

大都市大規模水害を対象とした 避難対策に関するシナリオ分析

片田 敏孝¹・桑沢 敬行²・信田 智³・小島 優⁴

¹正会員 群馬大学大学院教授 広域首都圏防災研究センター (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)
E-mail: katada@gunma-u.ac.jp

²正会員 群馬大学大学院広域首都圏防災研究センター特別研究准教授 ((株)IDA社会技術研究所)
(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)
E-mail: kuwasawa@ce.gunma-u.ac.jp

³正会員 国土交通省 関東地方整備局 企画部
(〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心2番地1さいたま新都心合同庁舎2号館18階)
E-mail: shida-s2jf@ktr.mlit.go.jp

⁴正会員 国土交通省 関東地方整備局 河川部
(〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心2番地1さいたま新都心合同庁舎2号館16階)
E-mail: kojima-m8314@ktr.mlit.go.jp

大都市における大規模洪水を想定した避難対策の検討においては、膨大な人口の存在が避難の障害にもなり得ることから、人口規模とその影響を正しく考慮する必要がある。本研究では、このような問題意識から、大都市における大規模水害時の避難問題の把握や対応策を検討することを目的として、65万人超の人口を擁する江戸川区を対象に、洪水氾濫や住民避難、そして浸水被害の状況を精緻に表現するシナリオ・シミュレータを構築した。そして、荒川決壊時における住民の避難意向を反映したシミュレーションから、大規模な避難者の発生が被害拡大を誘発するという都市部特有の避難問題を把握した。さらに、被害低減策を想定したシナリオ分析から、避難需要の低減や避難者の空間的、時間的な分散化などの対応策が重要であることを明らかとした。

Key Words: scenario analysis, evacuation strategies, big cities, large-scale flood, simulation

1. はじめに

近年、地球温暖化の進行に伴う気候変動の影響により、台風の強大化やゲリラ豪雨の頻発化など、洪水リスクが高まる傾向がみられおり、水害を対象とした防災対策の必要性が叫ばれている。特に、都市部においては、近年の積極的な治水施設整備の推進により浸水の頻度が低下したことで、人口や資産の集中が加速しており、大規模な水害による被害の甚大化が懸念されるというジレンマが生じている。このような背景から、大都市における大規模水害を対象とした防災対策は喫緊の課題であり、特に避難対策をはじめとするソフト的な対応策の推進が求められている。

2010年4月、内閣府中央防災会議大規模水害対策に関する専門調査会は、首都圏における大規模水害を対象と

した被害軽減に関する提言をとりまとめた¹⁾。同調査会の推計では、首都圏の被害が最大となる利根川氾濫シナリオを想定した場合、浸水域は約500km²に及び、230万人の浸水人口が発生するとされており、被害低減に向けて都市部の特性を踏まえた避難方針の検討が重要であるとしている。この提言における指摘や次章に示す名古屋市の事例のように、都市部における避難対策は、対象人口が膨大であるという特異性によって非常に困難な問題となっている。

本研究では、以上の問題意識のもと、大都市における大規模水害時の避難問題の把握やその対応策を検討することを目的とした。まず本研究では、都市部における膨大な避難者人口に起因する問題を具体的に把握するために、65万人超の人口を擁する東京都江戸川区を対象として、洪水時の地域住民による避難状況を表現するシナリ

オ・シミュレータを構築した。そして、構築したシミュレータを活用し、荒川の決壊を想定したシナリオ分析を実施することによって、住民の行動意向に基づく被害発生特性の把握や被害低減に向けた対応策の検討、対応策の効果検証を行った。その結果、画一的な避難の促進や誘導では対応することのできない、大都市特有の避難問題や対応策の方向性が明らかとなった。

2. 大都市を対象とした洪水避難の検討方針

(1) 大都市における洪水時の避難問題

2011年9月に発生した台風15号は、東日本に上陸し甚大な被害をもたらす一日前、九州の南海上にある時点から、本州上に停滞する前線に湿った空気を送り込み、岐阜県や愛知県に断続的な激しい雨を降らせた。この地域を流域とする庄内川では、豪雨により水位が急激に上昇し、2000年の東海豪雨によるピーク水位を約50cm上回る6.23mにまで達した。ただし、一部で越水がみられたものの決壊には至らず、幸いにも大規模な外水氾濫は生じなかった。庄内川において既往最大の洪水が発生するなか、名古屋市は、避難勧告の発令基準となる避難判断水位の超過から25分後、市内181学区に住む100万人を超える膨大な住民を対象に避難勧告を発令した。ただし、市が指定する施設に避難した住民は約5千人に留まり、避難率からみれば非常に限定的な避難しか行われなかった²⁾。指定避難所以外への避難者も考慮すると、実際の避難者は多少増加すると考えられるものの、この時仮に庄内川が決壊していた場合、大規模な被害が生じていたであろうことは想像に難くない。しかし、逆に避難勧告を受けた住民の多くが避難していた場合、過去に例を見ない大規模な洪水避難が展開されていたこととなり、深刻な混乱が生じていたであろうことも容易に想像できる。そして、併せて大規模な外水氾濫が生じていた場合、避難者の中から多くの犠牲者が発生していた可能性を否定することもできない。

この事例からも想像されるように、大都市における住民避難の問題は、大規模な避難人口の存在によって、避難の促進だけでは解決できない複雑な様相を呈する。したがって、大都市における適切な避難対応を検討するためには、地域人口を単に保全対象や避難対象の規模として静的に捉えるのではなく、事態の進展や情報の取得に応じて自ら考え行動する動的な要素として捉え、避難行動をはじめとする対応の過程において生じる問題にまで及んだ検討を行う必要がある。

(2) 大都市大規模水害を対象とした住民避難の検討方針

本研究では、前節の問題意識を踏まえ、大都市におけ

る大規模水害時の避難問題について検討するために、対象地域の水害時の状況を具体的に表現するシナリオ・シミュレータ（以下、シミュレータと呼ぶ）を構築することとした。

住民避難を対象としたわが国のシミュレーション研究の多くは、地下街などの閉鎖空間を対象としたもの³⁾や地域の一部を対象としたもの⁴⁾が多く、大都市全域を対象に大規模な避難人口を想定したものは少ない⁵⁾⁶⁾。しかし、住民避難の検討主体は自治体であり、特に広範囲が浸水する大規模水害を対象とした検討においては、少なくとも自治体全体の避難状況を考慮することが求められる。さらに、大都市を対象とした場合は、避難状況や被災状況に対する人口規模の影響を具体的に考慮した検討が必要となる。一方、国外においては、広域を対象とした水害避難に関するシミュレーション研究が実施されており、対象地域の人口や面積、居住者の属性などから避難に要する時間等を求める研究⁷⁾⁸⁾や、避難者の規模とOD、道路網等から避難時間を予測する研究⁹⁾¹⁰⁾、そして、個々の避難者の行動を表現するマイクロシミュレーションやエージェントベースのモデルによる研究¹¹⁾¹²⁾等に分類される。ただし、これらの研究で検討されている避難対応の多くは、米国におけるハリケーン対応に代表されるように、市民を効率的に浸水域外へ避難させることに主眼を置いており、自治体単位を基本としたわが国の避難政策に適合するものは少ない。加えて、本研究と同様に個々の避難状況を表現するマイクロシミュレーションモデルを活用した研究についても、自動車による避難交通の表現が主であり、住民への災害情報の伝達や徒歩も含む避難者の行動と洪水氾濫との動的な関係など、地域における水害時の状況を具体的に、総合的に表現したシミュレーション研究は見当たらない。

この様な問題意識や既往研究の状況から、本研究では、シミュレータの構築や検討の実施に当たって、次の事項を考慮することとし、大都市全体を対象に住民の行動意向に基づく大規模避難を具体的に表現することを方針とした。

- ・シミュレータは、住民避難における具体的な課題を把握するため、洪水災害に関するハザード現象の表現に留まらず、避難行動を含めた社会的な対応行動までを総合的に表現するものとする。
- ・大都市を対象とした検討を実施することから、住民の表現については、その特徴となる人口規模が避難行動や被害状況に与える影響を表現する。
- ・対象地域の特性を踏まえた検討を行うため、対象地域を表現する地形や道路網、住民分布、防災施設の配置などを精緻に表現する。
- ・住民の対応行動は、被害の多寡に多大な影響を与える要素であることから、現実に即した課題や対策を検討

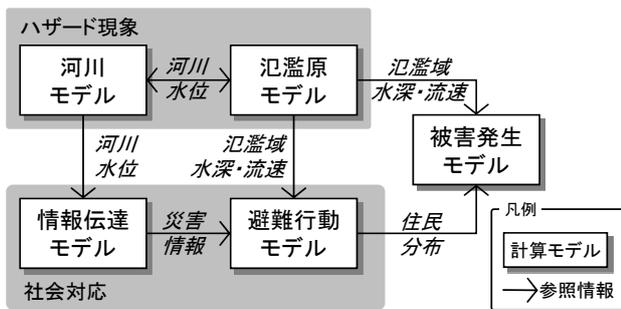


図-1 シミュレーションモデルの構成

するため、現状の住民意識を反映して表現する。

- ・人的被害の削減に向けた対応策を検討するためには、情報伝達の改善や避難支援など、直接的な目的が異なる対策の優先度を検討する必要がある。そこで、シミュレータでは人的被害の発生までを表現し、その低減数を対策の共通の評価指標として用いる。

3. シミュレーションモデルの構築

本研究では、前章に示した方針に則したシミュレータを構築するため、筆者らがこれまでに開発してきた災害総合シナリオ・シミュレータ^{13),14)}を基本モデルとして用いた。本モデルは、災害情報の伝達状況を表現する情報伝達モデルと住民の避難状況を表現する避難行動モデル、そして、ハザードの状況を表現する洪水氾濫モデルで構成されている。本研究では、避難行動モデルにおいて交通渋滞や歩行避難者の混雑度に応じた速度低下を考慮するなど、避難速度の精緻化や都市部における避難行動の表現に向けた改良を行った。

(1) シミュレータの構成

大規模水害時における住民の避難状況を表現するため、図-1に示す計算モデルで構成されるシミュレータを構築した。これらの計算モデルは、洪水災害に関するハザード現象を表現するモデルと洪水災害時における社会的な対応を表現するモデル、そして人的被害を推計するモデルに大別できる。ハザード現象を表現する計算モデルは、河川の水位変化を表現する河川モデルと堤内地の氾濫域や浸水深を表現する氾濫原モデルで構成される。一方、社会的な対応を表現するモデルは、ハザードの状況に応じて行政が住民に災害情報を伝達する様子を表現する情報伝達モデルと災害情報の取得などをきっかけとして住民が避難を決意し、避難施設まで移動する様子を表現する避難行動モデルで構成される。そして、被害発生モデルは、両モデル群の出力結果から人的被害の規模を推計するものである。

(2) シミュレーションモデルの概要

本節では、図-1に示した各計算モデルについて概説する。なお、各モデルは、基本的に既往技術を活用したものであるため、詳細については参考文献の提示に留める。

a) 河川モデル

河口部の潮位を出発水位、また上流端に与えた流量のハイドログラフを境界条件として、河道内の水位や流量の時間的な変化を表現する。本モデルでは、洪水状況の時間的な変化を表現するため、計算手法として一次元不定流計算¹⁵⁾を用いている。また、本モデルでは、川幅や径深を設定する河道横断面に流量や流速を計算する点を置き、水位の計算については、断面の中間点で行う。対象範囲に合流部がある場合は、支川の下流端断面の水位計算点と本川合流部の水位計算点を共有させることにより、合流部下流端の流量を算出している。

b) 氾濫原モデル

氾濫原モデルは、破堤や越流によって堤内地に流入した氾濫流の挙動を直交座標系の二次元不定流計算¹⁶⁾により表現する。河川氾濫による破堤流量や越流量は、河川モデルによる水位と対応する氾濫原の計算メッシュの水位及び破堤敷高または堤防天端高との関係から本間の横越流公式¹⁶⁾によって算出する。なお、本シミュレータでは、堤内地の氾濫状況について住民の避難行動と合わせて評価する必要があることから、10mの詳細な計算メッシュを用いる。

c) 情報伝達モデル

情報伝達モデルは、警報や避難勧告などの災害情報が防災行政無線やマスメディアなどを通じて住民に伝達される様子を表現する。また、住民間の口伝えにより情報が地域に拡まる様子を表現するため、住民個々の情報伝達行動についても考慮している。このモデルの実装には、筆者らが既往研究において構築した災害情報伝達シミュレーションモデル¹⁷⁾を用いた。災害情報伝達シミュレーションモデルは、住民間の情報伝達行動の活発度を操作するパラメータを有しており、地域コミュニティの結束度や、被災時などコミュニティがおかれている状況に応じた伝達行動の状況を表現することができる。本モデルは、住民の情報伝達行動の表現を基本に、防災行政無線などの情報伝達メディアによる伝達状況を考慮した災害時の情報伝達状況を表現する。

d) 避難行動モデル

避難行動モデルは、主として住民が自宅から道路上を歩いて避難先まで移動する様子を表現する。避難を開始するタイミングは、情報伝達モデルにより表現される避難勧告などを取得したタイミングを基準として、避難の準備に費やす時間などを加算した時刻に設定する。また、避難先や経路は、基本的に自宅から最も近い避難施設とその場所までの最短経路を利用する。なお、この部分の

表現については、次章において詳細を述べる。

避難中は、移動開始からの経過時間と移動速度に応じて道路データから避難者の位置を求める。対象地域の道路は、道路を表現するリンクと交差点を表現するノードで構成されるネットワークで表現する。各リンクは、任意のタイミングで変更可能な通行可否を表す状態を持つ。避難者は、進入しようとするリンクが通行不能であった場合、通行不能リンクを除外したネットワークを利用した経路探索を実施し、迂回路を求める。また、道路の状態は、10秒毎に氾濫原モデルにより表現される浸水状況を反映して更新しており、浸水域の拡大に伴う通行不能箇所の出現やそれに応じた避難者の迂回行動を表現している¹⁴⁾。

避難手段としては、徒歩と自動車の利用を表現する。水害時においては、一般的に徒歩による避難が原則とされるが、車はそれ自体が財産であることや豪雨時の徒歩による移動が困難であるなどの理由から、実際には自動車を利用した避難が多く行われている現状にある¹⁸⁾。移動速度は、基本的に任意に設定された速度に基づく。ただし、自動車の速度については、リンクへの進入時、もしくは走行中のリンクの交通量が変化した時に、Greenshields¹⁹⁾の式により速度を更新することで、交通量に応じた速度変化を表現する。

$$v_c = v_f \cdot (1 - k/k_j) \quad (1)$$

ここで、 v_c ：自動車速度 (km/h) , v_f ：自由走行速度 (km/h) , k ：交通密度 (台/km) , k_j ：飽和密度 (台/km, 今回の計算では140に設定) である。なお、自由走行速度は、主に道路の規模に基づくため、本研究では、対象地域の道路交通センサ等の調査を基に高速道路30 km/h, その他道路20km/hに設定した。また、交通密度は先行車との車頭間隔の逆数により求めた。なお、本モデルでは、モデルの簡略化のため車線や信号機の表現は省略しており、交差点においては直進車を優先している。また、大都市における避難行動では、徒歩避難者による混雑が発生し、避難速度が低下することも考えられる。そこで、既往検討²⁰⁾を参考に下式により混雑度に応じた歩行速度の低下を表現した。

$$\begin{aligned} r_d &= 1 & (d < 1.5) \\ r_d &= 1.3 - 0.2d & (1.5 \leq d < 6) \\ r_d &= 0.1 & (6 \leq d) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 r_d ：混雑度による速度係数、 d ：混雑度 (人/m²) である。なお、混雑度は、歩道面積とリンク内の避難者数より算定する。また、 $6 \leq d$ の場合は、別のリンクから該当リンクに避難者が侵入できないこととした。さらに、避難行動が長時間となった場合、歩行避難者は疲労による速度低下が生じると考えられることから、式

表-1 浸水人口の分類

浸水人口	定義
浸水域内滞在者	避難せずに自宅に留まっている人で、自身は浸水していないが自宅が浸水域内にある (自宅の地表面が浸水している) 人
浸水域内危険者	未避難または避難途上で、緊急の救助が必要ではないものの自身が浸水している人
要緊急救助者	未避難または避難途上で、歩行が困難なほどの浸水状況下において、緊急の救助が必要な人

(3)により疲労による速度低下を考慮した²¹⁾。

$$r_f = 1 / (0.982 + e^{1.12t-4}) \quad (3)$$

ここで、 r_f ：疲労による速度係数、 t ：避難開始からの経過時間 (hour) である。加えて、式(4)²²⁾により浸水域における速度低下を考慮した。

$$r_w = 1 - w/w_{max} \quad (4)$$

ここで、 r_w ：浸水による速度係数、 w ：浸水深 (m) , w_{max} ：歩行限界浸水深 (m, 今回の計算では1mに設定) である。なお、浸水に応じた速度低下に関しては、流速の影響も考慮する必要があると考えられるが、流向や浅水深時の影響の表現が困難であるため、本研究では、より支配的な影響を持つ水深²³⁾のみを考慮することとした。

以上の速度低下に関する係数を考慮し、歩行避難者による移動速度を式(5)により表現することとした。

$$v_w = r_d \cdot r_f \cdot r_w \cdot v_s \quad (5)$$

ここで、 v_w ：歩行避難速度、 v_s ：歩行避難速度の初期値である。

e) 被害発生モデル

河川氾濫による水害の場合、浸水域内においても必ず犠牲者となるとは限らないため、本モデルでは、住民の避難状態や住居特性と浸水状況から表-1に示す三種類の浸水人口を算出し、人的被害規模の評価指標として用いることとした。なお、本モデルでは、歩行が困難な浸水状況におかれている場合を救助が必要な状態としている。歩行の困難度の判定については、須賀ら²³⁾による身長と流体力から歩行困難を判定する式を用いている。

4. 基本シナリオの設定

本章では、検討対象地域や設定した計算条件 (図-2, 表-2参照) についてまとめる。

(1) 計算条件の設定

a) 対象地域

本研究では、大規模水害時の避難対策の検討地域とし

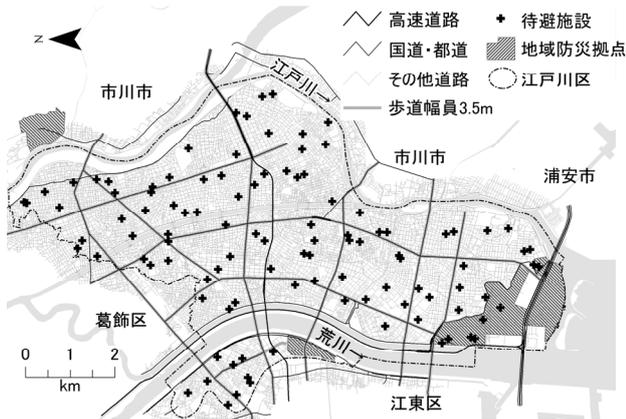


図-2 検討対象地域

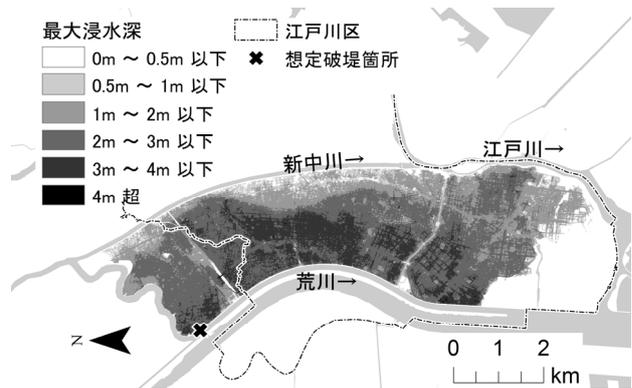


図-3 想定破堤箇所と最大浸水深分布

表-2 計算条件

分類	項目	設定内容	参考・考え方
氾濫	想定洪水	200年確率洪水	基本高水
	出発水位	AP+2.2m	朔望平均満潮位
	破堤箇所	荒川左岸7.0k	被害最大
住民	人口	651,733人	区資料
	世帯	303,245世帯	
	歩行速度	性年齢別歩行速度	統計資料
屋外 拡声器	配置	256基	区資料
	音声範囲	280 m	一般値
	聴取率	30%	既往調査
広報車	台数, 経路	10台	区資料
	速度	20 km/h	一般値
	音声範囲	80 m	一般値
	聴取率	30%	一般値
住民間 伝達	伝達方法	口頭のみ	輻輳により 電話利用不可
	活発度	積極的に 行われない	住民調査
道路	歩道幅員	2 m, 一部3.5 m	区資料
	自動車 基本速度	高速 30 km/h その他 20 km/h	区資料
	避難 施設	待避施設 106箇所 收容可能人数	区資料
	地域防災拠点	3箇所	

て、東京都江戸川区を選定した。江戸川区は、東京都の南東部に位置し、西は荒川、東は江戸川の二大河川に挟まれている。加えて、両河川の最下流に位置することから、堤防が決壊した場合、決壊地点に関係なく浸水の危険性がある水害を受けやすい地勢を持つ。さらに、地盤沈下の影響により、陸域の7割が満潮面以下のゼロメートル地帯となっており、自然排水が望めないことから、一度氾濫が発生すると広範囲が長期間に渡り浸水し、被害が長期化する。また、約65万人の人口を擁する都内でも有数の大都市であり、水害時には膨大な要避難人口が発生する恐れがある。

b) 地形・人口に関する条件

まず、対象地域の地形は、レーザープロファイラを利用して10mメッシュの精度で整備した。次に、建物の分

布と形状は、市販の電子住宅地図を利用して表現した。なお、各建物には、住宅地図やレーザープロファイラデータを参考に階数を設定した。最後に、道路を表すネットワークデータは、住宅地図に含まれる道路形状を参考にして作成した。

住民の表現については、まず区が公表している平成22年1月時点の町丁目別・年齢別・男女別の人口統計に示される人口構成に基づいて仮想的な住民を作成した。次に、町丁目別に住宅地図に示される戸建て、集合住宅を対象に人口統計から把握した世帯数分の仮想的な世帯をランダムに布置し、さらに戸建て住宅には一世帯のみ割り振ることを条件として、各世帯に作成した住民をランダムに割り振ることで人口分布を表現した。

c) ハザードに関連する条件

河川モデルは、荒川を対象としてモデル化を行った。その他の河川は、地形データを加工し、満水の状態を表現した。想定する洪水は、荒川の基本高水（1/200確率）に基づく昭和22年9月型洪水を設定した。また、破堤箇所としては、対象地区内の浸水人口が比較的に多くなる荒川左岸7.0km地点を選定した。河川堤防の破堤幅は、カスリーン台風による利根川での決壊実績を参考に340mに設定した。また、堤防が破堤するタイミングについては、現況堤防の余裕高や整備状況を勘案した基準水位に到達した時点とした。これらの条件に基づく氾濫計算の結果、荒川と新中川に挟まれる区間の大部分が浸水する結果を得た（図-3参照）。

d) 防災施設や災害情報に関する条件

避難施設は、江戸川区の地域防災計画書で指定されている小中学校などの待避施設、高台となる公園などの地域防災拠点を対象に表現した。なお、待避施設については、区の資料を基に浸水の危険性を有する階を除外した利用可能面積を参照し、緊急避難として一畳当たり二人を收容することを前提に收容可能人数を設定した。また、地域防災拠点については、200万人超の收容能力に相当する広大な面積を有するため、收容可能人数を無限とした。なお、避難行動モデルでは、避難施設が收容超過で

表-3 調査で提示した洪水時の段階的状況

No.	状況
1	自宅において普段より降雨が多いと感じた
2	大雨警報や洪水警報が発表された
3	警報が長らく続き、雨も降り止まない
4	避難勧告が発表された
5	堤防が決壊しそうな状況を知った
6	避難指示が発表された
7	堤防が決壊したことを知った
8	自宅の近くまで浸水してきた
9	自宅が浸水し始めた

あった場合、その場所から次に近い避難場所に向けて避難することとなる。

防災行政無線については、区に整備されている256基の屋外拡声器を表現した。なお、屋外拡声器からの情報を取得する割合は、既往調査²⁴⁾を参考に30%に設定した。また、避難勧告と避難指示が発令されるタイミングは、区の計画を参考に、荒川の岩淵地点の水位がそれぞれ避難判断水位、はん濫危険水位に達した時点とした。この結果、今回想定した洪水シナリオでは、堤防が決壊する4時間44分前、2時間41分前に避難勧告と避難指示が発令されることとなった。

(2) 洪水避難に関する住民の意向と反映方法

本節では、洪水災害時における住民の行動意向を把握するために実施した意識調査の結果と、避難行動モデルへの反映方法について述べる。

a) 住民意向の反映方法と調査概要

本研究では、避難行動モデルで表現される「避難の意思決定」、「避難の開始タイミング」、「避難時の行動」において地域住民の意向を考慮することとした。まず、避難の意思決定については、表-3に示す洪水時の段階的な状況を提示し、各時点における避難意向を把握した。また、避難の意思決定については、避難の勧誘による影響も大きい²⁵⁾ため、勧誘を受けた際の避難意向についても把握することとした。次に、避難の開始タイミングは、避難の意思決定後の準備に要する時間を考慮することとした。最後に、避難行動については、避難先と避難手段を把握することとした。

以上の洪水災害時における住民の行動意向について、江戸川区の住民を対象とした意向調査より把握した。本調査の概要を表-4に示す。本調査は、インターネット調査サービスを利用し、江戸川区在住者より3,000票の回答を得た。なお、基本属性に関する設問では、自力による避難が困難な家族の有無や支援の可否についての問いを含めた。

住民の意向を反映した避難行動を表現するため、避難行動モデルでは、世帯毎にあらかじめ調査により得られた回答票をランダムに選択させ、各問の回答に沿った行

表-4 住民意識調査の概要

調査機関	2010年2月19日から23日
調査対象者	二十歳以上の東京都江戸川区在住者
調査実施方法	インターネット調査
回答票数	3,000票
調査項目	<ul style="list-style-type: none"> 基本属性 洪水災害に関する意識 洪水災害に関する行動意向

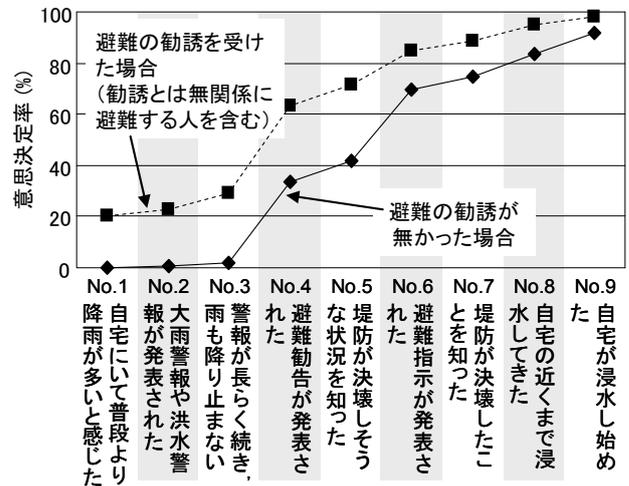


図-4 状況別の避難意思決定率

動を取らせることとした。個々の回答をそのまま利用せず、問別に集計された結果から行動を表現する方法も考えられるが、問毎の回答の相関が表現できず、個人の行動としての整合性が失われるため不採用とした。また、避難意向について、居住地域（6地区）、居住階数（戸建て・集合住宅1F、二階建て以上の戸建て・集合住宅2F以上）別に行動意向に差が見られたため、この二つの属性に応じて回答票をグループ分けした。そして、各世帯に関連付ける回答票を選択する際には、世帯と居住地域・居住階数が一致するグループから選択することとした。

b) 避難の意思決定

住民調査から得られた表-3に示すNo.1～No.9までの各段階において自宅外への避難を決意する人の割合、また、加えて避難の勧誘を受けた場合の割合を図-4にまとめる。

この図からまず避難の勧誘が無かった場合に注目すると、避難勧告を聞いた時点で大きく増加する様子が把握できるものの、その割合は34%と全体の1/3程度に留まっていること。また、避難指示が発令された時点で70%程度まで大きく上昇していること。そして、自宅が浸水する最終時点における意思決定者の割合は92%程度であり、約8%の人はいずれの状況においても自宅外に避難する意向を持たないことが分かる。

次に、各状況に加えて避難の勧誘を受けた場合に避難を決意する人の割合をみると、避難指示前までの各状況においては、勧誘を受けない場合よりも2割程度増加し



図-5 イベントの発生タイミング

ていることが分かる。ただし、避難指示以降については、その差は縮小している。この結果から、避難促進に向けて災害時の初期段階における勧誘の重要性をうかがうことができる。

表-3の状況に対応する各イベントのシミュレーションにおける発生タイミングを図-5にまとめる。これらのタイミングは、前述した河川モデルによる計算結果から得られた避難勧告などの発令時刻と堤防の決壊時刻の時間差をそのままに、避難勧告の発令2時間前を計算開始時刻として洪水警報や河川に関する情報が伝達されるタイミングを設定したものである。ここで、No.1, No.2の状況については、シミュレーション開始前に既に発生している状況を想定した。また、No.8, No.9については、自宅の位置や浸水の状況により個人ごとに異なるタイミングで発生する。なお、図-5の時間は、実際にはイベント発生を引き金となる情報の伝達開始タイミングを示しているため、イベントが発生する厳密なタイミングは、防災行政無線やマスメディアなどによる伝達を経て各住民が情報を取得した時点となる。したがって、情報を取得できなかった場合、該当するイベントは発生しない。

避難行動モデルにおいて避難の意思決定は、災害情報の取得状況と、住民からの避難の勧誘に応じて判断する。具体的には、取得した情報が、避難を決意すると回答した状況、またはそれ以降の状況を示す情報だった場合は、避難を決意することとなる。また、既に避難を決意した住民から情報を受けた場合は、勧誘を受けたと見なし、勧誘を受けた際の避難意向に応じて、その時点で避難を決意するか、取得した情報内容に応じて避難を判断する。

c) 避難を開始するタイミング

避難を決意してから避難のために自宅外へ出るまでの準備に要する時間に関する回答を図-6の上部に示す。この結果によると、避難の決意から30分後までに準備が終わる世帯は36%に留まる。また、最も多く割合を占める回答は30分から40分であり、全体の1/3となっている。一方で、1時間以上を要すると回答した人も同程度存在していることが分かる。避難行動モデルにおいて避難の開始タイミングは、避難を決意した時刻に避難準備に要する時間を加えたタイミングとした。

d) 避難行動

避難時の行動意向に関する調査項目の集計結果を図-6下部にまとめる。

まず避難先については、地域防災拠点（高台）への避

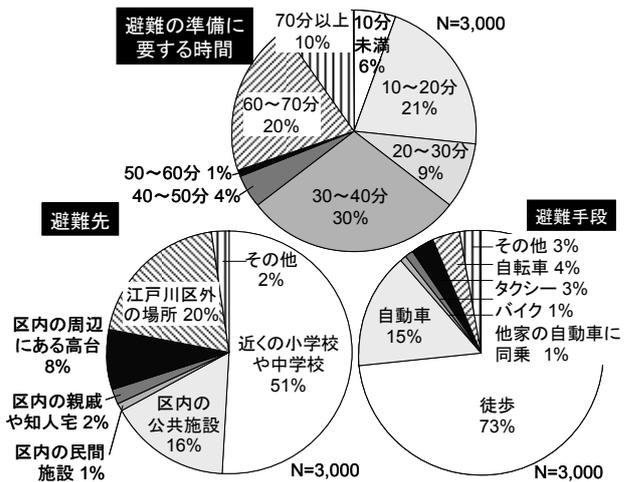


図-6 避難準備に要する時間と避難時の行動意向

難を基本とし、待避施設（小中学校）を緊急避難先として位置付けている区の避難計画と住民が希望する避難先の間で齟齬が生じている。具体的には、多くの回答者が近隣の小学校や中学校へ避難すると回答しており、その他の公共施設を含めると区の施設へ避難する意向を持つ回答者は67%に達している。一方、高台への避難を想定している回答者は8%に留まり、非常に限定的である。また、2割の回答者は、区外への広域的な避難をイメージしている。

次に、避難手段については、徒歩による避難を想定している回答者が73%と多く、特徴的である。ただし、自動車を利用した避難についても同乗避難やバイク・タクシーなどを含めると2割存在しており、絶対数で考えると避難に利用される自動車数は膨大となることが分かる。

避難行動モデルにおいて避難行動を開始する住民は、これらの回答に基づいて避難先と避難手段を選択する。ここで本モデルでは、簡略化のため、区内の公共施設、民間施設、親戚・知人宅へ避難するとした場合は、待避施設に避難する状況を想定することとした。また、区外に避難するとした場合は、区外へと通じる道路ネットワークの端点に布置した仮想的な避難施設に向けて避難することとした。また、避難手段は、徒歩または自動車のいずれかとし、回答が徒歩または自転車の場合は徒歩、それ以外の場合は、自動車で避難する状況を表現することとした。

e) 自力避難困難者

図-7に示した2つのグラフは、自力避難が困難な家族の有無と、自力避難が困難な家族がいる世帯を対象に避難支援の可否について質問したものである。この結果を合わせてみると、全体の1割の世帯には自力による避難が困難な家族が存在しており、その中の少なくともさらに約1割の世帯は、家族などによる避難支援が困難であり、世帯単独での避難が困難な状況にあることが分かる。

自力での避難が困難な家族の有無 家族等による避難困難者の支援の可否

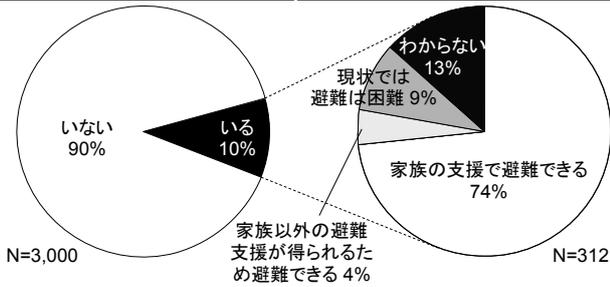


図-7 自力避難困難者の有無と家族等による支援の可否

避難行動モデルでは、この結果を反映して、自力避難困難者が存在し、避難が困難な場合においては、自宅外への避難ができない状況を表現することとした。なお、家族等による避難困難者の支援の可否において「わからない」とした回答の半数についても避難不能として扱うこととした。

5. シナリオ分析

大都市における大規模洪水時の被害低減策を検討するためのシナリオ分析として、まず、調査から把握した住民の行動意向をそのまま再現するシナリオ（以下、現状再現シナリオと呼ぶ）によるシミュレーションを実施し、現状において想定される被害規模やその要因を把握した。次に、被害の発生要因を踏まえた被害低減策を表現した各種シナリオ（表-5参照）によるシミュレーションを実施し、その効果の検証や新たな課題の抽出を行った。

(1) 住民の行動意向に基づく現状の被害想定

図-8は、現状再現シナリオの開始から24時間が経過した時点における各住民の状態をとりまとめた結果である。この結果から、まず全住民の構成をみると、3.7万人を超える要緊急救助者が発生しており、大規模な被害が生じていることが把握できる。次に、要緊急救助者の構成をみると、98%は避難途中で被害を受けていることが分かる。この要因について、図-4を併せてみると、多くは避難勧告よりも後の氾濫の危険性が高まった状態において避難を決意するため、結果として避難途中で氾濫に巻き込まれていることが分かる。また、避難開始前の要緊急救助者の構成をみると、約6割が避難準備中、2割は自宅外への避難意向を持たない住民、その他、避難情報を取得できていない住民や避難困難者によって構成されていることが分かる。これらの結果より、現状再現シナリオでは、避難の意思決定タイミングの遅れをはじめとする種々の要因によって被害が発生していることが分かる。なお、多くの待避施設は、最終的に収容超過の状態となった。

表-5 対策シナリオ

記号	対策シナリオ	表現方法
A1	避難困難世帯の対応	避難困難世帯への対策がなされたとし、倍の準備時間を要することを条件に、避難を可能とする。
A2	情報空白世帯の対応	情報伝達の改善がなされたとし、各情報の伝達開始から1時間後には全住民が情報を取得する。
A3	避難タイミングの改善	住民の意識改善がなされたとし、少なくとも避難勧告を聞いた段階で全住民が避難を決意する。
A4	避難準備時間の改善	平時からの事前準備がなされたとし、避難の決意から30分後までには避難を開始する。
B1	高層階居住者の危険避難禁止	破堤を認識した後は、3F以上の住民の屋外への避難を禁止する。
B2	避難対象者の限定	避難勧告を認識した後は、3F以上の住民の屋外への避難禁止。2F以下は、避難勧告までに全員避難。
C	地域防災拠点への誘導	地域防災拠点への避難を基本とし、氾濫開始以降の緊急時以外は待避施設へ避難しない。
D1	歩行者用道路の導入	避難勧告時点から道路の一部区間（図-11参照）を歩行者専用道路とする。
D2	避難先の分散化	災害弱者世帯のみ、待避施設への避難を許容する。
D3	事前避難の促進	災害弱者世帯は、避難勧告の2時間前には避難を完了する。

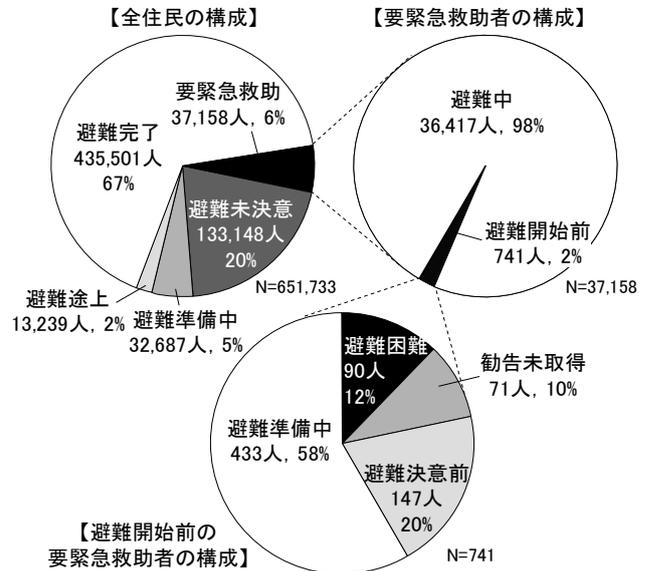


図-8 現状再現シナリオによるシミュレーション結果

(2) 避難行動の改善による影響

現状再現シナリオから把握された問題を踏まえて、ここでは避難率や避難の開始タイミングの改善による被害低減効果を把握する。想定した対策は、表-5に示すA1～A4のシナリオである。

現状再現シナリオに対して各対策シナリオを単独で実

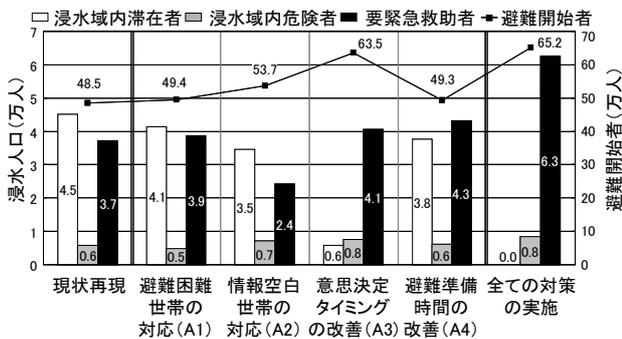


図-9 対策シナリオによる浸水人口と避難開始者数の変化

施した場合と全ての対策を併せて実施した場合の浸水人口と避難開始者数を図-9にまとめる。なお、図中に示した浸水域内滞在者等の各浸水人口の定義は、表-1の通りである。この結果から避難者数の変化をみると、各対策を単独で実施した場合、避難率や避難の開始タイミングが改善されることで、現状再現シナリオよりも多くの住民が避難を開始しており、全ての対策を併せて実施した場合、全住民に相当する約65万人が避難を開始していることが分かる。しかし、浸水人口に着目すると、A2以外のシナリオにおいては、改善策の導入により逆に要緊急救助者が増大していることが分かる。特に、全ての対策を実施した場合、現状再現シナリオにおいて発生していた4.5万人の浸水域内滞在者がゼロにまで減少しているものの、より深刻な被害を受ける要緊急救助者は6.3万人と現状再現の約1.7倍にまで拡大している。この結果は、現状において全住民を対象とした画一的な避難行動の促進が、被害の拡大につながる危険性を持つことを示唆するものである。さらに、各対策シナリオを単独で実施した場合を分析した結果、A3は、避難勧告の段階において活発な避難が実施されるものの、その規模が大きすぎることによって、避難施設の容量超過や渋滞の深刻化が発生し、被害が拡大していること。また、A1とA4は、避難を決意するタイミングが改善されていないため、避難勧告後の危険な段階における屋外避難者が増加し、被害が増大していることが把握された。一方、A2は、悉皆的に情報が伝わることで、早い段階に避難意向を持つ住民が確実に避難を開始することで、全体の避難タイミングを早める効果が認められた。加えて、避難意向は現状の意識に基づくため、A3のような極端な避難者の増加は発生せず、結果的に被害が減少していることが把握された。

以上の分析より、大都市における避難問題に関して、避難者の増加に伴う次のような課題が確認された。**危険な避難行動の問題**：高層階居住者で自宅に留まっていれば浸水域内滞在者となっていた住民が、自宅外へ避難することによって要緊急救助者となっている。**避難施設の容量の問題**：現状再現シナリオにおいても超過がみられた待避施設の収容人数が、避難者が増加することで、よ

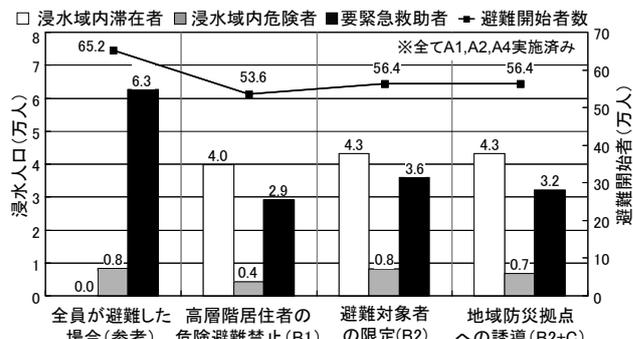


図-10 避難者の限定、地域防災拠点への誘導による効果

り早いタイミングで満員となっている。**避難者渋滞の問題**：避難者の増加が、自動車渋滞、歩行者渋滞の発生を深刻化させており、避難時間の遅延をもたらしている。

なお、全住民が全く避難しない状況を想定した場合、要緊急救助者は現状再現よりも大幅に低い約6千人に留まった。ただし、31万人に及ぶ浸水域内滞在者が発生しており、何らかの対応が求められる結果となった。

(3) 避難需要の低減策による被害低減効果

前節の結果を踏まえ、氾濫直前や氾濫後の危険な避難行動を低減させるための対策を想定したシミュレーションを実施する。具体的には、3F以上居住者による破堤後の避難の禁止した場合(B1)、2F以下居住者は、避難勧告までに全員避難することに加えて、3F以上の居住者による避難勧告以降の避難の禁止した場合(B2)である。なお、A1、A2、A4については実施済みの状況を想定した。

図-10よりB1、B2によるシミュレーション結果をみると、両シナリオともに全員が避難した場合(図-10左端)と比較して大幅に被害が低減していることが分かる。ただし、現状再現シナリオと比較した場合、要緊急救助者の減少数は僅かであり、依然として大規模な被害が生じていることが分かる。また、避難者の限定によって浸水域内滞在者が4万人程度発生していることから、最終的にはこれらの住民を対象とした別の対応も必要となる。

(4) 避難先の改善による被害低減効果

7割が区内の公共施設への避難意向を持つ一方で、待避施設の収容能力の合計は約27万人であり、大規模な避難が実施された場合、意向通りの避難を実施することは非現実的である。一方、地域防災拠点は、合計200万人を超える収容能力を有しており、区の避難計画においても優先的に避難すべき場所として指定されている。次の分析では、この地域防災拠点を活用したシナリオを設定した(C)。このシナリオでは、基本的に居住地区に応じた地域防災拠点を避難先とする。ただし、堤防の決壊や周辺の浸水を認識した場合は、緊急避難行動として待避施設も含めた最寄りの避難場所に避難することとした。

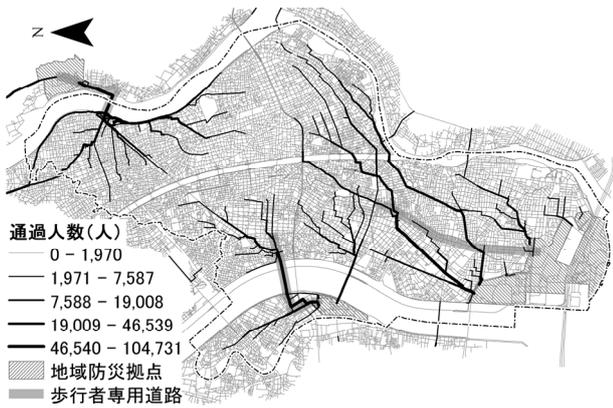


図-11 歩行避難者の通過人数と歩行者専用道路導入箇所

B2を基本として、Cの条件を加えた結果(図-10右)をみると、適切な避難先の指定によって被害が減少しているのが確認できる。ただし、減少数は4千人程度であり、依然として3万人を超える要緊急救助者が発生している。

(5) 避難者の分散化による被害低減効果

避難先の改善により被害の低減はみられたものの、少数の地域防災拠点に多くの避難者を誘導することで、一部の道路において特に徒歩避難者による大規模な渋滞が発生した(図-11参照)。渋滞は、特定の道路に対して一時に容量を超える避難者が集中することで発生している。したがって、渋滞を解消するためには、避難者を空間的、そして時間的に分散させることが対策として考えられる。ここでは、まず空間的な分散化策として、避難勧告の発令時から一部の道路を歩行者専用とした場合(D1、対象道路は図-11を参照)と、災害弱者世帯(未就学児、後期高齢者を持つ世帯、約24%の世帯に該当)や避難困難者世帯については、待避施設も含めて避難先を選択させることで避難先を分散させた場合(D2)を設定した。なお、D1では、歩行者専用道路が周知されている状況を想定し、歩行者の経路探索において該当道路は、通常の半分のコストで評価した。次に、時間的な分散化策としては、災害弱者世帯を対象に事前避難が促進された状況を想定し、避難勧告の2時間前には避難が完了している場合(D3)を設定した。

B2とCを基本として、D1~D3の条件を加えた場合の浸水人口と徒歩避難者に限定した平均避難所要時間を図-12にまとめる。この図からまずD1の結果についてみると、避難に約2時間を要していたCに対して、40分程度避難時間が短縮しており、渋滞が緩和されている様子が把握できる。また、約3万人であった要緊急救助者は、千人程度にまで大幅に低減した。次に、D2では、災害弱者世帯が近隣の待避施設に避難できるようになったため、避難時間はD1よりもさらに20分程度短縮化された。ただし、地域防災拠点への避難者による渋滞は十分に緩

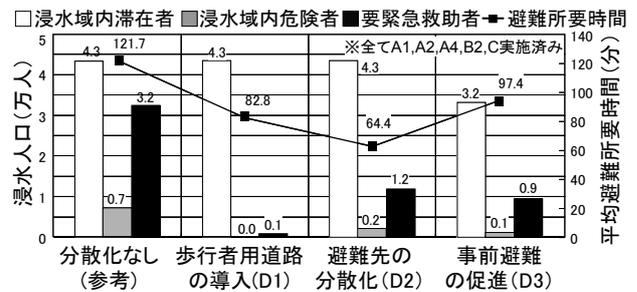


図-12 避難者の分散化策による効果

和されず、2万人程度の被害低減に留まった。最後に、D3では、災害弱者世帯の避難が早い段階において完了しているため、避難勧告時の渋滞が緩和され、要緊急救助者は、D2よりも被害が少ない約9千人にまで低減した。ただし、地域防災拠点に向かう一般世帯の避難時間は大きくは改善していない。なお、D1~D3の対策を併せて実施した場合、要緊急救助者はゼロにまで低減する結果となった。

(6) シナリオ分析結果のまとめ

最後にこれまでに実施したシナリオ分析から把握された大都市における洪水犠牲者の低減に向けた課題と、対応策についての考察をとりまとめる。

住民意識の改善：洪水災害に対する住民意識は低く、現状では自宅が浸水してから避難を実施するなどの危険な行動を取る住民も少なくない。犠牲者の低減に向けては、都市部における洪水リスクを理解し、適切な対応を促進するための意識改善が必須である。このためには、平常時からの防災教育を推進する必要がある。

避難需要の低減：都市部における大規模な避難は、避難施設の収容能力超過、避難者渋滞の誘発などの問題から、犠牲者を増加させてしまう危険性を有している。したがって、高層階居住者に対して自宅待機を推奨するなどの避難需要の低減策が求められる。ただし、ゼロメートル地帯においては、湛水が長期間継続する可能性があることから、各家庭における備蓄の徹底や湛水時の救出計画など、命の安全を確保した後の二次的な避難計画の検討を併せて実施することが必須である。

避難者の分散化：避難勧告に応じて一斉に避難が開始される場合、避難者渋滞の深刻化が懸念される。したがって、早い段階から積極的な避難を促すことにより、避難者の時間的な分散化を進めることが本質的な課題となる。このためには、近年の気象予測や水位予測技術を活用した早期からの積極的な情報提供が求められる。また、避難者を空間的に分散させるための適切な避難先の指定や渋滞対策も重要である。最も深刻な事態は、小規模の避難施設に大勢の避難者が一時に集中してしまうことであり、各地に避難需要に応じた避難施設が整備されることが求められる。ただし、少数の大規模な避難施設

の整備は、渋滞の深刻化を招く危険性を持つため注意が必要である。また、避難施設の整備が困難な場合は、高台や地域外も含めた広域避難を検討すべきであり、その為の周辺地域との調整や住民への周知徹底を行う必要がある。低平地の都市部における最も効果的な対応は、両分散化対策を推進することにより、浸水区域外への早期避難を実現させることである。

情報伝達の悉皆化、災害時要援護者の支援：人的被害をゼロにまで低減させるためには、避難情報が伝わらない住民や災害時要援護者などの一部の住民に対する対応も不可欠である。特に、情報伝達について都市部は、膨大な人口、多様な居住者の存在、コミュニティの弱さなど、種々の問題から情報の悉皆性を確保することが困難である。この問題の解決に向けては、伝達メディアの多様化や災害情報の取得における主体性の醸成などの対応が考えられる。また、要援護者に対する支援は、地域特性に依存しない基本的な課題である。人口の多い都市部においては、行政のみによる支援は特に困難であることから、地域住民による支援組織の育成などが求められる。

6. おわりに

本研究では、大都市における大規模水害を対象とした適切な避難対策を検討することを目的として、地形や避難施設などの地域の空間的な特性や地域住民の現状を表現したシミュレータを構築した。本シミュレータは、大都市全体を対象に住民の行動意向に基づく大規模避難を具体的に表現することに加えて、災害現象や情報伝達、そして被害状況などの大規模洪水時の状況を総合的に表現できる特徴を有しており、都市部における避難対応を検討するツールとして活用することができる。ただし、より現実的な検討に向けた課題として、住民避難に対する内水氾濫や流速の影響を考慮することが残されている。

また、本研究では、構築したシミュレータによる江戸川区を対象としたシナリオ分析から、画一的な避難行動の促進が、一時に膨大な避難者を生み出すことで渋滞や避難施設の容量超過の問題を深刻化させ、逆に被害の拡大を招くという都市部特有の避難問題をあらわにした。また、都市部における洪水災害の被害低減策に向けて、住民意識の改善や避難需要の低減、避難者の時間的、空間的分散化などの多角的な避難対策を講じることが重要であることが確認された。

本研究の結果は、都市部における避難対応の大枠を示すに留まっているため、地域を特定した実践的な避難計画を策定するためには、より地域の実情に即した検討を進める必要がある。また、適切に避難計画を運用するためには、避難者たる地域住民の理解が不可欠であり、そ

のための意識啓発は非常に重要な課題である。

謝辞：本研究の遂行に当たっては、江戸川区からの協力を得た。また、河川モデルや氾濫モデルの構築においては、(株)IDA社会技術研究所の細井教平氏の協力を得た。ここに記してこれらの方々に謝意を表する。

参考文献

- 1) 中央防災会議 大規模水害対策に関する専門調査会：大規模水害対策に関する専門調査会報告 首都圏水没～被害軽減のためにとるべき対策とは～, 2010.
- 2) 中央防災会議 災害時の避難に関する専門調査会：平成 23 年 台風 15 号に関する現地ヒアリング調査概要, 2012.
- 3) 例えば, 堀宗朗, 犬飼洋平, 小国健二, 市村強：地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究, 社会技術研究論文集, Vol.3, pp.138-145, 2005.
- 4) 例えば, 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.
- 5) 村木雄二, 狩野均：地域性を考慮した広域災害避難シミュレーションのためのマルチエージェントモデル, 人工知能学会論文誌, 22 巻 4 号 F, pp.416-424, 2007.
- 6) 湯川誠太郎, 畑山満則, 多々納裕一：大規模水害を想定した避難計画のシミュレーション評価に関する考察, 情報処理学会第 73 回全国大会講演論文集, pp.4.655-4.656, 2011.
- 7) Simonovic, S. P. and Ahmad, S.: Computer-based model for flood evacuation emergency planning, *Natural Hazards*, Vol. 34, No. 1, pp. 25-51, 2005.
- 8) Kolen, B., Kok, M., Helsloot, I. and Maaskant, B.: EvacuAid: A probabilistic model to determine the expected loss of life for different mass evacuation strategies during flood threats, *Risk Analysis*, 2012.
- 9) El-Sergany, A. and Alam, S.: Trip distribution model for flood disaster evacuation operation, *ITE Journal*, Vol. 82, pp. 42-47, 2012.
- 10) FLOODsite Consortium: Modeling the evacuation process in case of flooding, *FLOODsite Project Report*, 2008.
- 11) Pel, A. J., Bliemer, M. C. J. and Hoogendoorn, S. P.: EVAQ: A new analytical model for voluntary and mandatory evacuation strategies on time-varying networks, *Proceedings of IEEE Intelligent Transport Systems conference*, Beijing, China, 2008.
- 12) Dawson, R., Peppe, R. and Wang, M.: An agent-based model for risk-based flood incident management, *Natural*

Hazards, Vol. 59, Issue 1, pp. 167-189, 2011.

- 13) 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.23, pp.250-261, 2006.
- 14) 桑沢敬行, 片田敏孝, 及川康, 児玉真: 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, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.3, pp.354-366, 2008.
- 15) 土木学会: 水理公式集 [平成 11 年度版], 1999.
- 16) 国土交通省北陸地方整備局: 急流河川における浸水想定区域検討の手引き, 2003.
- 17) 片田敏孝, 及川康, 田中隆司: 災害時における住民への情報伝達シミュレーションモデルの開発, 土木学会論文集, No.625/IV-44, pp.1-13, 1999.
- 18) 高橋和雄, 高橋裕: クルマ社会と水害, 九州大学出版会, 1987.
- 19) Greenshields, B.: A study of traffic capacity, *Proc. of Highway Research Board*, Vol. 14, pp. 448-494, 1934.
- 20) 中央防災会議: 「首都直下地震避難対策等専門調査会」第 10 回, 2008.
- 21) (財) 河川情報センター: 洪水氾濫解析と住民の避難計画 付 堤防の決潰対策, 1993.
- 22) 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.
- 23) 須賀堯三, 上阪恒雄, 吉田高樹, 浜口憲一郎, 陳志軒: 水害時の安全避難行動 (水中歩行) に関する研究, 水工学論文集, 39 巻, pp.879-882, 1995.
- 24) 群馬大学災害社会工学研究室: 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.
- 25) 片田敏孝, 児玉真, 浅田純作, 及川康, 荒畑元就: 東海豪雨を事例にした避難に関わる意思決定の状況依存性に関する研究, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.319-324, 2002.

(2012. 10. 16 受付)

SCENARIO ANALYSIS ON EVACUATION STRATEGIES FOR RESIDENTS IN BIG CITIES DURING LARGE-SCALE FLOOD

Toshitaka KATADA, Noriyuki KUWASAWA, Satoru SHIDA and Masaru KOJIMA

This study aims to investigate evacuation strategies for residents in big cities during large-scale flood damage. Based on the result of the flood disaster citizen opinion poll with the residents of Edogawa ward, a flood evacuation simulation was created a model their intended behavior. Using this simulation, an evacuation strategy was investigated that allows zero casualties in the case of the banks of the Arakawa River being broken. This paper covers problems identified from simulation studies, countermeasures in order to resolve such issues, as well as the course of action of future efforts to be taken.