

総合的な流域内治水対策のための水害リスクマッピングシステムの開発*

Development of Risk Mapping System for Integrated Flood Risk Management*

畑山満則**・田馳***・多々納裕一****

By Michinori HATAYAMA**・Chi TIAN***・Hirokazu TATANO****

1. はじめに

水害に対して脆弱な地域へ人口・資産の集積が進んできた結果として、単一の水害の発生に伴う被害が甚大なものとなる傾向が近年顕著に観察されるようになってきた。例えば、1999年の福岡水害や2000年の東海水害等では、市街化区域として計画的に都市的土地利用への転換が進められてきた地域において発生した浸水が甚大な被害をもたらした。これらの水害を教訓として、堤内地における対策を含む総合的な流域内治水対策の重要性が認識されるようになってきた。すなわち、従来の河川内施設整備を中心とした治水対策にとどまらず、当該都市内の被害対象物の立地誘導やそのための情報提供を含む流域全体で治水対策を講じることの重要性が再認識されているのである。

本研究は、このような治水対策に関する社会的要請を背景として、このような総合的な流域内治水対策（以下、「流域治水」と呼ぶ）を促進するために、有効な水害危険度情報の提供方法を提案し、そのための水害リスクマッピングシステムを実装することを目的とする。

水害による被害の程度は、水害危険度に依存して異なったものとなっている。また、水害軽減対策には、実施する主体が「行政」「地域コミュニティ」「住民」の三つあり、それぞれハード的な水害軽減対策、ソフト的な水害軽減対策がある。水害に対して安全な都市の形成のためには、ハード的な水害軽減対策とともに、水防法・災害対策基本法等に基づく情報提供、水防活動、避難行動等といったソフト的な水害軽減対策も重要である。例えば、水害危険度の高い地域から事前に人命・資産を分散させておくようなソフト的な防災対策を講じておくこ

とが有効であると考えられる¹⁾。水害発生前の段階においては、土地利用制御管理のための有効な水害危険度情報の提供により、有効なソフト的な被害軽減対策を実現することが考えられる。具体的には、「居住地として開発されるべきか」とか、「居住地として開発されたら、どのような土地規制を施すべきか」とかのような被害軽減活動に関する意思決定のためには、有効な水害危険度の情報提供は必要不可欠である。また、水害が発生した際に、安全に避難することを可能とするためには、少なくとも事前に避難計画を立案しておくことが必要であろう。このためには、「流域内のどの地域が生命の危機に瀕するような事態に直面しうるのであるのか」、「避難ルートは確保しうるのであるのか」、「避難先は十分か」などの検討を事前に行うことが必要となる。このような検討を事前に行っておけば、水害時に住民が自律的に避難を行う体制の確立を実現することが期待されるからである。

したがって、これを実現するための有効な水害危険度の情報提供は必要不可欠である。つまり、水害発生前の段階においては、住民を安全な土地に住むように誘導するため、水害発生後の段階においては、住民を安全なところに避難誘導させるためにも、まず、事前に水害危険度に関する情報提供を提供することが重要であると考えられる。そこで、本研究では、有効な水害危険度情報の提供方法を提案し、そのための水害リスクマッピングシステムの実装を行った。図-1に本研究の位置付けを示す。

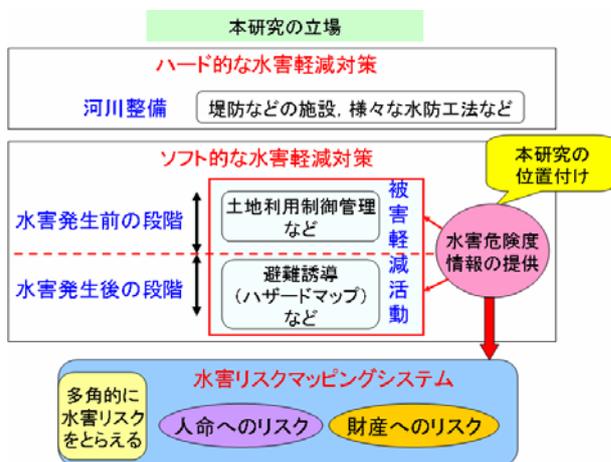


図-1 本研究の位置付け

*キーワード：リスク、GIS、水害

**正員、工博、京都大学防災研究所

(京都府宇治市五ヶ庄、

TEL0774-38-4333、FAX0774-38-4044)

***工修、メリルリンチ日本証券株式会社

**正員、工博、京都大学防災研究所

(京都府宇治市五ヶ庄、

TEL0774-38-4308、FAX0774-38-4044)

2. リスクの可視化

流域治水を進めるために有効な水害危険度情報の提供方法としては以下のような要件を満たすことが必要であろうと考えている。

- ① 俯瞰的に流域内の水害リスクの空間分布を把握できること
- ② 流域治水で用いられる施策の効果がその空間分布にいかなる変化をもたらすかを評価することが出来ること

F. Knight²⁾によれば、リスクは損失の確率分布として定義される。この定義は、経済学をはじめ、リスクマネジメントなどの分野で広く受け入れられている。水害リスクも水害による損失の確率分布であると考えられるならば、水害リスクを単一の特性値で表現しつづすことは不可能である。

ところが、流域内におけるリスクの地理的な分布を表現しようとするれば、色分け等を用いても2次元空間上に表わしうる属性は多くの場合1つに限られる。従って、流域内に分布する被害対象物一つ一つに対して描かれる損害の確率分布を地図上では一つの特性値として表現することが必要になる。そこで、本研究では、水害リスクマッピングに際して、人命、財産を被害対象として同定することとした。そして、それぞれが被る損害の確率分布を代表しうるリスク評価指標について考察し、人命リスクおよび財産リスク評価指標として定式化した。この際、人命へのリスクは取り返しのつかない損失、つまり不可逆の特徴を持ち、財産へのリスクは取り返しのつく損失、つまり可逆の特徴を持つので、人命へのリスクと財産へのリスクを捉えるに際して、それぞれに必要なとなる評価指標を複数個提案し、多角的に水害リスクをマッピングする手法を用いた。加えて、上述のようなシステムへの要請に応えるためには、上記のように情報を縮約して指標化し、水害リスクの空間分布やその変化を表示することが出来るシステムを開発することが必要となる。そこで、本研究では、時系列地理データの扱いに長けている時空間情報システムDiMSIS³⁾をベースに、水害リスクマッピングシステムの開発を行った。

3. 水害リスクマッピングシステムの提案

(1) 水害リスクの規定方法

水害リスクのマッピングのための指標選定に先立つて、ソフト的な水害軽減対策を検討する際に、水害リスクのどのような側面が重視されてきたかをいくつかの法律をもとに考えてみよう。

建築基準法第39条では、災害危険区域の指定に関する法的な規制などの内容からなっている。表-1に、建築

基準法第39条を示す。

表-1 建築基準法第39条

建築基準法第39条に基づく災害危険区域の指定
第39条 地方公共団体は、条例で、津波、高潮、出水等による危険の著しい区域を災害危険区域として指定することができる。
2 災害危険区域内における住居の用に供する建築物の建築の禁止その他建築物の建築に関する制限で災害防止上必要なものは、前項の条例で定める。
条例による規制の例：宅地かさ上げ、高床式建築、建築の禁止

建築基準法第39条により、土地利用規制の前提として、危険の著しい区域の定義を決めることが重要なポイントであることが分かる。つまり、何を基準にして危険の著しい区域を定義するかを検討する必要がある。そこで、危険の著しい区域を定義するために、水害におけるリスクのから考えてみよう。リスクとは、望ましくない結果をもたらす可能性のことを指す。水害におけるリスクとは、すなわち、水害により人間の生命や健康、財産に望ましくない結果をもたらす可能性のことを指す。水害リスクは「被害の大きさ」と「発生確率」の二つの要素からなっている。つまり、水害リスクは結果と頻度の二つの要素に大きく左右される。したがって、危険の著しい区域の定義に関しては、結果、頻度、結果&頻度を評価基準とする三つの定義が考えられる。そこで、表-2に示すような、危険の著しい区域の定義を提案した。

表-2 危険の著しい区域の定義

危険の著しい区域の定義
I 甚大な被害を受ける可能性のある区域 (→結果)
II 極めて高い頻度で被害を受ける可能性のある区域 (→頻度)
III 甚大な被害を受ける可能性があり、かつ極めて高い頻度で被害を受ける可能性のある区域 (→結果&頻度)

危険の著しい区域の定義を示したら、次いで危険を受ける側を考えてみる。水害による被害を評価するに際して、主に人命と財産の二つの視点から評価されることが一般的である。そこで、本研究においては、災害危険区域の指定に際しては、危険の著しい区域の定義に照らし、水害リスクを、人命へのリスクと財産へのリスクの2つの側面からみて、水害危険度情報の提供方法を考察した。ただし、人命へのリスクと財産へのリスクは人命及び財産の脆弱性・損失の観点から考えている。

(2) 人命リスクマッピングのための評価指標

人命へのリスクの評価にあたっては、人命を損なうような水害の発生確率を推定し、これを地理情報システム上に表示することを考えている。具体的には、まず、その水深を超えると人命が損なわれる可能性が高い水深を「危険水深」と定義し、危険水深を超える水深をもたらす水害の発生確率を流域内の各地先で求めそれを表示しようとした。つまり、人命へのリスクの評価に当たっては、「危険水深」の閾値を決めた上で、その水深を超える水害の発生確率（以下、「人命損傷の発生確率」と呼ぶ）で地理情報システム上にマッピングする手法を提案することとした。ある地点における人命損傷の発生確率を P_i とし、次式のように定義する。

$$\text{人命損傷の発生確率: } P_i = \max_{s \in S} \{P(\max_i \{h'_i(s)\} \geq H)\} \quad (1)$$

$h'_i(s)$: 浸水深 H : 危険水深
 i : マッピング単位識別子 s : シナリオ識別子

つまり、人命損傷の発生確率は危険水深以上の水深を起りうるシナリオの発生確率の最大値である。危険水深の閾値を決めるに際して、様々な選定方法が考えられる。例として、2メートルを閾値とする選択肢が挙げられる。2メートルという高さは、即ち、人間の身長を超える高さで、ほぼ一階の軒の高さ、つまり2Fの床に達する高さに等しいものである。この浸水深を超える水害の場合、建物は全損の可能性は極めて高い（被害認定基準）ことが示されている。また、二階のない建物に在住する人々に対しては、二階に避難することができないため、人命リスクが著しく高くなると考えられる。さらに、たとえ二階のある建物に在住しても、二階まで避難できない人々（高齢者や要支援者）にとっては人命リスクが極めて高くなるのであろう。そこで、本研究では2メートルを「危険水深」の閾値として定め、分析を進めることとした。

また、破堤シナリオ等の違いによって、被害の様相は異なるが、このような情報の縮約化のためにこれらの違いは地図上には明示的に表れない。しかしながら、人命のように取り返しのつかないリスクに関しては、この種の不確実性を補足的に説明できるように、水害の発生確率別の悲観的人命損傷危険度マップと楽観的人命損傷危険度マップを表示する機能を付加することとした。具体的には、悲観的人命損傷度マップにおける水深は、生起確率を所与として、発生しうる最大の浸水深を与えるものである。これは、同一の生起確率をもつ氾濫シナリオ毎に、当該地点における浸水深の最大値を求め、さらにシナリオを比較してその最大値を算定することによって得られる水深である。以下、これを「危険側にみた最大浸水深」と呼ぶこととする。

危険側にみた最大浸水深は、以下のように定式化される。

$$\text{危険側にみた最大浸水深: } \bar{h}_i^{\max} = \max_{s \in S} \{\max_i \{h'_i(s)\}\} \quad (2)$$

$h'_i(s)$: 浸水深 i : マッピング単位識別子 s : シナリオ識別子

悲観的人命損傷度マップにおいては、可能最大浸水深を評価指標として、その分布を地図上に表示することとする。

一方、楽観的人命損傷度マップにおける水深は、生起確率を所与とすれば、その発生を覚悟する必要がある浸水深を与えるものである。これは、同一の生起確率をもつ氾濫シナリオ毎に当該地点における浸水深の最大値を求め、さらにシナリオを比較してその最小値を算定することによって得られる水深である。以下、これを「安全側にみた最大浸水深」と呼ぶこととする。

安全側にみた最大浸水深は、以下のように定式化される。

$$\text{安全側にみた最大浸水深: } \bar{h}_i^{\min} = \min_{s \in S} \{\max_i \{h'_i(s)\}\} \quad (3)$$

$h'_i(s)$: 浸水深 i : マッピング単位識別子 s : シナリオ識別子

楽観的人命損傷度マップにおいては、安全側にみた最大浸水深を評価指標として、その分布を地図上に表示することとする。

(3) 財産リスクマッピングのための評価指標

財産へのリスクは取り返しのつく損失、つまり可逆の特徴を持つので、財産へのリスクの評価にあたっては、結果と頻度の両方を重んじる定義Ⅲを用いることにした。それで、流域内の各地先における被害率や被害額の期待値を財産へのリスクの評価指標として提案した。これらをそれぞれ「期待被害率」、「期待被害額」と呼ぶ。期待被害率は、当該地点における平均的な資産損傷の可能性を示す指標であり、当該地点に集積している資産の状況に依存しないことから、潜在的な資産損傷のリスクを代表する指標となっている。

期待被害率は、同一の生起確率をもつ氾濫シナリオ毎の平均被害率と生起確率の積分により求められる。なお、期待被害率は式(4)に示すように定式化される。

$$\text{期待被害率: } E_s[r(h_i^{\max}(s))] = \int_S (r(h_i^{\max}(s)) \times p^i(s)) ds \quad (4)$$

$r(h_i^{\max}(s))$: 被害率 $h_i^{\max}(s)$: 最大浸水深 $p^i(s)$: 生起確率
 i : マッピング単位識別子 s : シナリオ識別子 S : シナリオパターン識別子

一方、期待被害額は当該地点における現状の資産の集積状況を反映しているので、現状における資産損傷のリスクを縮約して表す指標である。期待被害額は式

(5) に示すように、期待被害率と当該地点の資産総額の積により求められる。

$$E[A_i] = E[r_i] \times A_i \quad (5)$$

$E[A_i]$: 期待被害額 $E[r_i]$: 期待被害率 A_i : 資産総額 i : マッピング単位識別子

家屋・家財の保全行動の実態に関する調査では、被災時に多くの被災者が効率的な家財保全行動ができなかったことが指摘された[12]。例えば、「東海豪雨災害では、60%以上の住民が家財の移動などの保全行動を行っておらず、浸水状況など事態の進展が急であったこと」という調査結果があった。そのため、期待被害額のような災害危険度情報を被災前に住民に知らせることや、期待被害額分布のような災害危険度情報を被災前に行政の意思決定者に提供することが地域の防災力向上に役に立つであろう。しかしながら、ある地点における現在の財産リスクは期待被害額によって指標化されるが、土地利用変化に伴う財産リスクの変化などを検討する際にはむしろ期待被害率を用いることが有効であろう。

3. 水害リスクマッピングシステムの構成

水害リスクマッピングシステムの全体構成を示すクラス図を図-2に示す。システムにおけるクラスには、人命損傷発生確率分布マッピング、悲観的人命損傷危険度マッピング、楽観的人命損傷危険度の機能を実現する人命リスクマッピングのオブジェクトと、期待被害率分布マッピング、期待被害額分布マッピングの機能を実

現する財産リスクマッピングのオブジェクトが挙げられる。二つのオブジェクトは、GISとしてシステムのコアを制御するDiMSISの管理下にある。さらにこれらのオブジェクトが利用するデータには、時系列浸水深、マッピング単位、建物形状ベクタデータ、背景イメージのラスターデータが考えられ、これらのデータもDiMSISが管理している。時系列浸水深は、複数の降雨確率と、さらに降雨確率毎の破堤の有無、あるいは破堤地点によって規定される氾濫シナリオを持ち、シナリオ毎に地理的座標と時間を属性に持つ点列によって構成されている。これに対して位置情報を持つマッピング単位のデータにおいては、メッシュデータや町丁目データによって構成されている。システムにはこれに加えて建物属性と地理データとしての形状を持つ建物形状とが統合されている。

4. 姉川・高時川下流域への適用

本論文においては、その対象地域を滋賀県の姉川・高時川下流域と定めた。正確には、1. 西浅井町、2. 余呉町、3. 木之本町、4. 高月町、5. 湖北町、6. 虎姫町、7. 長浜市、8. 米原市の八つの地域である。その位置を図-3に示す。この地域は姉川・高時川の沿岸地域であり、姉川・高時川の氾濫による被害を受ける

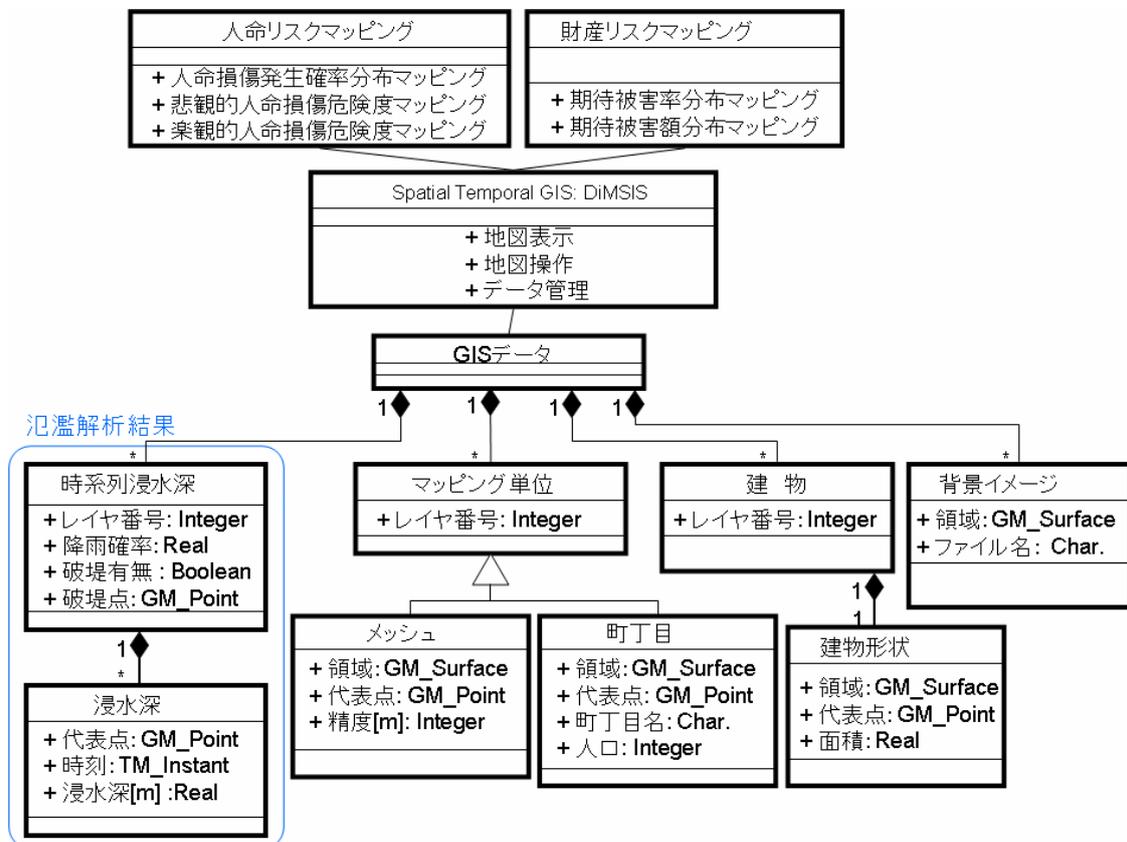


図-2 水害リスクマッピングシステムの構成

可能性が高い地域となり、水害危険区域と思われる極めて危険な地域である。特に、高時川は、下流地域においては天井川となり、いったん堤防が決壊すると、その被害は甚大なものとなる。



図-3 対象地域の位置

(1) 利用したデータベースについて

検証実験においては、滋賀県より提供を受けた氾濫解析結果のデータを水害リスクマッピングシステムに統合し、機能の実現を図った。提供された氾濫解析においては、姉川・高時川の計画対象洪水が発生した場合における破堤の場所を想定しており、破堤は、堤防天端高さから余裕高を差し引いた高さに水位が達した場合に破堤することを原則としている。ただし、これで破堤しない場合は、ピーク流量時の水位が破堤敷高（堤内地盤高と

表4-2 シナリオパターンの詳細

番号	河川	生起確率	岸	場所	番号	河川	生起確率	岸	場所
1	高時川	1/30	左	4.00k	25	姉川	1/50	右	3.10k
2	高時川	1/50	左	4.00k	26	姉川	1/50	右	3.10k
3	高時川	1/50	右	4.20k	27	姉川	1/50	右	5.00k
4	高時川	1/50	左	4.60k	28	姉川	1/50	右	5.40k
5	高時川	1/50	左	13.20k	29	姉川	1/50	左	6.60k
6	高時川	1/50	左	16.00k	30	姉川	1/50	左	7.60k
7	高時川	1/50	左	16.00k	31	姉川	1/50	左	7.60k
8	高時川	1/100	左	4.00k	32	姉川	1/50	左	8.40k
9	高時川	1/100	右	4.20k	33	姉川	1/50	右	9.08k
10	高時川	1/100	左	4.60k	34	姉川	1/50	左	14.04k
11	高時川	1/100	右	5.20k	35	姉川	1/50	左	14.14k
12	高時川	1/100	右	6.18k	36	姉川	1/100	右	3.10k
13	高時川	1/100	左	6.98k	37	姉川	1/100	左	3.10k
14	高時川	1/100	右	12.60k	38	姉川	1/100	右	5.00k
15	高時川	1/100	左	13.20k	39	姉川	1/100	右	5.40k
16	高時川	1/100	右	13.40k	40	姉川	1/100	左	6.60k
17	高時川	1/100	左	16.00k	41	姉川	1/100	左	6.90k
18	高時川	1/100	左	16.00k	42	姉川	1/100	右	7.60k
19	姉川	1/10	右	5.00k	43	姉川	1/100	左	7.60k
20	姉川	1/10	左	14.14k	44	姉川	1/100	左	8.40k
21	姉川	1/30	右	5.00k	45	姉川	1/100	右	9.08k
22	姉川	1/30	右	7.60k	46	姉川	1/100	右	14.04k
23	姉川	1/30	左	7.60k	47	姉川	1/100	左	14.14k
24	姉川	1/30	左	14.14k					

発生確率	1/10	1/30	1/50	1/100	合計
シナリオ数	2	5	17	23	47

高水敷高の高いほう) を超える場合にのみピーク水位に達した時点で破堤させることとされている。シナリオに関しては、内水氾濫から破堤を伴う大規模な複合反乱まで、合計47種の水害シナリオを備える。シナリオパターンの発生確率は1/10, 1/30, 1/50, 1/100, 1/500の四種類であり、シナリオパターンの詳細は表-3に示す通りである。なお、水害リスクのマッピング単位は100m*100mのメッシュデータである。

(4) マッピング結果と考察

a) 人命リスクに関する考察

人命損傷の発生確率分布のマッピング結果を用いて、人命リスクを評価する。なお、本研究では、人命リスクに関する危険水深を2メートルとした。図-4に、危険水深が2メートルの場合における人命損傷の発生確率分布のマッピング結果を示す。

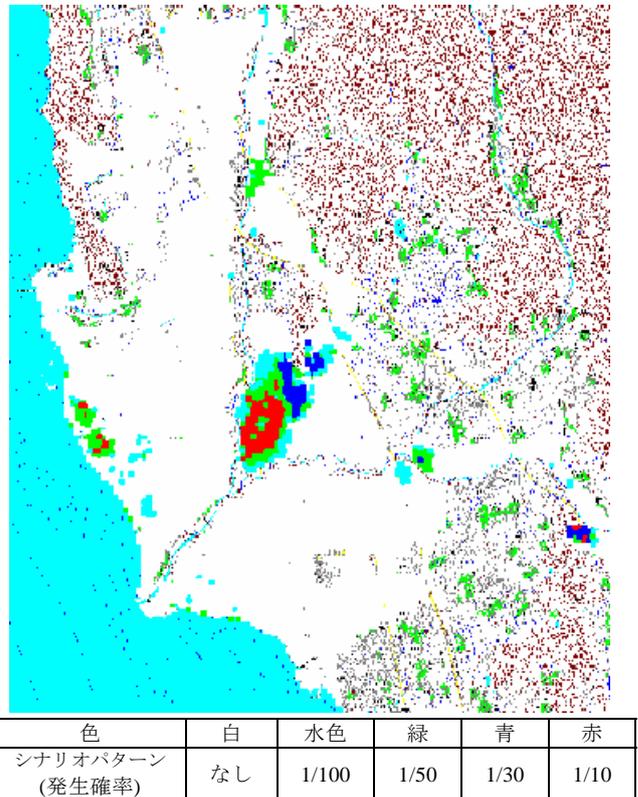


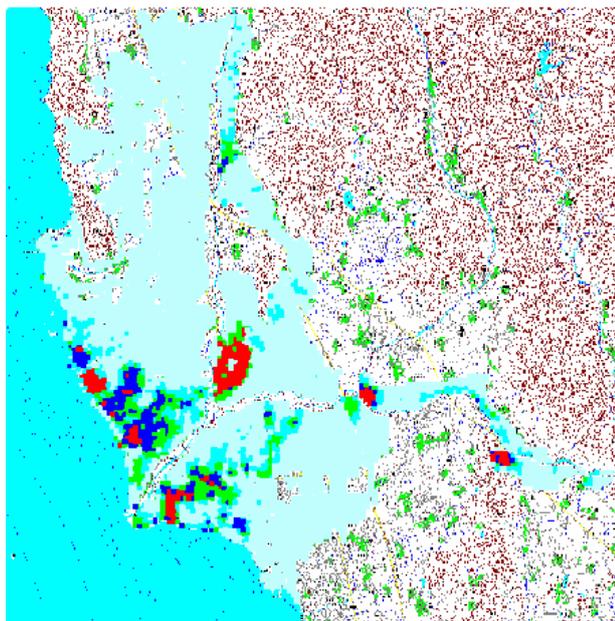
図-4 人命損傷の発生確率分布

図-4の結果によると、赤色、青色、緑色、水色、浅水色でマッピングされたところにおいては、人命リスクがあることが確認された。また、危険水深の発生確率によると、赤色でマッピングされた地域では、発生確率が1/10の規模の水害でも人命リスクが発生する可能性が考えられ、かなりの確度で人命リスクが発生することが分かる。ただし、破堤シナリオ等の違いによって、被害

の様相は異なるが、このような情報の縮約化のためにこれらの違いは人命損傷の発生確率分布には明示的に表れない。しかしながら、人命のように取り返しのつかないリスクに関しては、この種の不確実性を補足的に説明できるように、水害の発生確率別の悲観的人命損傷危険度マップと楽観的人命損傷危険度マップを付加して、人命リスクの評価を行う必要がある。

b) 財産リスクに関する考察

財産へのリスクについて、流域内の各地先における被害率の期待値である「期待被害率」を用いて考察を行う。期待被害率は、当該地点における平均的な資産損傷の可能性を示す指標であり、当該地点に集積している資産の状況に依存しないことから、潜在的な資産損傷のリスクを代表する指標となっている。一方、期待被害額は当該地点における現状の資産の集積状況を反映しているので、現状における資産損傷のリスクを縮約して表す指標である。従って、ある地点における現状の財産リスクは期待被害額によって指標化されるが、土地利用変化に伴う財産リスクの変化などを検討する際にはむしろ期待被害率を用いることが有効であろう。図-5では、期待被害率分布のマッピング結果の一例を示す。この場合、期待被害率の凡例表示形式は均等間隔で0.5パーセントごとに異なる色でマッピングされるようにした。



色	浅水色	水色	緑	青	赤
期待被害率	~0.5%	0.5%-1.0%	1.0%-1.5%	1.5%-2.0%	2.0%~

図-5 期待被害率分布

図-5の結果によると、赤色でマッピングされた地域に

おける潜在的な財産リスクが最も大きいと思われる。そのため、赤色でマッピングされたところに関しては、人口・財産の集中をなるべく抑えるべきだと思われる。なお、当該地域における潜在的な財産リスクの大きさは赤色、青色、緑色、水色、浅水色の降順に従うことが分かる。

5. おわりに

本研究では、流域治水の必要性を示し、流域治水促進のために有効な水害危険度情報の提供手法についての検討を行った。流域治水を進めるために有効な水害危険度情報の提供方法としては以下のような要件を満たすことが必要である。すなわち：①俯瞰的に流域内の水害リスクの空間分布を把握できること、②流域治水で用いられる施策の効果がその空間分布にいかなる変化をもたらすかを評価することが出来ること、である。そこで、水害リスクを、人命へのリスクと財産へのリスクの2つの側面からみた水害危険度情報の提供方法を提案した。具体的には、人命リスクの評価に関しては、人命損傷の発生確率分布を評価指標として提案し、取り返しのつかないような人命リスクにおける不確実性を補足的に説明するために、水害の発生確率別の悲観的人命損傷危険度マップと楽観的人命損傷危険度マップを追加した。一方、財産リスクの評価に関しては、期待被害率と期待被害額を評価指標として提案した。ある地点における現状の財産リスクを考察する場合は、期待被害額を用いることが有効であり、土地利用変化に伴う財産リスクの変化などある地点における潜在的な財産リスクを検討する際には期待被害率を用いることが有効と思われる。これらを実現する水害リスクマッピングシステムの設計と実装を行った。さらに、滋賀県姉川・高時川下流域において行われた水害リスクマッピングシステムの評価検証実験を行った。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：社会資本整備審議会河川分科会第6回豪雨災害対策総合政策委員会資料，<http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai/shakai/050418/>，2005.
- 2) Knight, F. H.: Risk, uncertainty, and profit, New York, Century Press, 1921.
- 3) 畑山満則，松野文俊，角本繁，亀田弘行：時空間地理情報システムDiMSISの開発，GIS-理論と応用，Vol. 7, No.2, 1999.