

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（第2報）

RESEARCH REPORT ON EXAMINATION AND IMPLEMENTATION STATUS
OF CLIMATE CHANGE ADAPTATION IN THE FIELD OF
FLOOD CONTROL IN THE NETHERLANDS (2ND REPORT)

千葉学¹・戸村翔¹・山本太郎¹・植村郁彦²・舛屋繁和³・吉田隆年³・大村宣明³
岡部博一⁴・佐々木博文⁴・小林彩佳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, Hirokazu OKABE, Hirofumi SASAKI, Ayaka KOBAYASHI,
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 we invited Dutch government officials and experts of flood risk assessment to Japan for interviews and exchange of opinions. 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 estimation of flood risk, setting of societal tolerance for loss of life, cost-benefit analysis considering climate change, relative comparison of the risks of various disasters, crises and threats, and so on.

Key Words : *Climate change, Flood risk assessment, Societal tolerance for loss of life, Netherlands*

1. はじめに

平成28年8月、北海道に4個の台風が連続して上陸・接近し、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、気候変動の影響は既に顕在化しており、その将来の影響を科学的に予測し、具体的なリスク評価を基に治水対策を講じる必要性が提言された¹⁾。この提言を受け、北海道では大規模アンサンブルデータを用いた将来の降雨予測及び河川流量と氾濫リスクの変化について検討が進められ、オランダの手法を参考にしたリスク評価が試みられている²⁾。

著者らはこの検討に資するため、諸外国の先進事例のうち気候変動予測に基づくリスク評価及び適応策を展開

しているオランダに着目した調査報告³⁾を行っている。

オランダに着目した根拠としては、低平地を抱える国土条件から歴史的に治水の意識が高いこと、将来の気候変動予測から氾濫リスクの推定、計画の策定及びハード整備など一貫した取り組みが進められていること、気候変動を考慮した計画と法整備がなされていることなどが挙げられる。

今回、資料調査を引き続き進めるとともに、さらに理解を深めるため2018年11月にはオランダから治水に関わる専門家を招請し、聞き取り及び意見交換を行った。招請の対象者は、オランダ公共事業局、デルタレス、HKV コンサルタントの技術者・研究者4名である。我が国における気候変動予測とリスク評価及び適応策検討に際して重要な示唆を与える複数の新たな知見を得たので、以下にその詳細を報告する。

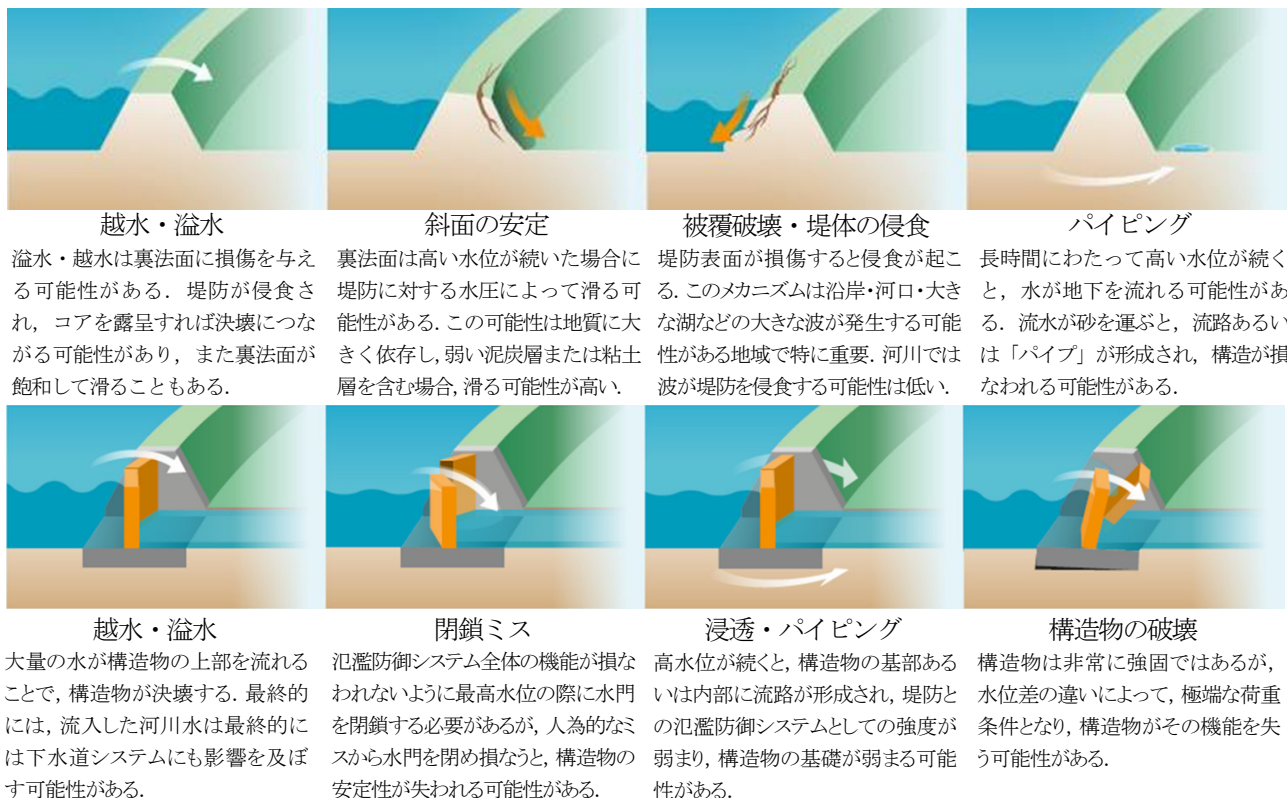


図-1 (1) Floris2において考慮された堤防決壊及び水理構造物の決壊メカニズム⁵⁾



図-1 (2) Floris2において考慮された決壊メカニズム (砂丘の侵食)⁵⁾

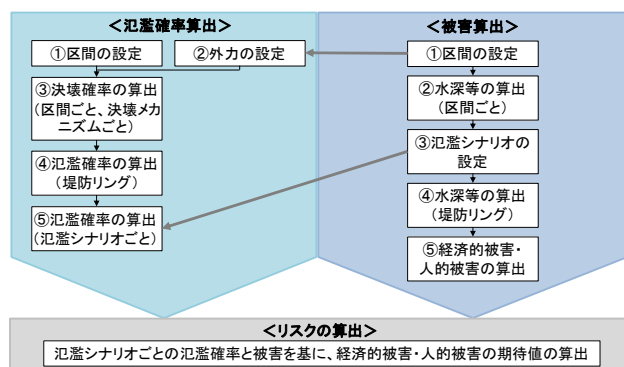


図-2 PC-Ringにおけるリスク算出の流れ⁷⁾⁸⁾⁹⁾

2. 氾濫リスクの算定手法

2001年、オランダ公共事業局は堤防リングの弱部を見極め、氾濫リスク（＝氾濫確率×氾濫被害）を軽減するための投資費用と便益を把握することを目的として、「Flood Risks and Safety in the Netherlands」プロジェクト（英語略記Floris, 蘭語表記VNK. 以下、Floris）を開始した。リスク評価結果を2005年に公開⁴⁾し、社会的な安全レベル（国としての許容リスク）を決定する上での基礎データとすることを目的としている。さらにFlorisの第2期として、2009年からFloris2（蘭語表記VNK2）が開始され、結果が2014年に公開⁹⁾された。

氾濫リスクを算定するメリットとして、現在の安全性が十分かを把握すること、基準に基づいた対策の優先順位付けにより安全性を向上させること、堤防のリスク評価が可能になること、大規模な氾濫への準備が可能になること、などが挙げられる。Florisの中では「オランダが将来、氾濫（洪水）を管理するためにとらなければなら

ない対策を適切に検討することが可能となる」と示されており、オランダが21世紀最初の年に将来へ目を向けて対策を検討し始めたことが推測できる。

堤防の決壊に対し、Florisでは4つの決壊メカニズム（越水・溢水、パイピング、滑り、護岸の侵食）について、Floris2ではさらに水理構造物及び砂丘の決壊メカニズムについて各々の決壊確率が算定された（図-1）。

Florisにおいては1次防御（主要な堤防）であるオランダ国内16の堤防リングを対象とし、さらにFloris2においてはオランダ全土へ展開され、86の堤防リングを対象として人的及び経済的被害が定量的に評価された。人的被害については、流速、水位上昇率、水深によって評価される死亡率関数を用いて推定されている³⁾⁶⁾。

Floris及びFloris2において、氾濫確率はPC-Ring（現在はHydra-Ringに更新）と呼ばれるソフトウェアによって算定された⁷⁾⁸⁾⁹⁾（図-2）。

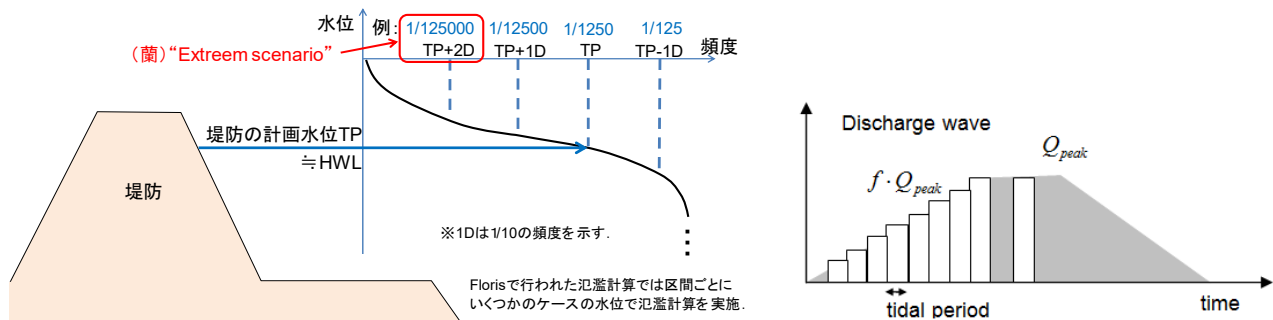
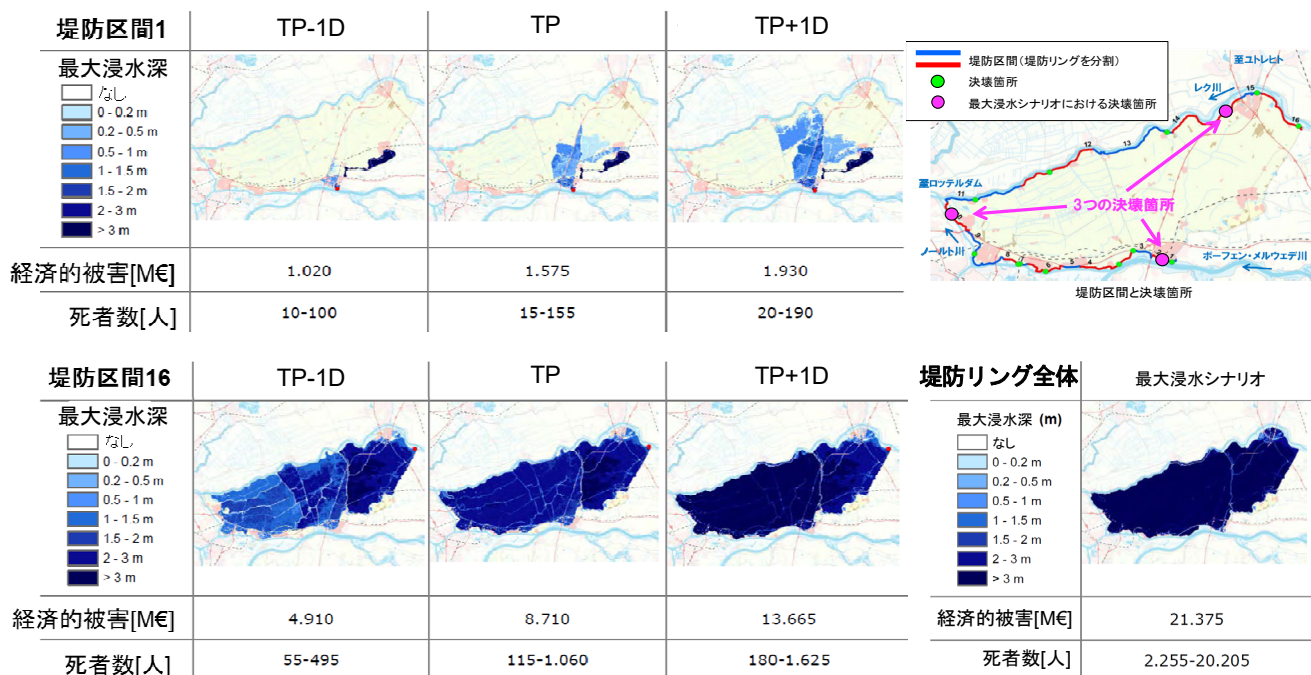


図-3 Floris2における外力規模の設定および洪水波形^{10) 11)}



PC-RingはFlorisプロジェクトチームによって開発された洪水リスク評価のためのソフトウェアである。Florisにおいてはその他の氾濫防御施設（堤防リングの外側にある防御施設、氾濫防御することを目的としない堤防、国境の外にある氾濫防御施設）はデータ欠如や直接的な被害を及ぼさないことなどの理由から計算には含まれていない。次に、決壊した場合の氾濫形態、水深、流速、水位上昇率を把握するために、各区間について洪水伝播モデルを作成する。Floris2では、氾濫流の進行における決壊箇所の被害だけでなく、氾濫が発生するときの水理負荷条件（水位やHWLの持続時間）も考慮する。河川水位が高い場合に堤防が決壊すると、水位が低い場合よりも多くの水が氾濫する。そのため、TP-1D、TP（計画水位）、TP+1D、TP+2Dなどの複数の異なる水位で計算される⁸⁾。

水位に関しては、堤防の計画水位TP（日本におけるHWLに相当）を基準として決定される。

+1Dとは計画水位に対して発生頻度が1/10倍に減った水位、-1Dとは発生頻度が10倍に増える水位を示している¹⁰⁾。また、TP+2Dを最悪ケースとして想定している（ヒアリング結果）。なお、ロッテルダム沿岸の地域では1Dは70cm相当である。Floris2における氾濫解析では、各規模の水位を台形ハイドロとして与えている¹¹⁾（図-3右）。

例として、オランダ中東部の堤防リングであるアルブラッセルワールト・ファイフヘーレンランデン地区における被害の算定結果を示す。区間ごとの最大浸水深と人的・経済的被害被害の算定結果を例示した（図-4）。

当該地区の堤防区間1、16では、3つの確率規模の水位（TP-1D、TP、TP+1D）ごとに氾濫計算および被害の算定を行っている。また、最大浸水シナリオとして、3箇所堤防が決壊した場合の最大氾濫シナリオとしての被害も示している。なお、死者数に幅があるのは避難率の幅を考慮しているためである。

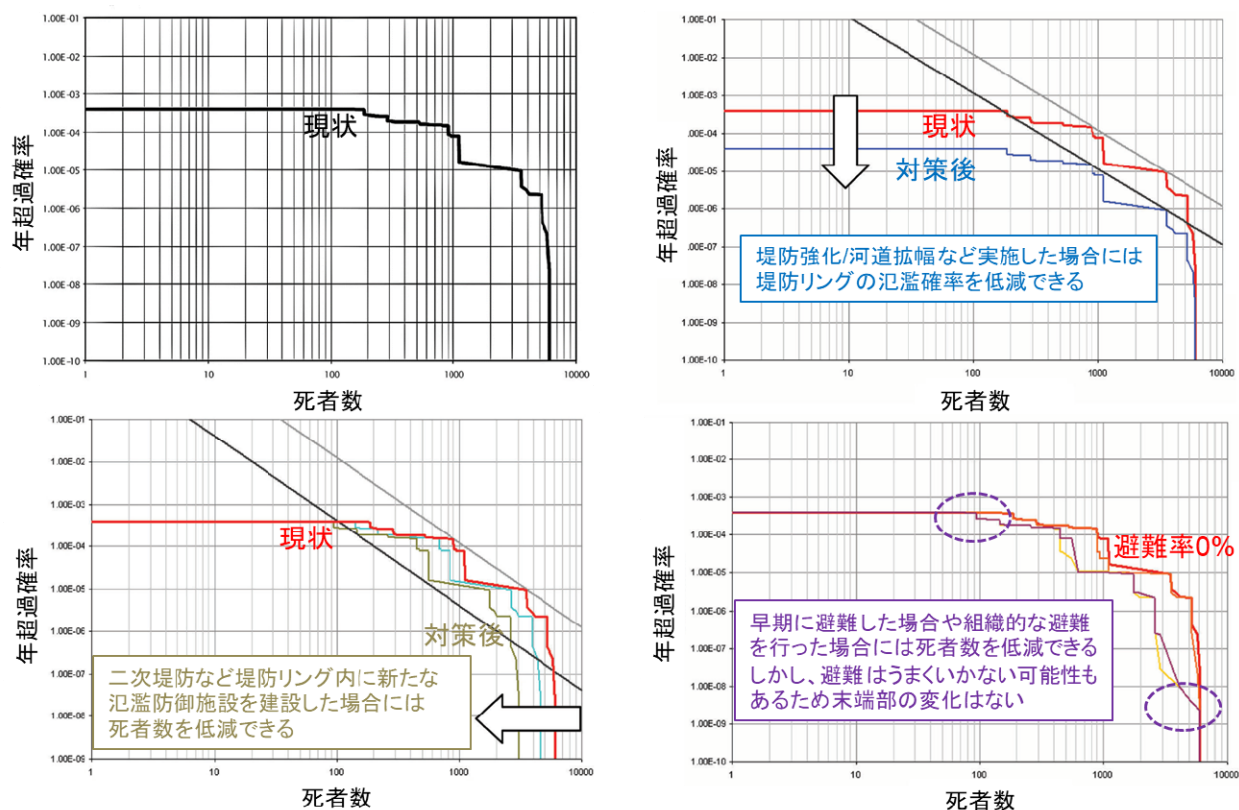


図-5 F-Nカーブによる社会的リスク評価¹²⁾

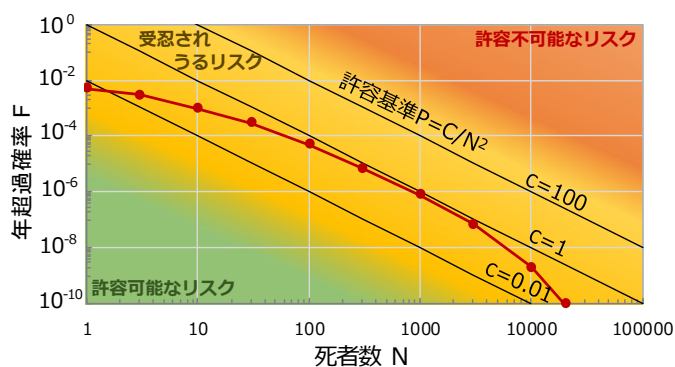


図-6 F-Nカーブと許容基準設定の概念図

3. 社会的リスクの評価と許容基準

社会への影響（被害）を示す社会的リスクは、一般にF-Nカーブで表現される（図-5，図-6）。オランダではF-Nカーブに基づくリスク評価により、従来の流量確率による計画からリスクベースへの転換が行われた。オランダでは、氾濫による死亡リスクに対する許容基準として、 N^2 に比例する直線を堤防リングごとに設定している（図-7）。堤防リングごとに、地域の状況や政策指数などを考慮して係数Cが決定され、オランダの許容基準（ N^2 に比例する直線）では、死者数1,000～10,000程度の事象が支配的となることが多い。F-Nカーブの下側の面積を積分すると、年間あたりの死亡リスクとなる。

F-Nカーブは死者数の確率分布を示すことで社会的観点から死亡リスクを評価でき、対策を講じた場合の効果

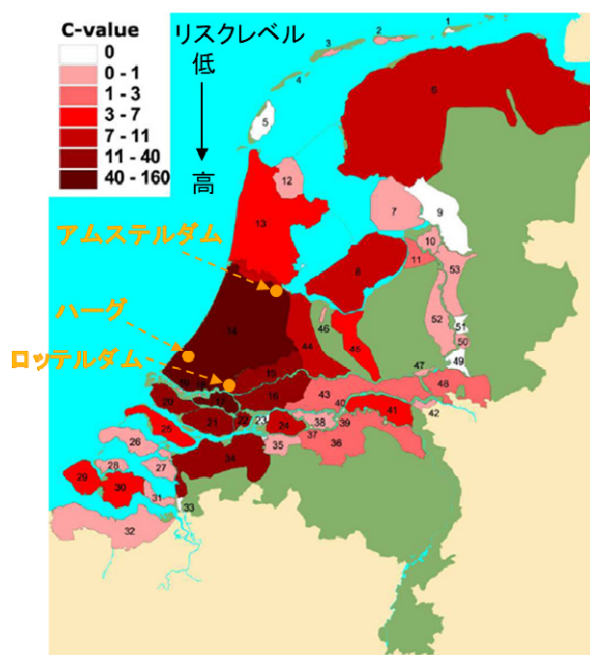


図-7 F-Nカーブによる社会的リスク評価¹³⁾

を視覚的に把握できる。堤防の強化や河道拡幅などの治水対策を実施した場合には発生確率を減ずることとなり、F-Nカーブは下方へ引き下げられる。また、堤内の二次堤防など流域対策を実施した場合には、死者数が軽減されるためF-Nカーブは左方向へスライドすることとなる。避難率の向上は死者数を低減するが、避難が成功しない場合を考慮するとF-Nカーブの末端部には影響しない（図-5）。

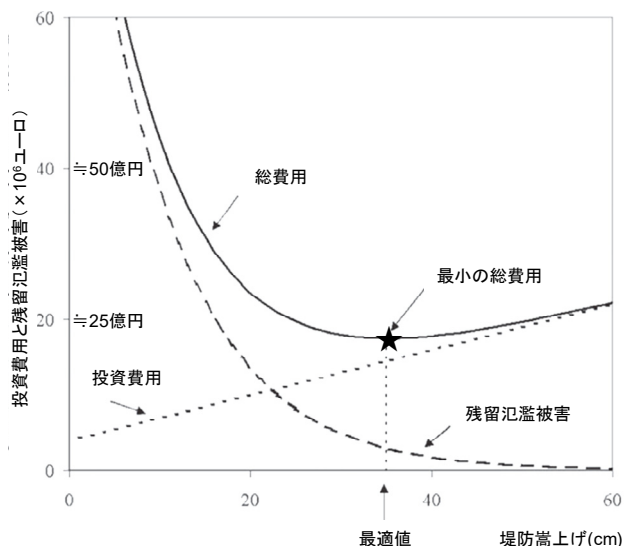


図-8 最適化モデル (optimisation model) を使用した費用便益分析¹⁴⁾

4. 気候変動影響を考慮した費用便益分析

オランダでは、堤防強化にかかる費用と便益に基づいて、氾濫リスクを低減するための最も安価な方法を決定する手段として費用便益分析が行われている。費用便益分析では、財政的/経済的損失だけでなく、自然・景観・文化遺産・人命への影響など「無視できないこと (imponderables)」も考慮されているため、オランダの費用便益分析は「社会的」費用便益分析 (Social cost-benefit analysis) である。

日本の費用便益分析と異なる点としては、日本の場合は効率的な公共支出の決定を目的として行われるが、オランダの場合は確率規模を決定するためのツールとして使われている点である。

当初は図-8に示すような単純かつ動的な影響を無視した最適化モデル (optimisation model) が使用されたが、現在では改良された複雑かつ動的な影響を考慮した数理最適化モデル (OptimaliseRing) が使用¹⁴⁾ されている。経済成長率は1.9%、社会的割引率はかつて5.5%であったが、オランダ国内での議論の結果、現在では日本と概ね同程度の4.0~4.5%とされている (オランダ公共事業局、デルタレス聞き取り結果)。特徴的なのは、現在のモデルでは気候変動と経済発展の影響が考慮されている点、そして、人命の貨幣換算が行われている点である。

図-9に示すように、気候変動影響 (海面上昇やピーク流量増加) によって、氾濫確率は時間とともに増加する。また、経済成長とともに堤防リング内で保護されるべき価値が増加することによって、最大許容氾濫確率は低くなる。氾濫防御への投資は1回限りではなく繰り返しい、投資直後に氾濫確率が小さくなる鋸歯形状を示す。

今回のヒアリングの結果、氾濫確率の低減について「実際には20年程かけて徐々に小さくなる」との見解を得た。

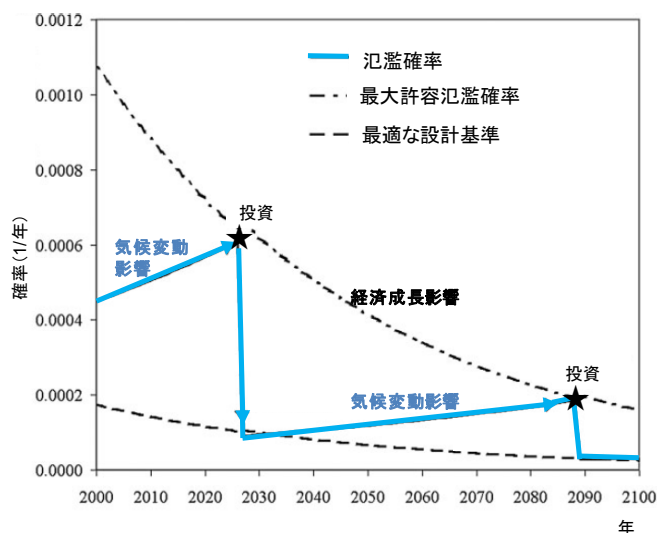


図-9 定期的な投資と経済的に効率的な氾濫確率¹⁴⁾

人命の貨幣換算は、統計的な人命の価値 (value of statistical life) として1つの人命あたり670万ユーロ (約8.5億円) が考慮されている。実際には人命の金銭的な価値ではなく、平均的な死亡リスクを低減させるための支払意思額の総計を示したものであり、530人のインターネットアンケート結果から決定された。オランダでは人命の価値についてある程度社会に受け入れられている。人命の価値を含まない場合、便益を過小評価する可能性がある。オランダの場合、洪水の場合の人命の価値は、交通事故の場合よりも高いことがわかっており、これまで長くにわたって使用されてきた経緯がある (デルタレスへのヒアリング結果)。これは、自発性の低いリスクの方が受け入れ難く、支払意思額が上がることによる。

5. 様々なリスクの相対比較

オランダ政府は、様々な災害や危機・脅威が国家の安全保障をどの程度危険にさらす可能性があるのか調査・公表¹⁵⁾ している (図-10)。これは国家リスクプロファイル (National Risk Profile, 通称NRP) と呼ばれ、リスクの比較に重点を置いている。NRPでは、社会的混乱に繋がる可能性がある29種の脅威を8通りに分類するとともに、個々のリスクの発生確率と被害の深刻さを比較している。

この中で、河川の洪水リスクの発生確率は、中程度の「やや起こりそう (Somewhat likely)」で、「深刻 (Serious)」な被害があると評価されている。これは複数のテロ攻撃や国際紛争と同程度の確率で、さらに原子力発電所の事故と同程度の深刻さとの位置付けである。

また、深刻な洪水 (海) の発生確率は「非常に起こり難い (Very unlikely)」ものの、その被害の程度は「致命的 (Catastrophic)」として位置づけられている。オランダでは国土の大部分が低平地に立地することから、これらの洪水被害を深刻に受け止めていることがわかる。

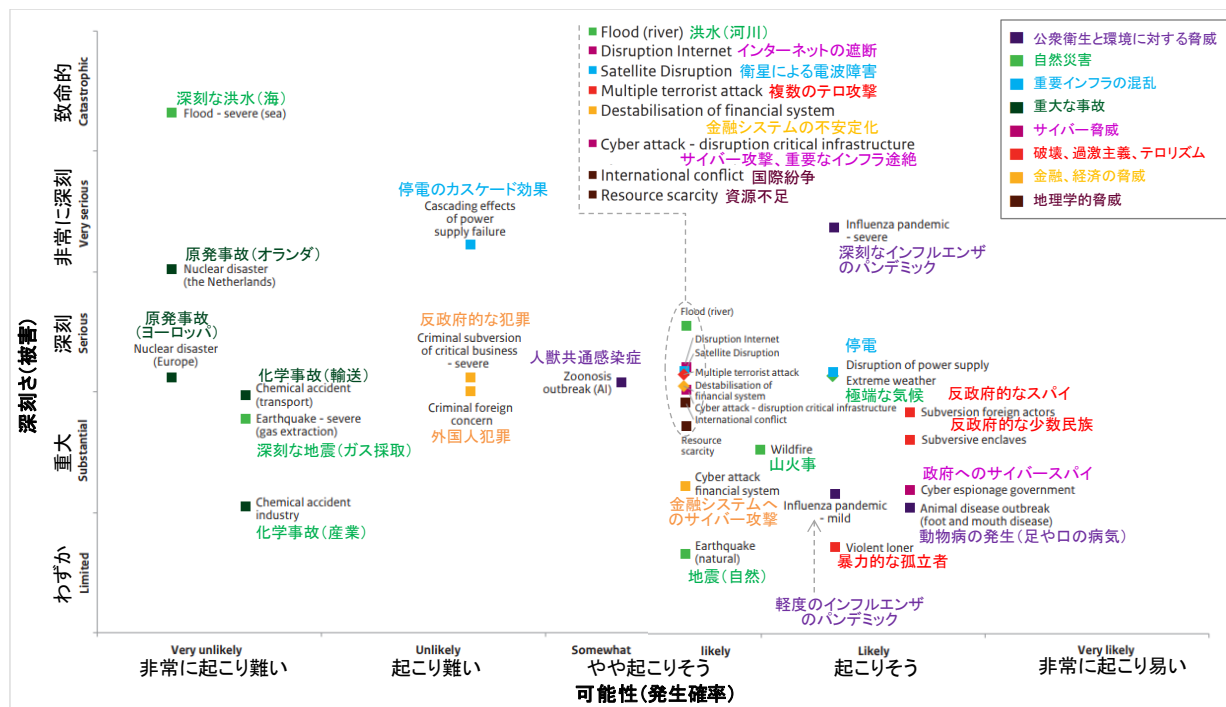


図-10 様々なリスクの相対比較 (リスクダイアグラム) ¹⁵⁾

6. おわりに

オランダにおける氾濫リスクの算定、リスク評価及び許容基準、費用便益分析、リスクの相対比較について、調査とヒアリングの結果を述べた。オランダでは、想定される水害リスクについて発生確率と被害の大きさの両面から定量的に把握し、幅を持ったリスク評価を行い将来へ向け気候変動影響も考慮した対策を講じており、また、多種多様なリスクについて相対比較も行っていることが分かった。

我が国の治水においても、複数のシナリオ分析に基づくリスク評価及び他の災害等とのリスク比較を行うことで、気候変動を含む水害リスクに対してその可能性と深刻さをより正しく把握し、より具体的な適応策の実装につながる議論が可能となる。

なお今回の招請に際しては、第63回土木学会水工学講演会における特別公演、及び日蘭治水セミナーin北海道も併催し、公に技術交流を深めた。今後も継続して両国の治水技術の向上に資する連携を図っていく予定である。

謝辞：本調査にあたっては、オランダ公共事業・水管理局 Durk Riedstra氏、オランダ独立研究機関デルタレス Mark Hegnauer氏、HKVコンサルタント Bas Kolen氏、Bob Maaskant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) 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, 河川技術論文集第24巻, 2018
- 4) Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Flood Risks and Safety in the Netherlands (Floris) – Full report, 2005.11
- 5) Rijkswaterstaat VNK Project Office, The National Flood Risk Analysis for the Netherlands – FINAL REPORT, 2014
- 6) Jonkman, S. N.: Loss of life estimation in flood risk assessment Theory and applications, 2007
- 7) Elisabet de Boer, Comparison of Reliability Methods for Flood Defence Systems, 2007.6
- 8) VNK2 project office, Flood in Netherlands (VNK2): The method in brief, 2012.7
- 9) Bram de Groot, Veiligheid Nederland in Kaart 2: VNK2 Overstromingsrisico Dijkkring 21 Hoeksche Waard, 2014.5
- 10) drs. R. Vergouwe et al., Veiligheid Nederland in Kaart 2 Overstromingsrisico dijkkring 16 Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden, 2014, pp53
- 11) Deltares, Hydra-Ring Technical Design, Software for the assessment of primary flood defences, 2016.12
- 12) R.B.Jongejan et al., The potential use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 1): Basic principles, 2009, pp2095-96
- 13) B. Maaskant et al., The use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 2): estimation of the individual and societal risk for the dike rings in the Netherlands, 2009
- 14) J.M. Kind, Economically efficient flood protection standards for the Netherlands, 2012
- 15) Government of the Netherlands, National Risk Profile 2016: An All Hazard overview of potential disasters and threats in the Netherlands, 2016.11, 194-195,

(2019. 4. 2受付)