

## 隊列走行時の大型トラックの衝突安全性に関する研究

日大生産工 (院) ○山口 伊織 日大生産工 栗谷川 幸代  
大阪産業大学 金子 哲也 日大生産工 景山 一郎

### 1 まえがき

現在、交通事故ゼロ、交通物流の効率化、環境問題の改善を目的とした自動隊列走行の研究が新エネルギー・産業開発機構 (NEDO) で行われている<sup>1)</sup>。このプロジェクトでは高速道路において大型トラックでの隊列走行を行っており、車間距離 4m を目標としているため、ブレーキ故障などが起きた場合はフェールセーフ機構を設けるなどして、予防安全への対策を備えている<sup>2)</sup>。しかしながら、万が一追突した場合の衝突安全性を検討し、証明しなければ今後普及させるまでには至らない。

そこで本研究では、大型トラックの隊列走行において、車両の追突解析・乗員の傷害の推定を行い、乗員へ及ぼす追突の影響を検討する。



Fig.1 隊列走行車両

### 2 追突条件

本研究では新エネルギー・産業技術開発機構が推進する ITS プロジェクトにおいて使用されている隊列走行車両について解析を行う。車両は図 1 に示す 25t トラックとし、2 台隊列走行中に何らかのシステムトラブルにより先行車両が急ブレーキをし、後続車は

よけきれず、制動もなしに追突する場合を想定した。

### 3 解析方法

隊列走行の実験データより初期速度を決定し、シミュレーションの初期条件として衝突速度を算出する。次に、車両挙動シミュレーションソフト「PC-Crash」と乗員挙動シミュレーションソフトである「MADYMO」を使用し、解析を行う。PC-Crashでは衝突時の反発係数と衝突持続時間、車間距離、車両諸元を入力し、車両の加速度を出力する。MADYMOでは車両の加速度を入力として乗員の頭部と頸部の速度と加速度を出力する。さらに、乗員の速度と加速度により、頭部傷害を示すHICとむち打ち傷害を示すNICを算出し、衝突が乗員へ及ぼす影響を検討する。

### 4 衝突速度

先行車が急制動を開始した瞬間に2車両間の初期速度には速度差があることを考慮すると、衝突速度は初期の速度差と減速による速度差の和となる。初期の速度差は、2010年に行われた新東名高速道路において行われた自動隊列走行の速度データの振動の大きさをを用いた。図2に示す自動隊列走行のデ

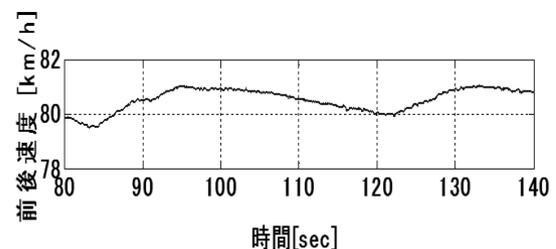


Fig.2 自動隊列走行の速度データ  
(新東名高速道路, 2010年)

Study on Crash Safety for Heavy Duty Vehicles on Platooning  
Iori YAMAGUCHI, Yukiyo KURIYAGAWA, Tetsuya KANEKO  
and Ichiro KAGEYAMA

Table.1 速度変動

|               | 速度[km/h] |
|---------------|----------|
| 平均 $\mu$      | 80.1     |
| 標準偏差 $\sigma$ | 3.06     |
| $\mu+3\sigma$ | 89.6     |
| $\mu-3\sigma$ | 71.3     |

ータは新東名高速道路において時速 80km/h を目標速度とした自動隊列走行のデータである。勾配や外乱により目標の 80km/h から速度変動しているため、平均  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  により  $\mu \pm 3\sigma$  の変動を考慮し、表 1 に示す。速度変動は 80km/h を基準に先行車の初期速度  $v_{01}=70\text{km/h}$ 、後続車の初期速度  $v_{02}=90\text{km/h}$  である。このことから、隊列時の 2 台の相対速度は 20km/h となる。

さらに、先行車のみ減速度  $a_E = -0.7G$  で制動し、車間距離  $l$  として、先行車の急制動から衝突までの衝突余裕時間  $T_{Collision}$ 、先行車と後続車との衝突直前の速度差  $\Delta v$  を式(1)、(2)、(3)、(4)より算出した。

$$T_{Collision} = \frac{(v_{02} - v_{01}) - \sqrt{(v_{02} - v_{01})^2 - 2a_E l}}{a_E} \quad (1)$$

$$v_1 = \int_0^{T_{Collision}} a_E dt + v_{01} \quad (2)$$

$$v_2 = v_{02} \quad (3)$$

$$\Delta v = v_2 - v_1 \quad (4)$$

Table.2 車間距離別速度差・衝突時間データ

| 車間距離[m]      | 5    | 10   | 15   | 20   |
|--------------|------|------|------|------|
| 衝突余裕時間 [sec] | 0.64 | 1.08 | 1.43 | 1.73 |
| 衝突速度差 [km/h] | 29.8 | 42.2 | 51.6 | 59.6 |

表 2 は、衝突速度差  $\Delta v$  と衝突余裕時間  $T_C$  を 5・10・15・20m の車間距離別で示した。これらの車間距離は隊列を組む過程において考慮すべき車間とした。車間距離が大きくなるにしたがって衝突直前の速度差は大きくなり、車間距離 20m の場合では約 60km/h と速度差が非常に大きい。姿勢角とオフセット量については、衝突解析を簡単にするためにどちらもなしとし、フルラップ衝突とした。

## 5 衝突解析

### 5. 1 衝撃加速度へ及ぼすパラメータの影響

衝突解析では車両の衝撃加速度を算出して評価する。車両の衝撃加速度は衝突時に乗員への影響を知る上で重要な指標である。しかしながら、大型トラックの衝突実験はほとんど行われていないこと、車両によって衝突パラメータが異なることを考慮すると、起こり得る衝突パラメータの範囲で衝撃加速度について言及する。衝撃加速度へ影響を及ぼす 4 つの項目である反発係数  $e$ 、衝突持続時間  $T$ ・車間距離  $l$ ・車両重量  $m$  をパラメータとし、表 3 に示す。

衝突時に加わる衝撃加速度は通常は  $\sin$  波であるため<sup>3)</sup>、先行車・後続車それぞれの最大値を式(5)、(6)に示す。

$$a_{1max} = \sqrt{2} \frac{m_2(1+e)\Delta v}{T(m_1+m_2)} \quad (5)$$

$$a_{2max} = -\sqrt{2} \frac{m_1(1+e)\Delta v}{T(m_1+m_2)} \quad (6)$$

まず、反発係数  $e$  については、大型トラックにおいて極低速時には大きくなるものの、一般的に 0.1~0.25 である<sup>4)</sup>。一方、衝突継続時間  $T$  については、乗用車は一般的に 0.1sec 前後である<sup>5)</sup>が、重量の大きい大型トラックの場合は時間をかけて衝突エネルギーを吸収するため、乗用車より長くなると考えられる。衝突持続時間は小さくなるほど衝撃加速度が大きくなり、衝撃加速度への影響が非常に大きい。

反発係数と衝突持続時間の及ぼす影響を見るため、図 3 に車間距離 20m、車両重量はともに同重量とし、反発係数  $e$ ・衝突持続時間  $T$  をパラメータとした衝撃加速度を示す。

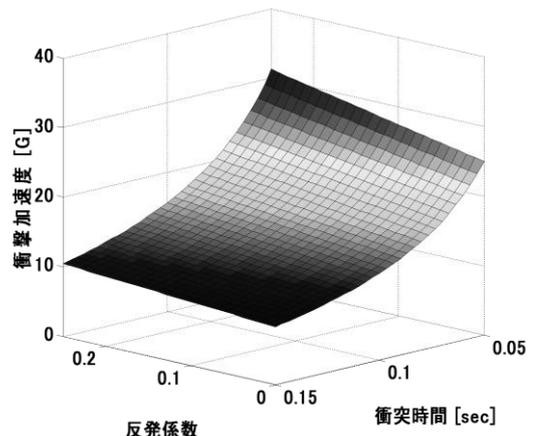


Fig.3 衝撃加速度に及ぼす  $e \cdot T$  の影響

Table.3 条件パラメータ

| パラメータ項目 | 範囲         | 単位  |
|---------|------------|-----|
| 反発係数    | 0~0.25     | —   |
| 衝突持続時間  | 0.05~0.15  | sec |
| 車間距離    | 5・10・15・20 | m   |
| 積載重量    | 0~13900    | kg  |

Fig.3 から反発係数が衝撃加速度へ及ぼす影響は小さく、衝突持続時間はその大きさに反比例して衝撃加速度が大きくなり、 $T=0.05\text{sec}$  の時、最大 32G の衝撃加速度を示す。

次に、車間距離と車両重量違いが及ぼす影響をみる。車間距離は衝突時の速度、つまり、先行車と後続車の速度差 $\Delta v$ に影響を及ぼす。車両重量は重いほど、その場にとどまろうとする慣性力が大きいため、速度変化が小さく済み衝撃加速度が小さくなる。特に大型トラックでは積み荷により大幅な重量変動がある。車両重量9370kgに積載量13900kgとして最大・最小がそれぞれ23270kg・9370kgとなる。一方の車両が9370kgとし、他方は積載量を0~13900kgとして重量パラメータを設定した。

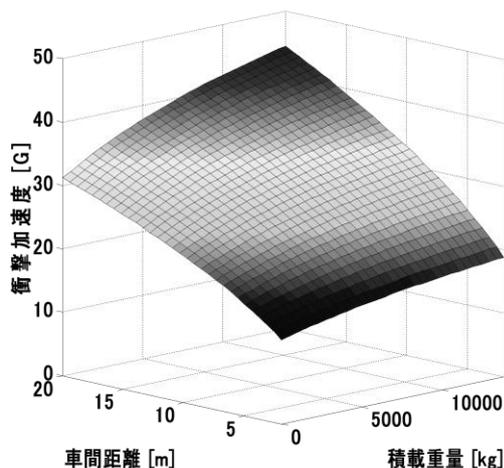


Fig.4 衝撃加速度に及ぼす積載重量と車間距離の影響

図4は衝撃加速度に及ぼす積載重量と車間距離の影響を示す。反発係数・衝突持続時間ともに衝撃加速度が最大となる  $e=0.25$ 、 $T=0.05$  として衝撃加速度を算出した。

また、車両重量の影響では、先行車の衝撃加速度が大きくなる場合と後続車の衝撃加速度が大きくなる場合の2パターンある。前者は車両重量が 9370kg、後続車が車両総重量 23270kg であり、後者は重量を入れ替え、先行車と後続車の衝撃加速度も入れ替わる。

## 5. 2 衝撃加速度のまとめ

衝撃加速度に及ぼすパラメータの影響より、最大45Gでありこれ以上はない。しかしながら、この衝撃加速度は乗用車の衝突実験で記録される最大よりも大幅に大きい。NHTSAによれば普通乗用車における56km/hのフルラップ・バリア衝突では衝撃加速度はおよそ20G~30Gである。今回算出した最大の衝撃加速度は、隊列走行を組む手前20mでよければ追突した場合のものである。そこで車間距離と比較的影響の大きい衝突持続時間をパラメータとし、それ以外のパラメータは衝撃加速度が大きくなるように設定し、図5と表4にまとめた。

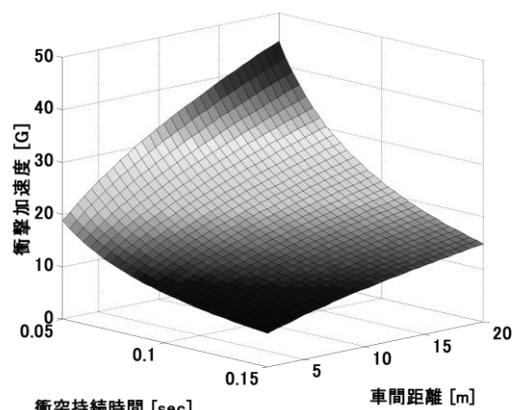


Fig.5 車間距離・衝突持続時間別衝撃加速度

Table.4車間距離・衝突持続時間別衝撃加速度

| 衝突持続時間[sec] | 0.15 | 0.10 | 0.05 |
|-------------|------|------|------|
| 車間距離 5m     | 8.3  | 12.5 | 25.0 |
| 車間距離 10m    | 11.0 | 16.4 | 32.9 |
| 車間距離 15m    | 13.1 | 19.6 | 39.2 |
| 車間距離 20m    | 14.9 | 22.3 | 46.0 |

単位：G

図5の車間距離・衝突持続時間別衝撃加速度から、車間距離5mでは乗用車の衝突実験で通常みられる30Gを超えていなく、最大で25Gである。通常の衝突持続時間の0.1secであれば12.5Gである。車間距離が10m以上になると衝突持続時間が0.05secの場合は衝撃加速度が大幅に高くなる。

## 6 乗員の安全性評価

乗員の安全性評価について、車両・乗員の衝突解析ソフトであるPC-Crash, MADYMOによりシミュレーション解析を行った。

衝突持続時間と車間距離別に車両の衝撃加速度を入力として乗員の速度と加速度を算出

し、頭部と頸部についての安全性評価指標として HIC と NIC を算出した。図 6 は各々の時系列データの一例を示す。車間距離 20m, 衝突持続時間 0.05sec, 先行車の重量が軽く後続車の重量が重い場合, 車両衝撃加速度は先行車が 46G, 後続車が 16G である。これを入力とした MADYMO の乗員の加速度・速度変化は衝突時間より少し遅れて挙動を示す。

HICは国内外で広く使用されているHIC36を使用し、式(7)に示す。表5は条件別のHICの値をまとめたものである。車両衝撃加速度が大きいほどHICスコアも大きくなるのが分かる。しかし、HICは36msの時間で積分しているため、瞬間的な最大衝撃加速度と衝突持続時間が長い場合に大きくなる傾向がある。国内法規の基準は1000以下であるが、最大の470は通常のNCAPで行われている衝突実験の値よりも非常に大きい。また、実際に隊列を想定している車間5mの場合は値が低い。

一方、NICは式(8)に示す乗員の頭部と頸部の速度差 $V_{rel}$ ・加速度差 $A_{rel}$ を使用し算出し、表6にまとめた。HIC同様、車両の衝撃加速度が大きいほどNIC値も大きくなる傾向にある。欧州では評価基準を $15m^2/s^2$ としているため、車間距離5mでは衝突持続時間により危険の度合いが大きく変化する。

$$HIC = (t_2 - t_1) \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{a(t)}{g} dt \right)^{2.5} \quad (7)$$

$$NIC(t) = 0.2 \times A_{rel}(t) + (V_{rel}(t))^2 \quad (8)$$

Table.5 条件別HICスコア

| 衝突持続時間[sec] | 0.15  | 0.1   | 0.05  |
|-------------|-------|-------|-------|
| 車間距離 5m     | 58.3  | 100.8 | 129.9 |
| 車間距離 10m    | 110.5 | 185.6 | 295.1 |
| 車間距離 15m    | 170.3 | 287.2 | 330.4 |
| 車間距離 20m    | 239.5 | 402.9 | 470.3 |

Table.6 条件別NIC[m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]

| 衝突持続時間[sec] | 0.15 | 0.1  | 0.05 |
|-------------|------|------|------|
| 車間距離 5m     | 12.4 | 21.7 | 31.9 |
| 車間距離 10m    | 19.0 | 35.5 | 48.6 |
| 車間距離 15m    | 26.2 | 36.7 | 60.5 |
| 車間距離 20m    | 34.6 | 42.9 | 71.5 |

## 7 まとめ

本研究では隊列走行車両の追突における車両解析・乗員解析を通して隊列走行の安全性の概要把握のため、車両の衝突パラメータを設定し、それらにより乗員の安全性は大きく左右され、乗員の傷害レベル推定結果を示した。今後初期条件等の影響について詳細な検討を行う必要がある。

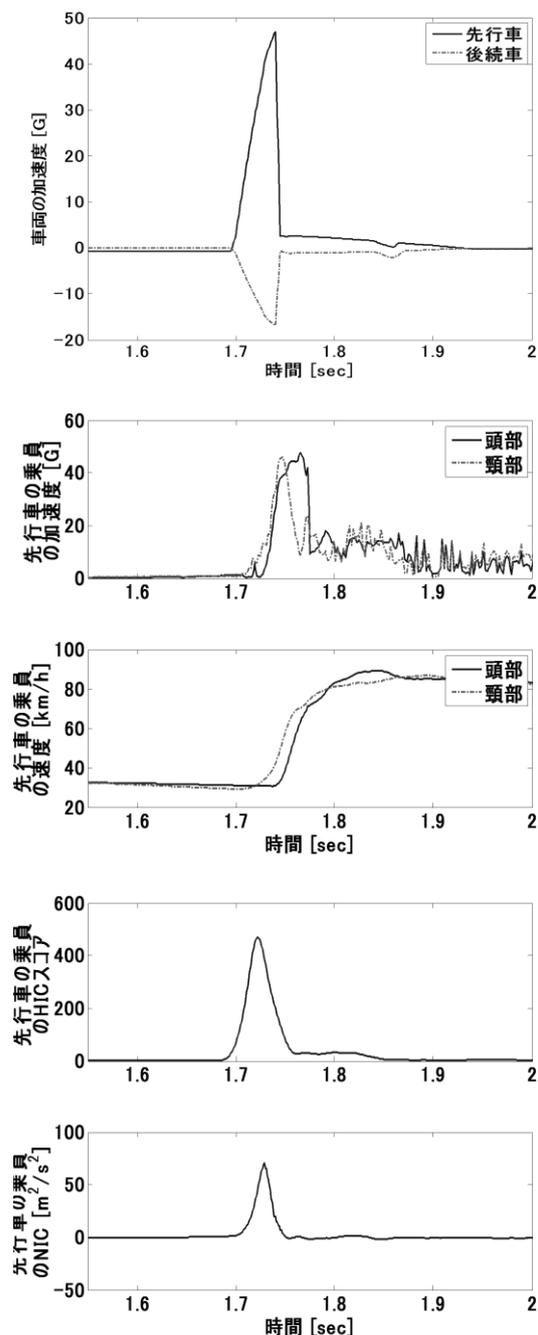


Fig.6 車両・乗員の時系列データ (車間距離20m, 衝突持続時間0.05sec)

- 1) 古川修, ITS に関する自動車の制御技術の現状と今後の課題, 計測と制御 第40巻 第3号, (2001)
- 2) 青木啓二, 森田康裕, 自動運転・隊列走行システムの開発(第1報)-エネルギーITS推進事業, 自動車技術会 2009 春季大会学術講演会前刷集, No20095509, (2009), p.1-4
- 3) Preliminary Evaluation of Advanced Air Bag Field Performance Using Event Data Recorders, NHTSA, DOT HS 811 015, (2008)
- 4) 大里進, 大型車の反発係数, 自動車研究, 第20巻 第5号, (1998), p.31-35
- 5) 石川博敏, 衝突時の車両運動に関する研究, 自動車研究, 第12巻 第10号, (1991), p.25-32