

気候変動適応策に向けた新たな水害リスクの評価と治水対策の構築

武田淳史・山田朋人・服部 敦・関 克己

1. はじめに

IPCC第5次報告書では、気候システムの温暖化には疑う余地はないと報告されている。我が国では、多くの研究機関や環境省、文部科学省、気象庁、国土交通省等により全球・地域気候モデルを用いた将来予測ならびに影響評価が実施されており、日本国内では高緯度ほど気候変動の影響を受けやすいとの結果が示されている¹⁾。こうした中、平成28年8月に3つの台風が北海道へ上陸するなどにより、道内で甚大な被害が発生した。

この水害を受け、平成29年に国土交通省北海道開発局及び北海道において発足させた「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」²⁾では、「気候変動の影響が現実になったものと認識し、北海道から先導的に気候変動への適応策に取り組むべき」と明記した上で、気候変動による水害リスクを科学的信頼性のもとで具体的に評価し、実効ある適応策の構築に向けて取り組んできた。

本報文は、全国の河川における対策検討の一助として活用されることを念頭に進めてきた十勝川流域等をモデルとして、水害リスク評価に基づく適応策検討に関わる既往の研究成果^{3),4),5)}を活用した一連の取り組みの主要な成果について取りまとめたものである。

2. 検討の進め方

検討は、令和元年7月に立ち上げた「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会」⁶⁾を通し、図-1に示す手順で行った。降雨に対する気候変動の影響については、降雨の規模のみならず流域での降雨の時空間分布について、既往の観測値の外挿に止まらず、気候変動により発生し得る降雨によるハザードの変化を分析した(図-1(1)ハザードに相当)。水害リスク評価は、それら降雨がもたらす人的・経済的な被害推算を

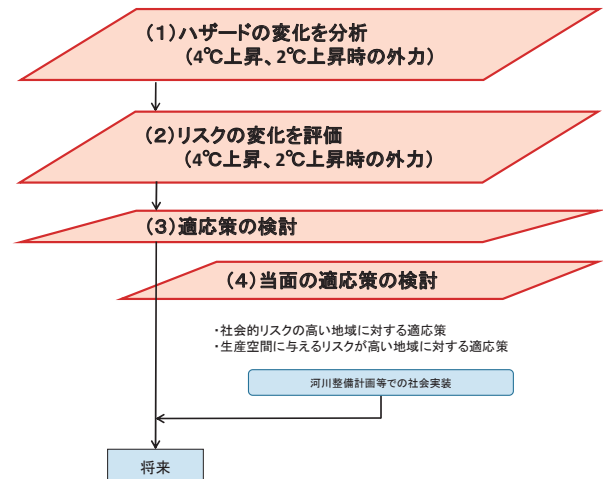


図-1 北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会の検討フロー（参考文献⁶⁾の図を一部改変）

行い、その関係を豪雨規模（年超過確率）と被害の大きさの関係曲線（図-7参照：以下「リスクカーブ」という。）として気候変動の影響、すなわち過去気候に対する将来気候下での水害リスクの変化増分を具体的に把握した（図-1(2)）。適応策は、ハード・ソフトの諸対策の選定・組み合わせ（多重防御）に対してリスクカーブを算定し、地域等に対応したリスクを減じる防災・減災効果を有する対策として設定した（図-1(3)、(4)）。

こうした地域での被害の形態や規模に対応した対策検討のアプローチは、気候変動への適応を具体化する実践的検討の枠組みとして提案された「治水フレーム」³⁾と合致するものである。本報告の検討は、「治水フレーム」を応用した治水計画検討の端緒を開く実践例と位置づけられる。なお、その特色として、以下の3点が挙げられる。

- ① 気候予測アンサンブルデータの導入による気候変動に対応した将来の幅広いハザードに対する検討（3章参照）
- ② 気候変動による水害リスクの地域・地先・支川流域等の特性に応じた対策（4章参照）
- ③ 気候変動による水害リスクへのハード・ソフト対策の一体的な検討（5、6章参照）

また、今回報告する一連の検討内容の一部は、

表-1 気候予測アンサンブルデータ概要

名称	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		
実験	過去実験	4℃上昇実験	2℃上昇実験
気候変動シナリオ		RCP8.5における2090年時点 (1850年比4℃上昇、現在より3℃上昇)	RCP8.5における2040年時点 (1850年比2℃上昇、現在より1℃上昇)
ダウンスケーリング手法	力学的		
全球モデル	AGCM		
領域モデル	NHRCM		
解像度	20km		
実験年	1951年～2010年(60年)	2051年～2110年(60年)	2031年～2090年(60年)
海面水温パターン(SST)	観測値(COBE-SST2)	6パターン(CCSM4、GFDL-CM3、HadGEM2-AO、MIROC5、MPI-ESM-MR、MRI-CGCM3)	6パターン(CCSM4、GFDL-CM3、HadGEM2-AO、MIROC5、MPI-ESM-MR、MRI-CGCM3)
メンバ数等	摂動50メンバ×60年 ⇒ 3000年分	SST(海面水温)6メンバ×摂動15メンバ ×60年 ⇒ 5400年分	SST(海面水温)6メンバ×摂動9メンバ ×60年 ⇒ 3240年分
実施機関	文科省：気候変動リスク情報創生プログラムおよび統合的気候モデル高度化研究プログラム、気候変動適応技術社会実装プログラム 海洋研究開発機構：地球シミュレータ特別推進課題		

2019年6月に国連気候変動枠組条約に係る会議(UNFCCC)において今後の防災に関する代表的活動内容として発表しており、物理的かつ数理統計的にサポートをしつつハード・ソフト対策の検討を進めるという本手法は、多くの賛同を得たところである⁷⁾。

3. 新たな研究・技術開発と治水計画への実装

3.1 アンサンブルデータによる水害リスク評価

治水対策を考える上で大元となる情報として過去の年最大雨量に確率処理を施した確率雨量が用いられている。地球規模の気候システムは時定数の異なる大気・海洋・陸域の非線形相互作用を有するため、各地域の降雨強度や頻度は多岐に渡るパターン(自由度)を有する。そのため、仮に過去の気候が定常であると仮定しても数十年程度の雨量データでは低頻度現象の出現数は限られたものとなり、それ故に過去データに基づく確率雨量は、本来ある幅(信頼区間)を持った値となることを意味する。つまり、観測期間の長さによってその信頼区間は決定されるものであり、完全な定常状態の気候が永遠に継続する場合のデータを用いることができないため、確率雨量には信頼区間が必ず存在することになる。これは気候システムの自由度から見れば、とある期間から対象とする系全体を把握することは、ある幅の中での議論と置き換えることができる。

この幅を評価する新たな方法として物理モデルによるアンサンブル手法が挙げられる。具体的には、過去数十年間に観測された海面水温等の大気にとっての底面境界条件を全球もしくは地域気候

モデルに与え、大気初期値に擾乱を付加した複数の初期条件を用いて計算を行う手法である。これによって、同じ条件下において物理的根拠に基づき発生し得る現象(降雨)の大量のアンサンブルデータを入手でき、低頻度現象を含めた諸現象に関して確率的に確度の高い情報が得られる^{注)}。本検討では、確率雨量の評価に加え、降雨の時空間分布について観測実績には含まれない多様なパターンを水害リスク評価に用いている。

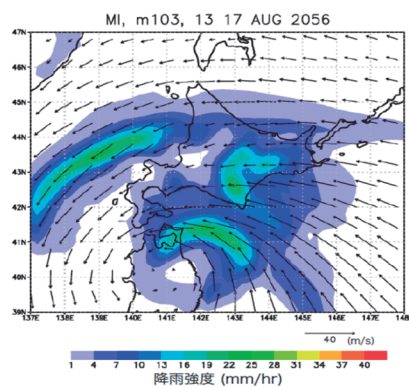
注) この考え方は対象とする系(ここでは地球規模の気候システム)を記述する非線形連立方程式が算出し得る値の幅を示す有界性(詳しくはLorenz⁸⁾)に起因する。

3.2 5km解像度への力学的ダウンスケーリング

現地観測やXRAIN等のリモートセンシングによる観測網の拡大・充実とともに気候モデルは改善・改良が進められ、その再現性は大きく前進してきた。また近年、アンサンブル手法による気候データセットである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)(表-1)が文部科学省の研究プログラム⁹⁾によって作成され、過去気候(これまでの数十年間)や将来気候における水文・気象データがデータ統合・解析システム(DIAS)¹⁰⁾によって配信されている。d4PDFは全球スケールでは60km解像度(d4PDF-60km)、東アジアスケールでは20km解像度(d4PDF-20km)の空間解像度で作成されており、d4PDF-20kmでは天気図スケールに相当する総観規模の気象擾乱が鮮明に表現されている。

本検討で用いたこれまでの気候(過去実験)、将来気候(将来実験)における気候予測アンサンブルデータは、d4PDF-20kmに対して気候モデ

20km解像度



5km解像度

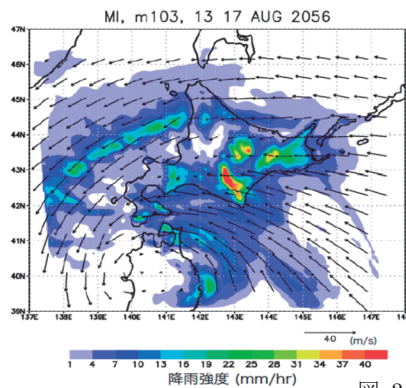


図-2 d4PDF-20kmと5kmによる降水強度と風速場の比較

ル（NHRCM）を用いて5km解像度への力学的ダウンスケーリングを実施したd4PDF-5kmである。これにより、豪雨を再現する上で不可欠である非静圧かつ強い鉛直循環の効果に関する再現性能が向上し、それにより日本で頻繁する台風や前線等ならびに地形の影響によって強化される降雨現象の表現能力が向上された（図-2）。また、十勝川等を対象とした観測実績との比較の結果、年最大降雨イベントの降雨量の超過確率分布（図-3）や1時間降雨強度の頻度分布等について高い再現性が確認された。

3.3 d4PDF-5kmアンサンブルデータの意義

d4PDF-5kmは、将来予測される気候変動のみならずこれまでの気候下において経験していないが物理的に発生し得るより広範な気象現象とその発生頻度を併せ持つ情報（報告⁶⁾で「準観測値」と位置づけた）である。そのため幅広いハザードに対して防災・減災効果を有するハード・ソフト対策（多重防御：4章参照）について、水害リスク評価に基づく検討を行うのに適している。

4. 気候変動に対する適応策としての流域を対象にした治水計画の構築

東日本大震災後制定された津波防災地域づくり法において、災害をもたらす最大規模（例えば1/1,000程度）の外力を対象にしたリスク評価を基本に、ハードとソフト対策を一体的に組み立て、L1、L2レベルの災害に対応する考え方が構築された。これは、年超過確率1/100～1/200の比較的頻繁に起こる規模（L1）の災害に対しては、堤防等のハード対策により確実性をもって対応し、L1を超過する大規模・低頻度（L2）の災害に対しては、ハード対策とともに土地利用規制や誘導、

(十勝川帯広基準地点)

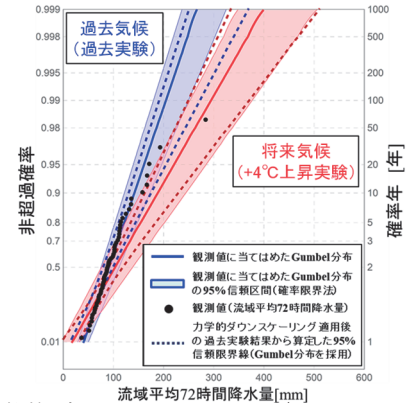


図-3 力学的ダウンスケーリング(d4PDF-5km)と確率限界法検定による非超過確率の信頼区間

避難体制の充実といったソフト対策を組み合わせた多重防御で被害を軽減し、とりわけ生命だけはなんとか守ろうというものである。

河川水害の特性として、例えば上流での対策が下流のリスクに影響を与えるように、河川の上・中・下流、左右岸のそれぞれの被害は相対的な関係があり、地域相互のリスクが相反する。このため、L1レベルを対象とした河川法に基づくハード施設による対策では、地域相互でリスクは一定のバランスを確保されるが、L2レベルの対策においては地域相互のリスクの相対的関係とその変化を分析・評価したうえで組み立てることが不可欠である。具体的には、浸水区域、浸水深等のリスクと、地域ごとの土地利用等の特性を踏まえ、ハード・ソフトの施策による効果と地域相互のリスク相反の観点を合わせ評価し、多重防御による対策の効果を発揮していくことが必要となる。

本検討は、3章で述べた特長・意義を有するd4PDF-5kmアンサンブルデータを活用して流域の水害リスク評価し、その科学的な結果を基にして、多重防御による対策を検討するものであり、津波防災地域づくり法における防災に向けた新たな枠組みを水害への対応にも展開しようとする新たな取り組みと言える。

さらに、地域相互のリスクの相対的関係に関する検討にあたっては、リスク評価により、避難行動に関しての条件が厳しく安全度の低い地域の抽出や、地域における中枢的な社会・経済活動を担う施設や区域の被災形態や頻度を評価し、地域の特性を踏まえたうえで優先的に対策を講じる考え方を導入している。具体的には、「社会的リスクの高い地域」、「生産空間（農地等、地域の農業等の戦略産業を支える重要な生産の場）に与えるリ

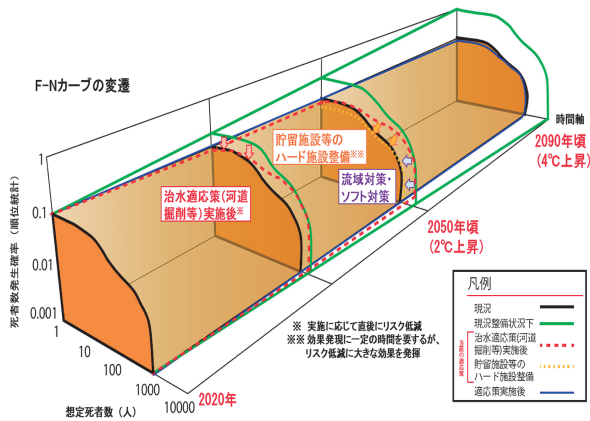


図-4 気候変動の進行に対応した適応策の考え方（イメージ）

スクの高い地域」を設定し、地域相互のリスクの相対的關係に配慮しつつ、流域全体が抱えるリスクをどのように低減させるのか、十勝川等の実例を対象に検討を試みた（詳細は6章参照）。

また、気候変動への適応においては、社会経済活動の不確実性に加えて、気温上昇の進行シナリオに対してどのようにアプローチするのかが肝要である。IPCC第5次報告書で採用されている温室効果ガス排出量が最大であるRCP8.5シナリオにおいては、今世紀末頃までには4℃上昇の世界に到達するとされている（表-1）。こうしたシナリオを参考に、気候予測アンサンブルデータ4℃及び2℃上昇実験とそれらに相当する気候変動が生じる将来の時点とを紐づけ、気候変動の進行の各時点におけるリスク評価を行い、気候変動進行の時間軸においてどのように対策を進めていくべきなのかを検討する治水計画を提案した⁶⁾（図-4）。

5. ハード対策の具体的展開

ハード・ソフト対策を一体的に検討するに際して、ハード対策には整備対象とした外力規模までは確実に被害を防止する役割を担っており、その目標水準の設定が重要である。

前述の検討会中間取りまとめにおいて、十勝川流域では、十勝川本川下流の茂岩基準点における流量が2℃上昇時に約1.25倍、4℃上昇時に約1.5倍になる一方で、支川である札内川上流部では、単純な温暖化の影響のみならず、日高山脈といった地形性の影響も加わり、2℃上昇時に約1.5倍、4℃上昇時には約1.9倍にまで流量が増加すると想定されている（図-5）。また、十勝川は札内川をはじめとする主要支川が流域中心都市である帯広市街地近傍で相次いで合流するが、アンサンブル

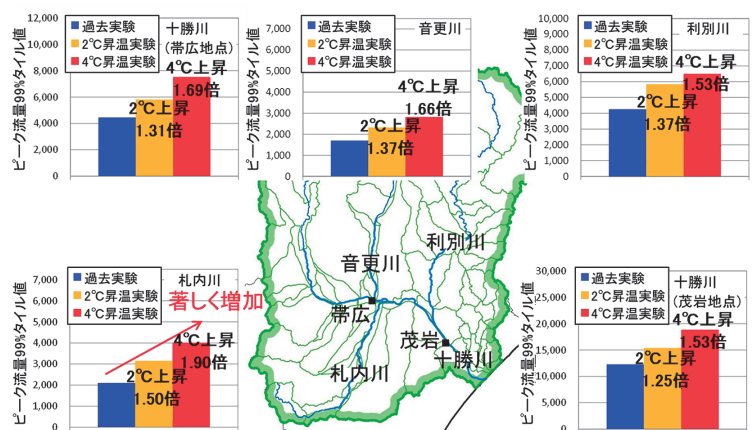


図-5 気候変動に伴う十勝川流域における流量変化倍率

データによる分析では、洪水時にこうした支川からのピーク流量が重なり、本川の流量がさらに増大する可能性も指摘されている。

今後の対応を検討するうえで、気候変動の影響の顕在化により、これまで進めてきた河川整備の安全度の低下、将来へのさらなる低下、降雨の時間空間分布とその変化は看過できない状況になっていると言える。

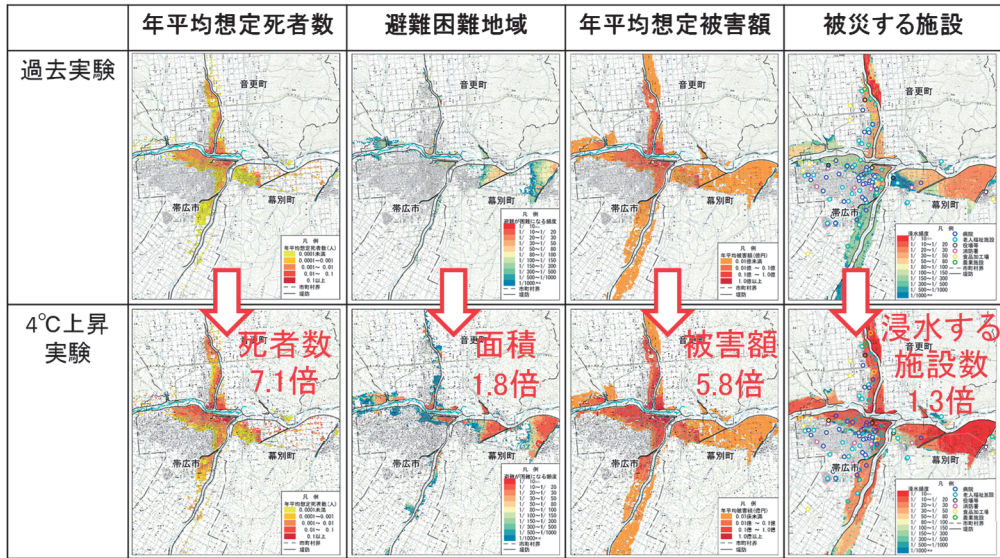
このため、堤防等の治水施設の整備や河道掘削により安全度の低下を防ぎ、さらに向上させていく必要がある。また、前述したような流域のリスクの高い地域においては、気候変動の影響に伴って洪水ピーク流量が増大し、地域の水害リスクが益々厳しくなる状況下において、確実かつ実効性をもって被害を防止するためには、こうした堤防や河道掘削等に加え、遊水地やダム等の洪水調節機能が果たす役割は一層重要になる。

一定の外力規模までは確実に安全度を確保する機能を有するハード対策と不確実性を有するものの、ハード対策の目標とする規模を超過する洪水においては不可欠なソフト対策の役割分担や優先度を地域においてしっかり議論しつつ、気候変動への対応を早急に進めていくことが重要である。

6. ソフト対策の具体的展開

気候変動を踏まえ、リスクベースの考え方に基づき今後発生し得る水害に対するハード・ソフト対策を講じるには、流域の地域特性や社会経済的な特性を十分に把握することが肝要である。

十勝川流域をモデルとして取り上げた一連の検討では、想定死者数や経済被害額等の複数の指標をもとに、十勝川中流部の市街地地域を流域全体において相対的にリスクの高い地域である「社会



※気候予測アンサンブルデータ5400年分(4℃上昇)の氾濫計算より作成

図-6 社会的リスクの高い地域の一例(十勝川流域)

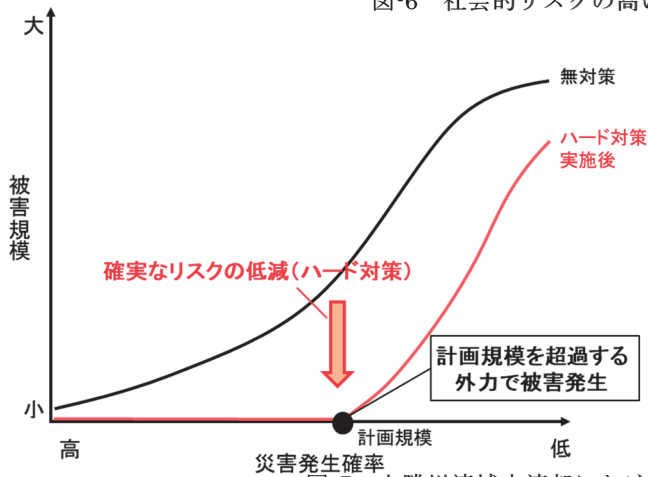


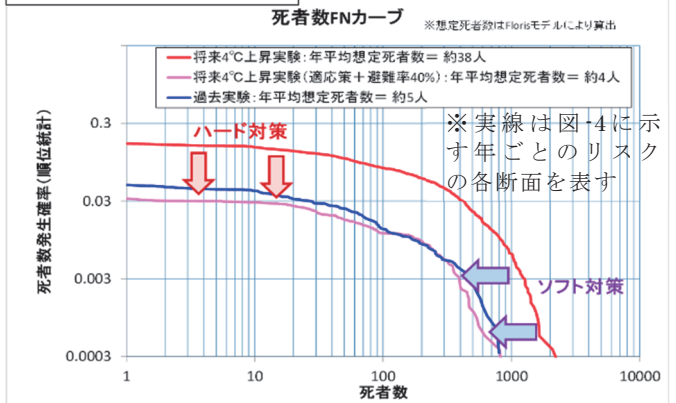
図-7 十勝川流域中流部におけるリスクカーブ(左図はリスクカーブのイメージ図)

「社会的リスクの高い地域」として定義している(図-6)。また、同地域におけるリスクカーブ(図-7)では、例えば避難率が40%(ソフト対策の効果として仮定)だと設定した場合、4℃上昇時の外力に対してハード・ソフトからなる適応策を講じることで現在と同程度の安全度が確保できる可能性を示唆している。こうした分析・評価は、ハード・ソフト対策を一体で俯瞰した上で、ソフト対策の役割を落とし込んでいく過程において非常に有効な考え方と言える。

さらに、十勝川中流部の一地区を例に、浸水確率に加えて、氾濫流の流速や水深、氾濫流の到達時間といった避難行動を検討する上で重要な情報を整理した(図-8)。地域において、どこに避難すべきか、どのような経路で避難すべきか、どのタイミングで避難すべきか、そのためには、アクセス路の整備等、ソフト対策をサポートするためにどのような対策が必要なのか、地域において具体的な検討を進めることが可能となると言える。

適応策+避難率40%の効果

〔帯広市、音更町、幕別町合計〕



平成28年北海道大雨激甚災害では、十勝川流域、常呂川流域をはじめとして甚大な被害が発生し、食料供給地である北海道の被害が全国主要市場での農作物の高騰を招くなど、その影響は全国に波及した。十勝川流域等は主には畑作地帯であるが、畑の土壌が流亡した場合には、畑の生産力低下が長期化すると報告もある。農業関連研究機関へのヒアリング調査によれば、ここでの土壌とは表層30cm程度のところであり、これが作物の品質を左右するうえ、表層土壌の維持・改良に長い年数を要するとのことである。そうであれば流域において生産性は高いが浸水リスクの高い農地等を「生産空間に与えるリスクが高い地域」として設定し、例えば、ハード対策に加えて、二線堤や霞堤を組み合わせることにより流速を低減するという方策も考えられる。このように流域の具体的なリスクを基に、ハード・ソフト対策の全体像を俯瞰しつつ、地域特性を十分に踏まえた上でソフト対策等を検討することが重要である。

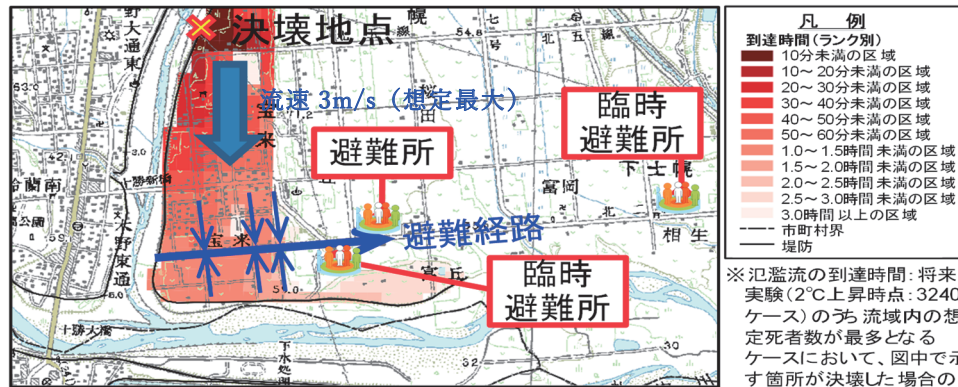


図-8 社会的リスクの高い地域の一例（十勝川中流部の一地区）

7. まとめ

本報告では、本年5月に公表された北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会中間取りまとめ等^{4),6)}の検討内容を引用しつつ、気候予測アンサンブルデータを活用したリスク評価、ハード・ソフト対策の検討の道筋を述べた。今後、こうした検討を踏まえ、河川整備計画等を通して、具体的なリスクに対応した気候変動適応策が早期に社会実装される必要がある。また、今回の取組を通し明らかにした流域における住宅や病院・学校等の要配慮者利用施設、工場等が抱える具体的リスクを対策に繋げる道を構築する必要がある。

今後、気候変動によるリスクの増大を踏まえた対策を社会全体で取り組んでいく必要がある。特に、気候変動の時間軸を踏まえると、次の世代に治水安全度の低下を引き継がないためにも、地域での取組に若い世代の積極的な参加を促すとともに、多様な主体が参画してリスクや対策を議論できる土壌の醸成に繋がることを期待したい。

参考文献

- 例えば、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」：気候変動を踏まえた治水計画のあり方 提言、https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/02_honbun.pdf、2019

- 北海道開発局「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、https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/ud49g7000000f010att/splaat000000h6w1.pdf、2017
- 例えば、服部敦：気候変動適応研究本部における水害リスク研究に通底する考え方とその実践、土木技術資料、第62巻、第6号、pp.8～13、2020
- 山田朋人ほか：北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化、河川技術論文集、Vol.24、pp.391～396、2018
- 関克己：水害時の危機管理における意思決定の強化に向けた提案、土木技術資料、第59巻、第12号、pp.8～13、2017
- 北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会：中間取りまとめ、https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000001offi.html、2020
- Yamada, T. J. Adaptation measures for extreme floods using huge ensemble of high-resolution climate model simulation in Japan. Summary report on the eleventh meeting of the research dialogue Bonn, Germany, 20 June 2019. P28-P30, Eleventh meeting of the Research Dialogue: Science for Transformation, United Nations
- Lorenz, E.N. : Atmospheric predictability experiments with a large numerical model, Tellus, 34, pp.505-513, 1982
- 文部科学省：気候変動リスク情報創生プログラム(SOUSEI)、<http://www.jamstec.go.jp/sousei/>
- 統合的気候モデル高度化検討検討プログラム(TOUGOU)<https://www.jamstec.go.jp/tougou/index.html>

武田 淳史



北海道開発局河川計画課
河川調整推進官
TAKEDA Atsushi

山田 朋人



北海道大学大学院工学院
准教授
YAMADA Tomohito

服部 敦



国土交通省国土技術政策
総合研究所河川研究部
水防災システム研究官
HATTORI Atsushi

関 克己



京都大学経営管理大学院
客員教授、(公財)河川財
団理事長
SEKI Katsumi