

歩行者と自動車行動を考慮した 水害避難シミュレーションモデル

平成 25 年

花島 健吾

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 第2章 水害避難マイクロモデル | 5 |
| 2.1 概説 | 5 |
| 2.2 水害避難マイクロモデルの概要 | 6 |
| 2.2.1 住民が避難を決意する心理過程 | 6 |
| 2.2.2 災害情報の伝達過程 | 7 |
| 2.2.3 デジタル道路ネットワークモデル | 7 |
| 2.2.2 避難者の配置と経路選択アルゴリズム | 9 |
| 第3章 経路上の混雑を考慮した水害避難行動モデル | 11 |
| 3.1 概説 | 11 |
| 3.2 デジタル街路ネットワークモデルの二次元化手法 | 11 |
| 3.3 歩行速度の設定 | 12 |
| 3.4 経路上の群衆密度と歩行速度の関係式によるモデル | 12 |
| 3.5 歩行者の回避行動を再現するモデル | 13 |
| 3.6 氾濫流の浸水深や流速が避難行動へ及ぼす影響 | 15 |
| 3.7 回避行動モデルの妥当性の検証 | 16 |
| 3.8 適用と考察 | 16 |
| 3.8.1 対象地域 | 16 |
| 3.8.2 シミュレーションの初期条件 | 17 |
| 3.8.3 混雑の影響評価 | 18 |
| 3.8.4 歩行者の速度分布の影響評価 | 19 |
| 3.8.5 避難場所の配置の影響評価 | 20 |
| 3.9 結語 | 22 |
| 第4章 水害避難時における自動車の挙動モデリング | 25 |
| 4.1 概説 | 25 |
| 4.2 自動車モデルの概要 | 26 |
| 4.3 自動車の基本的な走行挙動のモデル | 27 |
| 4.3.1 自由走行モード | 27 |
| 4.3.2 減速停止モード | 27 |
| 4.3.3 追従走行モード | 29 |
| 4.4 待ち行列と流入制限 | 31 |
| 4.4 氾濫流の浸水深が車両走行に及ぼす影響 | 31 |
| 4.5 自動車挙動モデルの検証 | 32 |
| 4.5.1 避難フィールドの設定 | 32 |
| 4.5.2 車両の設定 | 32 |
| 4.5.3 追従挙動の検証 | 33 |
| 4.5.4 信号停止に向かう減速・停止の検証 | 35 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 4.5.5 青信号時の発進・走行の検証..... | 39 |
| 4.6 適用と考察..... | 41 |
| 4.7 結語..... | 42 |
| 第5章 信号制御が避難行動に及ぼす影響..... | 45 |
| 5.1 概説..... | 45 |
| 5.2 信号制御モデルの概要..... | 46 |
| 5.3 信号設置アルゴリズム..... | 46 |
| 5.4 信号制御アルゴリズム..... | 47 |
| 5.5 適用と考察..... | 49 |
| 5.5.1 適用地域..... | 49 |
| 5.5.2 避難フィールドの設定..... | 49 |
| 5.5.3 避難者の設定..... | 49 |
| 5.5.4 歩行者による避難行動..... | 50 |
| 5.5.5 信号保持時間の影響..... | 51 |
| 5.5.6 自動車による避難行動..... | 52 |
| 5.6 結語..... | 53 |
| 第6章 水害避難行動モデルを用いた避難計画の評価..... | 57 |
| 6.1 概説..... | 57 |
| 6.2 本研究で用いる氾濫解析データ..... | 58 |
| 6.2.1 設定する外力..... | 58 |
| 6.2.2 解析方法..... | 58 |
| 6.2.3 対象区域における浸水想定..... | 59 |
| 6.3 避難者の設定と行動モデリング..... | 60 |
| 6.3.1 避難者の設定..... | 60 |
| 6.3.2 歩行者と自動車の交錯を表現する行動モデリング..... | 61 |
| 6.4 平常時の自動車交通量の再現..... | 63 |
| 6.4.1 交通量データ推測手法の現況と限界..... | 63 |
| 6.4.2 断面通過交通量データのODデータへの変換..... | 64 |
| 6.4.3 対象地域の平時交通量推測..... | 66 |
| 6.5 歩行者と自動車による統合避難シミュレーション..... | 70 |
| 6.5.1 浸水がない状態での避難行動..... | 70 |
| 6.5.2 100年確率降雨の想定時における避難行動..... | 72 |
| 6.5.3 10年確率降雨の想定時における避難行動..... | 81 |
| 6.5.4 避難場所の変更による避難行動の成否の検討..... | 85 |
| 6.6 結語..... | 87 |
| 第7章 結論..... | 89 |

第1章 序論

本論文のテーマは、水害避難行動モデルの開発と、その治水対策検討への利用方法である。

近年頻発するゲリラ豪雨による小河川の氾濫等の都市型水害は、河道の大規模治水施設のみで対処する事には困難がある。また、多くの自治体においては、さらなるハード整備を速やかに行える財政状況ではない。そこで、流域全体で防災・減災処理をしようとする総合的治水対策の重要性が指摘されている。これらは、一定規模までは洪水を河道に閉じ込めて氾濫を起こさせないようにすると同時に、施設規模を超える外力によってもたらされる氾濫に対しては、氾濫原における減災対策も考慮に入れて治水計画を策定しようとするものである。

こうした総合的な治水計画の策定する際には、堤防やダム、貯水池などの伝統的な対策、宅地嵩上げや輪中堤など堤内地でとられるハード施策に加えて、ハザードマップの配布や避難対策、土地利用規制などいわゆるソフト対策の効果をシステム設計に定量的に組み入れる方策を検討する必要がある。なかでも、ソフト対策は、水害が発生した際に、最低限、住民の人命を守るセーフティネットとしての重要な役割を果たしている。

しかしながら、ソフト対策の効果を測定するには、いまだ困難を生じる。なぜなら、ソフト対策の効果は、水害に対する人間の反応や行動に大きく影響を受け、それらは多分に不確実性を含むからである。同じ状況の洪水においてさえ、各個人の行動は、居住地域、世代、生活様式、その他の習慣によって違う。適切なソフト対策を検討する場合、こうした住民の特性を考えつつ、より実態に即した水害時の避難行動をシミュレートすることは施策の効果測定には欠かせない。

一方、水害時の避難行動に関しては、主として洪水に関する危機管理の視点から、様々な研究が行われてきた。氾濫水の中を人が歩行する様子を浸水深との関係でとらえてコンピュータ上でシミュレートするアプローチや、住民の意識や意志決定過程を含めてシミュレーションを行う水害避難マイクロモデル、GISを用いて災害情報伝達過程をシミュレーションするモデルが開発されている。以上のように、避難行動のシミュレーションモデルに関する研究は、より詳細にかつ個別的な人の行動をシミュレートできる方向に進んできたと言える。これらの避難行動モデルにおいては、それぞれの解析目的によって、重視するパラメータは違っているものの歩行者のみによる避難を前提としている。

ここで、大きな課題が2つ考えられる。1つは、経路上の混雑の取り扱いである。近年の特に都市部での浸水を考えると、比較的広い領域にわたって大人数が避難しなければならないというような状況も懸念される。こうした場合、避難域に隘路となる橋梁があったり、障害物が存在したりすることの影響を把握しておくことが重要になる。しかしながら、モデルの多くは街路を一次元的に点と線で表現するため、経路上が混雑している際に、避難者が他者を回避する行動の詳細などを表現することには向いていない。道路ネットワークを面的に捉え、経路上で避難者がとる追い越しや減速などの回避行動を表現するモデルが望まれるところである。

もう1つは、自動車の取り扱いである。平成20年の中央防災会議はその答申において、避難

行動に関して「原則徒歩」として、状況に応じては自動車の使用も許容する表現を初めて用いた。つまり、避難行動は徒歩に限るという前提が転換期を迎えつつあると言える。実際には、自動車を用いた避難も多数行われている。さきの2011年3月の東日本大震災においても、津波からの避難の為ではあるが多くの避難者が自動車による避難を試み、また実行に移した事が確認されている。自動車が避難行動に用いられる理由としては、いちはやく危険区域から離脱できる事が考えられる。また、乳幼児や高齢者、重病人など自力の避難が困難ないわゆる災害弱者の避難の為には車両は欠かせないと言える。しかしながら、自動車による避難にはリスクもある。まず、自動車そのものが水害に対して脆弱である。自動車が、氾濫流の水深や流速が一定の値を越えた場合に走行不能に陥った事例が多数報告されている。また、水没車両からの脱出も容易ではない。実際、これらの水没車両は、避難遂行の障害物となる恐れがある。また、避難行動には用いられなくとも、現実には市街には多くの自動車が存在しており、これらの自動車が被災したり、同様に交通障害を引き起こし、歩行者の避難に影響を与えたりする場合もある。よって、より現実的に避難行動をシミュレートする場合には車両の存在や使用を含める必要があると言える。

本論文は、上記の課題認識に基づいて、経路上の混雑や、避難時における自動車の使用やその存在を取り扱うことのできるより現実的な水害時の避難行動モデルの開発を試みるものである。また、そのモデルをいくつかの仮想的な水害シナリオにしたがってシミュレートし、その結果を治水計画策定に活用する方法や、地域住民の水害被害に対するイメージーションの刺激に用いる方法について論じる。

以下に本論文の構成を示す。

第2章では、本論文で開発したモデルのベースとなった水害避難マイクロモデルの概要について説明する。

第3章では、経路上の混雑を表現するために開発した、追い越し・減速・追従歩行など避難者が経路上でとる回避行動を表現するモデルについて論じる。観測実験より得られた、経路上の人の密度と歩行速度との相関によって混雑の影響を表現するモデルと比較検討し、詳細な回避行動を表現する手法が経路上の混雑を表現することに適していることを確認する。加えて、氾濫流の水深だけでなく流速が避難行動に及ぼす影響を表現する機能をモデルに追加する。さらに、上記の回避行動を表現するモデルを用いて実流域におけるシミュレーションに適用して結果を考察する。

第4章では、水害避難時における自動車挙動のモデリングについて考察する。自動車特有の挙動を、できるだけ簡易に表現するために3つの挙動モードを中心にモデル化することを提案するとともに、避難経路上の自動車が徒歩の避難者に及ぼす影響について検討する。加えて、氾濫流の水深や流速が走行中の車両に与える影響について検討し、車両自体の水害に対する脆弱性について論じる。上記の車両挙動のモデルを実流域におけるシミュレーションに適用して、自動車を用いた避難行動のアドバンテージとリスクについて考察する。

第5章では、道路ネットワークを用いたシミュレーションにおいて不可欠である信号制御のモデル方法について論じる。シミュレーションの対象領域の信号設置状況や制御状況の調査には困難を伴うが、それらを数値地図等の簡易な道路ネットワークデータから再現する方法を開

発する。これらの再現手法の妥当性を検討する為に、実地域におけるシミュレーションに適用して考察する。

第6章では、第2～4章で示した水害避難行動モデルを統合した総合的水害避難行動モデルを用いて、実地域を対象とした幾つかの災害シナリオに基づいたシミュレーションを実施し考察する。また、実地域でのシミュレーションに際して、対象地域における平時の交通量を考慮に入れる方法と、その為の平時の交通量データの推測手法についても論じる。

第7章では、本研究のまとめと結論を述べる。

第2章 水害避難マイクロモデル

2.1 概説

都市化の進展や流域の開発が著しい河川における治水対策においては、大規模治水施設のみによって処理することが難しいケースもあり、流域全体で防災・減災処理をしようとする総合的治水対策の重要性が指摘されている。

こうした総合的な治水計画の策定手法について、堀ら(2008)¹は堤防やダム、貯水池などの伝統的な対策に加えて、宅地嵩上げや輪中堤など堤内地でとられるハード施策、ハザードマップの配布や避難対策、土地利用規制などいわゆるソフト対策の効果をシステム設計に定量的に組み入れる方策を検討している。しかしながら、ソフト対策の効果を測定するには、いまだ困難を生じる。なぜなら、ソフト対策の効果は、水害に対する人間の反応や行動に大きく影響を受け、それらは多分に不確実性を含むからである。同じ状況の洪水においてさえ、各個人の行動は、居住地域、世代、生活様式、その他の習慣によって違う。

そこで、水害時の避難行動をコンピュータ上で模擬するために様々な研究が行われて来た。西原(1983)²、高橋ら(1970)³による氾濫原を人が歩行する様子を浸水深と歩行速度の関係を用いてシミュレートするアプローチに始まり、その後、高棹ら(1993,1995)^{4,5}により住民が避難決意に至る心理過程も含めてシミュレートする水害避難マイクロモデルが提案された。一方、片田ら(2000)⁶は GIS を用いて災害情報伝達過程をシミュレートするモデルを開発した。また、鈴木・今村(2005)⁷は津波からの避難を対象とし、詳細な現地調査に基づいて経路選択モデルを作成し、避難者による交通渋滞を含めたシミュレーションモデルを開発している。また、後藤ら(2004)⁸は避難者を粒子に見立てて地盤解析や構造解析の分野で多く用いられてきた DEM (個別要素法) を適用して詳細にシミュレートするモデルを開発した。また、関根ら(2011)⁹は浸水時の地下空間における避難行動を詳細に数値解析するモデルを開発した。これらのシミュレーションモデルは、それぞれの解析目的によって、歩行に対する浸水の影響を重視するもの、避難情報に対する人間の反応の再現を考えるもの、情報の伝達を取り扱うもの、限られた空間における混雑状況を重視するものと様々である。

本章では、本研究で開発したモデルのベースとした堀ら(2004)¹⁰の水害避難マイクロモデルの概要について論ずる。

2.2 水害避難マイクロモデルの概要

本研究で開発したモデルのベースとなる水害避難マイクロモデルは、氾濫原における情報伝達過程と、それを受けて避難者が避難を決意するまでの過程を詳細に表わしている。また、避難者が避難を開始してから、相互に影響を及ぼしながら避難を遂行する過程は、マルチエージェントシステムとして表現されている。マルチエージェントシステムとは、避難する個々の人間をエージェントとして避難開始後の行動をシミュレートするシステムであり、火災時のビルからの避難誘導や船舶からの避難誘導のシミュレーションで広く実績を残しており、津波災害時における避難行動を渡辺ら(2006)¹¹らがマルチエージェントシステムを用いて示している。このモデルは、避難者（エージェント）が避難開始後に取得した情報（主に外的要因）を元に判断し自立的に行動を決定して相互に影響を与えていく様子をシミュレートするものである。

2.2.1 住民が避難を決意する心理過程

水害避難マイクロモデル(高棹ら；1993,1995)は、避難者を世帯単位のエージェントとし、それぞれに水害経験や意識・生活形態など水害時の避難行動に対して初期条件として働く要因を水害危険観として定義し、氾濫原に関する情報が得られてから、住民が避難を決意するまでの過程を、外的要因が初期条件に作用する心理過程として考えている。住民は、降雨や浸水の状況に応じて自らの危険に対する認識（危険認識度）を変化させ、その認識が閾値を越えればその時点で避難を決意するとしている。当モデルにおいては、以下の過程で避難意思決定のシミュレーションを行っている。

- 1) 初期条件となる個人の属性（水害危険観、避難場所、避難経路に関する知識）をセットする
- 2) 降雨量と自宅浸水深から、水害発生の主観確率を求め、危険認識度を計算する。
- 3) 危険認識度と時間帯から情報入手率を求め、それに従って避難情報を受け取ったかどうかを決める。
- 4) 危険認識度の値と避難情報の入手状況から避難を開始するかどうかを決める。

なお、シミュレーションにあたっては、基本となる構造は同じで、水害危険観の値等の属性の異なる個人のモデルを、コンピュータメモリ内に多数発生させる必要がある。そこで、オブジェクト指向プログラミングを用いてモデルコードを記述することで、保守性と効率性を高めている。

これらの過程を経ることで、各避難者が水害発生という状況下において、どのように避難を開始していくかをシミュレートでき、避難者の初期条件に働きかける対策（ハザードマップ・啓蒙活動など）や避難中の外的要因となる対策（予警報・災害情報など）などのソフト対策の効果測定が可能となった。

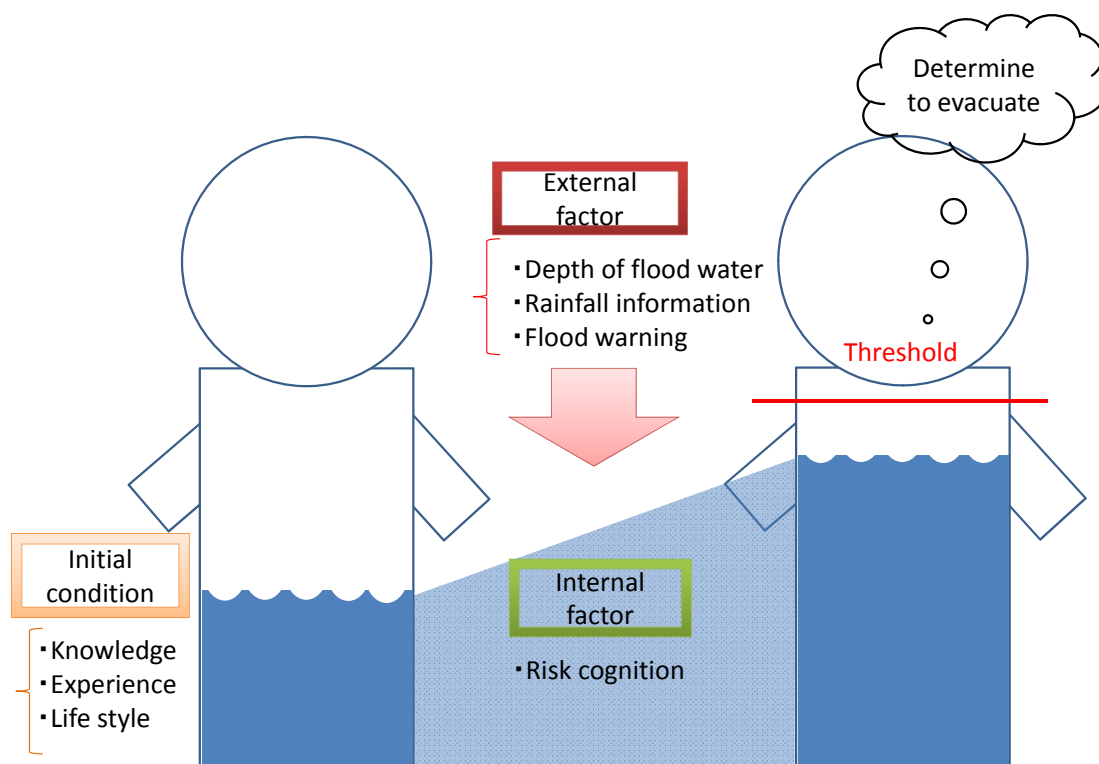


図 2-1 水害避難行動を規定する要因

2.2.2 災害情報の伝達過程

情報の伝達を円滑に行うことは、効果的な避難システムを構築するために欠かせない。水害時における防災組織から住民への情報伝達過程には、テレビ・ラジオなどマスメディアが利用される場合と、自治会や自主防災組織などの住民組織が情報伝達に参画する場合とがある。水害避難マイクロモデルにおいては、水害時の情報伝達過程を、行政から自治会連合会、自治会、住民へと情報が伝達されていく様子を防災無線や電話・ファックス、ハンドマイクや戸別訪問といった、地域の自主防災手順にのっとった形でシミュレートし、同時に、テレビ・ラジオ・有線放送などマス伝達媒体アナウンスもモデル上で表現し、各種伝達手段やタイミングがどのような影響を避難行動に与えるかの検討を可能にしている(Hori, 2008)¹²。

2.2.3 デジタル道路ネットワークモデル

洪水からの避難プロセスをシミュレートする際、道路ネットワークに氾濫水の挙動や避難者の動きを同時に重ね合わせて表現する必要がある。そのため、精緻な道路ネットワークのモデルは避難シミュレーションには不可欠である。

かつては広範なシミュレーションフィールドについて詳細な道路ネットワーク構築することが難しく、水害避難マイクロモデルにおいても、適用範囲はごく小さな住宅地として、扱う避難

者も 100 世帯程度であった。しかし、近年の日本では街路網のデータベース化が進み、国土地理院が提供するデジタル街路網データ(数値地図 2500)を用いることができる。

その中で道路は道路の中央を折れ線近似した線(Arc)で、道路の交差点は点(Node)で表現されている。堀ら(2004)は、これらのデータを元にしてシミュレーション用の道路ネットワークを構築し、水害避難マイクロモデルに適用して、より広範囲を対象に避難シミュレーションを行うことを可能にした。

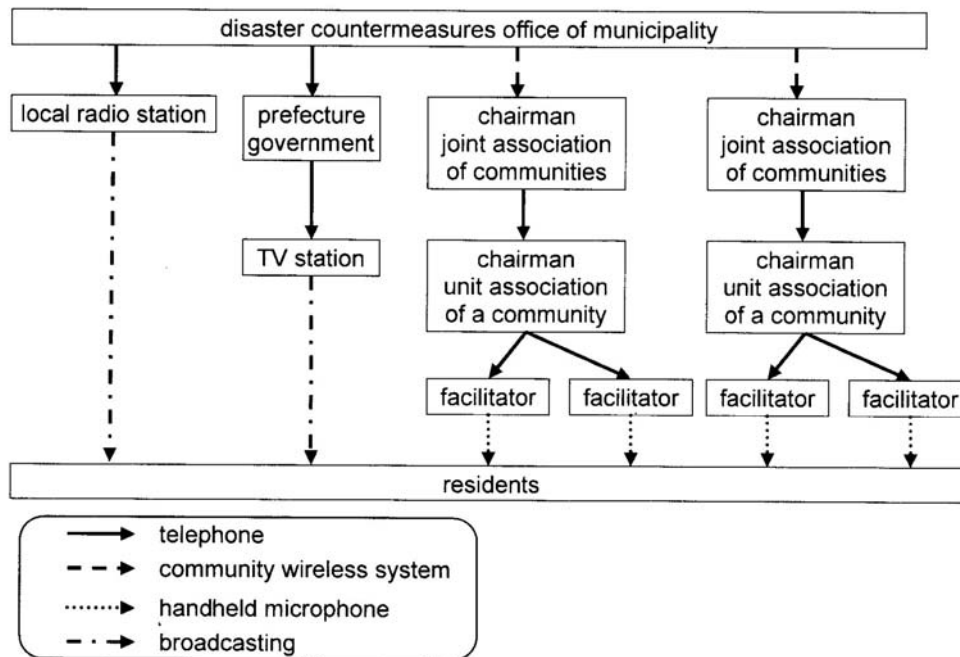


図 2-2 情報伝達の過程 (Hori,2008)

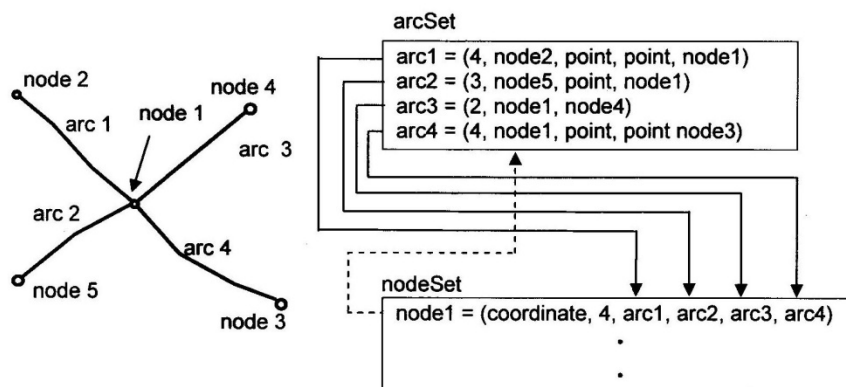


図 2-3 デジタル街路網 データ構造と模式図 (Hori,2008)

2.2.2 避難者の配置と経路選択アルゴリズム

洪水からの避難プロセスをシミュレートする際、道路ネットワークに氾濫水の挙動や避難者の動きを同時に重ね合わせて表現する必要がある。そのため、精緻な道路ネットワークのモデルは避難シミュレーションには不可欠である。日本では、国土地理院が提供するデジタル化された実際の街路網のデータベース(数値地図 2500)を用いることができる。その中で道路は道路の中央を折れ線近似した線(Arc)で、道路の交差点は点(Node)で表現されている。堀ら¹⁰は、これらのデータを元にしてシミュレーション用の道路ネットワークを構築し、水害避難マイクロモデルに適用した。

当モデルにおいて、道路上の避難者の位置づけは、自身が乗っている Arc(道路)の ID と、Arc の始点からの距離の組み合わせで表現されている。避難者が移動して Node(交差点)まで達した場合、その Node に接続している Arc の中から次に進むべき Arc を探して進む。避難者は目的地までの最短経路を進むが、各 Node からの最短経路は予め Warshall-Floyed¹³法によって計算されており、避難者はその計算結果を参照して次に進むべき Arc を決める。

Warshall-Floyed 法の概要(佐藤ら, 2004)¹⁴は以下の通りである。

点*i*から*j*に向かう枝がある場合はその距離 d_{ij} を、ない場合は ∞ とした直接距離行列を作成する。次に、*i*から*j*に別の1点を経由した場合(枝2本)の最短路・最短距離を求め、距離行列を更新する。その際、次に経由する点を、以下の式 2.1 で与える p_{ij} とする。

$$p_{ij} = j \quad (i \in N, j \in K) \quad (2.1)$$

全ての $i, j, k \in N(k \neq i, j)$ に対し、 $d_{ij} > d_{kj}$ であれば、式 2.2 のように p_{ij} を更新する。

$$d_{ij} = d_{ik} + d_{kj}, \quad p_{ij} = p_{ik} \quad (2.2)$$

更新された距離行列を用いてこの操作を再度行えば、枝4本まで使った最短路・最短距離が求まる。以上の操作を繰り返していけば、最終的に全ての2点間の最短経路を求めることができる。

避難シミュレーションにおける最短経路探索アルゴリズムの用法には2通りが考えられる。それは、避難中の最短経路の更新を許すか許さないかの2通りである。

前者の場合、避難中に最短経路上に浸水を認めた場合、再探索して新たな経路を探したり、防災無線等により氾濫原の情報を入手してそれによって進路を更新したりする様子の再現が可能となるが、計算量は多くなる。

本研究では、歩行者や自動車の行動特性の差異や、浸水深さ等の影響による避難成功の可否を評価したいので、全ての経路における最短経路を予め計算しておく方法を採用する。

第2章 参考文献

- 1堀智晴,古川整治,藤田暁,稲津謙治,池淵周一:氾濫原における安全度評価と減災対策を組み込んだ総合的治水対策システムの最適設計,土木学会論文集 B Vol64 No1, pp.1-12,2008
- 2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,京都大学博士学位論文,1983
- 3高橋保,中川一,東山基:洪水氾濫水の動態と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.757-780,1970
- 4高棹琢馬,椎葉充晴,堀智晴:住民意識の変化過程を考慮した水害避難モデルの設計,水工学論文集,第37巻,pp.239-244,1993
- 5高棹琢馬,椎葉充晴,堀智晴:水害避難行動のマイクロモデルシミュレーションと制御に関する研究,土木学会論文集,Vol.509,II-30,pp.15-25,1995
- 6片田敏孝,浅田純作,桑沢敬行:GISを用いた災害情報伝達のシミュレーション分析,土木情報システム論文集,Vol.9,pp.49-58,2000
- 7鈴木介,今村文彦:住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル,自然災害科学,Vol.23,No.4,pp.521-538,2005
- 8後藤仁志,原田英治,久保有希,酒井哲郎:個別要素法型群衆行動モデルによる津波時の避難シミュレーション,海岸工学論文集,第51巻,pp.1261-1265,2004
- 9関根正人,大野龍馬:複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水時避難行動解析と避難誘導,水工学論文集,第55巻,pp.961-966,2011.
- 10 Hori, T. and Shiiba, M: "Micro Model Simulation Tools for Performance-based Design of a Flood Risk Management System", J. Natural Disaster Science, Japan Society for Natural Disaster Science, 26(2),pp.73-80,2004.
- 11 渡辺公次郎,近藤光男,野澤征司:マルチエージェントシステムを用いた津波避難シミュレーションモデルの開発,日本建築学会研究報告集,2006
- 12 T. Hori: Flood Evacuation Simulation System Based on Digital Modeling of Street Network Considering Distribution Process of Information, Water Down Under 2008, pp.2232-2240, 2008
- 13 Cormen, Thomas H., Leiserson, Charles E., Rivest, Ronald L.: Introduction to Algorithms (first edition ed.). MIT Press and McGraw-Hill., 1990
- 14 佐藤史隆,廣安知之,三木光範:最短経路問題におけるアルゴリズム【ウォーシャル・フロイド法】の調査 ISDL Report No. 20040716001,2004

第3章 経路上の混雑を考慮した水害 避難行動モデル

3.1 概説

近年の特に都市部での浸水を考えると、比較的広い領域にわたって大人数が避難しなければならないような状況も懸念される。こうした場合、避難域に隘路となる橋梁があったり、障害物が存在したりすることの影響を把握しておくことが重要になる。

数値地図 2500 のデータに基づき、Node と Arc で表現された道路ネットワークモデルは、データが手に入る限りは日本中のあらゆる場所について構築できるので、避難シミュレーションにおいては非常に有用であった。しかしながら、避難経路上の混雑や障害物を考慮するシミュレーションにあたっては、上述のモデルでは不十分な点がある。以上のモデルでは道路は一次的に線で表現されるため、避難者が経路上で、どのように他者や障害物を回避するかを表現するのに必要な道路幅が設定できなかった。

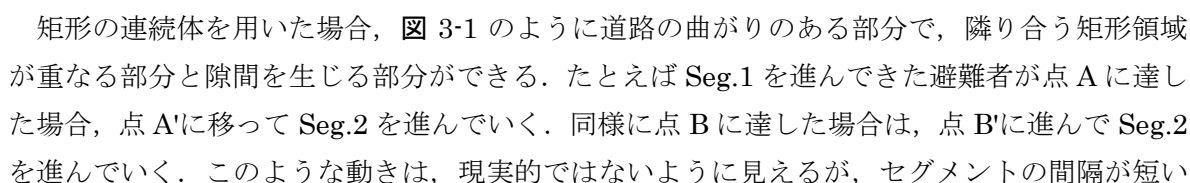
そこで、本研究では、前章の水害避難マイクロモデルを基本として、広域を対象とし混雑の影響を考慮したシミュレーションを可能とする機能拡張について論ずる。

3.2 デジタル街路ネットワークモデルの二次元化手法

道路幅を設定して二次元的に道路を表現したモデルでは、経路上の混雑や障害物の避難行動への影響を評価することができる。しかしながら、一次的に表現されたネットワークを元に、二次元的なネットワークモデルを構築するのは容易ではない。

まず、道路幅は車線数、歩道の有無など対象エリア内の道路構造に関するデータを手に入れるのが容易ではない。道路区分から道路構造令の規格を参照して推測する事は可能であるが(この手法については第4章で詳しく述べる。また、道路構造データが入手できたとして、それらを二次元ネットワークモデルで正確に構築する場合は非構造格子を用いるべきであるが、その場合、道路内で統一した座標系を用いる事が難しくなる為、避難者の位置の表現が煩雑になり、多大な計算負荷を発生させる。

そこで、本研究では、道路を矩形の連続体で表現した。数値地図 2500 で得られる Arc データに道路幅を設定するだけで容易に二次元の道路ネットワークデータが得られる。また、道路内で統一した座標系が設定できるため、避難者の位置の表現も容易である。

矩形の連続体を用いた場合、のように道路の曲がりのある部分で、隣り合う矩形領域が重なる部分と隙間を生じる部分ができる。たとえば Seg.1 を進んできた避難者が点 A に達した場合、点 A' に移って Seg.2 を進んでいく。同様に点 B に達した場合は、点 B' に進んで Seg.2 を進んでいく。このような動きは、現実的ではないように見えるが、セグメントの間隔が短い

場合には誤差はほとんど無視できる。

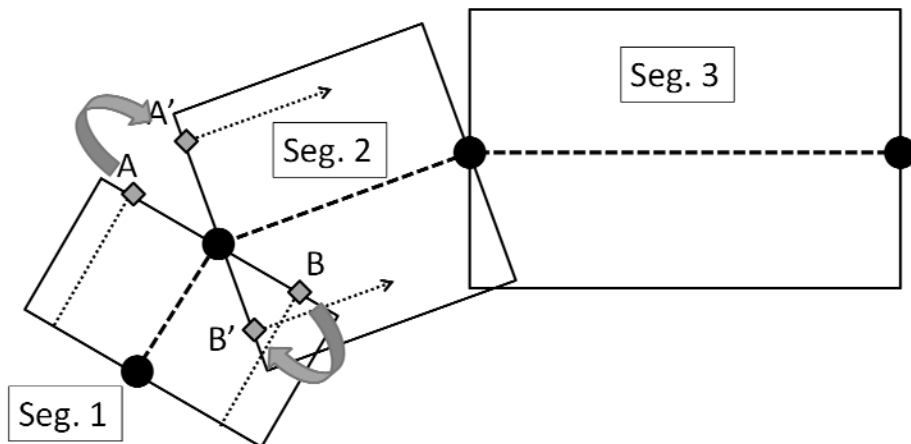


図 3-1 2次元的に表現したデジタル街路モデル

3.3 歩行速度の設定

避難者の歩行速度は、実際はみな一律ではない。年齢や性別、怪我や疾病の有無などによって異なる。岡本ら(2007)¹⁾は避難行動中の速度を成人男性・成人女性・子供及び高齢者の3グループに分けて定義し、避難シミュレートすることを提案している。そこで本研究では、歩行者の基本速度は1.1m/sとし、避難者に一律に基本速度を与える設定と、基本速度を平均としてさまざまな速度を分布させる設定のいずれかを検討する。

現実の避難者の速度分布は、平均速度付近の値を持つ者が多く、偏差が大きくなるにつれて人数は少なくなると考えられる。よって、速度分布を設定する場合には、最も速い人と遅い人に2倍程度の差があると仮定して、平均1.1m/s、下限0.55m/s、上限1.65m/sの分散 $\sigma^2 = 0.05$ の三角形分布に従うとする。

3.4 経路上の群衆密度と歩行速度の関係式によるモデル

一つは群衆密度と歩行速度の関係式を用いる方法である。この関係式は、中央防災会議による観測実験²⁾の結果に基づいた式である(図3-2参照)。

$$v = \begin{cases} 4000 & (0 \leq d \leq 1.5) \\ -800d + 5200 & (1.5 \leq d < 6.0) \\ 400 \times 6/d & (6.0 \leq d) \end{cases} \quad (3.1)$$

v:歩行速度(m/h) d:群衆密度(person/m²)

密度は、同一 Arc 内にある避難者数と道路の面積から計算できる。この方法は密度さえ計算すれば避難者の速度は一意に決まるため、道路平面上での人の二次元的位置を考える必要が無く、非常に計算負荷が軽く簡便な方法と言える。

群衆密度が 6.0(人/m²)を超えると、歩行はほぼ困難となると言える。なお、この密度は満員電車内で立っている人の密度とほぼ同じである。

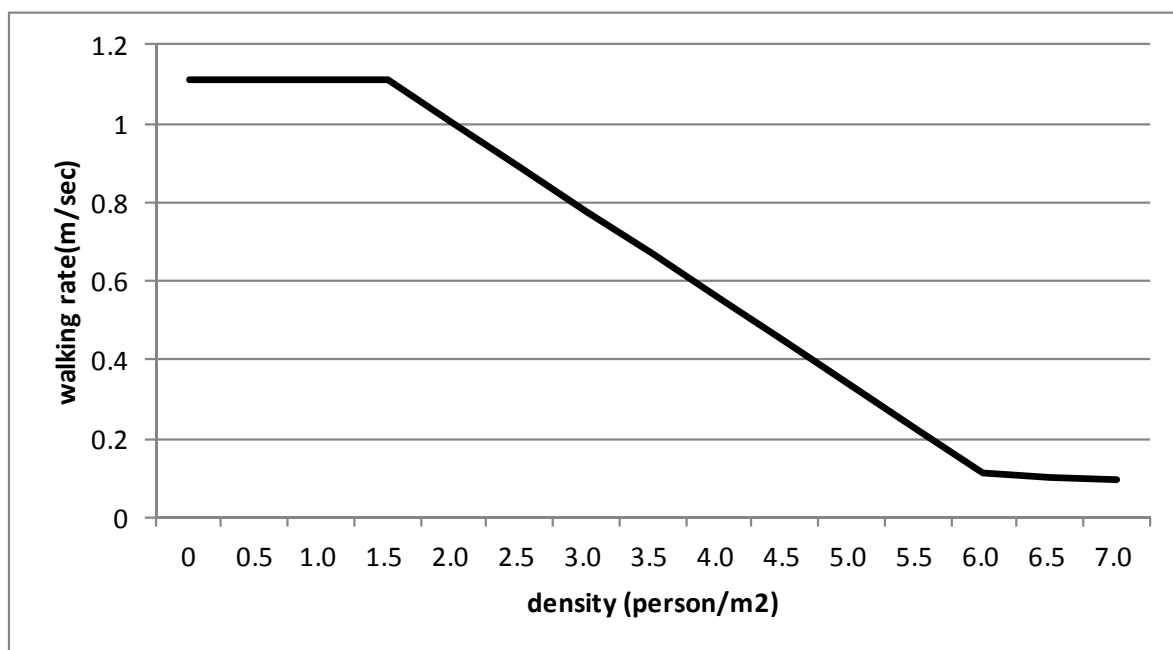


図 3-2 観測実験による歩行速度と密度の関係式

3.5 歩行者の回避行動を再現するモデル

もう一つの方法は避難者の回避行動を具体的に表す方法である(図 3-3 参照)。以下、この方法を回避行動モデルとする。各避難者は、自分の進行方向にほかの避難者、あるいは障害物を見つけた際、それらを避けるように進路を変える。各避難者は円に模して表現することにする。一般に人にはこれ以上の接近を不快と感じるパーソナルスペースあると言われており、人体円と呼ばれることがある。各避難者はこの人体円が他者の人体円や障害物に衝突することを自律的に避けながら進んでいく。各避難者には、進行方向に向かって矩形の衝突判定領域を設定する。この領域内に他者や障害物を認めた場合、その避難者は回避行動をとる。方向は回避される対象の側方に $h(m)$ 間隔を空けた位置を通過できるような向きに設定される。側方間隔は建部ら(1990・1994)³⁴の実験で得られたデータより 0.9m とした。加えて各避難者は道路側面の壁との衝突も回避する。壁との間が狭く、側方間隔 h をとれない場合は、壁と反対側の向きに h をとる(図 3-4 参照)。領域の大きさは、進行方向の向きには 1 計算ステップの間に避難者が進む距離、進行方向の法線方向には人体円の 1.2 倍の長さとする。回避行動モデルのアルゴリズム

ムは図 3-5 に示す通りである.

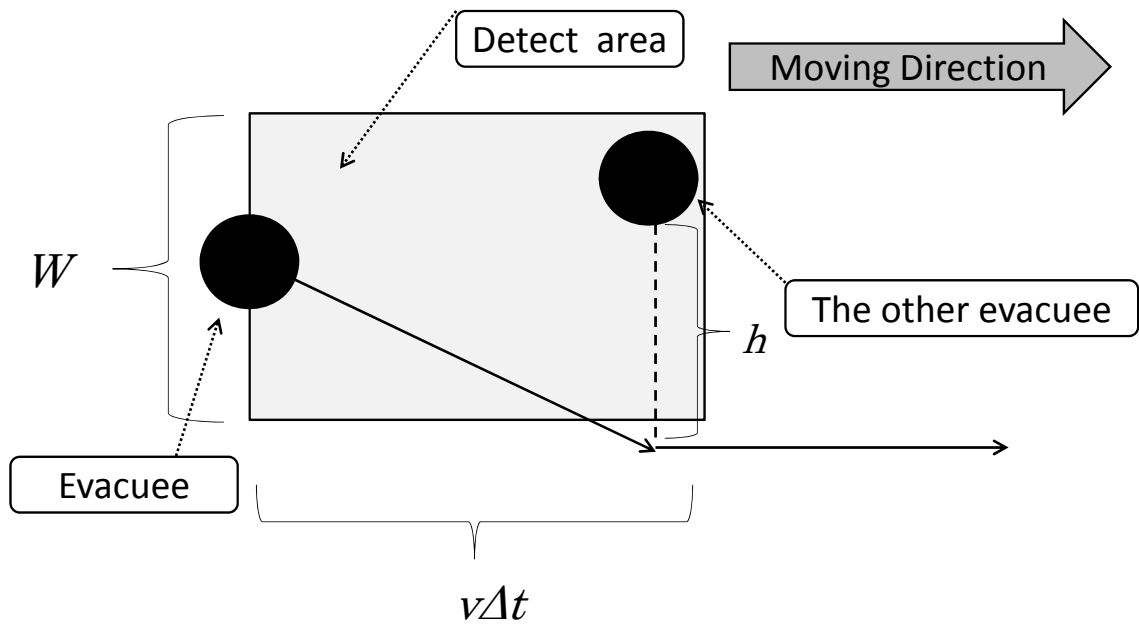


図 3-3 避難者における回避行動モデリング

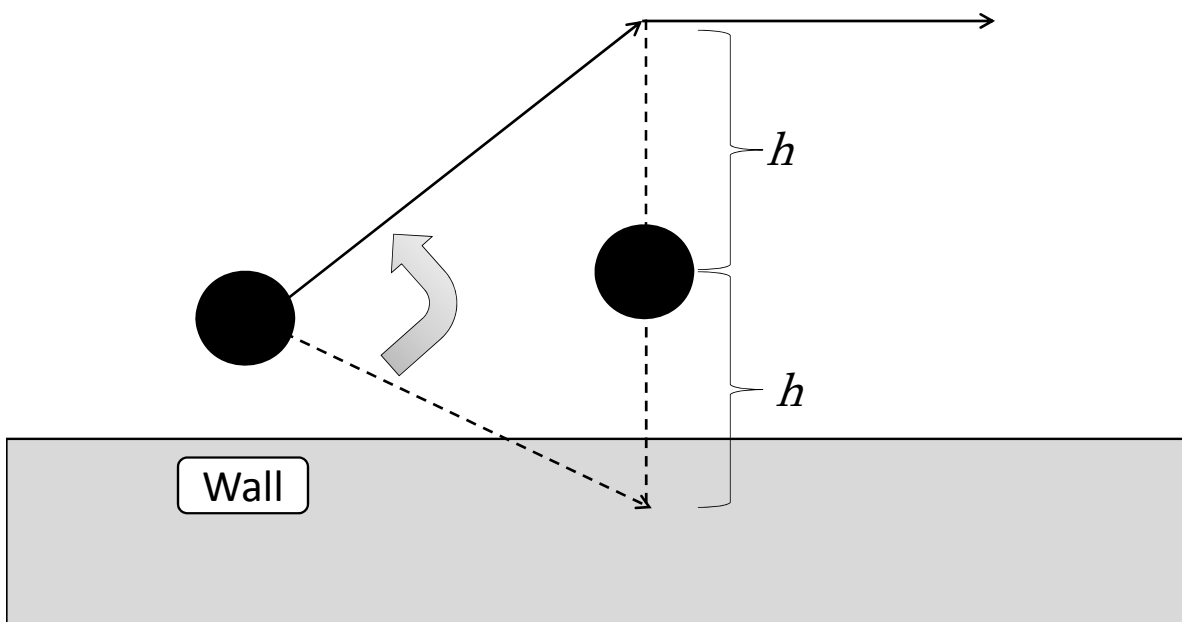


図 3-4 避難者における回避行動モデリング (壁面衝突回避)

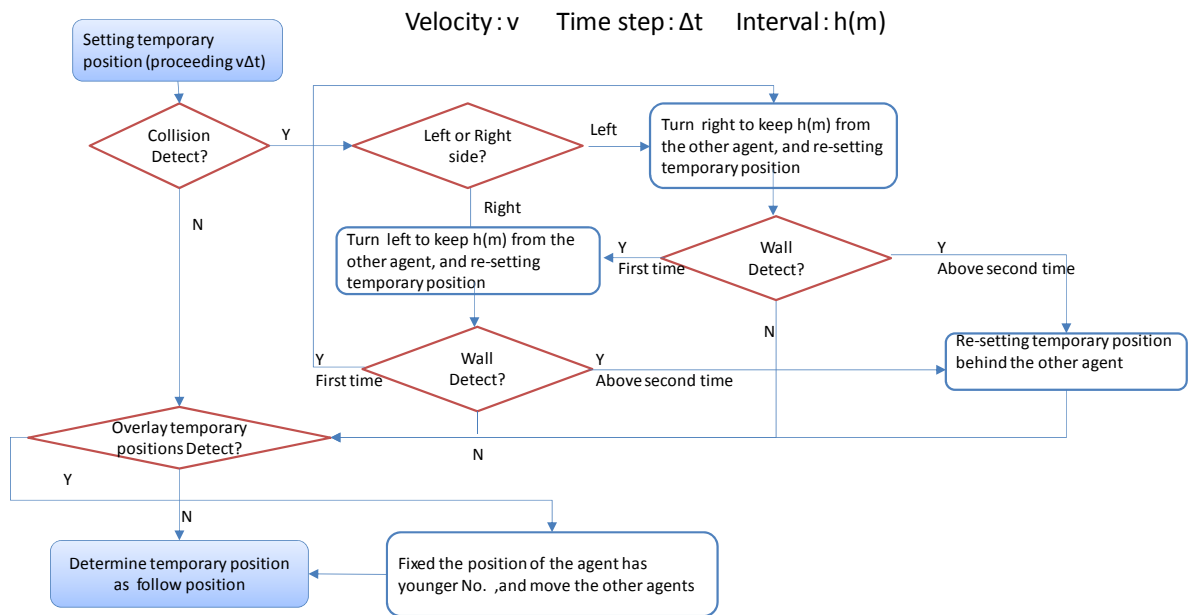


図 3-5 回避行動アルゴリズム

3.6 氾濫流の浸水深や流速が避難行動へ及ぼす影響

水害時においては、浸水深や流速の影響もあって平時と同様に歩行することは難しい。浸水下における歩行速度については、これまでにさまざまな研究がなされてきた。

西原(1983)⁵⁾によると、水深が歩行者の歩行速度に与える影響は、浸水深の影響による歩行速度の割引率を用いて、下記のように定義できる。

$$v^t = v_0 \left(1 - \frac{d^t}{0.7}\right) \quad (3.2)$$

v_0 : 基本の歩行速度(m/s)

v^t : 時刻 $t \sim t + \Delta t$ における歩行速度(m/s)

d^t : 時刻 $t \sim t + \Delta t$ における浸水深(m)

西原(1983)の研究によると、歩行者が歩行不可能となる浸水深は 0.7m とされている。また、岡本ら(2007)は浸水深さに加えて流速の影響を考慮した歩行速度減衰モデルを提案した。

3.7 回避行動モデルの妥当性の検証

図 3-6 は、無限長で幅 5m の仮想道路に、一定の密度で避難者をランダム配置し、群衆密度と平均歩行速度の関係をシミュレーションした結果を示したものである。実線は、本研究で開発した回避行動モデルを用いた結果で、点線は 3.4 で示した観測実験に基づいて定式化された群衆密度と歩行速度の関係式によるものである。

この結果から考えて、回避行動モデルの結果は観測実験に基づいた結果とおおむね一致すると言える。回避行動モデルにおいて、群衆密度が低い範囲でも速度に影響を及ぼしているのは、仮に密度が低かったとしてもどこかで、回避行動が起これば、その結果進行方向の速度が低下するからであろうと考えられる。以上より、回避行動モデルによっても現実的な歩行条件を再現できることが分かった。

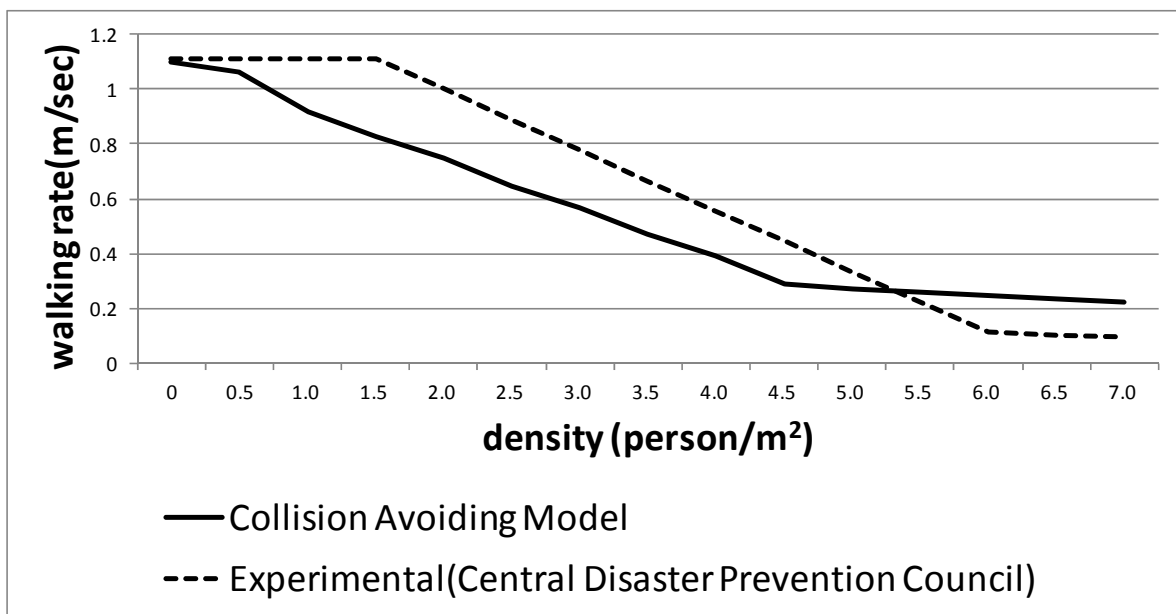


図 3-6 群衆密度と歩行速度の関係式(中央防災会議:2008)と回避行動モデルの比較

3.8 適用と考察

3.8.1 対象地域

滋賀県東浅井郡虎姫町の一部（2010年1月1日に長浜市と合併）を適用地域とした。虎姫町は人口 5,582 人（2005 年）、面積 9.45km² の町である。南端には一級河川の姉川、東端にはその支流の高時川があり、これら河川の堤防に囲まれている。両河川は、洪水時には相当な被害

を生じる恐れがある河川として滋賀県によって「洪水予報河川」に指定されている。堤防が決壊すれば、平坦な町内に水が大量に流れ込んで滞留することが予想されている。滋賀県が2012年に作成した「地先の安全度マップ」によると、生起確率が100年に一度の洪水で、ほぼ町内全域で3.0m以上の浸水、両河川の合流地点付近の住宅地では4.0m以上の浸水が予想される。

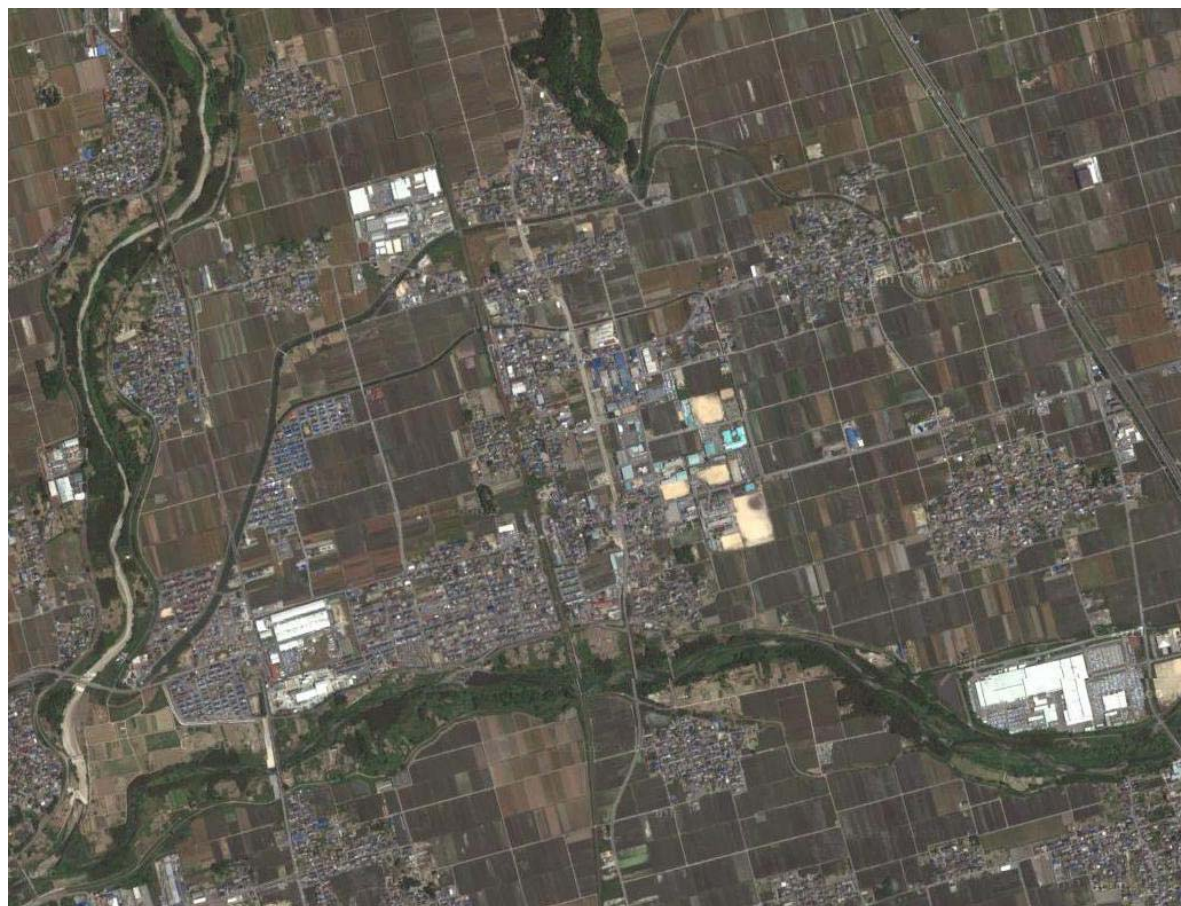


図 3-7 滋賀県長浜市（旧虎姫町）航空写真（Google ZENRIN）

3.8.2 シミュレーションの初期条件

適用地域内の空間スケールは南北方向に3000m、東西方向に4000mとする。図3-8は適用地域をデジタル道路ネットワーク化したものである。このデジタル道路ネットワークを避難フィールドとして、シミュレーションを行う。なお、ここでは個々の道路アークの幅に関するデータは得られなかったため、道路幅を一律5mとしている。避難所は適用地域のほぼ中央に位置する災害時避難場所の虎姫高校とする。また、避難者5500人を避難フィールドにランダムに配置し、目的地の周囲500m四方に配された約600人を除外して4900人とする。これは、混雑の避難行動への影響を適切に把握できるよう、すぐに目的地にたどり着いてしまう避難者が発生させないためである。

避難者は初期歩行速度1.1m/sで一斉に避難を開始し、最短経路をとりながら目的地に向かっ

て移動する。目的地にたどり着いた避難者は避難完了としてフィールドから除外する。

計算ステップは1秒とし、ステップごとに避難中の避難者数を比較した。なお、混雑の影響のみを比較するため氾濫解析データは用いてない。

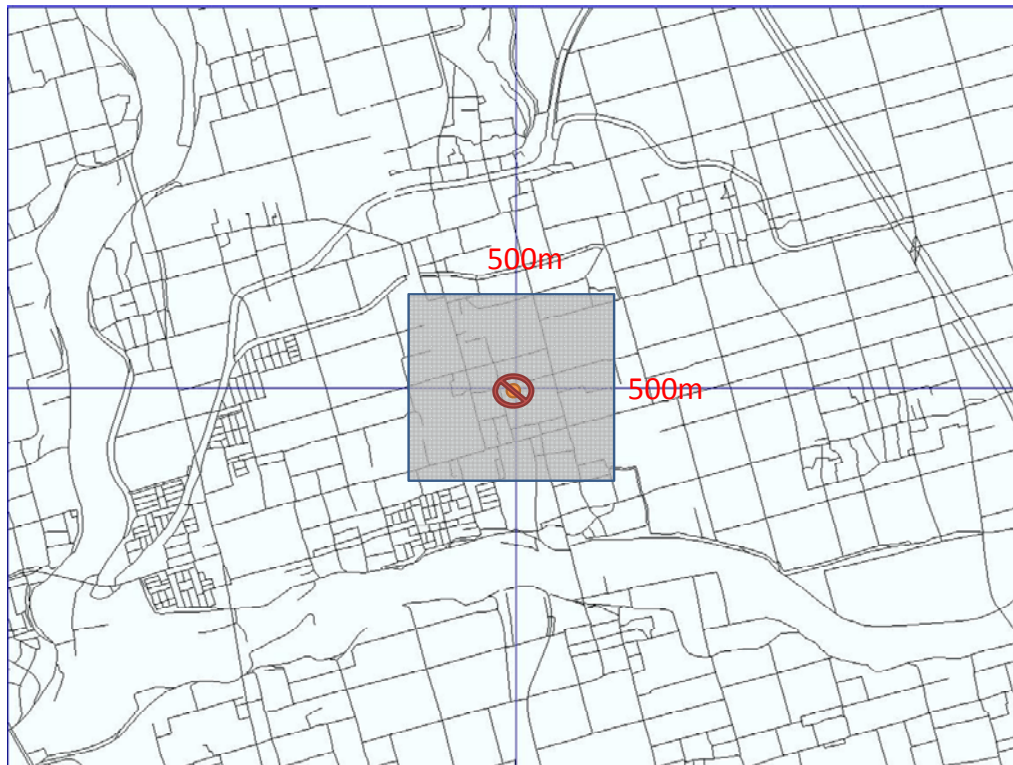


図 3-8 対象領域のデジタル街路モデル

3.8.3 混雑の影響評価

図 3-9 は、避難行動開始直後から 60 分後までの、避難完了者数を示したグラフである。点線が、混雑の影響を全く考慮しなかったケース、破線が群衆密度と歩行速度の関係式によって避難の影響を考慮したケース、実線が回避行動モデルを用いて影響を考慮したケースである。いずれものケースも、時間経過したがつて避難完了者数が増えていく。

混雑を考慮しないケースでは避難開始後 42 分までに全ての避難者が避難を完了しているのに対し、密度-速度モデルでは 1571 人、回避行動モデルでは 1189 人がその時点でまだ避難中である。

また、密度-速度モデルでは 30 分を経過したあたりから、ほとんど避難完了する避難者が出なくなっている。この原因の一つに、目的地に近づいてくるにしたがつて特定の街区に避難者が集中することになり、混雑度が $6.0(\text{人}/\text{m}^2)$ を超えると、秒速 $0.1\text{m}/\text{s}$ 未満と極端に歩行速度が低くなることが考えられる。また、目的地付近にあるごく短いアークも原因と考えられる。ある時間ステップにごく短いアークに一度に住民が流入してしまった場合、極端に密度を上げてしまい、移動速度が相当に低下することとなる。

他方、回避行動モデルにおいては、ほぼ34分頃までは、ほぼ一定の割合で避難完了しており、34分ごろに目的地付近のアーケで渋滞を起こし始めることがわかる。しかし、密度-速度モデルと違って渋滞を起こしてからでも僅かではあるが避難完了する世帯が出ている。これは前者のように一律で全避難者が速度低下を引き起こすわけではないことに起因すると考えられる。現実には相当混雑した状況であっても僅かずつでも前進できるという点においては、回避行動モデルの方が実際の避難行動により近い結果を得られていると考えられる。

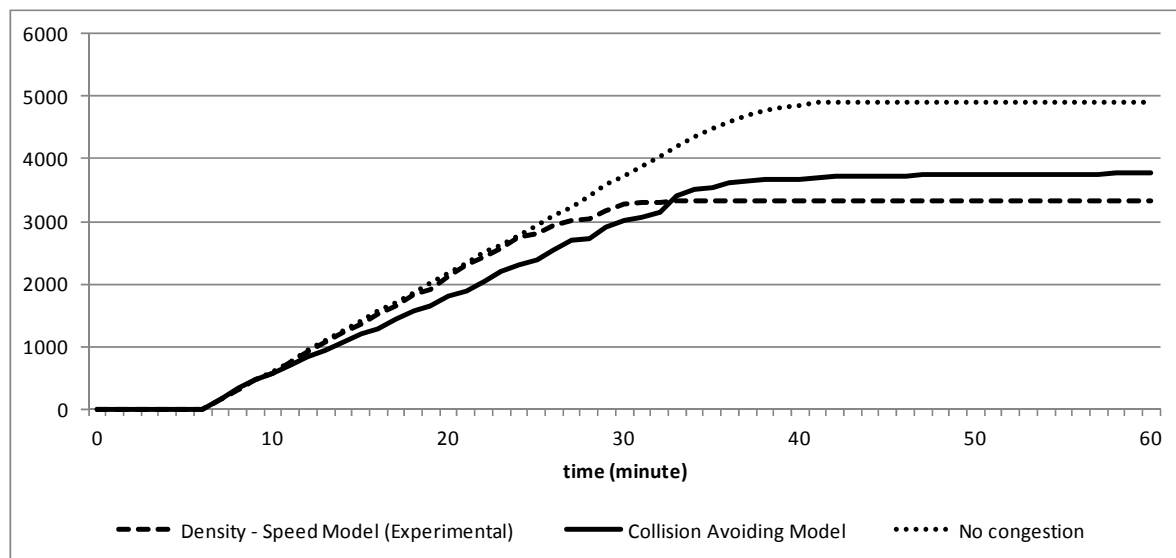


図 3-9 各モデルを用いたシミュレーションの避難完了者数の比較

3.8.4 歩行者の速度分布の影響評価

速度のバラつきが避難行動にどのように影響を及ぼすかを計るため、最も速い人と遅い人に2倍程度の差があると仮定してシミュレーションを行う。各避難者の速度は平均速度を1.1m/sのまま速度の下限を0.55m/s、上限を1.65m/sの分散 $\sigma^2 = 0.05$ の三角形分布に従うとする。速度一定の場合と分散がある場合の結果を比較して図3-10に示す。

図3-10より、平均速度が一定でも速度にバラつきがあると全体としては避難が遅くなることがわかる。これは、経路上に速度の遅い避難者がいるとそれだけ回避行動の数が増加し、全体として速度低下することによるものであると考えられる。ただし、60分以内に避難完了した人数は前者が1135なのに対し後者は1145であり、目的地付近で混雑を起こし始めてからはほとんど避難行動の様相にほとんど差は無い。これは、いずれのケースにおいても、目的地付近で避難者が団子状で移動している際は、初期速度に関わらずどの人もほぼ同一の非常に遅い速度で移動しているためである。

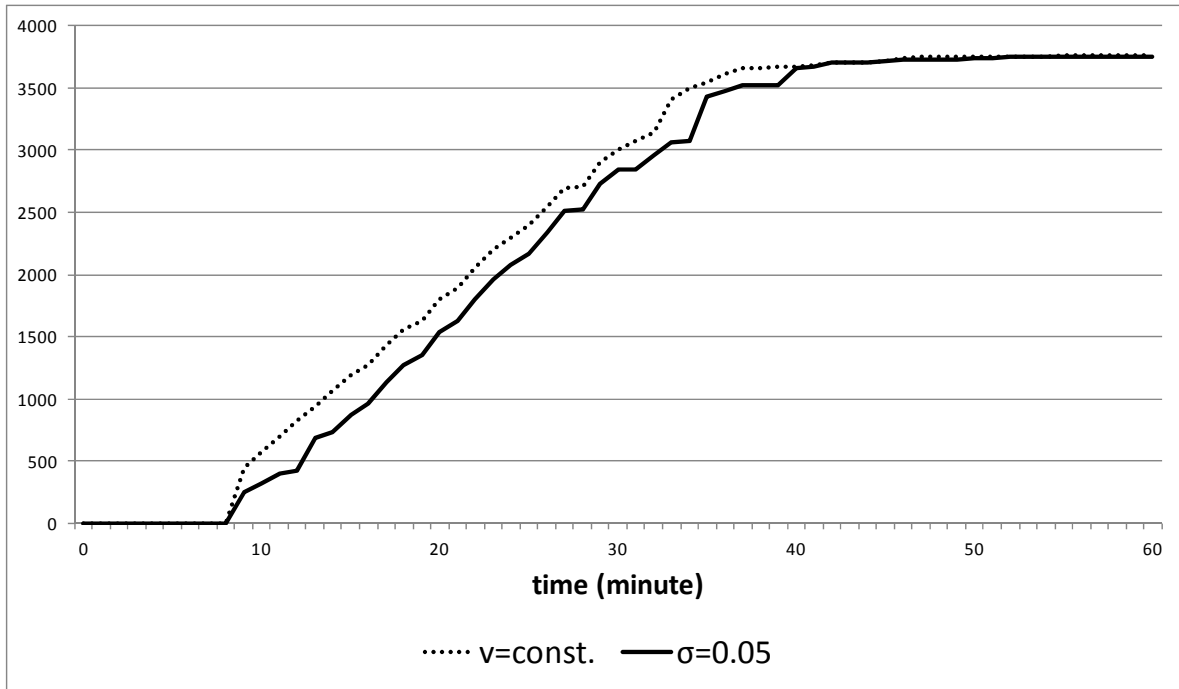


図 3-10 速度分散の影響比較

3.8.5 避難場所の配置の影響評価

避難経路中に、多くの避難者が通過しなければ目的地にたどり着けない道路が有る場合、混雑は深刻な問題になりがちである。橋はその典型的な例である。例えば図 3-11 に示したように、姉川の南の大井町付近に避難所があった場合、都市部に住む多くの人は3つの橋のいずれかを渡らざるを得ない。そういった場合、これらの橋が避難経路上の“ボトルネック”になる恐れがある。

図 3-11 の箇所に避難所を設置した場合と、フィールドの中央に避難所を配置した場合を比較した結果を図 3-12 に示す。グラフより、明らかに避難経路上のボトルネックが避難遂行上の障害になることがわかる。この結果より、効率的な避難を考える上で、避難所の配置は重要な検討項目であり、その決定過程において避難シミュレーションの果たす役割は大きいと言える。



図 3-11 避難場所を姉川の南に配置した場合

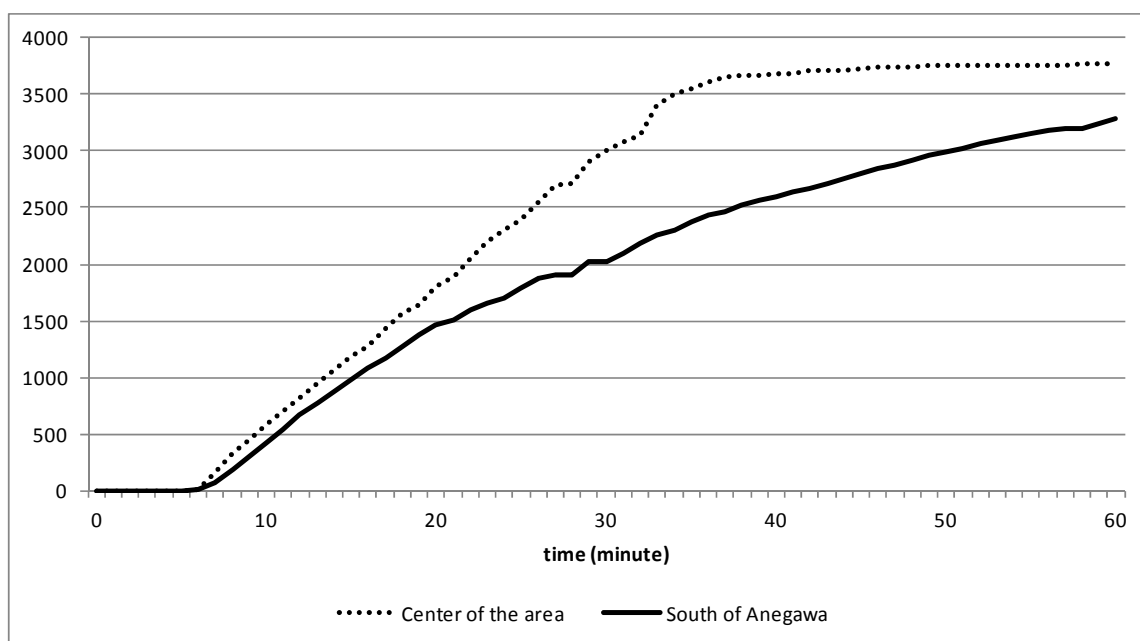


図 3-12 避難場所が異なる場合の避難完了者数比較

3.9 結語

第3章では、水害避難行動時の混雑の様子と、それが個々の避難者に及ぼす影響を表現する方法について考察した。都市部での浸水を考えると、比較的広い領域にわたって大人数が避難しなければならないというような状況も懸念される。こうした場合、避難域に隘路となる橋梁があったり、障害物が存在したりすることの影響を把握しておくことが重要になるが、モデルの多くは街路を一次元的に点と線で表現するため、経路上が混雑している際に、避難者が他者を回避する行動の詳細などを表現することには向いていなかった。そこで本章では、混雑の影響を考慮した避難シミュレーションモデルを二種類開発した。観測実験に基づいて群衆密度－歩行速度の関係式によって混雑の影響を表わしたモデルは、計算負荷も軽く簡便に用いられるが、混雑が深刻になると避難者がほとんど前進しなくなるなど非現実的な挙動が見られた。避難者の回避行動を詳細に表現するモデルにおいては、計算負荷は比較的高くなるが、混雑が深刻な状況でもより妥当性の高い避難行動のシミュレートを可能にした。

回避行動モデルにおいては、道路ネットワークを面的に捉えた上で、人を一定の領域を持つ円と考え、それらが接触することなく移動するため、追い越し・減速・追従歩行など避難者が経路上でとる回避行動を表現するモデルについて考察した。また、提案したモデルと観測実験より得られた、経路上の人の密度と歩行速度との相関によって混雑の影響を表現するモデルとを比較検討し、詳細な回避行動を表現する手法が経路上の混雑を表現することに適していることを確認した。

本章では、また両モデルの開発過程において、道路を二次元的に表現する際に多角形として表現するのではなく、矩形の連続体として表現する道路ネットワークモデルを考案し、計算精度を損なうことなく負荷を下げることに成功した。

第3章 参考文献

- 1 岡本睦,目黒公郎:避難行動シミュレーションに基づく避難困難度マッピングシステムの構築,生産研究,Vol.59,No.3,pp. 37-40,2007
- 2 首都直下地震避難対策等専門調査会:中央防災会議 第9回報告,2008
- 3 建部謙二,中島一:静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動,歩行者の回避行動に関する研究(I),日本建築学会計画系論文集,第418号,pp.51-57,1990
- 4 建部謙二,辻本誠,志田弘二:回避行動開始点の判定と前方回避距離,歩行者の回避行動に関する研究(II),日本建築学会計画系論文集,第465号,pp.95-104,1994
- 5 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,京都大学博士学位論文,1983

第4章 水害避難時における自動車の挙動モデリング

4.1 概説

1990年代以降、数多くの自動車交通シミュレーションモデルの研究開発が行われ、様々な適用事例が報告されている。

堀口ら(2002)¹が行った自動車交通シミュレーションの系統と利用実績の分析によると、現在、主流となっているのは、交通を流体に見立てリンク容量などの交通流特性を外性的に与える Q-K タイプと、追従走行モデルに従い個別の車の挙動を集積して交通状態を再現する C-F(car follow)タイプの2通りに分かれる。

前者の Q-K タイプとしては、SOUND²・TRANDMEX³・AVENUE⁴などの主要モデルが挙げられ、交通センサスのゾーン単位など、交差点数($10^2 \sim 10^3$)の比較的大きなエリアで、交通需要や渋滞箇所などマクロ視点の解析等に用いられている。後者の C-F タイプとしては、NETSTREAM⁵・Paramics⁶・REST⁷・tiss-NET⁸・VISITOK⁹などの主要モデルが挙げられ、交差点数($10^1 \sim 10^2$)の局所的なエリアで、交差点改良や駐車施設整備などのマイクロ視点の解析に用いられる。

さて、ここで本研究が目的とする水害時の自動車交通のシミュレートに適したタイプを考える。水害時の危険区域からの離脱等を表現する必要があるため、対象エリアの広さとしては Q-K タイプに相当する。しかし、水害対応車両の走行経路選択や稼働可能時間など、個別の自動車の挙動を再現する必要もある為、自動車には C-F タイプで用いられる追従走行モデルを用いるのが適している。

つまり、現行の主流である 2 タイプのいずれも水害時の避難シミュレーションには適しておらず、「自動車には追従走行モデルを用い、広域なエリアでのシミュレーションを可能とする」モデルが必要であることがわかる。

現在、自動車交通シミュレーションモデルにおいて、上記の条件を満たす主要モデルが存在しない理由としては以下の 2 つが考えられる。1 つは、C-F タイプのモデルが必要とする交差点の信号制御のデータや、主要道路でない道路の平時の交通量などの詳細データを、エリア内全域について入手するのが非常に困難な事である。もう 1 つは、広域なエリアを対象とするシミュレーションの場合、観測したいアウトプットは交通量や平均走行速度、渋滞箇所などマクロ視点のものであるため、その為に個別車両挙動のような詳細なインプットの積み上げを行うのは、非常に無用な手間をかけることであり、解くべき問題と手段がマッチしていないと考えられる事による。

そこで、本章では自動車による避難行動の解析に適した自動車交通シミュレーションモデルを検討する。

4.2 自動車モデルの概要

前節で述べた通り，自動車の個別の自動車挙動を再現する必要があるため C-F タイプのモデルを元にするのが適当と考えられる．しかし，現在の C-F タイプは，より狭いエリアでより詳細な車両挙動を表現する方針で進化してきている．例えば NETSTREAM は，自動車の車種による理想車間距離に違いを再現し，その道路を通行する車種の構成比による交通特性の違いを表現できる．また REST は，運転者の習熟度や危険認識度，または性格によって自動車の追従行動や加速特性の差異を表現できる．

しかしながら，より詳細な自動車の挙動を表現しようとするほど，シミュレーション時の計算負荷は増大し，避難シミュレーションで用いられるような広範なフィールドで適用するには困難が生じる．桑沢ら(2008)¹⁰は，これらの問題を解決する為に浸水下における自動車挙動の表現においては，既往の C-F モデルで考慮されているような種々の要因よりも，浸水深そのものが支配的な要因であるとして，自動車の渋滞における表現としては，同一道路内の自動車密度によってその道路への侵入可否を判断する簡易なモデル手法を開発することでこの問題を克服している．しかし，比較的浸水深が浅い間は，通常の走行時に近い挙動で自動車が走行するケースも考えられ，自動車特有の走行挙動が支配的になり得るケースも考えられる．

以上より，避難シミュレーションに用いる C-F タイプの自動車モデルの検討にあたっては，可能な限り計算負荷を下げつつ，可能な限り現実的な自動車挙動を再現するという方針が妥当であると考えられる．

そこで，筆者は和田ら(2013)¹¹とともに本研究において，第 2 章で示した水害避難マイクロモデルをベースにして，自動車の走行シーンを定常走行時，減速停止時，加速発進時の 3 分類に単純化し，さらに自動車の相対位置で区別した上で，自由走行モード，追従モード，減速停止モードの 3 つのシンプルなモードで表現した C-F タイプの自動車交通シミュレーションモデルを統合することで，計算負荷を低減しつつ広域なエリアでも可能な限り自動車の挙動をよく再現することができるように改良した．

本研究において導入する，自動車による避難者（以下：車両）は，形状は長さ 4m×幅 2m の矩形とし，走行領域は道路に設定された片側 1 車線とする．避難場での位置づけや経路選択のアルゴリズムについては，歩行者と同様とすることができる．

追従行動については，基本部分は前述の水害避難マイクロモデルにおける歩行者のモデルとよく似たアルゴリズムを導入する．衝突判定領域の大きさは，進行方向の長さには 1 計算ステップの間に車両が進む距離，進行方向の法線方向には車幅と同じとする．しかし，衝突判定領域内に他の自動車を認めても，追い越し等の回避行動はとらずに速度を落とし，前の自動車の後ろについて走行する．

4.3 自動車の基本的な走行挙動のモデル

以下、本研究で用いる3つの車両挙動のモードについて説明する。自動車の3つの走行シーンと自動車の相対位置によって、異なる車両挙動モードが選択される(表4-1参照)。

表4-1 走行シーンと車両挙動モード選択

| Movement | Modeling | |
|--------------|-------------------|-------------------|
| | Lead vehicle | Following vehicle |
| Regular | Free drive mode | Following mode |
| Acceleration | | |
| Deceleration | Deceleration mode | |

4.3.1 自由走行モード

自由走行モードとは、道路上に別の車両や信号などの障害物がない時は車両ごとにあらかじめ設定された標準速度（最高速度に相当） v_{max} (m/s)で走行しようとし、最高速度に達している場合はそのままの速度で走行する。最高速度より小さい場合は加速し、最高速度に到達しようとする。その時、車両*i*の性能に応じて設定された一定の加速度 a_i (m/s²)で加速を続けるものとする。

4.3.2 減速停止モード

車両が赤信号を視認して停止する場合は、停止地点を定めそこで速度が0になるように減速をしていく。この場合、停止を決めて減速を始めてから、実際に停止するまでの減速の様子が問題となる。これについては実際の道路上で車両が減速する際ブレーキを何回も踏むことで速度と停止線までの位置がほぼ直線関係になるように減速しているとする中村ら(2007)¹²の報告があるが、状況や運転者の特性によるばらつきも大きい。そこで本研究では、簡単のため、等加速度運動をしながら車両は停止線に向かって減速し停止することとした。

今、停止位置より x (m)手前で停止を決め減速を始めたとする。 x (m)進んで速度がゼロになるような一定の加速度 a (m/s²)を求めると

$$a = -\frac{v_0^2}{2x} \quad (4.1)$$

となり、停止に向かって減速し始める時の車両の初速度を v_0 (m/s)、減速を始めてから経過した時間 t (s)における速度を v (m/s)として速度の式を表すと、

$$v = -\frac{v_0^2}{2x}t + v_0 \quad \left(0 \leq t \leq \frac{2x}{v_0}\right) \quad (4.2)$$

になる。

ただし、急激な減速を防ぐため、減速加速度の下限を設け、これを a_{\min} (m/s²)とする。いま、標準速度 v_{\max} (m/s)で移動中の車が停止する場合を考える。停止のためには、まず障害物を認知し、停止の意思決定を行い、ブレーキを操作して減速する必要がある。これに要する距離は、障害物発見時の速度に依存し、停止視距と呼ばれている。速度 v_{\max} (m/s)に対する停止視距を $l_{\text{stop}}(v_{\max})$ とすると、式(1)より

$$a_{\min} = -\frac{v_{\max}^2}{2l_{\text{stop}}(v_{\max})} \quad (4.3)$$

となる。これが最高速度における減速のための加速度であるため、これを下限とする。

なお、以上から、停止視距だけ走行してちょうど停止するまでに要する時間 $T_{\text{stop}}(v_{\max})$ (s)は

$$T_{\text{stop}}(v_{\max}) = \frac{2l_{\text{stop}}(v_{\max})}{v_{\max}} \quad (4.4)$$

となる。

しかし、信号が赤に切り替わった際の信号までの距離が $l_{\text{stop}}(v_{\max})$ に満たない場合は、その自動車は、赤信号の手前で安全に停止することができない。斉藤ら(2008)¹³は車両信号赤切替時までに停止線を通過することも、停止線で安全に停止することもできないこのような範囲をジレンマ・ゾーンとし、交差点における交通事故の原因の一つとしされている。鈴木ら(2009)¹⁴は、走行速度と運転者の判断タイミングの差異による通過・停止判断の分岐を詳細に検討している。しかしながら、本研究で構築する自動車モデルの目的は、自動車の事故回避ではなく避難行動時の行動を把握することであり、また、本研究で用いる街路モデルにおいて交差点は道路(Arc)が結節した端点(Node)として表現されていて交差点内における自動車の衝突回避行動を考慮しない為、安全に停止することができない場合は、減速・停止モードから自由走行モードに切り替えてそのままの速度で交差点を通過することとした。減速・停止シーンにおけるモード選択のアルゴリズムを図 4-1 に示す。

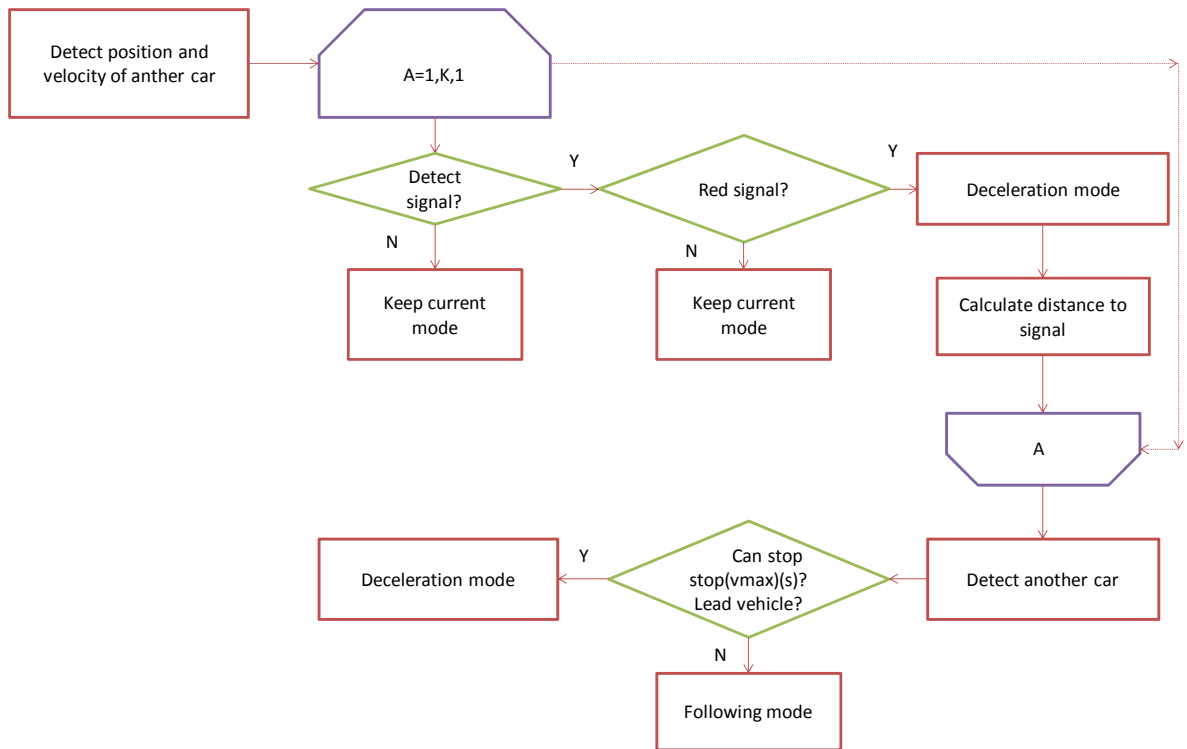


図 4-1 減速・停止時のモード選択アルゴリズム

4.3.3 追従走行モード

ある車両の衝突判定領域の中に同じ方向に走行中の車がある場合は、その車両は追従走行モードとなる。追従走行モードで前方車両の速度に応じた車間距離を保ちつつ、前方車両との相対速度をゼロにするように速度を調整する。標準車間距離の値は、日本交通事故鑑識研究所の資料¹⁵⁾によると、一般的に低速域（60km/hr 以下）では前方を走行している車両の時速の値－15メートルであり、高速域（60km/hr 以上）では前方を走行している車両の時速の値をメートル単位としたものである。

本研究では、追従走行モデルは以下のように定義する。

追従走行をする車両の挙動は、前方の車両との車間距離によって場合分けする(図 4-2 参照)。

(a) 車間距離が標準値よりも小さい場合

車間距離が標準値よりも小さい場合、まず相対速度が負であるかで場合分けをする。相対速度が負である時は衝突をさけるために減速する必要がある。この際の加速度は、1 タイムステップ後に対象車両の車間距離が標準値になるように定めるとする。すなわち、今時刻 $t(s)$ で減速を始めるとし、減速した速度を求める式を示すために、時刻 $t(s)$ から $t+1(s)$ 間の加速度を $a(t)$ (m/s^2) とする。時刻 $t(s)$ での実車間距離を $l_{realij}(t)(m)$ 、前車両の速度を $v_i(t)(m/s)$ 、時刻 $t(s)$ での標準車間距離を $l_{ideal}(v_i(t)) (m)$ として、時間 $t+1(s)$ における対象車の速度 $v_j(t+1) (m/s)$ を次式で求める。

$$l_{ideal}(v_i(t)) = l_{real,j}(t) + v_i(t) \cdot \Delta t - v_j(t+1) \cdot \Delta t \quad (4.5)$$

となる。なお、相対速度が正である時はこのままの速度で走行すれば車間距離が広がっていくので、同じ速度で走行していくことにする。

(b) 車間距離が標準値よりも大きい場合

車間距離が標準値よりも大きい場合、まず対象車両から見た前方車両の相対速度の正負だけ考える。相対速度が正である時は、そのままの速度で走行するとさらに車間距離が大きくなるため、衝突や接近といった危険は発生しない。したがって対象車両は自由にその行動を決めることができ、事実上の自由走行モードとして扱うことができる。

相対速度が負である時は前方車両に近づいていく状態であるが、車間距離が標準値よりも大きい場合最高速度に達していない車両の場合は加速するという選択肢がある。しかし、この時点で車間距離が減少傾向であることを考慮すると、いずれ車間距離は標準値に近づく。速度変化を頻繁に行うルールを採用すると、減速、加速を繰り返す、挙動が不安定になるおそれがある。そこでこのケースでは同じ速度で走行をしていくこととする。

(c) 標準車間距離で走行していた場合

後続車両から見た前方車両の相対速度が負となり、車間距離が詰まる場合は標準車間距離に戻すことができるように自分の車を減速していく。また、相対速度が負でない場合は最高速度（自分の車の最初に与えられた速度）になるまで加速していく。車間距離が標準値より大きくなる場合は必ずしも車間を詰める必要が無いこととする。

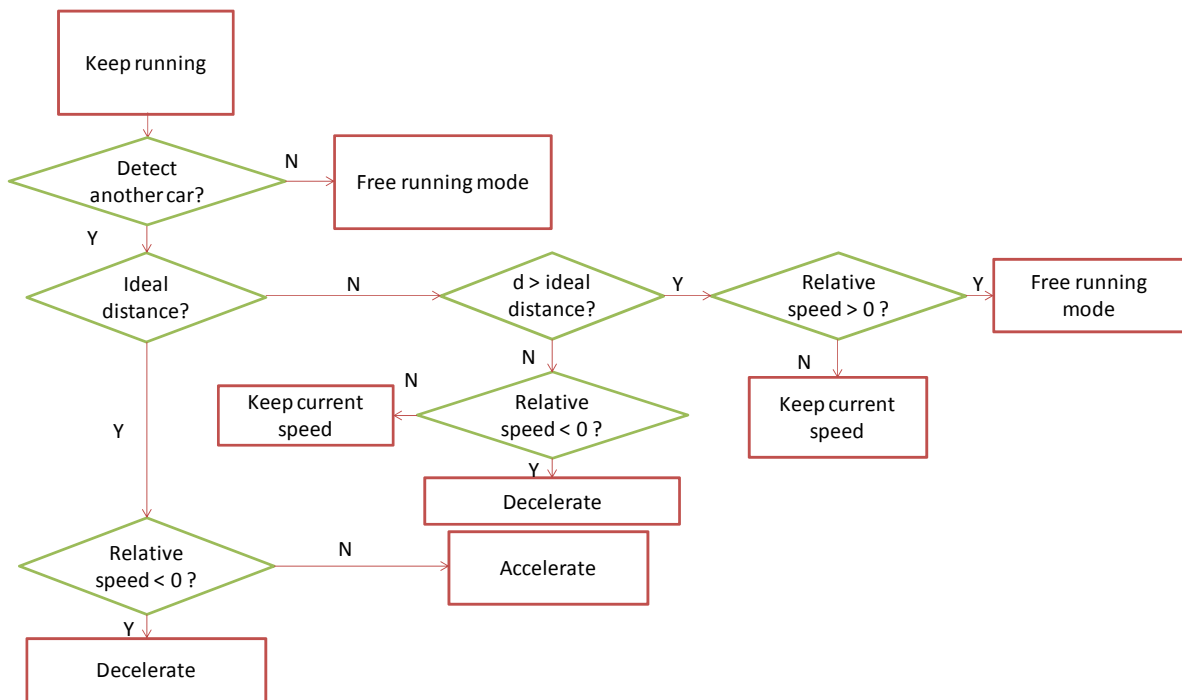


図 4-2 追従走行モードアルゴリズム

4.4 待ち行列と流入制限

Arc の端点、すなわち交差点に到達した避難者は、自身が乗っている Arc から次の Arc に移動可能な状態であれば、次に進むべき Arc に進む。赤信号となっている、渋滞車列の最後尾が Arc の端点に来るなどして移動可能でなければ、静止してステータスが変化するのを待つ。その際、後続の避難者が到達した場合は先着の避難者の後ろで待機し、待ち行列を作る。

その Arc に多数の避難者が存在し、待ち行列が Arc の反対側の端点まで到達した場合、他の Arc からその Arc への流入を不可とし、その Arc に進もうとする避難者は端点で待機する。つまり、複数の Arc にわたって待ち行列を作る (図 4-3 参照)。

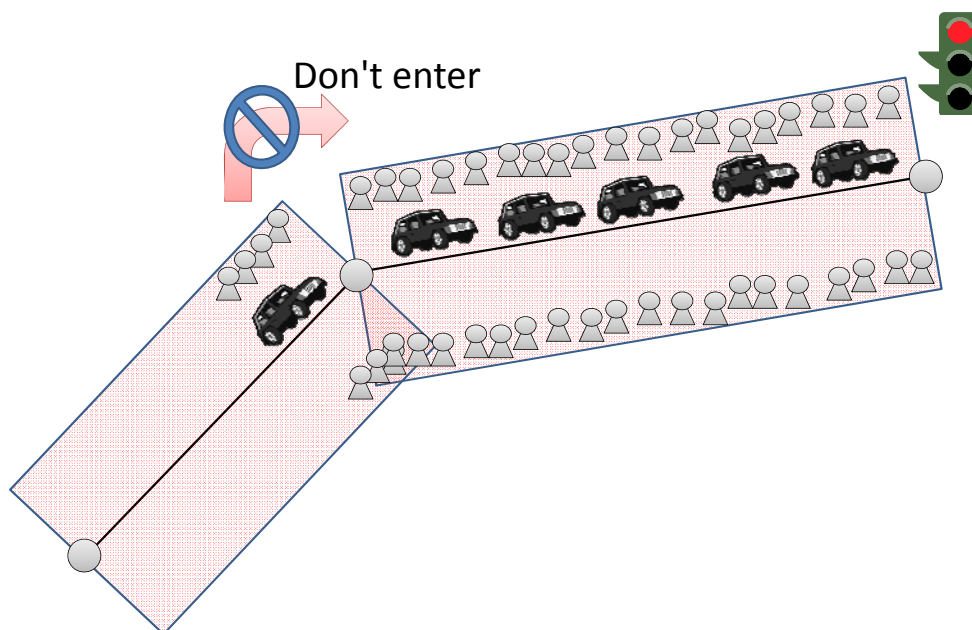


図 4-3 待ち行列の設定

4.4 氾濫流の浸水深が車両走行に及ぼす影響

押川ら(2011)¹⁶によると、小型車の場合は、非常にゆるやかな流速(0.1m/s 程度であっても、水深が 0.4m ほど車体が浮き始めて走行不可能となる。また戸田ら(2012)¹⁷によると、SUV 車など車高の高い車種を除く小型のセダン等では 0.5m の水深(流速 2m/s の状況下)に達すると、自動車が漂流の危険にさらされることがわかっている。本研究におけるシミュレーションでは、これらを参考に水深が 0.5m に達すると自動車は走行不可能とした。

4.5 自動車挙動モデルの検証

4.5.1 避難フィールドの設定

本研究では、テストマップを用いてシミュレーションを行う。テストマップの空間スケールは x 方向（南北方向）に 3000m, y 方向（東西方向）に 4000m とする。なお道路幅は、一般的な市町村道に適用される道路構造令の道路区分第 3 種 3 級を適用し、車道片側 3m の計 6m としている。テストマップ内の 13 カ所には信号機を設置し、交通制御を行う。アークの各組の信号保持時間は 150 秒とし、150 秒毎に信号を切り替える。

以下にテストマップの図を載せる。ここで、図 4-4 中の A#数字はアークのナンバーを表しており、N#数字はノードのナンバーを表している。座標の値はノードが設置されている場所 (x 座標, y 座標) を表している。

4.5.2 車両の設定

本研究においては、車両 10 台をアークナンバー4 上に配置する。(車両の長さは 4m)ここで、配置は図 4-5 のように 50m 間隔で 10 台の車両を配置していく。No.1 が先頭を走行する車両で、数字の順に配置し、No.10 が最後尾であるとする。車両の下の数字はノードナンバー10 からの距離を表している。No.1 を 18km/hr(5m/s)とし、それ以外の車両を 40km/hr(11m/s)の速度で走行しているとする。車両はアーク 4 からアーク 7, アーク 10, アーク 13 に向かって進行し、その間にノード 10, ノード 12, ノード 5 を通過し、ノード 13 を目的地とする。ノード 12 で赤信号に到達し各車両が停止するようにしてあり、各車両が追従する様子、赤信号で停止に向かって減速をする様子、発進する様子を正しく表すことが目標である。

また、本実験では最高速度 $v_{\max}=11(\text{m/s})$, その速度での停止視距の長さ $l_{\text{stop}}(v_{\max})=40\text{m}$ であるとする。この時、 $T_{\text{stop}}(v_{\max})$ は約 7.2 秒になり、1 秒ごとのタイムステップで実験しているので、 $T_{\text{stop}}(v_{\max})$ を 7 秒にする。また、 $T_{\text{scollision}}$ を 10 秒とした。

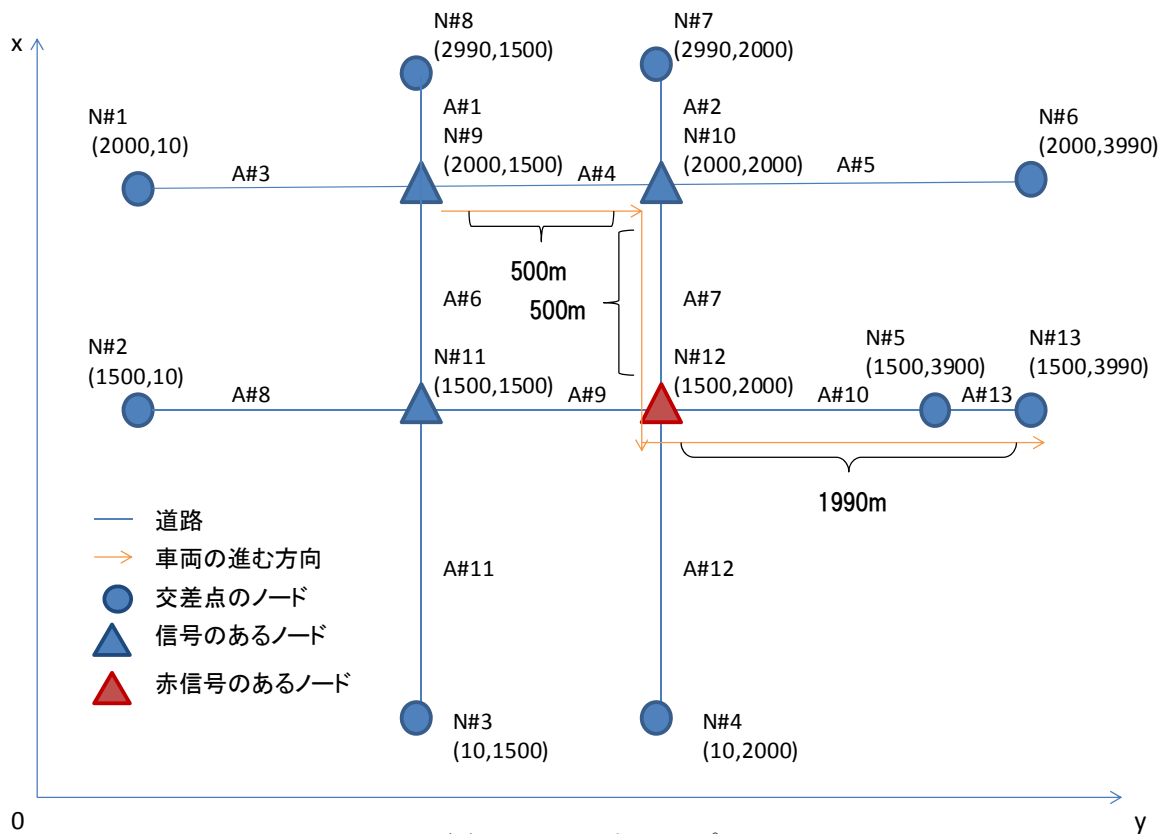


図 4-4 テストマップ

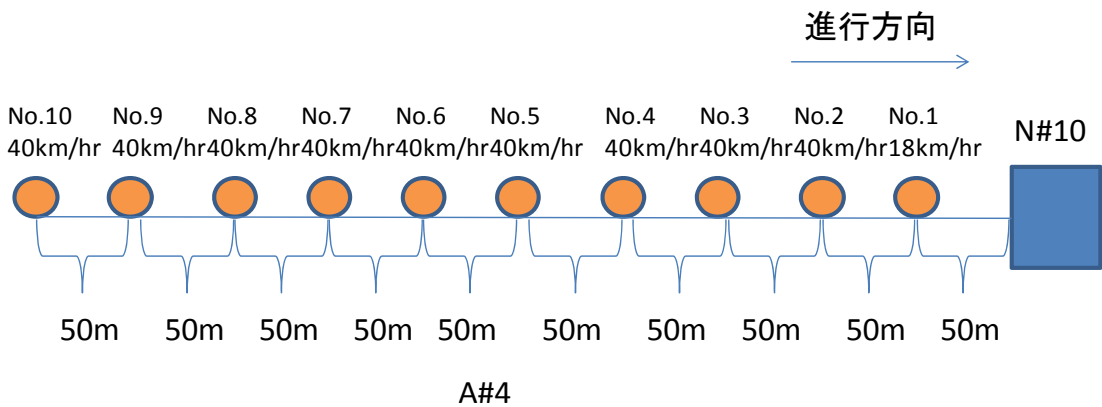


図 4-5 各車両の初期条件

4.5.3 追従挙動の検証

前節 4.1 の条件で検証をした結果を図 4-6 に示す、先頭を走行している車両の速度が小さいため追従をしている後続の車両は先頭を走行する車両と同じ速度になろうと減速をしていく。図を見ると、減速しすぎたら加速をしていき、先頭を走行している車両と同じ速度になってい

くことが分かる。ちなみに、62秒後に全ての車両が同じ速度になった。また、途中で前の車両を追い越すことはなく追従をしていた。

No.1は5(m/s)の速度を維持して走行していた。なので、No.2は一度No.1と同じ5(m/s)の速度になったら速度を維持して走行すると考えた。しかし、11秒後にNo.2は加速を始めた。これは、前の車両のNo.1が次のアークに進行した際、No.2はNo.1を一瞬見失い、自由走行モードとなり加速を始めたからだを考える。交差点で、自分の前の車両が曲がった時はその車を見ることができないので現実でありえる現象と考える。

本来追従している車両が $t(s)$ から $t+1(s)$ に進む距離 $\Delta L_j(t)(m)$ は、時刻 $t(s)$ での実車間距離を $l_{real_{ij}}(t)(m)$ 、前車両の速度を $v_i(t)(m/s)$ 、時刻 $t(s)$ での標準車間距離を $l_{ideal}(v_i(t))(m)$ として、

$$l_{ideal}(v_i(t)) = l_{real_{ij}}(t) + v_i(t) \cdot \Delta t - \Delta L_j(t) \quad (4.1)$$

を満たすように、 $v_j(t+1) \cdot \Delta t(m)$ を決めるべきである。また、

$$\Delta L_j(t) = v_j(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_t \Delta t \quad (4.2)$$

である。しかし、例えば図4-7のような場合(i は車両No.1、 j は車両No.2)で $\Delta t=1(s)$ とすれば、式より $a_3=-14(m/s^2)$ となる。この時、

$$v_2(4) = v_2(3) + a_3 \Delta t \quad (4.3)$$

であり、 $v_2(4)=-3(m/s)$ となる。これは、 $v_2(t+1) \geq 0$ に反する速度の値を持つことになる。よって、本研究では、簡単のために $\Delta L_2(t) = v_2(t+1) \cdot \Delta t$ として考える。結果、本来取り得る $v_2(t)(m/s)$ より低い値を計算に用いている。

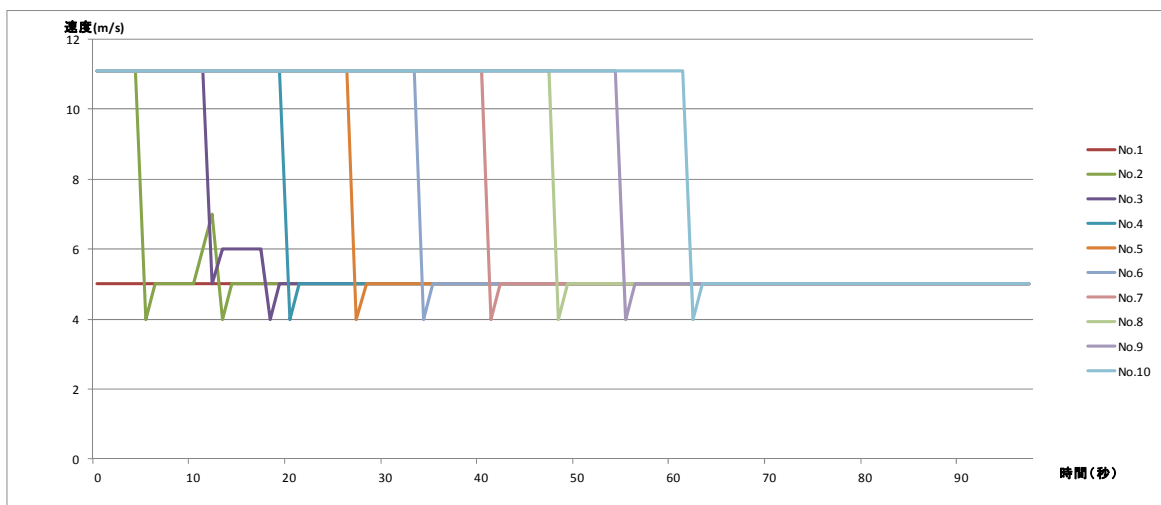


図 4-6 追従行動時の速度変化

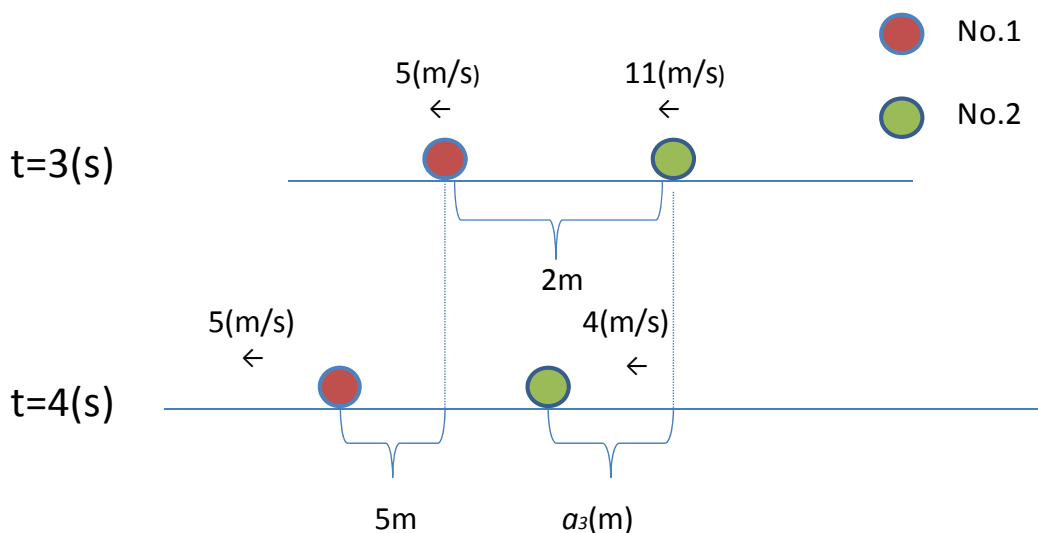


図 4-7 追従行動の詳細

4.5.4 信号停止に向かう減速・停止の検証

ノード 12 において、車両が赤信号に到達し停止に向かっていく。99 秒後の時点でさらに 10 秒経過した 109 秒後にそのままの速度で走行すると赤信号があることを発見して減速モードが発生する。すると、一番先頭を走行している車両は等加速度運動をしながら停止に向かっていき、追従している残りの車両は図 4-2 の追従モードのアルゴリズムに基づいてだんだん速度を落としていき停止に向かっていく。図 4-8 は信号停止に向かって全車両が減速し、停止する様子を表して、図 4-9 は停止時の各車両の速度分布を示している。

先頭を走行している車両は直線的に減速をし、追従している車両もほぼ直線的に減速していくことが理想である。しかし、グラフを見ると先頭の車両も含めて最初の 2 台は直線的に減速するのに対して、残りの 8 台は大きな減速と加速を繰り返した振動をかなりしている。これは、プログラムの設定上前車両の速度が変化した時、対象車両は 1 秒後にならないと前車両の速度変化に対して為すべき行動を判断することができないという反応遅れが生じ、後続の車両になればなるほど反応遅れが大きくなるのが原因と考える。また、振動の発生するタイミングが予想よりも早かった。振動を小さくするには、前の車両の 1 秒後の位置を予測することで、反応遅れを防げばよいと考える。

図 4-10 では減速・停止する際の各車両の停止位置からの距離を表し、図 4-11 は停止前 24 秒間の各車両の位置の推移を示している。図 4-10 を見ると、車両同士の間隔が車両の長さの $4m$ よりも短いところがあるので、衝突が発生したことが分かる。ただし、図 4-11 より前の車両を追い抜かず現象は発生していないことがわかる。衝突を防ぐには、本研究では前の車両の速度に応じて追従をしているので、前の車両の加速度の変化に応じて追従できるようになれば、1 秒後の対象車両の対応が間に合うので、衝突は減少すると考える。

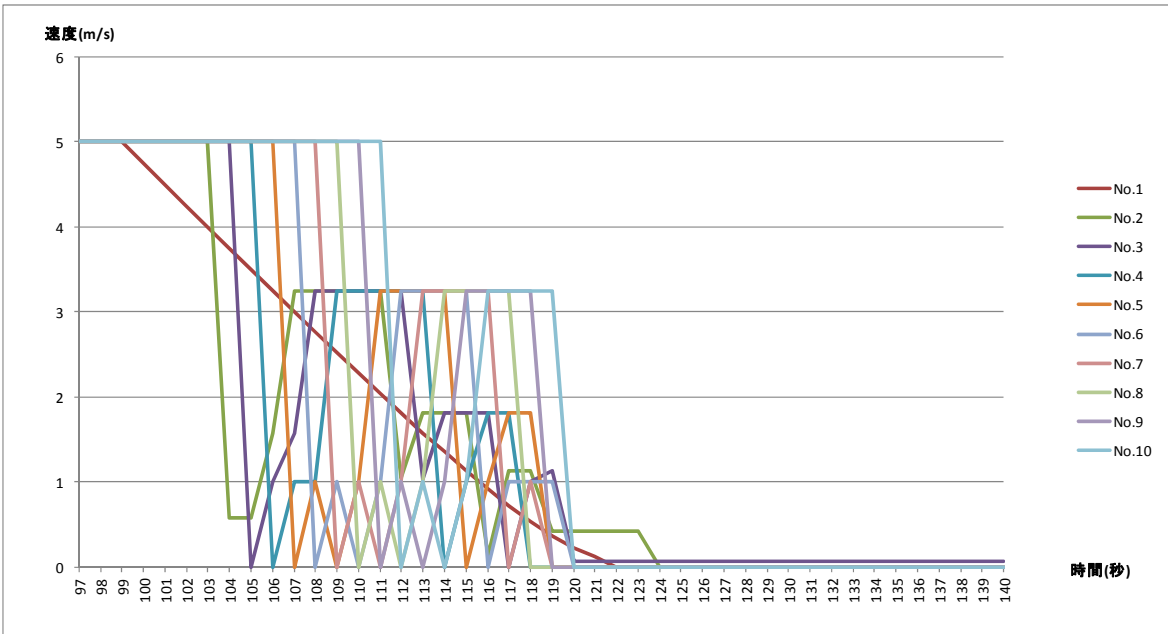


図 4-8 減速停止する際の全車両の時間と速度分布

第4章 水害避難時における自動車の挙動モデリング

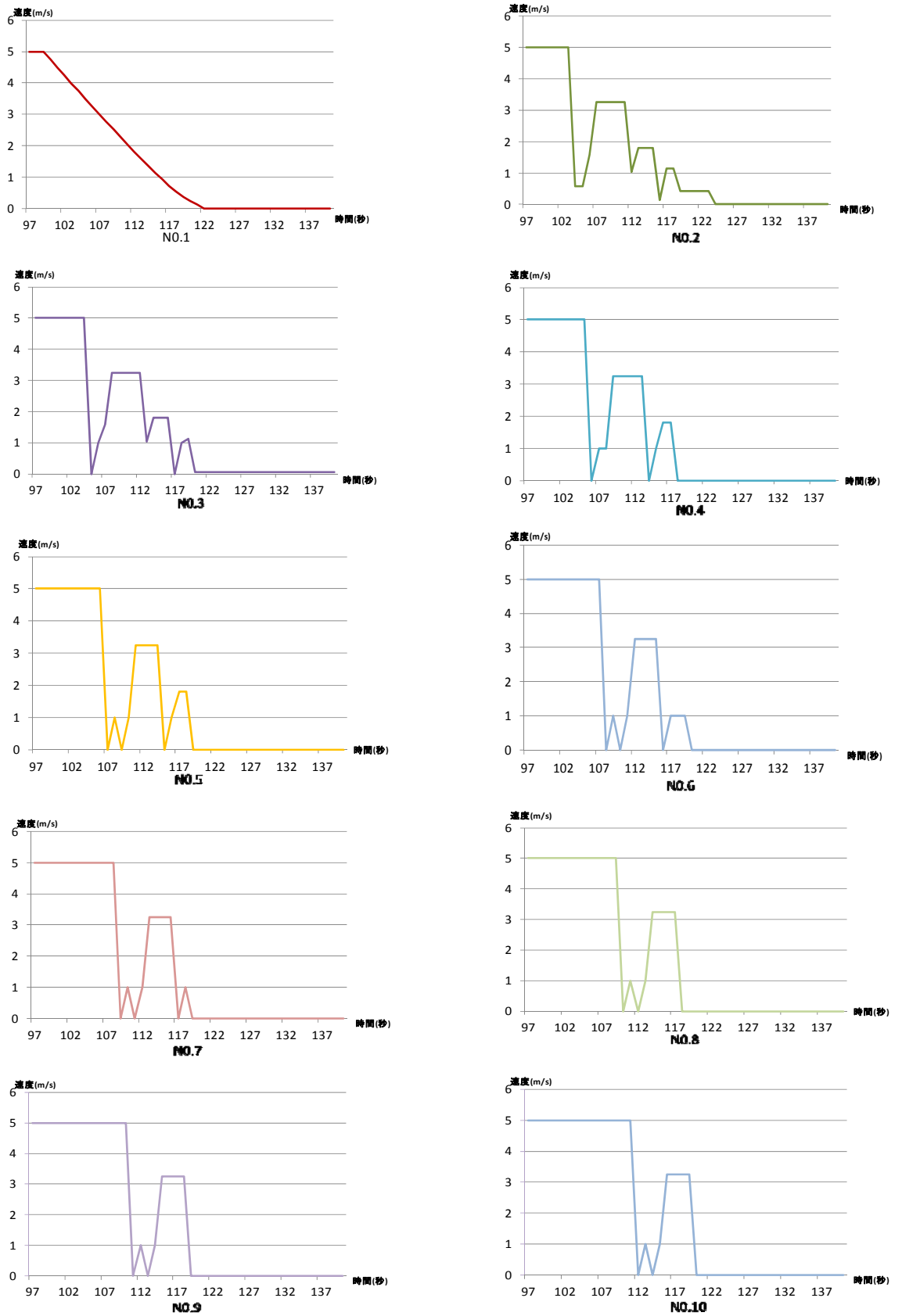


図 4-9 減速停止する際の各車両の時間と速度分布

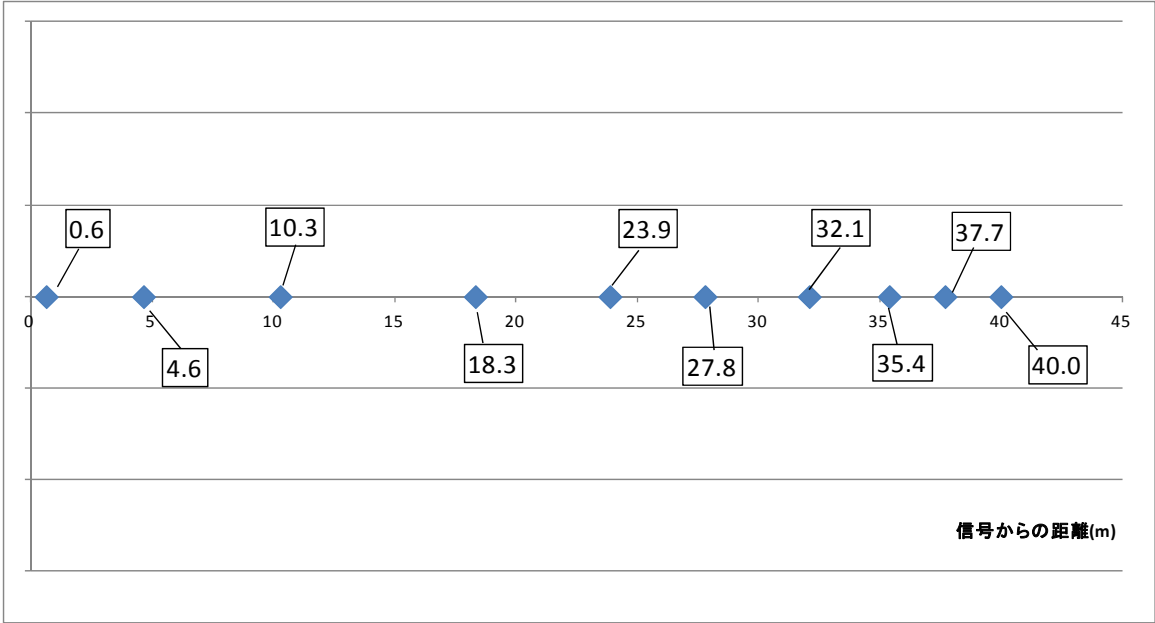


図 4-10 減速停止における全車両の時間と位置

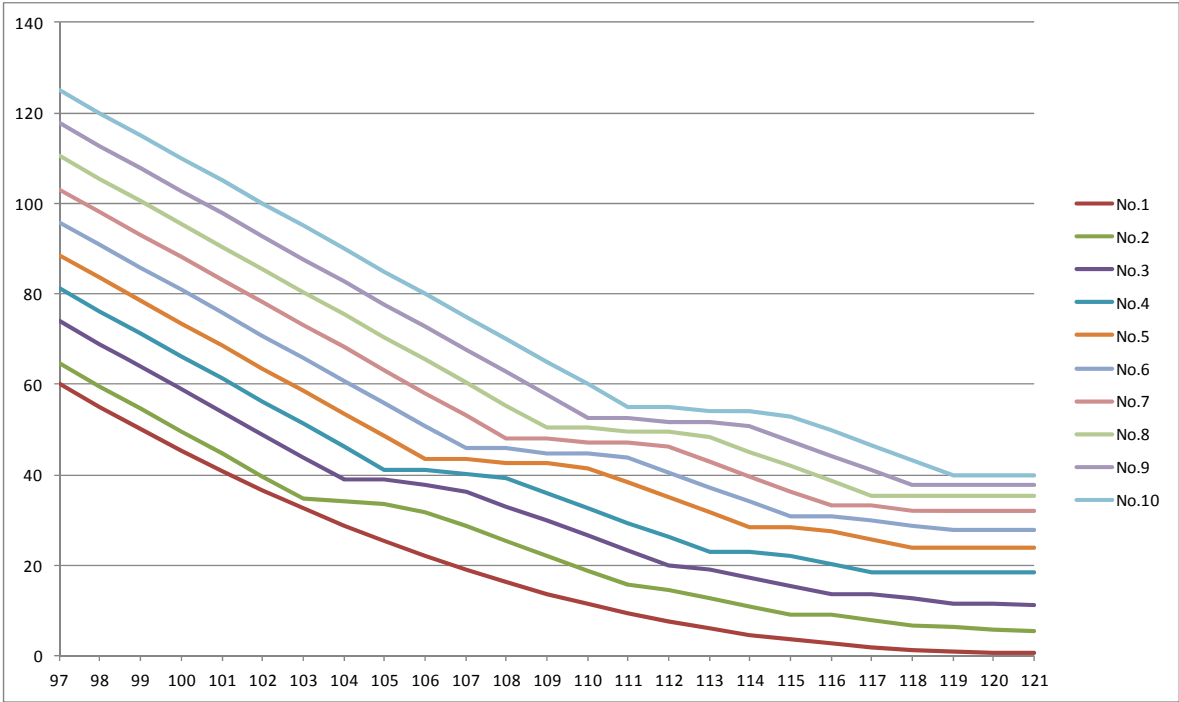


図 4-11 停止前 24 秒間の全車両位置の推移

4.5.5 青信号時の発進・走行の検証

図 4-12 は信号が青に変化してからの全車両の発進し加速する様子を示し、図 4-13 は発進時の各車両の速度分布を示している。一番先頭を走行する車両は等加速度で加速をし、自由走行をしようとしていることが分かる。また、それ以外の車両は前の車両を追従している様子が分かる。本研究では、前の車両が十分進行したら後ろの車両も発進し出す。前の車両が発進してから、対象車両が発進し出すまでタイムラグがあるので、車間が大きくなり、対象車両は大きな速度で前の車両を追従していることになる。後に、車間が詰まりすぎて大きく減速することになる。

また、188 秒後に No.4 が減速した後、後続車が大きな振動を起こしているが、これは現実でも起こりえる内容である。

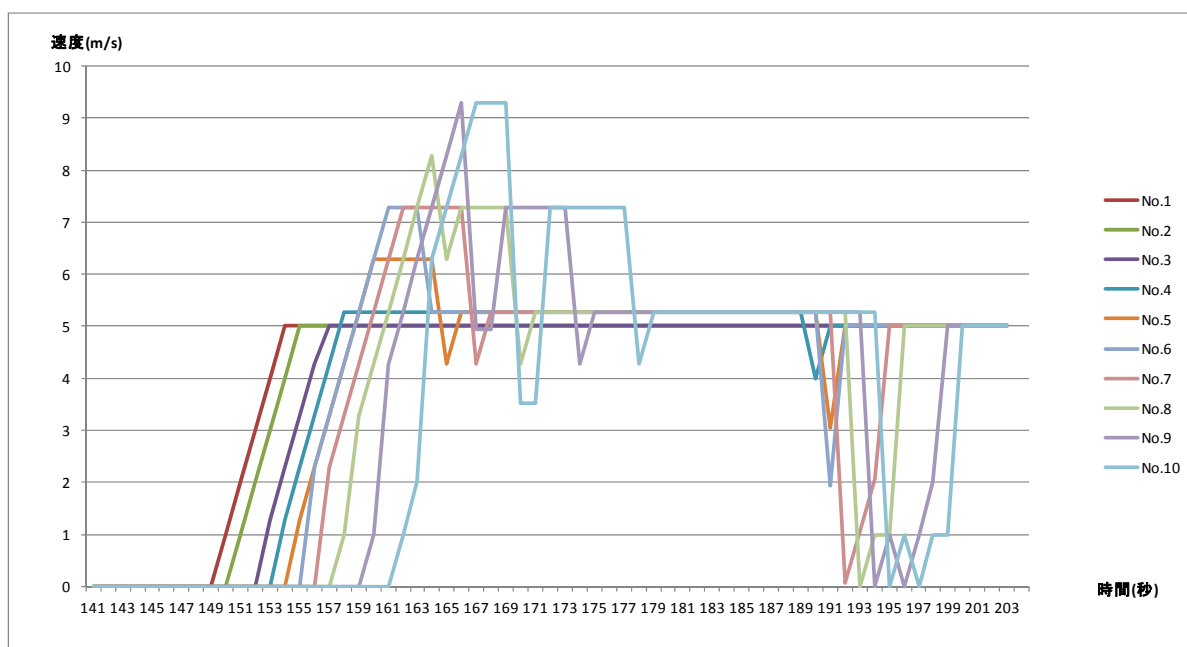


図 4-12 発進する際の全車両の時間と速度分布

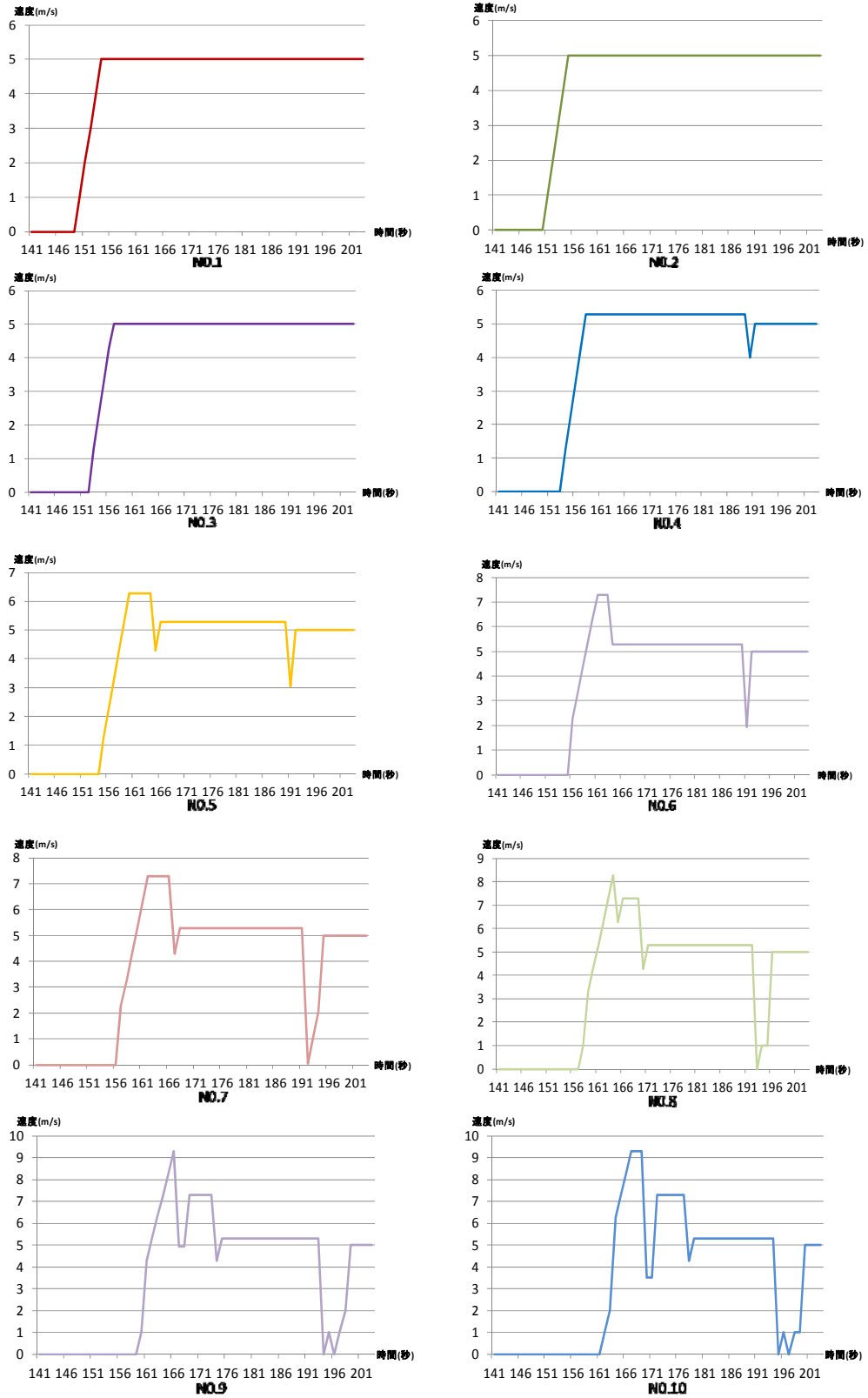


図 4-13 発進時における各車両の時間と速度分布

4.6 適用と考察

本章で示した挙動モデルに基づいた自動車による避難者を、3.8節の対象領域に適用した。自動車の定常速度は8.3m/sとし、避難場所の配置などその他の設定は3.8節に準じるとする。歩行によるか自動車によるかの避難者の行動特性の違いが避難行動の成否に及ぼす影響を評価する為、住民の全員が自動車によって避難をしたという設定で考察する。

滋賀県の平成25年の自動車保有台数は762,037台であり、これを滋賀県の人口1,416,546人¹⁸で割ると、1人当たりの自動車保有台数（乗用車）¹⁹は0.53台である。これに虎姫町の人口である5,500人を乗じて、約2900台の乗用車が対象領域内に存在する。このうち、水害発生時に区域外に移動している自動車や、使用できる状態にない自動車が約3割程度存在すると仮定して、2000台の乗用車が一斉に避難を開始したとする。

北関東・南東北豪雨災害²⁰(1998)における郡山市においては、住民のほとんどが避難時に自動車を選択したとされており、今回のケースではそのような状況を想定する。

図4-14に、比較の為に全員が歩行による避難行動をとった場合も合わせてシミュレートする。歩行者による避難を行った場合85分程度で避難が完了するのに対し、自動車による避難を行った場合は96分程度かかっている。これは、自動車の方が経路上の混雑の影響を顕著に受けやすいことを表現している。グラフの概形から、避難開始から40分後には既に避難場所の付近に多くの自動車が到達しており、しかしそこで渋滞列が発生した為、それ以降は少しずつしか避難場所に到達していない事がわかる。実際には、多くの自動車が一箇所に集中して避難することは考えにくいだが、自動車の避難による特性をよく表している結果と言える。なお、本章で用いた自動車行動モデルは信号の有無を検知できるが、本節においては信号による制御を行っていない。自動車交通における信号制御の影響については次章で検討する。

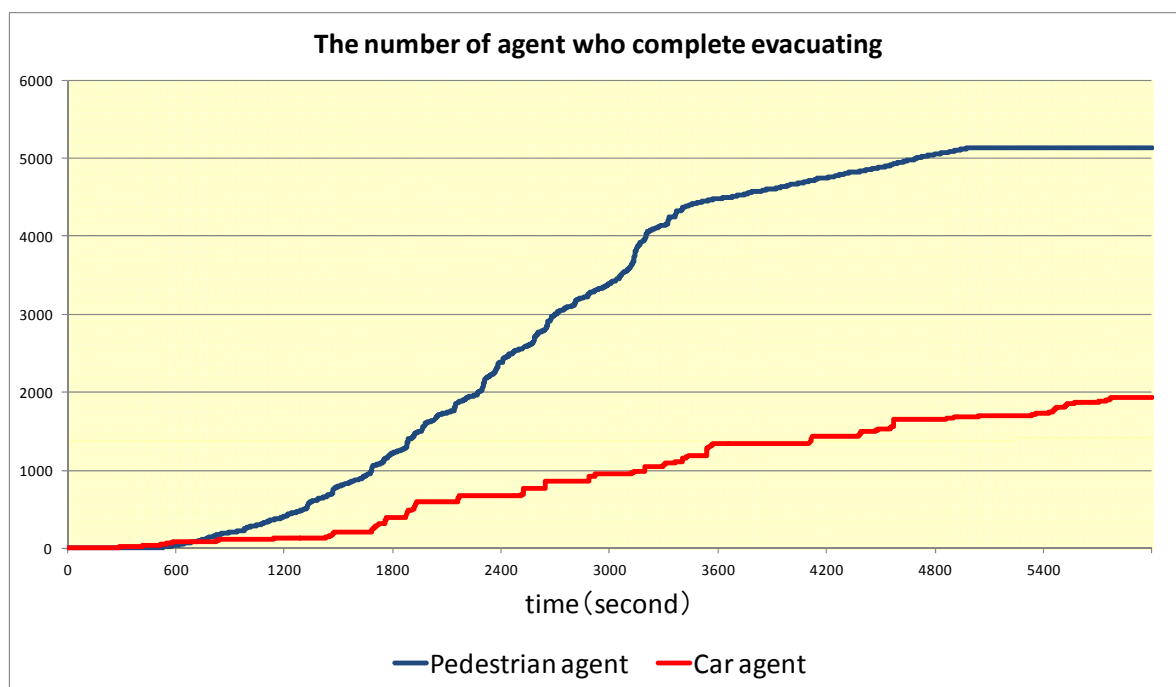


図 4-14 歩行者と自動車の避難完了者数比較

4.7 結語

第4章では、水害避難時における自動車挙動のモデリングについて考察した。多くの避難行動のシミュレーションモデルに関する研究は、それぞれの解析目的によって、重視するパラメータは違っているものの歩行者のみによる避難を前提としていた。

しかし実際には、自動車を用いた避難も多数行われている。そこで、本章では、現実的に避難行動をシミュレートする為に、自動車の存在や使用を含めたモデル構築を試みた。

しかし、個々の自動車の行動を表現できる既往の自動車交通シミュレーションモデルを、避難シミュレーションで用いられるような広範なフィールドで適用すると、多大な計算負荷による困難が生じる。一方、個々の自動車を再現せず、交通量を扱うモデルの場合、浸水による被害の状態を時間的、空間的に細かく把握することは難しい。したがって、避難シミュレーションに自動車行動モデルの検討にあたっては、個々の自動車を扱いつつ、行動アルゴリズムをできる限り簡素化して、計算深を下げるのが課題であったが、本研究では、自動車の走行シーンを定常走行時、減速停止時、加速発進時の3分類に単純化し、さらに自動車の相対位置で区別した上で、自由走行モード、追従モード、減速停止モードの3つのシンプルなモードで表現した追従タイプの自動車交通シミュレーションモデルを開発し、計算負荷を低減しつつ広域なエリアでも可能な個別の自動車の挙動再現を可能とした。ステップ計算を行っているという性質上、現ステップの相対速度と距離しか次ステップの速度の判断材料にできない為、速度に振動が生じる、または急ブレーキには対応できないなど現実の自動車と乖離する挙動も見られるものの、多数の自動車の挙動の集合体として結果をみる分には概ね許容できる再現性を示した。

また、上記の自動車挙動のモデルを実流域におけるシミュレーションに適用して、自動車を避難行動に用いた場合、徒歩に比べて素早く目的地に到達できるというアドバンテージもあるものの、渋滞列を作ってしまうなどして経路上の混雑を受けやすいなど、そのリスクについて考察した。

第4章 参考文献

- 1堀口良太,小根山裕之:適用事例を通じた交通シミュレーションの利用実態の分析と利用促進の課題,土木学会,土木学会論文集 IV,Vol.709,No.IV-56,pp.61-69,2002
- 2吉井稔雄,桑原雅夫,森田緯之:都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発,交通工学,Vol.30,No.1,pp.33-41,1995.
- 3酒井浩一,田沢誠也,吉田克明:都市内高速道路シミュレーションモデルの開発と検証,土木学会第53回年次学術講演会第IV部門論文集,pp.686-687,1998.
- 4 AVENUE : <http://www.i-transportlab.jp/products/avenue>.
- 5 E. Teramoto, M. Baba, H. Mori, Y. Asano and H. Morita, “NETSTREAM: Traffic Simulator for Evaluating Traffic Information Systems,” Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems '97, 6p(CD-ROM), Boston, November 1997.
- 6 Paramics : <http://www.paramics.com/>.
- 7吉田正,野呂好幸,富山礼人:ETC 対応型 IC 計画に関する基礎的研究ー交通流シミュレータ「REST」の適用事例の報告,土木計画学研究・講演集 No.22(2),1999.
- 8 Sakamoto, K., Kubota, H. and Takahashi, N.: Traffic assignment method considering car-by-car behavior for traffic impact studies -development of the tiss-NET System, *Proceedings of 8th World Conference on Transport 69 Research*, Antwerpen, 1998.
- 9宇陀正志,森津秀夫:小規模道路網を対象とした交通シミュレーションモデル,第19回交通工学研究発表会論文報告集, pp.69-72,2000.
- 10 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
- 11 花島健吾,和田洋介,堀智晴,野原大督:自動車による避難行動と道路上の信号制御を考慮した水害避難行動モデル,京都大学防災研究所年報 56号 B,2013
- 12 中村良枝,浜岡秀勝:信号切替時情報取得時のドライバー判断からみる安全性の評価,平成18年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集,CD-ROM,IV-21,2007
- 13 斉藤威:ジレンマゾーンの回避を意図した信号制御方式とその効果,交通工学, Vol.29, No.6, pp.11-22,2008
- 14 鈴木理,浜岡秀勝:信号切替情報の獲得によるジレンマ・ゾーンの回避に関する研究,土木計画学研究・論文集,Vol.26,No.5,pp.855-863,2009
- 15 日本交通事故鑑識研究所:週末安全運転ワンポイントアドバイス
http://www.rakuten.ne.jp/gold/anshinmini/magazine/week22_a3.html
- 16 押川英夫,大島崇史,小松利光:冠水時の自動車通行の危険性に関する研究,河川技術論文集第17巻,2011
- 17 戸田圭一,石垣泰輔,尾崎平,西田知洋,高垣裕彦:氾濫時の車の漂流に関する水理実験,河川技術論文集,第18巻,2012
- 18 滋賀県:滋賀県人口推計年報(2012)
- 19 一般財団法人自動車検査登録情報協会:自動車保有台数データ(2013)
- 20一般財団法人消防科学総合センター:消防防災博物館, <http://www.bousaihaku.com/>

第5章 信号制御が避難行動に及ぼす影響

5.1 概説

自動車の存在や使用を含めて避難シミュレーションを検討する場合、経路上の信号機等による交通制御の影響や歩行者との交錯の影響を把握しておくことが重要になる。

赤羽ら(2002)¹は、交通シミュレーションモデル構築のフレームワークを標準化する際、少なくとも信号による影響を再現できるものでなくてはならないと指摘している。中川ら(1998)²によれば、交通シミュレーションモデルにおける信号制御の取り扱い、交差点や合流部での自動車の挙動を詳しく知るためのものと、経路選択や交通量配分の為のものに大別することができる。

前者は交通をマイクロにとらえ、信号サイクルや右左折レーンを明示的に取り扱うモデルであり、尾崎ら(1989)³が信号制御の評価をするために開発した DESC モデルや、横井ら(1993)⁴の開発した交通管制マクロシミュレータ、別所ら(1993)⁵の交差点シミュレーションモデルなどが挙げられる。

後者は、交通フローを有る程度のユニットとして捉え、ネットワーク全体の挙動を表現するために信号の役割を交通量配分に特化したモデルであり、飯田ら⁶の動的交通シミュレーションモデルにおける信号モデルや、堀口ら(1993)⁷の AVENUE における信号モデル、Hall(1992)⁸の開発した Saturn におけるモデル、TRANSIMS⁹における信号モデルなどが挙げられる。また、高山ら(1993)¹⁰は信号機による制御の特性を考慮して、信号遅れ時間を表現できる時間交通量配分モデルを開発し、道路の交通容量との関係から渋滞などの交通障害をシミュレートした。また、狩野ら(2002)¹¹はセルオートマトンを用いた広域の経路選択システムを構築し、信号機の挙動に近似した交通制御をモデル化した。

しかし、自動車交通モデルに C-F モデルを用いる場合、後者の信号制御モデルのように信号機を経路選択システムや交通量配分の機能に単純化する事は適当ではない。前章で述べた通り、自動車は信号機通過の前後で独特の挙動を取り、また信号機は自動車の待ち行列発生の主たる契機となる。よって、可能な限り現実に近い信号機の機能をシミュレーションで再現する必要がある。

よって、C-F モデルを用いたシミュレーションを行う場合は、前者のモデルのように交通をマイクロにとらえる信号制御モデルが適している。これらの信号制御モデルを適用するには信号の設置状況や制御状況データが必要となるが、これらのデータは入手が容易でない為、現地調査等から実際の信号設置や制御状況を調査するのが一般的である。しかし、本研究で対象とする避難シミュレーションのように広域エリアについてそれを行うのは多くの人手と時間を要する為、非常に困難を伴う。

そこで、本研究では、比較的簡易な方法で、広域なエリアにおける信号制御を再現するモデ

ルの構築を試みた。

5.2 信号制御モデルの概要

以前の水害避難マイクロモデルでは、経路上に信号は設置されておらず、歩行者は交差点でも各々が自由に好きな方向へ進む。しかし自動車を含めたシミュレーションを行う場合、この挙動は非現実的である。自動車が通行する避難モデルの場合、信号機による交通制御の再現は不可欠と言える。本研究では狩野らの提案したセルオートマトンモデルを参考に、次のような道路ペアに着目した制御モデルを検討した。一般に交差点においては、同時に両方向が通行可能となる道路のペアが1つ存在する。しかし、交差点には十字路だけではなく、三叉路や五叉路があり、どの道路同士がペアになるかは自明ではない。広範囲の避難フィールドを設定する場合、実際の制御状況を観察して再現するのも困難である。

そこで、本研究では数値地図 2500 から得られる Arc の接続関係から基本的にはより直線に近い2本の Arc をペアにするアルゴリズムを考案した。

信号機による交通制御は、一つの Node に結節した Arc のペアの設定と、ペアごとに設定された信号保持時間によって表現される。

5.3 信号設置アルゴリズム

信号制御を行う交差点にあたる Node について、下記の手順で道路ペアを設定していく(図 5-1 参照)。

- i. Arc の xy 平面上の傾き $\tan \theta$ を計算する(x:東西方向 y:南北方向)
- ii. 傾きの差が 0 に最も近い 2 本の Arc を第 1 ペアとする
- iii. 第 1 ペア以外の Arc において、傾きの差が最も近い 2 本の Arc を第 2 ペアとする
- iv. 以下、順次繰り返す
- v. Arc が残り 1 本になった場合、その Arc 1 本でペアとする

以上の手順で、三叉路以上の全ての形状の交差点について道路ペアを設定する。

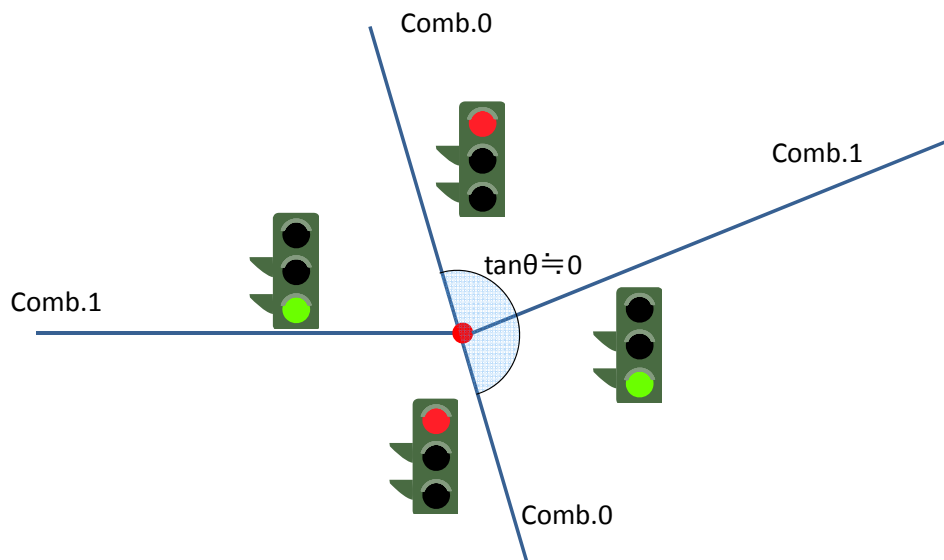


図 5-1 信号設置アルゴリズム模式図

5.4 信号制御アルゴリズム

道路ペアごとに信号保持時間を設定し、これによって道路の重要度や道路種別などを考慮した信号制御が可能となる。交差点での信号制御は以下の手順で行うものとする。なお、移動可能な状態とは、車両・避難者共にその Arc からその他全ての Arc への流入を許可されている状態を言う。

- i. 第 1 ペアに属する Arc を移動可能とする
 - ii. 第 1 ペアの信号保持時間が経過した後、第 2 ペアのみ移動可能とする
 - iii. 第 2 ペアの信号保持時間が経過した後、第 3 ペアのみ移動可能とする
- 以下繰り返し(図 5-2 参照)

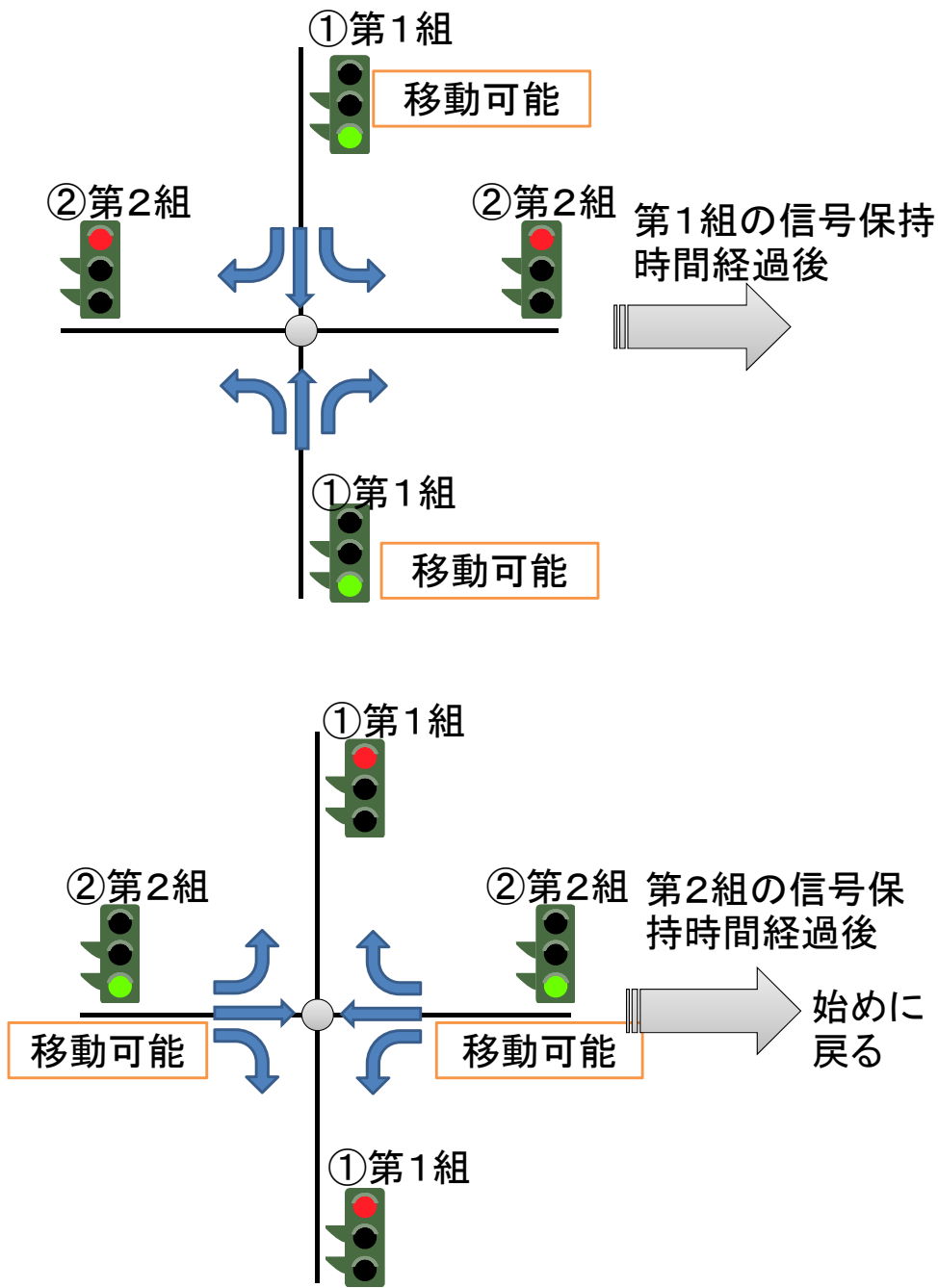


図 5-2 信号による交通制御

5.5 適用と考察

5.5.1 適用地域

適用地域は、第3章ならびに第4章における適用と同様に滋賀県長浜市(旧虎姫町)とした。

5.5.2 避難フィールドの設定

適用地域内の空間スケールは南北方向に3000m、東西方向に4000mとする領域を避難フィールドとして、シミュレーションを行う。

なお道路幅は、一般的な市町村道に適用される道路構造令の道路区分第3種3級を適用し、一律に片側6m(歩道3m・車道3m)の計12mとしている。なお、簡単の為に歩行者と車両の交差は考えず、それぞれ個別にシミュレートする。フィールド内の主要100交差点には信号機を設置し、交通制御を行う。Arcの各組の信号保持時間は60秒とし、60秒毎に信号を切り替える。避難所は適用地域のほぼ中央に位置する災害時避難場所の虎姫高校とする。

5.5.3 避難者の設定

歩行者5500人及び車両2000台～4000台を避難フィールド内にランダムに配置する。但し、混雑の避難行動への影響を把握しやすくする為、すぐに目的地にたどり着く周囲500m四方には配置していない。

避難者の歩行速度は、実際はみな一律ではない。年齢や性別、怪我や疾病の有無などによって異なる。岡本ら(2007)¹²避難行動中の速度を成人男性・成人女性・子供及び高齢者の3グループに分けて定義し、避難シミュレートすることを提案している。そこで本研究では、歩行者の基本の速度は、平均1.1m/s、下限0.55m/s、上限1.65m/sの分散 $\sigma^2 = 0.05$ の三角形分布に従うとする(図5-3参照)。車両については基本の速度8.3m/sとする。各避難者は一斉に避難を開始し、最短経路をとりながら目的地に向かって移動する。目的地にたどり着いた避難者は避難完了としてフィールドから除外する。

計算ステップは1秒とし、ステップごとに避難完了者数を計測した。なお、混雑や信号制御の影響のみを比較するため冗濫解析データは用いてない。

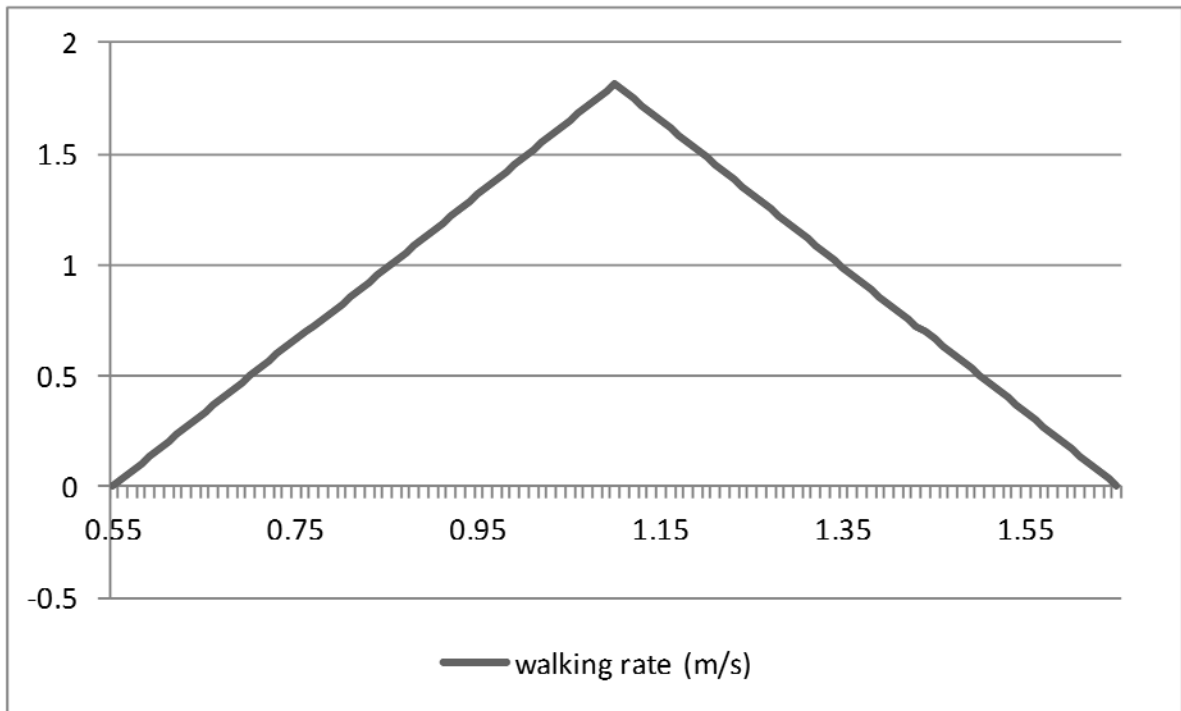


図 5-3 歩行者速度の分布（三角分布）

5.5.4 歩行者による避難行動

図 5-4 は、避難行動開始直後から 100 分後までの、避難完了者数を示したグラフである。点線が、混雑の影響を全く考慮しなかったケース、破線が信号機による交通制御を行わなかったケース、実線が信号機による交通制御を行ったケースである。

混雑を考慮しないケースでは避難開始後 53 分までにはほぼ全ての避難者が避難完了している。他 2 ケースでは、時間が経つにつれて避難完了者数の伸びが緩やかになるが、これは目的地付近や多数の歩行者が流入する経路で滞留を起こしているためであると予想される。信号による交通制御を行ったケースは、行わないケースに比べて初めの時間帯は避難完了者が少なくなるが、38 分あたりで逆転する。最終的な避難完了者数も 3227 人となり、交通制御を行わないケースの 2607 人より多くなる。

これにより、水害避難時のような多くの歩行者が一カ所を目指して移動する場合でも、信号機による交通制御は歩行者の滞留抑制に一定の効果がある。

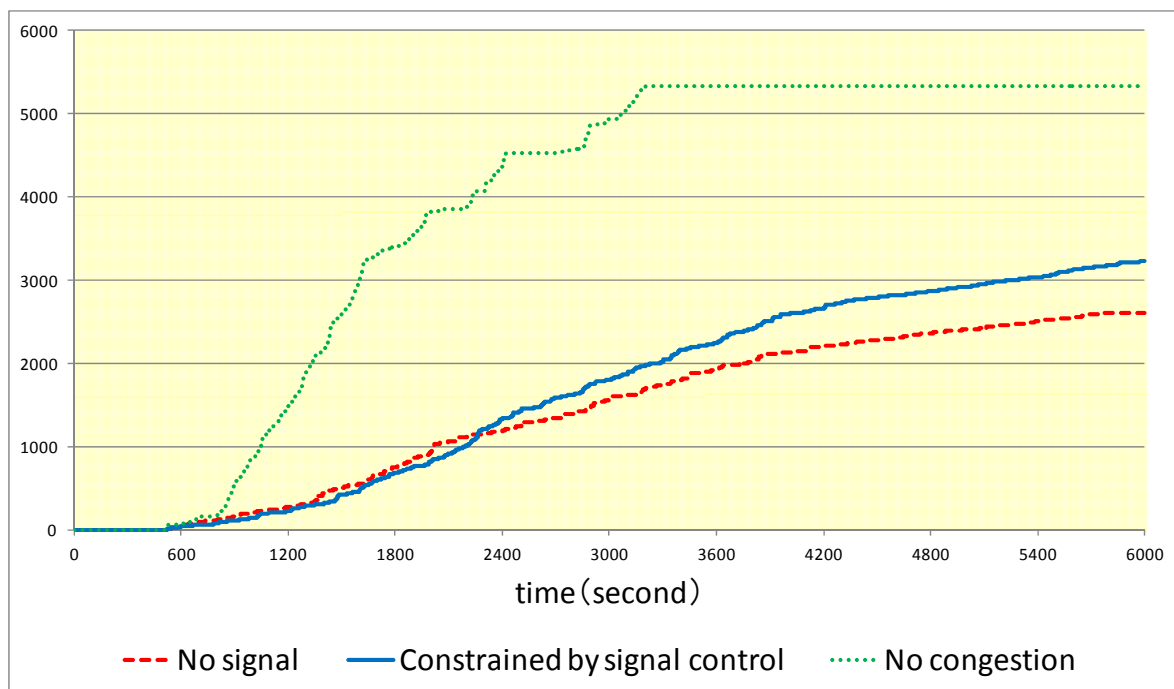


図 5-4 歩行者の避難行動における信号の影響

5.5.5 信号保持時間の影響

図 5-5 は、信号保持時間を 30 秒、60 秒、90 秒、120 秒と様々に変え、その他の初期条件は同様にしてシミュレーションを行った結果を示したグラフである。信号保持時間を 30 秒としたケースでは、2 時間以内の避難完了者が 2263 人となり、信号を設置しないケースよりも少なく、かえって交通障害を引き起こしていることがわかる。信号保持時間を 90 秒としたケースでは、避難完了者が最も多く 3395 人であった。しかし、信号保持時間が最長の 120 秒のケースでは、2616 人となっている事から、信号保持時間には、街路や避難行動の状況に対して適切な範囲が存在することがわかる。しかし、現状の信号保持時間は、各方向が一律では設定されておらず、接続する道路の重要度や交通量によって、それぞれの方向の保持時間の設定は適切な値が定められているはずである。本章で示している信号制御アルゴリズムの再現方法は、全国の街路について遍く入手可能な数値地図 2500 の Arc データを基本としているが、このデータには道路の大きさを表す道路構造令による区分や、国道や市道など道路の行政上の区分を示すデータの含まれていない。ただし、同梱されている Attr データには、国道 1 号や県道 1 号など道路の名称がテキストデータとして記載されている。これらの道路名称のデータから、道路の重要度を判断し、適切な信号保持時間の設定を交差点ごとにおこなえば、より実際に近い信号制御を再現できると考えられる。

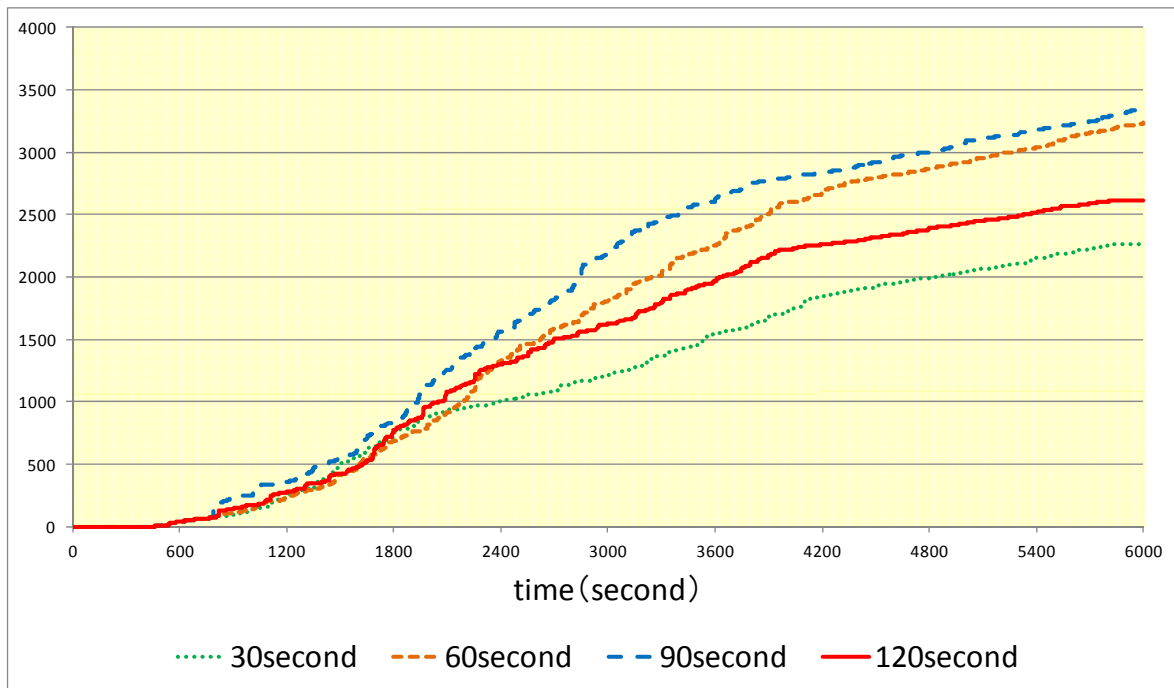


図 5-5 信号保持時間の影響

5.5.6 自動車による避難行動

避難者として、歩行者を自動車 2000 台に置き換えた。全ての設定は 4.6 節に準じている。結果を図 5-6 に示す。

4 章で示した通り、信号制御を行わない場合、交差点付近では他の道路から流入してきた自動車の衝突検知ができない為、自動車の著しい渋滞が起こっていると考えられる。また、車体が完全に重なってしまう衝突も多数起こっていると考えられる。本モデルでは、衝突による自動車の故障などは扱っていない為、このような場合は通常の追従行動をとっている。

信号制御を取り入れることで、2 つ以上の方向から同時に自動車が流入するという事態を避けられた為、避難開始後 40 分まではスムーズな避難所への移動を促したことになる。その後、避難完了台数の伸びが緩やかになるが、これは目的地近辺での渋滞を表していると考えられる。

しかし、浸水が起こっている際に信号機が正しく機能しているかどうかは保証できない。また、多くの自動車が信号制御に従わない場合も考えられる。よって、自動車が信号の制御に従わなかった場合の衝突事故の発生やそれによる交通障害も、水害時などの緊急状況下では十分に発生する恐れがあると考えられる。

本研究で行う対象としている避難シミュレーションにおいて、このような緊急状況下の表現を可能にすることは、検討できる避難シナリオのオプションを増やすことにつながると考えられる為、今後に取り組む課題としたい。

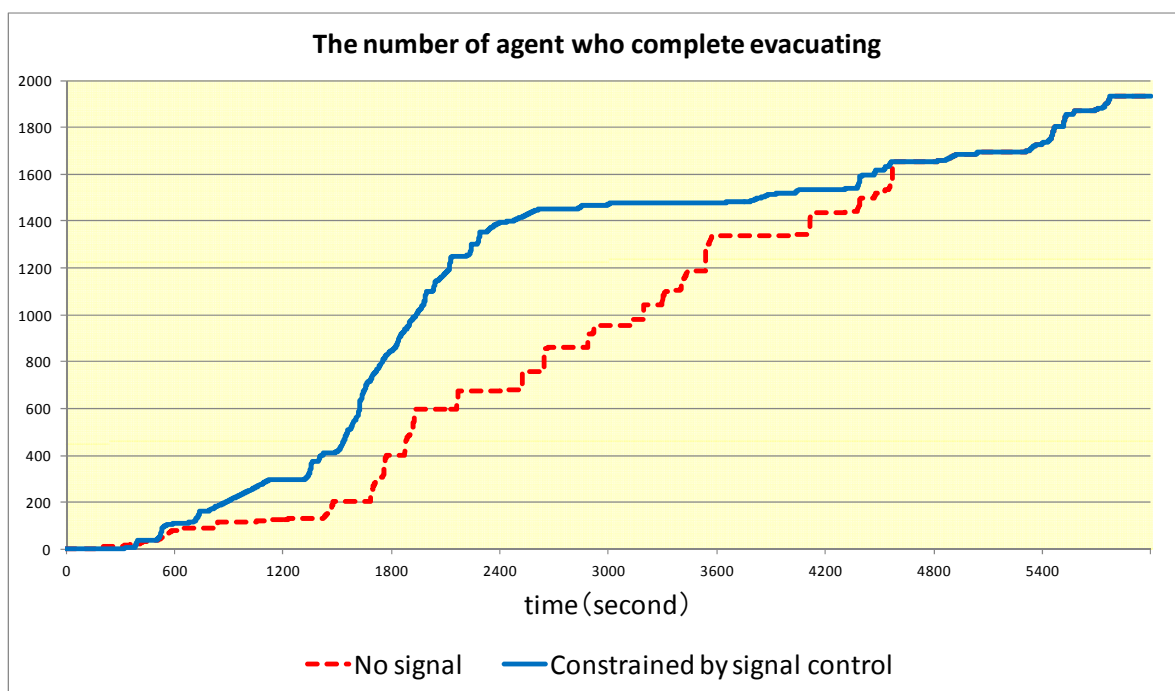


図 5-6 自動車による避難行動

5.6 結語

本章では、道路ネットワークを用いたシミュレーションにおいて、信号制御を簡易なモデルで可能な限り現実的に再現する方法について考察した。特に自動車を対象とした交通シミュレーションを行う場合、信号制御を表現することは必須となるが、シミュレーションの対象領域の信号設置状況や制御状況のデータは容易に入手することはできず、また実地の調査にも困難を伴う。そこで本章では、それらを数値地図等の簡易な道路ネットワークデータから再現する方法を開発し、その妥当性を検討した。

実際の地域に適用した結果、多くの歩行者が避難所等の特定の地点を目指して移動する災害避難時においても、信号による交通制御は避難経路上の避難者の滞留等を抑制する効果がある可能性が示された。ただし、信号保持時間等の設定は、避難経路や避難行動の実際に合わせて適切に行われる必要がある。また、自動車による避難行動においては、避難開始の初期においては渋滞や衝突を抑制する効果がある事が確かめられた。

今回は、全国の街路について手に入る、数値地図 2500 が持つデータから、信号設置と信号制御を簡易に再現するアルゴリズムを開発したが、その設置箇所の特定は手作業によっている。それは、数値地図 2500 のデータでは、幹線道路や一般道路などの道路種別の属性までは入手

できないからである。

今後の課題としては、信号の設置箇所を容易に再現する仕組みの考案や、信号ごとの保持時間の設定を変える、複数の信号で連動した制御を再現するなど、より現実に近い信号制御を再現する為のモデル改良が必要となる。また、緊急時など信号の制御下でない場合の自動車交通も合わせて表現できるようにすることは、避難計画を検討する上で有用であると言える。

第5章 参考文献

- 1 赤羽,大口,吉井,堀口:交通シミュレーションモデルの実用化に向けての課題,土木計画学研究・講演集 No.20 (1), 2002
- 2 中川大,伊藤雅,小出泰弘:公共交通と自動車交通を統合した都市交通シミュレーションシステムの構築,土木情報システム Vol.7,pp. 97-104,1998
- 3 尾崎晴男:街路網信号制御の評価シミュレーションモデル(DESC),交通工学, No.7, pp. 31-37, 1989
- 4 横井昭,宮田晋,田村恒治:交通管制マクロシミュレータ,交通工学研究発表会論文集,pp. 37-40,1993
- 5 別所則幸,内山久雄:交差点シミュレーションモデルの開発とその適用,交通工学研究発表会論文集,pp. 29-32,1993
- 6 飯田恭敬,藤井聡,内田敬:道路網における経路選択を考慮した動的交通流シミュレーション,土木学会論文集,pp. 37-47,1996
- 7 堀口良太,片倉正彦,桑原雅夫:都市街路網の交通シミュレーター-AVENUE-の開発,交通工学研究発表論文集,pp. 33-36,1993
- 8 M.D. Hall D. Van Vlietetc : Saturn –a simulation– assignment model for the evaluation management of schemes, Traffic engineering & Control, No.4,1992
- 9 Dynamics Traffic Simulation “TRANSIMS”, Univ. of OXFORD transport studies unit, 1980
- 10高山,亀谷,中村,飯田:信号交差点を組み込んだ時間交通量配分モデルによる渋滞列長の分析,土木学会第47回年次学術講演会講演概要集,pp432-433,1993
- 11狩野,小塚:CA法による広域道路交通シミュレータを用いた経路案内方式の評価,情報処理学会,高度交通システム研究会 ITS-10-6, pp. 37-43 ,2002
- 12 岡本睦,目黒公郎:避難行動シミュレーションに基づく避難困難度マッピングシステムの構築,生産研究,Vol.59,No.3,pp. 37-40,2007

第6章 水害避難行動モデルを用いた 避難計画の評価

6.1 概説

水害時の自動車について、考えられる契機となったのは長崎大水害(1982)である。死者 299 名のうち 12 名の方が自動車による走行中に車内で亡くなったとされている。台風襲来により長崎市内で 10 日間の積算雨量が 1000mm を越え、市民が連日の警報に慣れてしまい危機感が薄らいだところに、帰宅時間帯である夕刻に時間雨量 100mm を越える峻烈な雨が降った為、十分な対策がとられないまま多くの方が被害にあったと指摘されている¹。こうした水害時には、走行可能区域が制限された事によって、深刻な交通障害起こる可能性がある。このような交通障害の事例としては、兵庫県南東部水害(1989)が挙げられる。西宮市で時間雨量 112mm を記録し、国道 2 号・国道 171 号などの浸水で深刻な交通障害を引き起こしたとの記録がある。そこで、深草・戸田ら(2008)²は、内水氾濫時の交通障害発生を予測する手法を検討している。

北関東・南東北豪雨災害³(1998)において、大規模な住民避難が行われた郡山市においても、徒歩による避難が原則とされていた。しかし、郡山市においては二度にわたって発令された避難勧告・指示において、住民の大半が車を利用して避難を行っており、結果として郡山市当局の徒歩を原則とした避難計画は住民に受け入れられなかった。第一回目の避難勧告・指示発令時には、徒歩による避難が 11% となっており、それ以外のほぼ全てが何らかの形で自動車利用の避難を行った。しかし、市内各所では、道路の冠水箇所を始点とした激しい渋滞が発生し、自宅から避難所までのわずかな距離（郡山市では、自宅から避難所までの距離を最大 2km として計画されていた）に、5~6 時間も要した事例が見られた。この渋滞の最中に破堤していたら、その被害は極めて大きなものとなったと考えられる。一方、第二回目の避難勧告・指示発令時には、徒歩による避難が 6% に減少し、避難率が大きいことも相まって、車利用の避難はさらに増加した。しかし、この二回目の住民避難においては、ほとんど渋滞は発生しなかった。住民へのヒヤリング調査によれば、その主たる理由は、第一回目の避難において、住民は道路の冠水箇所を把握しており、そこを外した避難経路を選択したからである。

このように、また避難者の意識が徒歩によるか自動車によるかという避難手段の選択に大きく影響を及ぼし、それらの選択の結果が避難の成否に大きな影響を及ぼす。

また、特に自動車による避難を検討する際には、それによって引き起こされる交通渋滞を考慮せねばならず、付近に幹線道路などがあるなどして普段から交通量の多い地域においてや、通勤時間帯で交通量が多い時間帯に水害が発生した場合は、避難行動中の自動車のみならず、そういった平時の交通量も、避難の成否に大きく関わる事を考えなければならない。

多くの地域の避難計画が徒歩による避難行動を原則としているものの、実際には避難を検討する際に、自動車の使用や存在を無視することはできない。そこで、徒歩による避難者と自動車による避難者が混在するなかで避難が行われた場合、それぞれの避難者は相互にどのような

影響を及ぼすのか、また避難フィールドにおいてどのような事がおこるのかを明らかにするシミュレーションを示すことは、地域住民の水害に対するイメージーションを刺激し、ひいては防災意識を向上させる点で大きな意義があるといえる。

そこで、本章では、第4章で示した歩行による避難シミュレーションモデルと第5章で示した自動車を用いた避難シミュレーションモデルを統合し、避難者として歩行者と自動車を同時に扱えるモデルとし、さらに平時の自動車交通量も考慮した上で水害避難シミュレーションを行い、考察する。

6.2 本研究で用いる氾濫解析データ

滋賀県によって平成25年に公開された地先の安全度マップ⁴に用いられた氾濫解析データを用いる。

6.2.1 設定する外力

同マップにおいては、外力として滋賀県雨量強度式から作成した、中央集中型ハイエトグラフ(1/10, 1/30, 1/50, 1/100, 1/200, 1/500, 1/1000)が用いられている。本節におけるシミュレーションでは、大規模な降雨発生時の避難シミュレーションには100年確率の降雨(最大時間雨量109mm)を用いて検討する。くわえて、浸水深が歩行や自動車による避難行動の遂行にどのような影響を与えるかを明らかにするため、比較的軽度な降雨発生時における避難シミュレーションを行う。その際には、被害が決定的になりすぎる事を避けて10年確率の降雨(最大時間雨量50mm)を用いて検討を行う。

6.2.2 解析方法

地先の安全度マップ⁴で用いられた氾濫解析においては、特定の河川の氾濫ではなく、複数の河川の氾濫や内水の氾濫を表現している。空間的解像度としては50m×50mメッシュが用いられ、各メッシュへの流入量と流出量の差分が、そのメッシュにおける浸水量とされている。

対象流域の降水は、流出域(山地部)、河道域(河川・洪水調節施設・水路)、氾濫域(堤内地)を経て氾濫する。流出域(山地部)の解析は、上流部に大きな山地流域を持つ河川については、流出域からの流量(流量の時間的変化:ハイドログラフ)が合成合理式により算出されており、その流量は河道域の上流端に与えられている。河川のうち、氾濫原を流れる河道断面データの測量されている区間は、次元不定流モデルを構築している。また、越水する場合、解析水位と堤防高等の比較により氾濫原への氾濫量が越流公式により算出されている。氾濫域においては、地盤高データ(50m×50m)、盛土ラインデータ、開口部諸元等を考慮した平面二次元不定流モデルを構築している。なお、洪水流量は河道域からの氾濫と堤内地への降雨により発生するものとされている。

本研究においては、このうち破堤条件は計画高水位を超えた時点で破堤するH.W.L破堤とし、

築堤区間は越水してすぐに破堤開始し、1時間後に終局状態になると想定して計算された氾濫解析データを用いる。破堤幅・破堤高さは、氾濫シミュレーションマニュアル⁵(案)にしたがっており、浸水深は15分ピッチで更新されている。

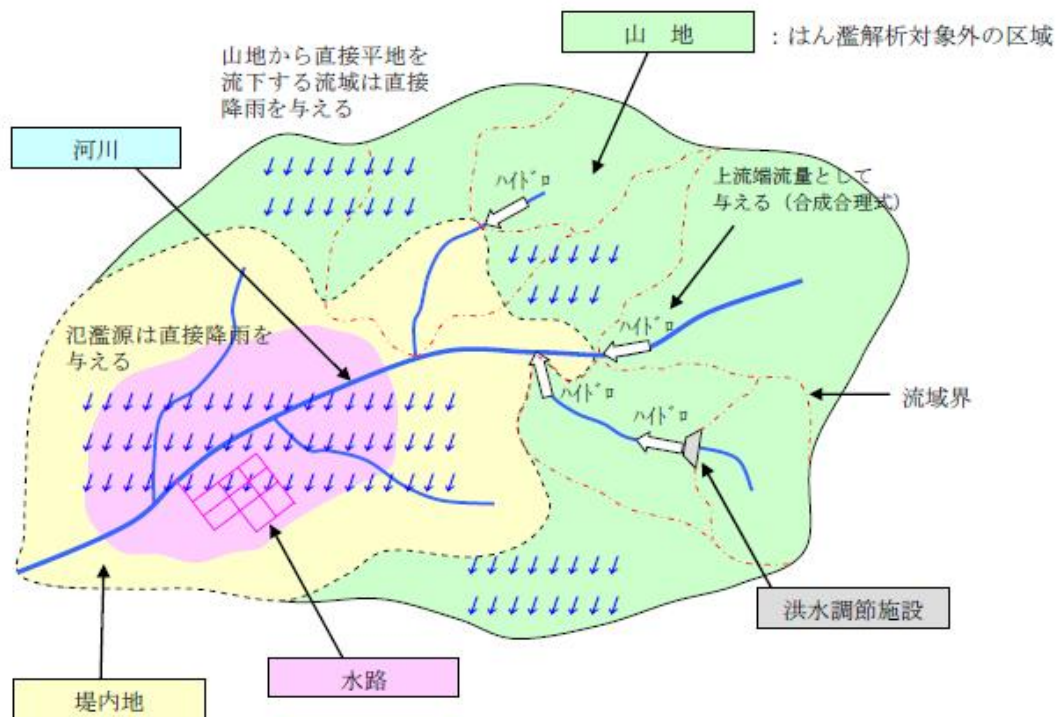


図 6-1 氾濫解析イメージ (地先の安全度マップ⁴ 解析条件より)

http://www.pref.shiga.lg.jp/h/ryuiki/tisakinoanzendo/files/map_kaiseikizyouken_1.pdf

6.2.3 対象区域における浸水想定

第2章～5章でも対象とした、滋賀県東浅井郡虎姫町の一部を対象地域とした。

参考として、図 6-2 に対象地域の最大浸水深図を示す。ただし、これらの最大浸水深は、「破堤なし」、「H.W.L 破堤」、「越水破堤」の3ケースで計算された結果の最大包絡値である。

たとえば、破堤条件を H.W.L 破堤とし、設定外力を 10 年確率降雨として氾濫シミュレーションを行った場合、降雨開始の約 8 時間後に姉川にて破堤がおこる(図中 6-2 丸印)。その約 2 時間後に高時川・田川にて同時多発的に破堤が起こり、その約 2 時間後にはエリアの約 10%にわたって 0.5m 以上の浸水が見られるようになる。

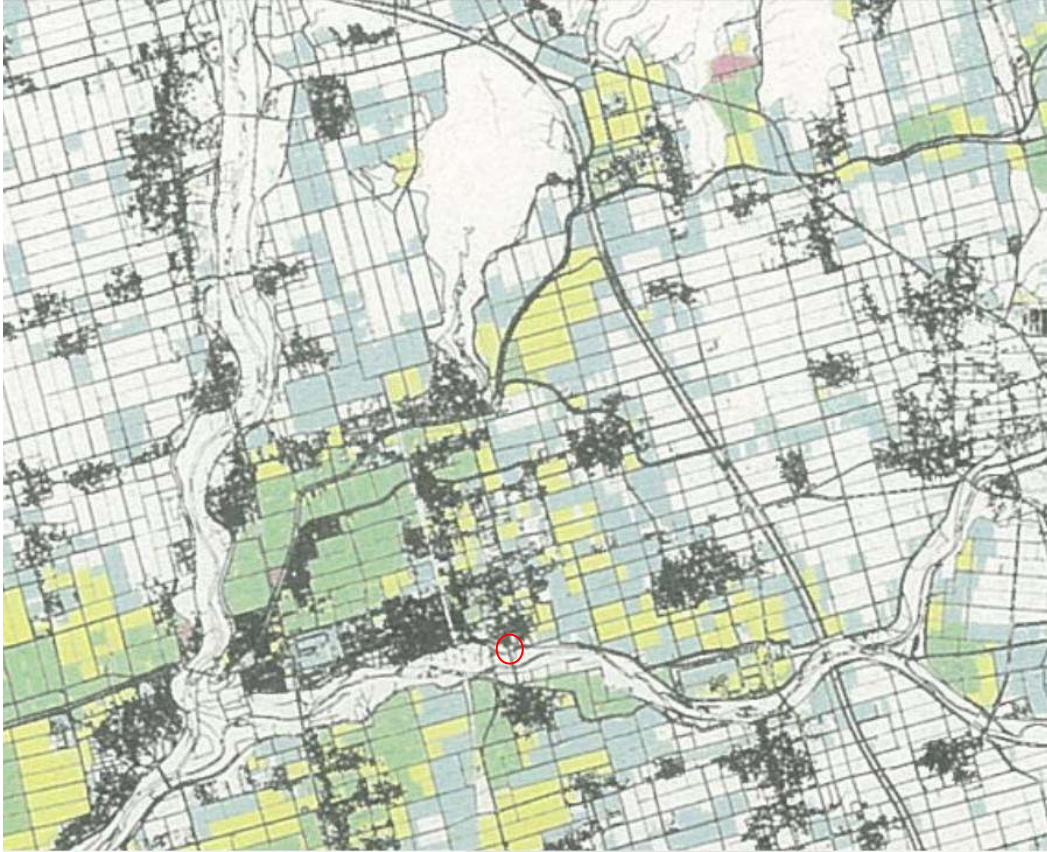


図 6-2 地先の安全度マップ 4- 最大浸水深図(10 年確率降雨)

http://www.pref.shiga.lg.jp/h/ryuiki/tisakinoanzendo/map_sinnsuisinnzu.html

6.3 避難者の設定と行動モデリング

6.3.1 避難者の設定

初期条件として人口は 5,582 人とし、地域住民が所有する自動車の数は 2000 台とする。

2000 台のうち、地域内で稼働状態にあった自動車を約半数の 1000 台とし、これらの自動車に住民のうち約 2500 人が乗車して避難開始するとした。これは平成 22 年度国勢調査による滋賀県の平均世帯人数 2.73(人)による。

つまり、約 3000 人を歩行による避難者として設定し、約 1000 台が避難行動を行う自動車として設定する。なお避難者の初期位置は避難フィールド内にランダムに配置する。

姉川・高時川ともに天井川となっており、これらの河川がひとたび破堤すれば、姉川と高時川に囲まれた部分にある町内の全域に大量の水が流れることが想定される。実際、1959 年と 1975 年には台風による洪水が原因で破堤し、多くの浸水被害を経験している。また、両河川の増水時には、河床の低い田川への逆流現象がたびたび報告されている(畑山, 2009)⁶。そこで、

避難者は地盤高が高く浸水が見られない町の北東部や高時川の西側か、浸水の比較的軽微な姉川の南東側に進路をとって、危険な区域からの離脱を試みることにする。

エリアの境界線付近で安全な地域に数か所設けられた避難場所に到達した時点で避難完了とする。図 6-3 中に青丸で示した地点を避難場所とする。フィールド内にランダムに配置された避難者はそれぞれ最寄りの避難場所を目指して最短経路をとりながら避難し、到達した時点で避難完了とする。

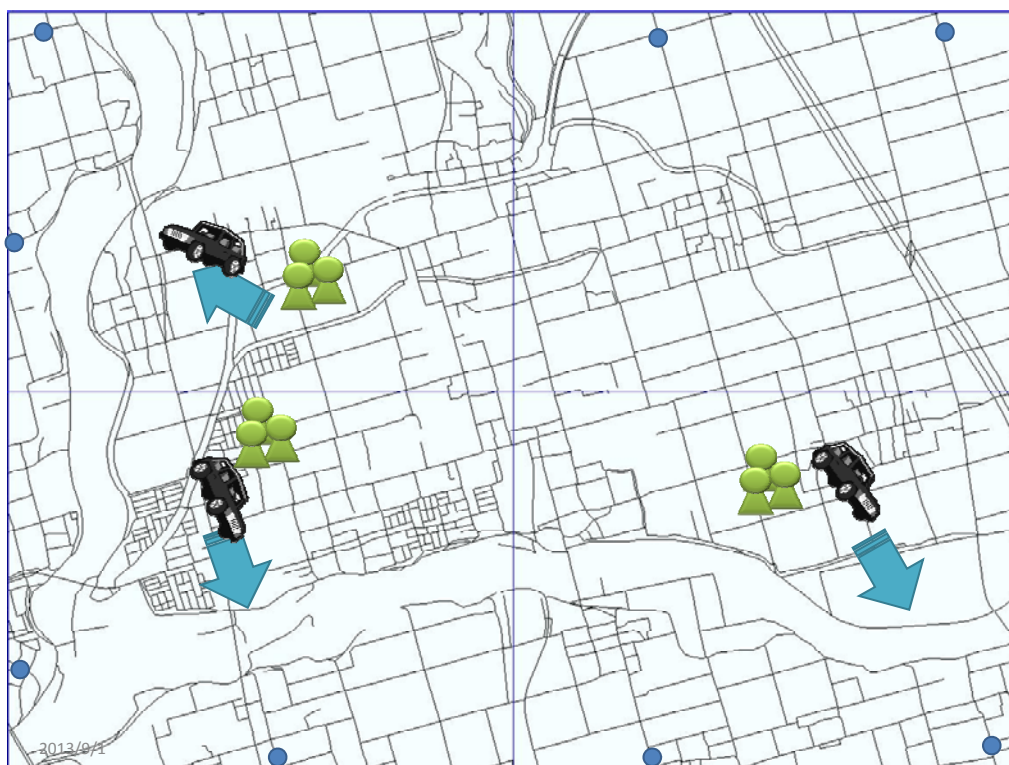


図 6-3 避難場所配置と避難シナリオ想定

6.3.2 歩行者と自動車の交錯を表現する行動モデリング

基本的には、歩行者については第3章で示した回避行動モデル、自動車については第4章で示した追従走行モデルを用いる。しかし、歩行者と自動車を同時に取り扱ってシミュレーションを行う場合には、それらの相互の影響について検討する必要がある。道路の両端に歩道がある主要道路においては、歩行者は歩道を通行し、自動車は車道を通行する事とされており、その通行領域は区別されている為に自動車と歩行者の交錯は起こらない（図 6-3 参照）。

しかし、全ての道路が道幅に余裕がある歩道付き道路として考えるのは、現実の状況とはかなり相違がある。現実には、道幅が狭く、歩道と車道の区別がはっきりとしていない生活道路

が多数存在し、こうした道路が避難経路となった場合には、歩行者と自動車の交錯が起きる事が考えられる。また、歩行者による混雑が原因で、自動車の渋滞が引き起こされるケースも考えうる。

そこで、本研究で用いる自動車挙動モデルでは、歩行者が多く、道の両端だけではなく中央付近にまで人があふれているような状況では、自動車は本来の速度で通行ができない様子を再現する。歩行者は、歩道付き道路を走行する場合は歩道内を通行するとし、自動車の交錯は起こらない。しかし、歩道無し道路を通行する場合は、基本的に道路の端を歩こうとするものの、前方の他者を追い越そうとする時などに、道路の中心寄りにはみ出ることになり、その場合、道路の中心寄りを走行する自動車の進路上に入ることになる（図 6-4 参照）。

このような自動車と歩行者の交錯を表現するにあたり、それぞれを以下のように設定した。

自動車は、進路上に歩行者を認めた場合、その歩行者の位置を停止位置とした減速停止モードに入るとした(4.3.2 参照)。また、歩行者については、歩道なし道路を通行する場合に限り、追い越し行動などの際に道の中央寄りに出てしまった場合は、だんだんと端に寄りながら通行するように回避行動アルゴリズムを修正した。修正したアルゴリズムは図 6-5 の通りとする。

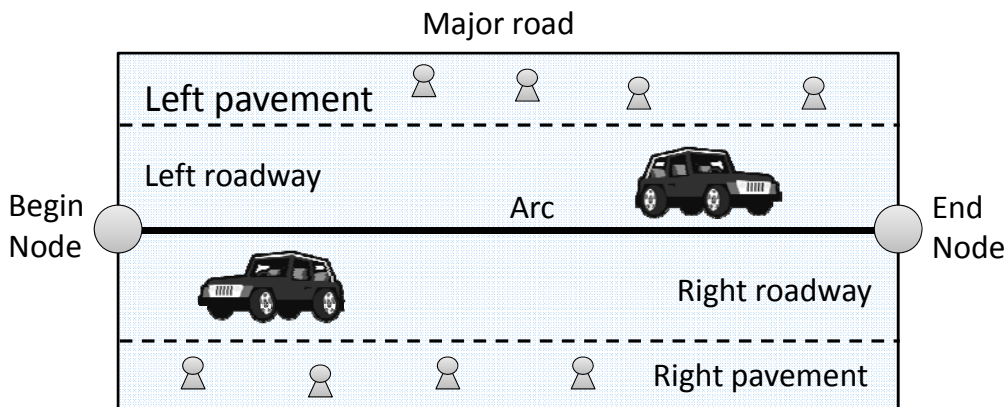


図 6-3 道路モデリング（幹線・主要道路）

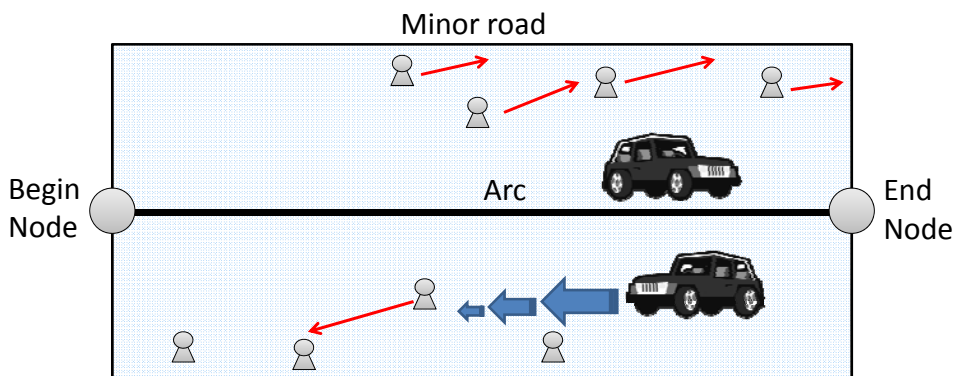


図 6-4 道路モデリング（非幹線道路・生活道路）

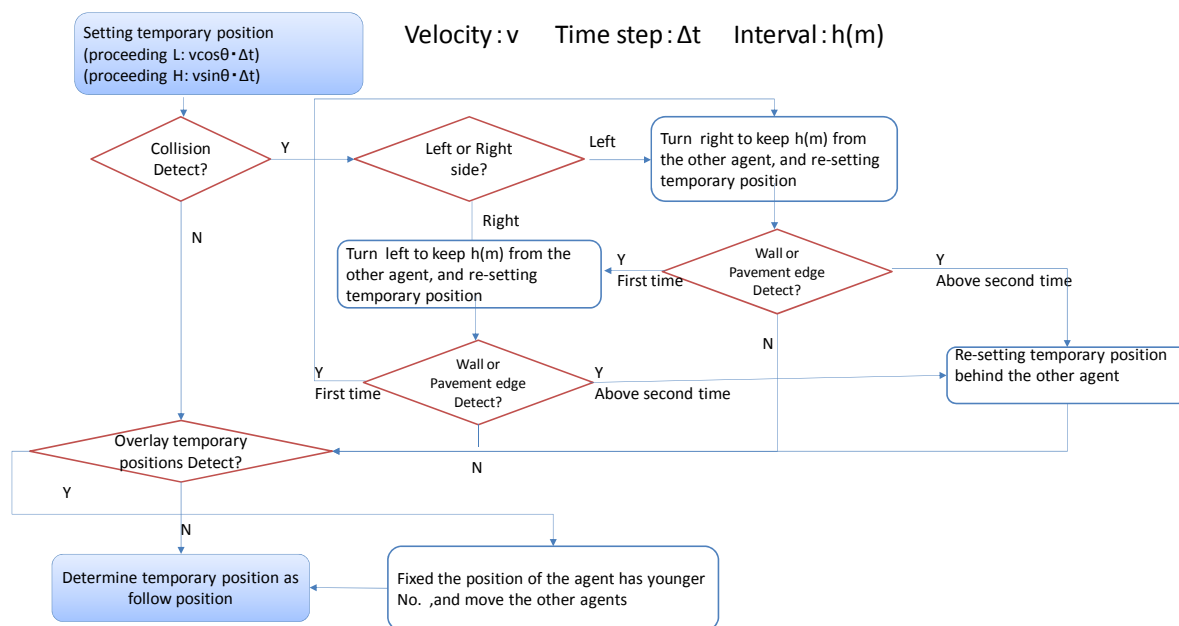


図 6-5 歩行者回避行動アルゴリズム（自動車同時シミュレーション用）

なお道路幅は，幹線道路については一般的な市町村道に適用される道路構造令の道路区分第 3 種 3 級を適用し，一律に片側 6m（歩道 3m・車道 3m）の計 12m とし，その他の道路については片側 3m（歩道・車道の区別なし）の計 6m とした。

6.4 平常時の自動車交通量の再現

6.4.1 交通量データ推測手法の現況と限界

自動車を使用した避難シミュレーションモデルを構築する場合，平常時の自動車交通量を見捨てることはできない。水害が起こっているまさにその時も，区域内にはそれぞれの目的地を持って平時の通行を行っている自動車が存在するはずである。歩行者のみを対象とする場合は，区域内の住民の全ては避難場所に向かって一斉に避難をするという設定でも，行政による避難勧告や指示の影響評価という点では意味があった。しかし，水害時に全ての自動車が避難場所への目的地変更，あるいは危険区域からの離脱を行うとはおよそ考えにくい。一方で，洪水にもかかわらず平常時と同じ行動をする自動車が被災する状況や，それが避難する人や自動車の障害となることも考えられる。

以上の観点から，避難行動の分析を行う対象区域の平時の状況のモデリングは重要であり，そのための平時交通量のデータは必須と考えられるが，その入手はそれほど簡単ではない。

最も一般的で容易に手に入る交通量データは，5 年に一度実施される道路交通センサスの一般交通量調査である。これは 5 年に 1 度，全国の主要道路上の約 36,000 拠点において，1 日の

交通量を調査するものである。また、そのうち 500 拠点においては常時観測が行われている。

4.1 にて示した Q-K タイプの自動車交通シミュレーションモデルの場合は、適するシミュレーション領域が広域であり、エリア間を移動する交通量をおおまかに把握できれば良いのでインプットデータとして用いる平時の交通量のデータは、道路交通センサスのデータで多くを賄うことができるか、わずかな加工にて用いることができる。不足があったとしても、平日の交通量から、休日の交通量を推測する方法や、常時観測拠点のデータから、周辺の観測拠点のデータを推測する方法⁷など、様々な推測手法が確立されている。

しかし、C-F タイプの自動車交通シミュレーションモデルの場合は、特定の交差点の周囲など非常に狭いエリアを対象にしたものが多く、対象領域が観測拠点を含む、あるいは近傍でない限り、センサスのデータを用いることはできない。道路交通センサスの観測拠点の密度では、調査対象としたいエリアをカバーできてない恐れがある。現に 6.3 にて示した本研究の対象領域内で平成 22 年度の道路交通センサスで調査が実施された拠点はわずか 1 拠点であった。センサスの拠点としては、さらに 4 拠点があるがいずれも平成 22 年には調査が実施されておらず、前回の H17 年の調査結果に基づく推測値がデータとして計上されている。しかしながら、推測手法が明らかにされているわけではなく、また、調査が実施されなかった 4 拠点のうち 3 拠点については、12 時間交通量、24 時間交通量とも全く同一の数値が掲載されているなど、不自然な点が見られた。

多くの C-F タイプモデルは、多くの場合において、これらの公的データの不足を現地における実測にて解決している。前述の通り、C-F タイプの扱う領域は基本的には非常に狭いため、必要なデータを人力の観測でまかなう事はある程度可能である。

とはいえ、本研究で行う避難シミュレーションのように、広域なエリアを対象領域とする場合、必要な交通量データの全てを実測にてまかなうのは、多くの労力と費用を要する為、現実的には困難である。そこで、既存のデータを補う形で、いくつかの重要な地点にて実測を行い、それらを元に、エリア全体の交通量を推測するのが現実的なアプローチと言える。

6.4.2 断面通過交通量データの OD データへの変換

本研究で用いている水害避難マイクロモデルのように Agent の OD(起終点)データに基づいてシミュレートするモデルの場合は、道路断面の通過交通量データであるセンサスとはデータ形式が違うので用いることはできない。これは、多くの C-F モデルが直面する問題であり、小根山ら(1997)⁸は、道路の断面交通量の観測データから OD データを推測する手法を提案した。この推定手法では、自動車に途中の経路選択を許すようなモデルで用いる場合や、ループするような動きをする自動車を想定することも可能としている。しかし、単純に各自動車に OD を一対一対応で決める簡易な設定の場合は、(一般社団法人)交通工学研究会が交通シミュレーションモデルの標準化を目指して設立した交通シミュレーションクリアリングハウス⁹において、上記の問題点を解決する為に以下のような方法を用いることができると紹介されている。

[シミュレーションクリアリングハウスによる OD 交通量データの推測手法]

1. 各ネットワーク端点（起点）からの流入交通量($N_1, N_2 \dots N_n$)を与える（観測拠点データを元にした推測を伴う）
2. 領域内の交差点において、流入方向別に交差点分岐率($r_{(1,d_a,d_b)}, r_{(2,d_a,d_b)} \dots r_{(n,d_a,d_b)}$)を与える。たとえば、 d_a, d_b は番号1の交差点に結節する道路を示し、道路 d_a から進入して d_b から出ていく交通量の分岐率は $r_{(1,d_a,d_b)}$ で表される。交差点分岐率に従い、($N_1, N_2 \dots N_n$)は交差点に到達すると各方向に割り振られる。
3. 各観測（推測）地点における、各ネットワーク端点を起点とする通過交通量の和が断面交通量($Q_1, Q_2 \dots Q_m$)を再現するように端点からの流入交通量を割り振る

$$Q_m = \sum_{k=1}^n \{r_{(1,d_a,d_b)} \cdot r_{(1,d_b,d_a)} \cdot r_{(2,d_a,d_b)} \dots \dots r_{(m,d_a,d_b)}\} N_k \quad (6.1)$$

つまり、上式に示す通り、各端点から観測地点にいたるまでの交差点分岐率を流入交通量に乗じたものの和が、観測地点の断面交通量を示すように流入交通量の同定を行う。

4. 割り振りの結果の終点を求め、OD 交通量データを作成する。

ただし、この方法で得られるのは、あくまで断面交通量と整合性がとれた見かけの OD 交通量である。また、一つのネットワーク端点からの流入を考えた場合、端点付近が最も交通量が多く、先に進むに従って先細りになっていく特性を持つことに留意しなければならない。

上記の方法を参考に本研究では、以下の方法で平時の交通量を与える。

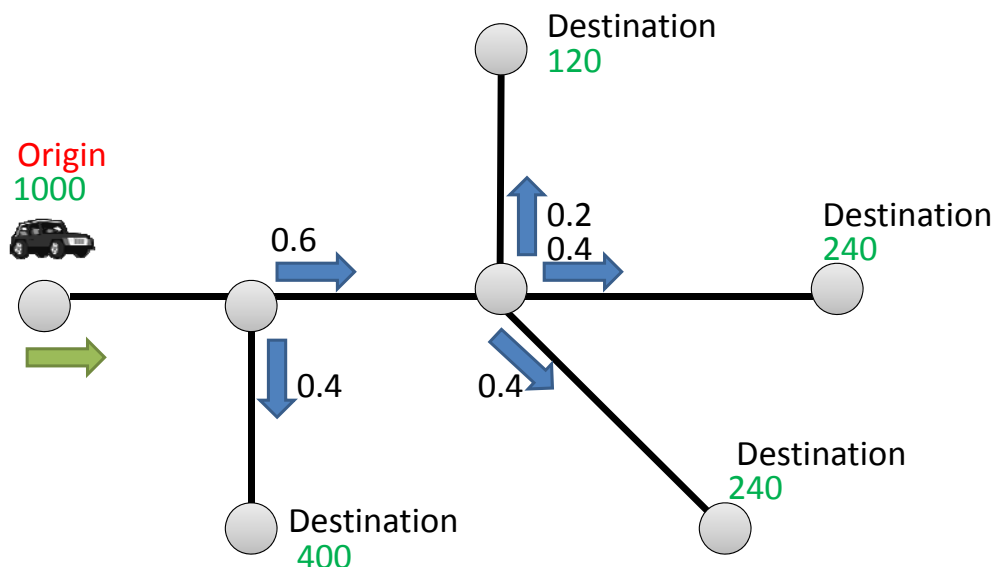


図 6-6 断面交通量からの OD データ再現

6.4.3 対象地域の平時交通量推測

本研究では、平時の交通量を再現できる OD データの推測を下記の要領にて行った。

まず、H22 年度交通センサスと現地調査にて得られた主要道路の断面交通量と主要交差点の進行方向別の分岐率を元に、地域内のその他の地点の断面通過交通量の推測値を得る。続いて、断面通過交通量の推測値を、6.4.2 で示した方法を参考に OD データに変換する。

対象領域内の H22 年度交通センサスの調査が行われた地点は図 6-7 の通りである。

図中の赤丸で示した地点が、センサスの調査実施拠点とされているが、実際の調査が行われたのは 510 号線上の図中に赤丸で示した 1 点のみで、黒丸で示した残りの 4 点は推測値とされている。上の数値は 12 時間交通量を表し、下の数値は 24 時間交通量を表すとしている。しかし、そのうち 3 点については全く同じ数値が掲載されるなどしている為、これらの地点のデータは精査を必要とした。

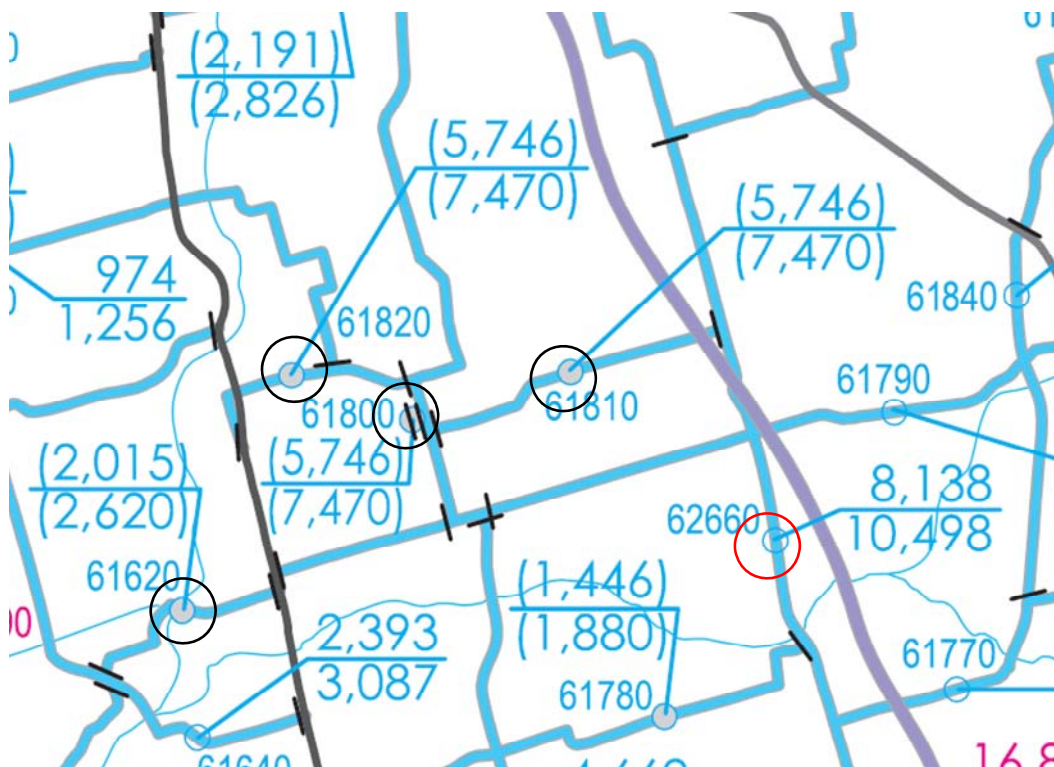


図 6-7 12 時間・24 時間断面交通量（平成 22 年度道路交通センサス）

これらの道路交通センサスのデータを補い、前項に示した方法で対象地域の OD データ再現するデータ再現する為に、平成 25 年 7 月 9 日に対象地域において現地交通量調査を行った。

【交通量調査項目】

断面交通量調査：5 地点

交差点別進行方向調査：6 地点

うち、1 地点については道路センサスの調査拠点とする。

調査地点は、図 6-9 に示した通りである。図中の道路を横断する黒い線は、断面交通量調査の実施地点で、△印は交差点別方向別調査の実施地点である。

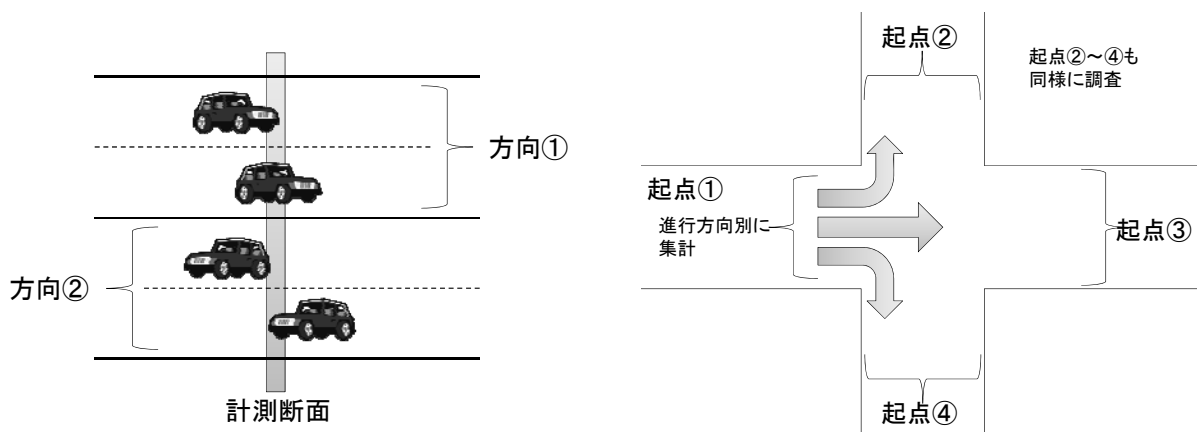


図 6-8 断面交通量・交差点進行方向別調査模式図

①断面交通量調査

道路の断面を通過する自動車台数を計測する。片側 2 車線以上ある場合は、同一方向の交通量を合計して計測する。調査時間は午前 10 時～午後 12 時の間の 1 時間程度とする。

②交差点進行方向別調査

交差点において、各起点からの交通量を、直進・左折・右折などの進行方向ごとに集計する。この調査の目的は、各方向への交通量の割合を示す交差点分岐率を定めることにあるので、各起点の調査時間は 5 分程度とした。図 6-9 中⑩の調査地点など、交通量が少ない箇所ではある起点からの通行が確認できない方向などがあつた。その場合の、交差点分岐率は 5%と定め、残りの 95%を他の進行方向の交通量の割合にしたがって案分した。



— 断面調査実施地点 △ 交差点方向別調査実施地点

図 6-9 調査実施地点 (Google ZENRIN)

調査を行ったのは午前中(10時～12時)であり、通勤時間帯ではないが、所見としては8号線や273号線など地域間のバイパスとなっている幹線以外では、ほとんど平常交通が観られない。あったとしても、避難の妨げになるほどの交通が発生しているとは考えにくかった。

ただ、危険区域からの西側への離脱を考える場合、上記の2幹線は非常に重要な経路となるので、避難シミュレーションをする上でこれらの道路については平時の交通量は看過できないと考えられる。

現地調査によって得られた時間交通量のデータを、今回は河野ら(2010)⁴が用いた、常時観測データからの推測方法を参考に、式6.2にしたがって現地で断面調査を実施した5地点について12時間交通量を再現する。ただし、基準断面とは道路交通センサ等で12時間交通量の実測値が存在する断面で、推定断面とは12時間交通量の推定値を得たい断面である。河野らによれば、基準断面と推定断面で、共通するトリップを持った交通の重複率が30%を超えていれば、一定の信頼性で推定可能としている。

$$Q_{a,12} = \frac{q_a}{q_0} Q_{0,12} \quad (6.2)$$

$Q_{0,12}$: 基準断面の 12 時間交通量

$Q_{a,12}$: 推定断面の推定 12 時間交通量

ただし、 $Q_{0,12}$ と $Q_{a,12}$ は同一基準日とする

q_0 : 基準断面の観測時間交通量

q_a : 推定断面の観測時間交通量

ただし、 q_0 と q_a は同一基準日同一時間帯

上記の方法で、対象領域内の断面交通量調査実施地点での 12 時間交通量を推定する。12 時間交通量を用いて、シミュレーションを実施する時間帯における時間交通量を切り出して用いる。

時間交通量の値を 6.4.2 に示した変換方法を元に、下記の方法で OD 交通量を得る。

[本研究による OD 交通量データの推測手法]

1. 各交差点に、実測（推測）値に合わせての交差点分岐率を与える
2. ネットワークの端点から、一定の間隔で自動車を流入させる
3. 各交差点の通過交通量は、交差点分岐率に従って割り振る
4. いくつかの地点における通過交通量が、断面交通量の実測値（推定値）や道路構造上の交通容量を満たすように、端点からの流入交通量のキャリブレーションを行う
5. 最終的に到達したネットワーク端点を D（終点）として、各 O（起点）からの各 D へ進行した割合を求める。
6. その構成比に従った、OD パラメータを自動車に設定する

現地調査による所見では、調査を行った時間帯では、幹線道路以外ではほとんど自動車交通が観測されなかったことから、8 号線、251 号線、273 号線の通過交通量が、推測値を満たすように端点からの流入交通量のキャリブレーションを行う。なお、実地調査を実施していない地点における交差点分岐率のデータは、交通シミュレーションクリアリングハウスにて提供されているベンチマークデータを、交差点形状を考慮しつつ適用する。

平日午前 10 時～11 時の設定で、流入交通量を推定した結果を図 6-10 に示す。



図 6-10 時間帯別流入交通量推定 (Google ZENRIN)

図中に示しているのが、1 時間あたりの交通量である。これらの主要幹線の端点から流入した自動車には、[本研究による OD 交通量データの推測手法] の手順 6 で求められた構成比に従い、D (終点) が設定されている。

6.5 歩行者と自動車による統合避難シミュレーション

6.5.1 浸水がない状態での避難行動

前項までの条件で、歩行者と自動車による統合避難シミュレーションを行った。

対象領域において、平日の午前 10 時を避難開始時刻と想定し、歩行者約 3000 人と自動車約 1000 台が、危険区域外の最寄りの避難場所を目指して一斉に避難行動を開始する。

まずは、平時の交通量を考慮してシミュレーションを行うことの影響を評価する為、浸水がない状態での避難行動をシミュレーションする。これは予警報が、浸水の発生までに十分な余裕時間をもって発令された状態に相当する。

その結果の避難に成功した歩行者数の推移を図 6-11 に、避難に成功した自動車の台数の推移を図 6-12 に示す。

本モデルでは、歩行者は歩道がある場合には歩道内を歩き、歩道と車道を区別しない道路においては、極力、道の両側を歩こうとするが、例えば、歩行者が混み合ってきた場合は、道路の中央寄りの自動車の通行している領域にまではみ出して歩行する者が現れる。しかし、現在の歩行者行動モデルでは 6.3 で述べたように、歩行者の側が車との衝突を回避する行動は省略されており、中央寄りにはみ出る際も車の有無に関わらず同じ行動をとるため、避難フィールド内を通行する自動車の台数が増えたとしても歩行者の通行には影響がない。その為、図 6-11 によると、平時の自動車交通量を考慮したケースとしないケースのいずれも 70 分程度で全ての歩行者が避難場所に到達している。上記の 2 ケースにおける、避難完了者数の時系列的な推移は完全に一致しているため、グラフ系列は 1 つしか確認できない。

図 6-12 は、青い線が平時の交通量を考慮せず、赤い線が平時の交通量を考慮した場合の避難完了者（台数）の時系列的推移である。平時の交通量が存在する分、自動車は避難行動の遂行に遅れが生じるが、避難を行う自動車が少なくなってきてからはその影響はほとんど見られず、約 90 分で全ての自動車が避難行動を完了する。この結果より、浸水がない状態においては、対象領域の設定した時刻における平時の交通量は、自動車の避難行動の成否について支配的でないと言える。また、平時の交通を考慮した場合、若干の遅れが見られるもののグラフ変化のパターンがほぼ同じであることから、新たに渋滞列が発生する箇所が存在する、もしくは渋滞列が極端に長くなる箇所が存在するという事は考えにくい。自動車挙動のアルゴリズムから考えると、これらはフィールド内に平時の交通が分布している為、避難を行う自動車の全体としてブレーキを踏む機会が増えたためであると考えられる。

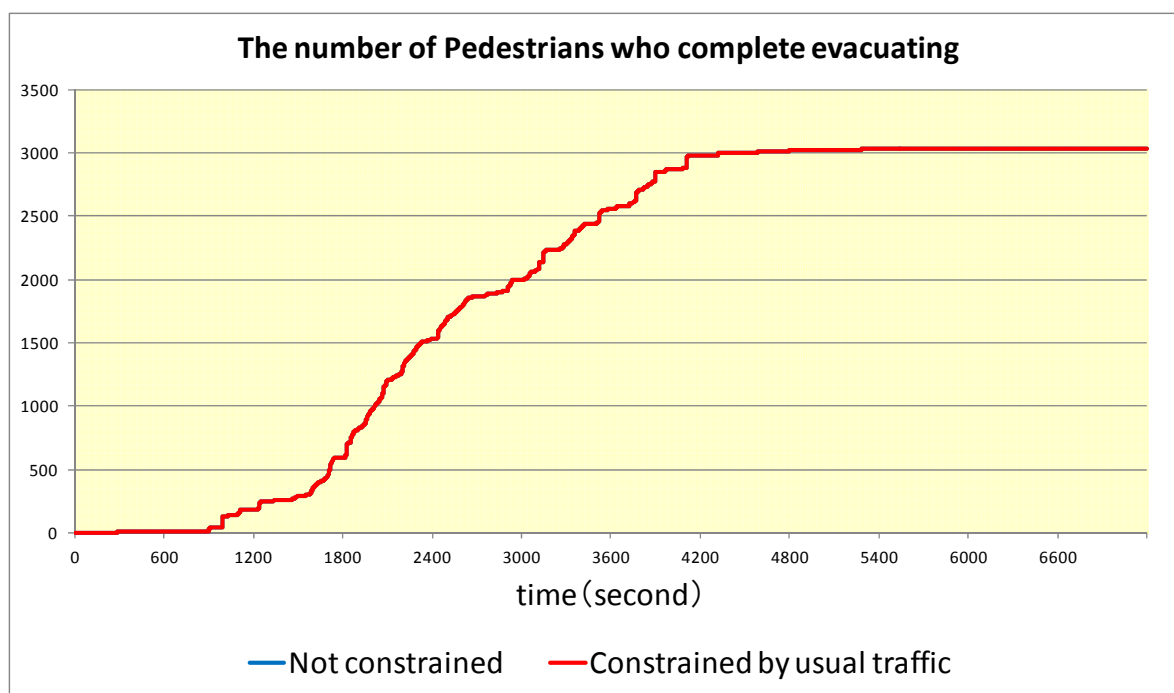


図 6-11 平時の交通量を与えた状況下での歩行者避難

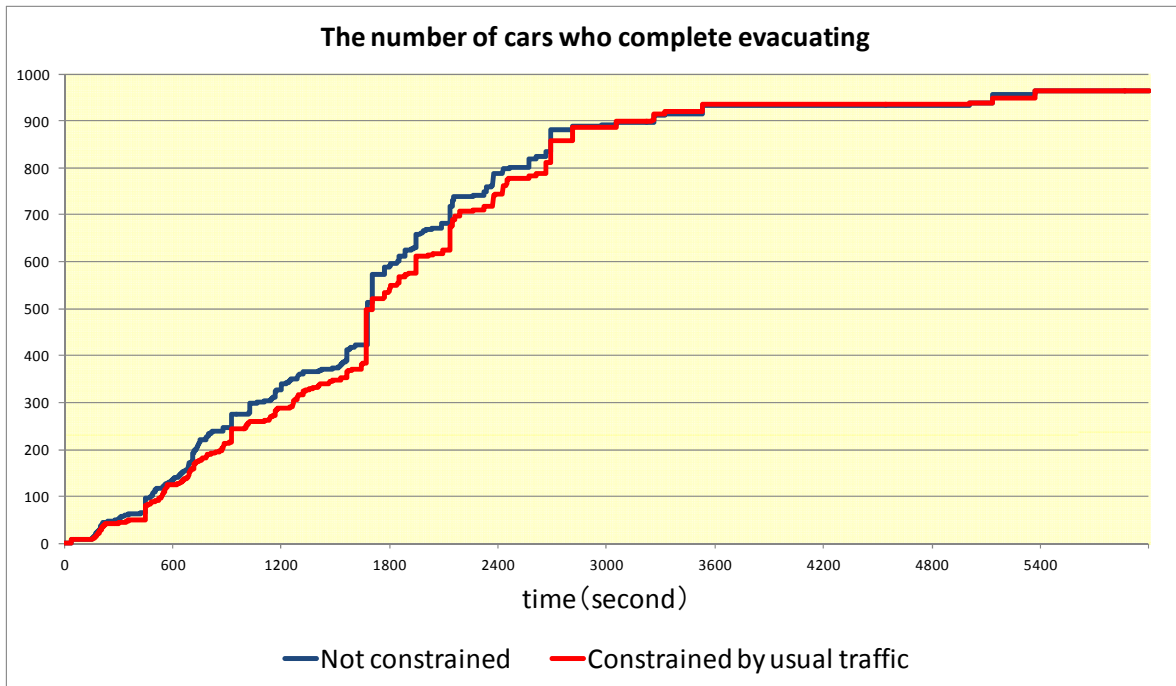


図 6-12 平時の交通量を与えた状況下での自動車避難

6.5.2 100年確率降雨の想定時における避難行動

まず、大規模な浸水を想定した場合の歩行者と自動車による統合避難シミュレーションを行った。

設定する外力は100年確率降雨とし、姉川にて破堤した時刻を基準時刻として、破堤時、破堤1時間後、破堤2時間後に避難開始した場合をそれぞれシミュレーションする。破堤時には既に、田川と七縄川の合流点付近を中心に、危険区域内の8%にあたる領域で0.1m~1.5mの浸水が見られる。多くは0.3m前後の浸水であり、避難者の通行を不可能にするほどの浸水ではないが、約1%の区域では1.0m以上の浸水が発生している。

姉川破堤時の時刻（氾濫解析開始から120分後）に最も近い氾濫解析データの更新時刻（氾濫解析開始から7200秒後）を避難シミュレーションの基準時刻とした。破堤1時間前から破堤時、破堤1時間後、破堤2時間後の対象区域の浸水深を図6-13、図6-14、図6-15、図6-16に示す。

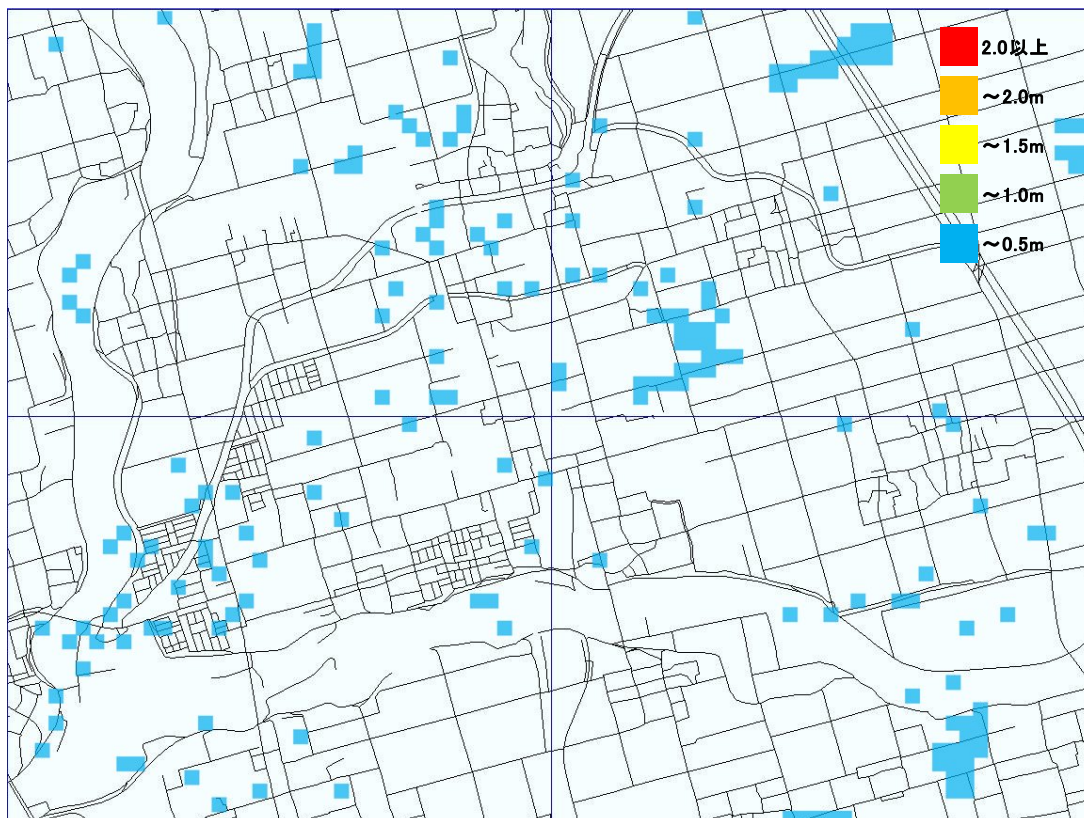


図 6-13 姉川破堤 1 時間前の浸水深 (100 年確率降雨)

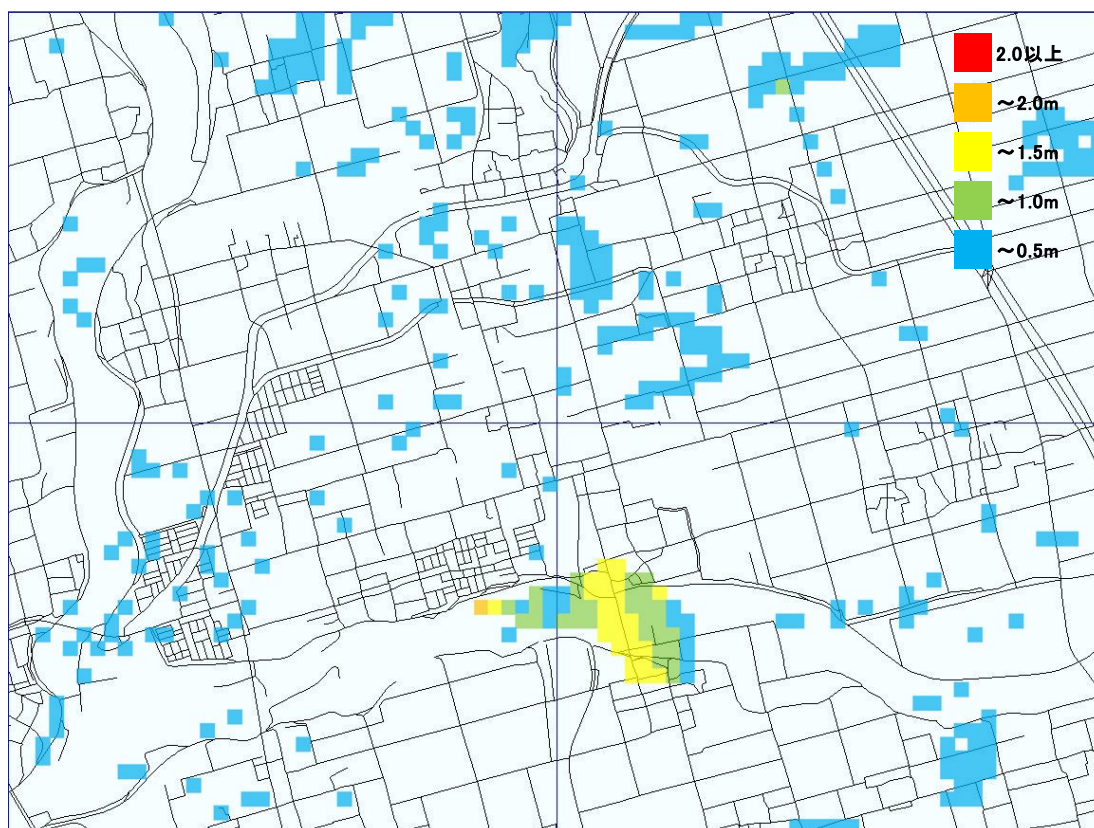


図 6-14 姉川破堤時の浸水深 (100 年確率降雨)

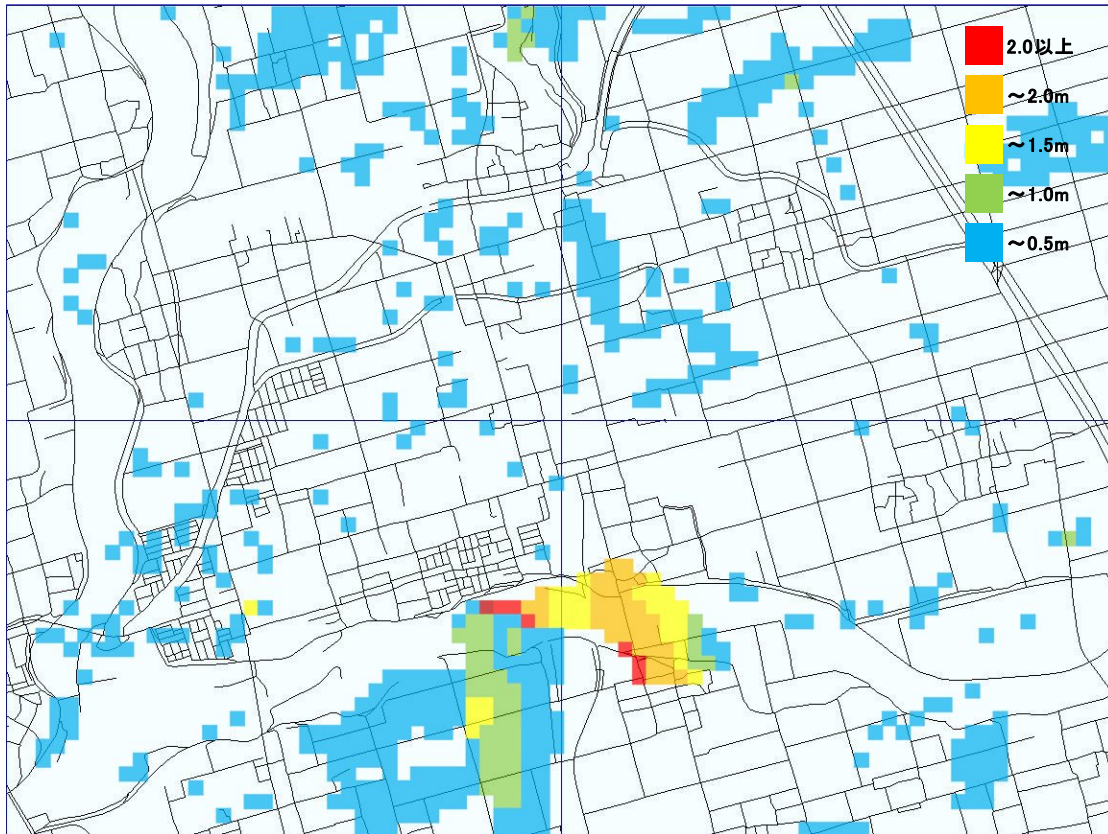


図 6-15 姉川破堤 1 時間後の浸水深 (100 年確率降雨)

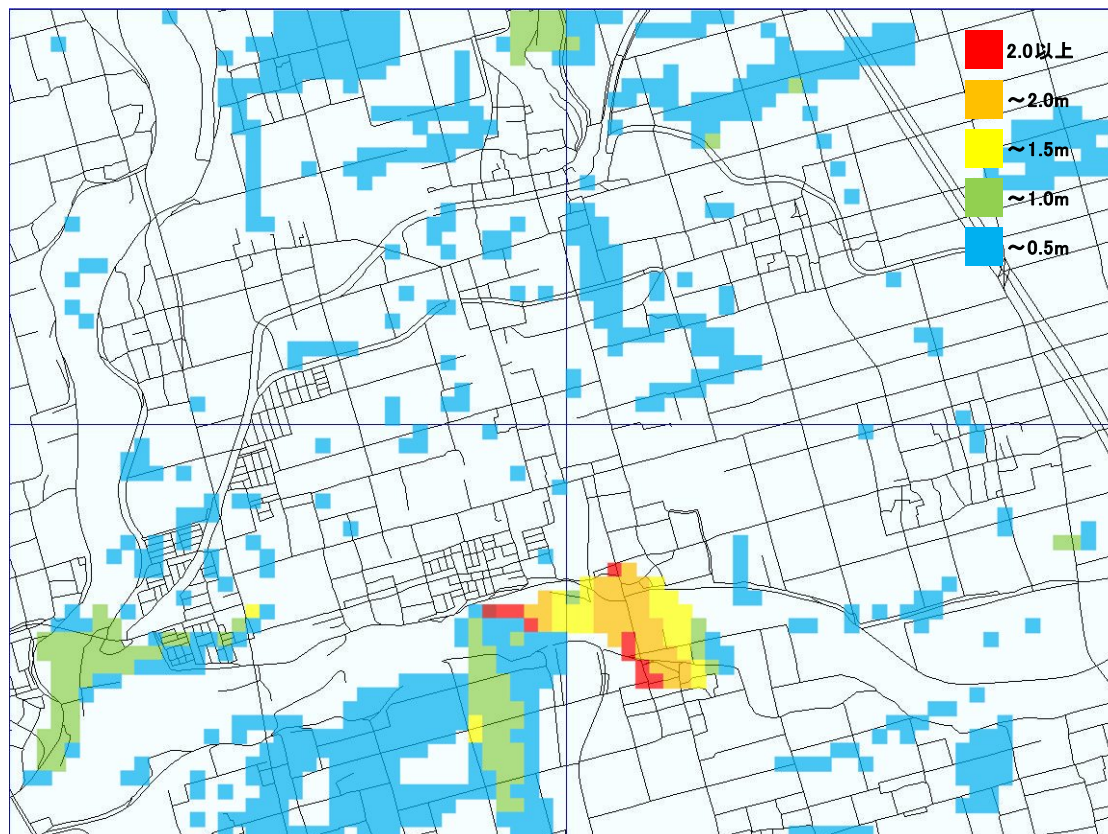


図 6-16 姉川破堤 2 時間後の浸水深 (100 年確率降雨)

①破堤 2 時間後に避難を開始した場合

姉川破堤の 2 時間後（氾濫解析開始から 14400 秒後）に避難行動を開始した場合の、統合シミュレーションの結果における、歩行者の避難完了者数の推移を図 6-17 に、自動車の避難完了台数の推移を図 6-18 に示す。

図 6-17 によると、歩行者 3000 人のうち 1621 人が避難中に 0.7m 以上の歩行不可能となる浸水に遭い、避難不可能となっている。6.5.1 の結果と同様で、現行の歩行者モデルは、自動車を回避する行動を省略しているため、平時の自動車交通を考慮した影響は見られない。避難行動を開始した時には既に多くの箇所で大規模な浸水が見られるため、避難行動開始の遅れが、避難者の半数以上が浸水に遭うという壊滅的な被害につながったと考えられる。

図 6-18 によると、最終的な避難完了台数が平時の交通量を考慮する場合もしない場合もともに 341 台で、大半の自動車は浸水の影響で避難不可能となっている。完了台数の推移がほぼ同じであるので、平時の交通量の存在の有無による自動車の避難行動への影響はほとんど見られないことがわかる。僅かな差異が見られるので、浸水に遭った自動車そのまま経路上の障害物となり、後続の自動車の通行を妨げる現象も少しは起こっていると考えられる。しかし、浸水した箇所が広範に渡る為、水没車両を原因とする渋滞列の影響がはるか後方の浸水被害にあっていない経路上にまで及んで自動車の走行を阻害するというケースよりは、浸水そのものが自動車の走行を妨げたと考えるのが妥当である。

つまり、大規模な浸水が起こっている状況にあっては、避難行動の成否には自動車特有の挙動やそれによる渋滞の影響よりも、浸水深の影響が決定的であることがわかる。

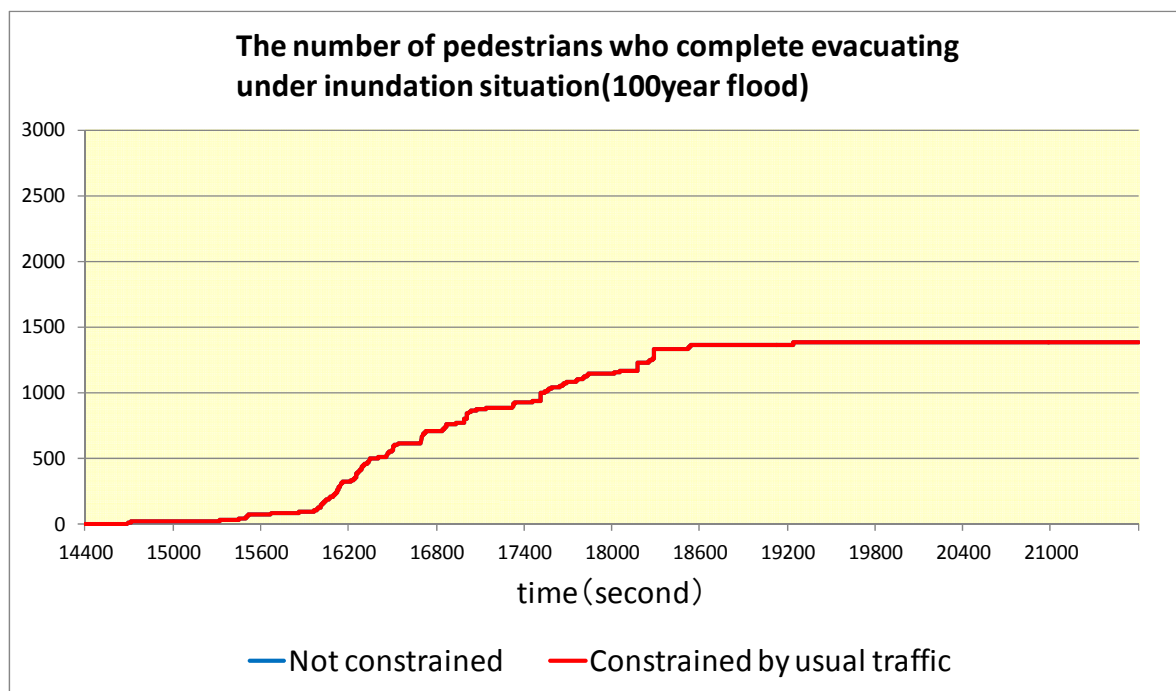


図 6-17 100 年確率降雨による浸水下での歩行者避難
(破堤 2 時間後に避難開始)

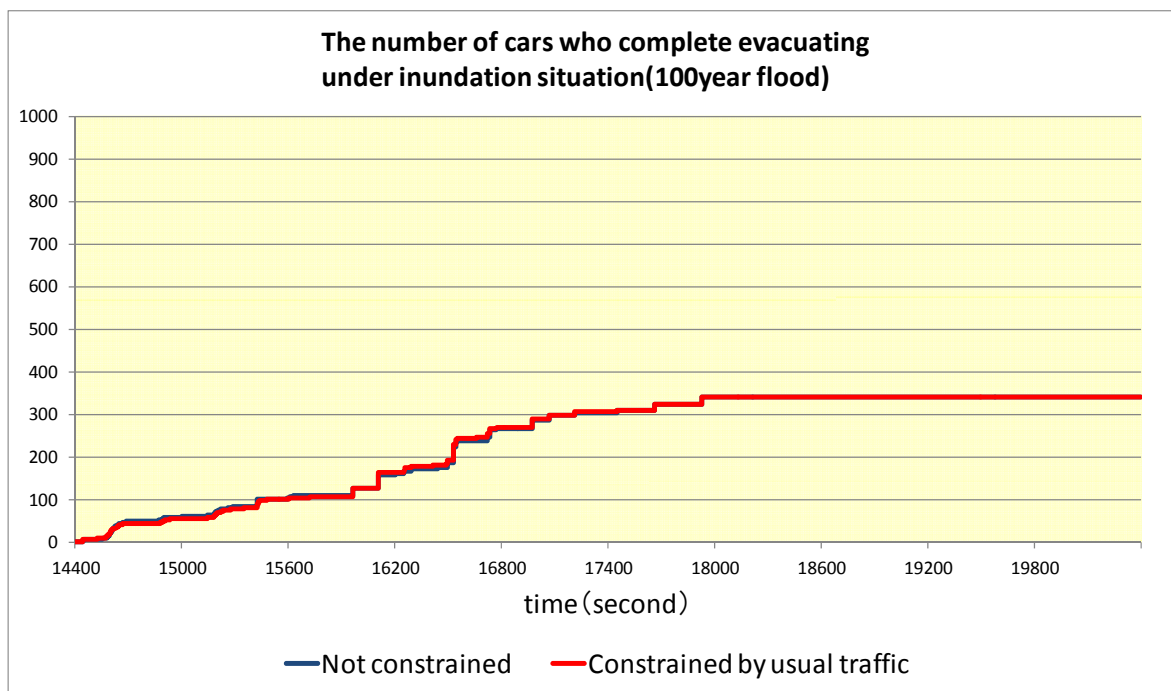


図 6-18 100 年確率降雨による浸水下での自動車避難
(破堤 2 時間後に避難開始)

②破堤 1 時間後に避難を開始した場合

姉川破堤の 1 時間後（氾濫解析開始から 10800 秒後）に避難行動を開始した場合の、歩行者の避難完了者数の推移を図 6-19 に、自動車の避難完了台数の推移を図 6-20 に示す。

図 6-19 によると、歩行者 3000 人のうち 471 人が避難中に 0.7m 以上の歩行不可能となる浸水に遭い、避難不可能となっている。6.5.1 の結果と同様に、平時の自動車交通を考慮した影響は現れない。避難行動を開始した時には、破堤箇所以外でも既に内水氾濫が起きているため、幾つかの地点で浸水による被害が見られるものの、危険区域外への移動は十分に可能であったと考えられる。しかしながら、破堤 2 時間後（避難開始から 1 時間後）までに避難を完了できた人数が 2115 人であり、これを 6.5.1 で検討した浸水がない場合の避難開始から 1 時間後までの避難完了者数 2555 人と比べるとその差分は 440 人であり、やはり浸水が円滑な避難行動の遂行に影響を与えたと考えられるので、十分に早く避難を開始できたとは言えない。

図 6-20 によると、最終的な避難完了台数は、平時の交通量を考慮する場合は 817 台、考慮しない場合は 819 台であり、ほぼ同様の結果となった。完了台数の推移は、避難開始から 45 分後までは若干の違いはあるもののほぼ同じパターンで推移する為、あまり大きな影響はみられなかったと言える。①で検討した破堤 2 時間後に避難開始した場合と比較すると、大幅な避難完了台数の増加が見られ、避難を完了した自動車の大部分は避難開始 45 分後までに完了している事より、浸水が深刻でなければ自動車による危険区域外への避難は有る程度は有効であると言える。6.5.1 で検討した浸水がない場合の避難開始から 1 時間後までの避難完了台数 936 台と比べるとその差分は 120 台程度であり、これらの車両は歩行者と同様に浸水が原因で避難不可能になったと考えられる。

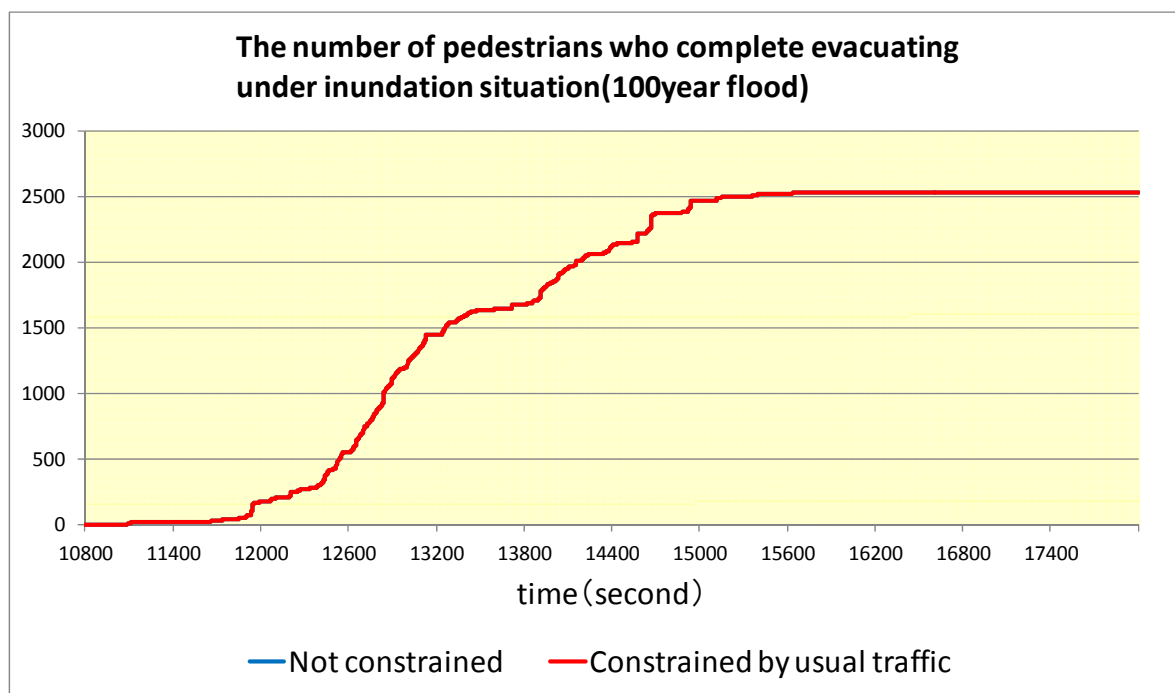


図 6-19 100 年確率降雨による浸水下での歩行者避難
(破堤 1 時間後に避難開始)

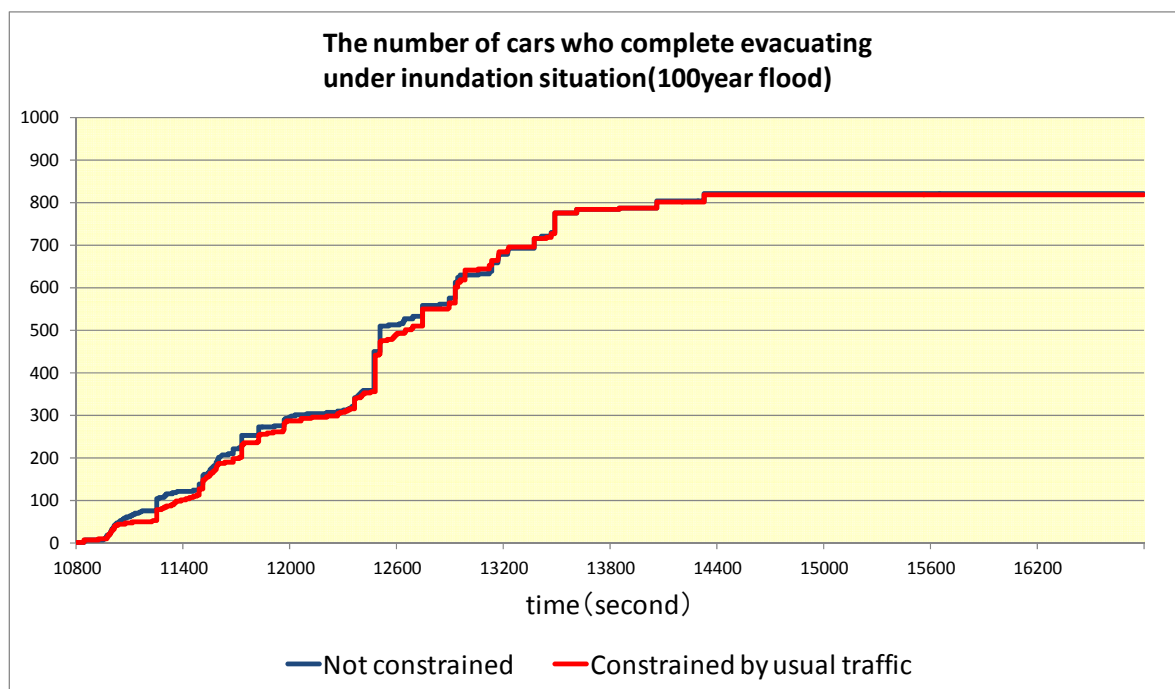


図 6-20 100 年確率降雨による浸水下での自動車避難
(破堤 1 時間後に避難開始)

③破堤時に避難を開始した場合

姉川破堤時（氾濫解析開始から 7200 秒後）に避難行動を開始した場合の、歩行者の避難完了者数の推移を図 6-21 に、自動車の避難完了台数の推移を図 6-22 に示す。

図 6-21 によると、歩行者 3000 人のうち 111 人が避難中に 0.7m 以上の歩行不可能となる浸水に遭い、避難不可能となっている。避難行動を開始した時には、既に破堤している七縄川による浸水と内水氾濫によって約 8%の地域で浸水が見られるもののほぼ全て 0.5m 以下の水深であり、ただちに歩行不可能となって避難を妨げるものではなかった。避難開始から 1 時間後までに避難を完了できた人数が 2198 人であり、これを 6.5.1 で検討した浸水がない場合の避難開始から 1 時間後までの避難完了者数 2555 人と比べるとその差分は 357 人であり、浸水深の影響は受けていると考えられる。

図 6-22 によると、最終的な避難完了台数は、平時の交通量を考慮する場合は 855 台、考慮しない場合は 856 台であり、ほぼ最終的には同様の結果となった。しかし、完了台数の推移については①のケースより差分が大きくなっており、浸水深の影響が少なくなった分、平時の交通量の影響が現れていると言える。

②で検討した破堤 1 時間後に避難開始した場合と比較すると、40 台程度と僅かではあるものの避難完了台数の増加が見られる。

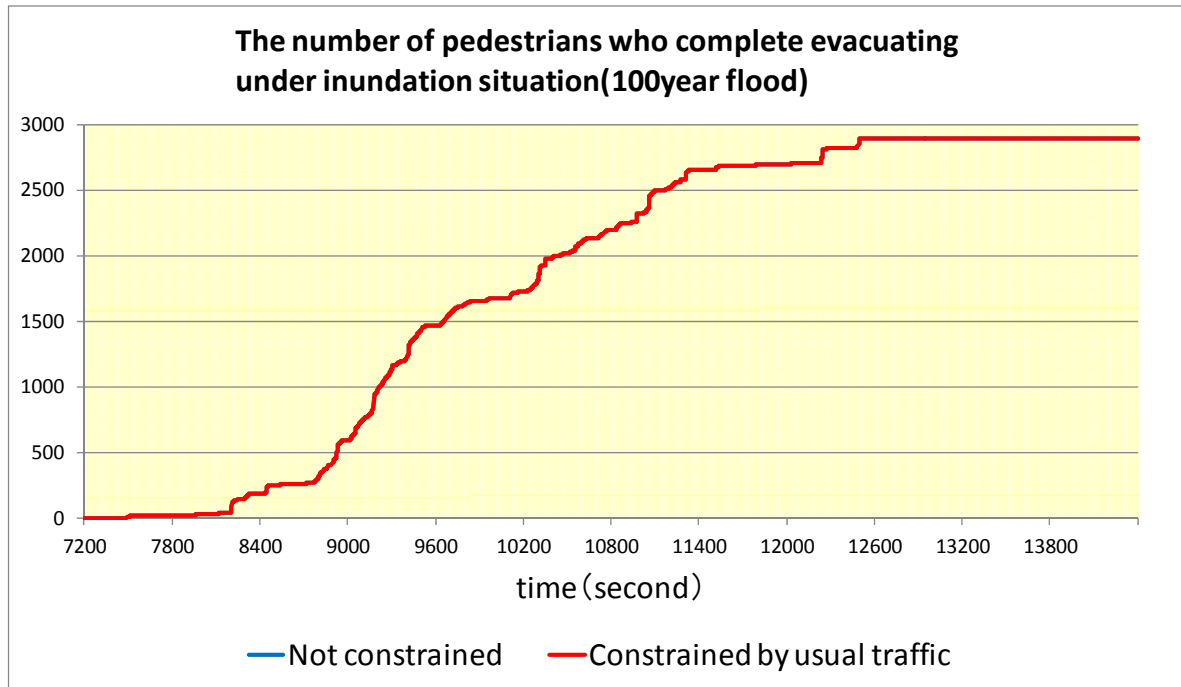


図 6-21 100 年確率降雨による浸水下での歩行者避難
(破堤時に避難開始)

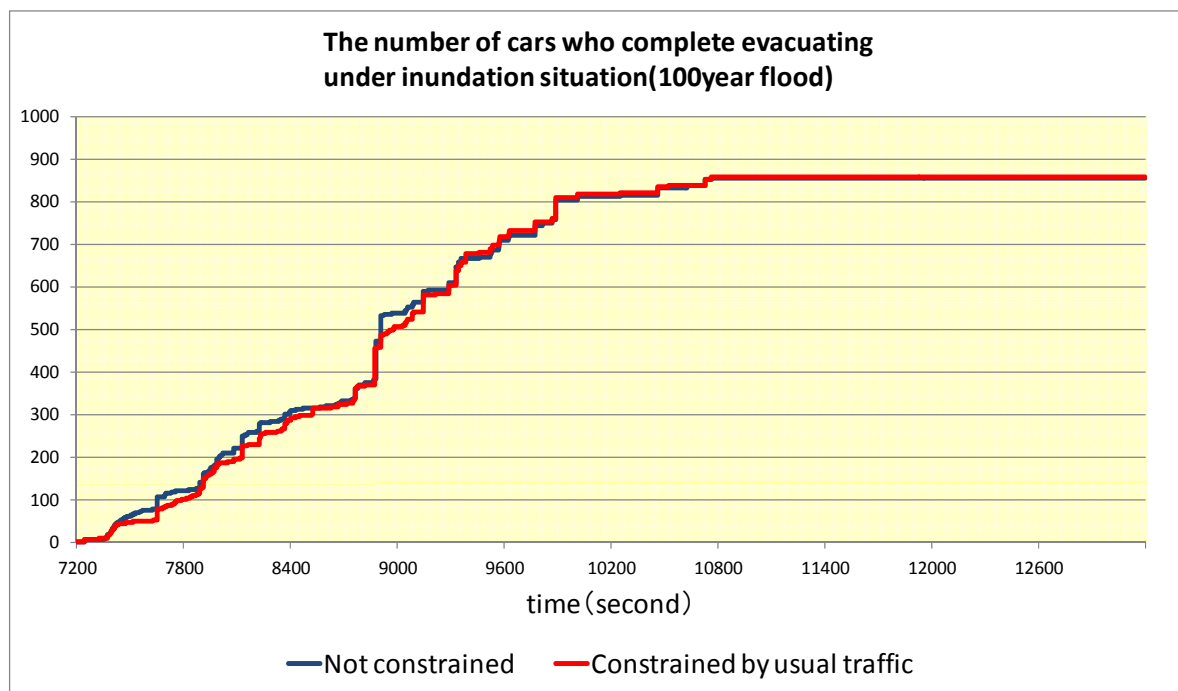


図 6-22 100 年確率降雨による浸水下での自動車避難
(破堤時に避難開始)

④破堤 1 時間前に避難を開始した場合

姉川破堤の 1 時間前（氾濫解析開始から 3600 秒後）に避難行動を開始した場合の、歩行者の避難完了者数の推移を図 6-23 に、自動車の避難完了台数の推移を図 6-24 に示す。

図 6-23 によると、歩行者 3000 人全員が避難に成功している。避難行動を開始した時には、既に破堤している七縄川による浸水と内水氾濫によって約 4%の地域で浸水が見られるもののほぼ全て 0.5m 以下の水深であり、ほとんどのエリアは浸水がない状態と同様に歩行ができる状態であったと考えられる。避難開始から 1 時間後までに避難を完了できた人数が 2542 人であり、これを 6.5.1 で検討した浸水がない場合の避難開始から 1 時間後までの避難完了者数 2555 人と比べるとその差分は僅かに 13 人であり、浸水深による避難行動の遅滞はほとんど見られなかったため、十分に早く避難行動を遂行できていると考えられる。図 6-24 によると、最終的な避難完了台数は、平時の交通量を考慮する場合もしない場合も、ともに 942 台であり、ほぼ最終的には同様の結果となった。しかし、完了台数の推移については③で検討した破堤時に避難開始した場合と比較すると、浸水深の影響が少なくなった分、平時の交通量の影響が現れていると言える。80 台程度と僅かではあるものの避難完了台数の増加が見られる。

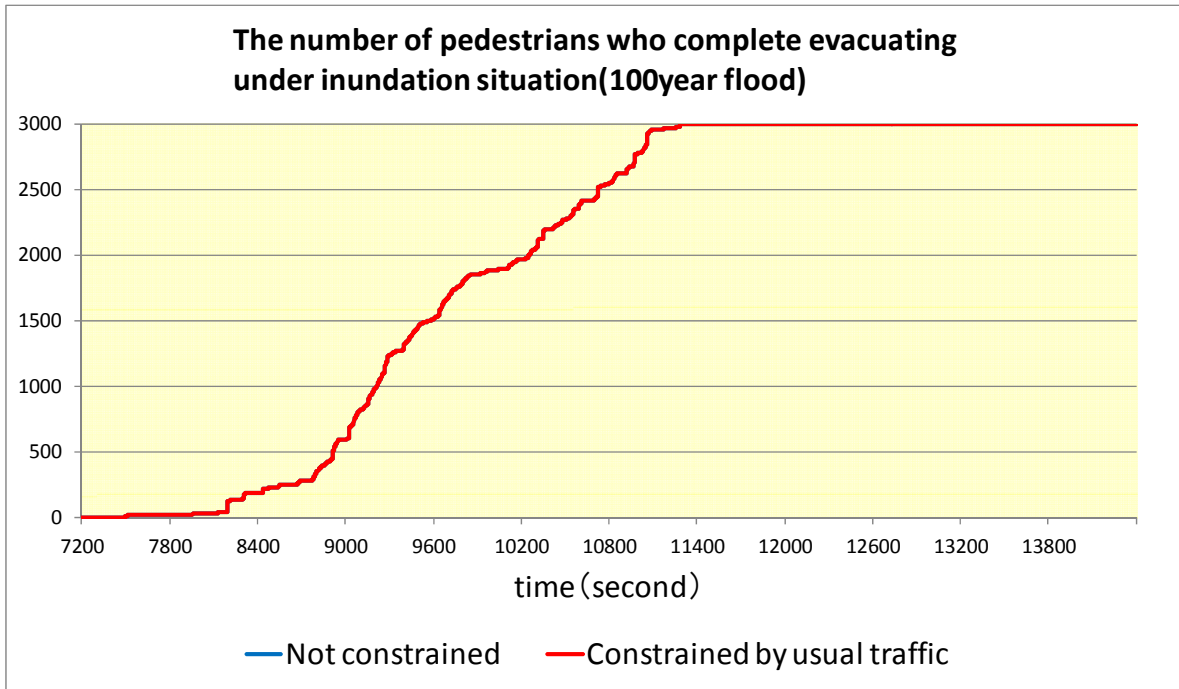


図 6-23 100 年確率降雨による浸水下での歩行者避難
(破堤 1 時間前に避難開始)

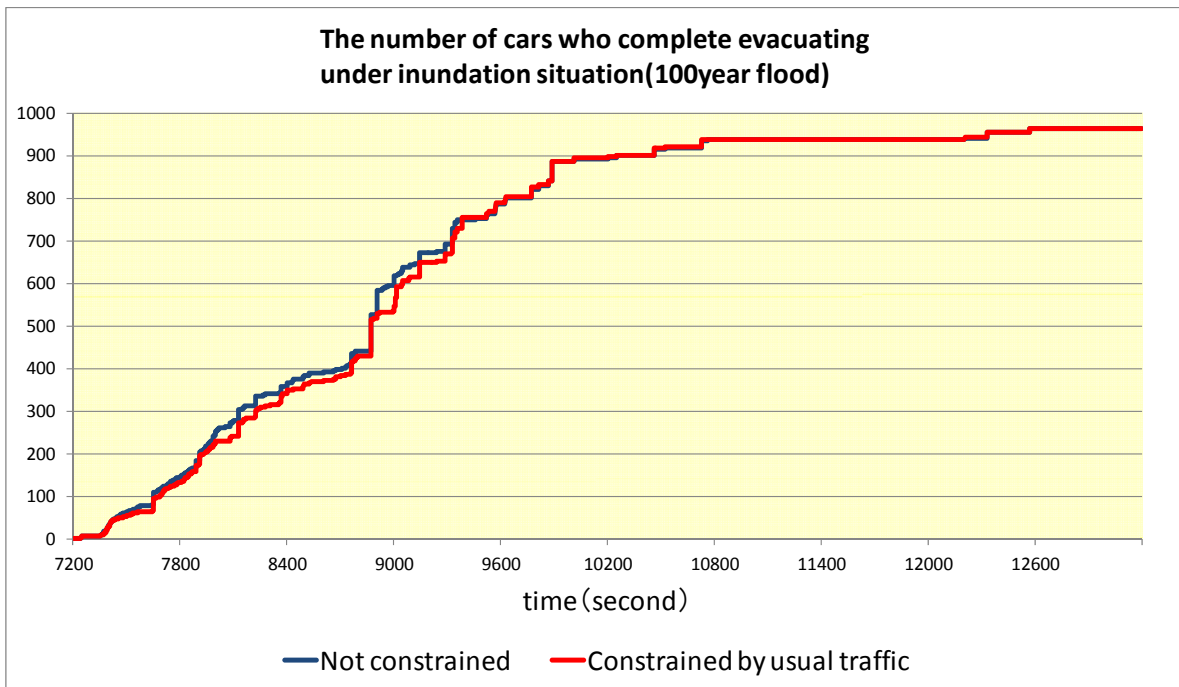


図 6-24 100 年確率降雨による浸水下での自動車避難
(破堤 1 時間前に避難開始)

表 6-1 避難開始後 30 分間の避難完了台数 (100 年確率降雨)

| | no usual traffic | Constraint by usual traffic |
|-----------------------------------|------------------|-----------------------------|
| no inundation | 597 | 536 |
| under inundation (t=60 start) | 595 | 534 |
| under inundation (t=120 start) | 537 | 506 |
| under inundation (t=180 start) | 513 | 489 |
| under inundation (t=240 start) | 159 | 163 |

表 6-1 は、避難開始後 30 分間における避難を完了した自動車台数を比較したものである。

100 年確率降雨による浸水を想定した場合において、破堤 1 時間前、破堤時、破堤 1 時間後、破堤の 2 時間後に避難開始の各設定について、平時の交通量を考慮する場合としない場合の差異をみると、それぞれ 61 台、31 台、24 台、4 台となっている。これは、大規模な浸水を想定してシミュレーションする場合も、避難が早期に行われている場合には平時の交通量が影響する事と、浸水が進むにしたがって次第に交通量の大小よりも浸水深の影響が支配的になっていく事を示している。

破堤 2 時間後に避難開始するとしたケースでは、平時の交通量を想定した方がこの時点では避難完了台数が多くなっている。これは、15 分ごとに各メッシュの浸水深を更新した際に、浸水深が一時的には低下するメッシュも存在するので、渋滞の影響で走行が遅滞した結果、走行不可能な 0.5m の浸水深に遭遇せずに済んだ自動車も存在することによると考えられる。

6.5.3 10 年確率降雨の想定時における避難行動

続いて、6.5.2 で想定した降雨よりは軽度な降雨による浸水下において、歩行者と自動車による統合避難シミュレーションを行った。

設定する外力は 10 年確率降雨とし、浸水区域が大きく増加し始める姉川にて破堤した時刻を避難開始時刻とする。避難開始時には、シミュレーション領域内の 4%での浸水が見られるが、多くは 0.2m 以下の浸水であり、自動車の通行を不可能にする 0.5m 以上の浸水はわずかに 1 メッシュで見られるのみである。姉川破堤時の時刻（氾濫解析開始から 510 分後）に最も近い氾濫解析データの更新時刻（氾濫解析開始から 29700 秒後）を避難シミュレーションの開始時刻とした。避難シミュレーション開始時の対象区域における浸水深を図 6-25 に示す。避難開始時には既に七縄川での破堤(氾濫解析開始と同時に破堤)と内水氾濫による浸水が散見される。

歩行者の避難完了者数の推移を図 6-26 に、自動車の避難完了台数の推移を図 6-27 に示す。

図 6-26 によると、歩行者 3000 人のうち 193 人が避難中に 0.7m 以上の歩行不可能となる浸水に遭い、避難不可能となっている。

図 6-27 によると、避難開始後の早い段階から 6.5.1 に示した氾濫なしの状況下よりも、平時の交通量の影響は大きく表れていることがわかる。また、最終的な避難完了台数が平時の交通量を考慮しない場合は 915 台で、85 台は浸水の影響で避難不可能となっているのに対し、平時の交通量を考慮する場合に避難を完了できたのは 859 台で、141 台が避難不可能となっている。浸水の影響を考慮する場合、浸水に遭った自動車が避難経路上で走行不可能状態となった場合、その自動車はそのまま経路上の障害物となり、後続の自動車の通行を妨げることとなる。水没車両を先頭に渋滞列が形成された場合、はるか後方の浸水被害にあっていない経路上にまで渋滞が及ぶ事も考えられる。これらの現象は、避難フィールド内に存在する自動車台数が多くなった場合には単純に発生機会が増えると考えられる。よって、平時の交通として設定した自動車が浸水にあつて通行不可能となっていた場合、避難自動車の通行に影響を与えることは十分に考えられる。

片田ら(2008)¹⁰などの多くの既往研究においては、大規模な浸水下の自動車交通シミュレーションにおいては自動車特有の挙動については簡略化しても良いとされている。しかし、以上の結果を見ると、浸水深が自動車の通行を不可能にする程ではない浸水状況下においては、追従走行等の自動車特有の走行特性が引き起こす渋滞の影響を無視できないことが示された。このことは、より適切とされる早期避難を行った方が通常交通の影響が大きいことを示しており、避難計画を策定する際には注意を要すると考えられる。

また、6.5.1 の浸水の影響を考慮しない状態でのシミュレーション結果と比べると、浸水がない状態ではわずかに避難場所までの到達時刻が遅れる程度の交通量であっても、浸水下においては避難の成否に関わる場合があることが示された。

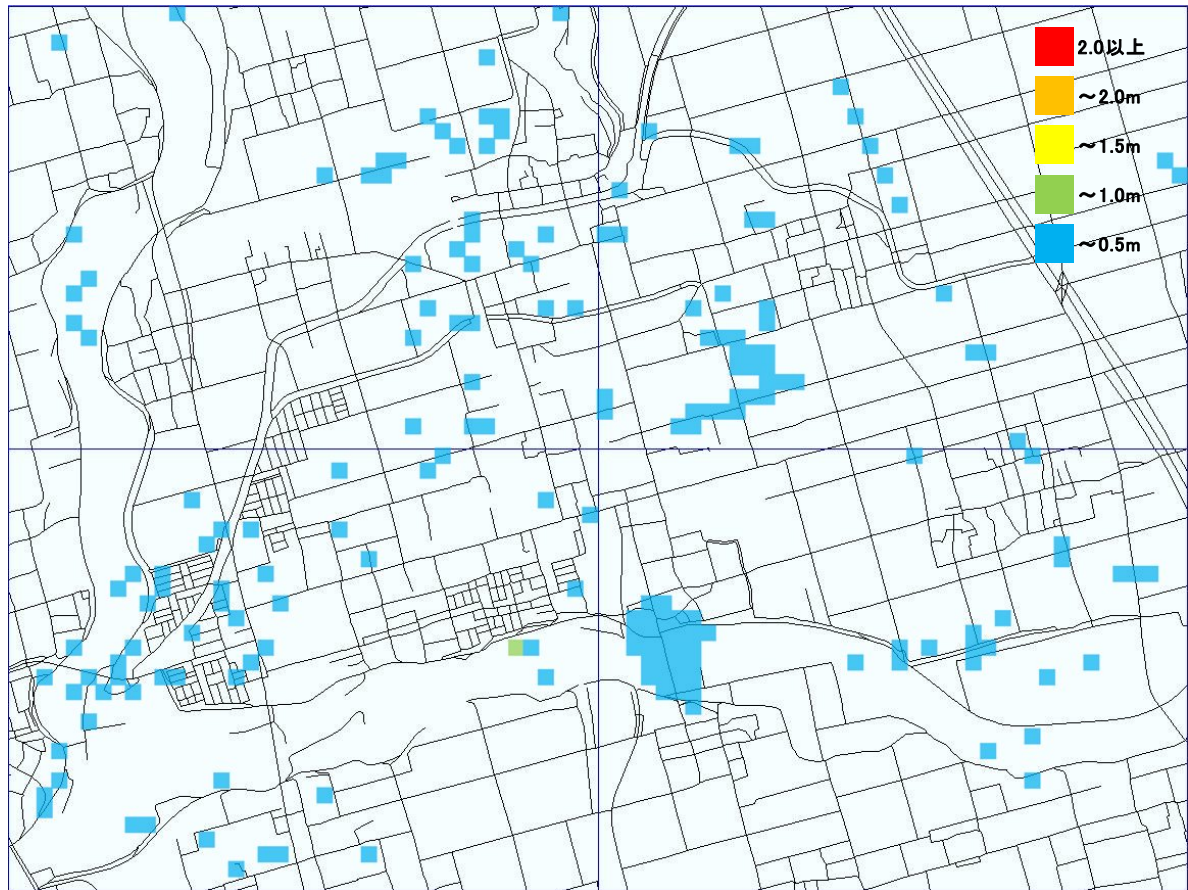


図 6-25 姉川破堤時の浸水深 (10年確率降雨)

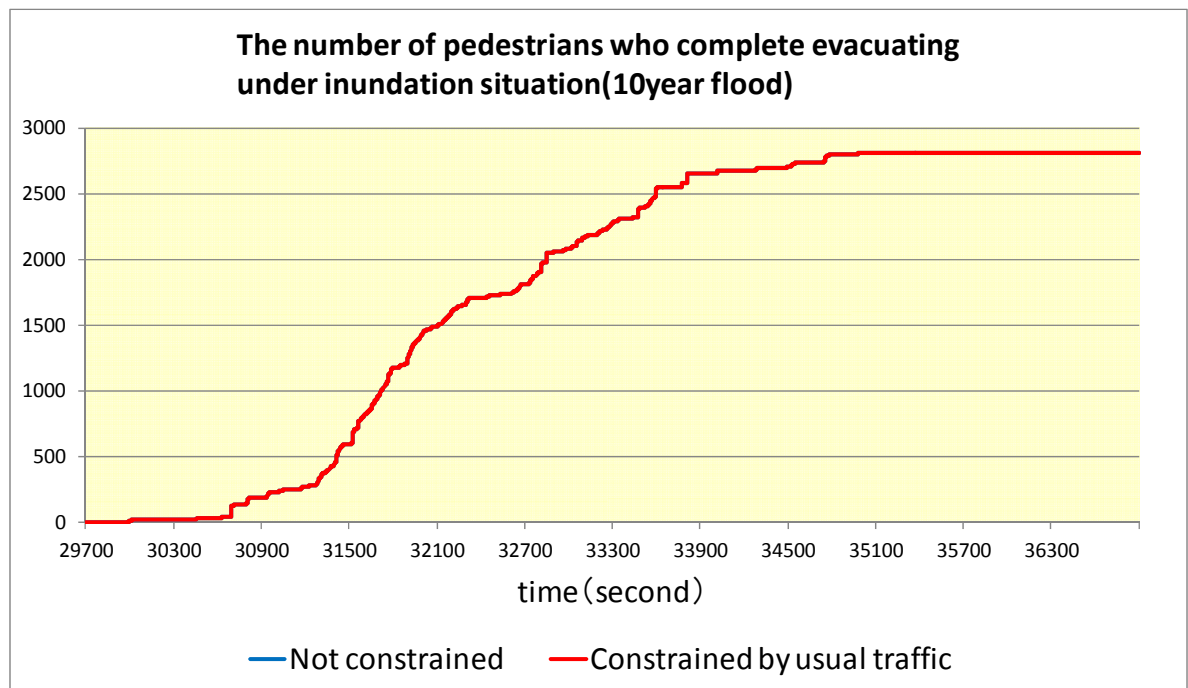


図 6-26 10年確率降雨による浸水下での歩行者避難
(破堤時に避難開始)

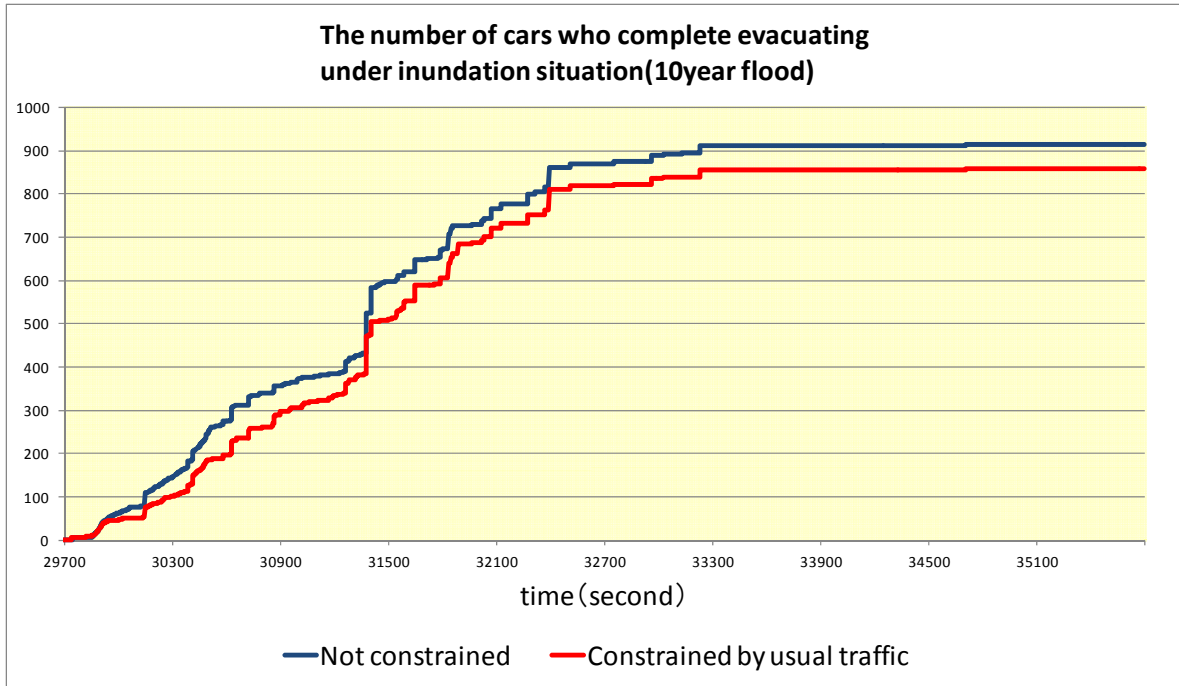


図 6-27 10 年確率降雨による浸水下での自動車避難
(破堤時に避難開始)

表 6-2 避難開始後 30 分間の避難完了台数 (10 年確率降雨)

| | no usual traffic | Constraint by usual traffic |
|------------------|------------------|-----------------------------|
| no inundation | 597 | 536 |
| under inundation | 597 | 512 |

表 6-2 は、避難開始後 30 分間における避難を完了した自動車台数を比較したものである。浸水を想定しない状況で平時の交通量を考慮した場合の完了台数は 536 台であり、10 年確率降雨による浸水を想定した場合の完了台数は 512 台となっている。これによると、浸水深の程度によっては、平時の交通量の影響が、浸水を想定しない場合よりも強く現れていることがわかる。

これは、たとえ浸水下での自動車交通のシミュレーションであったとしても、自動車の通行を不可能にするほどではない浸水深の場合は、自動車特有の挙動によって引き起こされる渋滞や遅滞の影響も認められるばかりか、浸水深がそのような渋滞や遅滞の発生を助長する場合もあることを示している。

6.5.4 避難場所の変更による避難行動の成否の検討

避難行動の成否は、避難行動を開始した時間に大きく関係することが 6.5.2 の適用で確かめられた。住民の速やかな避難を実施するには、避難警報や避難指示が適切に発令され、かつその情報が遅滞なくかつもれなく伝わる災害情報システムを構築する事が肝要である。片田ら(2000)¹¹や Hori(2008)¹²は、マスメディア、地域の防災無線、広報車など複数のメディアによって防災情報が伝達されていく過程をシミュレートする過程を再現するモデルを提案している。また、近年では自治体においても災害情報システムの整備がますます重要視されてきており、新潟県では、災害時に雨量だけでなく地域の河川水位や土砂崩れ、交通規制などの情報をインターネットを通じてリアルタイム配信するシステム¹³を整備している。このように災害情報システムの発達が進むと、あらかじめ決められた避難所に定められた避難ルートで向かうだけでなく、地域の交通渋滞や浸水の状況についての情報をもとに、ルートや目的地を選択するような避難行動も考えられる。

例えば、6.5.2④で検討した破堤の2時間後に避難を開始するケースでは、既に姉川の南側で浸水している箇所が多く、橋の通行も危険な状態に陥っている。避難開始時にそのような情報が得られているのであれば、既に浸水に遭っている避難所には向かわないと考えられる。

避難を開始した時点で既に、図 6-28 中の赤い×印で示した避難所は浸水下にある。よって、この避難所を目的地としていた避難者については、他の避難所に目的地を変更して 6.5.2④と同様のシミュレーションを行った際の、歩行者の避難完了者数の推移を図 6-29 に、自動車の避難完了台数の推移を図 6-30 に示す。



図 6-28 破堤 2 時間後の浸水状況

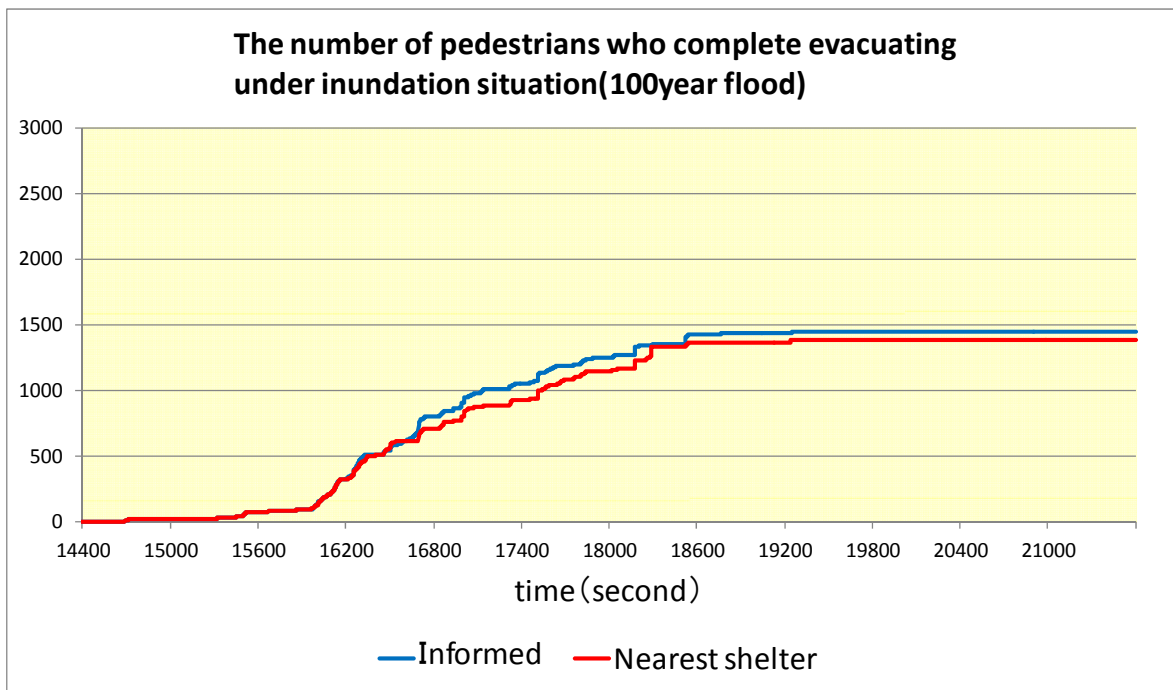


図 6-29 100 年確率降雨による浸水下での歩行者避難
(破堤 2 時間後に避難開始)

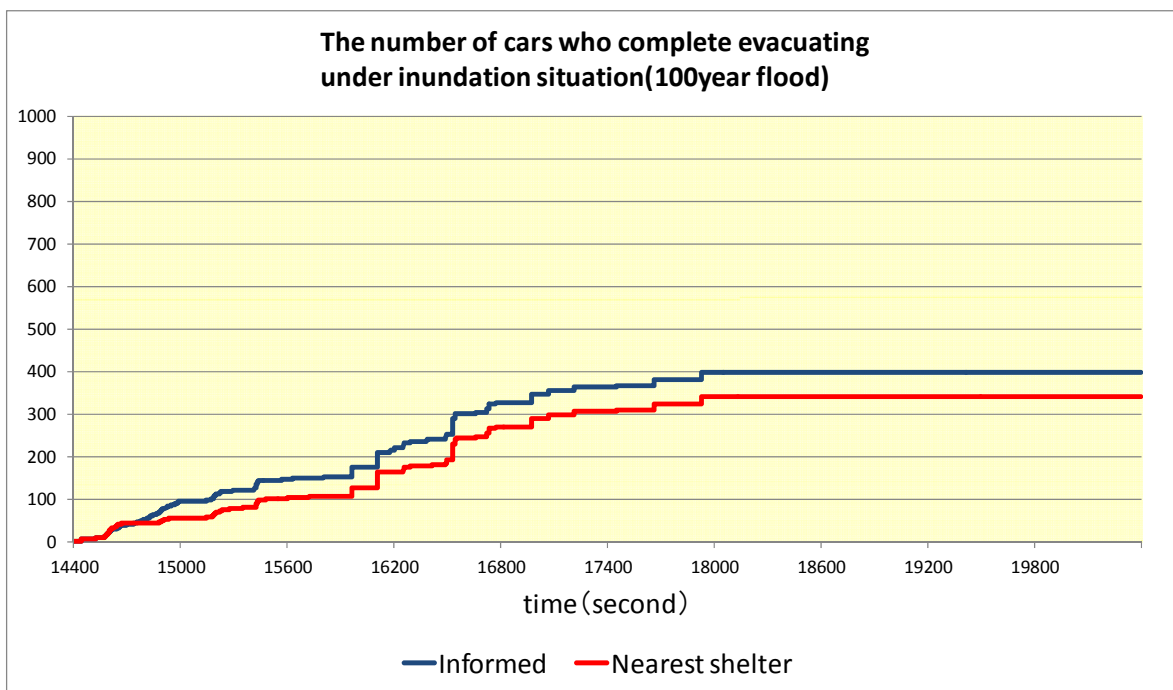


図 6-30 100 年確率降雨による浸水下での歩行者避難
(破堤 2 時間後に避難開始)

図 6-29 によると、6.5.2①では最終的に避難に成功した歩行者は 1379 人だったのに対し、浸水した避難所を目的地にしていた避難者の目的地を変更した場合は、1446 人であった。また、図 6-30 によると、6.5.2①では最終的に避難に成功した自動車台数は 341 台だったのに対し、浸水した避難所を目的地にしていた避難者の目的地を変更した場合は、397 台であった。歩行者と自動車とも、危険な避難所を回避したので当然ながら避難の成功者数は多くなっている。

地域の防災計画において、避難所や避難経路を予め定めておくような場合には、様々な浸水状況下でシミュレーションを行って、それぞれの避難所の危険性を把握した上で定めることは非常に重要であると言える。

6.6 結語

本章では、第4章で示した歩行による避難シミュレーションモデルと第5章で示した自動車を用いた避難シミュレーションモデルを統合し、避難者として歩行者と自動車を同時に扱えるモデルとし、さらに平時の自動車交通量も考慮した上で水害避難シミュレーションを行った。

対象地域における平時の交通量を示すデータは、十分な量が手に入るとは言い難い状況である。また、多くの同種の自動車交通モデル(個々の自動車の追従行動を扱う C-F モデル)では、必要なデータを実測によって補っているが、避難シミュレーションのような広域なエリアを対象とする場合はその全てを実測でまかなう事は現実的ではない。そこで、道路交通センサスのデータと最小限の観測地点に実測によるデータを用い、妥当な断面交通量データを推測する方法を提示した。また、それらの断面交通量データから、C-F モデルで用いる OD 交通量データへの変換方法を提示した。

上記の方法で得られた平時の交通量のデータと、氾濫解析のデータを用いて統合避難シミュレーションを行った。その結果、外力として 10 年確率降雨を設定し、浸水はあっても部分的で自動車の走行を不可能にするほどではない状況下では、平時の交通量は避難行動の成否に大きな影響を与えうることを示した。一方、外力として 100 年確率降雨を設定し、大規模な浸水を想定した場合には、避難の成否においては交通量の大小よりも浸水深の影響が支配的であり、避難の開始が遅れた場合には、極めて危険な状況になることがわかった。被害が大きくなることを防ぐ為には、少しでも早く避難を開始する必要があるが、そうした状況下では交通量の大小が避難行動の結果に影響を与えることに注意が必要である。

第6章 参考文献

- 1 高橋和雄,高橋裕:クルマ社会と水害 長崎豪雨災害は訴える,九州大学出版会
- 2 深草新,戸田圭一,宇野伸宏:内水氾濫に起因する道路交通障害予測に関する研究,河川技術論文
集第14巻,土木学会水工学委員会河川部会,pp.223-228, 2008.
- 3 一般財団法人消防科学総合センター:消防防災博物館, <http://www.bousaihaku.com/>
- 4 滋賀県:地先の安全度マップ,
http://www.pref.shiga.lg.jp/h/ryuiki/tisakinoanzendo/top_page.html
- 5 氾濫シミュレーションマニュアル(案):平成8年2月,土木研究所資料第3400号
- 6 畑山満則,枝廣篤,多々納裕一:姉川・高時川における地域間連携を考慮した広域避難に関する
考察,京都大学防災研究所年報,第52号B,pp.91-110,2009
- 7 河野友彦,橋本浩良,上坂克巳,五十嵐一智:交通量常時観測データを用いた隣接区間の交通量推
定方法に関する研究,土木学会,土木計画学研究・講演集, Vol.40,2010
- 8 小根山裕之,桑原雅夫:路側観測交通量からの時間変化するOD交通量の推定,交通工学, Vol.
32, No.2, pp. 5-16, 1997.
- 9 一般社団法人交通工学研究会:交通シミュレーションクリアリングハウス,
<http://www.jste.or.jp/sim/>
- 10 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
- 11 片田敏孝,浅田純作,桑沢敬行:GISを用いた災害情報伝達のシミュレーション分析,土木情報シ
ステム論文集,Vol.9,pp.49-58,2000
- 12 T. Hori : Flood Evacuation Simulation System Based on Digital Modeling of Street
Network Considering Distribution Process of Information, Water Down Under
2008 ,pp2232-2240, 2008
- 13 新潟県:河川・雨量・交通規制などのリアルタイム情報,
<http://www.pref.niigata.lg.jp/dobokukanri/1245960070520.html>

第7章 結論

本論文の主題は、水害避難行動をシミュレートするモデルを開発し、避難計画の検討への利用方法について考察することにある。具体的には、従来開発されてきた個人レベルの歩行避難をシミュレートする水害避難マイクロモデルをベースに、経路上の混雑による避難行動への影響や、避難行動における自動車の利用、ならびに経路上での歩行者と自動車の相互の影響を再現する機能を実現し、より現実に即したシミュレーションを行えるようにした。この結果、本研究のベースとした水害避難マイクロモデルはより大規模で多機能なモデルに発展した。一方で対象とする行動過程が複雑になるにつれて、本モデルによるシミュレーション結果が、どの程度現実を正確にとらえているのかといったことを直接検証することも難しくなっている。これには2つの理由がある。1つは水害時の避難行動に対する詳細なデータの不在である。実際の水害に関する調査はどうしても事後のものとなるため、住民個々の行動を時系列に沿って網羅的に調査することは難しい。もう1つの要因は、モデルに含まれるパラメータがモデルの大規模化、複雑化に伴い、増加しているということである。パラメータの値はそれが直接関係する要素行動に照らして一般的に妥当と思われるものを用いているが、いつも同じものであるという保証はない。こうしたパラメータの値を変更することでシミュレーション結果が変わってくるため、現実と比較するためにはパラメータ同定のためのキャリブレーション手法について検討する必要がある。

そこで本研究を取りまとめる段階では、避難行動を構成する要素行動を表現する際に、できるだけ実験や観察に基づいた様式やルールを取り入れるようにした。例えば、浸水深と歩行速度の関係や、自動車を停止させようとする時の減速ルールは、それぞれの要素行動を観測したり、実験したりすることで一定の妥当性を保証することができた。こうした一定の妥当性を持つ要素を積み重ねることで、全体としてのモデル上の行動の現実性が担保できるのではないかと考えた。もちろん、個々の要素が妥当であっても組み合わせによっては不自然な点が出て来ないとは限らない。この点については、常に注意を払いながら本モデルによるシミュレーション結果を考察して行かなければならない。

以下、再度本研究における成果と課題を確認しておく。

第1章と第2章では、近年の水害の状況を整理し、予警報や避難といった危機対応が被害軽減に益々重要となっていることを指摘するとともに、避難行動に関する既往研究をレビューし、本研究の位置付けを行い、本論文で開発したモデルのベースとなった水害避難マイクロモデルの概要について説明した。

第3章では、水害避難行動時の混雑の様子と、それが個々の避難者に及ぼす影響を表現する方法について考察した。都市部での浸水を考えると、比較的広い領域にわたって大人数が避難しなければならないというような状況も懸念される。こうした場合、避難域に隘路となる橋梁

があったり、障害物が存在したりすることの影響を把握しておくことが重要になるが、モデルの多くは街路を一次的に点と線で表現するため、経路上が混雑している際に、避難者が他者を回避する行動の詳細などを表現することには向いていなかった。そこで本章では、混雑の影響を考慮した避難シミュレーションモデルを二種類開発した。観測実験に基づいて群衆密度—歩行速度の関係式によって混雑の影響を表わしたモデルは、計算負荷も軽く簡便に用いられるが、混雑が深刻になると避難者がほとんど前進しなくなるなど非現実的な挙動が見られた。避難者の回避行動を詳細に表現するモデルにおいては、計算負荷は比較的高くなるが、混雑が深刻な状況でもより妥当性の高い避難行動のシミュレートが可能にした。

回避行動モデルにおいては、道路ネットワークを面的に捉えた上で、人を一定の領域を持つ円と考え、それらが接触することなく移動するため、追い越し・減速・追従歩行など避難者が経路上でとる回避行動を表現するモデルについて考察した。また、提案したモデルと観測実験より得られた、経路上の人の密度と歩行速度との相関によって混雑の影響を表現するモデルとを比較検討し、詳細な回避行動を表現する手法が経路上の混雑を表現することに適していることを確認した。

本章では、また両モデルの開発過程において、道路を二次元的に表現する際に多角形として表現するのではなく、矩形の連続体として表現する道路ネットワークモデルを考案し、計算精度を損なうことなく負荷を下げることに成功した。

第4章では、水害避難時における自動車挙動のモデリングについて考察した。多くの避難行動のシミュレーションモデルに関する研究は、それぞれの解析目的によって、重視するパラメータは違っているものの歩行者のみによる避難を前提としていた。

しかし実際には、自動車を用いた避難も多数行われている。そこで、本章では、現実的に避難行動をシミュレートする為に、自動車の存在や使用を含めたモデル構築を試みた。

しかし、個々の自動車の行動を表現できる既往の自動車交通シミュレーションモデルを、避難シミュレーションで用いられるような広範なフィールドで適用すると、多大な計算負荷による困難が生じる。一方、個々の自動車を再現せず、交通量を扱うモデルの場合、浸水による被害の状態を時間的、空間的に細かく把握することは難しい。したがって、避難シミュレーションに自動車行動モデルの検討にあたっては、個々の自動車を扱いつつ、行動アルゴリズムをできる限り簡素化して、計算負荷を下げるのが課題であったが、本研究では、自動車の走行シーンを定常走行時、減速停止時、加速発進時の3分類に単純化し、さらに自動車の相対位置で区別した上で、自由走行モード、追従モード、減速停止モードの3つのシンプルなモードで表現した追従タイプの自動車交通シミュレーションモデルを開発し、計算負荷を低減しつつ広域なエリアでも可能な個別の自動車の挙動再現を可能とした。

また、上記の自動車挙動のモデルを実流域におけるシミュレーションに適用して、自動車を避難行動に用いた場合、徒歩に比べて素早く目的地に到達できるというアドバンテージもあるものの、渋滞列を作ってしまうなどして経路上の混雑を受けやすいなど、そのリスクについて考察した。

第5章では、道路ネットワークを用いたシミュレーションにおいて、信号制御を簡易なモデルで可能な限り現実的に再現する方法について考察した。特に自動車を対象とした交通シミュ

レーションを行う場合、信号制御を表現することは必須となるが、シミュレーションの対象領域の信号設置状況や制御状況のデータは容易に入手することはできず、また実地の調査にも困難を伴う。そこで本章では、それらを数値地図等の簡易な道路ネットワークデータから再現する方法を開発し、その妥当性を検討した。

第6章では、対象地域における平時の交通量を示すデータは、十分な量が手に入るとは言い難い状況である。また、多くの同種の自動車交通モデル(C-F モデル)では、必要なデータを実測によって補っているが、避難シミュレーションのような広域なエリアを対象とする場合はその全てを実測でまかなう事は現実的ではない。そこで、道路交通センサスのデータと最小限の観測地点に実測によるデータを用い、妥当な断面交通量データを推測する方法を提示した。また、そうした断面交通量データから、C-F モデルで用いる OD 交通量データを得た。

上記の方法で得られた平時の交通量のデータと、氾濫解析のデータを用いて統合避難シミュレーションを行った結果、大規模な浸水を想定した場合には、避難の成否には平時の交通量よりも浸水深が決定的であったが、浸水はあっても部分的で浸水深が自動車の走行を不可能にするほどではない状況下では、平時の交通量は避難行動の成否に十分影響を与えうることを示した。

また、被害が大きくなることを防ぐ為に、早い段階で避難を開始した段階では、交通量の大小の影響が大きく表れることを確かめた。

以上のように、本研究では混雑が歩行避難者の行動に与える影響や自動車による避難行動を表現しうる水害避難シミュレーションモデルを構築した。

以上で論じてきたように、本論文はより現実的な水害避難シミュレーションを行う為に、最低限考慮しなければならないと考えられる経路上の混雑、自動車の使用や存在、信号制御の影響などの要素に注目し、さらにそれらの個々の要素をできるだけ簡易にモデリングする方法を提案した。大規模な浸水が発生した際には、危険区域外に避難する為に自動車を利用せざるをえない地域においては、避難ルートを選定が重要となる。それぞれのルートを定量的に評価しうる本モデルは、地域の避難計画の立案に非常に有用であると考ええる。また、本研究で提示したモデルによるシミュレーション結果が、市民の水災害に対するイメージーションを刺激し、防災意識の向上の一助となることを願って、本研究の結びとする。

謝辞

本研究を行うにあたり、京都大学防災研究所堀智晴教授には、あらゆる場面で懇切なご指導を賜りました。堀智晴教授は、私の学部生時代と修士時代の指導教官でもあり、専門分野はもちろん論文の書き方やプログラミングの基礎など基本的な部分まで、さらには研究に対する心構えや働くことの意義など公私にわたって時には厳しく熱心に指導をしてくださいました。また、私が博士課程進学を決意した際、決して良い学生ではなかった私を快く迎えてくださり、以前と変わらぬご指導をしてくださいました。堀先生のご指導を賜れたことは、私の生涯にわたる財産です。ここに深甚なる感謝の意を表します。

京都大学防災研究所角哲也教授は、私の副指導教官を引き受けてくださり、災害シミュレーションを研究テーマとして扱うに際し、ともすれば陥りやすい誤った方向性と、扱うことに伴う責任について現場での豊富なご経験から指針してくださいました。また、研究に着手した当初から常にアウトプットを意識することの重要性をご教示賜りました。ここに心よりの感謝の意を表します。

京都大学防災研究所戸田圭一教授には、都市型水害と避難シミュレーションについての学術的な視座から数々の貴重なご助言をいただきました。特に、クルマ社会と水災害への脆弱性というテーマについては、先生の開催なさったワークショップの場も含めて、多くの場面でご教示を賜り、研究の動機に関わる部分も含めて大いに刺激を受けました。ここに深く感謝の意を表します。

京都大学工学研究科立川康人准教授には、私の副指導教官を引き受けて頂き、研究の全ての段階において貴重なご教示を賜りました。また、社会人学生としての生活の仕方や研究の進め方の注意点など、公私にわたってさまざまなご助言を賜りました。お会いした時にはいつも必ず叱咤激励の言葉を賜り、どれほど励みになったことか言葉に尽くせません。ここに心よりの感謝の意を表します。

京都大学防災研究所野原大督助教には、研究のあらゆる段階で示唆に富んだ指摘を多数頂戴し、非常に参考になりました。また、私が研究に行き詰った時は、いつも大局的な視点からご助言をくださいました。そのご助言のおかげで、袋小路を打開できた事は数えればきりがありません。ここに心よりの感謝の意を表します。

京都大学大学院工学研究科椎葉充晴名誉教授には、研究に着手した当初より多数のご助言を賜りました。研究のみならず、人としての生き方についても、コーヒープレイク中のお話のなかでふと触れられることが大変参考になりました。本当にありがとうございました。

京都大学防災研究所 小尻利治教授、寶馨教授、中北英一教授には折に触れて貴重なご教示を賜りました。ここに心よりの謝意を表します。

滋賀県土木交通部流域政策局流域治水政策室の皆様には、非常に貴重なデータを賜るとともに惜しみないご協力を頂きました。特に中西宣敬氏には、データ概要や解析条件について丁寧にご教示くださり、大変お世話になりました。本当にありがとうございました。滋賀県における地域防災の取組みに、僅かでも貢献できましたら望外の喜びです。

日本工業英語協会の中山裕木子講師には、技術英語の記述について懇切丁寧なご指導を賜りました。英語での論文執筆や英語による口頭発表を成し遂げられたのは、中山先生のご指導のおかげです。また、英語はもとより研究を発表する際のコミュニケーション技術についても非常に示唆に富んだアドバイスを頂戴いたしました。ここに深く謝意を表します。

本研究を行うにあたり、京都大学防災研究所附属水資源環境研究センター地球水動態研究領域の皆様には深く感謝の意を表します。河崎千里秘書には、常に快適な研究環境を整備していただきました。中島正人君、和田洋介君には、同領域の研究テーマを選んでいただくこともあり、多くの場面で多大な協力を頂きました。天井洋平君と杉本悠君には、炎天下の苛酷な調査にも快くご助力をいただきました。その他、多大なるご支援を頂戴しました京都大学防災研究所附属水資源環境研究センターのスタッフの皆様方や学生諸兄に心より厚く御礼申し上げます。

最後に、私の博士後期課程への進学に対して最大限の理解を示し、有形無形の惜しみない協力をしてくれた妻の茜、私が悩める時や挫けそうな時にはいつも明るい笑顔でもって再び机に向かう力を与えてくれた娘の奏、常に私の傍で温かい目で見守り、時には貴重なアイデアやヒントをくれた相棒のサスケに心を込めて感謝の意を表します。