

# 車群追従走行の安全性評価に関する実験的研究\*

## Empirical Approach to Evaluating Safety of Vehicle-Platooning Behavior\*

鈴木宏典\*\*・藤井 健\*\*\*

By Hironori SUZUKI\*\* and Takeshi FUJII\*\*\*

### 1. はじめに

現在、自動車車両（以下、車両）の予防安全を目的とした運転支援技術が順次開発され実車両に搭載されつつある。全事故の約30%を追突事故が占める<sup>1)</sup>現状を考えると、特に前後方向の運転支援技術が、予防安全上重要な技術になると予想される。車両前後方向の制御に関わる運転支援技術は、その車両を運転するドライバの行動や車両挙動のみではなく、車両の集合体である車群の追従挙動にも影響を及ぼす可能性がある。このため、運転支援技術の効果評価を行う上では、車群追従挙動への影響も考慮した評価を充実させる必要があると考えられる。

運転支援技術と追突に対する車群追従挙動の安全性（以下、車群安全性）や安定性に関しては、幾つかの研究が国内外で報告されている。京都大学のグループ<sup>2)</sup>やMinderhoud and Bovy<sup>3)4)</sup>はAdaptive Cruise Control (ACC)やIntelligent Speed Adaptation (ISA)が車群の安全性や安定性に及ぼす効果をシミュレーションにより計算した。Darbha and Rajagopal<sup>5)</sup>はACC搭載車両と非搭載車両が混在した交通流の安定性を確保する要件を理論的に導いた。Geller and Asher<sup>6)</sup>は車々間通信のアルゴリズムを仮定し、前々方を走行する車両情報の後方車両への伝達が追突防止に及ぼす効果をシミュレーションにより評価した。

現在までの既存研究により車群安全性評価に関する一定の研究成果が得られてきているが、幾つかの

課題点も存在する。まず、評価に利用されているシミュレーションモデルの現況再現性に関する記述はほとんどないため、評価結果の現実的な妥当性が不明である。また、単なる追突の有無を評価するのみの場合や、潜在的な危険性を定義していても危険性の深さを評価に取り入れ切れていない場合もある。さらに、ある特別な追従状況についての車群安全性を評価するケースが多く、車群安全性に関する一般的な特徴を示すには至っていない。

そこで本研究では、車両前後方向の制御技術に関する予防安全上の効果を想定し、ドライバの運転行動、特に車両反応時間及び初期車間距離と車群安全性との関係を明らかにし、車群安全性の特徴を明確化することを目的とする。研究を行うに当たり、実車走行実験での車両挙動データに基づくシミュレーションを行い、評価結果に可能な限り高い現実性を持たせることとした。また、追突に至らないまでも潜在的な追突の危険性を評価することとした。

### 2. 方法

#### (1) 追従モデル

シミュレーションに用いる追従モデルはGazis-Herman-Rotheryのモデル(GHRモデル)<sup>7)</sup>を基本とする。最適な車間時間や最適な車速などGHRモデル単体では表現しきれない追従状況をモデルに内装するため、加速度 $\ddot{x}$ を計算するGHRモデルを式(1)のように変形した。式(1)の validityは既に検証済みであり、モデル化と検証の詳細は文献8)に譲る。

$$\ddot{x}(t+T) = a \left( \frac{\ell}{\Delta v} \cdot v^\alpha \right) + b \left( \sqrt[\xi]{\beta \cdot v^\gamma} - \frac{v}{\ell} \right) + c \left( \frac{R}{1 + m \exp(n \cdot \ell)} - v \right) + \Phi \quad (1)$$

\*キーワード：交通安全、交通流、車群追従走行

\*\*正員、D. Eng. (財) 日本自動車研究所予防安全研究部

(茨城県つくば市荻間2530、

TEL029-856-0874、FAX029-856-1121)

\*\*\*工修、(財) 日本自動車研究所予防安全研究部

(茨城県つくば市荻間2530、

TEL029-856-0874、FAX029-856-1121)

ここに  $t$ :時刻,  $T$ :車両反応時間,  $\Delta v$ :相対車速,  $v$ :自車速,  $\ell$ :車間距離, その他はモデルパラメータとする。

## (2) 1台の車両の追従安全性評価手法

### a) 適切な安全走行車間距離

追従挙動の安全性を評価するに当たり、まず適切な安全走行車間距離(ASDD: Appropriate Safe Driving Distance)を、車速の小さい先行車に車速の大きい追従車が接近する場合、適切に減速し適切な車間距離を保って先行車と同じ車速で追従するために必要な車間距離と定義する<sup>9)</sup>。この定義に基づいて運動方程式を解くと式(2)が導かれる。ASDDは先行車と追従車の車速により動的に変化するため、適切な車間距離をリアルタイムに把握することができる。

$$ASDD = -(t_{app} - v_2(t) + x_{stp}) + \frac{(v_2(t) - v_1(t))^2}{2\Delta a^*} \quad (2)$$

ここに、 $v_1$ :先行車の車速,  $v_2$ :追従車の車速,  $\Delta a^*$ :適切な相対減速度,  $t_{app}$ :適切な車間時間,  $x_{stp}$ :停止時車間距離とする。

### b) 追従安全性の評価指標

追従走行の安全性は、実際に観測される車間距離がASDDとどの程度乖離しているかにより評価することとした。すなわち実際の車間距離がASDDより短い場合には危険、長い場合には安全と判断する。この先行車と追従車の走行状態を擬似的に簡便なmass-springシステムに置き換え、釣合の位置をASDD、実車間距離を $\ell$ 、バネ定数を $k$ とし、仮想バネに蓄えられる符号付のエネルギーPEを追従安全性の指標と定義した。式(3)にPEを示す。 $\delta_p$ は $(\ell - ASDD)$ が負の時+1、正の時に-1の符号を示す。

$$PE = 0.5k(\ell - ASDD)^2 \cdot \delta_p \quad (3)$$

実車実験に基づいてPEの妥当性を検証した結果、既存手法(衝突余裕時間:TTC)との比較において、適用性が高いことを確認した。特にTTCが1.5sを超える、明らかに危険とも明らかに安全とも言えない追従状況の危険性を評価可能であることが導かれた。PEの導出及び検証の詳細は文献9)に譲る。

## (3) 車群安全性評価手法

本来、車群を構成する全ての車両のPEを計算し、車群安全性に対して何らかの議論を与えることが望

ましい。しかしながら、ドライバの運転行動にはばらつきが大きく個人差もあることから全車両の挙動を把握して車群挙動の一般的な傾向を得ることが難しい。そこで、研究の第一段階として車群内の個々の車両の安全性は後続車両に増幅あるいは減衰して伝播し最終的に最後尾の車両に反映される、という仮定を設けた。そして先頭車を除く中間車両の反応時間の合計値( $T\_sum$ )及び初期車間距離の合計値( $L\_sum$ )と、最後尾車両の追従安全性との関係を把握することにより車群安全性を評価することとした。

## 3. 数値計算

### (1) 追従挙動データの収集と追従モデルの検証

車群安全性を評価するに当たり、まずシミュレーションの基礎となる追従走行データの収集を行った。計測器を搭載した乗用車(AT車)5台に対し、先頭車減速度、車間距離、各2条件を組み合わせテーストコース上を走行させ、定速走行から減速するまでの車両挙動データを取得した。先頭車減速度条件は「比較的強い(0.4~0.5G)」及び「比較的弱い(0.1~0.2G)」とし、車間距離条件はドライバの主観に基づき「通常」及び「通常より短い」とした。

次に「通常」車間距離走行時のデータを用いて先頭車を除く全車両、全走行での追従モデルのパラメータを同定し、「比較的強い」減速度かつ「通常より短い」車間距離時のデータを用いて追従モデルの検証を行った。全車両及び全走行の加速度/速度の推定誤差は平均値で0.35m/s<sup>2</sup>, 1.8km/hとなり、モデルに関する実際の追従現象再現能力を確認した。

### (2) シミュレーションのシナリオ

本研究では車群がどのような状況で危険になるか、を特に議論するため、約55~60km/hの車速及び、通常より短い車間距離(約12~16m)で車群内の車両が追従走行し、かつ先頭車両に比較的強い減速(約0.4~0.5G)を与えるシミュレーションを行う。

#### a) 車両台数とシミュレーション時間

- ・7台の乗用車を100ms間隔で追従走行させる(既存研究6)の知見に基づいて7台とした)
- ・定速走行から減速して停止あるいは再加速するまでの150sのシミュレーションとする

b)先頭車両（1番目車両）挙動の設定

実車実験にて観測された先頭車の急減速挙動データ合計10セットを与える。10セットの減速度及び初速度は概ね0.4~0.5G、55km/h程度であった。

c)中間車両（2~6番目車両）挙動の設定

車両挙動データから同定した追従モデルのパラメータ38セットを、中間の5台の車両にランダムに与える。ここで、車群安全性に関わりが深いと考えられる車両反応時間を実測値±0.3s、同様に初期車間距離を実測値±5.0mでランダムに変化させ、パラメータに現実的な範囲を持たせることとした。

d)最後尾評価車両（7番目車両）挙動の設定

38セットの追従モデルパラメータの内、代表的な17セットを最後尾車両に与え、評価車両の違いによる車群安全性の比較検討を行う。パラメータはすべて実測値に基づいて同定された値を用いる。

(3) シミュレーションと車群安全性評価の手順

先頭車両挙動1セット、最後尾評価車両挙動1セット、中間車両挙動をランダムに5セット選択し、7台の車両挙動をシミュレートする。1走行毎に最後尾評価車両の追従安全性指標の極大値(PE\_lmx)を計測し、その時の中間車両の反応時間合計値(T\_sum)及び、初期車間距離合計値(L\_sum)とPE\_lmxの関係を記憶する。先頭車両挙動及び中間車両挙動をランダムに変化させ同様の走行と評価を2,000万回の走行分を行う。この操作を、17セットの最後尾評価車両について個別に行い、T\_sum、L\_sumとPE\_lmxとの関係を3次元に示した図を、17セット分描く。

(4) 車群安全性評価結果

図1~4に最後尾評価車両の反応時間がa)比較的小さい場合(-1.2~-0.6s)、b)中程度の場合(0.2~0.6s)、c)比較的小さい場合(0.8~1.0s)、及びd)初期車間距離が比較的小さい場合(25~30m)の各ケースについて、代表的な車群安全性評価結果を示す。平面2軸にT\_sum、L\_sum、鉛直軸にPE\_lmxを取り、PE\_lmxを等高線で図示する。PE\_lmxが大きくなるほど車群が危険、小さくなるほど安全と評価する。図中の点線は最後尾車両が追突する確率が0.01%以上となる境界線である。図1~4から以下が理解できる。

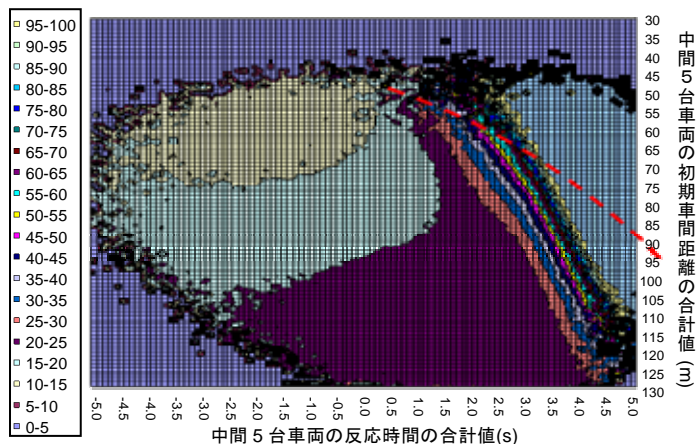


図-1 車群安全性評価(最後尾車両反応時間=-0.6s)

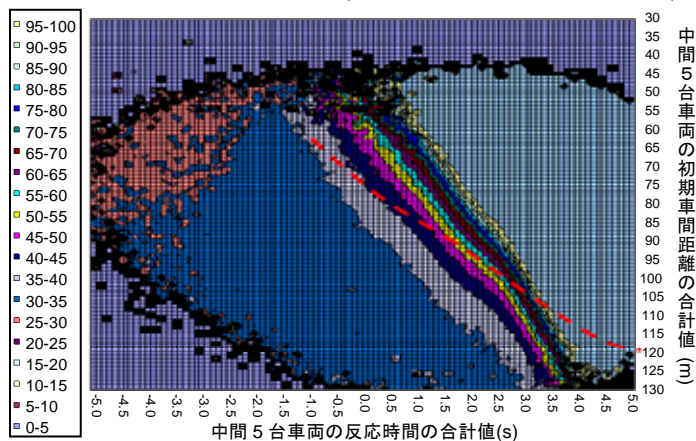


図-2 車群安全性評価(最後尾車両反応時間=0.5s)

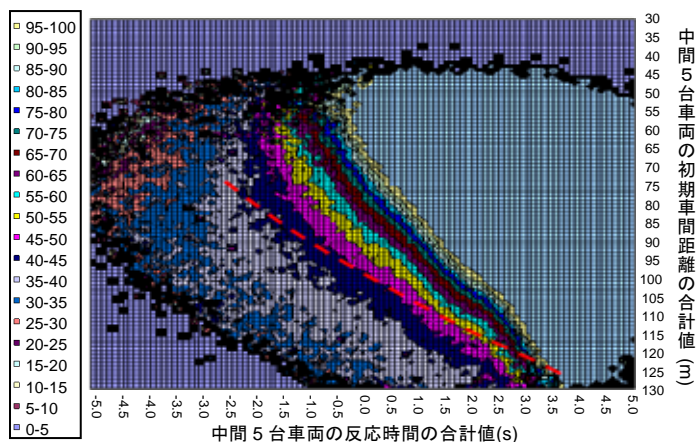


図-3 車群安全性評価(最後尾車両反応時間=1.0s)

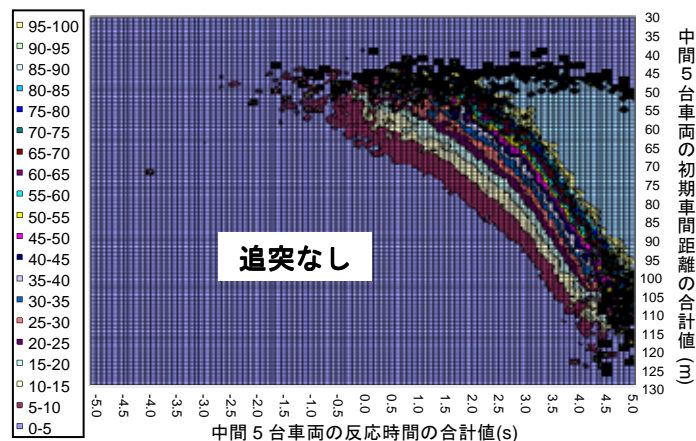


図-4 車群安全性評価(最後尾車両車間距離=25.4m)

#### a)全ケースにはほぼ共通の知見

1.  $T_{sum}$ が増加するほど、また、 $L_{sum}$ が減少するほど車群は危険になる。
2. 等高線の間隔が急激に狭まり、 $T_{sum}/L_{sum}$ の僅少な増加/減少が、急激にかつ突然に車群危険性を増大させてしまう追従状況が存在する。
3. 最後尾車両の追突が観測され始める領域と車群危険性が突然増加する領域は概ね一致する。
4. 比較的短い $T_{sum}$ (例えば-1.5s以下等)が車群安全に貢献するのは、 $L_{sum}$ がある値以下の場合であり、これを超えると効果は比較的小さい。

#### b)各ケースの比較

1. 最後尾車両の反応時間が短いほど(図1と2)、ほぼどの $L_{sum}$ においても安全領域が増加し、長いほど(図2と3)危険領域が増加する。
2. 最後尾車両の初期車間距離が極端に長い場合(図4)、車群安全性は顕著に向上する。

#### (5) 車群安全性評価結果に対する考察

##### a)潜在的な車群危険領域の存在

今まで安全だった車群追従が突然かつ急激に危険になる追従状況が存在している。例えば図2において $L_{sum}=110m$ (1台平均22m)の場合、 $T_{sum}=2.5\sim 3.0s$ (1台平均0.5~0.6s)で急激に車群危険性が変化する。22mの車間距離/0.5sの反応時間は決して特異状況ではなく頻繁に生じる状況であり、急激に車群危険性が増加する領域は追突が生じ始める領域と概ね重なることから、頻繁に生じる追従状況に実は潜在的な車群危険領域が存在すると判断できる。

##### b)前々方車両挙動把握の効果

例えば車々間通信技術を想定し車両反応時間を限りなく削減できると仮定しても、その効果はある車間距離の範囲内のみで効果があり、その車間距離を超えると顕著な効果が得られないことが伺える。

##### c)中間車両の努力と最後尾車両の挙動

中間車両が努力をして $T_{sum}=0.5s$ (1台平均0.1s)に出来たととしても、例えば図3のように、最後尾車両の反応時間が長いと車群は比較的危険となってしまう。ただ、ここでは中間車両と最後尾車両は独立で考えているが、中間車両の努力が最後尾車両のドライバーに何らかの影響を及ぼす可能性もあり、人間工学的な検証が必要な場合も考えられる。

#### 4. おわりに

ドライバーの運転行動、特に車両反応時間及び初期車間距離の変化と車群安全性との関係をシミュレーションにより定量的に評価し、一般的な車群安全性の特徴を明らかにした。評価に高い現実性を持たせるため実際の車両挙動データに裏付けられた追従モデル、パラメータを用い、追従モデルの現況再現性も検証した。既存手法に変わる追従走行の安全性評価指標を定義し潜在的な車群危険性を把握した。

この結果、普段頻繁に生じる追従状況に、急激に車群安全性が阻害される潜在的な車群危険領域が存在すること、前々方車両挙動把握が有効な追従状況はある車間距離の範囲内に限定されていること、などの知見が得られた。ただ、今回はa)ドライバー行動を決定論的にモデル化し、b)個々のドライバーを独立と仮定し、c)バラツキのある車群安全性の平均値を評価したに過ぎない。得られた車群安全性の特徴を基に、今後車群安全化を図るための条件を検討すると同時に、人間工学的な知見も含め評価結果の妥当性を実車実験等により検証する必要もある。

#### 参考文献

- 1) 日本損害保険協会：自動車保険データにみる交通事故の実態 2003年4月~2004年3月, p.149, 2005.
- 2) 宇野他：ファジィ追従シミュレーションモデルを用いた車両反応時間削減の影響分析,第1回ITSシンポジウム講演集, pp.597-605, 2002.
- 3) Minderhoud, M.M., and P.H.L. Bovy. Extended Time-To-Collision Measures for Road Traffic Safety Assessment. Accident Analysis and Prevention, Vol. 33, Elsevier Science Ltd. pp.89-97, 2001.
- 4) Minderhoud M.M., and P.H.L. Bovy: Impact of Intelligent Cruise Control on Motorway Capacity, Transportation Research Record 1679, TRB, pp.1-9, 1999.
- 5) Darbha S and K.R.Rajagopal: Intelligent Cruise Control Systems and Traffic Flow Stability, Transportation Research C(7), pp.329-352, 1999.
- 6) Galler, B.A., and H. Asher: Vehicle-to-Vehicle Communication for Collision Avoidance and Improved Traffic Flow: IDEA Project Final Report Contract ITS-1, TRB, 1995.
- 7) 例えば, Rothery R.W.: Chapter 4 -Car Following Models-, Traffic Flow Theory, A State-of-the-Art Report, TRB (eds. Cartner N., Messser C.J. and Rathi A.K.), 1992.
- 8) 鈴木・鈴木：道路環境シミュレーションのための車両追従モデルの構築,自動車研究 第26巻 第5号, pp.189-192, 2004.
- 9) 鈴木：追従安全性評価手法の提案—TTCとの比較検討—,自動車技術会・学術講演会前刷集No.113-04, pp.17-20, 2004.