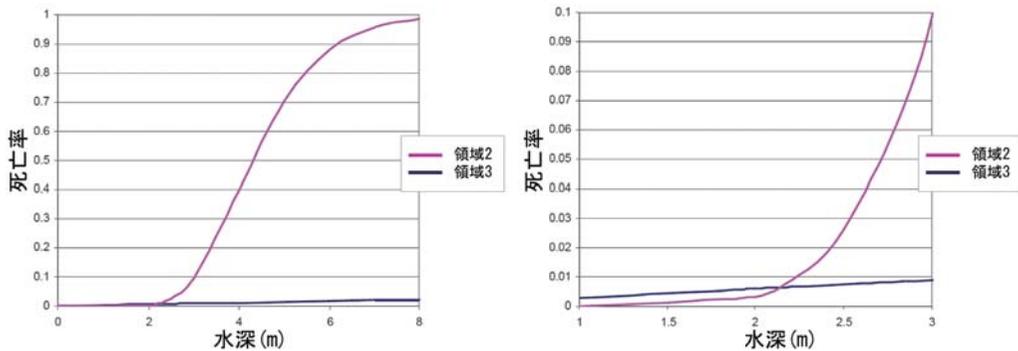
図参2-32 堤防区間ごとの年間氾濫確率(決壊確率)(参考文献³³⁾を一部改変)



図参2-33 年間個人リスク(参考文献³³⁾を一部改変)

Floris プロジェクトの結果をもとに, 2009年 Maaskant ら³²⁾は Jonkman の方法の課題を明らかにした. 高速流を特徴とする【領域1】では死者は発生せず, 実際には, 水位上昇率が高い【領域2】と水深が支配的な【領域3】で想定死者が算定された. 特に, 水位上昇率が高い【領域2】の死亡率が高いと示されている. 高速流を特徴とする【領域1】の閾値の流速を小さくしても, 何ら変化はなかったため, 水位上昇率が高い【領域2】の死亡率関数を更新することとした. 水位上昇率が高

い【領域2】を細分化し、水位上昇率が高い【領域2】と水深が支配的な【領域3】の間に遷移領域を設け、4領域の方法を提案した。なお、今後の課題として、現在の家屋の倒壊基準や倒壊確率などを見直すことが挙げられている。水位上昇率が高い【領域2】と水深が支配的な【領域3】の死亡率関数を重ねた場合、水深2.1 mで関数が交差する。2.1 mより小さな水深では水位上昇率が高い【領域2】の死亡率関数は水深が支配的な【領域3】よりも低い死亡率を示す。よって、水深2.1 m以上かつ水位上昇率が4.0 m/hr以上のときを水位上昇率が高い【領域2】とする。そして、水深2.1 m以上0.5 m/hr以上4.0 m/hr未満の場合に遷移領域【領域2～3】、水深2.1 m以下かつ水位上昇率0.5 m/hr未満の場合に水深が支配的な【領域3】とした。遷移領域【領域2～3】の死亡率関数は、過去の洪水データから求めるのではなく、Maaskantらは水位上昇率が高い【領域2】と水深が支配的な【領域3】の死亡関数の線形補間により算定した。



図参2-34 水位上昇率が高い【領域2】と水深が支配的な【領域3】での死亡率関数の比較(右図は水深1.0～3.0 m、死亡率0～0.1の範囲に拡大したもの)(参考文献³²⁾を一部改変)

Maaskantらが提案した浸水域を4領域に分類することで死亡率を推定する方法を示す。なお、 d = 浸水深さ (m), v = 流速 (m/s), w = 水位上昇率 (m/hr), F_D = 氾濫による死亡率, Φ_N は累積正規分布関数である。

【領域1】高速流を特徴とする領域：

$$d \cdot v \geq 7 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{かつ} \quad v \geq 2 \text{ m/s}$$

$$F_{D,B} = 1$$

【領域2】水位上昇率が高い領域：

$$d \cdot v < 7 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{または} \quad v < 2 \text{ m/s}$$

$$d \geq 2.1 \text{ m} \quad \text{かつ} \quad w \geq 4 \text{ m/hr}$$

$$F_{D,Rise}(d) = \Phi_N \left(\frac{\ln(d) - \mu_N}{\sigma_N} \right)$$

$$\mu_N = 1.46, \quad \sigma_N = 0.28$$

【領域3】 遷移領域 :

$$d \cdot v < 7 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{または} \quad v < 2 \text{ m/s}$$

$$d \geq 2.1 \text{ m} \quad \text{かつ} \quad 0.5 \text{ m/hr} \leq w < 4 \text{ m/hr}$$

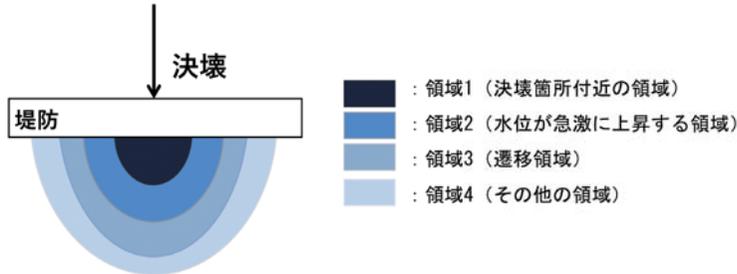
$$F_D = F_{D, \text{Remain}} + (w - 0.5) \frac{F_{D, \text{Rise}} - F_{D, \text{Remain}}}{3.5}$$

【領域4】 水深が支配的な領域 :

$$w < 0.5 \text{ m/hr} \quad \text{または} \quad (w < 0.5 \text{ m/hr} \quad \text{かつ} \quad d < 2.1 \text{ m}) \quad \text{かつ} \quad (d \cdot v < 7 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{または} \quad v < 2 \text{ m/s})$$

$$F_{D, \text{Remain}}(d) = \Phi_N \left(\frac{\ln(d) - \mu_N}{\sigma_N} \right)$$

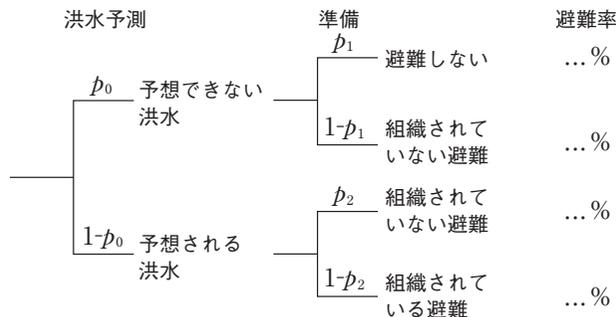
$$\mu_N = 7.60, \quad \sigma_N = 2.75$$



図参2-35 領域イメージ (図参2-27 をもとに作成)

現状として、4 領域ごとに死亡率を算定する Maaskant らの方法はオランダの研究成果として最新のもの (2018 年1 月ヒアリング時) となる。しかし、政府が想定死者数の際に4 領域の方法を使用している事実は得られなかった。今後フォローアップとして、引き続き調査していく必要がある。

また、氾濫リスク分析における避難率の算定には、考え得るすべてのケースの発生確率を定量的に推定するイベントツリー解析が用いられており、確率論的避難モデルなどの研究も進められている (図参2-36)。これに関しても、今後フォローアップとして、引き続き調査していく必要がある。



図参2-36 イベントツリー解析 (参考文献³³⁾ を一部改変)

以上を踏まえ、本検討のリスク評価では、国家プロジェクトである Floris プロジェクトにも実際に使用されている流体力・流速・水位上昇率・浸水深を考慮したオランダの3領域の手法を用いて死亡率関数から、想定死者数を算定した。

なお、Jonkman の方法を日本で使用するうえでのアドバイスとして、以下に示す提案を Jonkman より受けた。

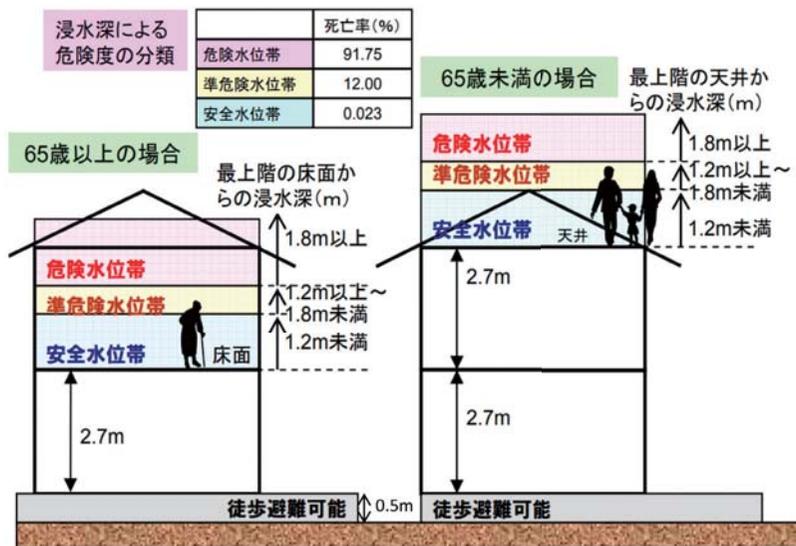
- ・試験的にオランダの手法を導入してみて、その結果がどうなのかを検証してみるのが良い。
- ・最終的には、日本における洪水のデータから死亡率関数を算定した方が良い。
- ・死亡率関数は新しいデータを取り入れ、随時更新していく方が良い。

今後、日本で死亡率関数を採用する場合には検証と更新が必要であるが、本検討ではオランダの手法をそのまま使用し、試験的に想定死者数を算定することとしている。

●●● 2つの手法による想定死者数の比較

将来の気候変動により洪水流量が増加し、それに伴い氾濫・人的被害(想定死者数)が増加することが考えられる。現在、日本で用いられている想定死者数の算定手法としては『水害の被害指標分析の手引き(H25 試行版)²⁶⁾』に示されている手法をもとに死者数を推定するものである。この手法は、LIFESim モデルをベースにアメリカ陸軍工兵隊がハリケーン・カトリーナ災害後の施設整備などの評価に用いたモデル^{34), 35)}(以下、「日本の手法」)である。

日本の手法は、被災者の年齢を考慮し、65歳以上である場合には最上階までの垂直避難が可能であり、65歳未満の場合には天井までの垂直避難が可能であると仮定して、死亡率を算定するものである(図参2-37)。つまり、水理条件としては浸水深のみを考慮する手法である。

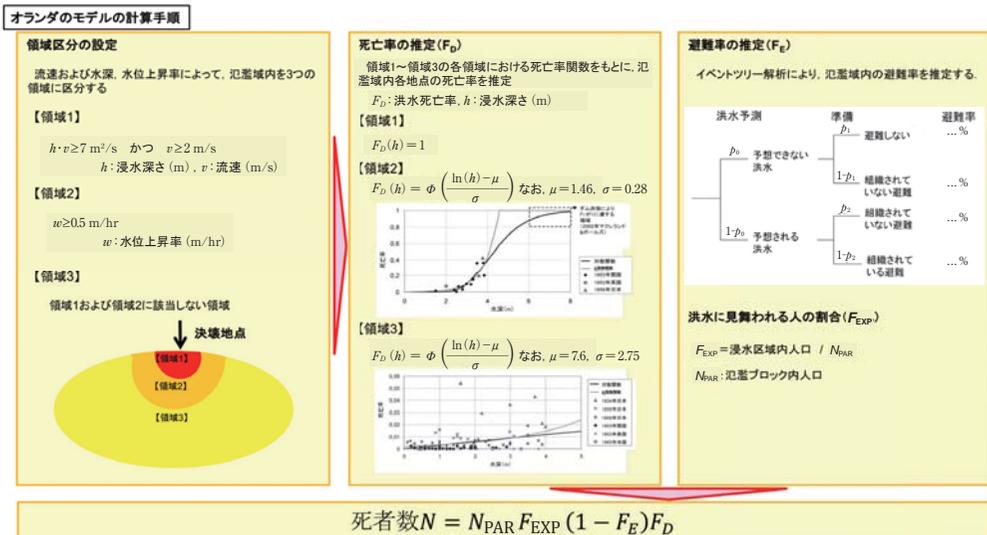


浸水深による危険度の分類
図参2-37 日本の手法の概要^{34), 35)}

一方で、近年の日本での災害事例を見ると、浸水深だけではなく、決壊箇所付近などで速い流速によって家屋や人が支持力を失ったことが窺われる例も散見される。

古くから水害を頻繁に受けてきた低平地オランダでは、前述のように世界各国の洪水データを用い、死亡率関数を導き、また、流体力や流速、水位上昇率なども考慮した手法により死亡率を推定している。前述のオランダの手法を以下に概説する(図参2-38)。

まず領域区分を設定する。流体力・流速・水位上昇率・浸水深によって、浸水域を3領域に区分し、領域ごとに死亡率を推定する。避難率は、考え得るすべてのケースの発生確率を定量的に推定できるイベントツリー解析が用いられている。近年、オランダでは予防避難および垂直避難の効果などを時間の関数として死者数を算定する確率論的避難モデル(2013年 Kolen ら³⁶⁾)などの研究もなされている。



図参2-38 オランダの手法の概要

※出典：S.N. Jonkman, Loss of life estimation in flood risk assessment: Theory and applications, 2007.1, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aabc4fb945-55ef-4079-a606-ac4fa8009426>.

●●● オランダに学ぶ

本検討を進めていくために、国家的な気候変動への取組みが見られ、先進的なリスクベースの治水対策を進めているオランダの取組みを調査した。4河川のデルタに位置する低平地オランダには、過去の大災害からこれまで治水安全度を高め続けてきた長い長い歴史があった。「世界は神が作ったが、オランダはオランダ人が作った」との言葉に代表されるように、オランダ人にとっての治水は自らの国土を守るためには当たり前のことだった。気候変動適応における取組みに関しても同様に、国土の約1/4が海拔0m以下である自らの国土を守るために早い段階から着手したものと考えられる。

オランダは、気候変動予測から適応策まで体系的に取り組んでいる。オランダと日本の治水事業の責任者と事業の内容は類似するため、オランダを模範とすることは難しくはないように思える。我が国でも「リスクでものを見ること（リスクベース）」を実施していくことが、より具体的な目標設定（年間死亡率10万分の1以下にするなど）につながる。想定死者数の算定においても、より多くの水理条件を考慮することで死者数を想定することは、1つの水理条件に頼るよりも信頼性が上がる可能性がある。

付 録

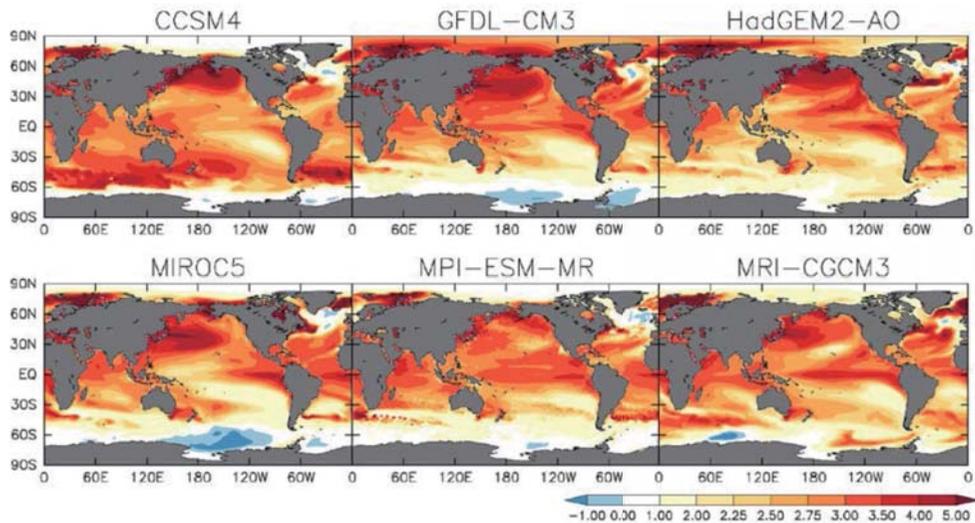
地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース d4PDF

d4PDF は、文部科学省・気候変動リスク情報創生プログラムのもとで、防災等への研究利用、国・自治体、産業界への影響評価や温暖化対策策定への活用を目的として作成されたものである。気象庁気象研究所の全球気候モデル AGCM (Atmospheric Global Climate Model, 水平解像度：60 km) と領域気候モデル NHRCM (Non-hydrostatic Regional Climate Model, 水平解像度：日本域 20 km) を用いた大規模な気候変動アンサンブル実験のデータが利用可能である。

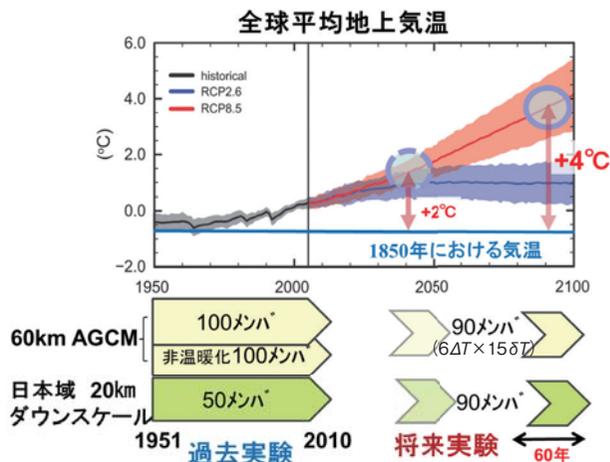
将来実験の場合、世界各国の気候モデルによる予測が集約された第5次結合モデル相互比較プロジェクト CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) の全球大気海洋結合モデルの RCP8.5 実験結果をもとに、SST の将来変化をクラスター分析し、6種類の代表 SST が選定されている(図付1)。6種類の SST 昇温パターンに15種類の摂動を組み合わせた90メンバの2050年9月～2111年8月の60年分のアンサンブルメンバ(6 SST × 15 摂動 × 60 年分 = 5,400 アンサンブルメンバ)がある。

過去実験の場合、観測された SST に50の摂動を組み合わせて、50メンバの1950年9月～2011年8月の60年分のアンサンブルメンバ(50メンバ × 60年分 = 3,000 アンサンブルメンバ)がある。

CMIP5	実験各略称	機関名
CCSM4	CC	アメリカ 大気科学研究所
GFDL-CM3	GF	アメリカ 地球物理流体学研究所
HadGEM2-AO	HA	イギリス 気象庁ハドレーセンター
MIROC5	MI	日本 海洋研究開発機構
MPI-ESM-MR	MP	ドイツ マックスプランク研究所
MRI-CGCM3	MR	日本 気象庁気象研究所



図付1 将来実験で使用する SST モデル



図付2 d4PDF における利用可能データ

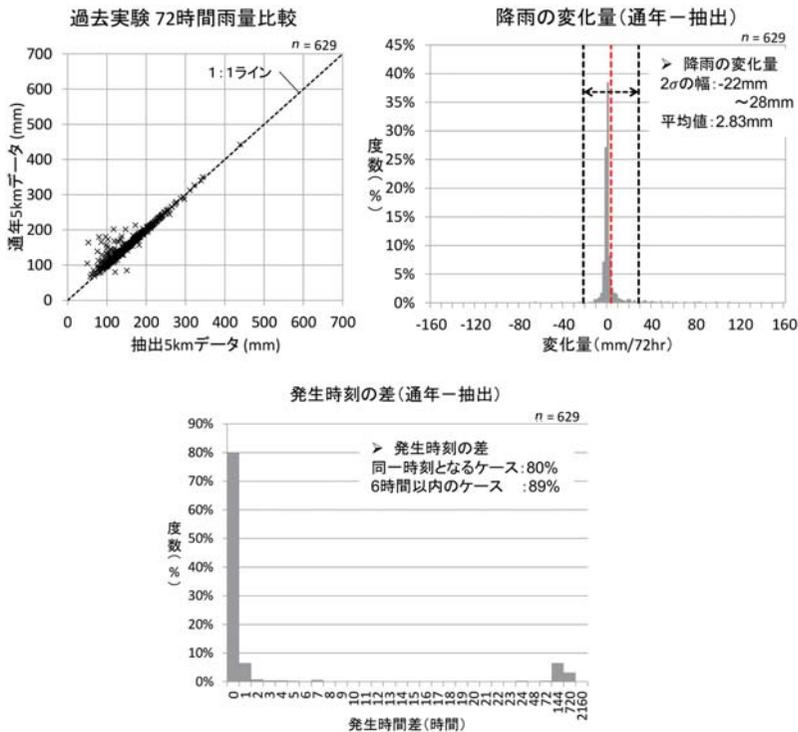
※出典：地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース d4PDF, <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/index.html>.
 文部科学省ほか, d4PDF 利用の手引き, 2015.12, <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/design.html>

通年ダウンスケーリング結果と抽出ダウンスケーリング結果の比較

降雨期間のみを抽出したダウンスケーリング（抽出 DS）の妥当性を確認するため、d4PDF の 20 km 領域モデル実験から、十勝川帯広基準地点の年最大 72 時間雨量が大きいケースのうち、過去実験 629 ケースを対象に通年期間でのダウンスケーリング（通年 DS）を実施した（図付 3）。

通年 DS および抽出 DS により作成した領域モデル実験データから整理した流域平均 72 時間雨量を同一ケースで比較すると、雨量の差は平均で約 3 mm、降雨の発生時刻は同一となるケースが約 8 割、6 時間以内となるケースが約 9 割となった。

通年 DS と抽出 DS とで年最大降雨が異なるケースは約 1 割程度であり、降雨量の変化の平均が 0 mm 付近であることから、降雨期間を抽出してダウンスケーリング計算を実施したことによる年最大降雨量の算出への影響は小さいと考えられる。



図付 3 72 時間雨量の差と降雨の発生時刻の差

流域平均雨量の算定方法

流域平均雨量はd4PDFの20kmまたは5kmメッシュを対象流域に重ね、流域に対する各メッシュの寄与率（面積割合）により重みづけをして算出している。具体的には、各メッシュの時間雨量に対象流域に該当する面積を乗じたものの総和をとり、対象流域面積で割ることによって求める（図付4）。



十勝川流域と d4PDF20km メッシュ

十勝川 5-7 番流域の例

$$\text{時間雨量算定式 } R_{5-7 \text{ 番流域}} = (R_{45129} \times A_{45129} + R_{45130} \times A_{45130} + R_{45450} \times A_{45450} + R_{45771} \times A_{45771}) / A_{5-7 \text{ 番流域}}$$

R : 時間雨量
添字 : d4pdf メッシュ番号 または 十勝川流域番号

図付4 流域平均雨量の算出

降雨の時空間特性の算出方法

●●● (1) 流域内各格子点上のハイトグラフの作成

初めに図付5³⁸⁾右上に示すような流域内の各格子点上でのハイトグラフを作成する。なお、図付5右上は十勝川流域における豪雨例を示しており、十勝川流域の格子点は合計で110点であり、同図の色付き線は110本描かれている。

●●● (2) 対象時間 n , 対象格子点数 m , 検出開始時間 s の設定

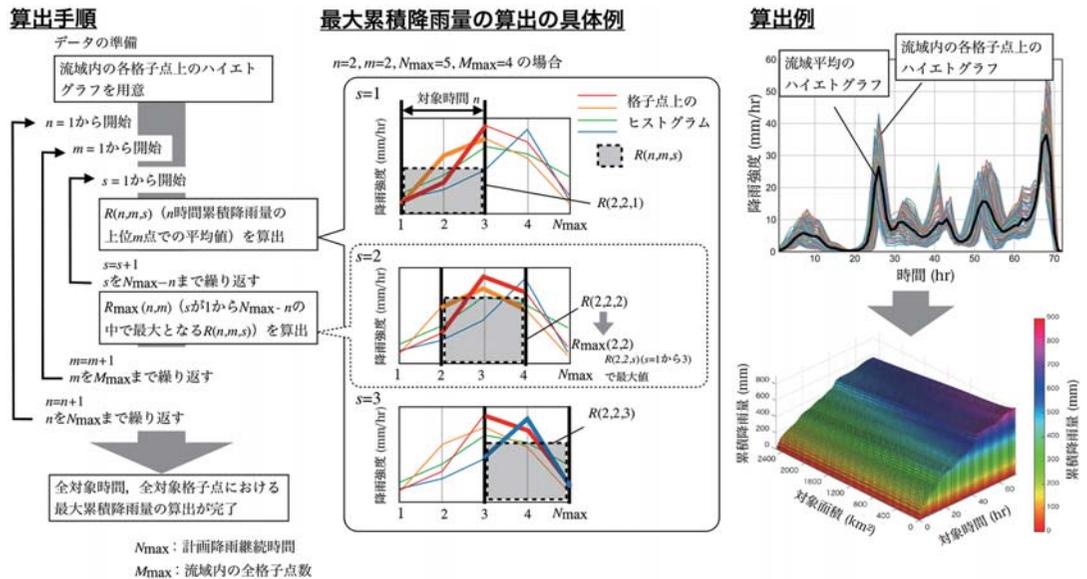
次に、1 から計画降雨継続時間 N_{\max} の間で対象時間 n を設定する。ここで設定した n が着目する時間スケールを意味する。また、1 から流域内格子点数 M_{\max} の間で対象格子点数 m を設定する。この m 格子点は着目する空間スケールを意味する。同様に1 から $N_{\max}-n$ の間で検出開始時刻 s を設定する。この s は連続した n 時間を設定する際の開始時間となり、1 から $N_{\max}-n$ の間で動かすことで全期間内を対象に累積降雨量が最大となる事例を検索する。

●●● (3) 所定の時間・面積における累積降雨量の最大値 $R_{\max(n,m)}$ の算出

n 時間累積降雨量の上位 m 格子点での平均値 $R_{(n,m,s)}$ を算出する。図中央に $R_{(n,m,s)}$ の算出例を示した。 s を1 から1 ずつ増加させ、 $N_{\max}-n$ まで繰り返し算出する。算出された同一 n, m での $N_{\max}-n$ 個の R のうち、最大値を対象時間 n , 対象格子点数 m (対象面積) での最大の降雨量 $R_{\max(n,m)}$ とする。

●●● (4) 繰り返し

n を1 から N_{\max} まで1 ずつ増加、 m を1 から M_{\max} まで1 ずつ増加させてこれを繰り返し計算することですべての n, m で $R_{\max(n,m)}$ が計算され、対象の降雨イベントの時空間的な特性 (累積降雨量, 対象時間, 対象面積の関係性) が計算できる。



図付5 降雨の時空間特性の算出手法 (対象の降雨イベントにおける、ある期間、ある面積における累積降雨量の最大値を算出)

確率密度関数

●●● (1) Gumbel 分布

Gumbel 分布として知られている最大値分布の第1型式は年最大洪水流量の分布関数としての有用性が知られて以来、水文統計解析で数多く適用されている。

Gumbel 分布の確率密度関数と分布関数は次式で与えられる。

$$f(x) = \frac{1}{a} \exp \left[-\frac{x-a}{a} - \exp \left(-\frac{x-c}{a} \right) \right] \quad (-\infty < x < \infty)$$

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-c}{a} \right) \right]$$

ここに、 c と a はそれぞれ、位置母数と尺度母数である。

●●● (2) GEV 分布 (一般極値分布)

Jenkinson (ジェンキンソン) は3種の極値極限分布を1つの式形に統一して、一般化極値分布 (GEV 分布) の導入を図った。イギリスの Natural Environment Research Council は、年最大日雨量の確率モデルにつき検討を行い、GEV 分布を基準法として推奨している。

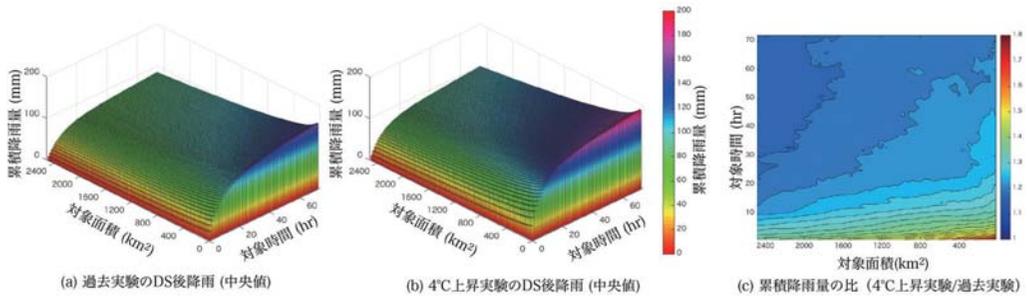
GEV 分布の分布関数は次式で定義される。

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k(x-c)}{a} \right]^{1/k} \right\} \quad (k \neq 0)$$

ここに、 $k > 0$ のとき、 $-\infty < x \leq c + (a/k)$ であり、 $k < 0$ のときは、 $c + (a/k) \leq x \leq \infty$ となる。 c と a はそれぞれ、位置母数と形状母数である。特に、 $k = 0$ のとき、Gumbel 分布に一致する。なお、GEV 分布の確率密度関数は上式から、 $f(x) = dF(x)/dx$ で求められる。

降水強度の頻度分布の変化および降雨の時空間的な集中化

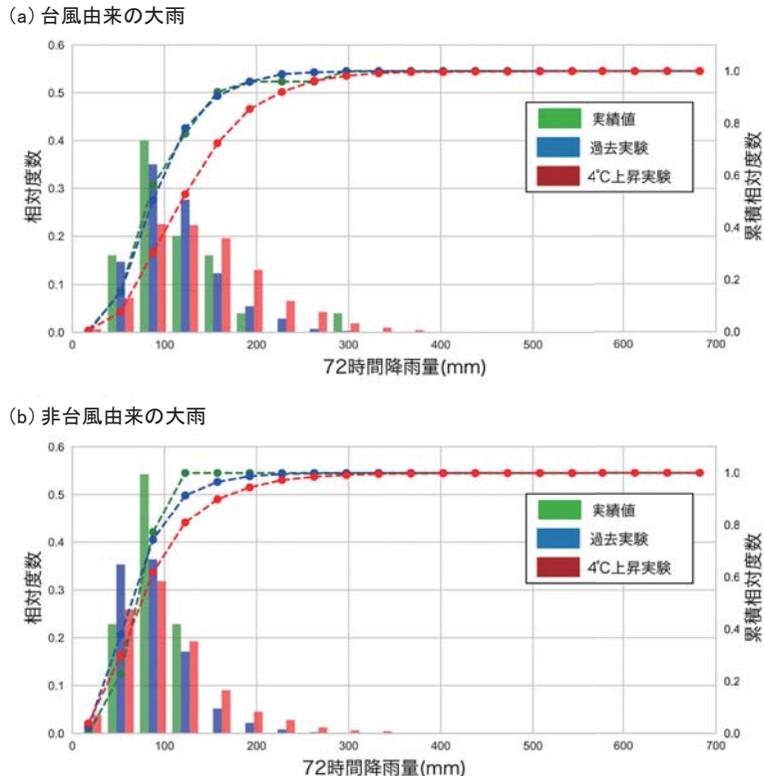
降雨の時空間的な特性を調べると、対象時間および対象面積を小さくするにつれ、将来実験における増加率は大きくなることがわかる (図付6)。流域平均72時間降雨量では1.2倍であったのに対し、対象時間が1時間、対象格子点が1点の降雨量は1.7倍となる。このような降雨の時空間的な集中化は洪水ピーク流量や洪水被害の形態の変化を招く可能性がある。



図付6 過去実験と将来実験における降雨の時空間特性

要因別の降雨量変化

十勝川帯広基準地点流域において台風に起因するか否かで分類し、降雨量の頻度分布を作成した(図付7)。年最大72時間降雨量をもたらす際に台風の中心が日本周辺域(東経130~150°, 北緯30



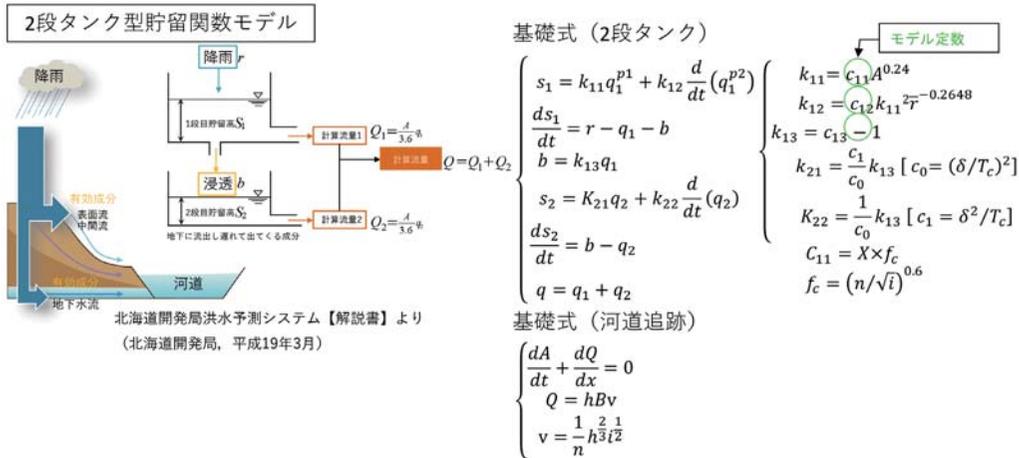
図付7 要因別の降雨の頻度分布(十勝川帯広基準地点流域)

～46.4°)を通過したものを台風由来の大雨, その他を非台風由来の大雨とした. なお, 台風の経路は Murakami et al. 2012 の基準により, 抽出されたデータを使用した. 降雨量は5 km にダウンスケーリングした結果である. 同図より, 要因によらず実績値と過去実験の降雨の頻度分布は近い傾向を示すことがわかり, 5 km へのダウンスケーリングにより降雨要因によらず観測実績に近い降雨量が得られることがわかる. また, 将来気候においてはどちらとも降雨量が増大しており, 降雨要因によらず降雨量が増大することがわかった.

分布型 2 段タンク貯留関数モデル

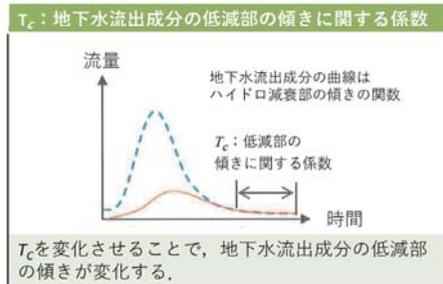
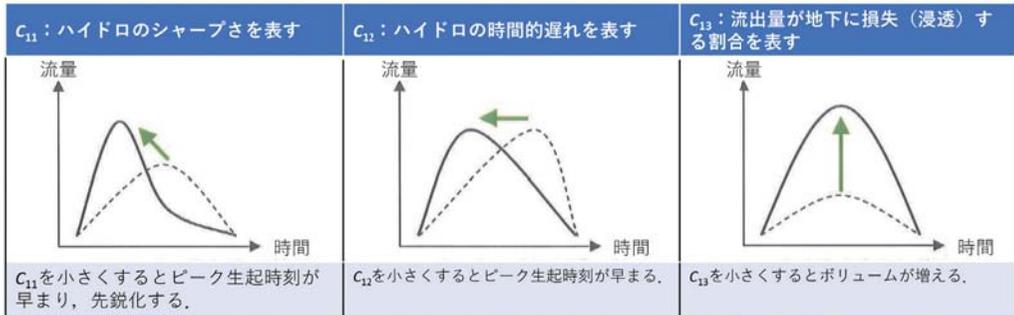
本検討で用いた2段タンク貯留関数モデルの概要を図付8に示す. モデルは, 表面流出および中間流出成分を非線形貯留方程式で表す上段タンク, 地下水流出成分を線形貯留方程式で表す下段タンクにより構成される. 雨水の流れ(河道追跡)には Kinematic wave 法が用いられる.

モデル定数 C_{11} , C_{12} , C_{13} および分離時定数 T_c の値の変化により, 算出される流量は図付9のように変化する.



s_1 : 1 段目タンク貯留高 (mm), s_2 : 2 段目タンク貯留高 (mm), r : 観測雨量 (mm/h), q : 全流出高 (mm/h), q_1 : 表面・中間流出高 (mm/h), q_2 : 地下流出高 (mm/h), b : 1 段目タンクから 2 段目タンクへの浸透供給量 (mm/h), k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22} : 貯留係数, k_{13} : 浸透係数, p_1 , p_2 : 貯留指数, A : 流域面積 (km^2), \bar{r} : 平均雨量強度 (mm/h), c_{11} , c_{12} , c_{13} : モデル定数 (未知定数), f_c : 流域粗度, N : 等価粗度 ($\text{s}/\text{m}^{1/3}$), i : 平均斜面勾配, $p_1=0.6$, $p_2=0.4648$, $\delta=2.1$, X : 未知定数, h : 水深 (m), B : 河道幅 (m), n : 河道粗度, i : 河道勾配

図付8 2 段タンク貯留関数モデルの概要



図付9 モデル定数および分離時定数と計算結果の関係

※出典：北海道開発局洪水予測システム【解説書】より（北海道開発局，平成19年3月）

参考文献

本 編

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report, 2013.
- 2) 文科省・気候変動リスク情報創生プログラム：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, <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/index.html>.
- 3) Sasaki, H. et al.: Reproducibility of Present Climate in a Non-Hydrostatic Regional Climate Model Nested within an Atmosphere General Circulation Model, *SOLA*, vol.7, 173-176, 2011.
- 4) 気象研究所：気象研究所非静力学地域気候モデルによる日本付近の将来気候変化予測について，気象研究所技術報告，第73号，2015.
- 5) Piani, C. et al.: Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, *Theoretical & Applied Climatology*, vol.99, 187-192, 2010.
- 6) (財)北海道河川防災研究センター・研究所：実時間洪水予測システム【解説書】，2004.
- 7) 土木学会水理委員会，水理公式集（平成11年版），1999.
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局，国土交通省河川砂防技術基準調査編および参考となる資料（平成24年6月改定版），2012.
- 9) 山田朋人，星野剛，舩屋繁和，植村郁彦，吉田隆年，大村宣明，山本太郎，千葉学，戸村翔，時岡真治，佐々木博文，濱田悠貴，中津川誠：北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化，土木学会河川技術論文集，第24巻，391-396，2018.
- 10) 星野剛，山田朋人：大量アンサンブル気候予測データを用いた年最大降雨の時空間特性の将来変化の把握—十勝川流域を対象として—，土木学会論文集G(環境)，Vol. 74, I_25-I_31, 2018.
- 11) H. Murakami, R. Mizuta, E. Shindo: Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60-km-mesh MRI-AGCM, *Clim Dyn*, Vol.39, 2569-2584, 2012.

参考 2

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007 Synthesis Report, 2008, <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>.
- 2) 社会資本整備審議会: 水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について (答申), 2008.6, http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/kikouhendou/pdf/toshintext.pdf.
- 3) (財) 国土技術研究センター: 欧米諸国における治水事業実施システム, 280-283 (※ 3), pp200 (※ 10), 202 (※ 11), 2001.2, http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/reports/autonomy/river/autonomy_kasen_01.pdf.
- 4) Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2014 Synthesis Report, 2015, <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 国総研プロジェクト研究報告, 第 56 号, 150-151, 2017.4, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryu/kpr/prn0056pdf/kp005607.pdf>.
- 6) THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL: DIRECTIVE 2007/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks, 2007.10, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32007L0060>.
- 7) COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES: WHITE PAPER Adapting to climate change Towards a European framework for action, 2009, [http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/com/com_com\(2009\)0147_/com_com\(2009\)0147_en.pdf](http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/com/com_com(2009)0147_/com_com(2009)0147_en.pdf).
- 8) de Moel, H. et al.: Flood maps in Europe—methods, availability and use, 291, 2009.3, <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/289/2009/nhess-9-289-2009.pdf>.
- 9) Rijkswaterstaat: Watersnoodramp 1953, <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/watersnoodramp-1953/index.aspx>.
- 10) Rijkswaterstaat: De Deltawerken, <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/waterkeringen/deltawerken/index.aspx#217541>.
- 11) Rijkswaterstaat: Maeslantkering, <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/waterkeringen/deltawerken/maeslantkering.aspx>.
- 12) Kind, J.M.: Economically efficient flood protection standards for the Netherlands, *Journal of Flood Risk Management*, 7, 104, 2014, https://www.deltares.nl/app/uploads/2014/12/kind2014_JFRM1.pdf.
- 13) Rosenthal, U. et al.: Flood Emergency Management in Developed Countries: The experience of 1993, 1995 and 1997 in Europe.
- 14) van Duin, M.J. et al.: Evacuation in case of extreme water levels, self reliance and care of authorities, 1995.
- 15) Rijkswaterstaat: Room for the River for a safer and more attractive river landscape, <https://www.ruimtevoorderivier.nl/english/>.
- 16) Gemeente Nijmegen & i-Lent: Ruimte voor de Waal Nijmegen, <http://www.ruimtevoordewaal.nl/en/room-for-the-river-waal>.
- 17) The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs: The 2011 Delta Programme, 2010.9, <https://english.deltacommissaris.nl/documents/publications/2010/09/14/2011-delta-programme>.
- 18) The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs: Delta

- Programme 2019, 2018.9, <https://english.deltacommissaris.nl/delta-programme/delta-programme-2019>.
- 19) The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs: National Water Plan 2016–2021, 表紙 (※ 21), 14 (※ 26), 2015.12, <https://www.government.nl/documents/policy-notes/2015/12/14/national-water-plan-2016-2021>.
 - 20) KNMI: KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands, 2006.5, <http://www.klimaatsscenarios.nl/knmi06/WR23mei2006.pdf>.
 - 21) The ministry of infrastructure and the environment: KNMI'14 Climate Change scenarios for the 21st Century—A Netherlands perspective, 表紙 (※ 23), 16 (※ 30) 2014.5, <http://bibliotheek.knmi.nl/knmipubWR/WR2014-01.pdf>.
 - 22) The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs: Delta Programme 2015, 17&23 (※ 28), 136 (※ 24), 152–167 (※ 27), 2014.9, <https://english.deltacommissaris.nl/documents/publications/2014/09/16/delta-programme-2015>.
 - 23) The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs: Delta Programme 2014, 83, 2013.9, <https://english.deltacommissaris.nl/delta-programme/documents/publications/2013/09/17/delta-programme-2014>.
 - 24) van Alphen, J.: The Delta Programme and updated flood risk management policies in the Netherlands, 9, 2016.7.
 - 25) Deltares & KNMI: Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas? Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van nieuwe klimaatprojecties voor rivierafvoeren, 15, 2015.9.
 - 26) Jongejan, R.B. et al.: The potential use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 1): Basic principles, 2093 (※ 32), 2094 (※ 42), 2010.
 - 27) Jonkman, S.N.: Loss of life estimation in flood risk assessment Theory and applications, 198 (※ 33), 206 (※ 38), 209 (※ 39), 2007.6.
 - 28) Maaskant, B. et al.: Analyse slachtofferaantallen VNK-2 en voorstellen voor aanpassingen van slachtofferfuncties, 4–40, 2009.1.
 - 29) Clausen, L. et al.: The development of criteria for predicting dambreak flood damages using modelling of historical dam failures, 369–380, 1990.
 - 30) Waarts, P.H.: Methoden voor de bepaling van het aantal doden als gevolg van inundatie, 1992.
 - 31) McClelland, D.M. et al.: Estimating life loss for dam safety risk assessment – a review, 2002.
 - 32) Ministerie van Verkeer en Waterstaat: Flood Risks and Safety in the Netherlands (Floris) – Full report, 2005.11, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:60751ba9-2271-404a-8fdd-518cd7af0715?collection=research>.
 - 33) Rijkswaterstaat VNK Project Office: The National Flood Risk Analysis for the Netherlands FINAL REPORT, 100–101, 2016.4, https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/Eindrapport%20Veiligheid%20Nederland%20in%20Kaart_tcm21-63921.pdf.
 - 34) 国土交通省水管理・国土保全局：水害の被害指標分析の手引き (H25 試行版), 23–25, 2013.7.
 - 35) 池内幸司ら：大規模水害時の氾濫形態の分析と死者数の想定, 139, 2011.
 - 36) 中央防災会議「大規模水害対策に関する専門調査会」：第 11 回専門調査会資料 1, 2, 2008.
 - 37) Kolen, B. et al.: Time needed to evacuate the Netherlands in the event of large-scale flooding—Strategies and consequences, 2012.

付 録

- 38) 星野剛, 山田朋人: 大量アンサンブル気候予測データを用いた年最大降雨の時空間特性の将来変化の把握—十勝川流域を対象として—, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 74, I_25-I_31, 2018.

おわりに

近年、大雨に起因する洪水、土砂災害が全国的に毎年発生している。北海道では線状降水帯や台風による豪雨が頻発しており、その傾向の変化も指摘されている。この一方で、地球温暖化が進行した際の年最大クラスの降水量は全国的に増加し、その増加率は北日本においてより大きいことが複数の予測結果から示されており、北海道は気候変動下に適応した洪水対策の必要性の高い地域であるといえる。このため今後の洪水対策を考える上で、将来の洪水リスクをいかに評価するかが重要かつ喫緊の課題である。

近年、膨大な気候シミュレーションにより作成された大量アンサンブル気候データベース (d4PDF) が文部科学省の研究プロジェクト (SOUSEI, TOUGOU, SI-CAT, DIAS) や JAMSTEC 地球シミュレータ特別推進課題によって作成され、過去の気候や温暖化進行時の気候における数千年分の気象データに基づき災害につながる低頻度の気象現象の発生頻度を評価することが初めて可能となった。これは、非線形力学系において有界性 (boundedness) を踏まえた検討と解釈できる。洪水リスクの評価にこのデータを用いる利点は大きく分けて2つある。

1つは確率雨量の不確実性の評価を可能とすることである。大量のアンサンブルデータを用いることで、気候システムの自由度を力学モデルに基づいて考慮した確率雨量の推定が可能となる。これを過去の気候と温暖化進行時に予測される将来の気候での確率雨量の推定に適用することで、将来の洪水リスクが従来の気候の中でどのような意味を有するのか評価できる。

もう1つの利点として、降雨の時空間パターンを踏まえた洪水リスクの評価を可能とする点が挙げられる。大量のアンサンブルデータ内には同程度の流域平均雨量であっても様々な降雨の時空間分布が含まれており、それらは洪水被害の程度に甚大な影響をもたらすことから、洪水リスクの評価において重要となる。また、これは様々な被害形態の想定を可能とすることから、具体的な洪水対策を考える上でも不可欠である。

このように大量アンサンブルデータの利用は洪水リスク評価に新たな視点を加えうるものである。これは気候変動後の洪水リスクのみならず、観測実績に基づいて設定される確率雨量の不確実性の評価をも可能とするものであり、確度を有する膨大な情報を利活用できれば専門家による判断を押し上げるものとなろう。本書に記載した検討内容は大量アンサンブルデータを用いた洪水リスクの評価手法を提案し、過去と温暖化進行時の気候条件下で同手法を適用することで洪水リスクの将来変化を把握するものである。これにより、過去の大雨事例からの洪水外力に加えて、最新の気候シミュレーションに基づく科学的知見に立脚した洪水外力の設定を可能とする。本書には記載していないが、力学的手法による確率雨量の不確実性は新しい極値統計理論によっても支持される結果が得られている。また、本書は平成29年度時点で実施した際の検討内容を記すものであるが、同検討は令和元年7月現在も前進しており、平成30年4月より開始された国土交通省「気候変動を

踏まえた治水計画に係る技術検討会」においても結果の一部が紹介されている。

最後に、本検討は過去の観測実績という決定論的情報（観測実績にも観測場所・観測手法等の確率論的性質は存在するが）とアンサンブル力学的手法による確率論的情報が融合されたものであり、考え方の本質はアインシュタインとボーアの論争に端を発する。本書に記載の考え方を推し進めつつ、今後の治水・地域づくりの在り方を前進させることができれば幸いである。

北海道大学大学院工学研究院 山田朋人

謝 辞

本書に記載した内容の検討を進める過程で、技術検討委員会をはじめ多くの方々の技術指導・協力をいただきました。また、本検討は文部科学省 SI-CAT（気候変動適応技術社会実装プログラム）および平成29年度地球シミュレータ特別推進課題の支援を受けて実施された検討内容を使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

技術指導・協力をいただいた方々

〈平成29年度 北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会〉

委員長

中津川誠 室蘭工業大学

委員

稲津 将 北海道大学

関 克己 京都大学

鼎信次郎 東京工業大学

立川康人 京都大学

佐々木秀孝 気象研究所

船木淳悟 寒地土木研究所

佐藤友徳 北海道大学

山田朋人 北海道大学

アドバイザー

山田 正 中央大学

オブザーバー

藤川典久 気象庁

岡下 淳 北海道開発局

服部博和 気象庁

石塚宗司 北海道開発局

榎本 弘 気象庁

大東淳一 北海道開発局

〈意見交換会等〉

中北英一 京都大学防災研究所

柳澤 修 国土技術研究センター

野田 徹 国土技術研究センター

岡部真人 国土技術研究センター

湧川勝己 国土技術研究センター

〈オランダ技術交流〉

Jos van Alphen デルタ委員会事務局

Van Mulligen オランダ公共事業局

Martijn Looijer デルタ委員会事務局

Eric Sprokkereef オランダ公共事業局

Ruud Staverman オランダ公共事業局

Bart van den Hurk オランダ気象庁 KNMI

Jules Beersma オランダ気象庁 KNMI

Rob van DorLand オランダ気象庁 KNMI

S.N. (Bas) Jonkman デルフト工科大学

Bas Kolen HKV コンサルタント

Bob Maaskant HKV コンサルタント

Ruben Jongejan ヨンヘヤン RMC

Assela Pathirana IHE デルフト水教育研究所

〈翻訳〉

正城麻紀 オランダ在住通訳

サムナー圭希 株式会社水工リサーチ

※所属・職位は平成29年度時点

気候変動を踏まえた新しい洪水リスク解析
[降雨・流量編]

2019年 8月31日 発行

監 修 国土交通省北海道開発局, 北海道,
北海道大学

発行所 北海道河川財団
〒060-0807 北海道札幌市北区北7条西4丁目5-1
伊東110ビル
電話 (011) 729-8141
<http://www.ric.or.jp/>



気候変動を踏まえた
新しい洪水リスク解析
[降雨・流量編]