

損失余命を用いた洪水の リスクコミュニケーションに関する研究

A STUDY ON FLOOD RISK COMMUNICATION USING LOSS OF LIFE EXPECTANCY

湧川勝己¹・岡安徹也²・天野雄介³

Katsumi WAKIGAWA, Tetsuya OKAYASU, Yusuke AMANO

¹正会員 工博 (財) 国土技術研究センター 調査第一部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

²正会員 (財) 国土技術研究センター 調査第一部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-12-1)

³正会員 国土交通省信濃川河川事務所 所長 (〒940-0098 新潟県長岡市信濃1-5-30)

Flood inundation risk has traditionally been expressed simply by a statement, "there is a possibility of inundation once in xx years". The risk has not been fully understood by the people living in floodplains. It is important to communicate with the people living in floodplains concerning flood inundation risk by comparing it with the risk of other phenomena that people can feel or instinctively understand on a daily basis, and to have them fairly understand flood control projects.

In this study, methods of expressing risk using loss of life expectancy, which is frequently adopted for representing environmental risk, were examined to properly communicate with the people in river basins concerning flood inundation risk.

Key words : *loss of life expectancy, risk communication, possibility of levee breach, risk of death, project assessment, economic evaluation of flood control measures*

1. はじめに

治水事業の効果は、事業の実施によって氾濫が抑止される洪水の規模及び被害（具体的には浸水が防止される区域の面積や人口、被害額等）で示される。また、治水事業実施時の評価や事業再評価では、事業に要する費用と事業の実施によって防止される浸水被害額の期待値をもとに費用便益分析を行い、B/Cなどの分析結果が事業評価委員会や流域協議会等を通じて一般に公表されている。しかしながら、そもそも洪水氾濫の危険性（リスク）が他の災害やリスクに比べてどの程度であるのか、また、洪水氾濫リスクを低減するための費用が他の防災費用と比べて安いのか、高いのかといった事業の適正を評価するために必要な参考的な情報が明らかにされていないことなどから、治水事業の適正な判断が難しいとの意見もある。

洪水氾濫に関するリスクコミュニケーションを行うための素材・ツールとして、氾濫原に居住する人々に対して、洪水氾濫によるリスクと他の災害リスクとの比較、単位リスクを低減するために要する費用を提示することは、洪水氾濫リスクを客観的に判断するために有益であると思われる。

そこで、本研究では、国民との氾濫リスクに関するコ

ミュニケーションや今後の新たな治水事業評価の枠組み構築の検討に資する資料を提供することを目的として、アスベスト被害等の環境リスクを表現する際によく用いられる損失余命等を用いたリスク表示方法について検討を行った。また、治水事業と他のリスク低減費用の相対的な比較を行うために、事業実施前後の損失余命の変化についても検討を行った。なお、氾濫リスクの客観的な評価を行うにあたっては、破堤事象を確率論的に取り扱う必要があったので、破堤確率についても検討を行い、リスク評価の中に取り入れた。

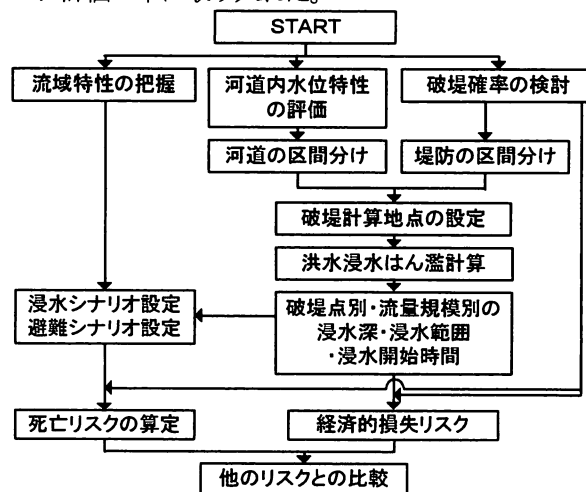


図-1 検討フロー

2. 破堤確率の検討

(1) 基本的な考え方

今までに実施されてきた一般的な治水経済調査等では、堤防の安全性に関する情報と知見が不足していたために、堤防の形状等から洪水を安全に流下させることが可能な水位を設定し、その水位までの洪水では破堤氾濫が生起せず、その水位を上回る洪水では破堤氾濫が生起すると仮定して氾濫被害額を算定してきた。しかしながら、破堤の危険性は、ある水位を境にして急激に上昇するとは考えられても、不連続に変化するものではないと考えられるため、破堤の危険性（破堤確率）は、水位に対して徐々に変化するものと仮定して検討を進めることとした。

破堤が生じる原因として、浸透による裏法すべり、堤防表法面の侵食、高水敷の侵食による堤防破壊、越水の四つの現象を捉えて、破堤確率を算定することとしたが、検討対象とした河川区間では、堤防表法面の侵食、高水敷の侵食による堤防破壊を想定することが困難であったので、浸透による裏法すべりを主たる対象として破堤確率の検討を行った。

なお、浸透による破堤確率は、近年実施されている堤防詳細点検の結果を用いて、浸透による堤防裏法すべりに対する安全率と破堤確率の関係が仮定できるものとして検討を進めた。

(2) 破堤確率算定手法の概要

破堤要因を整理したうえで本研究では、浸透と越水による破堤リスクを水位発生確率と堤防破壊確率という独立事象の組合せにより評価する。

ここで水位発生確率は、確率規模別流量ハイドログラフを与えた不定流計算結果より推定する。堤防破堤確率は、すべりに対する安全率が正規分布に従うと仮定し、所与の水位に対する堤防破壊確率を推定する。所与の水位は、計画高水位（HWL）、HWL-1m、HWL-2mの3パターンとした。なお、安全率は、洪水氾濫の要因となる堤防裏法の円弧すべりに対する安全率（ F_s ）を用いることとし、洪水の減衰期に生じる堤防表法のすべり破壊は大規模氾濫となることが少ないため考慮しないこととした。

任意断面の任意水位に対応した F_s は、図-2に示した平均動水勾配と堤防裏法 F_s の相関関係（下位包絡）に基づき堤防表法における水位との接点と裏法尻を結ぶ勾配から推定する。 F_s と破堤確率 P の関係は、図-3に示したように $F_s=1.0$ で $P=0.5$ 、 $F_s\leq 0.5$ で $P=1.0$ 、 $F_s\geq 1.5$ で $P=0.0$ とし、 F_s が0.5から1.5の間では P は正規分布に従うと仮定した。

破堤確率は、図-4に示すように、ある水位での堤防破壊確率とその水位の発生確率の積として評価する。なお、一般的な土堤は越流に対して脆弱であることを考慮し、堤防天端高を越える水位での堤防破壊確率は1.0として

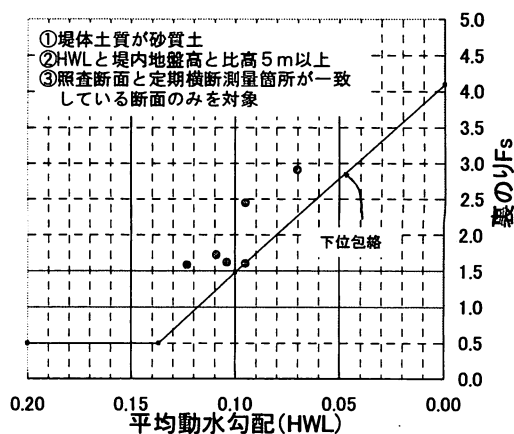


図-2 想定したHWL平均動水勾配と F_s の関係

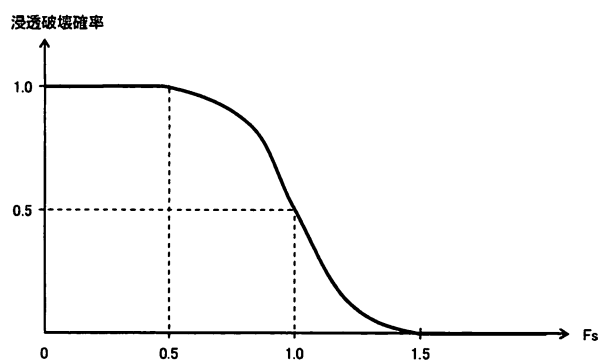


図-3 浸透破壊の確率分布

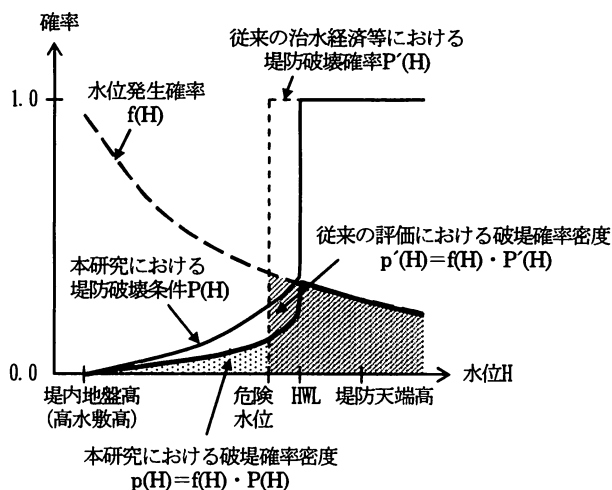


図-4 破堤確率（破堤リスク）算出の考え方

いる。

このような手法を取り入れることにより、従来の治水経済調査等において、HWL等の危険水位を基準に破壊確率を（0、1）で扱っているのに対し、危険水位以下の水においても、破堤の可能性も評価することができるようになり、図-4に示したように幾分ではあるが、リスクが高めに評価される傾向にある。

3. 死亡者数の推定

(1) 基本的考え方

洪水氾濫による経済的な損失を算出する場合には、

表-1 死亡リスク検討ケース

	ケース1 (合理的避難)	ケース2 (非合理的避難)	ケース3 (週末夜間破堤)
発生時季	出水期 (7月13日 [火])	出水期 (7月13日 [火])	出水期 (6月30日 [日])
破堤時刻	昼間 (13:00)	昼間 (13:00)	夜間 (23:00)
避難指示発令時刻	氾濫開始2時間前 (11:00)	避難指示無	氾濫開始2時間前 (21:00)
避難行動のとり方	その人が始めにいるメッシュが浸水したら、それ以降は避難しない。	その人が始めにいるメッシュが浸水したら、避難行動を開始。	事後避難はしない。
想定洪水波形	昭和36年6月実績洪水波形 (規模は $W=1/10 \sim 1/1000$) 昭和54年7月実績洪水波形 (規模は $W=1/10 \sim 1/1000$)		
破堤条件	任意の一箇所が破堤すると仮定		

一般資産である家屋等は移動しないため、破堤する時間であるとか、曜日等を考慮する必要がないが、死亡者数を算出する場合には、破堤時間や曜日によって氾濫原内の人口や個々人の行動が大きく異なるため、死亡者数を算定する際の条件を検討シナリオとして設定することとした。

なお、死者数を推計するモデルは、現在、我が国に存在しないので、図-5に示したように避難行動と米陸軍工兵隊がハリケーンカトリナ防除システムの評価に用いたLIFESimモデルを組み合わせ使用することとした。

(2) シナリオの想定

本研究では、表-1に示す3ケースをシナリオとして想定した。これらは破堤時刻による死亡リスクの差や浸水後の住民の避難行動による死亡リスクの差について、それぞれ対極的な位置づけにあるものを検討することを目的に設定したものである。

また、想定洪水波形については、地域によって大きな差が出ることが予想されたため、信濃川の浸水想定対象洪水である昭和36年6月実績洪水波形と支川の魚野川の浸水想定対象洪水である昭和54年7月実績洪水波形の2波形を用いて、それぞれ信濃川中流域全体を対象に解析を実施した。

(2) 死亡者数の推定手法

a) 洪水による死亡要因及び死亡者数推定フロー

図-5に本研究における死者数算定フローを示す。図中の用語はそれぞれ以下のように定義している。

事前避難…避難勧告・指示前の避難。

事後避難…避難勧告・指示後の避難。浸水発生後の自主的な避難も含む。

家屋避難…建物の2階以上への一時的な避難。

地区外避難所…あらゆる面から安全であると仮定できる避難所。

地区内避難所…いわゆる災害時に使用される避難所。ただし、本研究では避難の長期化に伴う死亡は非考慮。

このように本研究では、事前避難、事後避難、屋内避

難を組み合わせ、各ステージにおいて適当なシナリオ(パラメータ)を設定することで死者数を推定している。なお、屋内避難には米陸軍工兵隊がハリケーンカトリナの防除システムの評価に用いたLIFESimモデル¹⁾を活用した。なお、死亡者数は、氾濫解析に用いている250mメッシュを解析単位として、メッシュ毎に推定している。

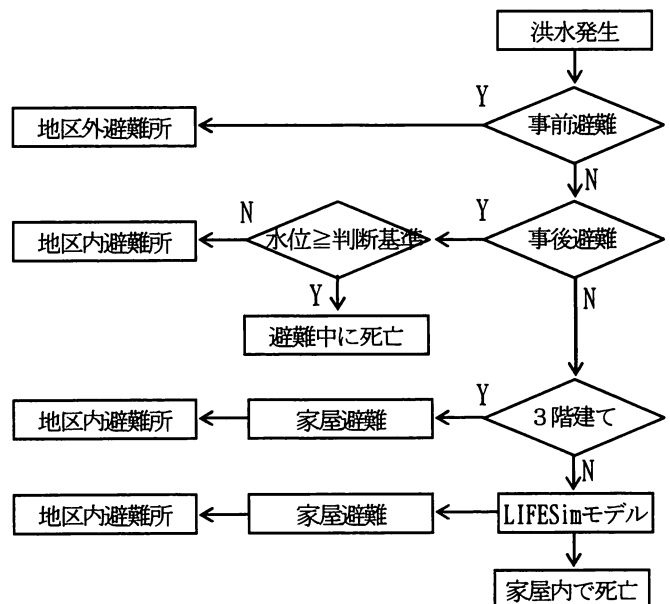


図-5 死者数算定フロー

b) パラメータの設定

本研究において必要となるパラメータについては、それぞれ以下のように設定した。

・ 氾濫原情報

平日昼間を想定する場合には、国勢調査の昼間人口算出式に基づく。ただし、児童、生徒については学校が閉鎖されていると仮定し、各家庭にいと仮定している。週末夜間を想定する場合には、国勢調査の人口を用いている。

・ 事前避難率は実績を参考に30%とする。

・ 避難指示のタイミングとその範囲

越水氾濫も含み、浸水開始の2時間前に避難指示が発令されると想定。このとき、浸水箇所と同一市町村内あるいは同一氾濫ブロック内は同時に発令され

ると想定。

- 事後避難率

緑川水系御船川²⁾での実績を元に定式化された式を用いる。ただし、夜間は事後避難しないものと想定。

- 避難可能かどうかの判断指標

既往検討³⁾より65歳以上は50cm、65歳未満については1mを判断指標とする。ただし、夜間を想定する場合には事後避難を想定していないため、昼間を想定する場合のみに適用。

- 屋内での避難率・死亡率

ハリケーンカトリナでの調査実績³⁾を適用。

4. 信濃川を対象とした死亡リスクの算定

ここでは、氾濫原のメッシュ別の最大死亡リスクについて述べる。死亡リスクは、経済的なリスクとは異なり、単純に浸水深に比例してリスク値が決まるわけではなく、避難時間がリスク値に影響すると考えられる。ある計算メッシュでは、最終的な浸水深がほぼ同じであっても、破堤点とそのメッシュから近い場合と遠い場合とでは避難にかけられる時間が異なるため、死亡リスクが変化する。そのため、同一氾濫ブロック内であっても破堤箇所によりその結果に大きな差が出ると考えられる。そこで、メッシュ別の死亡リスクについては以下のように考える。

あるメッシュに着目した場合、任意の破堤点*i*の破堤に伴う死亡リスク*D_i*は、

$$D_i = \sum_j \bar{d}_{ji} p_j \quad (1)$$

で表現される。ここで、 $\bar{d}_{ji}$ ：破堤点*i*における洪水規模*j*の時の死者数、 p_j ：洪水規模*j*の生起確率である。さらに、同一氾濫ブロック内の全破堤点に着目し、

$$D_{\max} = \max(D_1, \dots, D_i, \dots, D_N) \quad (2)$$

ここで、 $D_{\max}$ ：あるメッシュの最大死亡リスク、 D_i ：破堤点 *i* の破堤に伴う死亡リスク、*N*：同一氾濫ブロック内破堤点数である。

以上の考え方にに基づき、現況土地利用を条件にメッ

シュ別最大リスクを算定した。紙面の都合上、ここではケース1の例を図-6に示す。

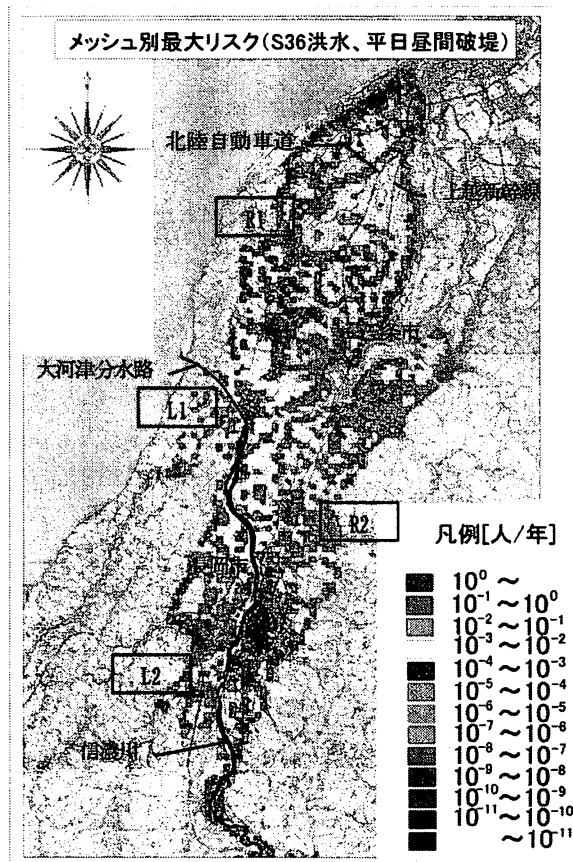


図-6 メッシュ別最大リスク図 (S36洪水、平日昼間破堤)

図-6 で示したメッシュ別最大リスクは、メッシュ内で1年間に平均的に最大何人が死亡するかを表しているため、長岡市をはじめとする人口集中地域の死亡リスクが高くなっている。新潟市については、破堤地点からは遠いが、最大浸水深が 5m 程度と大きいので、死亡リスクが高く表現されている。また、特徴的な点として、他の氾濫ブロックに較べて L1 ブロックは相対的に死亡リスクが高くなっている。大河津分水路左岸は氾濫形態が貯留型であり、最大浸水深が大きくなるため、建物内での死者が多い上に、氾濫開始後の水位上昇速度が速く、避難途中での死者も多くなる。

表-2 10万人あたりの年間死亡者概数

[人]

対象範囲	昼間人口	夜間人口	ケース1 (合理的避難)		ケース2 (非合理的避難)		ケース3 (週末夜間破堤)	
			S36	S54	S36	S54	S36	S54
L1	6,463	7,133	5.137	2.197	300.170	196.503	21.030	12.184
L2	71,108	78,200	0.298	0.130	72.988	29.955	0.895	0.304
R1	228,789	247,633	0.063	0.025	88.728	37.720	0.230	0.131
R2	263,483	260,999	0.050	0.022	48.201	14.119	0.586	0.229
流域	635,654	669,020	0.157	0.085	64.150	27.179	0.729	0.446

なお、ケース 3（週末夜間破堤）はケース 1 に較べて平均的には 5 倍程度リスクが高くなっており、ケース 2（非合理的避難）ではケース 1 に較べて平均的には約 400 倍程度リスクが高くなっている。

5. 他のリスクとの比較

(1) 年間死者数での比較

ここでは信濃川中流域を対象とした死亡リスクを用いて、他リスクとの比較を行う。まず、10 万人あたりの年間死者概数で他リスクとの比較を行う。

本研究においては、前述のメッシュ別最大リスクを氾濫ブロック内、あるいは流域内について足し合わせることで死亡者の期待値を算出し、年間死者概数を

$$\begin{aligned} & \text{年間死者概数[人/年]} \\ &= \frac{\text{氾濫ブロック内の死亡者期待値[人/年]}}{\text{氾濫ブロック内人口[人]}} \times 10 \text{ 万[人]} \end{aligned} \quad (3)$$

で算定した。

表-2は信濃川中流で比較的人口が多く、氾濫形態が拡散型となる妙見堰（信濃川30.0k）下流の氾濫ブロックごとあるいは中流域全体の年間死者概数について整理したものである。また、表-3には他の様々なリスク要因による10万人あたりの年間死者概数を示す。

流域全体では 10 万人あたり年間概ね 0.08～64 人程度の死者数となっている。また、ケースによって死者数に大きな差が見られるが、これらの差に最も大きな影響を与えているのが、「避難指示の有無」である。これにより、死者数は数 10 倍から数 100 倍異なっている。また、浸水後の避難行動の違いや想定している洪水波形そのものの影響も無視できないと考えられる。

(2) 損失余命による比較

他リスクとの比較という視点から「損失余命」が一つの判断指標として提案されている。損失余命⁴⁾とは「あるリスクにさらされている集団のうち何人かが疾病・障害などの健康影響を被り、生存年数を縮めてしまうものとする。そこで、本来享受するはずだった生存年

数の損失を集計したものを全員で配分して、一人当たりどれくらいの余命を損失するかを計算する」ものである。

表-3 さまざまなリスク一覧⁴⁾

要因	10 万人あたりの 年間死者概数[人]
ガン	250
心疾患（高血圧症を除く）	127
自殺	24
老衰	19
交通事故	9.0
火事	1.7
他殺	0.52
自然災害	0.10
飛行機事故	0.013

表-4 他リスク（化学物質）による損失余命例⁵⁾

リスク要因	損失余命[日]
喫煙 - 全死因	数年～10 数年
喫煙 - 肺癌	370
受動喫煙 - 虚血性心疾患	120
ダイオキシン類	1.3
ヒ素	0.62
DDT 類	0.016
クロルデン	0.009

損失余命の算定手法を示せば次のとおりである。

$$ROL = \frac{\sum (N_i \times E_{loss_i} \times R_i)}{\sum N_i} \quad (4)$$

ここで、ROL：対象範囲での損失余命[年 or 日]、 N_i ：対象範囲内の i 歳の人口、 E_{loss_i} ：一人当たり年平均損失年数、 R_i ： i 歳の平均余命である。

表-5は妙見堰（信濃川 30.0k）下流の氾濫ブロックあるいは中流域全体での損失余命である。これより、信濃川流域内に一生住むことによって数 10 分～7 日程度の日数を損失していることになる。また、地域ごとの死亡リスクをみるため、メッシュ別の損失余命図を図-7 に示す。表-4 は他リスクによる損失余命の例を示したのである。これによれば、信濃川における水害の死亡リスクはダイオキシン類～クロルデンの曝露による死亡リスクと同程度である。

表-5 損失余命

[日]

対象範囲	昼間人口	夜間人口	ケース1 (合理的避難)		ケース2 (非合理的避難)		ケース3 (週末夜間破堤)	
			S36	S54	S36	S54	S36	S54
L1	6,463	7,133	0.372	0.157	37.098	25.493	2.252	1.315
L2	71,108	78,200	0.030	0.014	9.973	3.963	0.074	0.023
R1	228,789	247,633	0.003	0.001	10.033	4.255	0.023	0.013
R2	263,483	260,999	0.003	0.002	5.746	1.660	0.045	0.018
流域	635,654	669,020	0.012	0.007	7.498	3.192	0.068	0.045

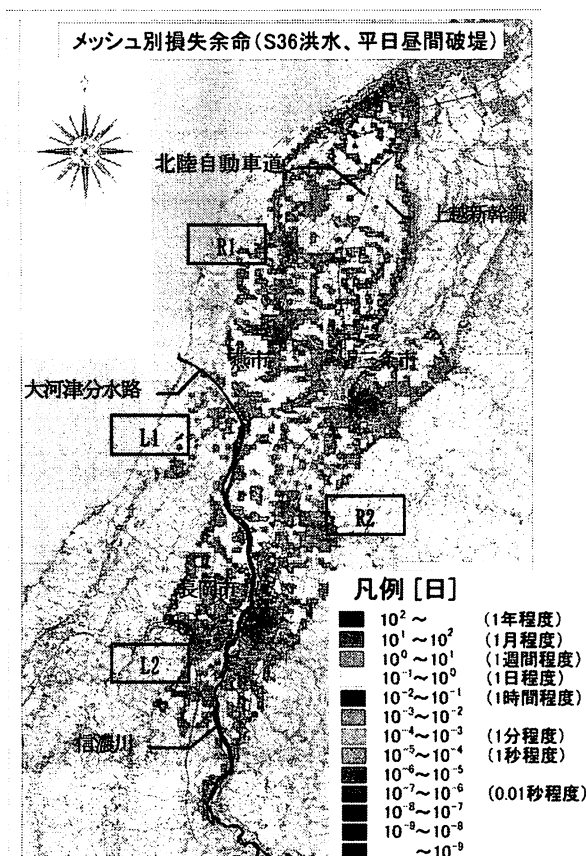


図-7 メッシュ別損失余命図 (S36洪水、平日昼間破堤)

6. 結論と今後の課題

本研究では、堤防の破壊確率を考慮し従来定量的に評価されることの少ない死亡リスクについて、いくつかのシナリオの想定を行って算定した。その結果、信濃川中流域全体では年間10万人あたり概ね0.08人～64人程度の死亡者数となるが、これらは「避難指示の有無」によって大きく変わることがわかった。また、損失余命でみると、数10分～7日程度となり、人口集中地域以外でも損失余命の高いところが見られた。

ただし、本研究で推定した死亡リスクには多くの課題が含まれている。

一つは、破堤確率の考え方について、過去の事例等も含めて検証を行っていき、考え方を精緻にしていく必要がある。特に、河川の洪水出水特性を反映した事前降雨状況と河川水位の組み合わせによる堤体内の浸潤線の変化と安全率の関係について整理を行い、堤防の破堤確率評価に用いる条件等について設定を行う必要がある。

第二には、死亡者数は住民の行動によって大きく異なるので、適正な条件設定が行えるように、実際の洪水氾濫時の住民の避難行動に関するデータを蓄積し、モデル化を行っていく必要がある。また、実際の洪水時には、自動車による避難など、徒歩以外の避難手段を用いるこ

とも多くあり、今後は徒歩以外の避難手段や地下空間での人的被害なども含めて死亡リスクを算定する必要がある。

上述のような課題はあるが、破堤確率や死亡リスクといった指標は、今後以下のような点に活用できると考えられる。

- ・ 計画規模の妥当性評価
- ・ 治水事業への投資の妥当性評価
- ・ 代替案の比較・評価
- ・ 防災計画等への活用
- ・ 浸水リスクの表現方法の検討
- ・ 安全な街づくりへの活用

但し、今回の検討結果を見てみると、氾濫原内の人口構成が大きく死亡リスクや損失余命に影響を与えていると思われ、死亡リスクだけを用いた評価を行うと、高齢化が進行している氾濫原では、治水事業を行っても損失余命が短くならないなどの弊害もでてくる。従って、治水事業の妥当性評価等においては、氾濫被害に伴う経済的な困窮度（流動性被害⁶⁾や精神的被害⁶⁾、地域コミュニティの崩壊の可能性等も含めた総合的な評価を行っていく必要があると考えられる。

また、環境リスクとの相対的な評価を行う場合には、環境リスクが国家的規模での評価であるに対して、今回の検討結果は、氾濫原の人口構成や地形的な特徴などが含まれた地域固有の値であることに留意して比較を行う必要がある。

参考文献

- 1) Gerald Stedje, Ph.D, Mark Landry, Maged Aboelata, Ph.D, : Estimating Loss of Life from Hurricane-Related Flooding in the Greater New Orleans Area, Abt Associates Inc.,2006.
- 2) 氾濫特性の異なる流域での避難行動, 水工学論文集, 第37巻, pp.233-238, 1993.
- 3) 須賀堯三, 上阪恒雄, 白井勝二, 高木茂知, 浜口憲一郎, 陳志軒: 避難時の水中歩行に関する実験, 水工学論文集, 第38巻, pp829-832, 1994.
- 4) 中谷内一也: リスクのモノサシ, 日本放送出版協会, 2006.
- 5) 中西準子: 環境リスク学 不安の海の羅針盤, 日本評論社, 2004.
- 6) 湧川勝己, 小林潔司, 幸弘美, 矢野定男, 伊藤弘之: 洪水氾濫による精神的被害と流動性被害の研究-浸水被害実態の治水経済調査への反映を目指して-, 河川技術論文集, 第13巻 (土木学会), p427-432, 2007年6月

(2008.4.3受付)