

水害時の避難解析システムの構築と 危機管理対応支援への適用性検討

DEVELOPMENT OF EVACUATION ANALYSIS SYSTEM FOR FLOOD EVENTS AND VERIFICATION OF APPLICABILITY TO EMERGENCY MANAGEMENT

飯田進史¹・舘健一郎²・武富一秀²・川本一喜²・金木誠²・平川了治¹・谷岡康¹
Shinji IIDA, Kenichiro TACHI, Kazuhide TAKEDOMI, Kazuki KAWAMOTO, Makoto KANEKI
Ryouji HIRAKAWA and Yasushi TANIOKA

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 水工技術本部 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

²正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 水害研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地)

The objective of this study is to construct an refuge action analysis system utilizing GIS. The system aims at supporting evacuation planning such as selection of appropriate shelters, escape routes for evacuees and decision of timing for issuing evacuation orders or advisories. Results of precise inundation analyses with various flood conditions are introduced to the system, making the refuge action analysis suitable to probable phenomena during floods.

For the purpose of putting the system into practice, the applicability of this system to emergency management is verified in this study.

Key Words : emergency management, refuge action analysis, damage mitigation, GIS

1. はじめに

洪水時の危機管理対応のうち、人命の損失を防ぐという点からみて、避難活動を迅速かつ的確に行うことは最も重要である。しかし、避難勧告の発令は地域防災計画書において抽象的な表現にとどまっていることがほとんどで、明確な基準を定めている自治体は少ない。実際には、多くの自治体で過去の災害経験、現場情報、気象予測情報を総合的に判断しているが、現象把握が難しく、避難勧告・指示の発令等の判断が必ずしも迅速・適切に行えない状況にある。このような問題の解決には、浸水氾濫の定量的予測と、それを踏まえた住民避難行動の予測に基づく適切な判断が必要である。

本研究では、最適な避難所や避難路の選定、避難勧告・指示などの発令の判断を支援するためのGIS (Geographic Information System) を活用した水害時の避難解析システムを構築し、危機管理対応の支援に対する適用性について検討した。これらは、水情報国土の構築¹⁾にもあげられている「きめ細かなリアルタイムな氾濫予測による被害の軽減」や、人的被害の軽減に貢献するものであると考える。

2. 水害時の避難解析システムの構築

(1) 避難解析システムの概要

本システムは、水害時の危機管理対応の最も重要である避難勧告・指示を行う行動を支援するために、様々な水災シナリオ (水害の規模、パターン、昼夜間の別) のもと市内の住民や滞在者が最適な避難所への避難行動を行った際の避難状況の相違を評価できるシステムとしてリアルタイム性を重視して構築している。行政機関から発せられた情報の伝達過程と、情報を得た住民の避難意思決定、道路上を通った避難所への移動過程を追跡している。さらに、氾濫解析による浸水域予測と重ね合わせ、避難可能者数などを算出することで避難勧告・指示のタイミングや避難経路や避難場所の指定の妥当性と効果を評価できる。

解析には、GISの空間解析やネットワーク解析機能を活用しており、解析対象となる住民の属性データなどは、既存のGISデータベースを活用して作成している。また、道路ネットワークデータにレーザースキャナーで計測された標高データを与え、道路の浸水深を評価した上で、それに基づく避難行動予測を行っている。したがって、浸水に

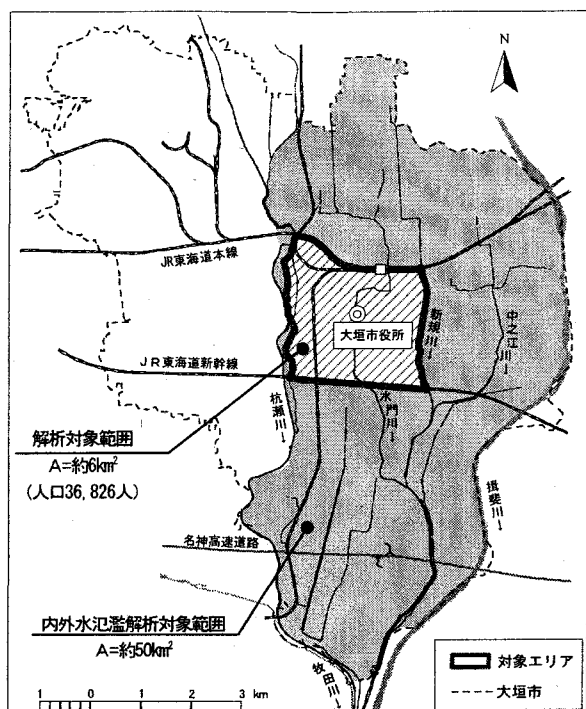


図-1 検討対象位置図

より避難が危険となる道路の特定や浸水による歩行速度の低減等が考慮可能である。

図-1に検討対象位置図を示す。内水及び外水の氾濫解析³⁾の対象は岐阜県大垣市の揖斐川と杭瀬川に囲まれた低平地とし、その氾濫解析結果を用いて図中の大垣市役所を中心とした約6km²を対象に避難解析を行った。避難解析システムの解析手順は図-2に示す通りであり、著者らが開発してきた手法²⁾を基本とするが、新たに本研究で追加・改良した点について以下に示す。

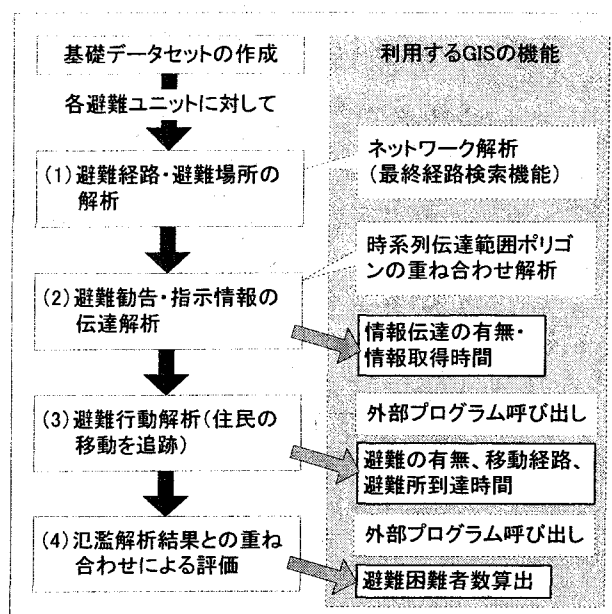
(2) 避難解析システムの改良点

a) 既往システム²⁾の課題

既往のシステムでは、内水及び外水氾濫の精緻な解析結果（浸水深の経時変化）を考慮しておらず、1kmメッシュによる粗い外水氾濫解析より得られた最大浸水深を用いて避難行動の評価を行っていた。また、避難者の最小ユニットを町丁目単位としており各戸のマイクロレベルの避難状況を追跡できるモデルではなかった。以上の2点を水害時の危機管理対策に適用可能な避難解析システムとしての課題と認識し、改良を行っている。

b) 改良1：内水及び外水氾濫解析結果の取り込み

岐阜県大垣市を対象として、内水・外水の双方を考慮した氾濫解析が行われており、100mメッシュで時系列の浸水深を得ることができる³⁾。本システムでは、これまで行われていたようなメッシュの水深による歩行阻害を考慮した避難解析検討⁴⁾ではなく、避難経路となる道路アークの浸水深で歩行阻害を評価する。そのため、道路アークの時系列平均水深の設定が必要となる。そこで、氾濫解析

図-2 避難解析システムの解析手順²⁾

結果のメッシュ浸水深を道路アークに与え、システムに取り込む機能を追加した。道路アークの浸水深は、ネットワーク構造化されたアークに対する両端のノード標高値と氾濫解析結果の浸水位を用いてノードの浸水深を算出し、アーク両端のノードの浸水深平均値をアークの水深とした。道路アークの属性に加える浸水深データとしては、平均的な歩行速度を60m/分とする⁵⁾と100mを移動するのに約2分弱要することから、2分ピッチ程度の氾濫解析結果（浸水深）が望ましいと考えられる。しかし、その場合避難ユニット全体の避難完了までに12時間程度かかることから膨大なデータが必要となってしまう解析時間が問題となる。本システムは、危機管理対応時における活用が第一目的であることからリアルタイム性を最重視している。また、検証フィールドが低平地で浸水変化が緩やかなことから30分ピッチでも十分実用に耐えうると判断し、その間の計算ピッチは内挿値を用いるものとした。

c) 改良2：道路冠水による歩行速度割引率の導入

上項で設定した時系列の浸水深による歩行割引率として、伊勢湾台風時に大人の男が約70cm以下で浸水中やっとな脱出できたという事例をもとに、湛水深70cm以上で歩行不可能とし $W=1-h_t/70$ (W : 歩行速度割引率, h_t : ある時間 t から $t+\Delta t$ における最大湛水深)と設定した⁶⁾。今後、この種のデータが蓄積された場合を考え、湛水深と割引率の関係は、テーブルで任意に設定できるようにしている。

(3) GISを用いたデータセット

避難解析システムでは、表-1に示すデータセットを必要とするが、本システム構築上特筆すべきデータセットについて説明する。

表-1 避難解析に必要なデータセット

項目	属性	基礎データ
避難ユニット	位置	大垣市都市計画GISデータ(平成10年度)
	人口(昼夜間)	平成12年度版大垣市統計
	年齢属性ABC	平成7年国勢調査地域メッシュ統計
道路ノード	位置	1/2500空間データ基盤
	標高	レーザーキャナー計測データ
道路アーク	位置、延長	1/2500空間データ基盤
	標高	レーザーキャナー計測データ
	幅員	大垣市住宅地図
避難場所	位置	平成12年度水防計画書、大垣輪中水防事務組合
	階数、床面積	大垣市都市計画GISデータ(平成10年度)

a) 避難ユニット

避難行動を行う最小単位である避難ユニットを設定する。避難解析の検討対象エリアとしている大垣市では都市計画GISデータの構築が進んでおり、建物の面積や用途、階数を属性とした建物ポリゴンデータが整備されている。避難行動を解析する際の最小単位としては世帯単位(=建物単位)が考えられ、ここではこのデータを使用して避難ユニット及び要避難者数を設定している。平成7年国勢調査地域メッシュ統計の人口属性データを大垣市都市計画GISデータの建物ポリゴンに重ね合わせ、建物毎の世帯属性を与えている。年齢属性を3種別に分類することで年齢による初期歩行速度の違いを考慮できるようにしている²⁾。また大垣市の統計と建物用途等により昼夜間での避難者の分布を考慮出来るものとしている。

b) 道路ネットワークデータ

避難解析を行う際に必要な道路ネットワークデータとしては、国土地理院作成の「数値地図2500空間データ基盤」のroadntwk.arc及びroadntwk.nodeを用いた。本システムでは、道路冠水による歩行速度割引を考慮するため、ノードに標高値の属性を追加する必要があるため、ポリゴンとレーザープロファイラのランダムデータ(ポイント)とをオーバレイし、道路ノードのバッファに対して結合された標高の平均値をノードの標高として設定し、道路上の精密な浸水深を表現できるデータセットとしている。ここで用いたレーザープロファイラの標高データは、高さ精度15cmの2.5mメッシュデータである。

(4) 避難解析の方法と諸条件

a) 避難勧告・指示情報の伝達解析

洪水時の避難情報伝達過程は、市役所からの情報が直接伝わるもの(一次伝達)と、その情報を入手した住民から口コミ及び電話によって他に伝わるもの(二次伝達)をモデル化している。一次伝達では、大垣市のヒアリング結果を参考に、広報車、防災行政無線、CATVの伝達手段をモデル化しており、経過時間毎の情報伝達範囲と避難ユニットの重ね合わせにより、情報取得する避難ユニットを求めており、市役所が勧告した情報は、すべて住民及び滞在者に伝わるものとしている(伝達率100%)。

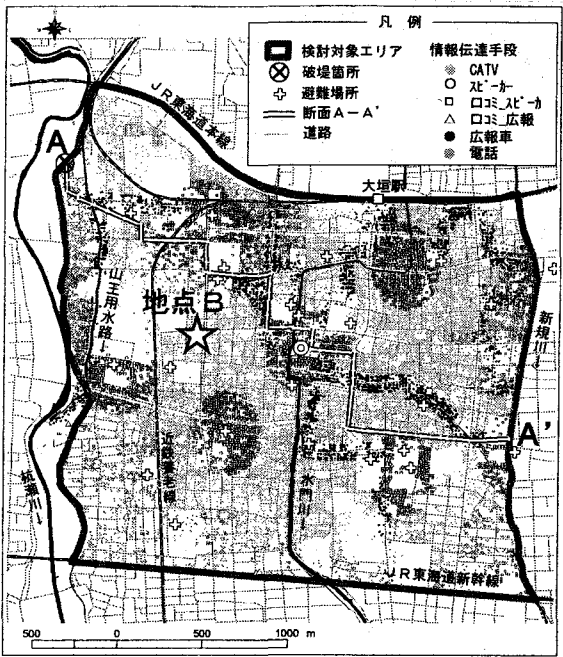


図-3 情報伝達手段

二次伝達では、新規に情報を入手してから近所へと直接訪問・電話連絡等で伝播する事象と、市内全域を対象に電話連絡される事象を分けてモデル化している。図-3は、対象としているエリアの避難ユニットに対し、取得した情報の伝達手段を表示したものである。手段別の情報分布が表現されていることがわかる。また、検討エリア内の避難ユニットを対象としているが、最も近い避難場所がエリア内とは限らないのでエリア周辺の避難場所も取り込んでいる。

b) 避難意思決定

要避難率は一般的には最大湛水深から建物階数をみて設定するが、大垣市は2階建て以下の建物が95%を占めるのでここでは要避難率を100%としている。また、移動過程における安全性の検証を目的とするため、避難情報を取得した住民及び滞在者は全員避難行動をすること(自主避難率100%)としている。

c) 避難行動解析

ここでは、与えられた出発準備時間、避難ユニットの年齢属性に基づく初期歩行速度、疲労度や群集密度、浸水深による歩行速度変化等を考慮した避難行動解析を行い、住民の移動過程を追跡している。

システムの開発言語は、ネットワーク解析のようにGISで開発可能な部分及び解析部分の制御はArcview Avenue言語(ESRI Arcviewの開発言語)で行い、行動解析部分はFortran PowerStation 4.0で行っている。

3. 解析結果

降雨外力として昭和51年9月洪水の実績降雨を確率1/100に引き伸ばしたものを対象とし、a)杭瀬川の破堤氾

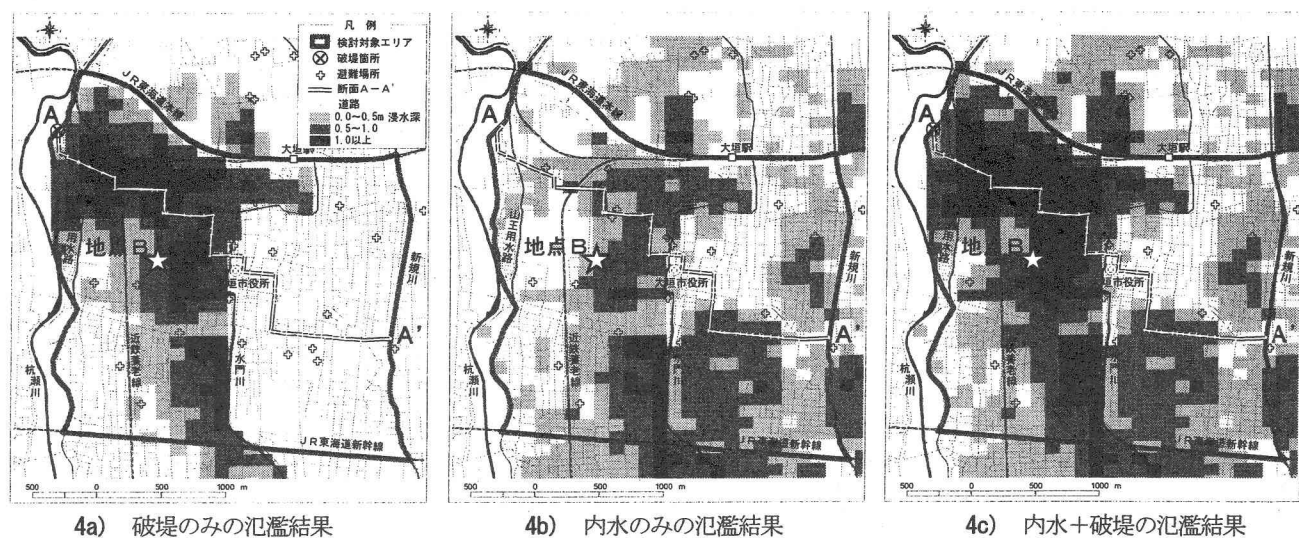


図-4 氾濫解析結果：最大湛水深

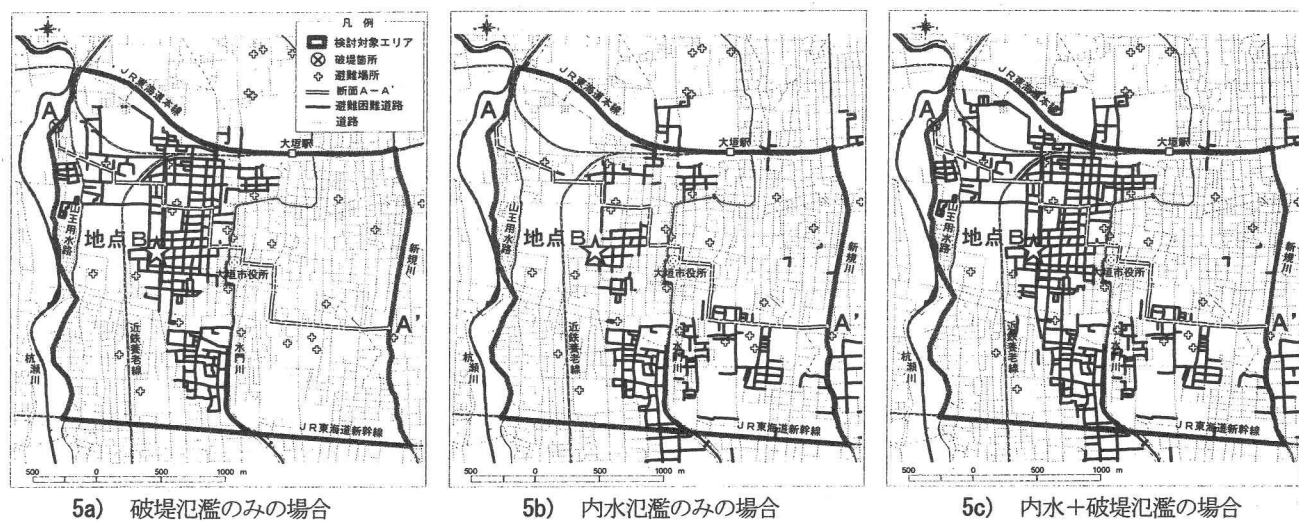


図-5 避難困難道路

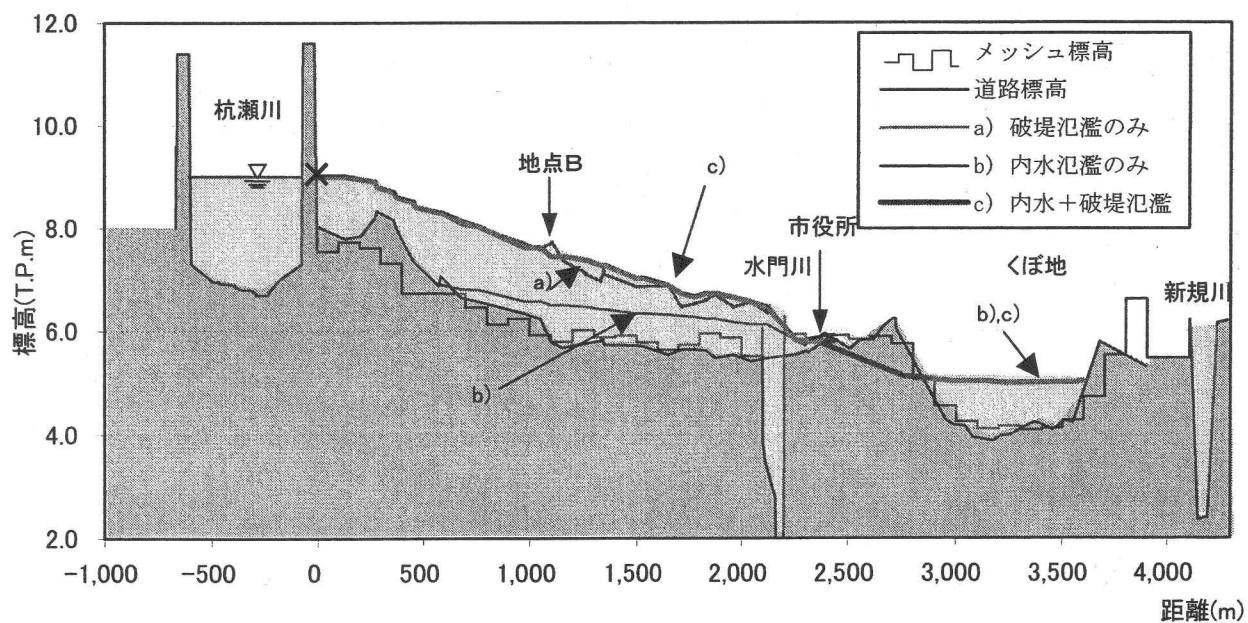


図-6 最大湛水深の横断面図(図-4中A-A'断面)

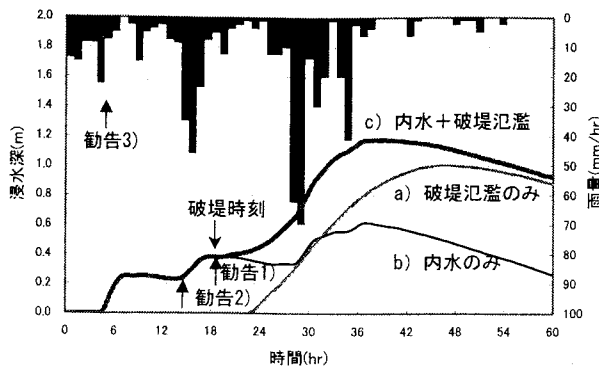


図-7 湛水深の経時変化 (図-5中地点B)

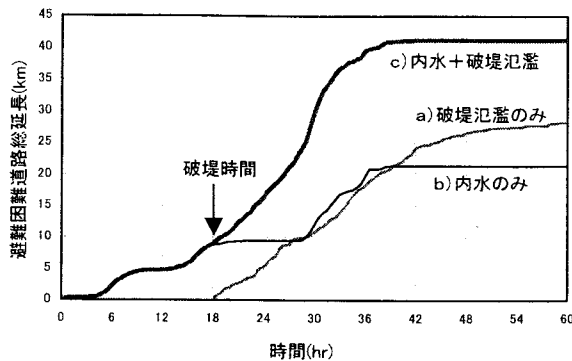


図-8 避難困難道路総延長の経時変化

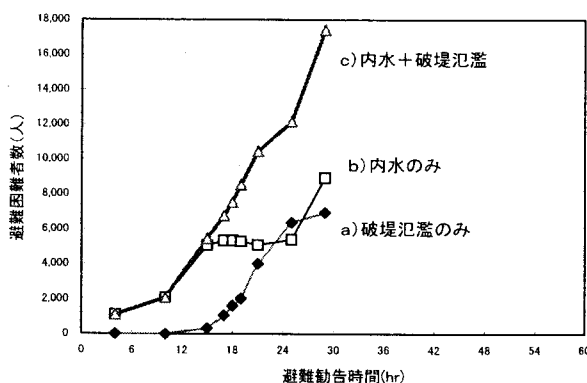


図-9 避難勧告時間と避難困難者

氾濫のみ、b) 内水氾濫のみ、c) 内水+破堤氾濫の解析を行っている (図-4)。杭瀬川には一次元不定流計算の上流端に流出計算結果を与え、破堤時間をピーク水位とし、破堤幅を治水経済調査マニュアルより130mと設定している。図-4a)においては、A地点からの破堤氾濫を想定しており、氾濫域は杭瀬川左岸下流に広がるが図中中央の水門川より東側には広がらない結果となっている。これに対し、図-4b)の内水氾濫のみの場合には、杭瀬川沿いには氾濫域はなく、また水門川の東側にも湛水が生じていることとなり、氾濫域の様相は異なっている。図-4c)で示す内水外水氾濫の複合ケースにおいては双方が重なってより大きな湛水深が広域に発生している様子が見られる。この場合にも内水が先行して発生し、その後外水(破堤氾濫)が遅れて発生する。

表-2 避難解析ケースと避難困難者の解析結果

避難勧告時期	氾濫外力	a) 破堤氾濫のみ	b) 内水氾濫のみ	c) 内水+破堤氾濫
1) 破堤時 (18時)		a-1) 1,622人	b-1) 5,337人	c-1) 7,531人
2) 破堤前3時間 (15時)		a-2) 328人	b-2) 5,064人	c-2) 5,454人
3) 破堤前14時間 (4時)		a-3) 0	b-3) 1,118人	c-3) 1,118人

※表中 a-1)～c-3) : ケース番号
※要避難者数総数は36,826人としている

最適な避難の方法、避難勧告の時期の選定にあたってはこの内外水の氾濫形態(時空間分布)の把握に大きく左右されることは明らかである。

図-5に各ケースに対応する本解析による避難困難道路(湛水深が70cm以上)について示す。図-5a)に示す外水(破堤氾濫)のみを想定した場合と図-5b)での内水のみの避難困難となる道路の分布が異なる。避難道路計画に当たっては、水災のシナリオと内外水の複合パターンを考慮して最適な道路及び避難場所を計画・準備する必要があることがわかる。

図-6に、図-4中に示すA-A'断面における各ケースでの最大湛水深横断面図を示す。杭瀬川における破堤氾濫においては水門川以東までには及ばないが内水氾濫においては水門川以東の窪地で約1mの湛水深を示すこととなっている。これは避難計画において内水を十分に留意しておく必要があることを示している。

図-7には図-5中に示す地点Bでの各ケースの湛水深変化を示す。図-7でのa)破堤氾濫のみを想定していると、図中24時位からの浸水となるが、実態はその20時間前から湛水深40～50cmの内水の発生が見られ、これにより避難が困難となる区間も発生すると予想される。

図-8に対象域において各ケースの避難困難となる道路(湛水深70cm以上)の総延長の経時変化を示す。破堤氾濫、内水氾濫、それらの複合したケースでは、その変化が大きく異なり、安全な避難の可能性が異なってくる。破堤による氾濫流が到達する前に内水のみに避難困難となる道路が発生することが示されている。

図-9では、避難の勧告時間による避難困難者数の変化を示す。避難勧告が遅いほど避難困難者(湛水深が70cmとなり歩行が不可能になった者)は多くなるが、内水を含めて考えた場合にはより早い避難勧告が必要となることが考えられる。これらにより内水をも考慮した避難勧告のタイミングと避難路の計画、避難所の選択が重要なことが伺える。

4. まとめ

本検討での避難解析システムは、破堤氾濫のみでなく、内水氾濫も複合した浸水の経時変化に応じた、詳細な避難解析を行い、その再現性を示した。

(1) 本システムの特徴

本システムの特徴として以下が挙げられる。

a) 時系列での解析に基づいて検討できる点

最大浸水深等のみの浸水情報を用いた解析では、災害対応の重要な要素である「時間」要素が含まれない。この点で本システムは、避難勧告のタイミング等の時間項を含む危機管理活動検討に活用出来る。またGISの機能を活用することで地域の詳細な情報・条件に応じた解析が可能となっている。

b) 浸水情報の精緻な解析に基づいて検討できる点

内水も含めた氾濫解析に基づくため、破堤氾濫発生以前の内水による避難困難箇所等の実態に即した再現を可能としている。また、レーザースキャナーデータを用いた道路高を細かに反映した浸水深を考慮しているため、局所的に生じる避難者の生命の危険性まで把握できる。人命被害を防ぐ上では、このようなきめ細かな状況把握・情報提供は重要であると考えられる。

(2) 本システムの適用性

水害時の避難勧告等の情報発令方法をはじめ、危機管理対策の現場への適用・活用の可能性は以下が考えられる。

a) 水災時の避難計画ツールとして

●避難道路計画：平成12年の東海豪雨災害では、蓋無しの側溝や用水路に転落している被災事例がみられた。このように中小河川、水路、側溝などでの被災が多くなってきている。本システムでは内水を含めた氾濫解析により細かな危険箇所を抽出し、それと交差する道路や近接する道路を回避した避難解析を行えるようにしている。避難時に発生する道路上での危険性を細かに把握でき、水災シナリオに応じた最適な避難道路計画を行うことが出来る。

●避難場所の設定：災害時の避難場所は、震災のみを想定している場合が多く、浸水しやすい危険箇所など、洪水時の避難場所として適していないことがある。本システムにより、避難場所の浸水危険性や避難者の歩行距離を考慮して洪水時における最適な避難場所の設定とその妥当性を検証することが出来る。

●対象を絞った避難計画：住民に関する詳細データを反映させれば、高齢者等、避難が困難となる人々等、住民特性に応じたきめ細かな検討と対策が可能となる。

●その他：地域的な情報伝達方法を考慮できることで、広報車巡回ルート設定、スピーカー設置場所などの決定に用いることが出来る。

b) 危機管理ツールとして

●避難情報発令条件の設定：どの段階で避難情報を出せばよいか等、住民の避難行動シミュレーションに基づいて設定することが可能なシステムとなっている。

●危機管理対応検証ツール：仮想あるいは現実の外

力条件での浸水被害の経時変化とそれに伴う避難活動の進行をシミュレート出来るので、最適な避難情報の発令のタイミング等を設定し、その結果の検証出来るツールとなる。

●防災訓練・教育など：本システムは、水害時の行動プログラム策定時の検証として、また最近危機管理対策のひとつとして注目されているロールプレイング演習時に用いることが出来る。時々刻々と変化する氾濫現象、避難行動現象を提示出来、複数の水災シナリオを設定して行う防災教育、防災訓練などに応用可能（バーチャル防災訓練）であると考えられる。

本システム上で実際に起こりうる様々な水災シナリオを仮定した洪水による被害を予測し、そこから得たデータを基に危機管理体制を確立し、被害を軽減すること、これによって将来洪水が発生した場合の避難誘導、人命救助と資産損失の軽減を図ることに資するシステムとなりうると考えている。

(3) 今後の可能性、課題

誰もが使用できる環境とするためにはインターネットGIS（WebGIS）による危機管理支援システムの開発が望まれるが、その実現には、さらなるリアルタイム性が求められる。現状のように1台のPCによる解析ではなく複数台数による並列処理を行うことも考えていく必要がある。また、今後は集中統合システムではなく、降雨予測・流出解析、氾濫解析、情報伝達、避難行動解析を個別のシミュレータを協調利用し総合的な危機管理対策を支援する分散シミュレーション技術の開発が求められると考える。

謝辞：国土交通省中部地方整備局木曽川上流工事事務所、岐阜県、大垣建設事務所及び大垣市役所には、データ提供、ヒアリング等でお世話になりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤宏明：水情報国土の構築に向けて、河川58巻第1号、(社)日本河川協会、pp. 30-34, 2002. 1. 20
- 2) 館健一郎、武富一秀、吉谷純一、金木誠：GISを用いた洪水時の避難行動解析システムの開発、土木技術資料、43-8, pp. 44-49, 2001. 8.
- 3) 館健一郎、武富一秀、川本一喜、金木誠、平川了治、飯田進史、谷岡康：内水を考慮した氾濫解析モデルの構築と検証—大垣市を対象として—、河川技術論文集、第8巻、2002. 6.
- 4) 高橋保、中川一、東山甚：洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究、京都大学防災研究所年報、第32号B-2, pp. 757-780, 1989. 4.
- 5) 財団法人消防科学総合センター：地域防災データ総覧 地域避難編、1987. 3
- 6) 西原巧：氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究、京都大学博士論文、1983

(2002. 4. 15 受付)