

## 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

### Signal Control Model And Car Behavior Used In Simulating Flood Evacuation

花島 健吾・和田 洋介・堀 智晴・野原 大督

Kengo HANAJIMA, Yousuke WADA, Tomoharu HORI and Daisuke NOHARA

#### Synopsis

Although it is important to retain the flood water within the river channels by using dikes and reservoirs, these facilities alone cannot cope with excessive floods. In Japan, appropriate combination of facility-based and non-facility-based countermeasures is getting more important. To determine non-facility-based countermeasures, we need to simulate flood hazardous situation. However, simulation models which include only evacuating on foot are not enough because our society and our lifestyles are based on using cars.

In this study, an evacuation simulation model which expresses the signal control and the behaviors of cars is developed. The performances of this model have been tested in the several simulation results in actual flood-plain areas in Japan.

**キーワード** : 水害, 避難, シミュレーション, 自動車, 信号制御

**Keywords** : flood disaster, evacuation, simulation, human behavior, car behavior, signal control

#### 1. 本研究の背景と目的

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。整備を続けることは重要だが、水害が発生した際に最低限、住民の人命を守る事を考えるならば適切な避難行動を取るための対策が重要となる。適切な避難対策を検討する場合、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。

そのため、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)、高橋ら(1970)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、高棟ら(1993;1995)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)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)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)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。

また花島ら(2012)は避難者の詳細な避難行動を明らかにすることにより、避難時に生じる経路上の混雑を考慮でき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、重視するパラメータは違っているものの原則として歩行者のみによる避難を前提としていた。現実には避難場には多くの車が存在しており、道路上に流された車両が避難遂行の障害物となる恐れがある。また、車両を用いた避難も実際には行われており、こうした避難車両による交通障害が間接被害をもたらす恐れがある。深草・戸田ら(2008)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。

車両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(1997)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。そこで、狩野ら(2002)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管制をモデル化した。また高山ら(1993)は、信号機に交通量配分の役割をさせ、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。しかし、多くのモデルは平常時の交通を対象としたもので、水害等の緊急状況下での交通障害の発生をシミュレートするにはさらなる検討が必要である。

そこで、本研究では、筆者らが従来から開発を進めてきた水害避難マイクロモデルを基本として、車両による避難行動のシミュレーションが可能となるよう機能拡張を図る。

## 2. 自動車を用いた避難行動モデル

### 2.1 道路モデリング

洪水からの避難プロセスをシミュレートする際、精緻な道路ネットワークのモデルは不可欠である。花島ら(2012)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導入した。数値地図において道路は中央を折れ線近似した線(Arc)で、道路の交差点は点(Node)で一次元的に表現されているが、当モデルにおいては、NodeとArcから矩形の連続体で表された二次元道路モデルを構築している[Fig. 1(a)]。これにより、追い越しや回避などの詳細な避難行動をわずかな計算負荷の増加で表現できる。

現行の水害避難マイクロモデルは歩行者のみの避難を前提に設計されていた為、車両を通行させるにあたり、歩道と車道に分けてそれぞれの通行可能領域とともに道路モデルを再定義した[Fig. 1(b)]。

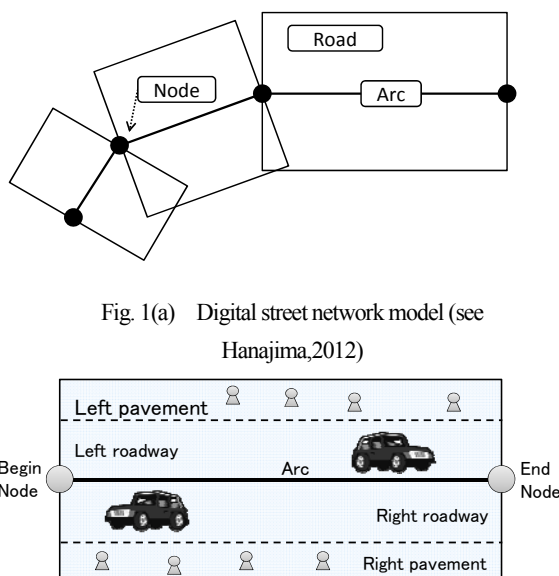


Fig. 1(a) Digital street network model (see Hanajima,2012)

Fig. 1(b) Detail of road network

### 2.2 歩行避難者のモデル

歩行避難者(以下:歩行者)の行動は、堀ら(2004)の水害避難マイクロモデルに基づいてシミュレートされる。道路上の歩行者の位置づけは、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。歩行者が移動して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。歩行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-Floyed法(1932)によって計算されており、歩行者はその計算結果を参照して次に進むべきArcを決める。

また各歩行者は、花島ら(2012)の回避行動アルゴリズムに従い、自分の進行方向に他の歩行者あるいは障害物を見つけた際は、回避しつつ進路を変える[Fig. 2]。これにより、経路上の混雑や障害物による遅延など、避難遂行への影響を評価できる。

矢守ら(1992)は、人にはこれ以上の接近を不快と感じる円状のパーソナルスペースがあるとして、これを人体円とした。本研究でも、これを適用して各歩行者は直径1mの人体円として表現する。各歩行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。各歩行者には、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車両などの障害物を認めた場合、その歩行者は回避行動をとる。進行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転回される。側方間隔は建部(1990;1994)ら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。領域の大きさは、進行方向の向きに1計算ステップの間に歩行者が進む距離、進行方向の法線方向には人体円の直径の1.2倍の長さとする。

上記のモデルの歩行者が、中央防災会議による観測実験(2008)の結果とよく一致する挙動をとる事が花島ら(2012)により示されている。

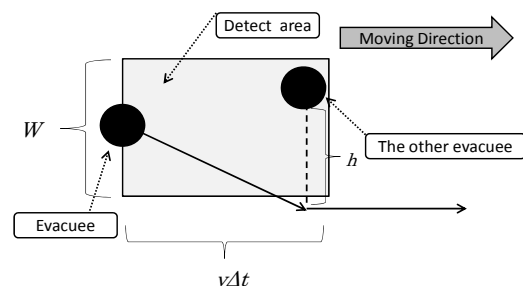


Fig. 2 Behavior of pedestrians

### 2.3 車両避難者のモデル

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)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。

前者は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る。後者は交差点数( $10^1 \sim 10^2$ )の局所的なエリアで、交差点改良や駐車施設整備などのミ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なので、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、本研究では、花島ら(2012)が提案した水害避難ミ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[Table 1].

本研究において導入する、車両による避難者（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ミ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。

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

Table 1. Modeling of moving car

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。

#### (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 $a_i(m/s^2)$ で加速を続けるものとする。

#### (2) 減速停止モード

赤信号を認めて停止するような場合は、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とになる。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の報告があるが、場面や運転者によるバラツキも大きい。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 $a(m/s^2)$ を求めると

$$a = -\frac{v_0^2}{2x} \quad (1)$$

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、

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

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/s<sup>2</sup>) とする。今標準速度  $v_{\max}$  (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、障害物を認知し、停止の意思決定を行い、ブレーキを操作、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

$$a_{\min} = -\frac{v_{\max}^2}{2l_{\text{stop}}(v_{\max})} \quad (3)$$

となる。これが最高速度に対す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

$$T_{\text{stop}}(v_{\max}) = \frac{2l_{\text{stop}}(v_{\max})}{v_{\max}} \quad (4)$$

となる。

### (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、資料<sup>17)</sup>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。本研究で作成した追従走行モデルは次のようである。

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される。

#### (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<sup>2</sup>) とする。時刻  $t$  (s) での実車間

距離を  $l_{\text{real},ij}(t)$  (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  $l_{\text{ideal}}(v_i(t))$  (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。

$$l_{\text{ideal}}(v_i(t)) = l_{\text{real},ij}(t) + v_i(t) \cdot \Delta t - v_j(t+1) \cdot \Delta t \quad (5)$$

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分け考える。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ため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にする。

#### (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。

## 2.4 信号による交通制御

以前の災害避難ミクロモデルでは、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。しかし車両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。車両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。信号機による交通制御モデルとしては、流体モデル、車追従モデルなどがあるが、本研究では狩野ら(2002)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。

### (1) 道路ペアの設定

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。

- ① 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)
- ② 傾きの差が0に最も近い2本のArcを第1ペアとする
- ③ 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
- ④ 以下、順次繰り返す
- ⑤ 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。

### (2) 制御ルール

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。

- ① 第1ペアに属するArcを移動可能とする
- ② 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
- ③ 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
- ④ 以下繰り返し[Fig. 3]

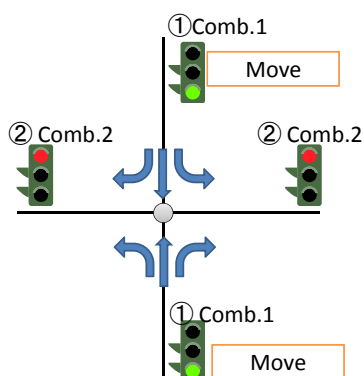


Fig. 3 Signal control rule

### (3) 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の状態が(2)で言う移動可能であれば、次に進むべきArcに進む。移動可能でなければ、静止してステータスが変わるのを待つ。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[Fig. 4].

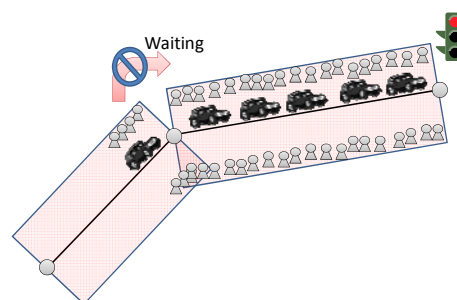


Fig. 4 Waiting line

## 3 適用と考察

### 3.1 適用地域

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9.45km<sup>2</sup>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。

### 3.2 シミュレーションの初期条件

#### (1) 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。[Fig. 5]は適用地域の航空写真で、[Fig. 6]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。[Fig. 6]の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。

#### (2) 避難者の設定

歩行者5500人及び車両2000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



Fig. 5 Study area (Torahime town) (Copyright Cnes/Spot Image, Digital globe, Geo eye)

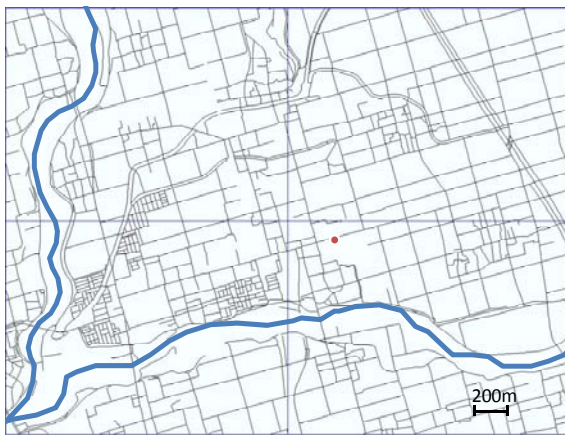


Fig. 6 Digital street network of study area

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<sup>19)</sup>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。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氾濫解析データは用いてない。

### 3.3 歩行者の避難行動

[Fig. 7]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。

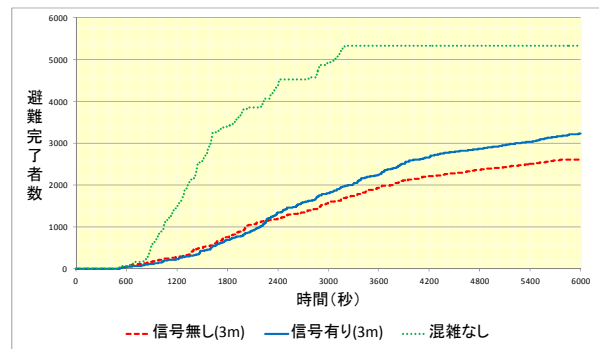


Fig. 7 The number of pedestrians who complete evacuating

### 3.4 信号保持時間の影響

[Fig. 8]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。

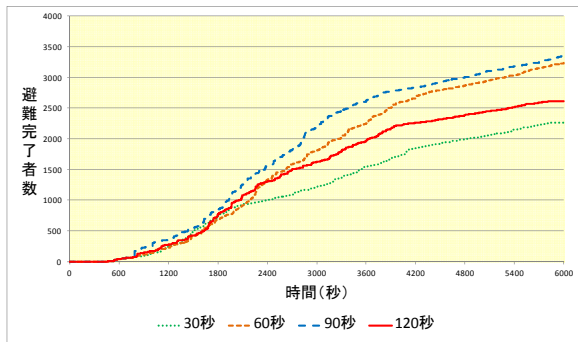


Fig. 8 The number of pedestrians who complete evacuating under various signal durations

### 3.5 自動車による避難行動

[Fig. 9] は自動車の避難行動開始直後から20分後までの、避難完了台数を示したグラフである。点線が追従行動などの車両特有の挙動を考えずにモデル化した自動車エージェントを用いたケースで、実線が2.3でモデル化した自動車エージェントを配置したケースである。前者のケースでは、開始後10分までに全ての車両が避難完了している。この時、実際の道路の基本交通容量は1250台/hであるのに対し、目的地付近の道路では最大で3000台/h程度の交通量が発生しており、現実には起こるとは想起しにくいほど遅滞なく車両が進行している。これは、自動車特有の挙動を表現していない影響と考えられる。たとえば、青信号になった後の発進時にすぐに巡行速度に達するが、現実にはそのような事は起こらず、徐々に速度を上げていく。また、減速過程においても、前方の車両が1秒後に衝突する距離に近づくまで減速をしないが、現実の減速はもっと早いタイミングで行われる。つまり、より現実的な自動車行動モデルであれば、もっと信号による影響を受けるはずであると考えられる。

しかし、本研究で提案する後者モデルでは、信号や自動車の混雑の影響による遅滞が表現できており、概ね妥当な結果が得られていると考えられる。

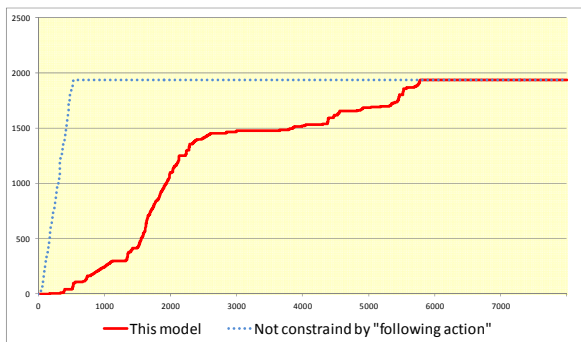


Fig. 9 The number of cars who complete evacuating

## 4. 結論

本研究では、水害時における信号による交通管制避難が避難シミュレーションに及ぼす影響を探るため、信号機を導入した避難場によるシミュレーションモデルを開発した。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、信号による交通管制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。また簡易な自動車行動モデルを用いて、自動車を用いた避難者への信号機による交通管制の影響や渋滞の一部を表現できた。しかし、避難場あるいはその周辺におけるキャパシティを無限として設定している点など改良を要する部分がある。現実には、目的地に到達した車両は敷地内もしくはその周囲に駐車されるはずであり、これらの駐車車両は経路上の障害物となり、ある程度時間が経過して多くの車両が集中すれば混雑の原因ともなるはずである。

また、現在のようなクルマ社会においては、水害時の自動車を利用した避難による交通障害や、避難に使われた自動車が水没する危険性、また避難経路上で立ち往生して歩行者にとっても新たな障害物となる危険性が指摘されている。実態に即した避難シミュレーションを可能とするためには、自動車と歩行者の交差や、浸水深や流速の自動車への影響などを含めた総合的なシミュレーションが必須である。また、本研究で開発した信号による交通管制と簡易な自動車挙動を再現したモデルは、そのようなモデルの開発につながる重要な1ステップである。

## 参考文献

- 赤羽,大口,吉井,堀口(2002) : 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),1997
- 岡本睦, 目黒公郎(2007) : 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.
- 片田敏孝・浅田純作・桑沢敬行(2000) : 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, Vol9, pp.49-58.
- 狩野,小塚(2002) : 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.
- 後藤仁志・原田英治・久保有希・酒井哲郎(2004) : 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.
- 鈴木介・今村文彦(2005) : 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.

高埴琢馬・椎葉充晴・堀智晴(1993)：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.

高埴琢馬・椎葉充晴・堀智晴(1995)：水害避難行動のミ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.

高橋保, 中川一, 東山基(1970)：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.

高山, 亀谷, 中村, 飯田(1993)：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, pp.432-433.

建部謙二, 中島一(1990)：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.

建部謙二, 辻本誠, 志田弘二(1994)：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.

首都直下地震避難対策等専門調査会(2008)：中央防災会議第9回報告.

西原巧(1983)：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

花島健吾・大澤豪・堀智晴・野原大督(2012)：経路上の混雑及び障害物の影響を考慮した水害避難行動モデル, 水工学論文集, 第56巻, 184-189.

深草新・戸田圭一・宇野伸宏(2008)：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.

堀口良太, 小根山裕之(2002)：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.

矢守克也・杉万俊夫(1992)：横断歩道における群集流の巨視的行動パターンの計量に関する研究-コンピュータグラフィックスによる計量-, 社会心理学研究, 第7巻第2号, pp.102-111.

Floyd, Robert W(1962): "Algorithm 97: Shortest Path", Communications of the ACM 5(6), 345-.

Hori, T. and Shiiba, M(2004): "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), 73-80.

(論文受理日：2013年6月11日)