

シミュレーションを用いた水害時自動車利用 避難行動に関する研究

ROAD TRAFFIC EVACUATION SIMULATION MODEL IN FLOOD DISASTER

劉 明微¹・梶田 佳孝²・角 知憲³

MingWei LIU, Yoshikata KAJITA and Tomonori SUMI

¹九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻(〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: lmwwb2 @doc.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院工学研究院環境都市部門(〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

³九州大学大学院工学研究院環境都市部門(〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

1. はじめに

近年, 地球環境の変化に伴い, 集中豪雨が全国各地で記録されている. 福岡でも平成 11 年 6 月 29 日に時間雨量 77mm(福岡市), 平成 15 年 7 月 19 日に時間雨量 99mm(太宰府市)の豪雨を記録し, 福岡市を貫流する御笠川が 2 度にわたり氾濫するなどして福岡市都心部に甚大な被害を与えた. 福岡都心部に位置する博多駅周辺部の浸水の状況を図-1 に示す. 自動車が冠水して動けない状態となっている. 都心部では自動車交通量が多く, 集中豪雨時には急激に道路が浸水するため, 自動車が道路上で動けなくなる可能性がある. また, 避難時において行政は自動車での避難は危険なため, 徒歩での避難を推奨しているが, 実際は高齢者にとって移動が楽, 荷物の運搬に便利, 移動速度が速いなどから自動車を利用する避難者が多い.

水害時における避難では, 今後においても自動車の利用が多いといえ, それを前提にした避難時の交通管理のあり方を検討する必要がある. 自動車を利用した避難者が多ければ, 道路の浸水箇所では自動車が動けなくなり, また, 浸水箇所周辺部で通過交通の自動車も含めて大渋滞が発生し, 避難所までの所要時間がかかることや緊急車両が通行できなくなるなどの問題が発生する. 本研究では, シミュレーションソフト”AIMSUN”を用いて, 水害時を想定した交通流シミュレーションモデルを構築する. モデルを実施することで, 自動車での避難状

況や周辺道路の渋滞状況の現象を視覚的に捉え, 問題を把握することを目的としている.

洪水避難シミュレーションに関する研究では高橋ら¹⁾が洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムを評価している. しかし, 避難対象者が徒歩者のみとなっている. 自動車による避難を対象とした研究では, 深草ら²⁾は静的な日交通量の配分を利用している. また, 桑沢ら³⁾は自動車交通の渋滞表現のみを簡便な方法で用いており, 時々刻々とリアルタイムに変化する道路の浸水状況を考慮しながら自動車の速度変化や渋滞を表現した交通流シミュレーションの適用はあまりみられない.

本研究では水害時の自動車による避難を対象として, 仮想都市の河川の破堤点の位置, 浸水を考慮した道路ネットワーク, 町丁目単位居住者人口分布を設定した上で, 居住者の避難行動の交通流シミュレーションを行い, 避難状況や道路上の渋滞状況を考察する.



図-1 福岡市博多駅付近浸水状況 (平成11年)

2. 洪水避難のフレームワーク

図-2に洪水避難時のフレームワーク⁴⁾の一例を示す。4つのモジュールがあり、各内容を以下に示す。

洪水予測 (HPM) モジュールは河川氾濫地点、浸水の予想持続時間、浸水範囲、浸水速度など洪水危害の影響を予測するものである。

人間の行動モジュール (HBM) は年齢、性別、各避難時間帯の避難者人数などの避難者の属性や避難行動を表現するモジュールである。また、避難警告の時間、範囲や頻度を変化させることによって避難率を変更することができる。

緊急管理決定サポートモジュール (EMDSM) は道路通行止め、資源配分などの道路管理者など行政の決定を考慮するモジュールである。交差点の信号現示のタイミング、交通規制などもこの一部である。このモジュールは行政の政策を表現する。

避難交通シミュレーションモジュール (ETSM) は交差点の座標、リンクの長さ、制限速度など道路ネットワークの作成と条件設定を行う。さらに、各自動車の追従モデル、車線変更モデルなどを利用する自動車マイクロシミュレーションを行うモジュールでもある。自動車マイクロシミュレーションでは道路の浸水高さによって自動車の走行速度を変化させる。

本研究はスペインで開発された交通シミュレーションソフトウェア“AIMSUN”を利用し、避難交通シミュレーション部分を実施する。洪水予測では河川氾濫地点、浸水範囲、浸水速度を簡易的に設定する。その設定に合わせて、時間帯別に道路ネットワーク上の各リンクで走行条件を変化させることで、道路の浸水状況を考慮する。また、人間の行動モジュールについては、避難行動パターンを設定する。それらを入力として自動車による避難行動の交通流シミュレーションを行った。

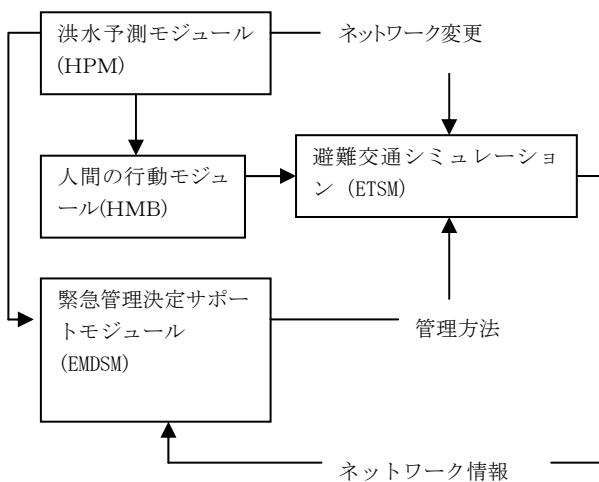


図-2 洪水避難のフレームワーク

3. シミュレーションの設定

(1) ネットワークの設定

本シミュレーションにおける道路網ネットワークは仮想都市を想定し、リンク、ノード(交差点を含む)、信号、出発地・目的地など構成される。総リンク数は882で、ノード数は388である。避難対象圏域は河川周辺に位置する30町丁とし、各町丁の世帯は各町丁の中心を出発地点として避難する。目的地はある地区の防災マップを参考にして、ネットワーク上に収容避難所を5地点設定した。各リンクについては長さ、車線の数、制限速度、リンクタイプ、リンクの標高などを設定した。リンクタイプは①国道、②主要地方道、一般県道 ③一般道の3種類がある。①国道と②主要地方道、一般県道を“幹線道路”とした。図-3の赤色の道路が幹線道路、黒色の道路が一般道である。

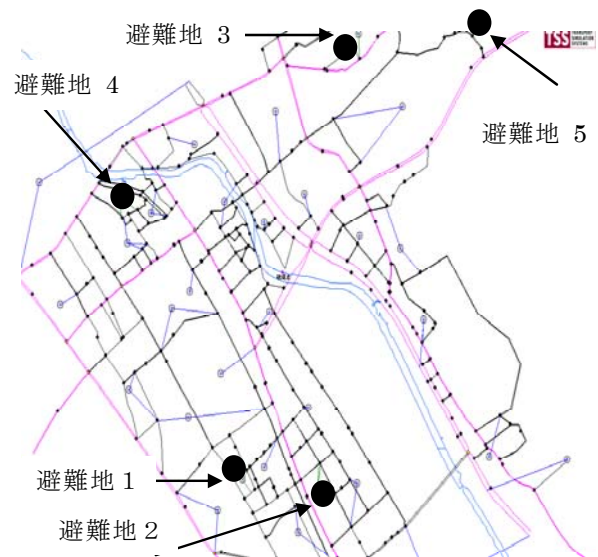


図-3 幹線道路と一般道路ネットワークの設定

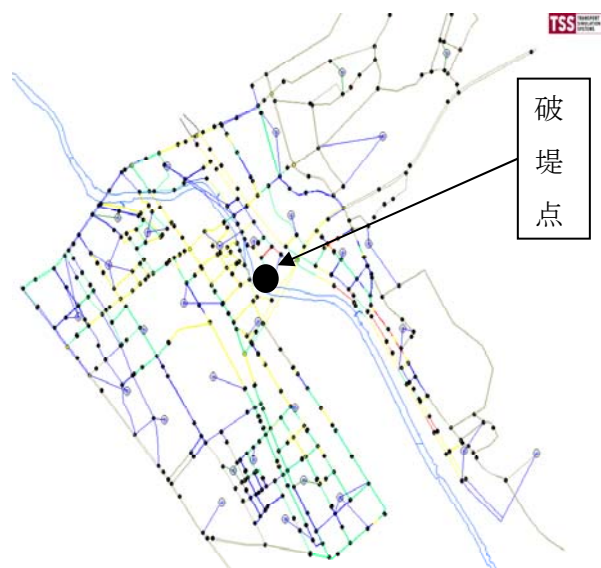


図-4 各リンクの道路高さと河川破堤点の位置

各リンクの高低の設定はある地区のM川の浸水想定避難図を参考し、各道路のリンクの高さを 0.1m 単位で設定した。図-4 に示すとおり、赤色リンクの高さは 0.1～0.9m、黄色リンクの高さは 1.0～1.9m、緑色リンクの高さは 2.0～2.4m、青リンクの高さは 2.5～3.0m、水色リンクの高さは 3.0m 以上である。

(2) 交通流シミュレーション

交通流シミュレーションに関しては、以下の追従モデルを採用した^{5), 6)}。まず、加速度を式(1)に示す。

$$V_a(n, t+T) = V(n, t) + 2.5 * a(n) T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad (1)$$

ここで、

$V_a(n, t+T)$: 車両nが時間 T で加速できる最大速度、

$V(n, t)$: 時間 t における車両 n の速度、

$a(n)$: 車両 n の最大加速度、

T : 反応時間 (=シミュレーションサイクル)、

$V^*(n)$: 車両 n の要求速度、

また、 $V^*(n)$ は式(2)のとおりである。

$$V^*(n) = \text{MIN}\{s_{\text{limit}}(s) * \theta(i), v_{\text{max}}(i)\} \quad (2)$$

ここで、

$\theta(i)$: 車両の許容速度、

$s_{\text{limit}}(s)$: リンクの速度制限、

$v_{\text{max}}(i)$: 車両の最大要求速度

次に、減速度を式(3)に示す。

$$V_b(n, t+T) = d(n) T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) [2\{x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)\} - V(n, t) T - \frac{V(n-1, t)^2}{1/2(d(n) + d(n-1))}]} \quad (3)$$

ここで、

$V_b(n, t+T)$: 車両nが時間 T で減速できる最大速度；

$d(n) < 0$: 車両 n の最大減速度；

$x(n, t)$: 時間 t における車両 n の位置

$x(n-1, t)$: 時間 t における車両 n の前の車両 n-1 の位置

$s(n-1)$: 車両 n-1 の有効長さ

$d(n-1)$: 車両 n-1 の減速度

最後に、速度とポジションを式(4)、(5)に示す。

$$V(n, t+T) = \min\{V_a(n, t+T), V_b(n, t+T)\} \quad (4)$$

$$x(n, t+T) = x(n, t) + V(n, t+T) T \quad (5)$$

ここで、

$V(n, t+T)$: 車両 n の時間 T での最終速度

$x(n, t+T)$: 車両 n の現在の車線における位置

一例として、交差点部でのシミュレーション実行時の状況を図-5 に示す。

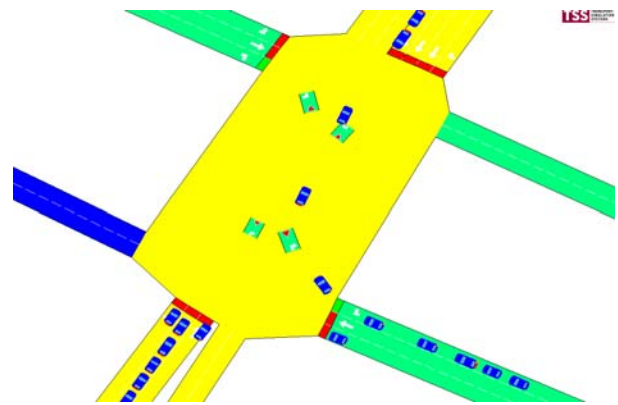


図-5 シミュレーション実行状況（交差点部）

表-1 避難行動の設定

設定項目	設定値またはパターン
避難者	対象圏域の居住者
避難手段	自動車
避難率	100% (対象圏域居住者全員が避難する)
避難出発地	30 箇所 (各町丁の居住地)
避難収容所選択	5 箇所 (居住地から最も近い避難収容所)
避難開始時間	河川破堤から
シミュレーション時間	60 分間
幹線道路	通過交通を含む全ての自動車が利用できる
一般道	避難者の自動車のみが利用可能

表-2 通過交通量と避難交通量の設定

	OD ペア数	OD 交通量(台数)
通過交通量	64 (8×8)	3628
避難交通量	150 (30×5)	11277

(3) 自動車による避難状況の設定

a) 走行限界水深の設定

まず、浸水により自動車が走行不能となる状況を表現するため、走行限界水深を設けた。本研究での自動車の走行限界水深は 0.3m と設定した⁷⁾。

b) 洪水氾濫モデルの仮定

本研究では洪水氾濫モデルが破堤点から、一定流速で拡散すると仮定した。至った地点で一定の速度で上がる。設定は流速: 1m/s、浸水深の変化速度: 0.01m/s、破堤点: 1カ所(図-4 参照)である。

c) 避難行動の設定

避難行動及び交通量の設定を表-1、表-2 に示す。また、道路ネットワーク上には避難行動のための交通量とは別に対象圏域を通過する通過交通量を設定した。なお、通過交通のみの運転者は対象圏域には土地勘があまりないと考えられるため、図-3 で設定した幹線道路のみを通行すると仮定した。

d) 道路の浸水状況を考慮した自動車速度の設定

自動車の制限速度は 50km/h として設定しているが、道路の浸水状況を考慮した自動車速度の設定は式(2)中の $V_{\max}(i)$ を変化させる。

$$V'_{\max}(n) = -\alpha H + V_{\max}(n) \quad (6)$$

ここで、

V'_{\max} : 浸水したときの最大車両 n の速度、

H : 浸水深 (0~0.3m)、

$V_{\max}(n)$: 浸水がない状態の最大車両 n の速度、

α : 正のパラメーター

4. シミュレーションの適用

浸水時の避難行動として、本研究では 2 つのパターンを設定した。避難情報が避難対象圏域の住民に提供され、その情報を受けた住民(世帯単位)が、すぐに避難行動をすることは限らないため⁸⁾、洪水被害が確実に発生する河川の破堤時から式(7)に設定した指数分布に沿って避難行動を行う場合(シナリオ A)を設定した。

$$T = -1/\lambda * \ln(u) \quad (7)$$

ここで、

u : (0,1) 範囲内のランダム変数

T : 連続した 2 台の車両の平均到着時間間隔

λ : 平均交通流(台/秒)

表-3 シナリオ A の避難状況

	避難人数	(通常時)		(浸水時)	
		避難完了人数	避難完了率	避難完了人数	避難完了率
避難地 1	1635	1471	89.97%	469	28.69%
避難地 2	2551	2090	81.93%	662	25.95%
避難地 3	1055	537	50.95%	204	19.34%
避難地 4	4531	2951	65.13%	863	19.05%
避難地 5	1505	479	31.83%	67	4.45%
合計	11277	7528	66.76%	2265	20.08%

表-4 シナリオ B の避難状況

	避難人数	(通常時)		(浸水時)	
		避難完了人数	避難完了率	避難完了人数	避難完了率
避難地 1	1635	1525	93.27%	1011	61.83%
避難地 2	2551	1989	77.97%	701	27.48%
避難地 3	1055	575	54.5%	205	19.43%
避難地 4	4531	2984	65.86%	938	20.7%
避難地 5	1505	262	17.41%	56	3.72%
合計	11277	7335	65.04%	2911	25.81%

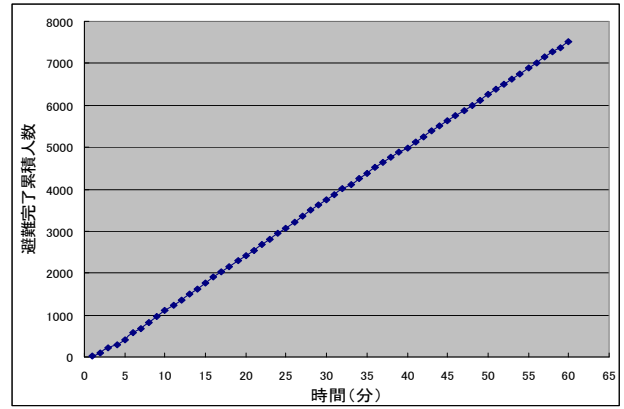


図-7 シナリオ A (通常時) の累積避難完了人数

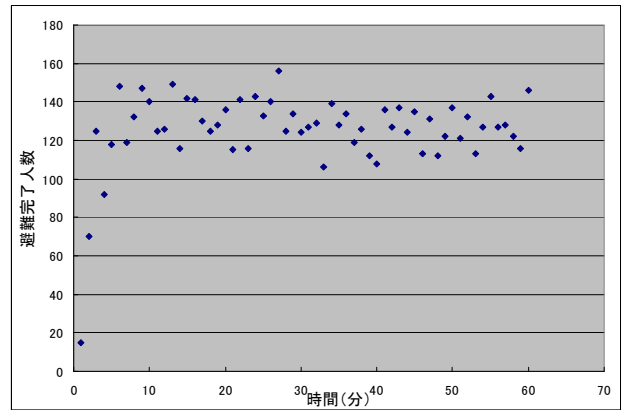


図-8 シナリオ A (通常時) の時間別避難完了人数

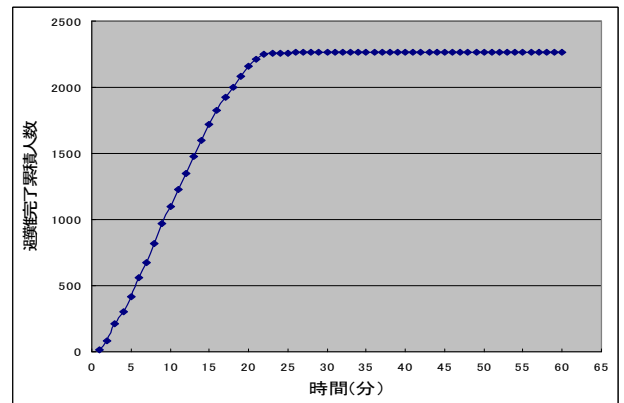


図-9 シナリオ A (浸水時) の累積避難完了人数

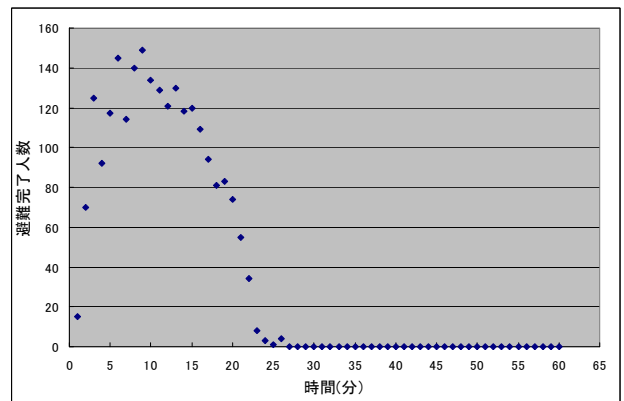


図-10 シナリオ A (浸水時) の時間別避難完了人数

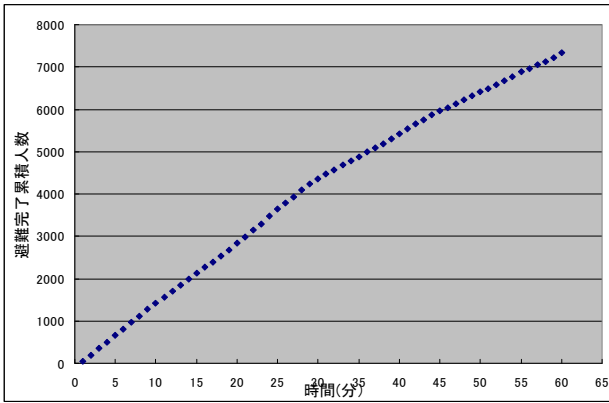


図-11 シナリオ B (通常時) の累積避難完了人数

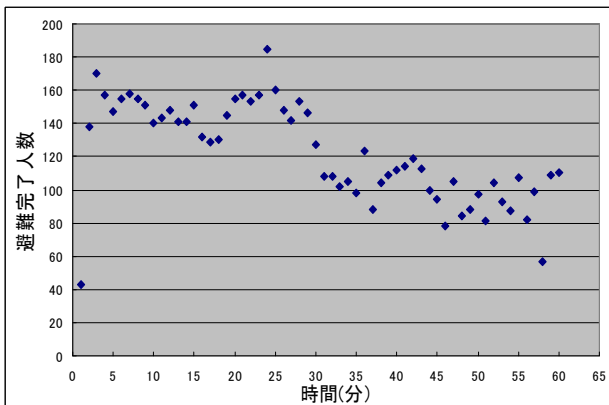


図-12 シナリオ B (通常時) の時間別避難完了人数

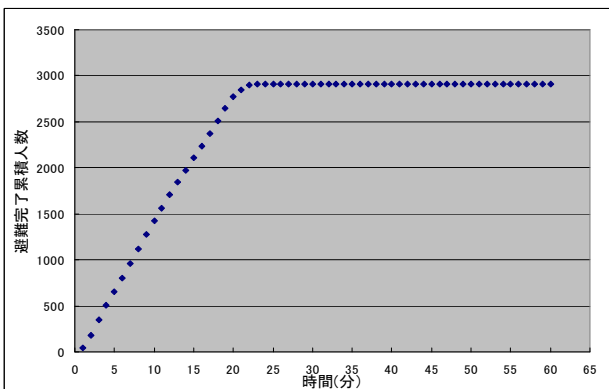


図-13 シナリオ B (浸水時) の累積避難完了人数

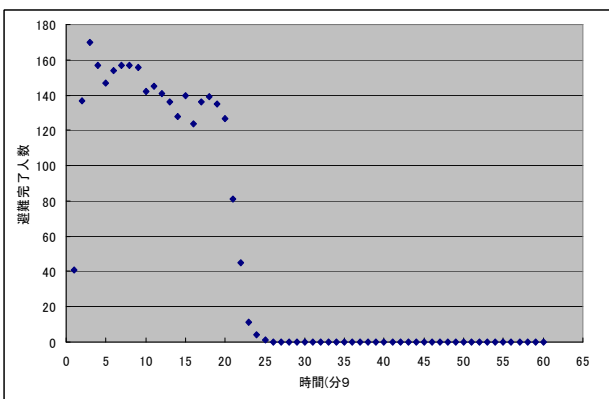


図-14 シナリオ B (浸水時) の時間別避難完了人数

また、河川からの破堤時に対象圏域の住民が一斉に自動車を使って避難する場合(シナリオ B)を設定した。

なお、避難情報を出したが河川から破堤せず浸水が発生しなかった場合もあるため、両シナリオとも比較検討のため、道路浸水被害がある場合(浸水時)に加え、浸水被害がない場合(通常時)のシミュレーションも実施した。シミュレーション結果を以下に示す。

避難地別の避難完了人数の状況を表-3、表-4 に示す。避難完了人数はシナリオ A,B とも通常時より浸水時が大幅に減少することがわかる。なお、シナリオ A, B とも浸水時は 30 分後に対象圏域の道路がほとんど浸水するため、自動車での避難ができなくなっている。また、シナリオ B はシナリオ A と比べると浸水時では避難完了人数が多い。これは、浸水時に避難開始時刻が早ければ、避難効果ができるといえる。

避難完了人数の河川破堤時からの時間分布を図-7～14 に示す。通常時のシナリオ B では時間帯別避難人数が 30 分をこえると若干減少している。この原因は避難地 4 付近で渋滞が発生し、避難地 4 に到着しにくくなっているためである。



図-15 シナリオ A (通常時) の渋滞状況 (20 分後)



図-16 シナリオ A (浸水時) の渋滞状況 (20 分後)



図-17 シナリオ B (通常時) の渋滞状況 (20 分後)



図-18 シナリオ B (浸水時) の渋滞状況 (20 分後)

浸水時の避難についてみると、避難タイミングが遅れると避難完了人数が減少すると見られ、両シナリオとも 20 分を超えると、道路の浸水や渋滞などにより、避難ができないとみられる。

最後に、対象圏域の道路ネットワーク上の交通渋滞を把握するため、浸水時に避難完了人数が急激に減少する 20 分後を対象に各シナリオのリンクごとの交通渋滞状況を図-15～18 に示す。赤い部分のリンクは交通密度 90 台/km 以上であり、渋滞が激しい箇所である。シナリオ B はシナリオ A より渋滞状況が激しいことがわかる。これは、シミュレーション終了時のシナリオ A (浸水時) の道路ネットワーク上に残存する自動車台数が 3632 台に対して、シナリオ B (浸水時) では 7214 台であることからみても明らかである。

次に、浸水時と通常時を比べると、渋滞状況に差はあまりみられない。これは出発地地点及び避難所地点付近の道路が浸水し、自動車による避難を実施できな

い世帯が増加することに起因する。シミュレーション終了時では、シナリオ A の通常時で避難を実施していない世帯が 1812 世帯、浸水時では 8848 世帯、シナリオ B の通常時では 1935 世帯、浸水時では 4406 世帯である。

5. おわりに

本研究では道路浸水を考慮した自動車避難の交通流シミュレーションを実施した。道路ネットワーク上の各リンクの高低などを設定し、対象圏域の居住者の避難行動に関して 2 つのシナリオで避難シミュレーションを行った。得られた結果から浸水が避難行動に大きな影響を及ぼしたことが分かった。

今後の課題については ①精度高い洪水氾濫モデルの適用②仮想都市の道路ネットワークを想定したが、実ネットワークへのシミュレーションの適用。③3D の実現。④緊急管理決定サポートモジュール(行政の施策)を入れて、各施策の効果を検証し、自動車を利用した避難も考慮したより効率的な避難施策を検討する。

参考文献

- 1) 高橋保, 中川一, 東山基: 洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 32 号 B-2, pp.1-24, 1989.
- 2) 深草新, 戸田圭一, 宇野伸宏: 都市水害に起因する道路交通障害について—京都市域を対象として—, 自然災害科学, Vol.26, No.2, pp.177-188, 2007
- 3) 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部門, Vol.64, No.3, pp.354-366, 2008.
- 4) Essam Radwan: Framework for Modeling Emergency Evacuation, Center for Advanced Transportation Systems Simulation, University of Central Florida, 2005
- 5) AIMSUN 5.0 Micro Simulator Users Manual.
- 6) AIMSUN NG Users Manual.
- 7) 高橋和雄, 高橋裕: クルマ社会と水害, 九州大学出版会, 1987.
- 8) 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.
- 9) Sangho Kim, Shekhar, S.: Contraflow transportation Network Reconfiguration for Evacuation Route Planning, IEEE Transactions on Knowledge and data engineering, VOL. 20, No. 8, August 2008.

(2008. 10. 16 受付)