

洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータの開発とその防災教育への適用

桑沢 敬行¹・片田 敏孝²・及川 康³・児玉 真⁴

¹正会員 (株)I. D. A 社会技術研究所 (〒370-0862 群馬県高崎市片岡町3-1-6)

E-mail: kuwasawa@ce.gunma-u.ac.jp

²正会員 群馬大学大学院教授 工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

³正会員 群馬大学大学院講師 工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

⁴正会員 (株)I. D. A 社会技術研究所 (〒370-0862 群馬県高崎市片岡町3-1-6)

水害による人的被害を低減するためには、適切な住民避難が行われることが必須である。このためには、住民が受け入れやすい確かな避難計画、そして、水害に対する住民自らの意識や知識の向上を促進する効果的な防災教育が重要である。本研究では、このような認識のもと、災害情報の伝達状況や住民避難、そして洪水氾濫といった水害時における一連の地域状況を総合的に表現するシナリオ・シミュレータを構築した。本シミュレータは、シミュレーション結果をわかりやすくアニメーション表示できることから、地域に予測される被害や適切な対応行動について具体的に説明する防災教育ツールとして利用できる。また、人的被害規模などの指標により情報伝達や避難計画を評価できることから戦略策定ツールとしても有効である。

Key Words: flood, disaster education, damage estimation, scenario simulator

1. はじめに

近年の異常気象により台風や集中豪雨の発生頻度が高まる傾向がみられており¹⁾、大規模な水害発生を前提とした避難対策の必要性が高まっている。このような状況の中、災害情報の伝達体制の強化や洪水ハザードマップの公表など、水害時における住民避難の促進に向けた対策が積極的に推進されている。しかし、行政から避難勧告の発令等が行われた近年の水害をみても、結果として低調な避難率に留まっているものが多く、行政の持つ危機感を住民が正しく認識できていないという問題が顕在化している²⁾。

近年、このような問題を引き起こす要因として、災害情報の伝達内容や伝達過程が注目されており、その対策として避難に関わる用語や伝達手段の検討が多く行われている³⁾。確かに、災害情報が的確に伝達されその意味が正しく理解されることは、実現しておくべき基本的な課題である。しかし、災害情報を実際の避難行動に結びつけるためには、災害情報の意味がわかるといったレベルの表面的な理解に留まらず、その情報が伝達された背景や今後予測される事態などを正しく認識し適切な対応行動を取ることができる知識や意識を身に付けておくことが不可欠である。このためには、効果的な防災教育の

実施に加えて、住民にとって明確で受け入れやすい避難計画が策定されていることが必要であると考えられる。

本研究では、このような問題に対して、水害時における地域状況を総合的に表現するシミュレーション技術が有効であると考え、避難計画の策定や防災教育の実施の支援を目的としたシナリオ・シミュレータを開発した。本シミュレータは、水害時における行政から地域住民への災害情報の伝達に加えて、住民による避難行動、そして、洪水の氾濫状況を総合的に表現するとともに、それらの空間的、時間的な関係から人的被害の発生状況を表現することができる。したがって、本シミュレータは、現状の避難計画や種々の対策を想定した任意のシナリオによる人的被害を推計できることから、住民避難の戦略策定ツールとして有用である。また、氾濫流の挙動や住民の避難、そして、被害の発生といった一連の状況をアニメーションの形式で視覚的にわかりやすく表現できることから、水害による被害想定や適切な対応策の効果を具体的に説明する防災教育ツールとしても活用できる。

本論文では、本シミュレータの概念やモデルの詳細を述べるとともに、名古屋市中村区を対象に行政や住民の対応行動が、洪水氾濫時の人的被害規模に与える影響を分析した事例を示している。また、地域住民を対象に本シミュレータを用いた防災教育を行うとともに、アン

ケート調査により洪水氾濫時における避難行動に関する意識変化を把握することで、本シミュレータの防災教育ツールとしての有効性について確認した。

2. 洪水時の住民避難にみられる問題と対策

(1) 住民避難の阻害要因

a) 住民側にみられる問題⁴⁾

住民が避難を行わない基本的な理由は、洪水時において自分の身の危険性を感じないことにあり、それゆえに避難の必要性を感じないことにあると考えられる。この原因としては、「正常化の偏見⁵⁾」と呼ばれる人間の心理的な特性によって、災害時において自分が置かれている状況を正しく認識できないことや、治水整備の進展などにより被災経験が乏しくなったことによる河川や洪水災害に対する知識の欠如⁶⁾、または、逆に過去の被災経験や伝承から誤った知識を習得してしまう^{7),8)}ことなどが挙げられる。その他、家財などの保全行動を優先するがあまりに危機的な状況を軽視しがちになるという特性もある。このような要因は、避難行動の実施を妨げる住民の心理的な問題として位置づけられる。

b) 行政側にみられる問題

一方、行政側の問題に着目すると、適切なタイミングで避難勧告が伝達されない場合が多いという基本的な問題もあるが、行政が災害の発生を警戒して避難勧告などの情報を伝達しているにもかかわらず、多くの場合において住民が避難していない状況が見られることから²⁾、行政の持つ危機感と住民の抱く危機感との間に乖離が生じていることも住民が避難しない要因として加えられる。このような問題が発生する原因の一つには、行政からの避難情報が具体的な行動に結びつかない不明瞭な情報になっているという問題がある。洪水氾濫を想定した場合、その避難行動は、緊急避難(Evacuation)と退避的避難(Refuge)という二種類の避難行動に分類できる。緊急避難とは、人命に関わるような事態を回避するために行う避難であり、例えば、洪水氾濫によって家屋流失の危険性がある場合や、平屋建ての住宅に対して数メートルの浸水が予想される場合などに行われる命を保全するための緊急の避難を示す。また、退避的避難とは、命の危険性は無いものの、そこに滞在し続けることが困難となる、いわば難民的な避難を指す。例えば、1m~2mの浸水がある場合でも自宅の二階に避難することができれば、一時的に難を逃れることができる。しかし、水道や電気、ガスなどのライフラインが一日以上途絶えるような場合は、不自由な生活を強いられることになり、最終的に退避的な避難を余儀なくされるだろう。

現状の避難情報の伝達は、町丁目などある程度の地域区分を単位として検討されることが多いため、洪水時に

おいて対象地域の中には、緊急避難が必要な住民や集合住宅の高層階に住むなどの緊急避難を要しない住民、そして、全く避難を必要としない住民すら存在していることがありえる。したがって、本来ならば、各住民のとるべき行動は個々の事情によって様々である。しかし、実際には地域を一括りとして避難情報が伝達されることから、個々の住民から見ると、住居の形態や地形的特徴などから明らかに緊急避難を要しないにもかかわらず、避難を要求されることによって、行政の避難計画や避難情報に従うことに対する疑問が芽生える。住民に対してこのような疑問を抱かせることは、行政からの避難情報に対する信頼性の薄れや避難に関する住民独自の誤った判断を誘発することにつながり、結果として実際に避難を要する場面においても避難情報が活かされない状況を作り出してしまふ危険性を高める。このような問題を解決するためには、微地形や住居形態など、個々の住民の避難に関わる条件を積極的に反映した避難計画が必要であり、全住民に画一的に緊急避難を求めるのではなく、集合住宅高層階の住民などには、想定される洪水氾濫の状況に応じて安全を確保した上での退避的避難を求めるなど、住民にとって受け入れやすい避難情報の提供を実現するための精緻な避難計画が必要である。

(2) 洪水時の避難対策における総合的なシナリオ・シミュレータの有用性

a) 防災教育ツールとしての有用性

筆者らは、既往研究⁹⁾において津波災害に関する住民を対象とした防災教育ツールとしてのシミュレータの有用性について論じているが、災害の対象を洪水とした場合においてもこの有用性は同様に当てはまると考えている。住民が洪水時に適切な対応行動を取るためには、洪水に対する正しい知識や認識を持つことが必要であり、さらには、氾濫時における地域や自宅の危険性を正しくイメージする能力を身につけている必要がある。

紙で配布される一般的な洪水ハザードマップによっても、地域に予想されている氾濫時の浸水深や浸水域などの情報を把握することはある程度可能である。しかし、氾濫流の速度による影響など、時間的なハザードの変化に関しては表現に限界がある。また、実際に発生する洪水の氾濫状況を事前に予測することは不可能であることから、予め想定された洪水氾濫の状況しか表現できない静的なハザードマップは、災害イメージの固定化を招いてしまう恐れもある¹⁰⁾。これに対して、本研究で開発するシナリオ・シミュレータは、堤防の決壊から時系列的に進展する氾濫流の挙動に加えて、行政や住民による社会の対応行動、そして、その下での人的被害の発生という水害時において地域に生じる一連の状況をアニメーションの形式で表現することが可能であり、堤防の決壊タイミングや情報伝達タイミング、そして住民の避難タ

イミシングといった時間的条件の下での被害の発生状況をわかりやすく表現することができる。また、任意にシナリオを設定できることから、破堤箇所や氾濫流量が変化した場合の被害状況の変化や各種対応策が実施された場合の被害軽減効果、さらには自分自身が想定する対応行動の帰結などを具体的に理解する動的なハザードマップとして利用できる。したがって、以上のような機能を持つ本シミュレータは、地域住民が氾濫時における地域の危険性や適切な対応行動について正しく理解することを目的とする防災教育ツールとして有用であると考えている。なお、本論文では、防災教育ツールとしての本シミュレータの有効性を確認するため、5章において防災講演会で利用した場合の効果分析を実施している。

b) 危機管理ツールとしての有用性

本シミュレータは、個々の住民の条件を考慮する緊急避難や退避的避難を分けた精緻な避難計画を検討する上でも有用である。想定される洪水氾濫に対して緊急避難や退避的避難が求められる地域を特定するには、流体力に大きな影響を与える流速や、洪水ハザードマップに示されるような最大浸水域に留まらず、湛水時間や氾濫流の到達時間など、時系列的に変化する浸水状況についても把握する必要がある。さらに、人的被害に関していえば、浸水範囲や避難施設の配置といった事象を個別に検討することも重要であるが、洪水の進展に対する行政や住民の対応の遅れといった、複数の事象が時間経過の中で相互に関連しあうことによって発生する問題の方がより支配的であると考えられる。

以上の考察より、洪水に関する避難対策の高度化を実現するためには、1. 洪水や氾濫の進展を動的にとらえる必要があること、また、2. ハザード現象のみならず、その際の住民や行政の対応といった社会的な状況までを含めて検討する必要があるといえる。したがって、空間、時間の概念を考慮した上で洪水時における地域状況を総合的に表現することが可能な本シミュレータは、的確な避難対策を検討する上で有用であるといえる。

3. 洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータの開発

本研究で開発する洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータは、筆者らが既存研究において開発した津波災害を対象としたシナリオ・シミュレータ⁹⁾をベースに、洪水災害を対象とする上で求められる機能追加や基本システムの改良を行ったものである。本章では、ベースとなる災害総合シナリオ・シミュレータの基本構成と本研究で実施した改良内容についてまとめる。

(1) 災害総合シナリオ・シミュレータの基本構成

洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータは、防災行政無線などの情報伝達メディアの機能や住民間の情報伝達行動を表現する情報伝達シミュレーションモデル、住民の避難の意思決定や避難行動を表現する避難行動シミュレーションモデル、そして氾濫解析データなどを利用して洪水氾濫の進展状況を表現する洪水氾濫シミュレーションモデルの三つの要素技術によって構成されている。このシミュレータは、各シミュレーションモデルを操作する種々のパラメータを設定することで、行政から住民への災害情報の伝達状況や住民の避難状況、そして洪水氾濫の進展状況という災害時の各種地域状況を様々なシナリオ想定の下に表現することが可能である。そして、シミュレータによって表現される住民の避難状況や氾濫流の挙動を空間的、時間的に分析することによって、人的被害の発生状況などを推計することができる仕組みとなっている。以下に各シミュレーションモデルの概要について示す⁹⁾。

a) 情報伝達シミュレーションモデル

情報伝達シミュレーションモデルは、避難勧告等の災害情報がマスメディアや防災行政無線の屋外拡声器、そして、広報車といった情報伝達メディアにより住民に対して発信される様子、また情報を受けた住民が口頭や電話による伝達行動を行うことにより災害情報が地域全体に広まって行く様子を表現するシミュレーションモデルである。情報が住民へ広まっていく様子は、ネットワークの形成過程として捉えられる。そこで本モデルでは、ネットワークを構成するノードとして住民を表現し、ノード間にリンクを張ることによって情報伝達の有無を表している。ここで情報伝達メディアは、ネットワーク形成のスターターの役割を果たす特別なノードとして位置づけられる。また、住民による情報伝達は、人間関係を反映した偏ったネットワークを形成すると考えられることから、本モデルでは、偏ネットモデル(Biased Net Model)¹⁰⁾と呼ばれるネットワーク形成モデルを基本構造に採用している。なお、本モデルは個人間の情報伝達の有無や情報伝達メディアからの情報取得の有無の表現にモンテカルロ法を用いている。

b) 避難行動シミュレーションモデル

避難行動シミュレーションモデルは、災害時において住民が自宅から避難場所まで避難する様子を表現するシミュレーションモデルである。また、このモデルでは、避難の有無や避難準備時間など、避難行動以前の意思決定に関するシナリオについても表現することができる。

このモデルでは、表現する要素の最小単位となる住民毎に避難速度、避難開始時刻、避難先を設定することが可能であり、各住民が指定した時刻になると自宅から避難先に向けて一定の速度で避難する状況が表現される。自宅から避難場所までの避難経路は、道路網を表すネッ

トワークデータから求めた最短経路が利用される。利用するネットワークデータは、リンク毎に通行禁止や通行方向の制限をかけることが可能であり、一部の道路に通行規制がかけられた場合や災害の影響により通行不能となった状況を表現することができる。

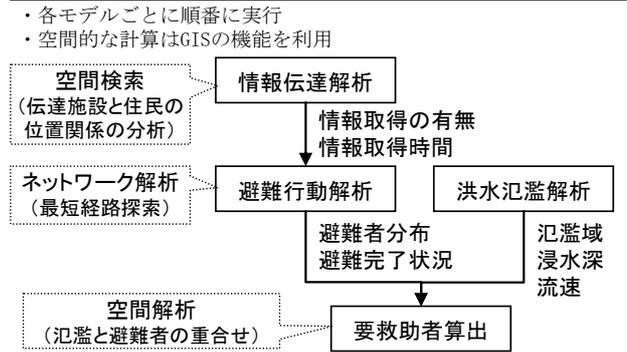
c) 洪水氾濫シミュレーションモデル

洪水氾濫シミュレーションモデルは、二次元不定流計算によって堤内地における氾濫状況を表現する。本シミュレータにおいて洪水氾濫は、行政や住民による社会的な対応から影響を受けない現象として、情報伝達シミュレーションや避難行動シミュレーションとは、独立して計算する構成を採っている。洪水氾濫を表現するシミュレーションモデルから得るべき情報は、氾濫域や域内の浸水深や流速であり、堤防の決壊等から経過時間毎にこれらの情報を蓄積したものを一つの外力シナリオとして取り扱う。破堤箇所や破堤流量、そして、堤防等の施設の状況により異なる氾濫解析の結果をデータベース化しておき、想定するシナリオに応じて選択して利用することとなる。

(2) シミュレーションモデルの統合化

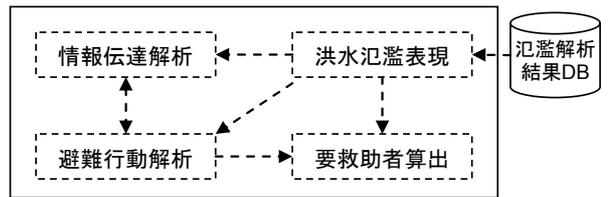
洪水時を想定した総合的なシミュレーションシステムを開発している同種の研究としては、飯田ら¹²⁾によるGISを利用した避難解析システムがある。このシステムでは、一般的な汎用GISが持つ静的なデータしか扱えないという制約を克服するため、時系列的な表現が求められる避難行動などの部分については、複数の独自プログラムを利用することで、時々刻々と変化する洪水氾濫と住民避難を考慮した人的被害推計を実現している。また、筆者らのこれまでシミュレータにおいてもGISをベースとした同様な構成を採用していた⁹⁾。しかし、このような複数のプログラムから構成されるシミュレーションシステムは、情報の伝達状況や住民の避難状況などシミュレーションの構成要素を表現するプログラムを個別に実行する必要があるため、洪水の氾濫状況に応じた道路の通行可否状態の変化やその状況を考慮した住民の避難路の選択状況、また避難中の住民間の情報伝達といった構成要素間の相互作用によって生じる事象を表現するのは非常に困難である。そこで本研究では、次項以降に示す機能を実現するため、GISに依存していた機能を独自に開発するとともに、独立して実行する複数のプログラムで構成されていた各シミュレーションモデルを統合することで、シミュレーションモデル間のインタラクティブ性を確保した(図-1参照)。これによって、避難途中における住民間の情報伝達や浸水状況に応じた避難路の選択といったシミュレーションモデル間の動的な関係構造の表現を可能としている。このような表現は、本シミュレータの特徴の一つとして挙げられ、静的な情報の管理を目的とする従来のGISをベースとしたシステムでは実

【改良前のシミュレータの構成】



【改良後のシミュレータの構成】

- ・すべてを単一のプログラムで表現
- ・時刻で同期をとりながら各モデルの処理を並行して実行
- ・GISに依存していた機能は独自に開発



凡例: 単体プログラム (内部処理) (GISの利用)

図-1 シミュレーションモデルの統合化

表-1 浸水深、流速を考慮した歩行困難度¹⁵⁾

浸水深(m)	H < 0.5	0.5 ≤ H < 1.0	1.0 ≤ H
流速(m/sec)			
V < 0.5	可能	可能	困難
0.5 ≤ V < 1.5	可能	困難	不可能
1.5 ≤ V	困難	不可能	不可能

現困難な機能である。また、近年では時間属性を付加することで地理情報の時間的な変化を表現する時空間GISと呼ばれるシステム¹³⁾も開発されているが、あくまで地図上に表記される規模を持つ構造物等の整備や撤去に関する情報の管理を目的としており、本シミュレータで表現するような洪水氾濫や避難者の分布といった秒単位で連続的に変化する空間的な情報の表現や相互の関連性の分析などを目的としているものではない。

(3) 洪水による人的被害規模の評価

水害による人的被害をみる場合、洪水の氾濫流そのものによる犠牲者の割合は少なく¹⁴⁾、浸水域と住民の分布から単純に人的被害を予測することは困難である。そこで本研究では、想定したシナリオによる人的被害の規模を評価する指標として、自力での避難が困難となり救助が必要と考えられる住民を「要救助者」と定義し、この人数を用いることとした。避難困難の判定については、表-1に示す末次¹⁵⁾による流体力を考慮した歩行困難度の判定モデルを準用し、歩行困難度が「可能」以外の浸水域に存在する住民を要救助者に判定することとした。

なお、本判定モデルは健常者を対象としたものであり、高齢者などの災害弱者の被害を考慮するためには他の方法を用いる必要がある。また、住民が歩行困難な地域に居たとしても、置かれている状況によって求められる対応が異なる場合があると考えられる。例えば、マンションの二階以上に住む住民が地表面の浸水状況により要救助者に判定されたとしても自宅に居続けることが可能な限りにおいて救助の優先度は低い。そこで、要救助者は、避難前に自宅で要救助者となった者、避難途中に要救助者となった者に分類し、さらに前者の場合は、自宅に居続けることが可能な住民とそうでない住民を分類するために、自宅が平屋建ての住民(集合住宅の一階居住者を含む、以下同様)と二階建ての住宅もしくは、集合住宅の二階以上に住む住民に分けて集計することとした。

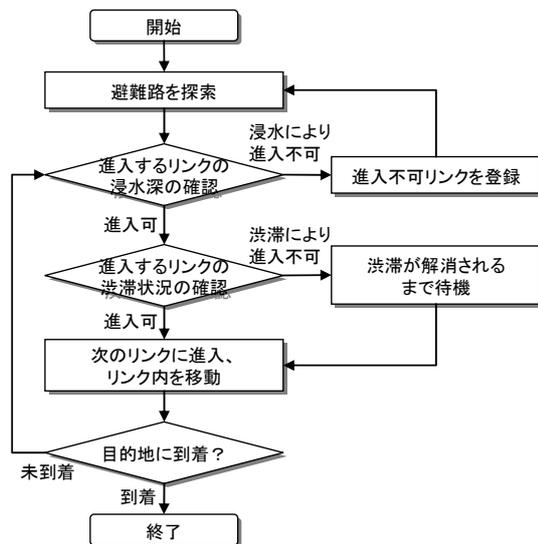


図-2 自動車による避難行動の処理フロー

(4) 自動車による避難状況の表現

1982年7月23日の夕刻から長崎市で発生した集中豪雨では、大水害が発生しているにもかかわらず多数の帰宅者が車による帰宅にこだわり続けた結果、交通渋滞、路面冠水による交通の途絶などにより、多くの車が立ち往生することになるなどの大規模な被害を引き起こした¹⁶⁾。また、同様な事例は、2000年の東海豪雨でもみられている¹⁷⁾。このような例から、洪水を対象とした避難計画の多くは、徒歩による避難を原則としている。しかし、車はそれ自身が重要な財産であり、避難時に残していくためには相当の決断を迫られることや、日常的に車を利用している人にとって豪雨時の移動に車の利用を制限されることは受け入れ難いなどの理由から、実際には車による避難が多く行われているのも事実である¹⁸⁾。また、以上のような認識から早期避難や避難場所までの距離が遠い地域に限り車の利用を認めることで、避難行動を促進しようとする自治体もある¹⁹⁾。そこで、本研究では、自動車を利用した避難行動についても表現することとした。

本シミュレータでは、交差点を表すノードと交差点間を結ぶ道路を表すリンクで構成される道路ネットワークを利用して避難者の動きを表現している。避難者は、避難開始時に出発地点から避難先までの経路を道路ネットワークから最短経路探索により求め、時間経過とともに移動速度を反映しながら経路上を移動する。また、別の道路リンクに進入する際には、後述する方法によって道路の冠水や渋滞の状況を確認し、道路に進入できない場合は、進入不可となったリンクを除外したネットワークを利用して再び避難経路を探索する。以上の処理を繰り返すことによって道路の浸水状況や渋滞状況を反映しながら避難する状況を表現している(図-2参照)。

a) 走行限界水深の表現

浸水により自動車が走行不能となる状況を表現するため、走行限界水深を設けている。この値は、道路の通行可否状態を判定する際にも利用され、道路の浸水状況に

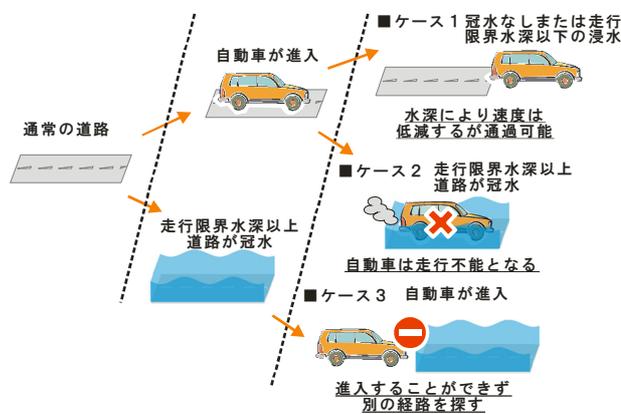


図-3 浸水深を考慮した自動車の走行

応じて避難経路が変更される様子を表現している(図-3 ケース3)。また、走行中の道路が走行限界水深に達した場合には、その車を停止させることによって浸水により走行不能となる自動車の出現を表現している(図-3 ケース2)。なお、自動車の走行限界水深は高橋ら¹⁶⁾を参考に30cmと設定している。また、歩行者の場合においても同様な歩行限界水深を設けているが、これについては、表-1を参考に1mと設定している。

b) 渋滞の表現

自動車による避難を表現するためには、渋滞など交通状況の考慮が必須となる。既存研究では、日常的にみられる自動車交通を精緻に表現するシミュレーションモデルが多数開発されている^{20), 21)}。しかし、本研究の検討対象となる水害時においては、冠水した道路が随所に存在しているような非日常的な状況が想定されることから、自動車交通の表現においては、既存のモデルで考慮されている種々の要因よりも道路そのものの浸水状況の方が支配的な要因となると考えられる¹⁷⁾。そこで、本研究では、道路リンクの通行可否や走行速度の表現において浸水深の影響を考慮する一方で、渋滞の表現については、

既往研究において実施されているような道路や個人の経路選択に係る膨大なデータや計算を扱う煩雑さを避けるため、簡便な方法を用いることとした。具体的には、次式により各道路リンクの走行許容台数を求め、リンク内に存在する自動車の台数が許容台数と等しい場合は、渋滞が発生している状態とした。そして、渋滞している道路リンクに新しい自動車が進入してくる場合は、渋滞が解消されるまで走行を停止させることによって渋滞による移動の遅延を表現している。

$$C = L_l \cdot A / (L_c + D) \quad (1)$$

ここで、 C ：道路リンクの許容台数、 L_l ：道路リンク長、 A ：リンクの車線数、 L_c ：自動車の平均車長、 D ：平均車間距離である。

(5) 浸水状況を考慮した避難速度の設定

避難者の移動速度は、避難中の道路の浸水状況に応じて変化すると考えられる。このような状況を表現するため、経時的、空間的に変化する浸水深を考慮して避難者の移動速度を設定することとした。具体的には、浸水深の上昇に合わせて避難速度が線形に低下する状況を仮定し、浸水状況が更新されるたびに下式を利用して各避難者の速度を設定する。なお、この式は、避難手段が徒歩、自動車に関わらず適用している。

$$V_{pt} = V_0 \cdot (1 - d_{pt} / d_{lim}) \quad (2)$$

ここで、 V_{pt} ：座標pにおける時刻tの浸水状況を考慮した避難速度 (m/sec)、 V_0 ：浸水がない状態での避難速度 (m/sec)、 d_{pt} ：座標pにおける時刻tの浸水深 (m)、 d_{lim} ：避難手段別の移動限界水深 (歩行者の場合1m、自動車の場合0.3m) である。なお、 V_0 の値については平均的な歩行速度や走行速度を設定するが、歩行者の場合は個人別に設定することも可能であり、より現実的な状況を表現するには、年齢や障害の有無等を考慮して歩行速度を設定するなどの対応が考えられる。

4. 洪水時の避難シナリオ分析

(1) 対象地域と基本条件

構築したシミュレータによるシナリオ分析の対象としたのは、名古屋市中村区の全域である。当地域は、面積約16.2km²で西側は庄内川に接し、東側にはJR東海道線と名古屋駅が位置している。シミュレーションを実施するために整備した基本データの概要を表-2に、また、各施設の配置を図-4に示す。なお、広報車の巡回経路については、台数と出発点に関する資料しか入手できなかったため、

表-2 整備データ

項目	数量等	参照情報
住民	63,583世帯 (131,964人)	名古屋市 町・丁目別、 年齢別公簿人口 (H18年1月)
建物	43,756棟	名古屋市DMデータ
避難場所	48箇所	名古屋市地域防災計画書
屋外拡声器	7基	中村区提供資料
広報車	7台	中村区提供資料 ※巡回経路は独自に設定

表-3 シミュレーション基本条件

設定項目		設定値またはパターン	
情報伝達	屋外 拡声器	基本	音声範囲：250m、聴取率：30%
		タイミング	発令直後から20分間隔で5回
	広報車	基本	音声範囲：100m、聴取率：40%
		タイミング	避難勧告発令直後に出勤
	マス メディア	基本	視聴率：60%
		タイミング	発令1時間後から30分間隔で3回
住民間	電話の利用	利用不可	
避難行動	避難率	100%	
	避難先	居住地から最も近い避難場所	
	避難手段	徒歩(分速80m)または、 自動車による避難(時速40km)	
洪水氾濫	破堤地点	庄内川左岸14k地点	
	内水の表現	シナリオによる。表現する場合は、破堤6時間前から開始	

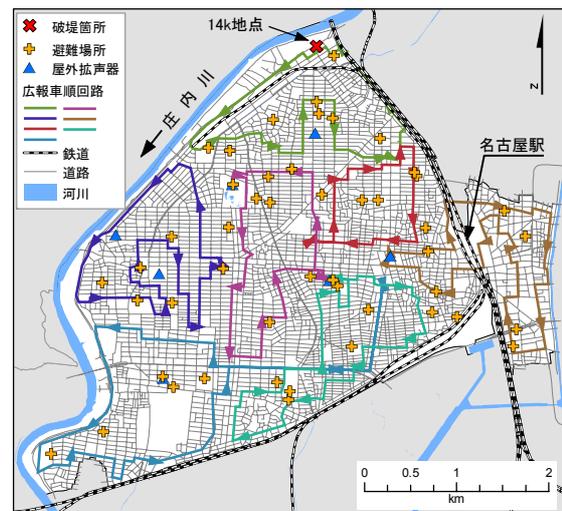


図-4 対象地域と施設配置

ため、出発点から地域を網羅するような経路を通り、また出発地点に戻る経路を独自に作成し利用している。表-3は、シミュレーションの実施に当たり設定した基本条件を示している。なお、表中に示した発令とは、避難勧告の発令を示している。また、洪水シナリオについて外水氾濫は、氾濫箇所を2000年の東海豪雨型洪水を想定した次元不定流計算の結果を参考に、庄内川左岸14k地点(図-4参照)に定め、堤防天端高を河川水位が上回る時点より越水が始まり、破堤が進行するという条件で計算した。そして、名古屋市によって計算された同様な想定に基づく内水氾濫の解析結果と合成した。

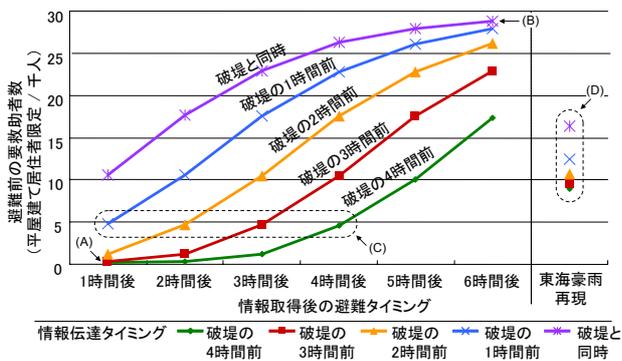


図-5 要救助者数(平屋建て居住者)

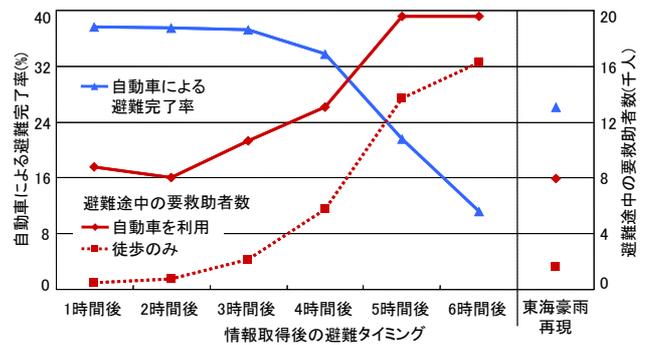


図-6 自動車の利用による被害の変化

(2) 避難タイミングの変化による被害への影響

a) シナリオ設定

まず、避難行動が遅れることによって人的被害の規模にどのような変化が生じるのかを把握するため、住民が避難情報を取得してから避難を開始するまでのタイミングを情報取得の1時間後から6時間まで1時間ずつ遅らせた場合と、東海豪雨時の避難実態調査²²⁾から得た実際の豪雨災害時における避難情報取得後の住民の避難開始タイミングの分布を再現した場合の計7パターンを設定した。次に、避難勧告の伝達が遅れた場合を想定し、そのタイミングを堤防決壊の4時間前から決壊と同時に1時間ずつ変化させた5パターンの情報伝達タイミングを設定し、シミュレーションを実施した。

b) シミュレーション結果

深刻な被害が発生しうる住民の規模について把握するため、自宅からの緊急避難が求められる平屋建て居住者に限定した避難前の要救助者数を図-5に示す。この結果によると、要救助者は情報伝達タイミングが遅れるほど、また情報取得後の避難タイミングが遅れるほど多くなっており、4時間前に情報伝達が行われ取得後1時間で避難を開始した場合(図-5のA)では200人程度、情報伝達が決壊と同時に1時間遅れ、取得後6時間で避難を開始した場合(B)では、2万8千人程度となった。後者の値は、別途計算した最終的な浸水域全体の平屋建て居住人口とほぼ一致しており、このシナリオでは全く避難しない場合と同規模の被害が発生すると言える。また、避難開始が遅れることによる要救助者数の変化に着目すると、情報取得の1時間後から4時間後までに避難した場合は、情報伝達がより遅れた場合の方が要救助者の増加する傾向が強いことから、行政からの情報伝達の遅れによって、住民避難の時間的な余裕が減少している状況を把握できる。

次に、情報伝達と避難のタイミングが相殺し、結果として決壊と同時に避難を開始する場合(C)では、5千人弱の要救助者が発生することがわかる。また、最も現況再現に近いと考えられる東海豪雨時の避難タイミングを再現したシナリオ(D)では、情報伝達のタイミングによって、9千人から1万6千人程度の要救助者が発生する結果となった。

(3) 車を利用した避難により発生する問題の把握

a) シナリオ設定

避難に自動車を利用した場合の被害への影響について把握するため、自動車による避難を行う状況を想定したシミュレーションを実施した。なお、避難情報の伝達タイミングについては、決壊の4時間前に固定し、避難タイミングについては、前節と同様な7パターンに設定した。また、ここでは自動車による避難の危険性を明確に表現するため、全世帯が自動車による避難を行う状況を想定することとした。ただし、内水などにより避難の開始時点で既に走行限界水深よりも浸水が深い場合は、徒歩による避難を実施させることとした。また、避難途中に浸水し走行不能となった場合は、その場所に停止したままの状態とした。

b) シミュレーション結果

全世帯のうち自動車によって避難場所までたどり着くことができた世帯の割合と発生した要救助者の数を図-6にまとめる。なお、自動車による避難の影響に注目するため、本図に示した要救助者数は、避難途中に救助を要する状態となった住民に限定した数となっている。またこの図には、比較のために自動車を利用せず全員が徒歩により避難した場合の要救助者数を併記している。この結果から、まず自動車による避難完了率の変化についてみると、避難タイミングを情報取得後1時間とした場合においても避難完了率は40%弱となっており、内水の影響によって多くの自動車が走行不能となっている状況が把握できる。この割合は、避難タイミングが遅れるにつれて更に下がっており、避難タイミングが情報取得後6時間では10%程度の世帯しか自動車による避難を完了できない結果となった。

次に、避難途上の住民に限定した要救助者の変化について情報取得から1時間後の避難した場合をみると、自動車を利用しない場合の要救助者が500人程度なのに対して、自動車を利用した場合は約9千人と17倍以上多い結果となった。この要救助者数の差は、避難タイミングが遅くなるにつれ減少する傾向がみられるが、これは避難タイミングが遅れるにつれて内水や外水が進行し、避難を開始する時点で既に自動車による避難を実施できな

表-4 防災講演会と調査の概要

実施日時	2006年11月19日(日)午後7時～午後9時
調査対象	名古屋市中村区防災講演会受講者
実施方法	講演会資料と一緒に調査票を配布 退出時に回収
回収数	180票 (途中退室者を除きほぼ全員)
主な 調査内容	シミュレーションのわかり易さ シミュレーションの現実性 講演会前後での避難の意識変化 個人属性、自由回答

い世帯が増加することに起因する。

5. シミュレータを利用した防災教育とその効果

本章では、前章において示したシミュレータによる分析結果を防災講演会において防災教育コンテンツとして活用した事例について示す。また、防災講演会の受講者を対象に実施した効果計測の結果について示す。

(1) 防災講演会と調査の概要

防災講演会は、前章で示したシミュレーションの対象地域とした中村区の住民を対象として、2006年11月19日の日曜日に開催された。東海地方では、2000年の東海豪雨により、死者10名、重軽傷者110名という甚大な被害が発生しており、対象地域に近い新川では100mを超える破堤が発生している。

防災講演会では、まず、シミュレータの基本的な構成や、その背景となる洪水氾濫や災害情報の伝達、そして住民避難といった各種シナリオ間の影響構造などを説明した。次に、住民の対応行動によってどのように被害が変化するのか具体的に把握させるため、シミュレータやその計算結果を紹介するという流れをとった。そして、最後に洪水に対する意識や、講演会の感想などについて問うアンケート調査を実施し、シミュレーションを利用した防災教育の効果について把握することとした。講演会と調査の概要を表-4にまとめる。なお、調査結果によると、参加者の年齢は、34%を占める60代が最多となる30代から80代で構成されおり、87%が男性であった。

(2) シミュレータを利用した防災教育

a) 提示したシナリオと提示方法

講演会では、最終的なシミュレーション結果を紹介する前に、まずシミュレーションに利用した洪水氾濫解析の結果について、最大浸水深、氾濫流の到達タイミング、そして、破堤箇所からの氾濫の様子をアニメーションで示すスライドを提示し、氾濫流の挙動を確認させた。なお、この際には破堤箇所を変化させた複数の結果を提示し、想定する洪水氾濫のシナリオによって結果が変わり

表-5 シミュレーションシナリオ

項目	シナリオ
避難情報の伝達 タイミング	堤防の決壊時刻を基準として 4時間前、2時間前
避難の開始 タイミング	情報取得を基準として 1時間後、2時間後、3時間後、 4時間後、5時間後、6時間後
避難時の 自動車の利用	利用しない(内水なし/内水を考慮)、 利用する(内水を考慮)

表-6 アニメーションパターン

No.	情報の伝達 タイミング (破堤前)	避難の開始 タイミング (情報取得後)	車の 利用	内水の 考慮	総要救 助者数 (人)
1	4時間	4時間	しない	しない	19,974
2	4時間	1時間	しない	しない	1,056
3	2時間	4時間	しない	しない	79,069
4	4時間	3時間	しない	する	7,603
5	4時間	3時間	する	する	16,003

うることを説明した。

次に、本シミュレータによる氾濫流と住民の避難状況を考慮したシミュレーション結果を示した。今回の講演会では、東海豪雨の事例からも確認された問題点である「住民の避難の開始タイミングの遅れによる危険性」、「行政からの情報にのみに依存してしまうことの危険性」、「避難時に自動車を利用することの危険性」という三つの項目について説明することを目的とし、行政からの情報伝達タイミング、住民の避難タイミング、避難時の自動車の利用に関する表-5に示すシナリオを組み合わせたいくつかのパターンのシミュレーション結果を提示することとした。また、シミュレーション結果は、単に最終的な要救助者数を示すだけではなく、より具体的に水害の進展状況や被害の発生状況をイメージしてもらうため、表-6に示したシナリオについては、アニメーションの形式で示すこととした(図-7参照)。なお、氾濫の進展と情報伝達や住民避難のタイミングによる被害の発生状況への影響をわかりやすくシンプルに説明するため、自動車による避難行動を行うシナリオ以外については、基本的に内水を考慮せず、外水のみが表現されるシミュレーション結果を用いた。一方、自動車による避難を実施する場合は、内水による避難や被害への影響が顕著なことから、内水を考慮するシナリオのみを採用することとした。また、被害の発生状況をイメージしやすいようにするため、アニメーションでは要救助者数を3章(3)で示した分類に分けて表示することとした(図-7参照)。

b) 防災教育の流れ

講演会では、まず、表-6に示すNo.1のアニメーションを示し、避難行動が遅れた場合には、大規模な人的被害が発生する可能性があることを示した。次に、No.2の避難の開始タイミングを情報取得後1時間とした場合のシミュレーションを示すことで、迅速な避難行動を行うこ

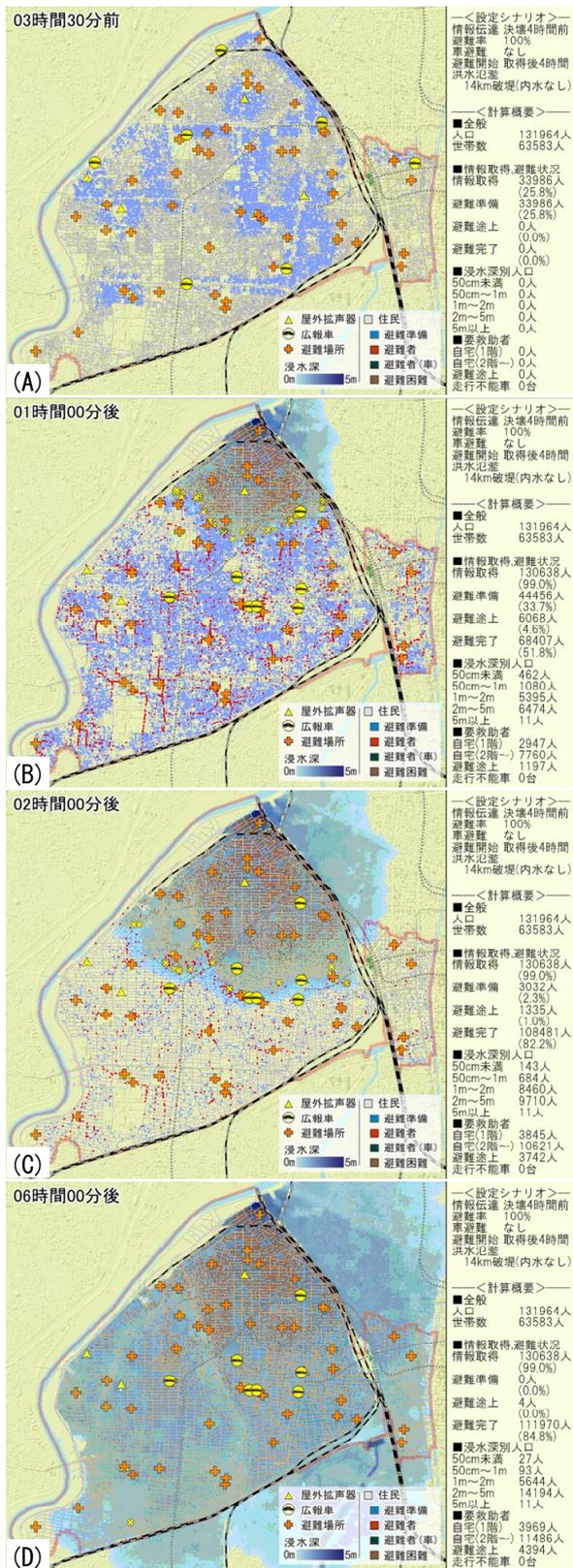


図-7 アニメーション例 (シナリオNo. 1)

とによって大幅に要救助者を減少させることができることを示した。そして、避難タイミングのみを変化させたその他のシミュレーション結果を示し、人的被害の規模は、避難の開始タイミングによって大きく変化することを説明した(図-5参照)。

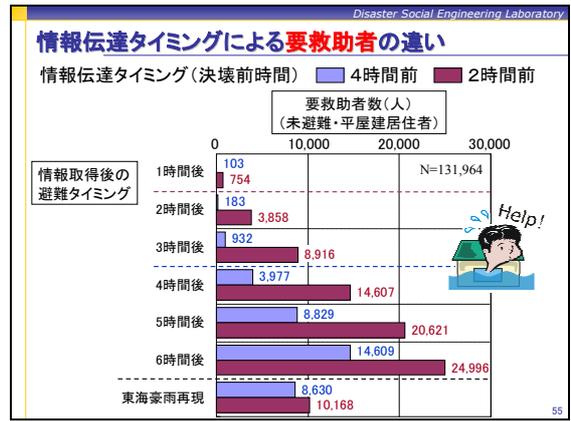


図-8 シミュレーション結果の表示例

次に、情報の伝達タイミングを破堤の2時間前としたシミュレーション(No. 3)を提示し、深刻な被害の発生が想定される平屋建て居住者に限定した避難開始前の要救助者の数について、住民の避難タイミングを変化させた場合のシミュレーション結果の推移を情報伝達が決壊の4時間前だった場合(No. 1)の結果と比較する形で示した(図-8参照)。そして、行政からの情報伝達が決壊に対して余裕を持ったタイミングで発令されるとは限らないこと、したがって行政からの情報伝達にのみ依存していると避難のタイミングの如何に関わらず大規模な被害が発生してしまう可能性があることを説明した。

最後に、自動車を利用した避難行動の危険性について説明するため、情報伝達や避難開始タイミングを固定し、自動車の利用の有無だけを変化させたNo. 4とNo. 5のシミュレーションを提示した。そして、自動車を利用した場合には、避難中に走行不能となる車が多数発生することを説明した。また、さらに避難タイミングを変化させたシミュレーション結果の変化を提示し、自動車を利用した場合は多くの世帯が避難を完了することができなかったこと、また、自動車を利用しなかった場合と比較して被害が大幅に拡大してしまうおそれがあることを示した(図-6参照)。

なお、講演会で利用したアニメーションは、シミュレータによって計算された災害情報の取得状況や避難状況、そして浸水深ごとの人口や要救助者数などの被害状況が時間経過とともにリアルタイムに数字で表示されることに加えて、情報伝達メディアの動きや住民の避難状況、氾濫流の挙動などが対象地域の地図を背景にアニメーション表示されたものである。図-7は、No. 1のアニメーションの一部のコマを抜き出したものであり、広報車や屋外拡声器により情報伝達が行われている様子(図-7のA)、破堤1時間後に氾濫流の中を住民が避難している様子(B)、破堤2時間後に氾濫域が拡大している様子(C)、破堤から6時間が経ち対象地域のほぼ全域が浸水している様子(D)などが示されている。なお、本講演会で利用した実際のアニメーションは、群馬大学大学院災害社会

浸水状況について

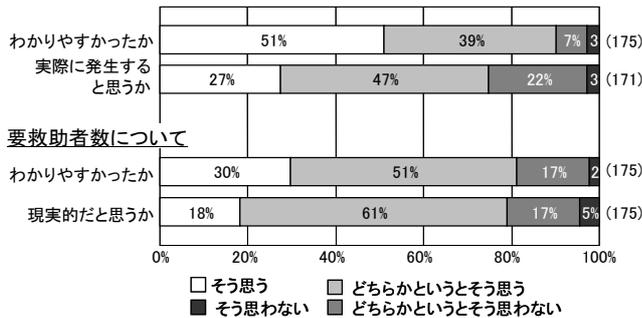


図-9 シミュレーションに対する反応

工学研究室のホームページ(<http://dse1.ce.gunma-u.ac.jp/simulator/shounai/>)において公開されている。

また、シミュレーション結果のまとめを提示する際には、図-8に示すような複数のシナリオによる計算結果をグラフなどで視覚化したスライドを用い、結果の差や対策の効果が理解しやすくなるよう心掛けた。

(3) シミュレーションに対する反応

まず、提示したシミュレーション結果が理解されていたのか。また、現実的に受け取られていたのかについて把握した。実施した調査では、シミュレーションで表現されている地域の浸水状況、要救助者の出現状況について「内容がわかりやすかったか」、「表現されている内容が実際に発生すると思うか(現実的だと思うか)」についての質問を行っている。図-9は、それぞれの回答についてまとめたものである。これによると、浸水状況に比べて、要救助者数の方が若干わかりやすいと回答した人の数が減っているが、双方とも80%以上の人々が、「そう思う」または「どちらかというと思う」と回答している。また、シミュレーション結果の現実性についてみると、双方とも70%を超える回答者が、「そう思う」または「どちらかというと思う」と回答しており、多くの講演会受講者がシミュレーション結果について実際に発生し得る状況であると受け止めたことがわかる。

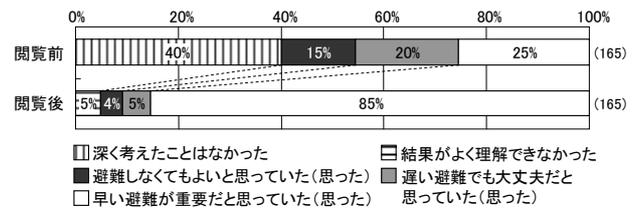
以上の結果から、多くの聴講者がアニメーションによって表現したシミュレーション結果をわかりやすいと感じており、現実感をもって聴講していたことが確認された。

(4) シミュレーション閲覧による意識変化

次に、シミュレータを利用した防災教育の効果について把握した。講演会では、「避難タイミングが遅れることによる危険性」、「自動車を利用した避難行動の危険性」について説明している。本研究では、これらの問題に対する回答者の意識変化を確認することによって、シミュレータを利用した防災教育の効果を検証することとした。

なお、調査は講演会終了時の一回のみ実施しており、

避難の開始タイミングについて



車での避難について

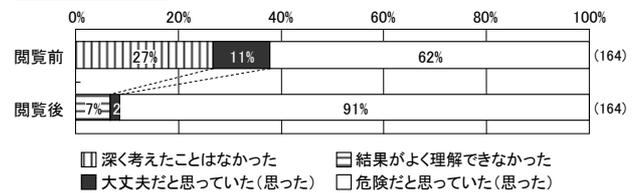


図-10 シミュレーション閲覧前後の意識

シミュレーション閲覧前後での意識変化について把握するため、調査票にはシミュレーションを閲覧する以前と閲覧後の二つの時点における意識についての設問を用意した。本来、講演会による意識変化を把握するためには、その前後において調査することが求められるが、同様な内容の調査を複数回実施することに対する参加者の抵抗を考慮し、このような実施形態とした。また、本調査は今回の防災講演会に参加するような意識の高い住民を対象としていることから、母集団に偏りがあるなどの問題も有している。したがって、本調査によってシミュレータによる教育効果を定量的に論ずることは妥当ではないが、実際にシミュレーションを見た住民の感想から把握できる効果を定性的に論ずることに大きな支障はないと考えている。

a) 避難タイミングに関する意識変化

講演会で示した洪水避難の問題に対するシミュレーション閲覧前後の受講者の意識の構成について図-10にまとめる。また、図-11はシミュレーション閲覧による意識変化について把握するため、シミュレーション閲覧前の意識別に閲覧後の意識の構成をみたものである。

まず、これらの結果から避難タイミングに関する閲覧前の意識について図-10をみると、防災講演会に参加するような水害に対する関心が高いと考えられる住民が対象であるにも関わらず、洪水時の避難タイミングについて考えたことが無かった人が4割も存在していることがわかる。また、「避難しなくてもよいと思っていた」や「遅い避難でも大丈夫だと思っていた」と回答した人が、35%存在しており、避難タイミングについて考えたことが無かった人を合せると、75%の回答者が、早期避難の重要性について認識していなかった。一方、シミュレーション閲覧後は、85%の回答者が早期避難の重要性について認識したと回答しており、講演会により多くの受講者が正しい認識を持ったことがわかる。

次に、図-11から意識変化の詳細についてみると、シミュレーション閲覧以前から早期避難の重要性について

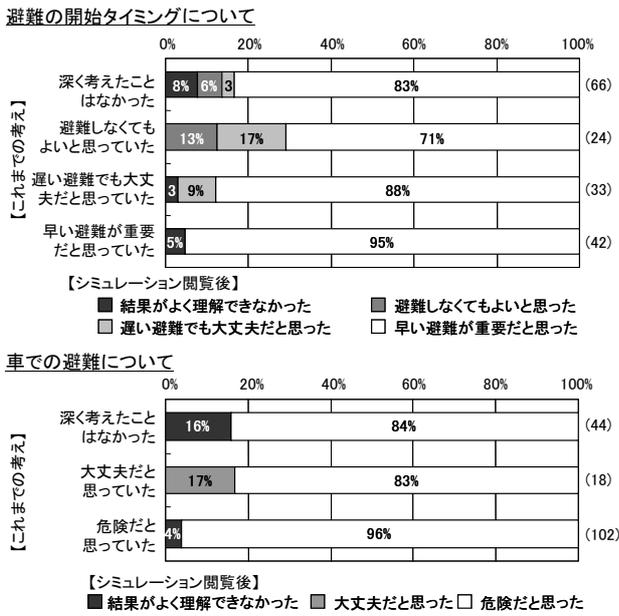


図-11 シミュレーション閲覧による意識変化

認識していた人については、「結果がよくわからなかった」という5%の回答者を除いては全ての人が「早期避難の重要性を認識した」と回答しており、「避難しなくてもよいと思った」、「遅い避難でも大丈夫だと思った」というように意識がマイナス側へ変化した受講者は存在していない。また、遅い避難でも大丈夫だと思っていた人については、1割弱が閲覧後もそのままでの意識を持ち続けているが、9割程度は早期避難が重要であると意識を改善させていることがわかる。さらに、避難しなくてもよいと考えていた人を見ると、3割の人は閲覧後も避難しない、もしくは遅い避難でも大丈夫だと考えているが、残りの7割の人は早期避難が重要であると意識を改善させた結果となった。また、これまで水害時の避難タイミングについて考えたことがなかった回答者についてみると、8割強が早い避難が重要であると答えており、多くの受講者が避難の重要性について認識した状況が把握できる。

なお、意識が改善されなかった人については、三階以上に住むなど自宅の浸水の危険性が低いことに起因すると考えられるが、回答数が十分ではなく、居住形態と意識変化の明確な関係を確認することはできなかった。

b) 避難時の自動車の利用に関する意識変化

ここでは、図-10、図-11から避難時の自動車の利用に関する意識の変化についてみる。

まず、閲覧前の意識の構成について図-10をみると、3割弱の人が避難時の自動車の利用について考えたことが無かったと回答しており、大丈夫だと思っていた1割強の人と合せると、4割弱が水害時の車を利用した避難の危険性について認識していなかったことがわかる。一方、閲覧後の意識構成をみると、9割以上の人が車での避難が危険だと思ったと回答しており、意識の構成が大きく改善していることがわかる。

次に、図-11から意識変化の詳細をみると、シミュレーション結果を理解できなかった人を除くと、元々自動車を利用しても大丈夫だと思っていた人の2割弱が閲覧後も意識が変化しなかったことを除いて、その他の全ての回答者が自動車による避難行動を危険だと認識した結果となった。

(5) まとめ

本章では、水害時における不適切な対応行動の危険性や適切な対応行動の効果について説明する防災教育ツールとしてシミュレータを活用した事例を示した。また、その効果検証として、シミュレーション閲覧者に対して実施したアンケート調査結果から、シミュレータによる表現内容の理解や意識変化について確認した。

その結果、本シミュレータは、被災時の状況を具体的にわかりやすく説明することが可能であり、多くの受講者が講演会で説明した問題事項について、受け入れたことを確認できた。一方、シミュレーションについて「結果がよく理解できなかった」という回答も一部得られていることから、表現方法に関する改善も必要であることがわかった。なお、アンケート調査では、シミュレータについて「市のホームページで公開してほしい」、「学校教育でも活用してほしい」、「自分でももっと利用してみたい」というような回答も得られており、住民からみた防災教育ツールとしてのニーズも高いことが把握された。

6. おわりに

洪水を対象とした的確な避難計画を立案するためには、ハザード現象のみならず、避難情報の伝達や住民避難についても考慮した総合的な検討が必須である。この様な問題意識のもと、本研究では、避難情報の伝達や住民避難、そして洪水氾濫やこれらに基づく被害の発生状況までを表現するシナリオ・シミュレータを開発した。そして、防災計画の検討ツールとしての活用事例として、避難情報の伝達や住民避難の遅延、自動車避難を対象としたシナリオ分析を実施し、これらの条件による人的被害規模の変化について把握した。また、地域住民を対象とした防災講演会において、洪水時における適切な避難行動を説明するためにシミュレータを活用し、その効果について調査することによって、防災教育ツールとしての本シミュレータの有効性を確認した。

今後は、シミュレータで用いている各シミュレーションモデルを精緻化していくこと。また、地形や氾濫流の特性、避難施設などの配置状況を総合的に判断することによって、精緻な避難計画を策定するための支援機能の開発やマニュアルの整備、そして、防災教育ツールとして、より効果的に災害時の状況を表現するための機能開

発やシナリオの検討などを実施することが課題である。

謝辞：本研究の実施に当たっては、国土交通省庄内川河川事務所、名古屋市の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 内閣府編：平成19年版 防災白書，2007.
- 2) 片田敏孝，児玉 真，浅田純作：東海豪雨災害における住民の情報取得と避難行動に関する研究，河川技術論文集，第7巻，pp.155-160，2001.
- 3) 例えば，わかりやすい洪水・濁水の表現検討会：的確な理解につながる洪水・濁水の情報提供について，2006.
- 4) 片田敏孝：都市の気象災害への住民の対応行動，第37回夏期大学 新しい気象学—都市の気象と災害—，pp.20-28，2003.
- 5) 岡本浩一：リスク認知・リスクコミュニケーション研究の概略，日本リスク研究学会誌，1(1)，pp.23-27，1989.
- 6) 片田敏孝，及川康，児玉真：治水施設整備の進展が洪水に対する住民意識に与える影響に関する研究，土木学会水工学論文集，第43巻，pp.169-174，1999.
- 7) 及川 康，片田敏孝：河川洪水時の避難行動における洪水経験の影響構造に関する研究，自然災害科学，Vol.18-1，pp.103-118，1999.
- 8) 片田敏孝，浅田純作，及川康：過去の洪水による学校教育と伝承が住民の災害意識と対応行動に与える影響，水工学論文集，第44巻，pp.325-330，2000.
- 9) 片田敏孝，桑沢敬行：津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発，土木学会論文集D，Vol.62，No.3，pp.250-261，2006.
- 10) 片田敏孝：洪水ハザードマップの効果と今後の課題，消防科学と情報，財団法人 消防科学総合センター，pp.9-14，2002.
- 11) Rapoport, A.: A Probabilistic Approach to Networks, *Social Networks*, No.2, pp. 1-18, 1979.
- 12) 飯田進史，館健一郎，武富一秀，川本一喜，金木誠，平川了治，谷岡康：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，河川技術論文集，第8巻，pp.139-144，2002.
- 13) 例えば，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，pp.25-33，1999.
- 14) 牛山素行，國分和香那：平成18年7月豪雨による人的被害の分類，水工学論文集，第51巻，pp.565-570，2007.
- 15) 末次忠司：氾濫原管理のための氾濫解析手法の精度向上と応用に関する研究，九州大学学位論文，1998.
- 16) 高橋和雄，高橋裕：クルマ社会と水害，九州大学出版会，1987.
- 17) 藤田素弘，三田村純：倒壊集中豪雨下における自動車帰宅交通状況と走行経路解析，土木学会論文集，No.751，IV-62，pp.127-137，2004.
- 18) 群馬大学工学部建設工学科片田研究室編：平成10年8月末集中豪雨災害における郡山市民の対応行動に関する調査報告書，1999.
- 19) 例えば，佐賀県白石町ホームページ：<http://www.town.shiroishi.lg.jp/>，2007.
- 20) 例えば，堀口良太：交通運用策評価のための街路網交通シミュレーションモデルの開発，東京大学学位論文，1996.
- 21) 例えば，坂本邦宏，久保田尚，門司隆明：地区交通計画評価のための交通シミュレーションシステムtiss-NETの開発，土木計画学研究・論文集，No.16，pp.845-854，1999.
- 22) 群馬大学工学部建設工学科片田研究室編：平成12年9月東海豪雨災害に関する実態調査 調査報告書，2001.

(2007.7.3 受付)

DEVELOPMENT OF COMPREHENSIVE SCENARIO SIMULATOR IN FLOOD TIME AND ITS APPLICATION TO DISASTER EDUCATION

Noriyuki KUWSAWA, Toshitaka KATADA, Yasushi OIKAWA and Makoto KODAMA

The primary mitigation measure for flood disaster is to develop effective evacuation strategies and to implement disaster education. A Comprehensive Scenario Simulator in Flood Time was developed as a tool to optimize the warning system and evacuation. The simulator combines hydrodynamic simulation of flood with warning and human-response simulations for evacuation. Therefore, the use of this simulator can be twofold: One as a strategy tool to examine effective flood disaster mitigation measures. Two, because of its visual presentation, this simulator can be used as a risk communication tool to learn about various disaster phenomena and appropriate actions to be taken to reduce the impact of flood disasters.