路面冠水時の自動車交通特性と交通規制を考慮した

ネットワークフローの予測に関する研究

Research about network flow considering car transport characteristics under road submergence and regulation of traffic *

橋本　直樹**・梶田　佳孝***・角　知憲****

By Naoki HASHIMOTO**・Yoshitaka KAJITA***・Tomonori SUMI****

１．はじめに

近年，気象事象による洪水等による外水氾濫や，アスファルト舗装などによって排水が上手くできないことによる内水氾濫が起こり，路面冠水による被害が増えている．こうした路面冠水が起こるような水害時において，行政の避難計画は徒歩を原則とし，自動車の使用を禁止している．しかし，災害要援護者と呼ばれる高齢者等の避難に自動車は欠かせない．また，普段から乗り慣れていることや荷物が運びやすい等といった理由で，避難する住民のほとんどが自動車を利用しているという現状がある．こうした理由から，自動車の利用を前提とした避難の可能性について議論することに大きな意味があり，そのためには路面冠水時の自動車の流れをコントロールする交通管制の在り方を検討する必要がある．

こうした路面冠水時の交通管制のあり方の検討を行うため，交通シミュレーションによってネットワークフローの予測を行い，避難状況や周辺道路の渋滞状況を経時的かつ視覚的に捉えたい．それに必要となってくるのが，路面冠水時の交通工学的な自動車の挙動の把握である．ここで，気象状況と交通特性の関係を論じる研究は佐藤ら[1]や阿江ら[2]によって行われているが，道路が冠水した場合の交通特性に関する研究はほとんど行われていない．また，平位ら[3]は冠水時の自由走行速度・最小車間距離からなる交通特性を観測し，道路冠水時における交通特性の定量的な分析を行っている．洪水避難シミュレーションに関する研究では高橋ら[4]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が，避難対象者が徒歩者のみとなっている．桑沢ら[5]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．

そこで本研究は，平位らの行った路面冠水時の交通特性の測定を元に，路面冠水時の自動車の交通特性の把握および定量化を行い，仮想都市を設定した上で，居住者の避難行動の交通流シミュレーションを行い，路面冠水時の自動車の流れをコントロールする交通管制の在り方を検討することとする．

２．道路冠水時の交通特性

（１）路面冠水時の交通特性の測定[3]

a）測定方法

路面冠水時の交通特性を調べる研究資料として，2008年 5 月～7 月に各局で放映された日本列島を襲った豪雨による被害を伝える報道資料を断続的に録画したもの（図 1）を用いる．信頼性の高い交通特性のデータを得るため，①カメラが固定していること，②浸水深が確認できること，③安定した速度で走行していることの三つの条件を満たす画像情報のみを用いることとする．対象とする測定データは，道路冠水時の交通特性として自由走行速度（km/h）と最小車頭間隔（m）とする．

浸水深の測定は，視覚的に判断しやすいタイヤのリム部とゴム部の境界(軽自動車で約10cm,普通車で約12cm)よりも水深が上か下かの二段階で浸水深を分類する．水面が境界より上にある場合を浸水高，境界より下にある場合を浸水低と定義する．

図 1　報道資料の一例

*キーワーズ：交通流，防災計画

**　学生員，工修，九州大学大学院工学府
（福岡県福岡市西区元岡 744，TEL092-802-3403）

***　正会員，工博，九州大学大学院工学研究院
（福岡県福岡市西区元岡 744，TEL092-802-3407）

****　正会員，工博，九州大学大学院工学研究院
（福岡県福岡市西区元岡 744，TEL092-802-3405）

b）測定結果

自由走行速度と最小車頭間隔の測定結果を以下の図 2，図 3 に示す．また最小車頭間隔については k-v 関係に変換してプロットしている．これらの結果より，自由走行速度は，浸水深が高まるにつれ平均速度が減少し，ばらつきが小さくなっていることが分かる．最小車頭間隔は，このままでは浸水深の影響を把握することは難しい．

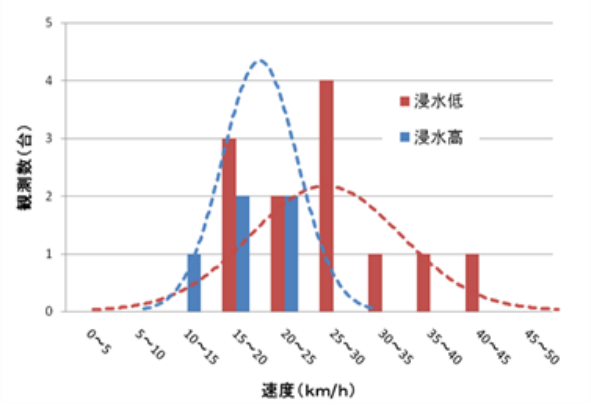

図 2　自由走行速度の分布

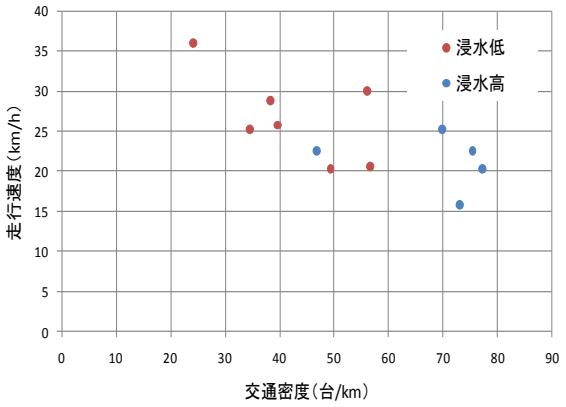

図 3　最小車頭間隔の分布（k-v 関係に変換）

（２）路面冠水時の交通特性の定量化

a）摩擦係数の定量化

冠水した道路に自動車が高速で進入した場合，タイヤが水に高速で衝突するので水の慣性により動水圧が発生する．この動水圧がタイヤと路面間の接地圧よりも高くなるとタイヤは浮き上がった状態になり，摩擦係数が減少する．この現象による摩擦係数の減少の実験データを文献から引用し，摩擦係数の減少割合が車体重量を動水圧が押し上げる割合であると仮定し計算を行うと，速度と浸水深の増加による摩擦係数の減少は図 4 のような曲面で表すことができる．

b）自由走行速度の定量化

浸水深の増加による自由走行速度の低下の原因を，前項で説明した摩擦力の低下によって生じるスリップの危険性を回避して自由走行速度が減少するという仮説を立てて物理計算を行う．スリップは，車が前に進もうとする駆動力がタイヤと路面の摩擦力よりも大きくなったときに発生する．これに対し，運転手は感覚的に十分遅い速度で走行するとみなして，「余裕度」のような表現をとる．スリップが発生する限界速度は横軸に浸水深を取ると図 5 の破線のようになり，前節の自由走行速度の測定結果の浸水低，浸水高がそれぞれ理論式の 5cm，15cm に合うようにスリップに対する余裕度γを掛けることで，自由走行速度は図 5 の実線のようになる．本研究では，γ＝0.52 と仮定する．

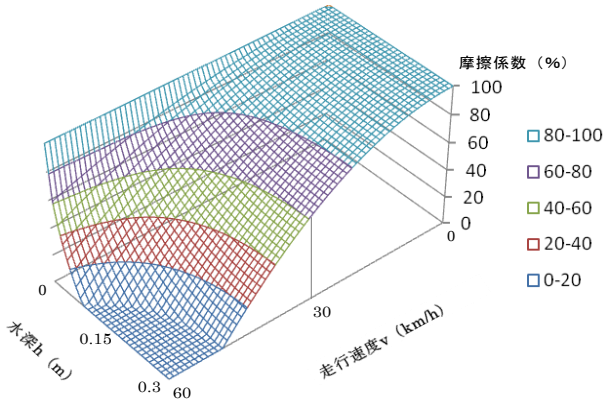

図 4　摩擦係数の減少（理論値）

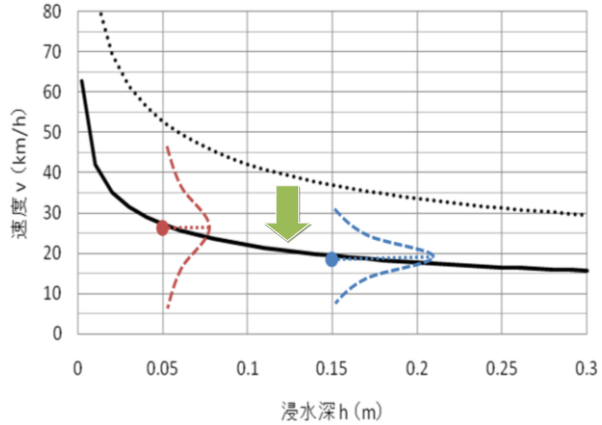

図 5　自由走行速度の定量化

c）追従理論式の作成

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[6), 7)]．まず，加速度を式(1)に示す．

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

$V_a(n,t+T)$：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．

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

$\theta(i)$：車両の許容速度

$S_{lim\ it}(s)$：リンクの速度制限

$v_{max}(i)$：車両の最大要求速度
次に，減速度を式(3)に示す．

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

・・・(3)

$V_b(n,t+T)$：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．

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

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

$V(n,t+T)$：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

3．ネットワークフローの設定

（1）シミュレーションの設定

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とし，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主要地方道と一般県道，③一般道の 3 種類があり，①と②を幹線道路とした．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6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．

浸水時の避難行動として，本研究では避難情報が避難対象圏域の住民に提供され，その情報受けた住民（世帯単位）が，すぐに避難行動をするとは限らないため[8]，洪水被害が確実に発生する河川の破堤時から式(6)に設定した指数分布に沿って避難行動を行う場合を設定した．

$$T=-1/\lambda*\ln(u)\quad・・・(6)$$

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)

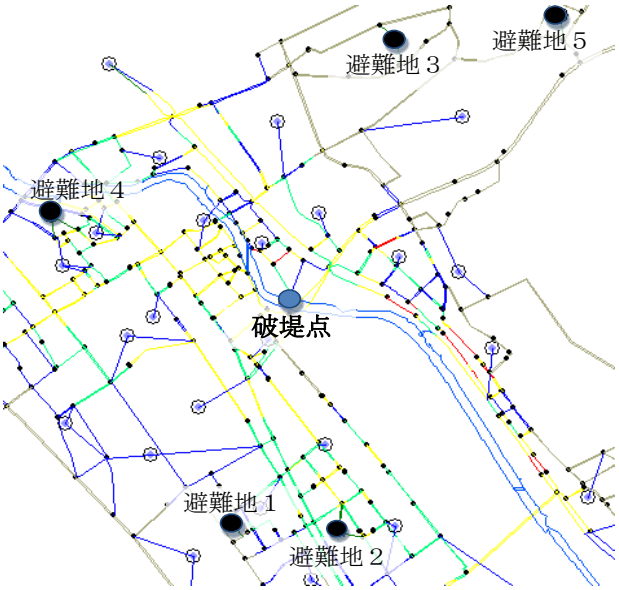

図 6　幹線道路と一般道路ネットワークの設定

（2）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[9]．

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，同心円状に一定流速度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とし，設定は流速度：1m/s，浸水深の変化速度：0.01m/s，破堤点：1ヵ所（図6参照）である．

c）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(7)中の $V_{max}(i)$ を変化させる．

$$V'_{max}(n)=-\alpha H+V_{max}(n)\quad・・・(7)$$

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

また，交通シミュレーションのマクロな動きを決定するため，路面冠水の影響を考慮した加速度式は式(8)，減速度式は式(9)のようになる．

$$a(n)=\gamma\left[f(v,h)g-\frac{R(v,h)g}{m}\right]\cdots(8)$$

$$d(n)=\gamma\left[-f(v,h)g-\frac{R(v,h)g}{m}\right]\cdots(9)$$

f(v,h)：摩擦係数
g：重力加速度（m/s²）
R(v,h)：水平方向流水圧抵抗（kgf）
m：車両重量（kg）

ここで，タイヤにかかる動水圧は、流水方向に対する橋脚の鉛直投影面積に作用する水平荷重（橋脚にかかる流水圧）に等しいと仮定する。流水圧の計算式は以下の式(10)のように与えられている[10].

$p = K \cdot v^2 \cdot A$ ・・・(10)

p：流水圧（tf）

K：流水圧抵抗係数

v：最大流速（m/s）

A：橋脚の鉛直投影面積（m^2）

d）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上で設定した幹線道路のみを通行すると仮定した.

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可能
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

e）交通規制の設定

交通規制として，破堤したと同時にネットワーク上の破堤点に向かう幹線道路を1時間通行禁止とした.また，通行禁止の幹線道路に入った通過交通は，別ルートを選択せずに停車していると仮定した.

（3）シミュレーションの結果

避難勧告時でも破堤がないことがあり，通常時と浸水時の場合を扱い，結果は表3のようになった．避難完了人数は通常時より浸水時が大幅に減少することがわかる．また，交通規制を行った場合は，行わなかった場合と比べて避難完了人数が多く，交通規制の効果が表れたと言える．これは，シミュレーション終了時に道路ネットワーク上に浸水して残存する自動車台数が，浸水して規制を行った場合では1193台であるのに対して，行わなかった場合では1691台であることからみても明らかであり，約500台の自動車が浸水せずに済んだことがわかる.

表 3　避難状況

		浸水なし 交通規制なし		浸水あり 交通規制なし		浸水あり 交通規制あり	
	避難人数	避難完了人数	完了率	避難完了人数	完了率	避難完了人数	完了率
避難地1	1635	1371	83.9%	168	10.3%	453	27.7%
避難地2	2551	1455	57.0%	221	8.7%	599	23.5%
避難地3	1055	751	71.2%	192	18.2%	208	19.7%
避難地4	4531	2735	60.4%	451	10.0%	791	17.5%
避難地5	1505	602	40.0%	150	10.0%	153	10.2%
合計	11277	6914	61.3%	1182	10.5%	2204	19.5%

4．おわりに

本研究では，路面冠水を考慮した自動車避難の交通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や通過交通などを設定し，対象圏域の居住者の避難行動に関して交通規制の有無で避難シミュレーションを行った．これにより，洪水時において適切な交通規制の必要性が示された.

今後の課題については，より精度の高い路面冠水時の自動車交通特性を交通シミュレーション内に導入する必要がある．また，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を実際の都市に適用し，通過交通が冠水しないような適切な交通規制を行いたい.

参考文献

1）佐藤馨一ら：非線形交通流モデルに関する研究，土木学会論文報告集，第258号，p85-95

2）阿江章ら：最近の高速道路の走行実態について，高速道路と自動車，第36巻，第10号

3）平位高浩，角知憲，梶田佳孝：道路冠水時の交通特性，土木計画学研究・講演集，Vol.38，2008

4）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.

5）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，Vol.64,No.3,pp.354-366,2008.

6）AIMSUN 5.0 Micro Simulator Users Manual.

7）AIMSUN NG Users Manual.

8）高橋和雄，高橋裕：クルマ社会と水害，九州大学出版会，1987.

9）片田敏孝，淺田純作，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.

10）道路橋示方書・同解説，日本道路協会，2002

11）川上省吾　松井寛：交通工学，第２版，森北出版，2002