

急減速によって発生する多重衝突に関する研究

杉山 直希

静岡大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

概要

走行している車両群のうち、一台の車両が急停止あるいは急減速する場合に発生する多重衝突について、前走車との速度差を考慮するよう拡張した最適速度モデルを用いてコンピュータシミュレーションを行う。車両の衝突あるいは停止を判定するために、衝突発生パラメータを定義する。減速車両の後続車の前方車間距離と速度の関係を示した車間距離-速度線図と、衝突発生パラメータと時刻の関係を示した図によって、各車両の挙動を明らかにする。多重衝突の発生及び衝突台数は感度、相対速度考慮係数、平均密度（車間距離）、初速度、減速車両速度に依存する。これらの値を変化させることで多重衝突発生領域マップを導出し、各パラメータ依存性を明らかにする。

Multiple-vehicle collision induced by sudden slowdown in traffic flow

Naoki Sugiyama

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

Abstract

We study the traffic behavior of the multiple-vehicle collision in traffic flow when a vehicle slows down suddenly. We apply the extended optimal velocity model to the vehicular motion to take into account the velocity difference. We define a collision parameter for the stop and collision criterion. We investigate whether or not vehicles collide. The number of collided vehicles depends on the sensitivity, the mean density (the initial headway), the initial velocity, and the relative velocity. We derive the phase diagram for multiple-vehicle collision.

1 緒言

高速道路では、複数の車両が巻き込まれる多重衝突が度々発生している。多重衝突は交通事故が原因で急停止あるいは急減速した減速車両に、減速車両の後続車が追突することで発生する。交通事故の発生原因は数多くあるが、減速車両に後続車が追突して多重衝突が発生するか否かは、後続車の感度、速度、車間距離に大きく依存している。これまでに、任意の速度・車間距離で車線変更した場合において、一台が衝突するまでの車両挙動について研究されているが[1,2]、衝突発生後の後続車両の車両挙動を扱った、多重衝突に関する研究はほとんどなされていない。

本研究では、走行している車両群のうち、一台の車両が急停止あるいは急減速した場合の各後続車の

挙動を明らかにする。車両の運動については、前走車（直前方車両）との車間距離に加えて、速度差を考慮するよう拡張した最適速度モデルを用いる。車間距離と速度の比で定義した衝突発生パラメータを用いて、車両の停止・衝突の判定を行う。多重衝突の発生及び衝突台数は、感度、相対速度考慮係数、平均密度（車間距離）、初速度、減速車両速度によって決定される。この条件を変えることで多重衝突の特性を調べ、多重衝突発生領域マップを導出する。

2 シミュレーションモデル

本研究では、一車線で追い越しができない道路を一定の感度、速度、車間距離で走行している車両群のうち、一台の車両が急停止あるいは急減速する状況を考える。

一台の車両が急減速すると、その後続車両も衝突を回避するため急減速する必要がある。後続車の感度・速度に対して、減速車両との車間距離が十分にある場合、安全に減速できるが、車間距離が不十分の場合、減速できず減速車両に衝突する。さらに、その後続車両も減速できずに連続して追突する場合がある。

この節では、車両の前進運動に用いるモデルと、車両が衝突あるいは安全に停止したと判定する基準について述べる。

2.1 車両の運動方程式

車両の運動については、前走車との車間距離に加えて、前走車との相対速度を考慮するように拡張した最適速度モデルを用いる。車両 i の運動方程式は(1)式で表される[3,4]。

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} = a \left\{ V(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\} + b \left\{ \frac{dx_{i+1}}{dt} - \frac{dx_i}{dt} \right\} \quad (1)$$

ただし $x_i(t)$, $x_{i+1}(t)$ は時刻 t における車両 $i, i+1$ の位置、 $\Delta x_i(t) (= x_{i+1}(t) - x_i(t))$ は車両 i の前方車間距離、 a は感度、 b は相対速度考慮係数、 $V(\Delta x_i)$ は最適速度関数である。本研究での最適速度関数は(2)式で表される関数を用いる。

$$V(\Delta x_i) = \frac{V_{\max}}{2} \{ \tanh(\Delta x_i - x_c) + \tanh x_c \} \quad (2)$$

ただし V_{\max} は最大速度、 x_c は変曲点で安全距離と呼ぶこととする。前走車との車間距離のみでなく、相対速度を考慮する(1)式の右辺第二項を加えることで、速度差が大きい場合、加減速がより強くなるため、現実に近い車両の挙動を再現できる。

2.2 衝突・安全停止の判定基準

走行している車両が安全に減速して停止できる場合、速度がゼロとなったとき、車間距離はゼロではなく任意の値となる。逆に前走車へ衝突する場合、車間距離がゼロとなったとき、速度はゼロではなく任意の値となる。つまり、

$$\text{停止時: } v_i(t) \rightarrow 0 \text{ のとき, } \Delta x_i(t) \rightarrow \text{constant} \quad (3)$$

$$\text{衝突時: } \Delta x_i(t) \rightarrow 0 \text{ のとき, } v_i(t) \rightarrow \text{constant} \quad (4)$$

と表せる。ただし $v_i(t) (= dx_i(t)/dt)$ は車両 i の速度である。

ここで、車間距離 $\Delta x_i(t)$ と速度 $v_i(t)$ を用いて(5)式により衝突発生パラメータ $S(\Delta x_i)$ を定義する。

$$S(\Delta x_i) \equiv \frac{v_i(t)}{\Delta x_i(t)} \quad (5)$$

(3),(4)式より、衝突・停止時の衝突発生パラメータ

$S(\Delta x_i)$ は(6),(7)式で表せる。

$$\text{停止時: } S(\Delta x_i) = \frac{v_i(t)}{\Delta x_i(t)} \rightarrow 0 \quad (6)$$

$$\text{衝突時: } S(\Delta x_i) = \frac{v_i(t)}{\Delta x_i(t)} \rightarrow \infty \quad (7)$$

(6),(7)式より、衝突発生パラメータの値がゼロに漸近するとき、車両は衝突することなく停止したと判定し、衝突発生パラメータの値が無限大に発散するとき、車両は前走車に衝突したと判定する。停止後、衝突後ともに車両の速度はゼロで一定として、停止位置、衝突位置から動かないものとする。

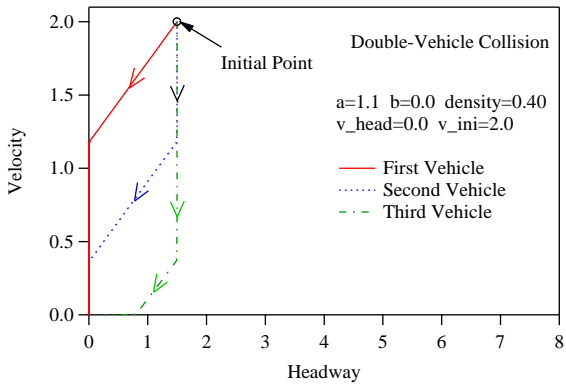
3 シミュレーション結果

本研究では、コンピュータシミュレーションにおいて時間刻み $\Delta t=1/128$ とした4次のRunge-Kutta法を用いる。初期条件として、最大速度 $V_{\max}=2.0$ の一車線の道路に車両を初期車間距離 Δx_0 、初速度 v_{ini} 、感度 a 、相対速度考慮係数 b 、安全距離 $x_c=4.0$ で、道路長 $L=200$ を超えない車両台数 N で配置する。平均密度 ρ は $\Delta x_0=0$ のときに $\rho=1$ となるよう $\rho=1/(1+\Delta x_0)$ で定義する。時刻 $t=0$ で先頭車両が減速車両速度 v_{head} に急減速したとする。以上の条件で感度 a 、相対速度考慮係数 b 、平均密度 ρ (初期車間距離 Δx_0)、初速度 v_{ini} 、減速車両速度 v_{head} の値を変化させることで、各後続車両の挙動、衝突の発生、衝突台数に及ぼすこれらパラメータの影響を明らかにする。

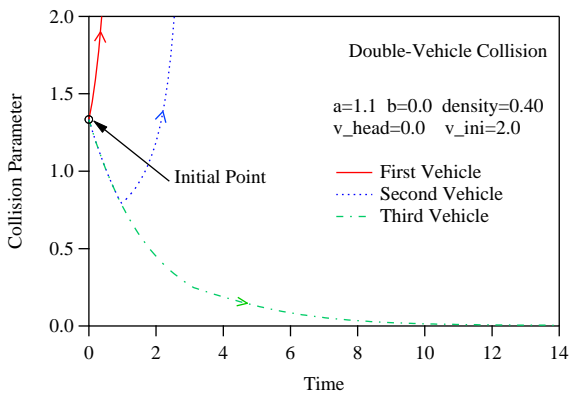
3.1 車両挙動

感度 $a=1.1$ 、相対速度考慮係数 $b=0.0$ 、平均密度 $\rho=0.40$ (初期車間距離 $\Delta x_0=1.5$ 、車両台数 $N=133$)、初速度 $v_{ini}=2.0$ 、減速車両速度 $v_{head}=0.0$ として、時刻 $t=0$ で急停止した車両の後続車三台の速度と車間距離の関係をプロットした車間距離-速度線図を図1(a)に、後続車三台の時刻に対する衝突発生パラメータをプロットした図を図1(b)に示す。ただし、赤い実線は減速車両の一台後方の車両の軌跡、青い点線は二台後方の車両の軌跡、緑の一点鎖線は三台後方の車両の軌跡を表している。この条件では、二台の車両が巻き込まれる多重衝突が発生する。

時刻 $t=0$ で先頭車両が急停止した後、後続車一台目の車両が減速車両に接近する。減速車両との車間距離が小さいため、急減速するが、速度の変化より早く車間距離がゼロになり、衝突発生パラメータは発散して減速車両に衝突する。二台目の車両は、一台目の車両が衝突するまでは、一台目の車両と同様に減速するので、車間距離はほぼ変化しないが、衝突発生パラメータは小さくなる。一台目の車両衝突後も減速するが、二台目は車間距離が速度の変化より早くゼロになり、衝突発生パラメータは発散して衝



(a)



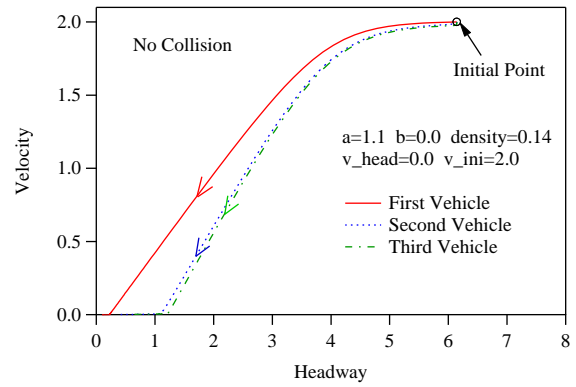
(b)

図1 二台衝突する場合の(a)車間距離 - 速度線図
(b)時刻に対する衝突発生パラメータ

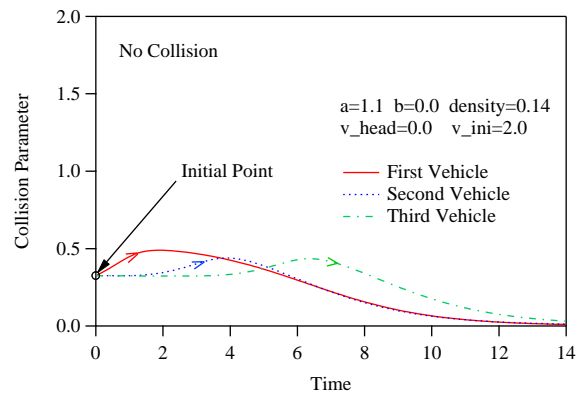
突する。二台目の車両は、減速車両までの距離が一台目の車両に比べ大きいため、衝突時の速度は小さくなる。一台目、二台目の車両が衝突した後、三台目の車両が接近するが、衝突発生パラメータの値はゼロとなり安全に停止できる。四台目以降の車両も三台目の車両と同様に、安全に停止できる。

感度 $a=1.1$ 、相対速度考慮係数 $b=0.0$ 、平均密度 $\rho=0.14$ (初期車間距離 $\Delta x_0=6.143$ 、車両台数 $N=32$)、初速度 $v_{ini}=2.0$ 、減速車両速度 $v_{head}=0.0$ として、時刻 $t=0$ で急停止した車両の後続車三台の車間距離 - 速度線図を図 2(a)に、時刻に対する衝突発生パラメータを図 2(b)に示す。二台衝突 (図 1) の条件に比べ、平均密度 (初期車間距離) のみ異なっている。この条件では全車両が安全に停止する。

$t=0$ で先頭車両が急停止した後、一台目の車両が減速車両に接近するが、車間距離の変化より先に速度が小さくなる。衝突発生パラメータは、安全距離より大きい車間距離では、高速のまま前走車に接近するので増加する。安全距離以下の車間距離になると、急減速するので、衝突発生パラメータは減少してゼロに漸近する。このため、一台目の車両は安全に停止できる。その後、二台目、三台目の車両が接近するがこれらの車両も衝突発生パラメータの値がゼロに漸近するので安全に停止できる。一台目の車両と



(a)



(b)

図2 衝突回避する場合の(a)車間距離 - 速度線図
(b)時刻に対する衝突発生パラメータ

違い、前走車が動いているので、停止時の車間距離は一台目の車両に比べ大きくなる。この条件では、初期車間距離が大きく、初速度が最適速度とほぼ一致する。このため、車両位置による差が小さくなり、四台目以降の車両も含め全車両が似た挙動となる。

3.2 多重衝突発生領域マップ

多重衝突の発生及び衝突台数は、感度 a 、相対速度考慮係数 b 、平均密度 ρ 、初速度 v_{ini} 、減速車両速度 v_{head} の値によって決定される。これらの条件を変化させることで、多重衝突発生領域マップを導出する。

図 3 に $a=1.1, b=0.0, v_{head}=0.0$ の条件で、縦軸、横軸を運転手が操作可能である初速度、平均密度として得られた多重衝突発生領域マップを示す。ただし、○は一台、□は二台、△は三台、◇は四台、●は五台、■は六台、▲は七台、◆は八台、×は九台以上の車両による多重衝突が発生したことを表している。

図 3 より、初速度が小さく、平均密度が低い (初期車間距離が大きい) 領域では衝突は発生しにくい。逆に、初速度が大きく、平均密度が高い (初期車間距離が小さい) 領域では衝突が発生しやすい。さらに、初速度が大きいほど、平均密度が高いほど、衝突台数は増加する。

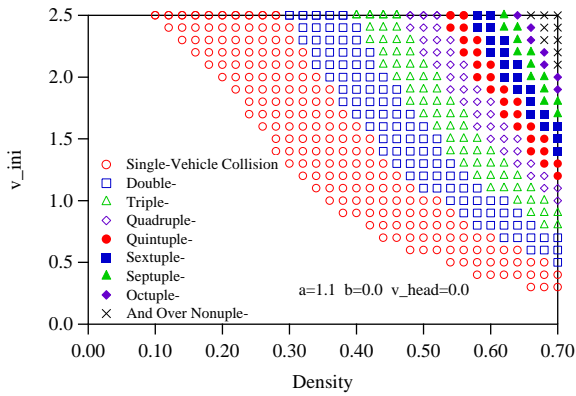


図3 初速度と平均密度に対する多重衝突発生領域マップ
($a=1.1, b=0.0, v_{head}=0.0$)

図4に $\rho=0.50, v_{head}=0.0, v_{ini}=2.0$ の条件で縦軸に感度、横軸に相対速度考慮係数として得られた多重衝突発生領域マップを示す。

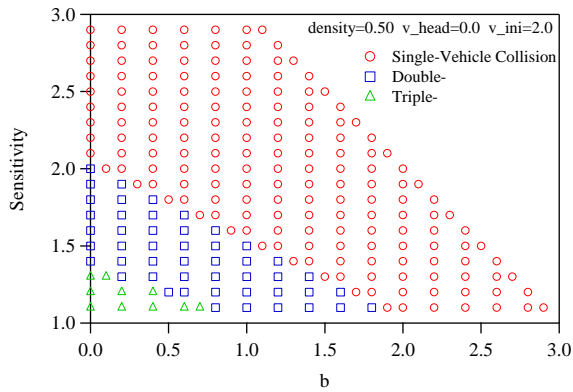


図4 感度と相対速度考慮係数に対する
多重衝突発生領域マップ
($\rho=0.50, v_{head}=0.0, v_{ini}=2.0$)

図4より、感度が大きく、相対速度考慮係数が大きい領域では衝突は発生しにくい。逆に、感度が小さく、相対速度考慮係数が小さい領域では衝突が発生しやすく、衝突台数が増加する。

図5に $a=1.1, b=0.0, v_{ini}=2.0$ の条件で、縦軸に減速車両速度、横軸に平均密度として得られた多重衝突発生領域マップを示す。

図5より、減速車両速度が大きく、平均密度が低い領域では衝突は発生しにくい。逆に、減速車両速度が小さく、平均密度が高い領域では衝突は発生しやすく、衝突台数も増加する。また、減速車両速度が大きくなるほど衝突車両の速度がゼロとなるため、衝突発生密度における衝突台数が増加する。

以上より、感度が小さく、相対速度考慮係数が小さく、平均密度が大きく、初速度が大きく、減速車両速度が小さい領域では多重衝突が発生しやすくなることがわかる。また、衝突台数の境界を明らかにした。

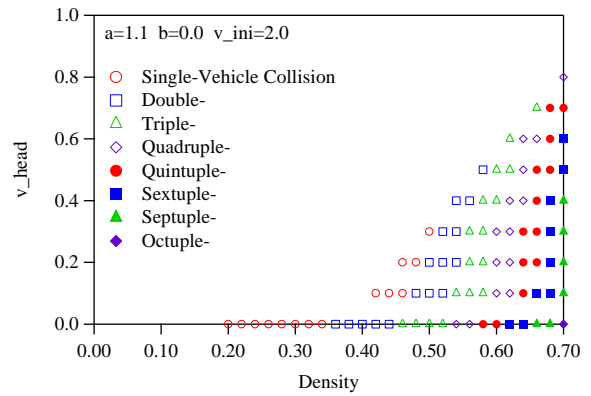


図5 減速車両速度と平均密度に対する
多重衝突発生領域マップ
($a=1.1, b=0.0, v_{ini}=2.0$)

4 結言

走行している車両群のうち、一台の車両が急停止あるいは急減速する場合に発生する多重衝突について、前走車との速度差を考慮するよう拡張した最適速度モデルを用いてコンピュータシミュレーションを行い、以下の結言を得た。

- 車両の車間距離と速度をプロットした車間距離 - 速度線図と、車間距離と速度の比で定義した衝突発生パラメータを用いることで、多重衝突発生時、非発生時の各車両の挙動を明らかにした。
- 多重衝突の発生及び衝突台数は感度、相対速度考慮係数、平均密度、初速度、減速車両速度によって決定される。これらの条件を変化させることで、多重衝突発生領域マップを導出した。
- 多重衝突発生領域マップより、感度が小さく、相対速度考慮係数が小さく、平均密度が大きく、初速度が大きく、減速車両速度が小さいほど多重衝突が発生しやすく、衝突台数が増加することを明らかにした。

参考文献

- [1] Y. Naito, T. Nagatani, Physica A 391 (2012) 1626-1635.
- [2] Y. Naito, T. Nagatani, Physics Letters A 375 (2011) 1319-1322.
- [3] W. Lv, W.G. Song, Z.M. Fang, Physica A 390 (2011) 2303-2314.
- [4] H.X. Ge, R.J. Cheng, Z.P. Li, Physica A 387 (2008) 5239-5245.