

## 2車線高速道路における追越挙動のモデル化

### Modeling of the Vehicle Passing Behavior in Two-lane expressways

稲垣 徹

指導教員：佐野可寸志・松本昌二・土屋哲

#### 1. はじめに

暫定2車線高速道路は、高速道路であっても一旦低速で走行する車の後ろにつけば利用者が期待する高速サービスが得られないという問題がある。この対策として、車線利用率の均等化を狙った追い越し車線（以下、付加車線）設置対策があり、現在、高速道路2車線区間では6~10km間隔で付加車線が設けられることとなっている。しかし、付加車線長などの構造を決定するにあたっての基本的な指針は取りまとめられておらず、現地での条件の範囲内で設置できる箇所に設置しているというのが実態である。

効率的な付加車線を設置する必要がある、そのためには、暫定2車線高速道路での車両挙動（自由走行時の挙動、追従・追い越し時の挙動）を把握する必要がある。特に、暫定2車線高速道路での車両挙動は、付加車線区間での車両挙動によって大きく変わると考えられるため、付加車線設置区間の車両挙動を把握することが重要である。本研究では、効率的な付加車線の設置を検討するため、ビデオ画像を用いて、暫定2車線高速道路における追い越し時の挙動をモデル化することを目的とする。

#### 2. 走行シミュレーションモデルの概要

暫定2車線高速道路では、前方車両の影響を受け、自由速度で走行できないときがある。このような走行状態を追従走行という。逆に、前方車両などの他の交通の影響を受けずに自由速度で走行できる状態を自由走行という。

本モデルでは、各車両に属性を与え、車両を発生させる。属性とは、発生時刻、車種、自由速度、加速度、減速度のことをいう。発生時刻、車種は乱数で与え、自由速度は車種による乱数を与える。加速度、減速度は自由速度の関数で与える。

##### (1) 暫定2車線区間での条件

暫定2車線区間での自由走行条件を図-1に、追従走行条件を図-2に示す。前方車両との車頭時間が2秒以上である場合、車両は自由走行する。前方車両との車頭時間が2秒になると、追従走行する。

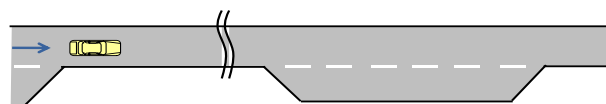


図-1 自由走行条件

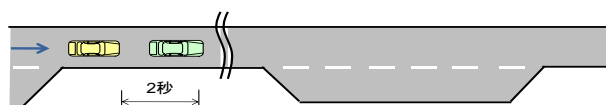


図-2 追従走行条件

##### (2) 付加車線区間での条件

車両は付加車線区間に流入すると、追い越し行動を行うことがある。付加車線区間での追い越し条件を以下に示す。

- ①前方車両との車頭時間=2秒(追従走行)
- ②自車車両の自由速度>前方車両の自由速度
- ③前方車両(車群)を付加車線区間内(L)で追い越せる
- ④付加車線に自車車両が入るスペースがある

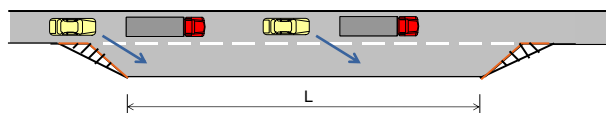


図-3 追い越し条件

車両は追従走行していなく、自由速度まで速度が達していない場合、加速度 $\alpha$ で加速する。

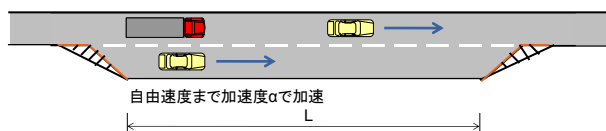


図-4 付加車線区間での車両挙動

付加車線へ車線変更を行った車両は、対象の車両を追い越したら走行車線に車線変更しなければならない(道路交通法20条)。走行車線への車線変更条件を以下に示す。

- ①対象車両(車群)を追い越したら走行車線に車線変更する
- ②付加車線区間終了時までには走行車線に車線変更する

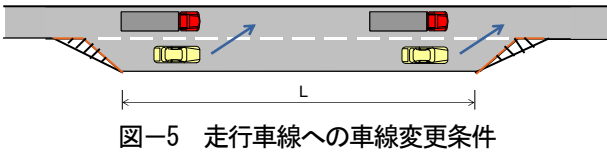


図-5 走行車線への車線変更条件

付加車線区間での追い越し行動には、導流帯を利用して追い越しをする車両が存在する。導流帯とは、車両の通行を安全かつ円滑に誘導するために設けられた道路上の帯状の部分のことをいう。導流帯を利用して追い越し行動を行う車両の追い越し距離は付加車線区間と導流帯区間の距離とする (L+L1+L2)。

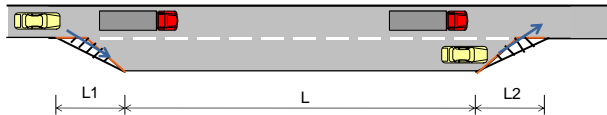


図-6 導流帯を利用した追い越し行動

### 3. ビデオ撮影調査概要

暫定 2 車線高速道路における車両挙動の実態を把握するため、付加車線区間のある磐越自動車道をビデオ撮影による実測調査を行った。調査日時は、平成 21 年 8 月 22 日 (土)、AM7:40~AM11:40 の 4 時間とした。また、調査後に、車間距離の測定、車両速度の補正が行えるよう実測車走行調査も行った。

調査地点は、磐越自動車道のkp144 (西会津IC付近) ~kp180 (阿賀町熊渡付近) とした。調査地点の広域図を図-7、詳細図を図-8に示す。a,b,j地点では、各車両の自由速度の調査を行い、c~i区間では、自由速度、車頭時間、加速度、車線変更に係る挙動の調査を行った。

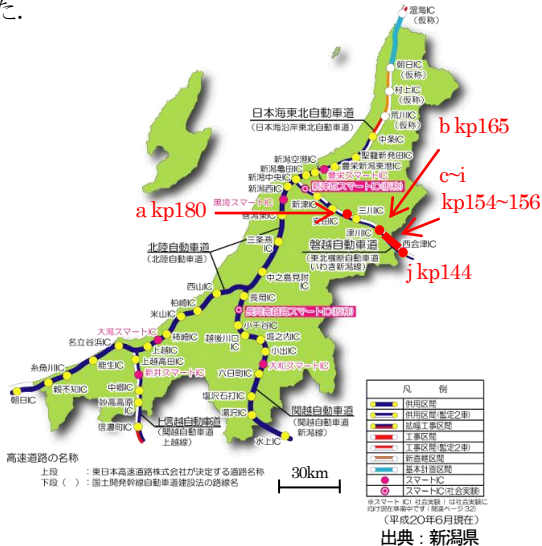


図-7 広域図

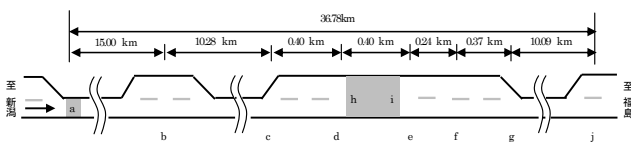


図-8 詳細図

### 4. ビデオ画像分析結果

車種の分類は小型車・大型車の 2 分類とし、高速道路料金車種区分から、小型車は軽自動車等及び普通車とし、大型車は中型車・大型車及び特大車とした。今回取得した交通量は、全車種で 2,245 台 (小型車 2,034 台・大型車 211 台)、大型車混入率は 9.4%であった。

今回の分析はデータの欠損が少ない 9:40~10:40 の 1 時間とし、交通量 650 台/h に対して有効なデータが得られたのは、595 台/h (91.5%) であった。また、分析で用いる自由速度は、c~g 区間の自由速度とした。車種別交通量を表-1に示す。

ビデオ画像分析では、実測調査から得られたデータを用いて、走行シミュレーションモデルに使用するパラメータを推定する。推定するパラメータは、車両の発生時刻分布、車種構成分布、自由速度分布、加速度、減速度、導流帯利用確率、車間距離である。

表-1 車種別交通量

	小型車	大型車	大型車混入率(%)
9:40~10:40	592	58	8.9

#### (1) 車両の発生時刻分布

本モデルではランダム到着を仮定しており、車両発生間隔にはアーラン分布を用いた。アーラン分布はガンマ分布から算出することができる。ガンマ分布は、式(1)で与えられる。

$$p(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \dots(1)$$

式(1)の  $\beta$  を式(2)とすると、式(3)となり、この分布を  $\alpha$  相アーラン分布という。

$$\beta = \frac{1}{\alpha \mu} \quad \dots(2)$$

$$p(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} (\alpha \mu)^{\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\alpha \mu x} \quad \dots(3)$$

$p(x)$ : 車両発生確率

$x$ : 車両発生間隔[s]

$$\left[ \begin{array}{l} \Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \\ \alpha \text{ が正の整数のとき、} \Gamma(\alpha) = (\alpha-1)! \end{array} \right]$$

c 地点 (付加車線開始地点) での車頭時間分布と c 地点での車頭時間分布から推定した車両発生確率を図-9に示す。車両の発生間隔は、c 地点の車頭時間分布を用いて、アーラン分布 ( $\alpha=1, \mu=0.6$ ) と推定し、実測値との誤差を減らすために車頭時間に 1 を加えた。実測

値との $\chi^2$ 値は2.48(自由度=10)であり、実測値と推定した車両発生確率の分布は相似しているといえる。また、車両の発生時刻には車両を分類する必要がないと考えられるため、車両の分類は行わないものとした。

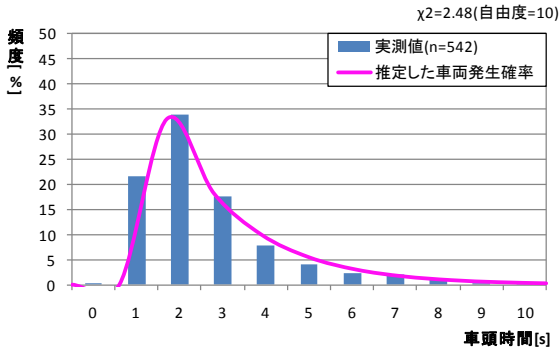


図-9 車両発生間隔

(2) 車種構成分布

車種は、小型車・大型車の2種類に分類することとし、それぞれの交通量を与えて一様分布により決定するものとした。

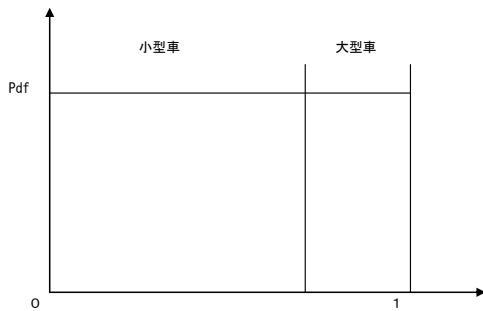


図-10 車種分布

(3) 自由速度分布

小型車の自由速度分布を図-11、大型車の自由速度分布を図-12に示す。自由速度分布は正規分布と推定し、c~g区間(付加車線区間)の実測値(小型車:平均100.8km/h,標準偏差12.3km/h,大型車:平均89.0km/h,標準偏差6.0km/h)を用いた。小型車の実測値との $\chi^2$ 値は0.09(自由度=18)、大型車の実測値との $\chi^2$ 値は0.38(自由度=18)であり、実測値と推定した正規分布は相似しているといえる。

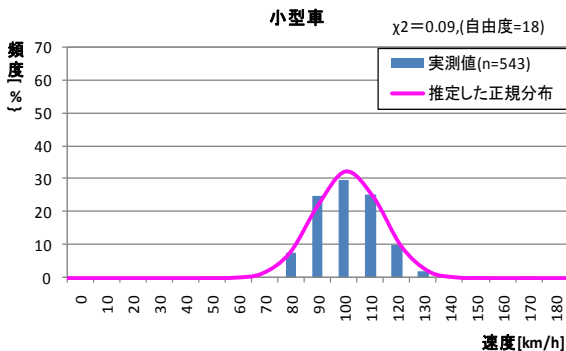


図-11 小型車の自由速度分布

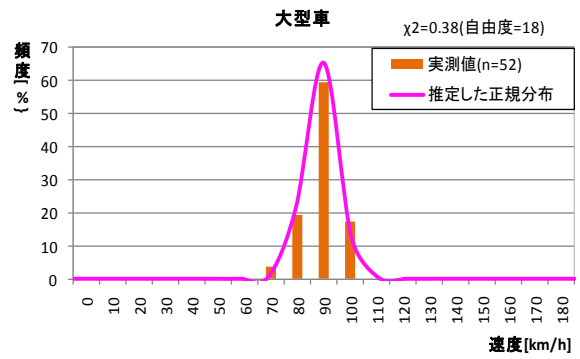


図-12 大型車の自由速度分布

(4) 加速度

小型車の加速度分布と推定した加速度を図-13、大型車の加速度分布と推定した加速度を図-14に示す。分析に用いた車両データは、付加車線区間(c~g区間)で追い越し行動を行った車両だけを抽出した。図-13、図-14は、付加車線区間を20mごとに細分化し、式(4)より求めた加速度で一番大きい値をプロットした。加速度は自由速度が速くなるにつれ、線形で上昇するものと仮定した。小型車の110km/h未満の加速度は $0.37\text{m/s}^2$ 、大型車の90km/h未満の加速度は $0.19\text{m/s}^2$ とした。

$$V^2 - V_0^2 = 2as \quad \dots(4)$$

V:終速度[m/s],  $V_0$ :初速度[m/s]

a:加速度[m/s<sup>2</sup>], s:変位[m]

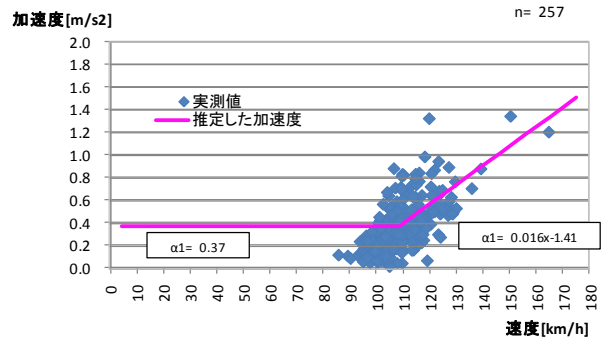


図-13 小型車の加速度

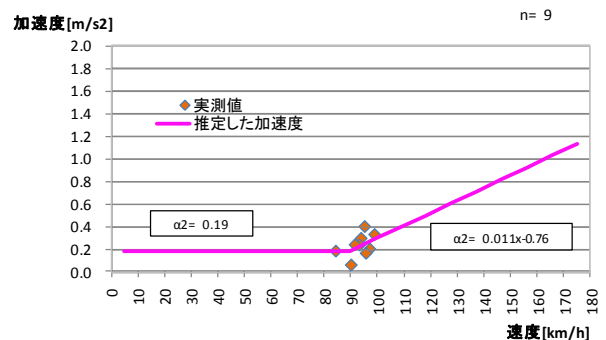


図-14 大型車の加速度

(5) 減速度

小型車の減速度分布と推定した減速度を図-15に示す。分析に用いた車両データは、付加車線区間(c~g区

間)で追い越し行動を行い、さらに減速を行った車両だけを抽出した。図-15は、付加車線区間を20mごとに細分化し、式(4)より求めた最小の加速度が0 m/s<sup>2</sup>以下であった場合、その値をプロットした。小型車の減速度の平均は0.40m/s<sup>2</sup>、大型車の減速度の平均は0.13m/s<sup>2</sup>であった。大型車の減速度は小型車の減速度の3分の1とした。減速度は自由速度が速くなるにつれ、線形で上昇するものと仮定した。小型車の110km/h未満の減速度は0.41m/s<sup>2</sup>、大型車の110km/h未満の減速度は0.14m/s<sup>2</sup>とした。

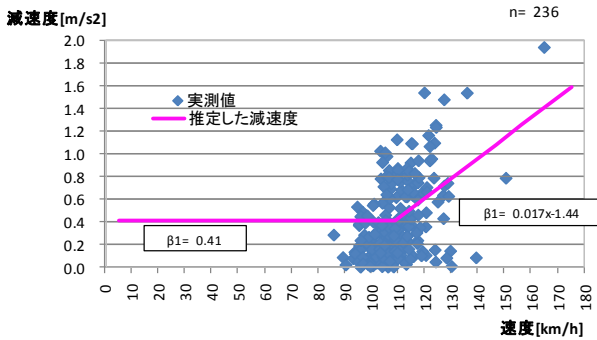


図-15 小型車の減速度

(6) 導流帯利用確率

導流帯利用確率は、まず、前方車両(車群)との相対速度を用いて、式(5)、式(6)から追い越し確率を算出する。追い越し確率の $\theta$ 、 $\alpha$ は実測値との誤差が最小になるように与え、 $\theta=0.16$ 、 $\alpha=17$ とした。導流帯利用確率も式(5)、式(6)から算出し、 $\theta$ 、 $\alpha$ は実測値との誤差が最小になるように与え、 $\theta=0.19$ 、 $\alpha=45$ とした。導流帯利用確率を図-16に示す。導流帯を利用して追い越し行動を行った大型車は調査から1台であったため、導流帯を利用して追い越し行動を行うのは小型車のみとした。

$$P = \frac{1}{1 + e^{\theta(x-\alpha)}} \quad \dots(5)$$

$$\sum_{i=1}^n \left( p_i - \frac{1}{1 + e^{\theta(x_i - \alpha)}} \right)^2 \quad \dots(6)$$

P:導流帯利用確率 (追い越し確率)  
x:相対速度[km/h]

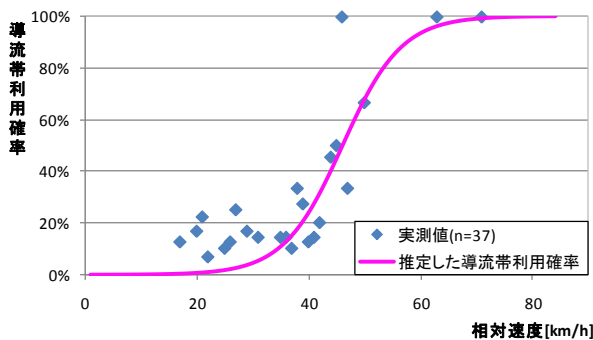


図-16 導流帯利用確率

(7) 車頭距離

車間距離(DBv)は式(7)から算出することができる。本モデルでは目標車頭時間を2秒とし、前方車両の車両長は0mと仮定する。車間距離は、前方車両との目標車頭時間を2秒とし、自由速度が速くなるにつれ車間距離が線形で上昇するものとする。目標車間距離は図-18で与える。

$$DBv = Xu - Lu \quad \dots(7)$$

Xu:前方車両の位置[m]

Lu:前方車両の車両長[m]

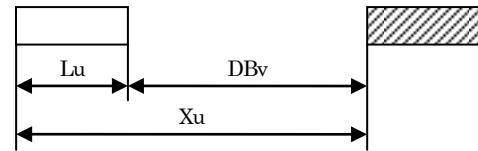


図-17 車間距離

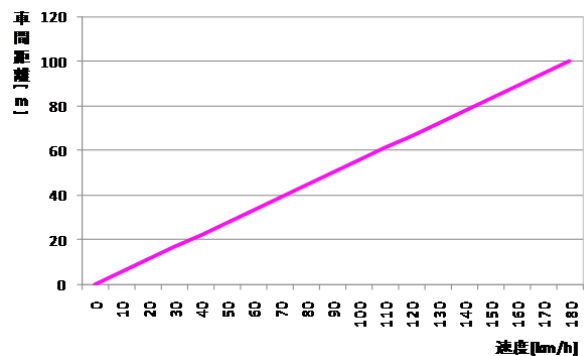


図-18 速度と車間距離の関係

5. モデルの検証

(1) 車群数の検証

車群数の検証に用いる走行区間を図-19に示す。車両を走行させる区間は、実測調査での付加車線区間(c~g区間)の前方の付加車線区間からの暫定2車線区間の距離(10km)とする。発生させる車両台数は595台、大型車混入率は実測調査から得た8.7%とした。試行回数は5回とした。

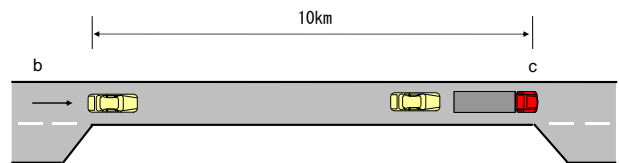


図-19 走行区間(車群数の検証)

車群数のシミュレーション平均値を図-20、実測値を図-21に示す。シミュレーション平均値と実測値との $\chi^2$ 値は1.74(自由度=8)であり、車群数の分布は相似しているといえる。

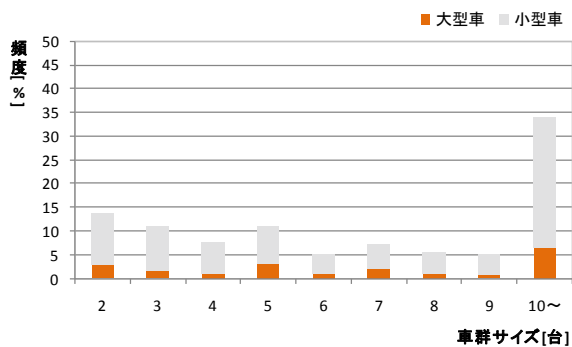


図-20 シミュレーション平均値

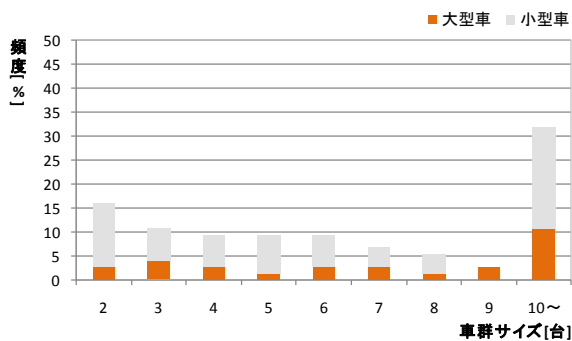


図-21 実測値

(2) 付加車線区間に関する検証

付加車線区間に関する検証では、所要時間・追い越し台数の検証を行う。所要時間・追い越し台数の検証に用いる走行区間を図-22に示す。走行区間は、実測調査での付加車線区間（c～g区間）と前方の付加車線区間からの距離（10km）とする。付加車線区間は1,400mであり、0～80m区間は導流帯設置区間、80～1,000mは付加車線区間、1,000～1,400m区間は導流帯設置区間である。発生させる車両台数は595台、大型車混入率は実測調査から得た8.7%とした。試行回数は5回とした。検証に用いるデータは、付加車線区間での所要時間・追い越し台数とした。

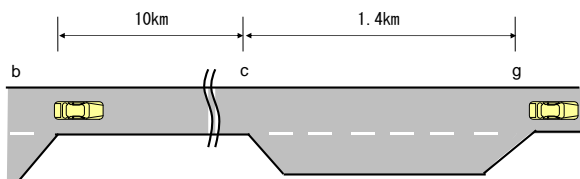


図-22 走行区間（付加車線区間に関する検証）

車種別の所要時間の検証結果を図-23に示す。平均所要時間は、実測値よりもシミュレーション平均値の方が小さくなった。これは、下り勾配が存在することで、所要時間が短くなったのだと考えられる。平均所要時間の小型車の標準誤差率は6.1%、大型車の標準誤差率は7.6%となり、再現性があるといえる。

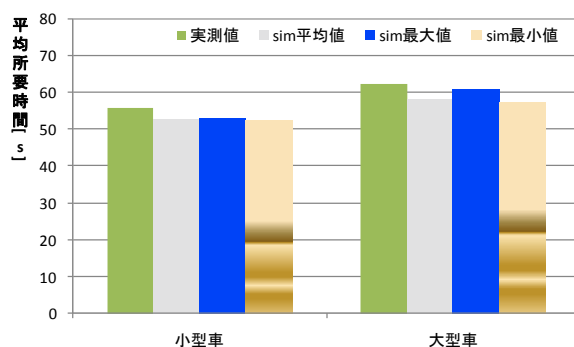


図-23 車種別平均所要時間の検証結果

車種別の追い越し台数の検証結果を図-24に示す。追い越し台数は、実測値よりもシミュレーション平均値の方が少なくなった。本モデルでは、安全性の観点から前方の車両との車頭時間を2秒以上としているため、付加車線区間開始時の車頭時間分布が実測値と異なり、追い越し台数が実測値よりも減ったのだと考えられる。小型車の追い越し台数の標準誤差率は6.1%となり、再現性があるといえる。大型車はサンプル数が少なく、追い越し台数の標準誤差率は82%と大きいものとなった。

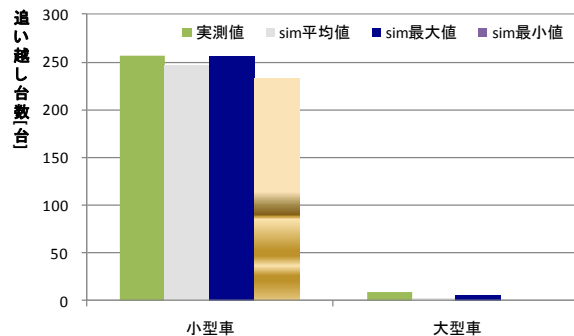


図-24 車種別追い越し台数の検証結果

6. 感度分析

(1) 追い越し台数に与える要因

構築した走行シミュレーションモデルのパラメータの値を変化させ、追い越し台数に与える影響を分析する。追い越し台数の感度分析では、平均速度、自由速度の標準偏差、大型車混入率、導流帯利用確率、加速度、減速度を±10%の範囲で変化させて行った。

分析結果を図-25に示す。変化させたすべてのパラメータが追い越し台数に感度を示し、追い越し台数に影響を与える要因は、変化させたすべてのパラメータであることがわかる。また、追い越し台数に影響を与える要因は1つのパラメータだけではないことがわかる。

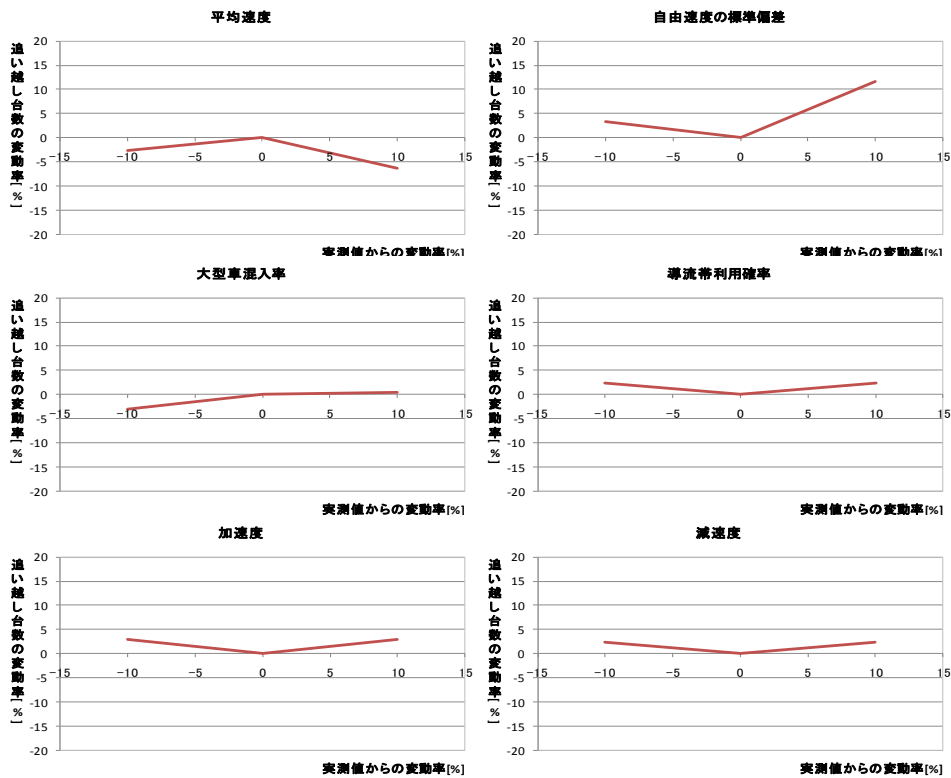


図-25 追い越し台数に影響を与える要因

## (2) 付加車線長の変化

付加車線長を変化させ、追い越し台数に与える影響を分析する。分析は、付加車線区間（導流帯含む）を-10%~50%の範囲で変化させるものとし、全区間の距離を2,100mとした。付加車線区間が2,100mに満たない場合は、残りの距離を暫定2車線区間と想定し分析を行った。付加車線長の変化が0%の時の走行区間は、0~80m区間は導流帯設置区間、80~1,000mは付加車線区間、1,000~1,400m区間は導流帯設置区間、1,400~2,100m区間は暫定2車線区間となる。

付加車線距離長の変化に対する追い越し台数の分析結果を図-26に示す。付加車線区間を50%延伸すると追い越し台数が5.1%多くなることわかる。また、今回の交通量では、付加車線長を20%変化させるまでの追い越し台数の変動率が著しものとなった。今回の交通量（595台、大型車混入率8.7%）であると、付加車線長を20%延伸するのが最も効果的であることがわかる。

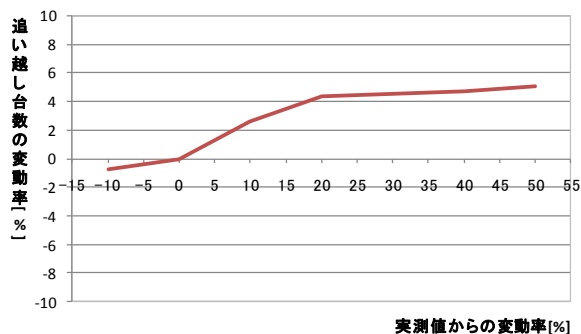


図-26 付加車線長の変化に対する感度

## 7. まとめ

実測調査から車両の発生間隔は、アーラン分布に近似できることがわかった。また、導流帯を利用して追い越し行動を行う車両が存在することがわかった。

モデルの検証から、車群数、平均所要時間、小型車の追い越し台数に再現性があることが確認でき、小型車の2車線高速道路における追い越し挙動は再現されているといえる。

感度分析から付加車線長を延伸すると、追い越し台数の増加がみられることがわかった。また、今回の交通量（595台、大型車混入率8.7%）であると、現在の付加車線長を20%延伸するのが最も効果的であった。

## 参考文献

- 1) 樋山沙央里：追越行動を考慮した高規格2車線高速道路における付加車線設置に関する研究，卒業論文，2006
- 2) 松原克浩：暫定2車線高速道路における車両挙動の分析，修士論文，2009
- 3) 吉川良一ほか：暫定2車線高速道路のボトルネック交通容量に関する研究，交通工学，Vol. 43, No. 5, 2008
- 4) 花房比佐友ほか：高速道路サグ部におけるAHS円滑化サービス評価運用用交通シミュレータの開発，第4回ITSシンポジウム，2005