

ブレーキ操作に着目した地震時の車両挙動について

京都大学工学研究科 清野 純史

京都大学工学部 馬淵亮太郎

京都大学大学院 岩橋 卓也

Behavior of Vehicles During an Earthquake Focusing on Brake Operation

Junji Kiyono, Ryotaro Mabuchi, Takuya Iwahashi

Abstract

Probability of a large earthquake such as the coming Nankai-trough earthquake is extremely high, therefore sufficient attentions should be paid to the occurrence of severe accidents of vehicles on the highway. When such severe accidents actually occur, not only the damage of the accident itself but also the trouble of transportation route cause a delay of emergency response. The influence of earthquakes on running vehicles and the countermeasures to avoid such accidents have to be considered in advance.

In this paper, we developed a vehicle running model during an earthquake based on the experiments by using driving simulator. We conducted simulations by focusing on the brake operation which is highly relevant to the accidents. Collision rate of a car group is adopted to judge the factors which affect to the car behavior under seismic excitation. The difference of braking operation depending on the seismic intensity, reaction time depending on the age strongly affect to the collision rate. Automatic driving technology being developed rapidly was also considered for practical application during an earthquake.

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、太平洋沿岸の国道 45 号線は被災・寸断されたが、部分的に供用していた三陸沿岸道路等の高速道路は、過去に津波を考慮して高台に整備していたため、損傷がほとんどなく、発災後の国道 45 号線の迂回路や緊急輸送路として大きな役割を果たした。また、被災後に利用が制限された太平洋側の高速道路の代替として、日本海側の幹線道路網が物資の輸送ルートとして機能したなど、災害時に高速道路ネットワークが果たす役割がここでもまた再確認されることとなった。こうした地震においては、高速道路上での車両密度があまり高くなかったことから、車両の多重衝突等の大事故は確認されていないが、今後発生すると考えられている南海トラフ巨大地震や首都直下地震など、阪神高速道路や首都高速道路のような比較的車両密度の高い場所の直近での地震においては、車両の多重衝突のような大事故や側壁またはガードレールとの接触が発生する可能性が十分考えられる。先に述べた高速道路の被災地への復旧・復興物資の輸送ルート等の役割を考えても、高速道路上における多重衝突は、災害時の初期対応の遅れを引き起こしかねない。そのため、十分に事前の対策を考えておく必要がある。

高速道路のような道路延長線上に列をなしている交通流において、通常走行車両は前方車両との相対関係を調整することで、その交通流全体の安定性を維持している。しかし、地震が起きると、運転者の判断によりブレーキ操作を行うことが想定され、安定した交通流は乱れたものとなり、時には追突事故

等が起こることが考えられる。近年では高齢者の運転者による事故も増加しており、これは反応遅れが一因であると考えられる¹⁾。

本研究では村上ら²⁾の作成した追従走行モデルを活用して、高速道路上の10台の車両を想定し、事故との関連性が高いブレーキ操作に着目した研究を行う。まず高齢者の反応遅れ時間を考慮した場合の衝突確率がどの程度変化するかについて分析する。そして、近年実用化に向けて急速に進歩している自動運転技術を考慮した場合の車間距離と衝突確率について検討することを目的としている。

2. 解析モデル

2.1 車両の運動

座標は、車両の前後方向を x 軸、左右方向を y 軸、上下方向を z 軸とする。この座標を基準として、運動の自由度をそれぞれの座標軸における並進方向と回転方向の6自由度とする。回転運動に関して、 x 軸回りをローリング運動、 y 軸回りをピッチング運動、 z 軸回りをヨーイング運動に対応させている。これらの基本運動を図1に示す。6自由度の車両挙動を解析するにあたっては、図2に示すモデルを使用した。このモデルは自動車工学の分野で用いられているものである。図2において下のバネはタイヤの剛性を、上のバネはサスペンションのバネをそれぞれ表している。また、上の質点(バネ上)は車体本体質量を、下の質点(バネ下)は車輪質量を表している。車輪ごとの各パラメータはすべて等しいものとする。

2.2 ドライビングシミュレータ実験

村上らは、京都大学大学院交通情報工学研究室の協力のもとで図3に示すドライビングシミュレータを用いた実験³⁾(以下 DS 実験)を実施した。実験被験者は一般道週1回、高速道路月1回程度の運転頻度のドライバー 30 名とした。

被験者は、阪神高速道路を模した直線道路(片側2車線)の左側車線を走行することとし、被験者が地震発生地点を意識し、運転に影響が生じることを防ぐため、道路中に標識等のランドマークになるものは一切設置しなかった。また、被験者が地震発生区間に 80km/h で突入できるように並走または前方車両を設定して制御した。図4に車両の配置を示す。実験の種類は、震度 5.5 以下と 6.5 以上の横揺れの各場合において、前方車両が地震発生後に停車する場合と走行を続ける場合の計4種類とした。地震動は、図5のような片勾配道路を交互に走行させることによって片方のタイヤずつで順番に生じる段差乗り越えによって表現した。

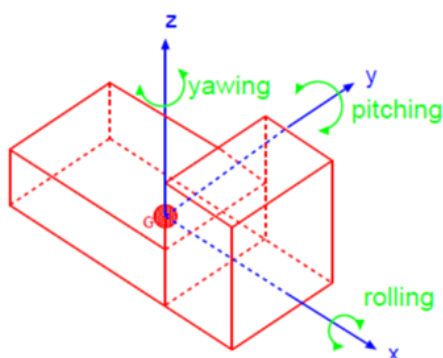


図1 車両の基本運動

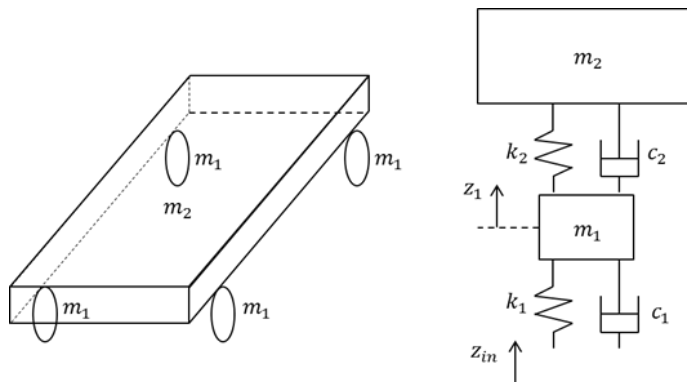


図2 車両モデル

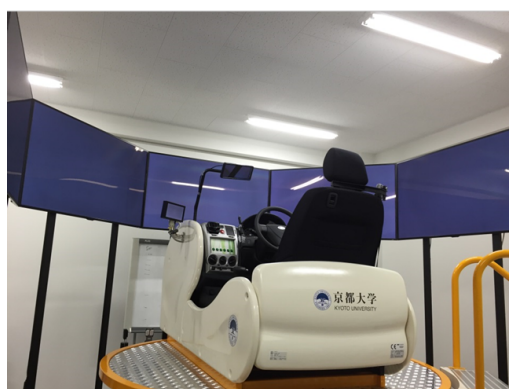


図3 ドライビングシミュレータ

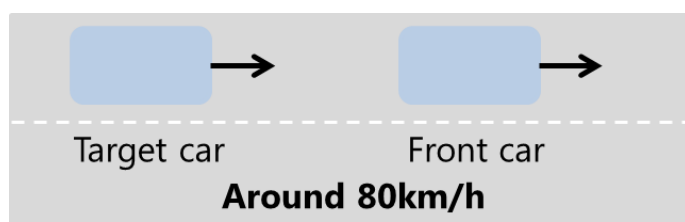


図4 DS 実験での車両の配置

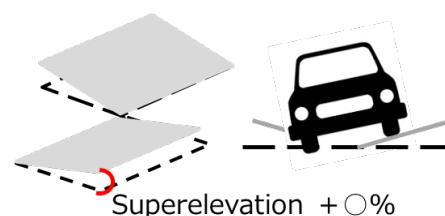


図5 片勾配道路

DS の運転席付近に固定設置した加速度ロガーを用いて、xyz の 3 軸方向の 0.1 秒刻みの加速度値を計測した。そして、計測された加速度値について計測震度階策定プログラムを用いて、計測震度を算出した。揺れの設定に関して繰り返しデータ収集を行い、計測震度階の設定を行った。

2.3 地震時車両走行モデル

村上らは、三宮ら⁴⁾の研究を参考にした追従走行モデルと DS 実験の結果を基に、地震動の影響を考慮した車両走行モデルを作成した。同モデルでは、追従走行のための力以外に地震時の減速力を追加することで、地震時車両走行を表した。以下に同モデル式を表す。

$$m\ddot{x}_i(t) = (1 - \alpha)(F_1 + F_2) + \alpha F_3 \quad (1)$$

$$F_1 = \alpha_1(|\dot{x}_i(t)| - \alpha_2)(|x_i(t)| - \alpha_3)x_i(t) \quad (2)$$

$$F_2 = \sum b_i(\gamma_{ij}) \frac{x_j(t) - x_i(t)}{\gamma_{ij}} + \sum c_i(\gamma_{ij}) \frac{x_j(t) - x_i(t)}{M_c} \quad (3)$$

$$\gamma_{ij} = |x_j(t) - x_i(t)| \quad (4)$$

$$F_3 = \frac{a}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

ここで、インデックスの i は追従車両、 j は先行車両を示す。式 (1) 中の F_1 は自車のみの前方推進力、 F_2 は先行車との相互間作用力を表し、その第 1 項は個体間誘引力、第 2 項は成群力を表す。 F_3 は地震時の減速力である。重み係数は、運転者がどの程度緊急時の運転に傾いているかを表す。同モデルでは DS 実験の結果を基に、 F_3 を正規分布で近似し、各車両のブレーキの強さから重み係数 α 、平均 μ 、標準偏差 σ の値を決定した。ここに μ はブレーキ操作後にブレーキ強さが最大値をとる時間である。ブレーキ

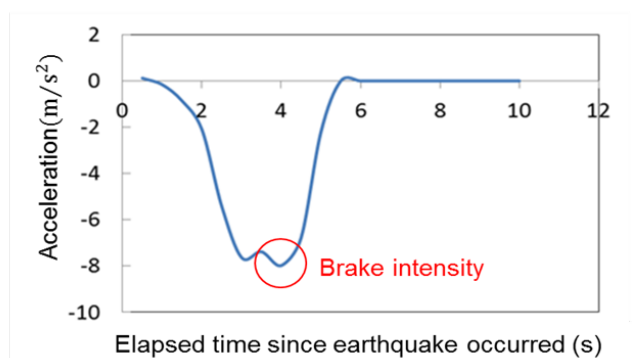


図6 ブレーキ強さの定義

強さの定義を図6, 正規分布化したモデル例を図7に示す.

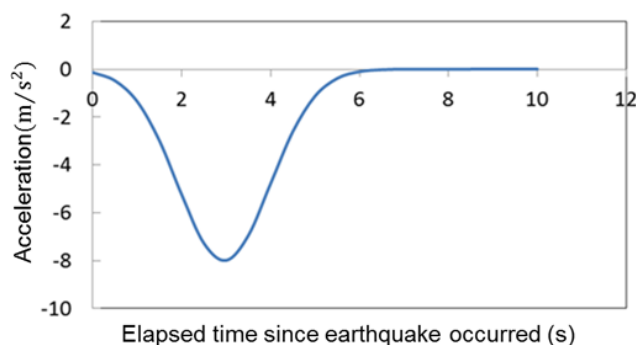


図7 車両の加速度時刻歴 (モデル)

3. モデルにおける妥当性の検討

ここでは, 前述した地震時車両走行モデルが DS 実験における被験者の運転特性を表現できているかを検証する.

3.1 解析条件

本解析では, 車両の台数はいずれの場合も先行車と追従車の2台とした. 図8に地震発生時点での車両の配置を示す. これらの車両の地震発生時点での速度は, 地震発生時点での車両の状況を解析と実験で一致させるため, 地震発生時点での両車の速度が約80km/hとなるように設定した. さらに, 地震発生後の先行車



図8 地震発生時点での車両の配置

の速度は, 実験と同様に前方車両非停車の場合は80km/hを維持, 前方車両停車の場合は $-3.951m/2^2$ の加速度で減速するように設定した. また, 車間距離に関しても, 地震発生時点での車間距離が実験と一致するように初期の車間距離を設定した. 解析のケースとしては, 前方車両非停車と前方車両停車の各場合において追従車のブレーキの強さが $-4, -6, -8m/s^2$ の計6ケースとした.

3.2 解析と DS 実験との比較

地震時車両走行モデルの妥当性を検証するにあたって, 解析で得た地震発生後10秒間の車間距離の時間推移と, 実験で得た地震発生後10秒間の車間距離の時間推移を比較した. 図9左側に前方車両非停車の場合の解析と実験の車間距離の時間推移を, 図9右側に前方車両停車の場合の解析と実験の車間距離の時間推移を示す. いずれの図においても, 図中の黒の太線が解析で得た車間距離の時間推移を, 他は全て実験で得た車間距離の時間推移を表している. 図から, 追従車のブレーキの強さが強くなるにつれ, 車間距離のひらき方が大きくなるといった特徴は再現できているといえる. また, 図10を見ると, ブレーキの強さがの場合場合は車間距離が縮まり, ブレーキの強さがの場合場合は車間距離がほぼ一定になるといった特徴も再現できているといえる. さらに, 式(6)を用いて解析と実験の車間距離の時間推移との

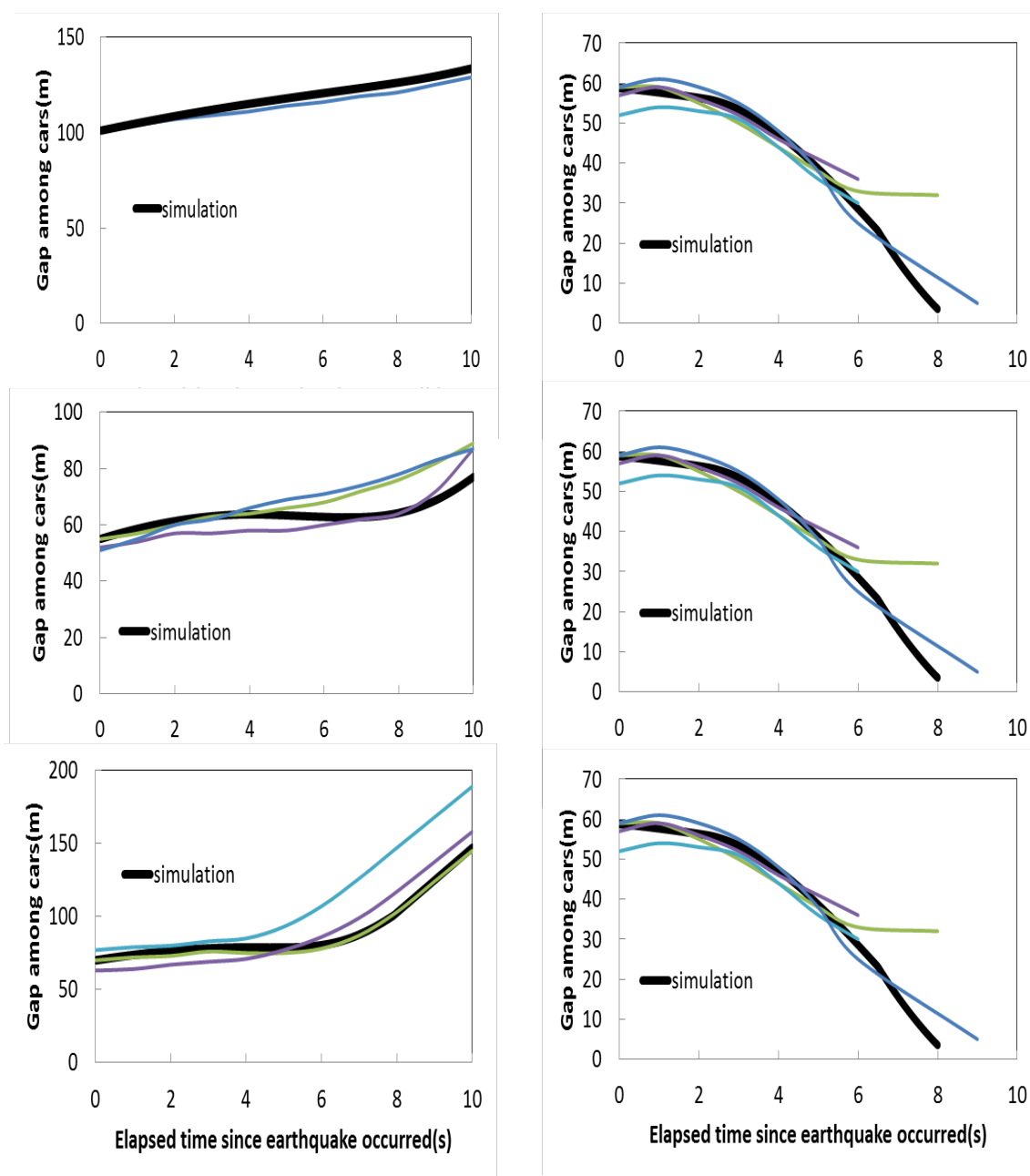


図9 解析と実験による地震発生後10秒間の車間距離の時間推移の比較。左) 前方車両停車の場合、上) 追従車のブレーキの強さ -4m/s^2 、中) 追従車のブレーキの強さ -6m/s^2 、下) 追従車のブレーキの強さ -8m/s^2 。

間の誤差を算出した。

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{(s_{data} - s_{sim})^2}{s_{data}^2}} \quad (6)$$

式(6)中の $\Delta \varepsilon$ は実験と解析との誤差、 N はデータ数、 s_{data} 、 s_{sim} はそれぞれ実験と解析の車間距離の時間推移を表す。また表1に本研究で用いた車両モデルのパラメータ値を示す。

その結果、解析と実験との誤差は15%の範囲であることが分かった。この誤差の大きさに関して Arne Kesting⁵⁾らは、30%以内の誤差は既往の研究で提案されている車両走行モデルが含む誤差の範囲内であ

ると述べている。そのため、本研究の地震時車両走行モデルも従来の車両走行モデルと同程度の精度は見込むことができると考えられる。

4. 地震時の車群挙動解析

4. 1 10 台での車群挙動解析

4.1.1 解析条件対象とする車両は走行車線に 5 台、追越車線に 5 台の計 10 台とした。図 10 に車両の配置を示す。車両の初速度、初期車間距離は平均、標準偏差の正規乱数で与えた。入力地震動は、図 10

に示す車群の先頭の車両が従う、地震発生後ブレーキ強さが最大値を取る時間とブレーキの強さの関係を表す関数が震度 6.5 以上と震度 5.5 以下の場合で区別されることから、震度 6.6 と震度 5.1 の入力地震動を用いた。図 11 左に計測震度 6.6 の入力地震動、図 11 右に計測震度 5.1 の入力地震動を示す。図に示している入力地震動は橋梁の最も端のノードの加速度応答であり、それぞれの車両への入力地震動に関しては、各車両の位置と速度に応じて異なっている。車両の初速度、初期車間距離およびなどの初期条件を 1 つの解析につき 100 パターン作成し、ブレーキ強さに関しては全車両でそろえた場合と図 12 のように確率分布に従って決定した場合を考えた。そして、各車両間の衝突回数を求め、同一車線上の車両 No.1 と No.3 のような追突が起り得る組み合わせの総数・隣同士の車線における車両 No.1 と No.2 のような側面衝突が起り得る組み合わせの総数・各車両と側壁の組み合わせの総数の和で割ることで、衝突確率を算出した。

4.1.2 解析結果

図 13 は震度 6.6 の場合と震度 5.1 の場合における衝突確率を比較したものである。図において縦軸は衝突確率、横軸はブレーキの強さの絶対値となっている。横軸のブレーキの強さの絶対値 4、6、8m/s² の場合は、全車両が共通して横軸に示されたブレーキの強さを持つことを、mix は図 12 の確率分布にしたがって正規乱数で与え、全車両が車両ごとに異なるブレーキの強さを持つことを表している。

青の棒グラフが震度 5.1 の場合、赤の棒グラフが震度 6.6 の場合の衝突確率を表している。衝突は、全てのケースで同一車線内での追突のみであった。ブレーキの強さが 6,8 m/s² および mix のとき、震度 5.1 における衝突確率の方が震度 6.6 における衝突確率よりも大きくなっている。これは、本解析において車両ごとの入力地震動の違いを考慮しているためだと考えられる。すなわち、地震時の減速力 F_3 は、各車両において入力地震動が初めて 50gal を超えた瞬間に作用し始める。この 50gal を初めて超えて F_3 が作用し始める時間の車両ごとの差が震度 6.6 の場合と比較して震度 5.1 の場合の方が大きく、このブレーキを踏み始める時間の差の違いによって、震度 5.1 のケースの方が震度 6.6 のケースよりも高い衝突確率を示したと考えられる。ブレーキの強さが 4m/s² の時は衝突は起

表 1 本研究で用いた車両モデルのパラメータ値

普通乗用車		
m_1 (km)	バネ下質量	100(4 本で)
m_2 (kg)	バネ上質量	1,150
l_a (mm)	先端と前輪軸間の距離	522.5
l_b (mm)	後端と後輪軸間の距離	522.5
l_f (mm)	前輪軸と重心間の距離	1,175
l_r (mm)	後輪軸と重心間の距離	1,175
L (mm)	車両全長	3,395
h_0 (mm)	車両静的時の重心高	350
d_1 (mm)	トレッド (前輪)	1,280
D (mm)	車両全幅	1,475

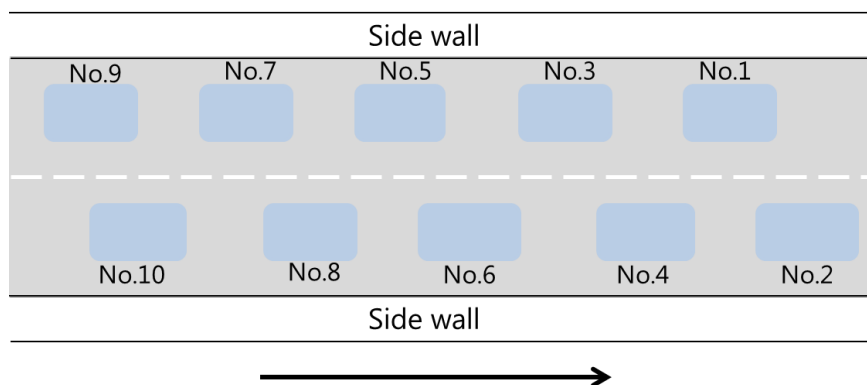


図 10 車両の配置

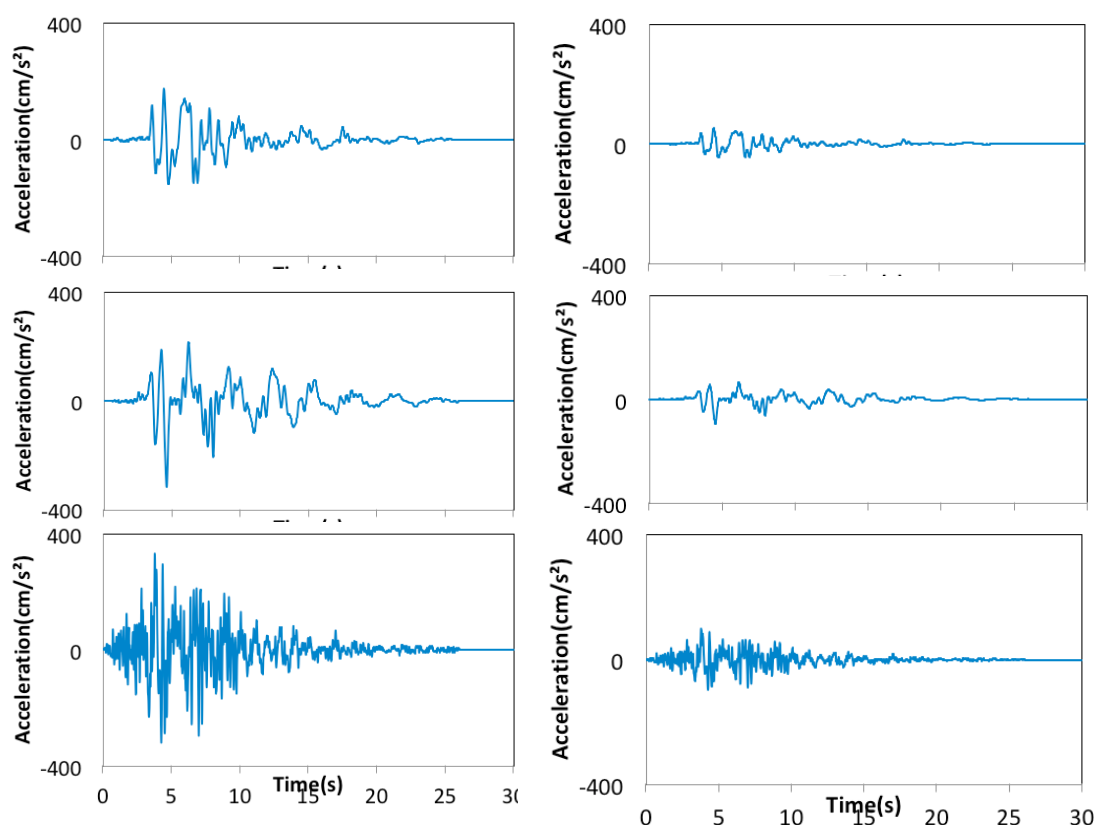


図 11 入力した計測震度 6.6 と 5.4. 左) 入力地震動計測震度 6.6, 右) 入力地震動計測震度 5.1, 上) 進行方向, 中) 進行直角方向, 下) 鉛直方向.

きなかった。これは、ブレーキの強さが 4m/s^2 の場合、前後でブレーキを踏み始める時間の差があっても、衝突を回避できるブレーキの強さといえる。

4.2 自動運転を想定した車群挙動解析

4.2.1 解析条件

対象とする車両は走行車線に 5 台、追越車線に 5 台の計 10 台とした。車両配置は前章の車群挙動解析と同様である。ここでは自動運転技術が全車両に搭載されていると仮定して、地震時までは安定な車群が形成されていると想定する。すなわち、地震発生時の車間距離および速度を揃えることで安定な車群を再現する。そのため初期条件として、走行車線は全車両 80km/h 、追越車線は全車両 100km/h の速度を与え、初期車間距離を 50, 60, 70, 80, 90, 100 m とし地震時までこの関係を維持するようにする。そして 50gal を超えたら従来通り図 12 に示すような分布に従う正規乱数を発生させ、各々の車両にブレーキを作用させる。ブレーキの強さについての条件を 1 つの解析につき、100 パターン作成し、各車両間の衝突回数を求めることで、衝突確率を算出した。

4.2.2 解析結果

図 14 は計測震度 5.1, 図 15 は計測震度 6.6 の場合における衝突確率を車間距離で比較したものである。図において縦軸は衝突確率、横軸は初期車間距離となっている。どちらの場合においても、車間距離が広がるにつれて衝突確率が低下する傾向が見られたが、計測震度 5.1 では 90m より 100m の方が衝突確率は高かった。これより、車間距離が広がることでランダムなブレーキ操作でも衝突を回避できる可能

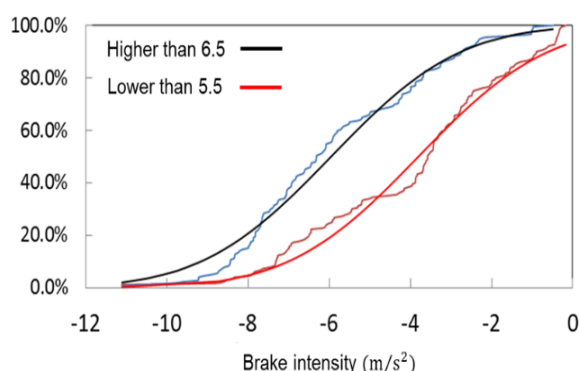


図 12 ブレーキの強さの累積分布

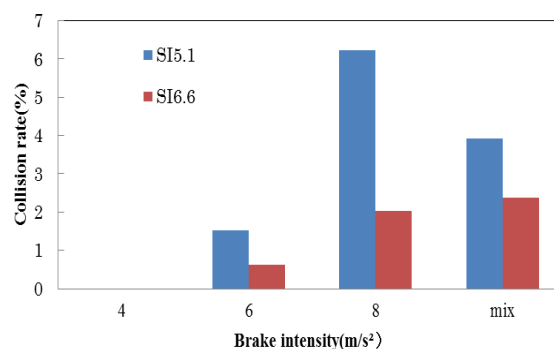


図 13 震度による衝突確率の比較

性が高いと言える。90m より 100m の方が衝突確率は高かったことに関して、現モデルでは車間距離が速度の 4 倍（約 90m～100m）を超えると、追従挙動の範囲外とし、先行車との相互作用による力（ F_2 ）をうけなくなることが影響していると考えられる。また、全パターンにおいて衝突がなくなることはなかった。これより、高速道路を走行する際に推奨されている「自車の速度と同じ値の車間距離」を取っていてもブレーキの操作によっては衝突をする可能性が十分あると言え、全車両に自動運転技術が搭載されていても地震時のドライバーの判断によるブレーキ操作によっては、事故につながる可能性があると言える。

4.3 高齢者の反応遅れ時間を考慮した車群挙動解析

4.3.1 解析条件

ここでは Makishita ら⁶⁾の研究より、高齢者は若年者よりブレーキ操作の反応時間が約 0.52 秒遅れることが分かっており、特定の車両におけるブレーキの力、つまり F_3 の開始時刻を 0.52 秒遅らせることでその影響を考慮するものとする。今回は反応が遅れることで衝突確率の変化に大きく寄与すると思われる図 11 中の No.3,4,7,8 に関して高齢者を想定し 0.52 秒遅らせて解析を行った。車両の初速度、初期車間距離、ブレーキの強さなどの初期条件を 1 つの解析につき 100 パターン作成し、衝突確率を算出した。

4.3.2 解析結果

図 16 は計測震度 5.1、図-17 は計測震度 6.6 の場合における衝突確率を高齢者の有無で比較したもので

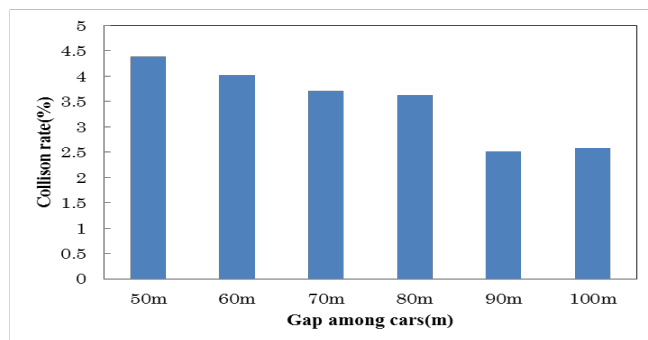


図 14 車間距離をそろえた場合の比較 (計測震度 5.1)

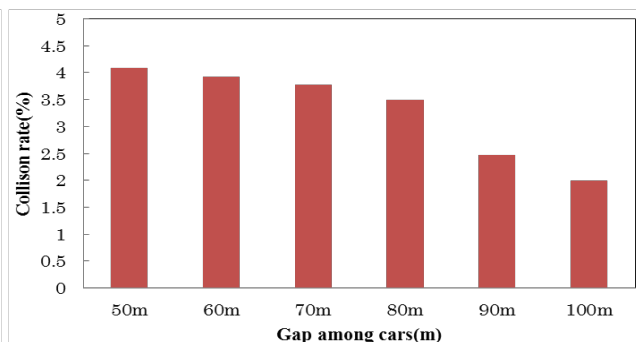


図 15 車間距離をそろえた場合の比較 (計測震度 6.6)

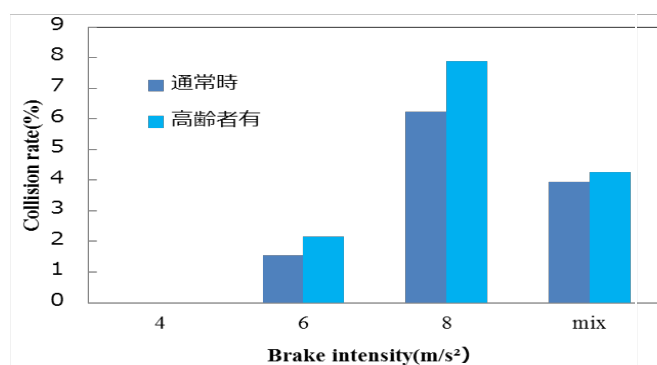


図 16 高齢者の有無による比較 (計測震度 5.1)

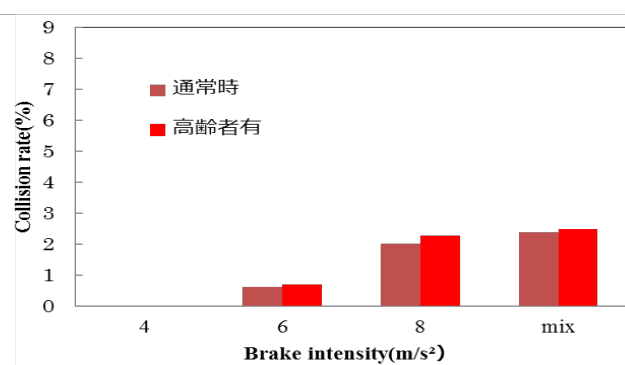


図 17 高齢者の有無による比較 (計測震度 6.6)

ある。すべての場合において、高齢者が含まれているケースの方が衝突確率は高い値を示した。これはブレーキを踏み始める時間が遅れたことにより車両はその分前に進んでしまい衝突回数が増加したことが原因と考えられる。またどちらの計測震度においてもブレーキ強さ-8m/s²が最大の増加率を示し、計測震度 5.1 においては約 30%増加した。これは、正規分布モデルにおいてブレーキ強さは約 3 秒で最大値を取るため、0.52 秒の遅れの寄与が極めて大きく、強いブレーキ操作においての反応遅れの影響は大きいと考えられる。またブレーキ-4m/s²強さで衝突確率は変化せず衝突は起きなかった。これは、ブレーキ強さ-4m/s²はで最大値を取るため、0.52 秒遅れても事故にはつながらず、弱いブレーキ操作においては反応が遅れても衝突する可能性は低いと言える。

まとめ

本研究では、地震時車両走行モデルを用いて、DS 実験の走行記録から得た車間距離の時間推移データと比較することで妥当性を検証した。そして、モデルを用いて地震動を考慮した高速道路上において車群挙動解析を行った。本研究の結論は以下に示すとおりである。

1. 本研究で用いた地震時車両走行モデルは、DS 実験の走行記録に見られる追従車のブレーキが強くなるにつれ車間距離のひらき方が大きくなっていくという特徴を再現できていた。また、DS 実験の再現解析で得られた車間距離の時間推移と実験の走行記録から得られた車間距離の時間推移との間の誤差を算出したところ、従来の車両走行モデルと同程度の精度は見込める誤差の範囲内であった。
2. ブレーキの強さが 6.8m/s² および mix のとき、計測震度 5.1 における衝突確率の方が計測震度 6.6 における衝突確率よりも大きくなった。これは、本研究で用いたモデルでは、ブレーキを踏み始める時間の差の違いが計測震度 5.1 の方が大きいため、計測震度 5.1 のケースの方が計測震度 6.6 のケースよりも高い衝突確率を示したと考えられる。またブレーキの強さが 4m/s² のときは衝突が起きなかったことから、安全なブレーキ操作であると言える。
3. 初期車間距離を設定し、地震時までそれを維持する車群について挙動解析を行った。これは自動運転技術が普及した場合を想定しており、地震時は人間の判断によりランダムなブレーキ操作を行うという条件で分析した。その結果車間距離が広がるにつれて衝突確率は減少したが、安全な距離を取っていてもブレーキの操作によっては衝突する可能性が十分あることがわかった。
4. 高齢者の反応遅れ時間を考慮した解析において、すべての場合において、高齢者が含まれているケースの方が衝突確率は高い値を示した。これはブレーキを踏み始める時間が遅れたことにより車

両はその分前に進んでしまい衝突回数が増加したことが原因と考えられる。ブレーキ強さ-8m/s²の場合、その影響は顕著に表れ、約 30%増加した。

参考文献

1. 二瓶美里, 小竹元基, 鎌田実：高齢者の認知特性を考慮した運転能力評価システムの開発, 2011
2. 村上凌一：地震発生時における高速道路上での車群の走行安全性に関する研究, 京都大学修士論文, 2016
3. ドライビングシミュレータを用いた地震発生時の車両挙動解析に関する研究, 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 交通情報工学研究室, 2016
4. 三宮信夫, 島田亮, 中峯浩：魚群行動における自律分散機構のモデリング. 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.2, pp.211 219, 1993
5. Arne Kesting, Martin Treiber：Calibrating Car-Following Models using Trajectory Data : Methodological Study , March 28, 2008
6. Makishita H, Matsunaga K. : Differences of drivers' reaction times according to age and mental workload, 2007