

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マルチエージェントシミュレーション

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

丸山 喜久¹・松本 和貴¹・山崎 文雄¹

¹ 千葉大学大学院工学研究科

SYNOPSIS

Earthquake Early Warning (EEW) has been under operation since October 1st, 2007. It is afraid that traffic accidents may occur because of the EEW. Yamazaki et al. (2007) introduced two driving simulators synchronized by server to perform virtual driving tests when the EEW is transmitted. In the study, the possibility that EEW induces traffic accidents was pointed out between two vehicles. 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, lower accidents 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 lights before reducing speed when receiving the EEW on an 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」¹⁾である。

すでに、2006年8月に鉄道・病院・工場などの特定ユーザーへの提供は開始されていたが、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。既往の研究として、山崎ら²⁾は、2台のドライビングシミュレータを連動させて、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。この実験では、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。

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マルチエージェント・シミュレータに組み込み、まず2台の実際の走行状況に近い数値シミュレーションを行う。さらに、この結果をもとに、3台の車両が走行する現実の状況に近いシミュレーションを行い、緊急地震速報が流れた場合に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が、まだまだ発展途上の手法であると考えられている³⁾。例えば、MASコミュニティの研究報告⁴⁾には、津波避難シミュレーション、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⁵⁾。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。

3. 2台の車両による地震時走行シミュレーション

(1) MAシミュレーションの概要

図1にMAシミュレーションにおける緊急地震速報の想定を示す。ここでは、2台のDS実験での想定と同じく、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。図2にMAシミュレーションで用いた走行コースを示す。前方車と後方車の2つのエージェントを用いる。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。なお、MAシミュレーション上の1stepは現実の値に換算して0.1秒であるとした。

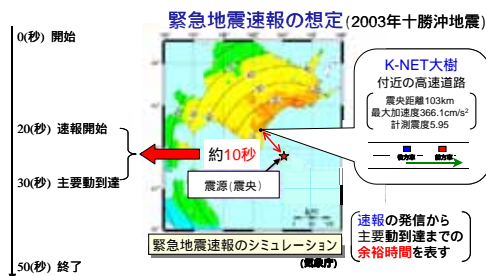


図 1. MA シミュレーションにおける緊急地震速報の想定

(2) 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_t をモデル化した。速度の変化を減速（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、以下の式(1)～式(4)でモデル化した。

$$\text{減速: } v_t = -S_L \cdot (t - t_0) + v_0 \quad (1)$$

$$\text{ブレーキ: } v_t = B^{(t-t_0)} \cdot v_0 \quad (2)$$

$$\text{停止: } v_t = S_T^{(t-t_0)} \cdot v_0 \quad (3)$$

$$\text{加速: } v_t = A^{(t-t_0)} \cdot v_0 \quad (4)$$

t (s): 現在の時間

t_0 (s): 減速（ブレーキ・停止・加速）開始時の時間

v_0 (m/s): 減速（ブレーキ・停止・加速）開始時の速度

S_L (m/s/s): 減速定数, B : ブレーキ定数

S_T : 停止定数, A : 加速定数

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。図 3 に減速時、ブレーキ時、停止時、加速時におけるタイプ別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た場合、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。表 1 に DS 実験の内容を示す。ここで用いるのは DS 実験 3 の事故があったケースと事故がなかったケースのそれぞれ 2 ケースずつの計 4 ケース（表 2）である。なお、表 2 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。例えば、実験 3-3 では、前方車と後方車の初速、初期車間距離、前方車の停止開始時間、前方車と後方車の運転者タイプ、後方車の減速開始車間距離 (D_{sl})、後方車のブレーキ開始車間距離 (D_b) を実験データから抽出し、MA シミュレーションの初期条件として与えた。また、後方車は車間距離が 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。MA シミュレーション結果を図 4、図 5 に示す。MA シミュレーションでは、DS 実験で事故を起こしたケース 3-3 とケース 3-8 で事

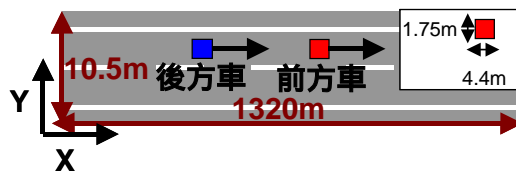


図 2. MA シミュレーションにおける走行コース

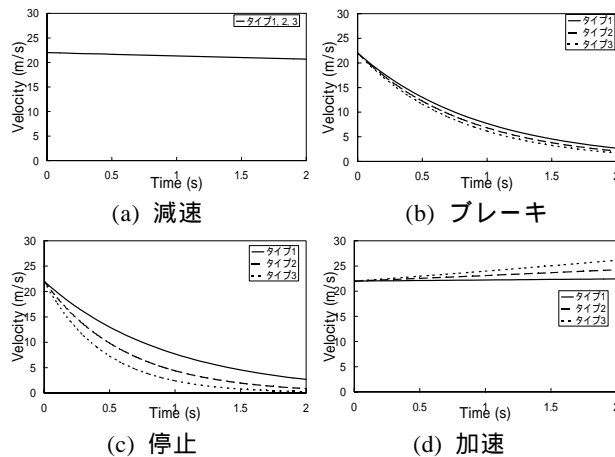


図 3. 走行特性タイプごとの車両速度の変化

表 1. ドライビングシミュレータ実験の内容

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

表 2. DS 実験 3 における被験者の反応

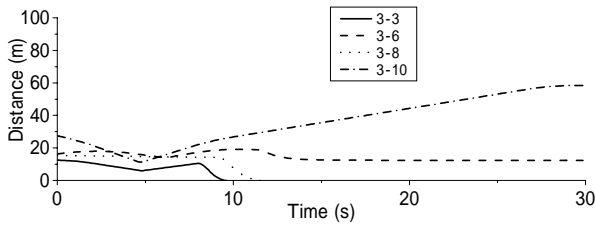
被験者番号	事故	速報を聞いた前方車の反応	前方車ハザード	主要動時の後方車の反応	後方車ハザード
3-3	あり	停止	なし	そのまま	なし
3-6	なし	停止	あり	ハザードで停止	なし
3-8	あり	停止	あり	ハザードで減速	なし
3-10	なし	減速	なし	減速	なし

故を起こしており、図 4、図 5 での比較からも、再現性を得ることができたと考えられる。

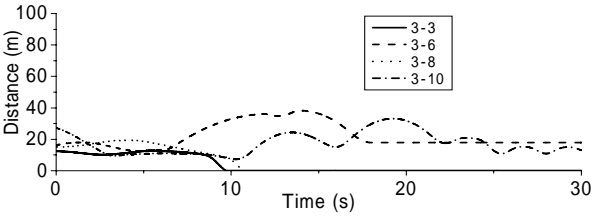
(4) 2車モデルの構築

DS 実験モデルと同等のモデルを作成した。表 3 に実験 3 モデルの前方車と後方車に与える初期条件を示す。前方車と後方車の車間距離、後方車の D_{sl}, D_b は DS 実験 1 の主要動到達前までのデータを参考に決定した。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。停止開始時間も実験 3 の速度グラフを参考に決めた。また、速報を聞いて停止をする場合は、実験 3 データに基づき、速報開始と同時に減速させる設定にしてある。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させる設定にした。また、後方車は車間距離が 80m 以上で加速するようにし、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。

次に、DS 実験の速度グラフとアンケートから、表 2 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。さらに、前方車・後方車の反応を確率的に組み合わせることで DS 実験 1~3 に等しいモデルを作成した。図 6 に DS 実

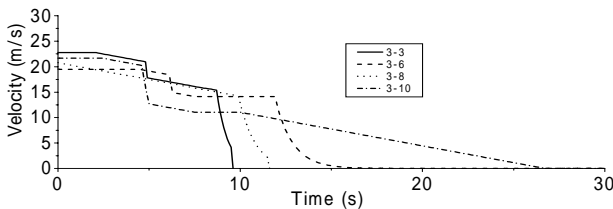


(a) MA シミュレーション

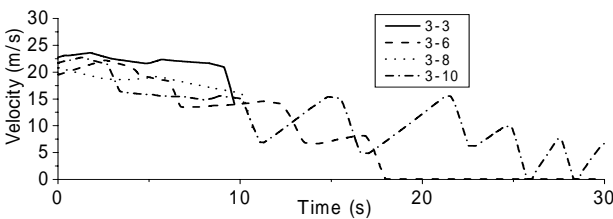


(b) DS 実験

図 4. MA シミュレーションと DS 実験の車間距離の比較



(a) MA シミュレーション



(b) DS 実験

図 5. MA シミュレーションと DS 実験の後方車の走行速度の比較

験 3 モデルの運転行動ごとに設定した確率を示す。後方車が前方車のハザードランプを見て行動する場合、ハザード点灯から 2 秒後に行動をとるようにしている。また、速報がない場合の行動は主要動時(30 秒)に行く。

以上の設定で作成した実験 3 モデルの MA 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になったため、実験 1~3 モデルについて各 500 回シミュレーションを行い事故率を計算した(図 7)。

結果を比較すると、DS 実験同様、実験 1 と実験 2 モデルでは事故は発生していない。情報格差のある実験 3 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 MA 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、MA シミュレーションでは 54.8m であった。MA シミュレーションでの車間距離は、より現実的な値と考えられるため、MA シミュレーションの事故率は妥当なものであろう。表 4 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 5 で事故原因を詳細に分析した。1 つ目が、前方車が停止開

表 3. DS 実験 3 モデルの初期条件

実験3モデル	前方車 (速報あり)	後方車 (速報なし)
X	105.8m	60.2m - 72.2mの一様分布
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	
$D_{0.5}$		25m - 37mの一様分布
$D_{1.0}$		12m - 24mの一様分布
停止開始時間	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	

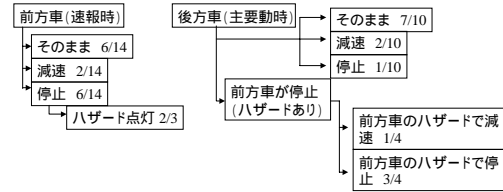


図 6. DS 実験 3 モデルの運転行動ごとに設定した確率

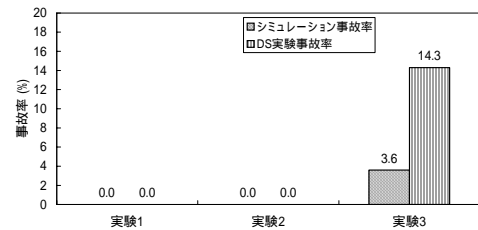


図 7. MA シミュレーションと DS 実験の実験別事故率の比較

表 4. DS 実験 3 モデルにおける事故パターン

前方車反応	後方車反応	事故回数	事故なし回数
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)	減速(前方車ハザードで)	2	27
停止(ハザード)	停止(前方車ハザードで)	1	108

表 5. 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

	事故あり	事故なし
停止開始時の前方車平均速度 (m/s)	18.8	17.3
停止開始時の後方車平均速度 (m/s)	21.6	15.8
速度差 (前方車-後方車) (m/s)	-2.9	1.5
停止開始時の平均車間距離 (m)	53.0	54.4
後方車の平均ブレーキ開始車間距離 (m)	14.8	18.3
(停止開始時間-ハザード点灯時間)の平均 (s)	0.4	2.7

始する時に後方車の速度が上回っている時、2 つ目が後方車のブレーキを踏むタイミングが遅い時、3 つ目が前方車がハザードランプを点灯させるがすぐに停止開始をしてしまう時、以上 3 つの場合に、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

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、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、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、加速を開始する車間距離を初期車間距離にした。3 つ目に、速報を聞いてハザードを点灯させる時間を単純にするために速報開始 2 秒後とした。最後に、前の車のハザード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点灯 1 秒後、また減速開始も同じく 1 秒後、停止開始が 2 秒後とした。その他、Car3 は Car2 と同じ条件

を与えている。

モデル作成にあたって、2 台の時と同じように行動の確率を与える必要がある。図 8 に Car3 に与えた確率の例を示す。基本的には、DS 実験のデータをもとにしているが、ハザードランプを見たときの行動の確率を減速 1/10、停止 9/10 と仮定した。同様に、Car1, Car2 の行動にも確率を与えた。

以上より作成した 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 回ずつシミュレーションを行った。図 9 にハザードランプ点灯率別の事故率を示すが、速報台数に関わらず、ハザード点灯率を上げることで事故率が減少することが確認できた。一方、速報台数と事故率の関係を見ると、速報台数が上がったとしても事故率が減るとは限らないことが分かった。

また、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も数回発生した。図 10 に速報受信台数 1, ハザード点灯率 20%の時の玉突き事故例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。このように情報格差があるとき、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。つまり、速報を受け取ったドライバーにハザードランプを点灯させる意識を持たせることがまずは必要である。

しかしながら、ハザードランプ点灯率 100%, 速報台数 3 台だとしても、事故 (Car1&Car2 で 1 回, Car2&Car3 で 1 回) が発生した。後者の事故のケースを確認してみると、「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つ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おり、速報を受け取った場合の行動として、「ハザードランプを点灯させて減速する」ということを広く周知していく必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、緊急地震速報が運転挙動に与える影響を評価するために、ドライビング・シミュレータ(DS)実験から得られた走行特性をマルチエージェント(MA)・シミュレータに組み込んだ数値実験を行った、まず 2 台の車による走行シミュレーションを行ったところ、情報格差がある場合に 3.6%の事故率と DS 実験よりも低い値を得たが、MA シミュレーションでは速報時の平均車間距離を現実に近い値に設定しており、事故率は妥当な値であると考えられる。また前方車が停止をした場合に事故が発生する場所が見られた。さらに、これをもとに、3 台の車両が走行するより現実の状況に近い MA シミュレーションを行った。速報台数に関わらず、ハザードランプの点灯率を上げることで事故率が減少することが確認できた。しかしながら、ハザードランプ点灯率 100%, 速報台数 3 台だとしても、事故が発生していた。前の車が「停止」という行為をしたことが原因であった。このため、速報を受け取った場合の行動として、「ハザードランプを点灯させて減速する」ということ

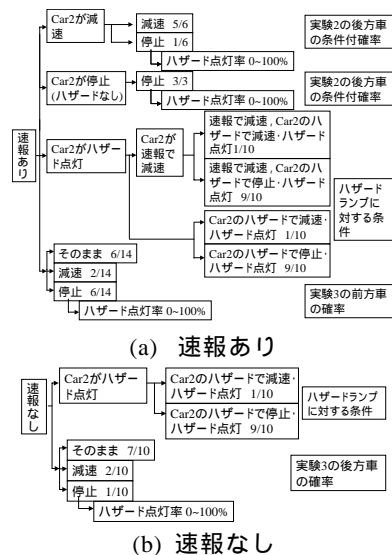


図 8. Car3 の運転挙動に与える確率

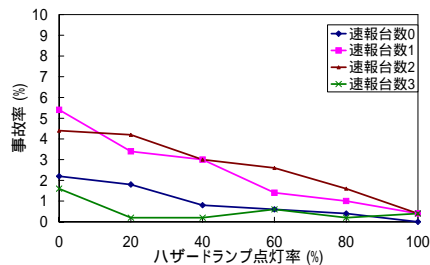


図 9. ハザードランプ点灯率と事故率の関係

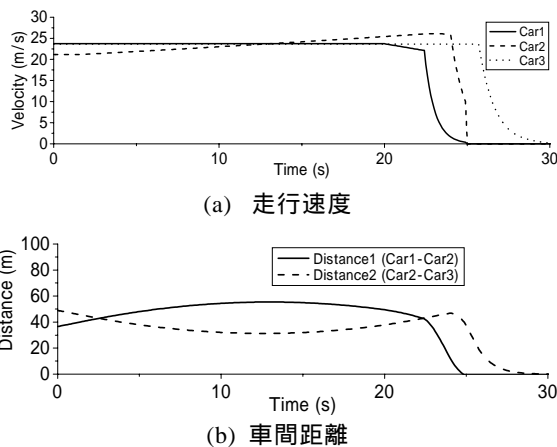


図 10. 速報台数 1, ハザード点灯率 20%の時の玉突き事故時の走行速度 (a) と車間距離 (b)

を広く周知していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 気象庁 HP, <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/index.html>
- 2) 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.
- 3) マルチエージェント・シミュレーション(mas)とは <http://citrus.c.u-tokyo.ac.jp/mas/masintro/masintroduction.htm>
- 4) MAS コミュニティ 研究報告 <http://mas.kke.co.jp/modules/mydownloads2/>
- 5) 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