

オランダの治水分野における気候変動適応策の 検討・実施状況に関する調査報告

RESEARCH REPORT ON EXAMINATION AND IMPLEMENTATION STATUS OF CLIMATE CHANGE ADAPTATION IN THE FIELD OF FLOOD CONTROL IN THE NETHERLANDS

千葉学¹・戸村翔¹・山本太郎¹・植村郁彦²・舩屋繁和³・吉田隆年³・大村宣明³
時岡真治⁴・佐々木博文⁴・濱田悠貴⁴・星野剛⁵・山田朋人⁵・中津川誠⁶
Manabu CHIBA, Sho TOMURA, Taro YAMAMOTO, Fumihiko UEMURA, Shigekazu MASUYA,
Takatoshi YOSHIDA, Noriaki OOMURA, Shinji TOKIOKA, Hirofumi SASAKI, Yuki HAMADA,
Tsuyoshi HOSHINO, Tomohito YAMADA and Makoto NAKATSUGAWA

¹一般財団法人 北海道河川財団 企画部 (〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目5-1 伊藤110ビル)

²(株) ドーコン 水工事業本部 河川環境部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

³(株) ドーコン 水工事業本部 河川部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

⁴国土交通省北海道開発局 建設部 河川計画課 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

⁵北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁶室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

This report focuses on the Netherlands in which consistent efforts are under progress, including concrete climate change adaptation measures such as infrastructure development improvement in flood control projects. In order to grasp the progress from examination history to latest trends, we conducted a document survey and interviewed government officials, experts of flood risk assessment, and others. As a result, we got several new findings that give important implications when we consider climate change forecasts and adaptation measures in Japan such as the method of setting four scenarios of climate change forecasting, the estimation method of loss of life and economic risk in flood risk assessment, setting of tolerance on human risk, cooperation beyond organization, and so on.

Key Words : *Climate change, Flood risk assessment, Loss of life Estimation, Netherlands*

1. はじめに

平成28年8月、北海道において観測史上初めて1週間に3個の台風が上陸し、さらに台風10号の接近により、全道各地で甚大な被害が発生した。これを受け、「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」が設置され、気候変動を考慮した治水計画の必要性が提言された¹⁾。この提言を受け、北海道では将来の降雨予測計算に基づく河川流量と氾濫リスクの変化について大規模アンサンブルデータを用いた検討^{2) 3) 4)}が進められているところであるが、参考とすべき検討事例は国内における報告は数少ない。

我が国では、2007年気候変動に関する政府間パネル(IPCC) 第4次評価報告書を踏まえ、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)より「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」が答申され⁵⁾、その後影響評価等に関する調査研究がいくつか進められてきたが、水災害分野におけるリスクの定量的な把握や具体的な適応策の展開には至っていない。

一方、諸外国においては先進的な取り組みがいくつか報告されている。諸外国の取り組みは気候変動予測の更新や社会情勢の変化に基づき年々進歩を遂げており、継続して最新動向を調査する必要がある。

2007年IPCC第4次評価報告書および2013年IPCC第5次評価報告書を受けて、イギリス、オランダ、アメリカなど欧米諸国を中心に先進的な気候変動適応策が展開されている。先進事例の中から、将来の降雨予測から河川流量及び氾濫リスク増加の推定、適応計画の策定及び法整

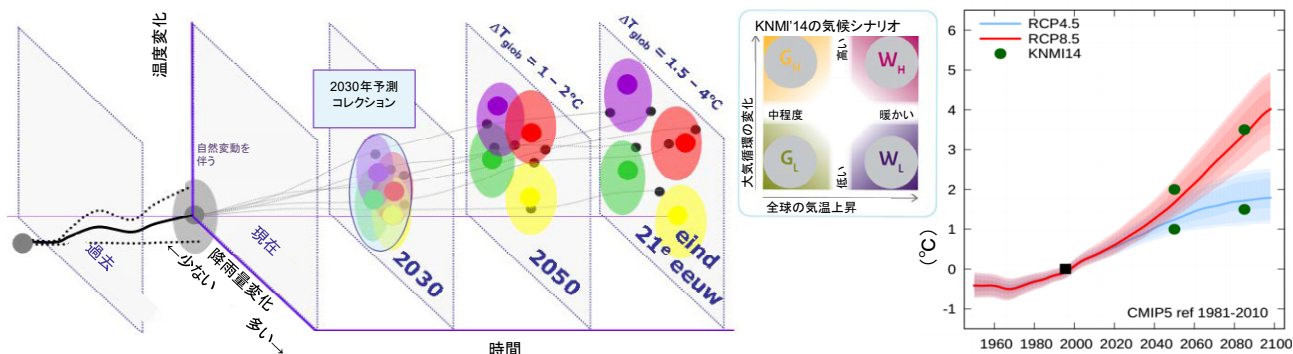


図-1 KNMI'14におけるシナリオ分類（左，中），RCPシナリオとの全球平均地上気温の比較（右）⁷⁾

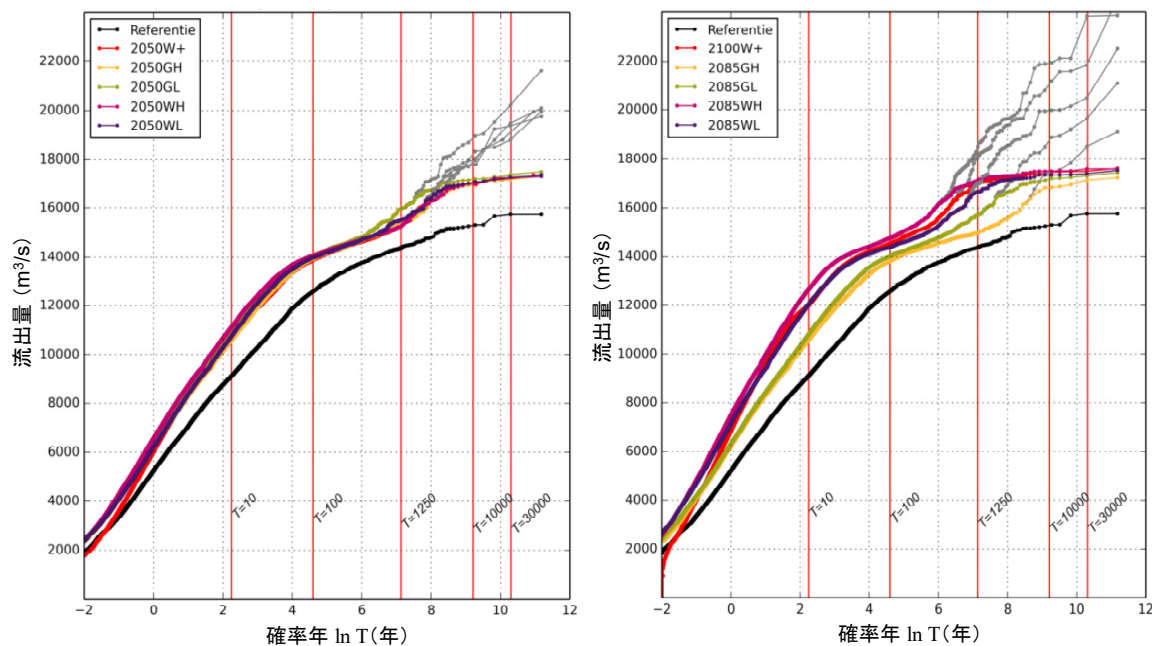


図-2 ライン川ロビス地点の流量確率の将来予測（左：2050年，右：2085年）⁸⁾
 (SOBEKモデルによる。灰色線は上流のドイツでの越流がない場合)

備、治水事業におけるハード整備等の具体的な適応策に至るまで一貫した取り組みが進められているオランダに着目し、検討経緯から最新の動向まで把握すべく、資料調査及び現地関係者・有識者の聞き取り調査を行った。

調査対象は、オランダの治水分野における気候変動適応策に関わる報告及び計画文書（気候変動予測KNMI'06及びKNMI'14、リスク評価報告The National Flood Risk Analysis for the Netherlands、デルタプラン、デルタプログラム2011～2017等）及び関連する論文・報告等の資料調査とともに、これらの策定に携わった機関のうち、オランダ王立気象研究所、デルフト工科大学及びHKVコンサルタント、デルタ委員事務局、公共事業・水管理局の関係者・有識者らを対象とした。

2. オランダにおける気候変動予測

オランダ王立気象研究所（Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 以下KNMI）は、日本の気象庁に相当

する組織である。KNMIは、2006年にIPCC第4次評価報告書に基づく気候変動予測KNMI'06⁶⁾を、2014年にIPCC第5次評価報告書に基づく気候変動予測KNMI'14⁷⁾を公表した。KNMI'14では、第5期結合モデル相互比較計画CMIP5における各国の245アンサンブルの予測を用い、2050年時点の温度上昇および大気循環の強弱によって分類し、独自の4つの気候変動シナリオG_L、G_H、W_L、W_Hを設定している（図-1）。

KNMIは気候変動予測だけでなく、主要河川における将来の流量予測も行っており、オランダ国土を貫流する国際河川であるライン川において、4つの気候変動シナリオ下における将来の流量を予測⁸⁾している（図-2）。

2050年の予測ではシナリオによる差は小さいが、2085年はシナリオによって異なる予測となっており、全てのシナリオを包括する目標値として18,000m³/sを採用している。

なお、ライン川の流量予測においては、国境より上流のドイツにおける氾濫を考慮し、流量を低減している。

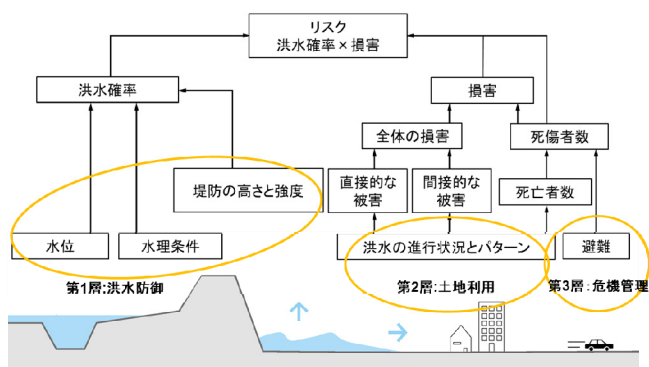


図-3 リスクベース・アプローチの概略図⁹⁾

表-1 重層的リスク管理の概要¹⁰⁾

	各層の詳細	オランダで実施されている対策
第3層: 危機管理	●あらゆる洪水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	・洪水警報 ・リスクマップ ・ハザードマップ ・「アフリ」浸水するの? (Overstroom ik?) ¹⁴⁾ など
第2層: 土地利用	●洪水被害を抑制する土地利用 氾濫流の抑止 土地利用など	・土地利用計画 ¹²⁾ (Land use planning) ・建築基準法 ¹²⁾ (Building codes) ・耐水建築物 ¹²⁾ (Water proof building) など
第1層: 洪水防御	●予防策を実施する洪水防御 最優先 洪水防御基準を満たすために、 定期点検(6年毎)、ハード対策の実施 ¹⁵⁾	・砂浜の形成(Sand Motor) ・防波堤や高潮堰、堤防の建設 ・河川空間拡張プロジェクト (Room for the River) など

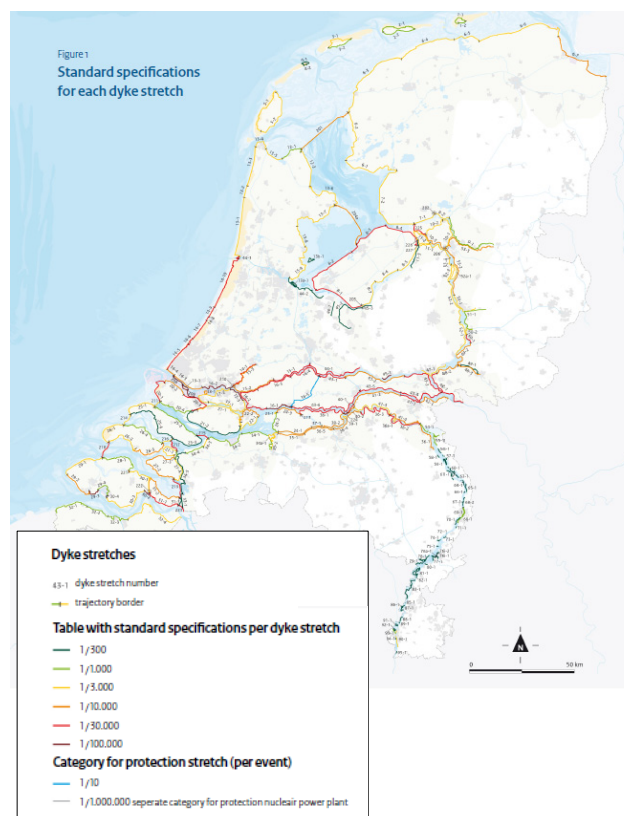


図-4 新しい洪水防御基準¹³⁾

3. オランダにおける洪水リスク評価

欧州においては、2007年EU洪水指令¹¹⁾では洪水リスクの評価・管理の法的枠組みが与えられ、2009年EU白書¹²⁾で気候変動影響を考慮することが明確に示された。

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次デルタ委員会が発足、2010年からデルタプログラムが開始された。デルタプログラムは現在及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開始された計画である。EU洪水指令で求められた洪水リスク管理と水資源の維持のための淡水供給がデルタプログラムの2つの目標とされている。

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、内閣は国家水計画に組み込んだ。2017年1月、政府は新しい洪水防御基準を導入し、2050年までに新しい洪水防御基準を満たすように洪水防御システムが設計されることとなっている。

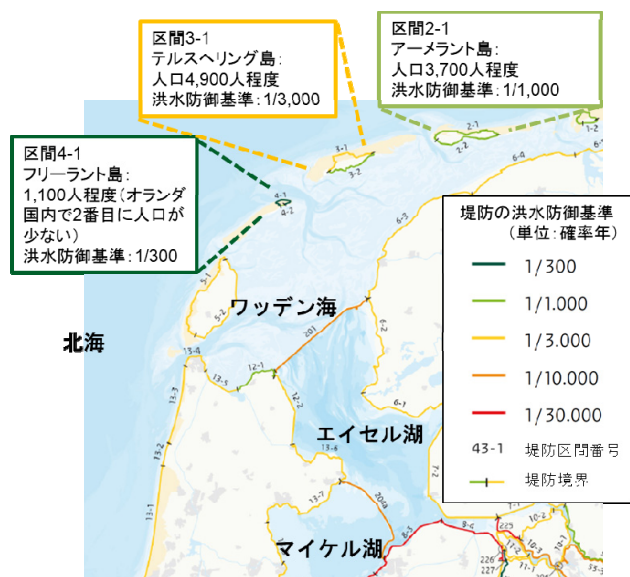
KNMIは気候変動予測に基づいて将来の降雨量と河川流量を予測しているが、デルタプログラムは2100年あるいは2085年の予測値を参考に、“too little too late” (少なすぎ、遅すぎ) とならないよう、2050年までに事業を実施し、リスクを低減させることを目指している。

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。KNMIが予測する最新の気候変動シナリオに基づいて検討されており、デルタプログラム2011からKNMI'06のシナリオを元に検討が進められてきた。

デルタプログラム2014からは最新のKNMI'14が考慮されているが、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のシナリオを基に検討が続けられている。仮に2つの予測結果が大きく異なっていたら、最新のKNMI'14の予測値に基づいて検討を進めた、とのヒアリング結果(デルタ委員)を得た。

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、特定事象の発生確率、すなわち洪水発生確率と、それによって引き起こされる被害のかけあわせである(図-3)。リスクベース・アプローチを適用することで、洪水による国民の死亡率を年間10万人に1人以下とすることを目標としている。

対策は重層的洪水リスク管理¹⁰⁾により講じる(表-1)。重層的洪水リスク管理とは3階層の対策でリスク低減を図るリスク管理の概念である。堤防の安全基準を満たすために最優先は第1層: 予防策による洪水防御であり、堤防の洪水防御基準¹⁵⁾を満たすため、ハード対策が行われている。洪水防御基準とは、従来の基準が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、新基準は堤防の滑りやパイピング等による決壊を含む洪水発生確率であり、堤内地の人的・経済的リスク、洪水・高潮の予測精度や避難の可能性を考慮して地域毎に設定された(デルタ委員ヒアリング結果)。



区間	洪水防御基準 (洪水発生確率)	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.

図-5 新しい洪水防御基準 (オランダ北部の例) ^{10) 13)}

例としてオランダ北部の島々を見ると、堤防区間4-1（フリーラント島）、堤防区間2-1（アーメラント島）、堤防区間3-1（テルスヘリング島）は、洪水防御基準が低く設定されている（図-5）。これは、人口が少ないことや島外への避難が困難であることから減災対策を重視する等、地域の状況を考慮しているものと思われる。ハード整備を実施し、新しい洪水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。

2015年デルタ決定を受け、国家水計画¹³⁾が決定された。この中で、2050年までに洪水による国民の死亡率を年間10万人に1人以下とすることが目標設定され、堤防の洪水防御基準が適用された（図-4）。

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100万人に1人以下となっており、非常に厳しいリスクレベルとなっているのに対し、治水分野の許容リスクは年間10万人に1人以下となっている（図-6）。年間100万人に1人以下に設定した場合、50億ユーロ（6,600億円）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、年間10万人に1人以下の個人リスクを設定したとのことである（デルタ委員、HKVコンサルタントヒアリング結果）。

1haあたりの年間経済損失を示す経済的リスクとしても、新しい洪水防御基準を満たすようにハード整備が実

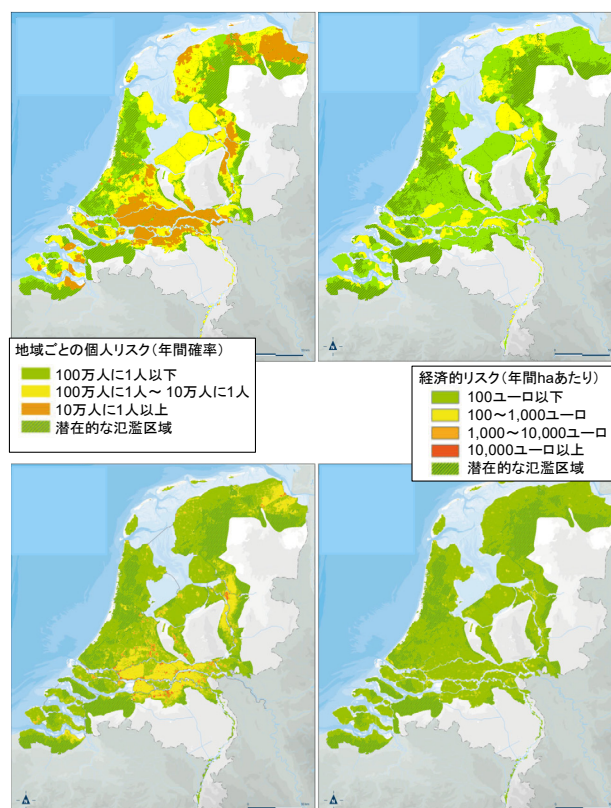


図-6 地域ごとの個人リスク(上)と経済的リスク(下) ¹⁴⁾

(左：現状のままの2050年，右：新しい洪水防御基準を満たした場合の2050年)

施された場合、2050年には経済的リスクの総額が1/20に低減することができる。

なお、これらのリスク評価にあたっては、河川増水や高潮が重複して発生する厳しい想定に基づいているようであるが、詳細については不明でありさらなる調査が必要である。

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度に、大規模なプロジェクトを計画し、ハード整備を実施することで、国土を守り、独自の合意形成を行ってきた。そして、2007年のEU洪水指令¹¹⁾を契機に、欧州では「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、先進的な洪水リスク管理を行い、具体的な数値目標（許容リスク：年間10万人に1人以下の死亡率）を決定し、「too little too late」（少なすぎ、遅すぎ）を避けるため早期の対策を講じている（デルタ委員ヒアリング結果）。

我が国の災害対策あるいは治水対策は、想定される災害をベースに行われる「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。オランダでは地域毎のリスクを把握することで、対策の優先順位付けが可能となったとの見解（デルタ委員へのヒアリング）を得たことから、今後我が国においても、オランダを始めとする欧州のリスクベースの考え方を参考にリスクを評価し、対策を講じていくことが望ましい。

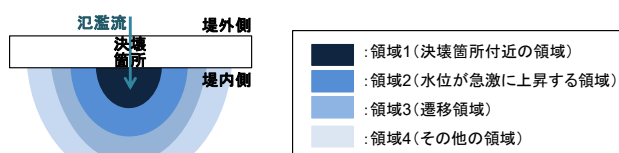


図-7 死亡率算定における領域区分イメージ

4. オランダにおける人的リスクの算定方法

オランダでは人的リスクと経済的リスクの両方を算定し、公表している。人的リスクとは想定される死者数を示し、洪水リスク分析の上で定量的な算定が行われている。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。本調査では、主に死亡率の算定方法に関して調査することとし、デルフト工科大学教授 S. N. (Bas) Jonkman, HKVコンサルタン トBas Kolen, Bob Maaskantらにヒアリングを実施した。

洪水による死亡率は、2007年にJonkmanがアメリカやイギリス、オランダ、日本の過去の水害データを用い、流速・水位上昇率・水深等を考慮して3領域の区分で算定する手法を開発¹⁵⁾し、2009年にMaaskantらがこれを改良¹⁶⁾し、4領域区分に拡張した。ここではMaaskantらの4領域の方法を概説する。4領域の場合、下記の算定式および死亡率関数により、死亡率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 = 洪水死亡率、 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：

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

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

【領域2】水位上昇率が高い領域：

$$h \cdot v < 7 \text{ m}^2/\text{s} \text{ または } v < 2 \text{ m/s}, h \geq 2.1 \text{ m} \text{ かつ } w \geq 4 \text{ m/hr}$$

$$F_{D,S}(h) = \Phi_N \left(\frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N} \right) \quad \mu_N = 1.46, \sigma_N = 0.28$$

【領域3】遷移領域： $h \cdot v < 7 \text{ m}^2/\text{s}$ または $v < 2 \text{ m/s}$,

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

$$F_D(h) = F_{D,0} + (w - 0.5) \left(\frac{F_{D,S} - F_{D,0}}{3.5} \right)$$

【領域4】水深が支配的な領域： $w < 0.5 \text{ m/hr}$ または

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

$$F_{D,0}(h) = \Phi_N \left(\frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N} \right) \quad \mu_N = 7.60, \sigma_N = 2.75$$

高速流を特徴とする【領域1】では、Jonkmanは水深・流速と死亡率を直接結び付けることは難しいとし、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、流

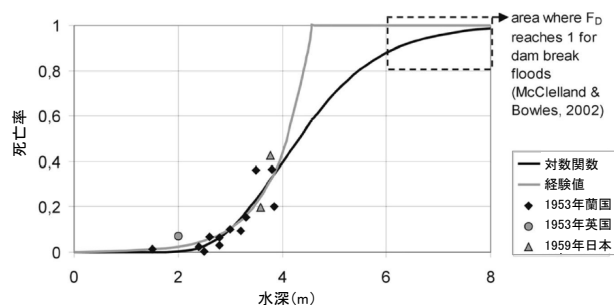


図-8 水位上昇率が高い【領域2】での死亡率 (0.5m/hr)¹⁵⁾

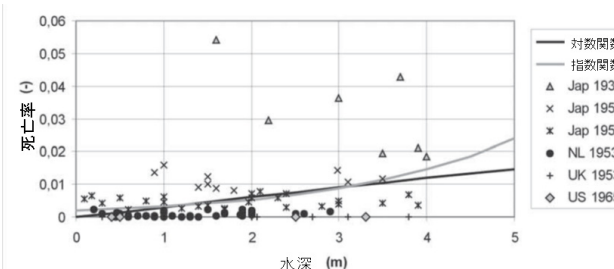


図-9 水深が支配的な【領域3】での死亡率¹⁵⁾

体力 $7 \text{ m}^2/\text{s}$ 以上の時に建物が倒壊し、流速 2 m/s の時に部分的な損壊あるいは倒壊が起こるとする倒壊基準を用いている。なお、この倒壊基準はレンガおよび石造りの家屋を想定しており、現在の水準に合わせる必要がある。

【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。この領域の死亡率関数の推定には、1953年イギリス・オランダの北海高潮、1959年伊勢湾台風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を考慮している。

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、1950年ジェーン台風、1959年伊勢湾台風、1953年イギリス・オランダの北海高潮、1965年ハリケーン・ベッツィ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。

これらの基礎研究に基づき、2001年にオランダ公共事業局は、堤防の弱部を見極め、洪水確率（堤防の決壊確率）と洪水の影響を把握することを目的に、「Flood Risks and Safety in the Netherlands（通称Floris、オランダの洪水リスクと安全性）」プロジェクトを開始し、評価結果を2005年に公表した。さらに更新版となる第2期についても2009年に開始し、2014年に結果公表している。

2001年以前は超過確率のみの評価だったが、Florisプロジェクトでは越流・越波、侵食、すべり、パイピングの4通りの堤防決壊メカニズムを考慮して確率的に評価し、各堤防の洪水確率を決定¹⁷⁾した（図-10、図-11）。

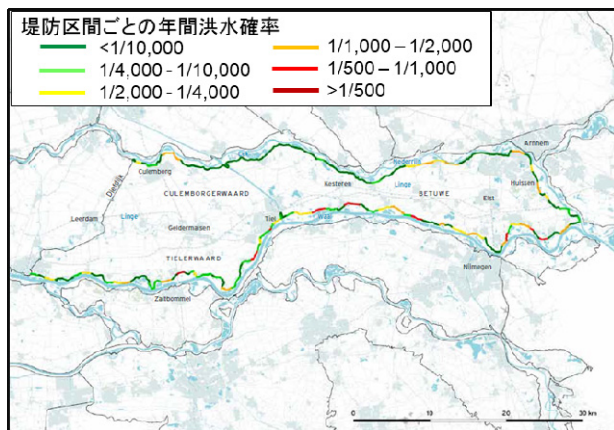


図-10 堤防区間ごとの年間洪水確率（決壊確率）¹⁷⁾
(ベートウヴェ/ティール-レムボルガー地区)

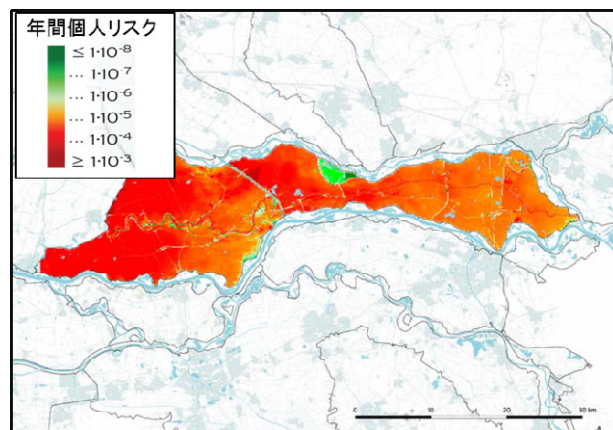


図-11 年間の個人リスク¹⁷⁾
(ベートウヴェ/ティール-レムボルガー地区)

5. おわりに

本調査においては、オランダにおける気候変動影響予測と氾濫リスク評価に関して資料調査及び聞き取りを行い、検討の基礎となる気候変動予測の4シナリオの設定方法、氾濫リスク評価における人的及び経済的被害の推定方法、人的リスクに関する許容値の設定など、我が国の気候変動予測と適応策検討に際して重要な示唆を与える複数の知見を得た。

これらの先進的な知見を参考として、我が国においても気候変動の影響予測や適応策検討の発展が望まれる。また、オランダの各機関のヒアリング時には、北海道における将来の降雨予測計算に基づく河川流量と氾濫リスクの検討^{2) 3) 4)}に関しても意見交換を行い、力学的シミュレーションを用いた大量アンサンブルに基づく確率評価について高い評価を得た。両国の治水技術の発展に資するべく、継続的な協力関係を築いていきたい。

謝辞：本調査にあたっては、一般財団法人国土技術研究センター 湧川 勝己氏、オランダ王立気象研究所 Bart J. J. M. fan den Hurk教授、Jules Beersma氏、デルタ委員事務局 Jos van Alphen氏、Martijn Looijer氏、デルフト工科大学 S. N. (Bas) Jonkman教授、HKVコンサルタント Bas Kolen氏、Bob Maaskant氏、ヨンヘヤンRMC Ruben Jongejan氏、公共事業・水管理局 Ruud Staverman氏、Eric Sprokkereef氏、Ellen van Mulligen氏らから数多くの情報提供とご助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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：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，2017
- 2) 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：【最終とりまとめ資料】，2018
- 3) 長谷川ら：実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく年最大流域平均雨量の算定，土木学会第73回年次学術講演会講演概要集，2018

- 4) 戸村ら：オランダにおける洪水時の想定死者数の算定方法と日本への適用に関する考察，土木学会第73回年次学術講演会講演概要集，2018
- 5) 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) KNMI：KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands, 2006
- 7) KNMI：KNMI'14:Climate Change scenarios for the 21st Century - A Netherlands perspective, pp16, 2014
- 8) KNMI, Deltares：Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas?, pp15, 2015
- 9) The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs：Delta Programme 2014:Work on the delta, pp36, 2013
- 10) The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs：Delta Programme 2015：Working on the delta, pp14, 2014
- 11) The European Parliament and the Council of the European Union：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
- 12) Commission of the European Communities：WHITE PAPER Adapting to climate change: Towards a European framework for action, 2009
- 13) The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs：National Water Plan 2016-2021, pp14, 2014
- 14) Van Alphen, J.: The Delta Programme and updated flood risk management policies in the Netherlands, pp9, 2016
- 15) Jonkman, S. N.: Loss of life estimation in flood risk assessment Theory and applications, 2007
- 16) Maaskant, B. et al.: Analyse slachtofferaantallen VNK-2 en voorstellen voor aanpassingen van slachtofferfuncties, 2009
- 17) Ministerie van Verkeer en Waterstaat: Flood Risks and Safety in the Netherlands(Floris) Floris study – Full report, 2005

(2018. 4. 3受付)