

マルチエージェント・シミュレーションを用いた 高速道路走行車両に与える緊急地震速報の影響に関する検討

Effects of Earthquake Early Warning to Highway Vehicles using Multi-Agent Simulation

松本和貴¹, 丸山喜久², 山崎文雄²

Kazuki MATSUMOTO¹, Yoshihisa MARUYAMA² and Fumio YAMAZAKI²

¹群馬県東部県民局 (元 千葉大学大学院生)

Gunma Prefectural Government

²千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻

Department of Urban Environment Systems, Chiba University

It is anticipated that traffic accidents may occur because of the Earthquake Early Warning (EEW). The present authors introduced two driving simulators synchronized by server to perform virtual driving tests when the EEW is transmitted. To consider more realistic driving conditions, the agent-based model simulation was employed in this study. The behaviors of agents (drivers) were modeled based on the results of the driving simulator experiments. According to the numerical simulation of three moving vehicles under the EEW, a lower accident rate was observed on condition that more drivers turned on hazard lights after receiving the EEW. Hence, it is important to instruct drivers to turn on the hazard light before reducing moving speed if an EEW is transmitted on an expressway.

Key Words : multi-agent simulation, earthquake early warning, hazard light, expressway

1. はじめに

気象庁による緊急地震速報のテレビ・ラジオを通じた提供が2007年10月にスタートした。緊急地震速報とは、「地震の発生直後に、震源に近い地震計でとらえた観測データを解析して震源や地震の規模（マグニチュード）を直ちに推定し、これに基づいて各地での主要動の到達時刻や震度を推定し、可能な限り素早く知らせる情報」である¹⁾。この情報を利用して、列車やエレベーターをすばやく制御させて危険を回避したり、工場、オフィス、家庭などで避難行動をとることによって被害を軽減させたりすることが期待されている。

すでに、2006年8月に鉄道・病院・工場などの適切な利活用が可能とされた特定ユーザーへの提供は開始されており、2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震の際にも、先行的に提供されていた分野でその利活用の報告がなされている²⁾。例えば、新潟県北蒲原郡聖籠町のコパレントマテリアル新潟株式会社では、速報を17秒前に受信し、工場従業員の作業中断、安全な場所への移動を実施した。また、東京都千代田区の株式会社帝国ホテルでは、速報を約50秒前に受信し、全エレベーター（38基）は直ちに最寄り階で自動停止し、エレベーター内の閉じ込め事故を防止した。

一方、自動車交通や集客施設など、速報が事故や混乱を引き起こす恐れがあるケースも指摘されていた。それを受けて、在京の民放ラジオ6局は運転中のドライバーが引き起こす2次被害の懸念から、2007年10月の放送開始を

延期している³⁾。

自動車交通における地震が運転者に与える影響に関する研究として、山之内ら⁴⁾は運転ゲーム機を使用し、振動台上で様々な地震動を加えることにより、地震時における運転者の走行安定性への影響を模擬的に検証した。その結果、大きな地震動下では、実際の道路上で地震時に生じうる交通事故を推測させる結果が得られ、地震波特性が走行安定性に大きな影響を与えることが分かっている。また、丸山・山崎⁵⁾は2003年宮城県沖地震における地震動強さと高速道路運転者の反応の関係をアンケートにより調査した。計測震度が4.0未満の区間を走行している運転者のうち、地震に気づいた運転者は4割に達していないが、計測震度が4.0以上になると8割以上の運転者が地震を認識するようになったという結果を得ている。

丸山・山崎⁶⁾は、ドライビングシミュレータを用いた地震走行模擬実験を行い、地震早期警報が運転者に提供された場合にもたらされる効果を検討している。震動による道路変状を想定し、自車前方の障害物回避の対応状況を地震動早期警報の有無で比較すると、地震動早期警報が行われない場合は11名中9名が障害物に衝突したのに対して、早期警報の効果で11名の被験者のうち9名が回避に成功した。このように早期警報を与えることにより、とくに単独走行の走行車両に対しては、震動による道路変状に対する事故を防ぐことができるといえるだろう。また、清野ら⁷⁾は、高速道路を走行する自動車への地震動早期警報の適用を想定し、その効果を定量的に評価するため、走行車両数6台（走行車線と追い越し車線にそれぞれ

3台ずつ)の質点系モデルによる数値シミュレーションを行っている。早期警報が受信できる車両とできない車両が混在する時に、衝突の危険性が生じる場合があることを述べている。

山崎ら⁸⁾は、2台のドライビングシミュレータ(DS)を連動させて、緊急地震速報が与えられた場合の走行模擬実験を行っている(図1)。この実験では、表1のように、前後車両に速報が与えられた場合や、一方のみに速報が与えられた場合、さらには速報が与えられなかった場合の危険性について検討を行っており、情報格差があった場合に事故の危険性が高まることが示されている。この実験では2台の車両のみを想定した結果であり、さらに台数を増やし現実の高速道路の状況に近づけようとする、ドライビングシミュレータでは限界があると考えられる。

そこで本研究では、前述の2台のドライビングシミュレータ実験(DS実験)から得られた運転特性をモデル化し、マルチエージェント・シミュレーション(MAS)上でDS実験の再現性を検討する。また複数台の地震時の走行シミュレーションを行い、起こりうる危険性の評価を行うことを目的とする。

2. マルチエージェント・シミュレーション

マルチエージェント・シミュレーション(MAS)とは、コンピュータ内の多数の主体(=エージェント)に一定のルールを同時に実行させ、その結果出現する「現象」を観察するためのシミュレーションの技法である。この手法は、人間や社会集団の相互作用を研究対象とする社会科学の方法論として、非常に有効であると考えられており、近年徐々に注目を集めるようになってきている⁹⁾。

マルチエージェント・シミュレーションに関する既往の研究として、宮嶋ら¹⁰⁾は、多様な群集が雑然と避難する状況を想定したシミュレーションの開発を行ってきた。2005年宮城県地震の際に撮影された繁華街での人々の動きを撮影したビデオ画像の解析により、緊急時の歩行速度の計測を行い、現実的なモデルを作成している。大規模地下空間として地下鉄駅を対象に避難行動シミュレーションを行ったところ、エージェントが迷走することが円滑な避難を妨げることを示した。また、大畑ら¹¹⁾は、釧路中心市街地における津波避難施設の配置評価のためにシミュレーションを行い、海岸平野部の高台避難の確保が難しい市街地では、ビル等の津波避難施設が果たす重要性を確認できたとしている。

他にも、MASコミュニティの研究報告¹²⁾には、道路交通シミュレーション、消費者行動に基づいた売り上げ予測など幅広い分野で用いられた例が紹介されている。

本研究では、マルチエージェント・シミュレータとして(株)構造計画研究所と東京大学大学院総合文化研究科の山影進教授が開発したartisocを用いた。artisocでは、人工社会のモデルは「エージェント」と呼ばれる行動主体、個々のエージェントの属性(性質や役割)を表す「変数」、エージェントが行動する(他のエージェントと関係する)「ルール」、エージェントが行動(相互作用)する「空間」ないし「場」、シミュレーションやモデル全体に関わる「変数」や「ルール」を基本的な要素にしている¹³⁾。このMASソフトでは、画面上でシミュレーションの様子を観察でき、また画面上へのグラフ出

力や外部へのファイル出力が可能である。



図1 2台のドライビングシミュレータを連動させた地震時走行模擬実験の様子

表1 DS実験の内容と緊急地震速報のアナウンスの内容

実験1	前方車、後方車ともに速報なし
実験2	前方車、後方車ともに速報あり
実験3	前方車のみ速報あり
実験4	前方車、後方車ともに速報(指示あり)あり

実験2 実験3	「ただいま地震が発生しました。強い揺れに備えてください」
実験4	「地震が発生しました。運転中の人はゆっくりスピードを落としてください。」

3. 2台の車両による地震時走行シミュレーション

(1) MASの概要

図2にMASにおける緊急地震速報の想定を示す。本研究では、緊急地震速報の想定として2台のドライビングシミュレータ(DS実験)と同様に、2003年十勝沖地震のK-NET大樹付近の高速道路を想定し、速報開始から主要動到達までの余裕時間を10秒とした。MASでは、0秒から20秒まで通常走行させ、20秒で速報開始、30秒で主要動到達、50秒で終了するようにした。図3に定義したエージェントのサイズとMASにおける走行コースの概要を示す。図3のように前方車と後方車の2つのエージェントを用いた。また、1つのエージェントのサイズをX方向が4.4m、Y方向が1.75mと定義した。

(2) 運転者パラメータの検討

まず、DS実験で得られた速度データを参考にエージェントの速度 v_i をモデル化した。速度の状態を減速(ブレーキペダルもアクセルペダルも踏まない状態)、ブレーキ(速度を下げるためにブレーキペダルを軽く踏む状態)、停止(停車するためにブレーキペダルを強く踏む状態)、加速(速度を上げるためにアクセルペダルを踏む状態)とした。モデル化に当たり、減速、ブレーキ、加速に関してはDS実験1のデータを、停止に関してはDS実験4のデータを参考にしている。減速時の速度を式(1)、ブレーキ時の速度を式(2)、停止時の速度を式(3)、加速時の速度を式(4)で表す。

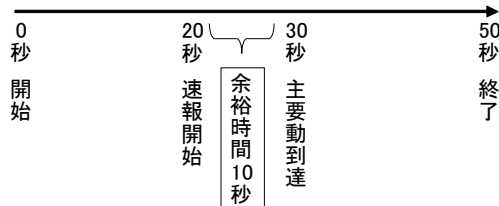
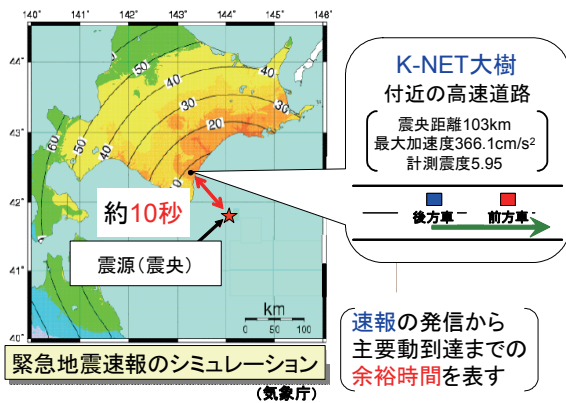


図2 MASにおける緊急地震速報の想定（2003年十勝沖地震）

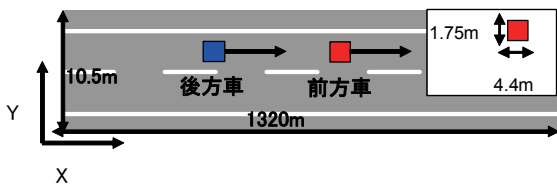


図3 エージェントのサイズの定義とMASにおける走行コースの概要

$$v_t = -S_L \cdot (t - t_0) + v_0 \quad [1]$$

$$v_t = B^{(t-t_0)} \cdot v_0 \quad [2]$$

$$v_t = S_T^{(t-t_0)} \cdot v_0 \quad [3]$$

$$v_t = A^{(t-t_0)} \cdot v_0 \quad [4]$$

ここで、 t は時刻、 t_0 は減速、ブレーキなどの開始時間、 v_0 はそのときの速度、 S_L は減速定数、 B はブレーキ定数、 S_T は停止定数、 A は加速定数である。

さらに、DS 実験データから運転者の走行特性をアクセルやブレーキのかけ方の違いで「やや緩やかにかける人」をタイプ1、「やや急にかける人」をタイプ3、「タイプ1とタイプ3の中間」をタイプ2として、3タイプに分け、それぞれのタイプについて S_L 、 B 、 S_T 、 A の4つの定数の値を定めた（表2）。図4に減速時、ブレーキ時、停止時、加速時におけるタイプごとの速度変化の様子を示す。ここでは変化の様子が分かりやすいように、初速度を22m/sとしてそれぞれ2秒間速度を変化させた。

(3) DS 実験の再現性の検討

以上のパラメータをもとに作成したモデルで、DS 実験で得られた速度などのデータを用いて、実験が再現されるかを検討した。ここでは DS 実験のデータにあわせるため、0秒で速報開始、10秒で主要動到達とした。

まず、DS 実験3の事故があったケース（3-3と3-8）と事故がなかったケース（3-6と3-10）のそれぞれ2ケースずつの計4ケースの検討を行った（表3）。DS 実験結果の詳細については、文献⁸⁾を参照されたい。なお、表3

表2 走行特性タイプごとの各定数の値

	$S_L (m/s^2)$	B	S_T	A
タイプ1	0.66	0.35	0.35	1.01
タイプ2	0.66	0.31	0.20	1.05
タイプ3	0.66	0.28	0.11	1.09

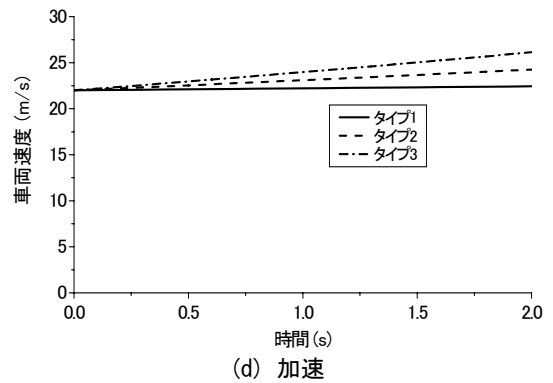
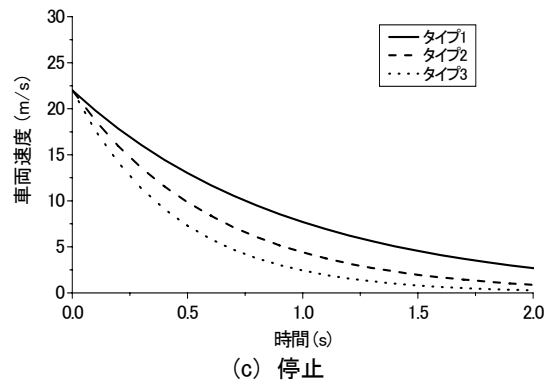
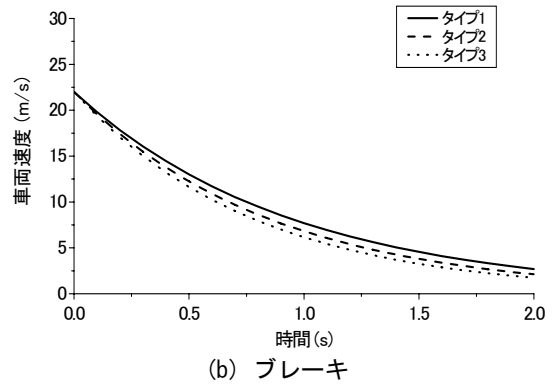
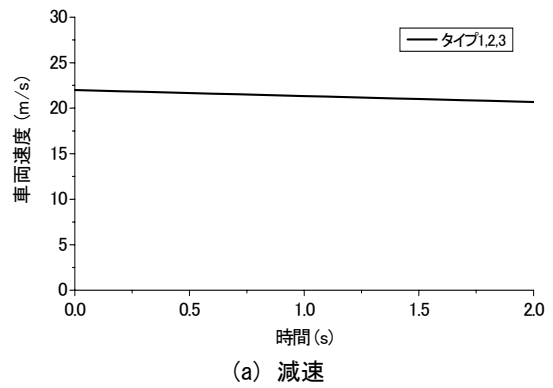


図4 走行特性タイプごとの車両速度の変化

表 3 DS 実験 3 における被験者の反応

被験者番号	事故	速報を聞いた前方車の反応	前方車ハザード	主要動時の後方車の反応	後方車ハザード
3-3	あり	停止	なし	そのまま	なし
3-6	なし	停止	あり	ハザードで停止	なし
3-8	あり	停止	あり	ハザードで減速	なし
3-10	なし	減速	なし	減速	なし

表 4 4 ケースのシミュレーションの初期条件

初期条件	3-3	3-6	3-8	3-10
前方車の初速 (m/s)	22.5	21.0	20.7	19.4
後方車の初速 (m/s)	22.7	19.5	20.8	21.7
初期車間距離 (m)	12.4	16.2	15.4	27.4
前方車の停止開始時間 (s)	8.1	11.6	9.3	
前方車のハザードランプ点灯時間 (s)		10.1	4.5	
前方車の運転者タイプ	3	1	3	2
後方車の運転者タイプ	1	1	1	2
後方車の減速開始車間距離(D_{sl}) (m)	10.4	16.3	18.0	20.3
後方車のブレーキ開始車間距離(D_b) (m)	6.0	14.0	7.0	11.6

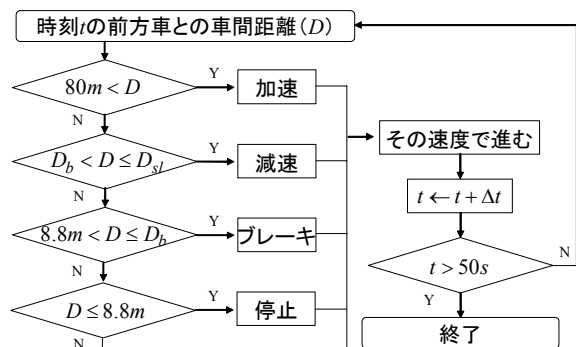


図 5 後方車の行動の基本パターンのモデル化

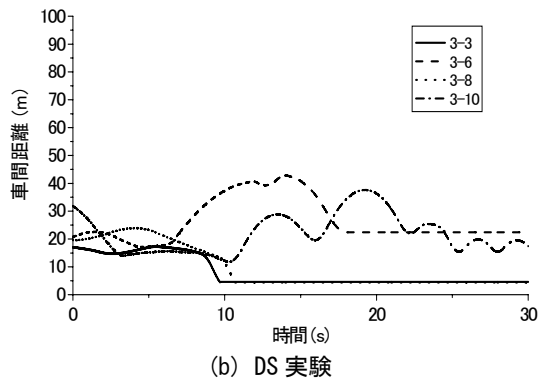
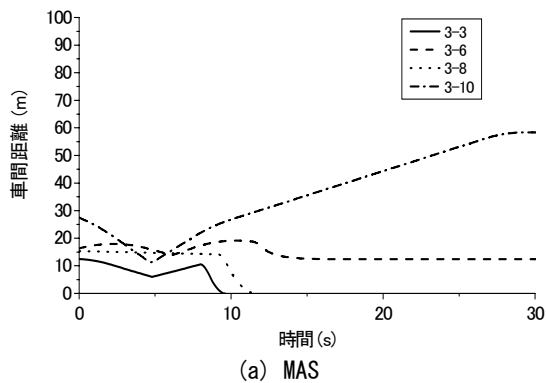


図 6 MAS と DS 実験の車間距離の時間変化

に表す被験者の反応は DS 実験データの速度グラフとアンケートから判別したものである。

4 ケースの実験データから抽出した各値を表 4 のよう

にシミュレーションの初期条件として与えた。後方車は車間距離が 80m を超えると加速するようにし、車間距離がブレーキ開始車間距離(D_b)より大きく減速開始車間距離(D_{sl})以下になると減速し、さらに車間距離が 8.8m より大きく D_b 以下になるとブレーキをかけ、また車間距離が 8.8m 以下になると「停止」の時と同様に強くブレーキをかけるようにした。以上の後方車の行動の基本パターンを図 5 に示す。これらの設定値は、DS 実験⁸⁾の結果の平均値をもとに定めた。

速報を受けた時の行動は、「減速」の場合は速報開始時から行うものとし、「停止」の場合は、DS 実験 3 の速度データに基づき、速報開始と同時にまず減速させた後に停止することとした。また、速報を受けていない時の行動は、前方車がハザードランプを点灯させた場合は、その 2 秒後に行うこととし、それ以外の場合は主要動到達時に行うこととした。なお、前方車のハザードランプを点灯させた時間については、データが存在しないため、後方車が減速やブレーキなどの反応を示した時間から仮定して決めた。図 6 に MAS と DS 実験における車間距離の比較を、図 7 に MAS と DS 実験における前方車の走行速度の比較を、図 8 に MAS と DS 実験における後方車の走行速度の比較を示す。シミュレーション結果では、DS 実験で事故を起こしたケース 3-3 とケース 3-8 で事故を起こしていた。また、図 6、図 7、図 8 から車間距離、走行速度ともに主要動到達 5 秒後(時刻 15 秒)程度までの範囲に関して DS 実験の結果をある程度再現できていると思われる。

次に、MAS 上で速報時の平均車間距離が DS 実験 3 の値 (23.5m) となるようにし、事故率を算出した。初期速度は DS 実験の 80km/h (=22.2m/s)平均を用い、標準偏差 1.1m/s の正規分布とした。速報時の平均車間距離は 12~35m (平均 23.5m) の一様分布と仮定した。また、後方車の減速開始車間距離(D_{sl})とブレーキ開始車間距離(D_b)は DS 実験 3 の平均値を用いて、 D_{sl} が 10~24m (平均 17m) の一様分布、 D_b が 5~17m (平均 11m) の一様分布と仮定した。以上の設定で作成したモデルのモンテカルロ・シミュレーションを 1000 回行い事故率を計算したところ、500 回付近で十分安定した事故率を示した(図 9)。MAS での事故率は、10.2%であった。DS 実験での事故率は 14.2%であるが、DS 実験の方が被験者の数が少なく、試行回数も少ないことを考えると、MA シミュレーションは DS 実験を再現できたものと考えられる。

以上の検討により、作成したモデルは DS 実験の再現性を得ることができたといえる。

(4) 2 台走行モデルの事故率の検討

上述の DS 実験 3 に関するモンテカルロ・シミュレーションで得られた事故率 (10.2%) はやや大きいように感じられる。これには、DS 実験 3 の平均車間距離 (23.5m) が、車速 80km/h のもとで通常想像されるよりも、やや小さいことが影響していると考えた。そこで、DS 実験 1~3 と同等のモデルを作成し、走行シミュレーションを行った。前方車と後方車の車間距離は DS 実験 1 の主要動到達前までのデータをもとに決定した。なお、DS 実験 4 に関しては、「停止」の状態をモデル化するためだけに用いているので、シミュレーションを行っていない。表 5 に各 DS 実験モデルの前方車と後方車に与える初期条件を示す。後方車の D_{sl} 、 D_b は DS 実験 1 のデータを参考に決定した。初期速度は DS 実験の 80km/h (=22.2m/s)平均を用い、標準偏差 1.1m/s の正規分布とした。

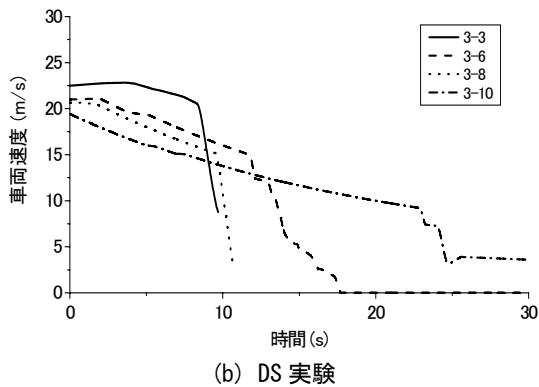
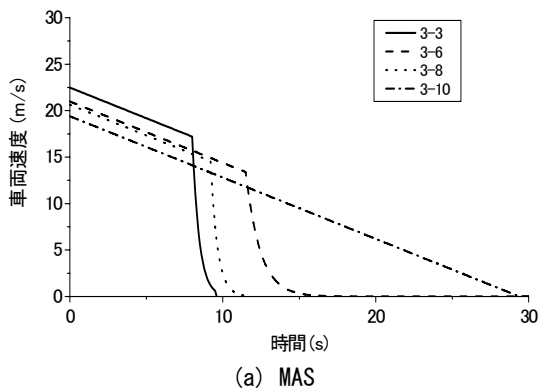


図7 MASとDS実験の前方車の走行速度の時間変化

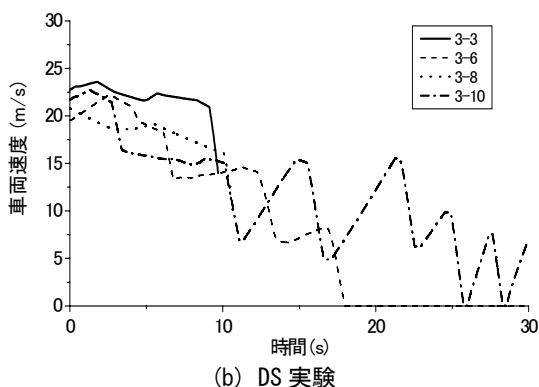
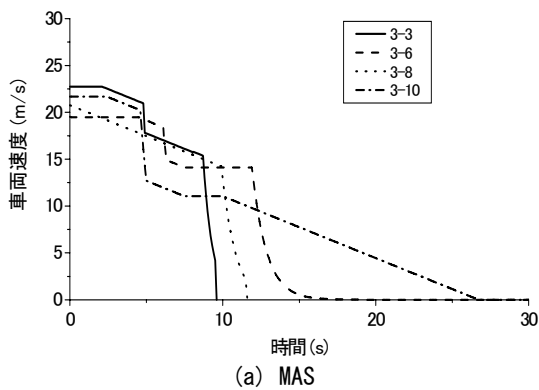


図8 MASとDS実験の後方車の走行速度の時間変化

停止開始時間もDS実験3の速度グラフを参考に決めた。ハザードランプを点灯させる時間についてはデータが存在しないため、速報2秒後から停止開始時間までに点灯

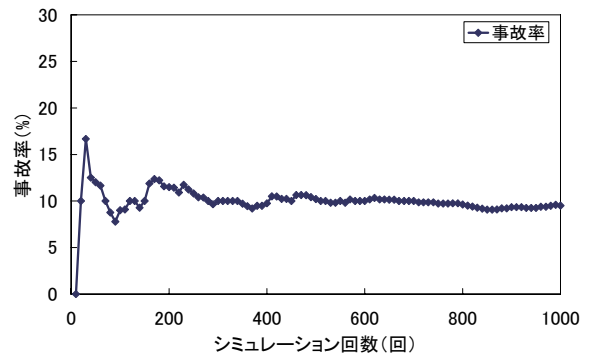


図9 MASにおける回数別の事故率

表5 DS実験モデルの初期条件

	前方車 (速報なし)	後方車 (速報なし)
	X	105.6m
Y	6.125m	
速度	平均22m/s, 標準偏差1.1m/sの正規分布	
タイプ	タイプ1, 2, 3の一様分布	
減速開始車間距離 (D_s)	25m~37mの一様分布	
ブレーキ開始車間距離 (D_b)	12m~24mの一様分布	
減速開始時間	主要動到達時	主要動到達時
停止開始時間	主要動到達時	主要動到達時
ハザードランプ点灯時間		
	前方車 (速報あり)	後方車 (速報あり)
	X	105.6m
Y	6.125m	
速度	平均22m/s, 標準偏差1.1m/sの正規分布	
タイプ	タイプ1, 2, 3の一様分布	
減速開始車間距離 (D_s)	25m~37mの一様分布	
ブレーキ開始車間距離 (D_b)	12m~24mの一様分布	
減速開始時間	速報開始時	速報開始時
停止開始時間	速報開始2秒後~12秒後までの一様分布	速報開始2秒後~12秒後までの一様分布
ハザードランプ点灯時間	速報開始2秒後~停止開始時間までの一様分布	
	前方車 (速報あり)	後方車 (速報なし)
	X	105.6m
Y	6.125m	
速度	平均22m/s, 標準偏差1.1m/sの正規分布	
タイプ	タイプ1, 2, 3の一様分布	
減速開始車間距離 (D_s)	25m~37mの一様分布	
ブレーキ開始車間距離 (D_b)	12m~24mの一様分布	
減速開始時間	速報開始時	主要動到達時
停止開始時間	速報開始2秒後~12秒後までの一様分布	主要動到達時
ハザードランプ点灯時間	速報開始2秒後~停止開始時間までの一様分布	

させる設定にした。また、後方車が速報を聞いて停止する場合 (DS実験2) は、前方車と同様に停止開始時間は速報を聞いてから2秒後~12秒後までの間とした。またこの場合、前方車の速度が1.39m/s (=5km/h) 以下になった時点で停止開始時間になっていなくても後方車は停止をする設定にした。

次に、DS実験の速度グラフとアンケートから、表3のような被験者の反応を実験1~3のすべてについて作成した。前方車・後方車の反応を確率的に組み合わせてDS実験1~3に関するMAシミュレーションを行った。

DS実験1モデルに関しては、DS実験1から得られる前方車と後方車に対する確率をそのまま用いた。DS実験

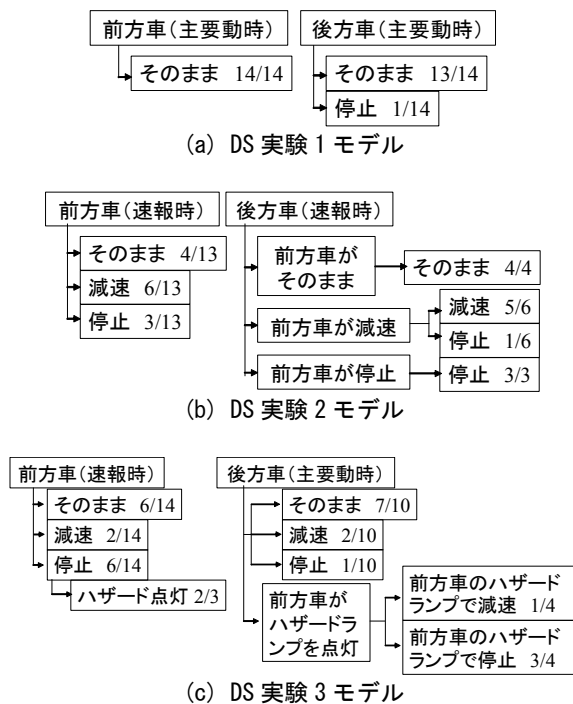


図 10 DS 実験モデルの運転行動ごとに設定した確率

表 6 MAS と DS 実験の実験別事故率の比較

	MAシミュレーション 事故率 (%)	DS実験 事故率 (%)
実験1	0.0	0.0
実験2	0.0	0.0
実験3	3.6	14.3

表 7 DS 実験 3 モデルにおける事故パターン

前方車反応 (速報時)	後方車反応 (主要動時)	事故発生 回数	事故未発生 回数
停止	そのまま	8	42
停止	減速	4	15
停止	停止	3	4
停止 (ハザード)	前方車ハザードで減速	2	27
停止 (ハザード)	前方車ハザードで停止	1	108

表 8 DS 実験 3 モデルの前方車が停止する場合における事故発生時と非発生時の比較

	事故発生時	事故未発生時
前方車の停止開始時における 前方車平均速度 (m/s)	18.8	17.3
前方車の停止開始時における 後方車平均速度 (m/s)	21.6	15.8
前方車の停止開始時における 平均速度差(前方車-後方車) (m/s)	-2.9	1.5
前方車の停止開始時における 平均車間距離 (m)	53.0	54.4
後方車の 平均ブレーキ開始車間距離(D_b) (m)	14.8	18.3
(前方車の停止開始時間-前方車の ハザード点灯時間)の平均 (s)	0.4	2.7

2モデルに関しては、前方車はDS実験2から得られる確率を、後方車は前方車の反応に対する確率で行動を決めた。後方車が前方車の反応に対する確率を用いる理由は、この実験では後方車の運転者が前方車にも速報が流れて

いるのを認識しているため、後方車のドライバーに前方車を追従しようとする意識がはたらくと考えられるためである。DS実験3モデルに関しては、DS実験3において前方車が「停止」の場合のみハザードランプを点灯させる者がいたため、後方車は、前方車がハザードランプを点灯させた場合のみ、前方車の反応に対する確率を用いた。図10にDS実験モデルの運転行動ごとに設定した確率を示す。

以上の設定で作成したDS実験1~3モデルについて、各500回モンテカルロ・シミュレーションを行い、事故率を計算した(表6)。結果を比較すると、DS実験同様、DS実験1とDS実験2モデルでは事故は発生していない。情報格差のあるDS実験3モデルでは、事故が発生し、事故率はDS実験のものより小さくなった。DS実験とMASの前方車が速報を受けた時の平均車間距離を比較すると、DS実験では23.5m、MASでは54.8mであった。DS実験では、首都高速道路などで見られるような車間距離が短い状況を想定していた。このような車間距離の違いが影響して、MASの事故率の方が低い値になったものと考えられる。

表7にDS実験3モデルの事故のパターンを示した。これによると、前方車が停止したために事故は発生していることが分かる。さらに表8で事故原因を詳細に分析すると、前方車が停止開始する時に後方車の速度が上回っている時、後方車のブレーキを踏むタイミングが遅い時、前方車がハザードランプを点灯させた直後に停止をしてしまう時の3つの要因が組み合わさったときに、事故の危険性が高まることが分かった。

4. 3台の車両による地震時走行シミュレーション

(1) 3台走行モデルの構築

より現実に近い状況を再現するため、同一車線に3台(Car1, Car2, Car3)の車両を配置した検討を行った。まず、2台の車両による地震時走行シミュレーションとの条件の変更点をいくつか挙げる。1つ目に、初期車間距離を実際の高速道路を走行中の車の車間距離を参考に(図11)、30m~60mの一様分布とし、Car2, Car3の初期位置Xを決定した。2つ目に、シミュレーション中に車間距離が初期車間距離以上に達してしまった場合に加速を開始することとした。3つ目に、ハザードランプの点灯率をMASのパラメータとして追加した。ハザードランプ点灯率は、各車両が減速または停止する際にハザードランプを点灯する確率として定義している。Car1, Car2がハザードランプを点灯するときには後続の車両に何らかの影響を与えるが、Car3が点灯するときはMASにおいて何も影響を与えない。本研究では、これらの差異についてはとくに区別を行っていない。4つ目に、速報を受けて自らハザードランプを点灯させる時間を速報開始2秒後とし、速報を受けずに自らハザードランプを点灯させる時間を主要動到達時とした。5つ目に、前の車のハザードランプを見て自身が行動する時間設定を、自身のハザードランプを点灯させる(必ず点灯させる)のが前の車のハザードランプ点灯1秒後、また減速開始も同じく1秒後、停止開始を2秒後とした。その他の条件は、Car1は2台によるシミュレーションの時の前方車と同じであり、Car2とCar3はその後方車と同じである。ブレーキ開始車間距離(D_b)の設定値によっては事故率



図 11 首都高速湾岸線（横浜ベイブリッジ付近）における走行車両の車間距離

が変化する可能性もあるが、運転行動のモデル化は DS 実験の結果のみによるものとした。

また、モデル作成にあたって、2 台によるシミュレーションの時と同じようにそれぞれの車に対し、行動の確率を与える必要がある。図 12 にそれぞれの車に与えた確率を示す。Car1 には、速報ありの場合は「DS 実験 3 の確率」を与え、速報なしの場合は、2003 年の宮城県沖の地震の際に高速道路運転者に行ったアンケート⁵⁾に基づいた確率を与えた。

Car2 に対しては、速報ありの場合で Car1 がハザードランプを点灯させた時は、行動確率を「ハザードランプに対する確率」として、Car1 のハザードランプを見て「減速」するのが 1/10、Car1 のハザードランプを見て「停止」するのが 9/10 と仮定した。Car1 がハザードランプを点灯させなかった時は、Car1 が「そのまま」か「減速」か「停止」かによって Car2 に与える確率を分けている。Car1 が「減速」か「停止」の場合は、「DS 実験 2 の後方車の確率」を用い、Car1 が「そのまま」の時は、自分で考えた行動をとると考えられ「DS 実験 3 の前方車の確率」を用いた。Car2 が速報なしの場合は、Car1 がハザードランプを点灯させた場合は「ハザードランプに対する確率」を用い、Car1 がハザードランプを点灯させなかった場合は「DS 実験 3 の後方車の確率」を与えた。

Car3 に与える確率は、ほぼ Car2 と同じである。異なる点として、Car2 が速報を受けてハザードランプを点灯させる場合以外に Car2 がハザードランプを点灯させた場合における Car3 の行動を加えた点が異なる点である。

(2) 速報受信台数の違いとハザードランプの点灯率の違いによる事故率の比較

(1)で作成した 3 台のモデルで速報受信台数を 0~3 台に変化させながら、また同時にハザードランプの点灯率を 0~100%まで 20%刻みで変化させながら、それぞれ 500 回ずつモンテカルロ・シミュレーションを行った。

まず、速報受信台数が 1 台と 2 台の時でハザードランプの点灯率が 100%でない時には玉突き事故が 1 台の時に 3 回、2 台の時に 4 回発生した。図 13 に速報受信台数が 1 台、ハザードランプの点灯率が 20%の時の玉突き事故の速度と車間距離の時刻歴を示す。このとき、速報は「Car1=あり、Car2=なし、Car3=なし」であり、「Car1 が速報を受けてハザードを点灯させずに停止し、Car2 が

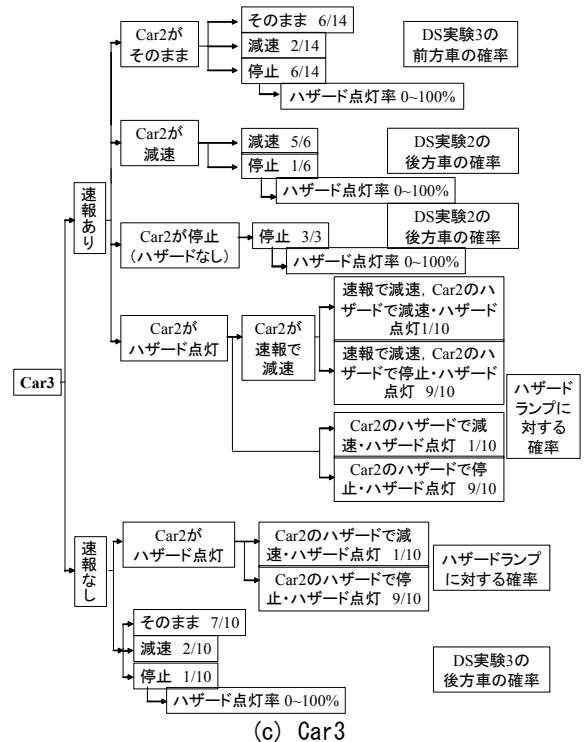
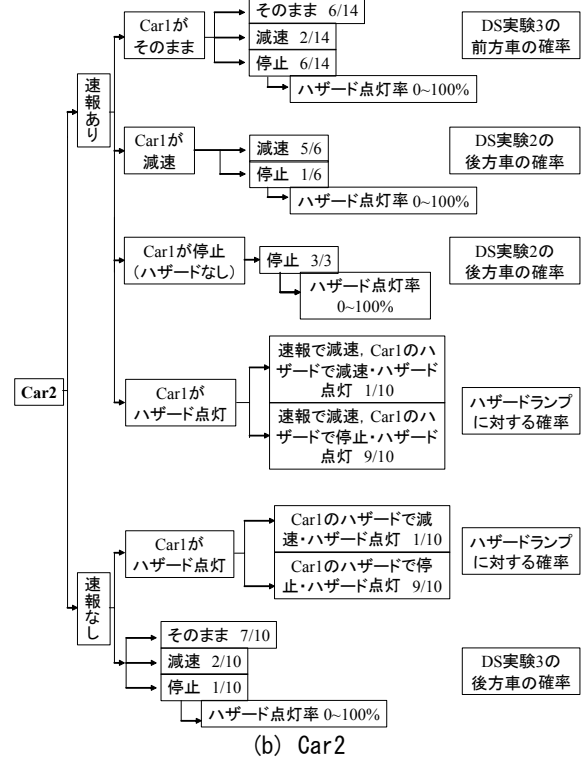
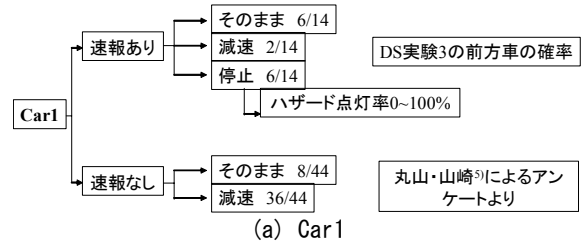


図 12 3 台走行モデルの運転挙動に与える確率

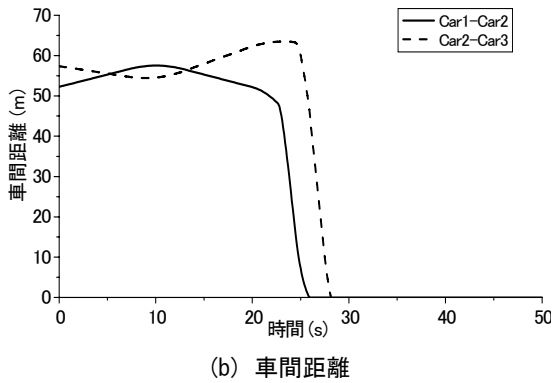
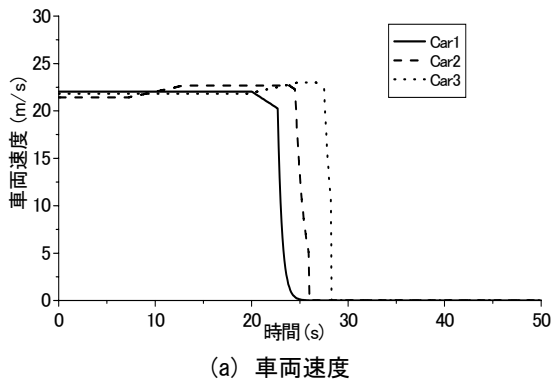


図 13 速報を受けた Car1 がハザードランプを点灯させなかったケースの車両速度と車間距離（玉突き事故発生）

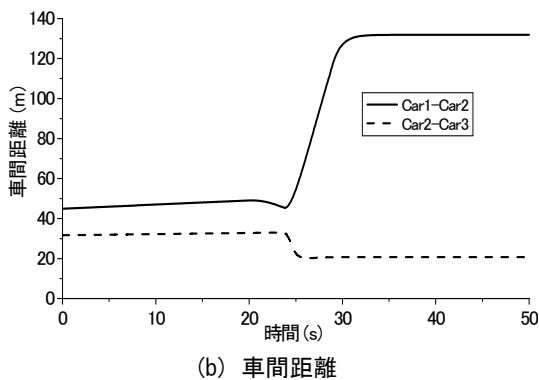
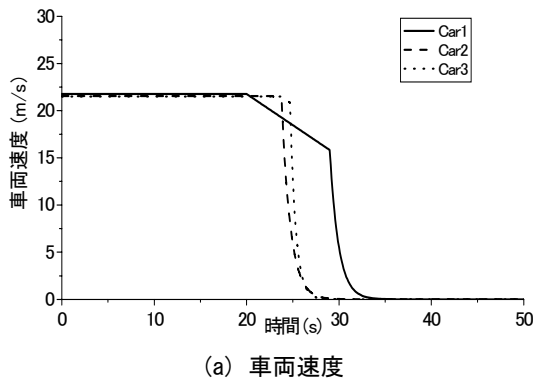


図 14 速報を受けた Car1 がハザードランプを点灯させたケースの車両速度と車間距離

そのまま走り追突し、Car3 がさらにそのまま走った。」ため追突した。一方で、速報受信の状況がそれと同じ場合でも、Car1 が速報を受けてハザードランプを点灯させ

て停止すれば、Car2 も Car3 もその前の車のハザードランプを見て停止することができたために事故は発生していないケースもあった（図 14）。このように、情報格差があるときには、ハザードランプを点灯させることは非常に有効な手段であると考えられる。

しかし、ハザードランプの点灯率が 100%、速報台数 3 台だとしても、事故（Car1 と Car2 で 1 回、Car2 と Car3 で 1 回）が発生した。後者の事故のケースは、「Car1 は速報を受けてハザードをつけて停止し、Car2 は速報を受けて減速し、Car1 のハザードを見てハザードを点灯させ停止を始める。さらに Car3 は速報を受けて減速し、Car2 のハザードを見てハザードをつけ減速する。」というものであった。Car2 の停止開始時の Car2 と Car3 の車間距離は 48.6m と短くはなかったが、Car3 の D_b が 13.0m と短いために、安全に停止できなかったものと考えられる。このようにハザードランプを点灯させたとしても、「停止」という行為が事故につながっていることが分かった。

図 15 に速報受信台数 0~3 におけるハザードランプの点灯率別事故率を示す。速報受信台数に関しては、速報をすべての車に受信させることができれば、事故率は少なくなることが分かった。しかし、現状では技術的な面からそれは困難であると考えられる。一方で、速報受信の格差があったとしても、ハザードランプの点灯率を上昇させることができれば、事故率は減っていくことが分かった。つまり、ハザードランプを点灯させることを徹底させることが賢明であろう。しかし、ハザードランプの点灯率が 100% になったとしても、ハザードランプを点灯させた運転者が停止をしたり、また前の車のハザードランプを見た運転者が停止をしてしまったりすると事故につながる場合があった。つまり、ハザードランプを点灯させた運転者、またハザードランプを見た運転者のとるべき行動を周知させておかないと事故につながる危険性があることが分かった。速報を受け取った運転者は、ハザードランプの点灯とともに急な停止をせずに落ち着いて減速するという、また前の車のハザードランプを見た運転者もハザードランプの点灯とともに減速するということを周知させる必要があるだろうと考えられる。

(3) 「減速」や「停止」の確率の違いによる検討

これまでの検討では、DS 実験での確率をもとにしてきたため、速報を受信した車が自らハザードランプを点灯させるのが「停止」の行動の時のみであり、「減速」の行動のときに自ら点灯させることはなかった。しかし、これはやや現実的ではなく、実際にはハザードランプを点灯させて減速させる運転者がいて、それを見た運転者も「減速」という行動をとる運転者が多いものと考えられる。そこで、図 16 に示すような Car1~Car3 の行動確率で検討を行った。これまでのモデルとの違いは、「減速」をする車が自らハザードランプを点灯させる確率を設けた点である。さらに、気象庁による緊急地震速報の認知度に関するアンケート調査（第 2 回）¹⁴⁾ から、速報を受けてハザードランプを点灯させる確率を 83% とし、速報を受けていない車が「減速」や「停止」をする場合も同様と仮定した。また、速報を受けた運転者とハザードランプを見た運転者は必ず「減速」か「停止」の行動をとるようにした。「減速」の確率を $a\%$ 、「停止」の確率を $(100-a)\%$ として、その確率を $a=50\sim 100$ の範囲で動かし、事故率を検討した。図 17 に「減速」と「停止」の確率の違いによる速報受信台数別の事故率を示す。図中の「50-50」は「 $a(100-a)$ 」であり、「減速」が 50%、「停

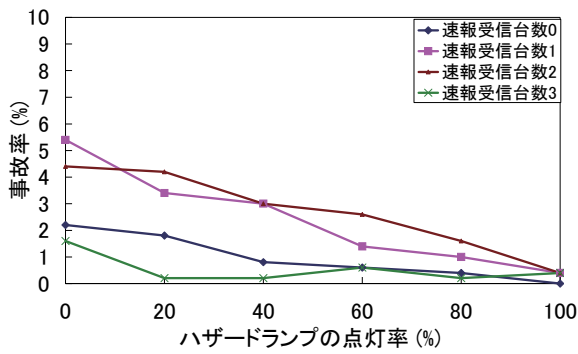
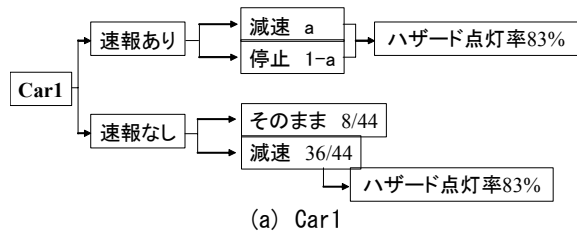
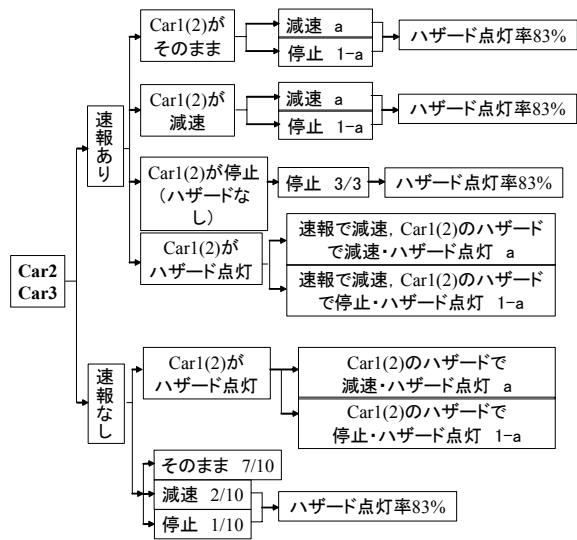


図 15 速報受信台数 0~3 におけるハザードランプの点灯率と事故率の関係



(a) Car1



(b) Car2, Car3

図 16 Car1~3 の運転挙動に与える確率

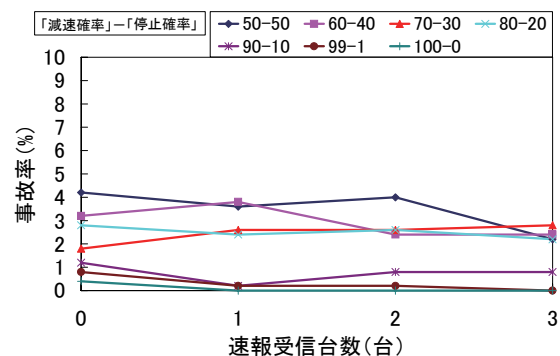


図 17 「減速」と「停止」の確率の違いによる速報受信台数別の事故率 (ハザードランプの点灯率 83%)

止」が 50%である。
事故率を比較すると、「減速」や「停止」が多数混在

している場合は事故が起こりやすいことが分かった。しかし、速報の受信台数に関わらず、「減速」の割合を上げ、「停止」の割合を下げていくと事故率が低下することが確認できた。気象庁による緊急地震速報の認知度に関するアンケート調査 (第 2 回)¹⁴⁾によると、2007 年 9 月現在では、速報を受けたときの行動を約 99%の人が「まわりの車に注意を促した後に、緩やかにスピードを落とす」または「まわりの車に注意しながら減速する」選んでおり、 $a=99$ として検討したところ、速報の受信格差がある場合でも、0.2%と低い値となった。したがって、速報を受け取った時の行動として、ハザードランプを点灯させて減速させること、また前の車のハザードランプを見た運転者もハザードランプの点灯とともに減速させるということが望ましいものと考えられる。

5. 結論

本研究では、著者らによる 2 台のドライビングシミュレータ実験 (DS 実験) から得られた運転特性をもとにした、地震時の走行状況に近いマルチエージェント・シミュレーション (MAS) を行った。

まず、DS 実験で得られた速度データをもとにエージェントの速度をモデル化し、また運転者の走行特性タイプを 3 タイプに分けることとした。これにより作成したモデルで、DS 実験で得られた速度などのデータを用いた場合、DS 実験が再現されるかを検討したところ、良い再現性を得ることができた。また、MAS 上で、速報時の平均車間距離が DS 実験 3 の値 (23.5m) となるようにして、事故率を検討したところ、10.2%であった。DS 実験 3 での事故率は 14.2%であるが、DS 実験の方が被験者の数が少ないことを考えると、この結果は妥当であると考えられ、再現性が得られた結果となった。

次に、2 台走行モデルを構築し、その事故率の検討を行った。DS 実験 1~3 に等しいモデルを作成し、500 回のモンテカルロ・シミュレーションを行い、統計的に事故率を計算した。結果を比較すると、DS 実験同様、DS 実験 1 と DS 実験 2 モデルでは事故は発生していない。情報格差のある DS 実験 3 モデルでは、事故が発生し、事故率は DS 実験のものより小さくなった。DS 実験と MAS シミュレーションの速報時の平均車間距離を比較すると、DS 実験では 23.5m、MAS では 54.8m と MAS の方が値が大きかった。そのため、MAS の事故率は低い値となったものと考えられる。

次に、より現実に近い状況を再現するため、同一車線に 3 台の車両を配置したモデルを作成し、速報受信台数を 0~3 台に変化させながら、また同時にハザードランプの点灯率を 0~100%まで 20%刻みで変化させながら、それぞれ 500 回ずつモンテカルロ・シミュレーションを行った。まず、速報受信台数に関しては、速報をすべての車に受信させることができれば、事故率は少なくなることが分かった。しかし、技術的な面から現状ではそれは困難であると考えられる。一方で、速報受信の格差があったとしても、ハザードランプの点灯率を上昇させることができれば、事故率は減っていくことが分かった。つまり、まずはハザードランプを点灯させることを徹底させることが賢明であろう。しかし、ハザードランプの点灯率が 100%になったとしても、ハザードランプを点灯させた運転者が停止をしたり、また前の車のハザードラ

ランプを見た運転者が停止をしてしまったりすると事故につながる可能性があった。このことから、ハザードランプを点灯させた運転者、またハザードランプを見た運転者のとるべき行動を周知させておかないと事故につながる危険性があることが分かった。

さらに、これまでのモデルでは「停止」の場合のみ自らハザードランプを点灯させていたが、「減速」をする車も自らハザードランプを点灯させる確率を与えるように改良した。それを用いて、ハザードランプの点灯率を83%に固定のもとで、速報を受けた運転者とハザードランプを見た運転者が「減速」や「停止」の行動をとる確率を変化させてシミュレーションを行い、事故率を検討したところ、「減速」や「停止」という行動を起こす運転者が多数混在している場合は事故が起こりやすいことが分かった。しかし、速報の受信台数に関わらず、「減速」の割合を上げ、「停止」の割合を下げていくと事故率が低下することが確認できた。

したがって、速報を受け取った運転者は、ハザードランプの点灯とともに急な停止をせずに減速するということが必要であるだろうと考えられる。

- 12) MAS コミュニティ - 研究報告 :
<http://mas.kke.co.jp/modules/mydownloads2/>
- 13) 山影進：人工社会構築指南 artisoc によるマルチエージェント・シミュレーション入門，書籍工房早山, 2007.
- 14) 気象庁（緊急地震速報の認知度に関するアンケート調査（第2回）の結果が出ました） :
http://www.jma.go.jp/jma/press/0709/14b/eeew_enq2.pdf

(原稿受付 2008.5.24)

(搭載決定 2008.9.13)

参考文献

- 1) 気象庁（緊急地震速報について） :
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/index.html>
- 2) 気象庁（平成 19 年新潟県中越沖地震における緊急地震速報の利用状況） :
http://www.jma.go.jp/jma/press/0708/02b/070802chuetsuoki_riyou.pdf
- 3) asahi.com :
http://www.asahi.com/culture/tv_radio/TKY200801120154.html
- 4) 山之内宏安，山崎文雄：運転シミュレータを用いた地震時の走行安定性実験に関する検討，第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，pp.1049-1052, 1999.
- 5) 丸山喜久，山崎文雄：2003 年宮城県沖の地震における地震動強さと高速道路運転者の反応の関係，土木学会論文集，No.794/I-72, pp. 307-312, 2005.
- 6) 丸山喜久，山崎文雄：ドライビングシミュレータを用いた地震動早期警報の効果検討，土木学会論文集，No.787/I-71, pp. 177-186, 2005.
- 7) 清野純史，土岐憲三，チャールズ・スコートン，藤井俊介：高速道路走行中の自動車に対する地震対策について，地域安全学会論文集，No.9, pp. 321-330, 2007.
- 8) 山崎文雄，丸山喜久，坂谷将人：複数のドライビングシミュレータを連動した走行模擬実験による緊急地震速報の影響評価，地域安全学会論文集，No.9, pp. 289-294, 2007.
- 9) 学術創成プロジェクト「マルチエージェント・シミュレータによる社会秩序変動の研究」 :
<http://citrus.c.u-tokyo.ac.jp/mas/index.htm>
- 10) 宮嶋宙，堀宗朗，小国健二：多様な群集の雑然とした状況を想定した地震時避難行動シミュレーション，土木学会地震工学論文集，pp. 765-772, 2007.
- 11) 大畑大志郎，高井伸雄，鏡味洋史：釧路市中心市街地における津波避難施設配置の評価-マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション その 2-，日本建築学会計画系論文集，第 612 号，pp. 87-91, 2007.