

# 自動車の燃費計算を反映した交通流シミュレーション による超小型車の最高速度に関する研究

水嶋 教文<sup>1</sup>・工藤 希<sup>2</sup>・新国 哲也<sup>3</sup>・大野 寛之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>非会員 (独)交通安全環境研究所 環境研究領域 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7-42-27)  
E-mail: mizusima@ntsel.go.jp

<sup>2</sup>非会員 (独)交通安全環境研究所 交通システム研究領域 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7-42-27)  
E-mail: n-kudo@ntsel.go.jp

<sup>3</sup>非会員 (独)交通安全環境研究所 環境研究領域 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7-42-27)  
E-mail: niikuni@ntsel.go.jp

<sup>4</sup>非会員 (独)交通安全環境研究所 交通システム研究領域 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7-42-27)  
E-mail: ohno@ntsel.go.jp

運輸部門における省エネルギー、温室効果ガス排出量の削減、あるいは高齢者のモビリティ確保を狙いとして、乗車定員1~2人程度の超小型車が注目されている。本研究では、超小型車の衝突時における被害の軽減、および交通流悪化の抑制を両立可能な超小型車の最高速度について、自動車の燃費計算を反映した交通流シミュレーションにより検討した。この結果、超小型車の最高速度を30 km/hに設定した場合、超小型車の導入率の増大に応じて他の自動車の交通流を悪化させ、最高速度を20 km/hまで低下させると、他の自動車の燃費も悪化させる結果となった。これらの結果から、衝突時の被害を軽減する目的で超小型車の最高速度を他の自動車とは別に設ける場合でも、当該速度を40 km/h程度に設定することで、交通流および他の自動車の燃費を悪化させずに、従来の交通環境下に超小型車を導入できることが示された。

**Key Words :** *mobility, ultra compact vehicle, traffic flow simulation, fuel consumption, CO<sub>2</sub> emission*

## 1. はじめに

日本国内における乗用車は一般的に4~7人ほどの輸送能力を有するものの、実際の利用形態としては平均乗車人数が1.3人と少なく、公共交通機関と比較してエネルギー効率が極めて低い。運輸部門における温室効果ガス排出量を削減するためには、ユーザは公共交通機関の積極的な利用に加え、低炭素な移動手段を選択しなければならない。しかしながら公共交通が十分に整備されていない地域において、自家用乗用車は移動手段として不可欠である。特に少子高齢化社会を迎える日本では、高齢者にやさしいモビリティ<sup>1)</sup>の確保が急務である。

このような中、国土交通省は平成24年5月に超小型車の認定制度を導入することを発表した。超小型車とは、道路運送車両法で定める軽自動車と第一種原動機付自転車の間に位置付けられ、図-1に示すような2人乗り程度の小型の車両のことをいう。しかしながら、超小型車の導入に向けては多くの課題がある。その一つが、衝突時における安全性の確保である。衝突安全性を確保するた

めに車両を強固に設計すると車両重量が増大するため、本来有する超小型車の利点が損なわれてしまう。

そこで本研究では、超小型車の衝突時における被害を軽減することを狙いとして最高速度の抑制に着目した。本報では、新たに自動車の燃料消費量、CO<sub>2</sub>排出量等の詳細な計算方法を反映した交通流シミュレーションを用いることで、超小型車に設けられた最高速度が、従来の交通環境下における交通流に及ぼす影響を解析し、これに伴う平均速度、旅行時間、燃料消費量、およびCO<sub>2</sub>排出量への影響を評価したので報告する。



図-1 超小型車の例(東京モーターショー2011 より)

## 2. 交通流シミュレーション方法

交通流シミュレーションは大きく二つに大別できる．一つは、交通流を流体と見立てて解析するマクロシミュレーション、もう一つは、車両一台一台の挙動を模擬するミクロシミュレーションである．前者は流体モデルとも呼ばれ、ある一定のエリア内の道路網など比較的広い範囲を対象とし、バイパス道路等を建設する際の交通流の変化をおおまかに把握する目的で活用される．後者は離散モデルとも呼ばれ、信号のタイミングやレーンの変更など、局所的に交通設備を変更した際の周辺道路の交通流の変化を予測する目的で活用される．

本研究においては、旅客輸送の一部を従来の乗用車から超小型車に置き換えた際の交通流への影響を評価する目的から、交通安全環境研究所が開発した都市交通シミュレータ<sup>2)</sup>を活用し、離散モデルにて取り扱った．以下に、本研究で重要となるシミュレーション方法について記述する．

### (1) 自動車走行モデル

自動車の走行は、前方に車両が存在する場合と存在しない場合で加速度および速度の計算方法が異なる．図-2にそのイメージを示す．前方に車両が存在しない場合(5 s後に前方車両に到達しない場合)は、以下の式(1)に示すように自動車に設定された最大加速度 $\alpha_{max}$  [m/s<sup>2</sup>]から速度を算出し、走行挙動を計算した<sup>3)</sup>．前方が赤信号かつ最大減速度で停車可能な場合は、式(1)の最大加速度 $\alpha_{max}$  [m/s<sup>2</sup>]を最大減速度 $\beta_{max}$  [m/s<sup>2</sup>]として取り扱えばよい．

$$V_t = V_{t-dt} + \alpha_{max} \times dt \quad (1)$$

ここで、 $t$ は現在時刻[s]、 $V_t$ は時刻 $t$ における速度[m/s]、 $dt$ はタイムステップ[s]、 $V_{t-dt}$ は $dt$ 秒前の速度[m/s]、 $\alpha_{max}$ は最大加速度[m/s<sup>2</sup>]である．

一方、前方に車両が存在する場合(5 s後に前方車両に到達する場合)は以下の式(2)に示す追従モデルから加速度を、式(3)かたより速度を求めた．

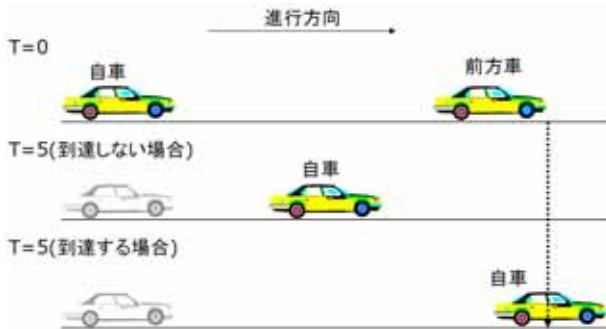


図-2 前方車両有無のイメージ

$$\alpha = \lambda \frac{V_{i+1}^m(t)}{\{X_i(t-dt) - X_{i+1}(t-dt)\}^l} (V_i(t-dt) - V_{i+1}(t-dt)) \quad (2)$$

$$V_t = V_{t-dt} + \alpha \times dt \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$ は加減速度[m/s<sup>2</sup>]、 $i$ は1台前方の車両ID、 $i+1$ は自車のID、 $V$ は速度[m/s]、 $X$ は位置[m]、 $\lambda$ は定数、 $l, m$ は速度 - 密度曲線の特徴を表す係数である．以上で算出した速度を用いることで、各車両の走行制御を行うモデルとした．

また、車線が複数存在する場合は、状況に応じ車線変更を行うモデルを導入した(付録参照)．

### (2) 燃料消費量、電力消費量の計算方法

超小型車導入の狙いの一つである温室効果ガス排出量の削減について、その効果を定量的に評価するためには、燃料消費量、または電力消費量を精度よく見積もる必要がある．これらを精度よく見積もることができれば、超小型車の導入によるCO<sub>2</sub>排出量削減効果を定量的に予測することが可能となる．本節では、本シミュレーションに新たに反映した燃料消費量、および電力消費量の計算モデルについて詳細を記述する．

自動車のタイヤが路面になす仕事率 $P$  [W]は、以下に示す式(4)で説明され、式(4)に示した仕事率 $P$  [kW]を時間で積分することによって、走行に必要な仕事量を計算することができる．

$$P = \frac{F \cdot dx/dt}{1000} = \frac{F \cdot V}{1000} \quad (4)$$

ここで、 $F$ は走行に必要な駆動力[N]、 $dx$ は距離の変化量[m]、 $dt$ は時間の変化量[s]である．

上記の走行に必要な駆動力 $F$  [N]は、以下に示す運動方程式(5)で表される．

$$F = R_r + R_l + R_s + R_a \quad (5)$$

ただし、 $R_r$ は転がり抵抗[N]、 $R_l$ は空気抵抗[N]、 $R_s$ は登坂抵抗[N]、 $R_a$ は加速抵抗[N]であり、以下の式により算出される．

$$R_r = \mu_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta \quad (6)$$

$$R_l = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot V^2 \quad (7)$$

$$R_s = m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (8)$$

$$R_a = (m + \Delta m) \cdot \alpha \quad (9)$$

ここで、 $\mu_r$ は転がり抵抗係数、 $m$ は車両重量[kg]、 $g$ は重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $\theta$ は道路勾配[rad]、 $\rho$ 空気密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $C_d$ は空気抵抗係数、 $A$ 車両前面投影面積[m<sup>2</sup>]、 $\Delta m$ は回転部分相当重量[kg]である．

つまり、道路勾配を0 rad (平坦路)と仮定すると、自動車の走行に必要な仕事量は速度 $V$  [m/s]と加速度 $\alpha$  [m/s<sup>2</sup>]の関数となる。以上は、自動車のタイヤが路面に対してなす仕事量の算出過程であるが、図-3に示すように、これに対して自動車の駆動系の伝達効率および原動機の効率で除することで、使用した燃料消費量や電力消費量を算出することが可能である。一方、本研究で用いた交通流シミュレーションでは、前述したとおり自動車一台一台の走行挙動を計算している。つまり個別の車両に対して、発生から消滅に至るまでの瞬時の速度および加速度が算出される。

以上より、本シミュレーションの燃料消費量および電力消費量の計算は、車種ごとに用意した速度と加速度に対応する瞬時燃料消費量または瞬時電力消費量のテーブルを参照し、それを時間で積分することで、発生から消滅に至るまでに消費した燃料あるいは電力の消費量を計算するモデルとした。以下に、瞬時燃料消費量または電力消費量参照テーブルの入力値の算出方法を示す。

#### a) ガソリン自動車の瞬時燃料消費量計算方法

ガソリン自動車に対しては、代表的なエンジンの効率データから精度の高い燃料消費量を算出する方法とした。具体的な方法を以下に記述する。

任意の速度 $V$  [m/s]、加速度 $\alpha$  [m/s<sup>2</sup>]に対して式(4)~(9)に示した方法で、自動車のタイヤが路面になす仕事率 $P$  [kW]を算出する。これに対してさらに式(10)よりエンジン出力 $P_e$  [kW]を算出する。

$$P_e = \frac{P}{\eta_d} \quad (10)$$

ここで、 $\eta_d$  は駆動系伝達効率であり、発進時にはトルクコンバータの伝達効率も考慮に入れた。次に、以下の式(11)に用いることで、速度 $V$ 、加速度 $\alpha$ に対する瞬時燃料消費率 $\dot{c}_{V\alpha}$  [L/s]を算出する。

$$\dot{c}_{V\alpha} = \frac{P_e}{\eta_{th} \cdot d_{fe}} \quad (11)$$

ここで、 $\eta_{th}$  はエンジン熱効率、 $d_{fe}$  は燃料エネルギー密度[kJ/L]である。

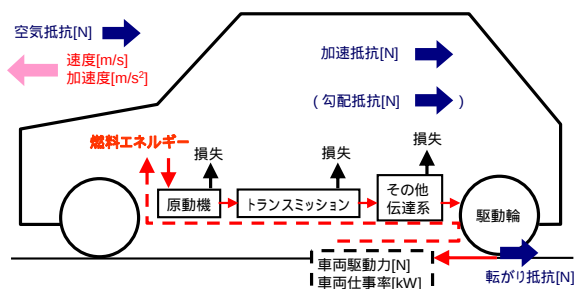
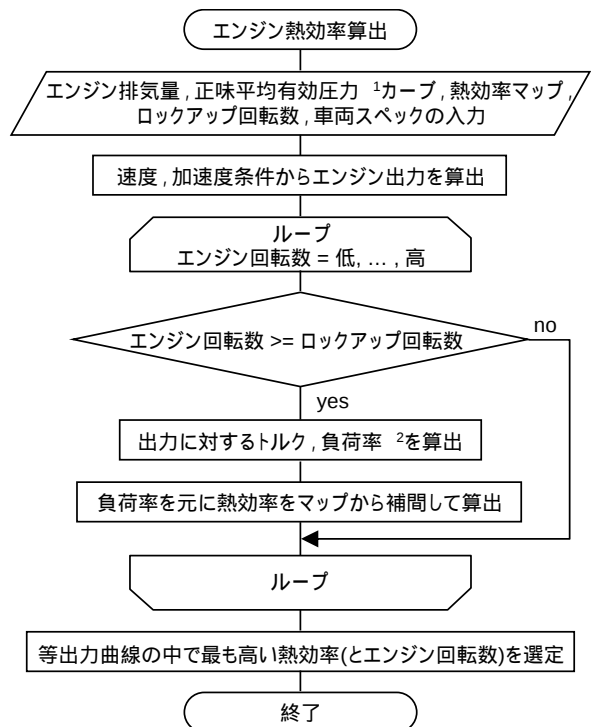


図-3 走行抵抗からの燃料消費量算出方法

なお、エンジン熱効率は機種や運転条件(エンジン回転数 - 負荷率)によって異なる値となる。より高精度な瞬時燃料消費量の計算を行うためには、運転条件(エンジン回転数 - 負荷率)に応じて熱効率を変化させる必要がある。そこで、瞬時燃料消費量参照値の計算においては、エンジンの回転数 - 負荷率に対する熱効率の実測値を元に厳密に算出した。

使用したエンジンの熱効率の実測値は、排気量1997 cm<sup>3</sup>の直列4気筒ガソリンエンジン(日産自動車製、型式MR20DE、2008年式)のものであり、乗用車用エンジンとしては一般的な仕様のものである。本計算では、普通車(乗用車)と超小型車といった複数の車種の燃料消費量を、同一エンジンでの熱効率実測値を元に算出した。図-4に、式(11)に用いるエンジン熱効率を算出するためのフローチャートを示す。近年の日本国内におけるガソリン自動車(乗用車)はトランスミッションにCVT (Continuously Variable Transmission)を搭載しているものが多く、常にエンジンを熱効率の高い回転数で運転することが可能となっている。このため、エンジン熱効率の算出においてはトランスミッションのギア比を自在に選定できるものと仮定し、エンジンの等出力条件において最も熱効率が高くなる回転数 - トルク条件を選定し、そのときの熱効率の値を使用した。

また、近年のガソリン自動車は減速時のエンジンに出力が要求されない条件では燃料噴射を止める(燃料カットを行う)といった燃費向上技術が導入されている例が



- 1 トルクをエンジン排気量で除することで、一般化した値
- 2 全負荷トルクに対する負荷割合

図-4 ガソリン自動車のエンジン熱効率算出方法

多い。このため、燃料カット実施車速(10 km/h程度)を定めることで、当該車速以上の速度で減速する際には燃料消費量を0、それ以外はアイドル時の燃料消費量とした。

#### b) ディーゼル自動車の瞬時燃料消費量計算方法

ディーゼル自動車に対しても、ガソリン自動車と同様に式(10)、(11)および代表的なエンジンの熱効率実測値を用いて精度の高い燃料消費量を算出する。ただし、エンジン熱効率の算出方法がガソリン自動車の場合と異なる。ガソリン自動車と異なる点は、貨物車を想定していることからトランスミッションをマニュアルトランスミッション(MT)としたことである。MTの場合、シフト位置によってエンジン回転数およびエンジントルクが決定されるため、トランスミッションとしてCVTを想定したガソリン自動車(乗用車)と同じエンジン熱効率算出方法は適用できない。そこで、図-5のフローチャートに示した方法でMTを想定したディーゼル自動車のエンジン熱効率を算出した。使用したエンジン熱効率の実測値は、排気量4009 cm<sup>3</sup>の直列4気筒ターボ過給ディーゼルエンジン(日野自動車製、型式N04C-TA、2004年式)のものであり、一般的な小型貨物自動車に搭載されているエンジンである。エンジン熱効率マップから熱効率を決定するためには、そのときのエンジン回転数およびトルク(負荷率)を算出する必要がある。MTの場合、エンジン回転数およびトルクはギア位置によって異なるため、速度、加速度

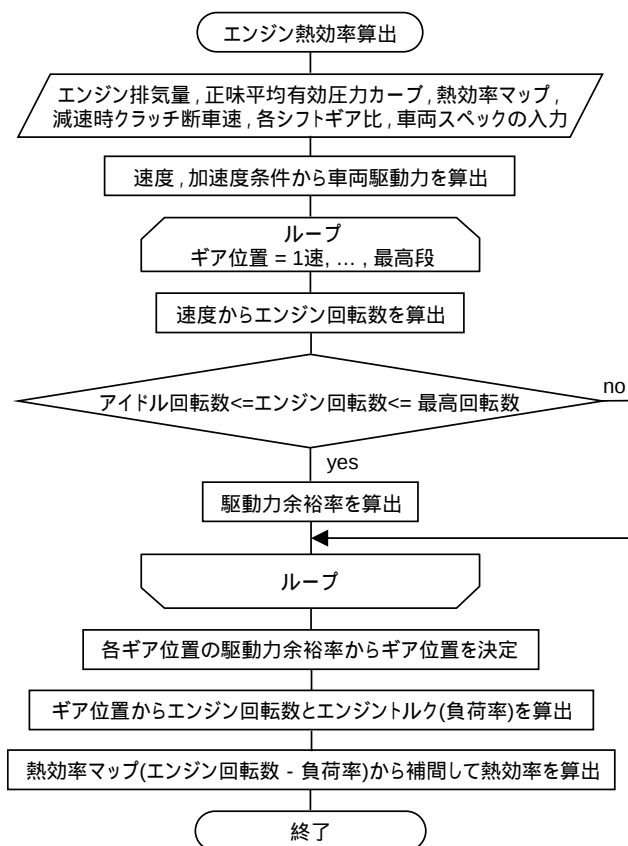


図-5 ディーゼル自動車のエンジン熱効率算出方法

条件に応じてギア位置を決定しなければならない。このため、各ギア位置における駆動力余裕率(= 最大駆動力 / 必要駆動力)を算出し、文献<sup>4)</sup>と同様の方法でギア比を選定した。

また、減速時にエンジン出力が負となる場合は、ガソリン自動車と同様に燃料カットを導入した。

#### c) 電気自動車の瞬時電力消費量計算方法

電気自動車の瞬時電力消費量計算方法も、ガソリン自動車およびディーゼル自動車の瞬時燃料消費量計算方法と基本的な考え方は同じである。異なる点は、原動機であるモータからドライブトレインに動力を伝える際にCVTやMTといったトランスミッションを介す必要がないことである。

式(12)にタイヤが路面になす仕事率 $P$  [kW]からモータ出力 $P_m$  [kW]を算出する式を、式(13)にモータ出力 $P_m$  [kW]から速度 $V$ 、加速度 $\alpha$ に対する瞬時電力消費量 $ec_{va}$  [kWh/s]を算出する式を示す。

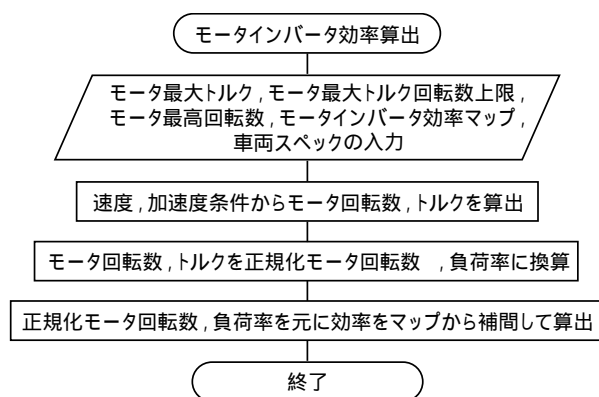
$$P_m = \frac{P}{\eta_d} \quad (12)$$

$$ec_{va} = \frac{P_m}{\eta_{mi} \times 3600} \quad (13)$$

ここで、 $\eta_{mi}$ はモータインバータ効率である。

モータインバータ効率は、モータ効率とインバータ効率を掛け合わせたもので、機種や運転条件(モータ回転数 - 負荷率)によって異なる値となる。電気自動車においてもより高精度な瞬時電力消費量の計算を行うため、実測値を元に運転条件(モータ回転数 - 負荷率)に応じて効率を変化させた。

図-6に計算のフローチャートを示す。使用したモータインバータ効率の実測値は、最大トルク290 Nm、最大出力 100 kW、最高回転数8000 rpmのもの(澤藤電機製、型式YZ901-M1、2006年式)である。様々な出力のモータインバータに対して本実測値を活用できるよう、モータ



モータ最大トルク回転数上限を100%としたときの回転数の割合

図-6 電気自動車のモータインバータ効率算出方法

インバータ効率測定時の回転数およびトルクを無次元化した。具体的には、モータの回転数 - トルクに対して、正規化モータ回転数 - 負荷率といった指標を定義した。本指標を導入することで、最高出力が異なるモータを適用した際においても、これらの値を無次元化することで本効率実測値を使用できるようにした。

また、電気自動車の場合、減速時にはモータで回生することで車両の運動エネルギーをバッテリーに充電することが可能である。通常は、安全性の確保や急ブレーキへの対応のため、回生ブレーキと機械ブレーキを併用している。本計算においては、減速時の回生ブレーキと機械ブレーキの分担率(全ブレーキ力に対する回生ブレーキの割合)を定義し、回生ブレーキ性能を任意に変更できる方法とした。

図-7に、ガソリン自動車、ディーゼル自動車、電気自動車の瞬時燃料消費量あるいは瞬時電力消費量の算出に用いた原動機の効率データを示す。

### (3) CO<sub>2</sub>排出量計算方法

本交通流シミュレーションにおける燃料消費量および電力消費量の計算結果から、CO<sub>2</sub> 排出量を算出するためには、ガソリン、軽油、および電力に対してCO<sub>2</sub> 排出係数を定義する必要がある。本検討においては、環境省が定めるCO<sub>2</sub> 排出係数<sup>5), 6)</sup>を使用し、以下のように定めた。ただし、電力については平成24年1月に公表された平成22年度の値であり、総合エネルギー統計における外部発電(卸電気事業者供給分)と自家用発電(自家消費分及び電気事業者への供給分を合計した排出係数の直近5ヵ年平均を算出した代替値を使用した。

ガソリン： 2.322 kg/L  
 軽油： 2.624 kg/L  
 電力： 0.559 kg/kWh (平成22年度代替値)

### (4) 交通流シミュレーションの対象地域

本検討においては、実在する地域の地図データを対象

にシミュレーションを実施した。想定されている超小型車の利活用場面の一つに観光地の周遊があげられていることから<sup>7)</sup>、日本国内の観光地として最も人気の高い京都市を対象とした。対象地域の詳細を図-8に示す(赤枠部分)。本対象地域は、南北に走る堀川通(片側2~4車線)と烏丸通(片側2~3車線)、および北部エリアを東西に走る今出川通(片側2車線)を中心とした領域である。同図に示すとおり、対象とした地域には京都の観光名所として代表的な金閣寺、銀閣寺、二条城、京都御所を含んでいる。また、京福電鉄北野白梅町駅で鉄道に乗り換えることで、嵐山までも観光することが可能である。このような地域を対象とすることで、観光地の周遊としてより現実的な評価を可能とした。図9に、本シミュレーションにおいて自動車の走行領域とした主要道路の制限速度を示す。同図より、堀川通、烏丸通、今出川通を中心として概ね制限速度は50 km/hであり、周辺で一部、制限速度が40 km/h、30 km/hの道路を含んでいる。

地図データは、住宅地図にはゼンリンZmap Town II (2006年)を、道路地図には(財)日本デジタル道路地図協会の「デジタル道路地図データベース」を使用した。



図-8 シミュレーションの対象地域詳細(京都市)

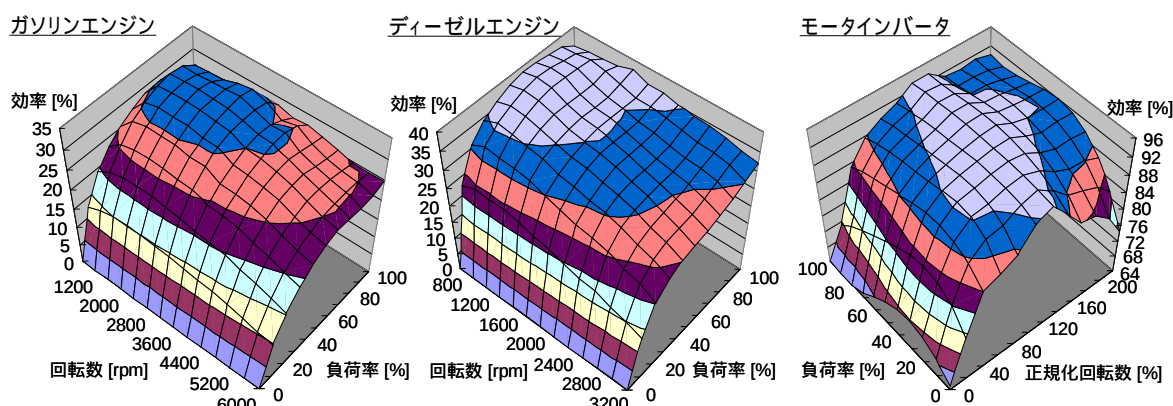


図-7 瞬時燃料・電力消費量の算出に使用した各種原動機の効率データ



図-9 シミュレーション対象道路の制限速度

#### (5) 交通量および信号機の設定

設定した交通量データは、平成16年12月3日(金)に調査を実施した今出川通近辺の交通量調査データおよび平成17年11月30日(水)に調査を実施した堀川通および烏丸通近辺の交通量調査データである。いずれのデータとも平日の通勤ラッシュ時を対象に、午前7時から8時の1時間において調査したデータである。また、これら交通量調査データを補完する目的で、平成17年度交通センサデータも使用した。

以上で設定した交通量となるよう各発生ノードで自動車が発生するが、その発生時刻や車種の発生順序は乱数によりランダムに与えた。シミュレーション中の車両総走行台数は約26000台である。

各信号機のサイクルについても同時期に調査したデータに基づいて設定した。ただし、各信号機間における位相差は任意に決定した。

#### (6) 車種の設定

本検討においては、ある一定の割合で超小型車、普通車(乗用車)、大型車(貨物車)、バスが混在した条件下においてシミュレーションを実行した。普通車(乗用車)および大型車(貨物車)に対しては、交通量調査データおよび交通センサデータを元に台数を決定したが、超小型車に対しては普通車からの転換率を0%、1%、5%、10%、20%、50%とすることで台数を決定した。また、バスは実際の運行スケジュールに合わせて走行させた。

表-1に、想定した各車両の仕様を示す。これらの仕様は渋滞長などの解析結果や燃料消費量の計算結果にも影響を及ぼす因子となる。表中において「-」記号で記している箇所は、今回の燃料消費量または電力消費量の計算モデルにおいて不要な項目であり、網掛け箇所は車両として該当しない項目であるため、記述していない。

表-1 各種車両の仕様

| 車両区分                          | 超小型車  | 普通車<br>(乗用車) | 大型車<br>(貨物車) | バス      |
|-------------------------------|-------|--------------|--------------|---------|
| 原動機区分                         | ガソリン  | 電気           | ガソリン         | ディーゼル   |
| 全長[m]                         | 2,500 | 2,500        | 4,610        | 6,510   |
| 全幅[m]                         | 1,300 | 1,300        | 1,695        | 2,185   |
| 重量[kg]                        | 470   | 470          | 1,345        | 4,660   |
| 乗員(55kg)[人]                   | 2     | 2            | 2            | 1       |
| エンジン排気量                       | 250   |              | 1,997        | 4,009   |
| モータ<br>最高出力[kW]<br>/最大トルク[kW] |       | 12 / 57      |              |         |
| 動力伝達装置                        | CVT   | -            | CVT          | MT      |
| ギア比                           |       |              |              |         |
| 1速                            |       |              | 5.979        | 3.487   |
| 2速                            |       |              | 3.434        | 1.864   |
| 3速                            |       | -            | 1.862        | 1.409   |
| 4速                            |       |              | 1.297        | 1.000   |
| 5速                            |       |              | 1.000        | 0.750   |
| 6速                            |       |              | 0.759        | 0.652   |
| 最終減速比                         | -     | 13.4         | -            | 4.1     |
| タイヤ直径[m]                      | -     | 0.466        | -            | 0.726   |
| 転がり抵抗係数                       | 0.01  | 0.01         | 0.01         | 0.00886 |
| 空気抵抗係数                        | 0.362 | 0.362        | 0.362        | 0.6146  |

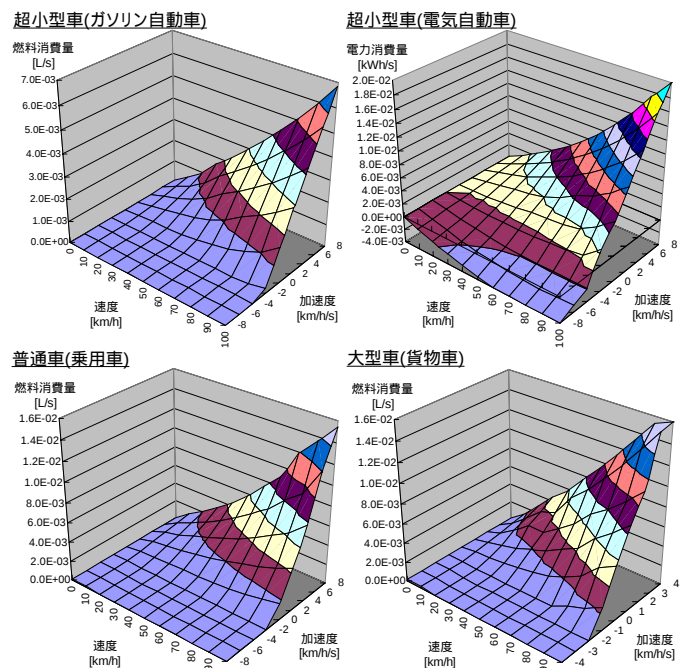


図-10 交通流シミュレーションで使った瞬時燃料消費量および瞬時電力消費量

実社会においては様々な車種が混在しているため、例えば普通車といっても仕様が一通りに定まることはない。しかしながら、本シミュレーションにおいては簡易化のため代表的な仕様を与えることで各車両区分における仕様を一通りに定めた。

なお、以下の仕様で計算した瞬時燃料消費量および瞬時電力消費量参照値の結果を図-10に示す。

#### a) 超小型車の仕様

超小型車については、全長および全幅を原動機付自転車(4輪)、いわゆるミニカーの規格で定められている最大寸法とした。また、車両重量、電気自動車の場合のモータ仕様、最終減速比、およびタイヤ直径については、国土交通省が平成23年度に実施した実証実験「環境対応車を活用したまちづくりに関する実証実験」において使用された2人乗り超小型車(日産自動車製、ニューモビリティコンセプト)の仕様と同一とした。また、ガソリンエンジンの場合の排気量は、国土交通省が平成22年度に実施した「超小型モビリティの仕様における要件に関する技術検討業務」<sup>8)</sup>において得られた成果を参考に、250 cm<sup>3</sup>と定めた。

#### b) 普通車(乗用車)の仕様

普通車(乗用車)は最も多くの台数が走行している車両区分であることから、前提条件を厳密に定める必要がある。ガソリン自動車における全長および全幅は、最も台数の多い5ナンバー規格に近い条件とするため、5人乗りセダントタイプの乗用車(日産自動車製、シルフィ、型式DBA-KG11)と同一にした。転がり抵抗係数および空気抵抗係数も同一の車両で得られたものを使用し、瞬時燃料消費量の計算を行った。また、ガソリン自動車の車両重量は、環境省の統計データ<sup>9)</sup>から得られる車両重量平均値(1345 kg)を使用した。エンジン排気量は、「超小型モビリティの仕様における要件に関する技術検討業務」<sup>8)</sup>で得られた車両重量と排気量の関係を元に、1345 kgの車両重量に対して一般的な約2000 cm<sup>3</sup>の排気量とした。

#### c) 大型車(貨物車)およびバスの仕様

大型車(貨物車)およびバスについては、それぞれ走行台数が少ないことから(全車両の1割程度)、一般的な車両を選定した。大型車(貨物車)には小型トラック(日野自動車製、デュトロ、型式BKG-XZU414)を、バスには大型路線バス(三菱ふそうトラック・バス製、エアロスター、型式LKG-MP37FKF)を選定し、これらの仕様と同一条件で計算を実施した。ただし、バスについては走行台数の割合が少ないため、燃料消費量等の評価を行っていない。

#### (6) シミュレーション条件

本研究においては、普通車(乗用車)から超小型車に転換した際の交通流の変化、さらにはそれによって引き起こされる平均車速、渋滞長、旅行時間、燃料消費量または電力消費量、CO<sub>2</sub>排出量に及ぼす影響を評価することを目的として、表-2に示す計51条件においてシミュレーションを実行した。

表-2 シミュレーション条件

| 超小型車の原動機区分                      | ガソリン自動車, 電気自動車             |
|---------------------------------|----------------------------|
| 超小型車の導入率<br>(普通車(乗用車)からの転換率[%]) | (0=base), 1, 5, 10, 20, 50 |
| 超小型車の最高速度[km/h]                 | 20, 30, 40, 50, 60         |

### 3. 交通流シミュレーション結果および考察

#### (1) 超小型車の導入が平均速度に及ぼす影響

最高速度が異なる超小型車を導入率1%, 5%, 10%, 20%, 50%の各ケースで導入した際の全車両の平均速度の結果を図-11に示す。同図には、赤の破線で超小型車を導入しない基本条件の結果も示している。本シミュレーションにおいては、図-9で示したとおり対象とした道路の制限速度が最大で50 km/hであるため、超小型車の最高速度が50 km/hの場合と60 km/hの場合ではほぼ同一の結果が得られた。また、超小型車の最高速度が20 km/hおよび30 km/hの場合、最高速度の低下とともに全車両の平均速度は低下し、特に超小型車の導入率が高い条件ほどその傾向は顕著に現れた。一方、超小型車の最高速度が40 km/hの場合、導入率の変化による平均速度への影響はほとんどないという結果が得られた。

上述の結果は全車種の平均であるため、図-12に超小型車、普通車(乗用車)および大型車(貨物車)それぞれの平均速度を解析した結果を示す。超小型車の平均速度は最高速度が低下するほど低下し、導入率の違いによる影響は最高速度20 km/hの場合を除き、大きくはない。最高速度20 km/hにおいては、導入率の増加とともに平均速度が低下する結果となった。これは、導入率が高くなるほど超小型車の前方を走る車両も超小型車となる確率が高くなり、加速時においては前方の車両の速度に依存して自車の加速度が計算されるため、より緩やかな加速になるためである。最高速度50 km/hおよび60 km/hにおいては若干ではあるが導入率が高い50%の条件で平均速度が向上している。これは、道路上における自動車の占有面積が小さくなることに起因すると考えられる。普通車(乗用車)および大型車(貨物車)の平均速度は、図-11と同様の傾向を示した。最高速度が道路の制限速度のみに

全車両の平均速度

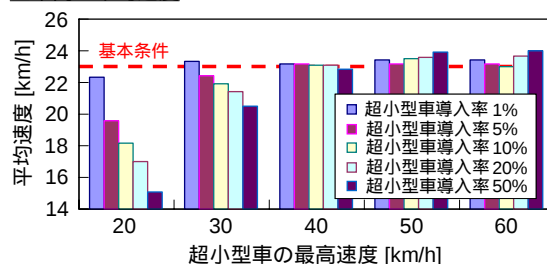


図-11 超小型車を導入した際の全車両平均速度の変化

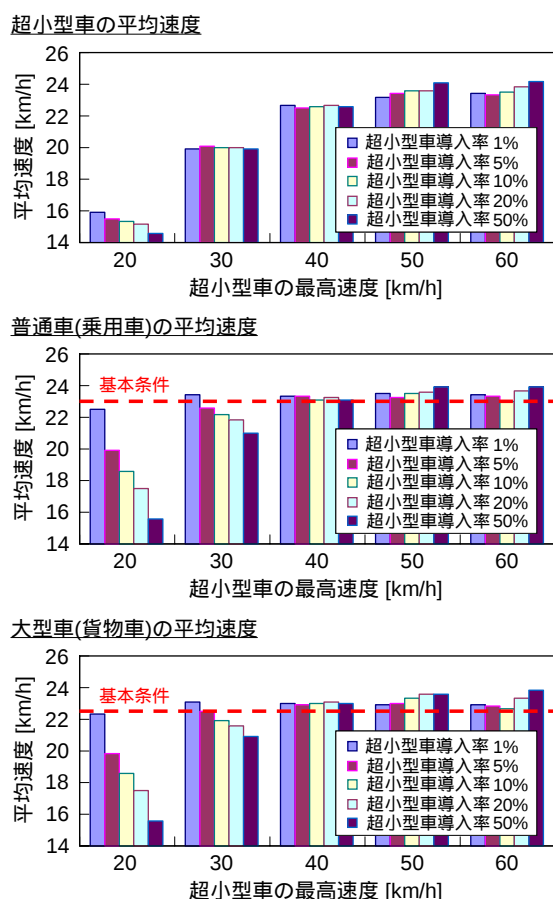


図-12 超小型車を導入した際の各車種平均速度の変化

依存している普通車(乗用車)および大型車(貨物車)においては、周囲の走行車両によって速度が変化する。このため、最高速度が20 km/hおよび30 km/hの超小型車が導入された場合は導入率が高いほど平均速度も低下する結果となった。

## (2) 超小型車の導入が平均旅行時間に及ぼす影響

前節で解析した平均速度を元に、京都駅～金閣寺間 8.8 kmのルートを走行したと仮定した際の平均旅行時間を算出した。図-13に全車両の、図-14に超小型車、普通車(乗用車)および大型車(貨物車)それぞれの平均旅行時間を解析した結果を示す。

図-13に示した全車両の平均旅行時間からは、最高速度20 km/hおよび30 km/hの超小型車を導入した場合において、基本条件の約23分という時間に対して旅行時間が長くなる傾向が確認された。特に超小型車の導入率が高くなるとその傾向は顕著となった。一方、超小型車の最高速度を40 km/h以上とすることで旅行時間は基本条件と同等となることが示された。

図-14に示した超小型車の平均旅行時間については、最高速度20 km/hおよび30 km/hで旅行時間が悪化していることが明らかである。特に最高速度20 km/hにおいては基本条件での平均速度の約1.5倍に増加した。最高速

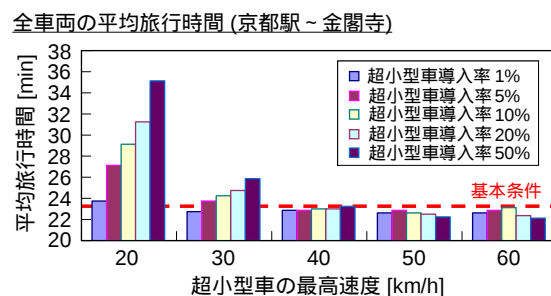


図-13 超小型車を導入した際の全車両の京都駅～金閣寺間平均旅行時間の変化

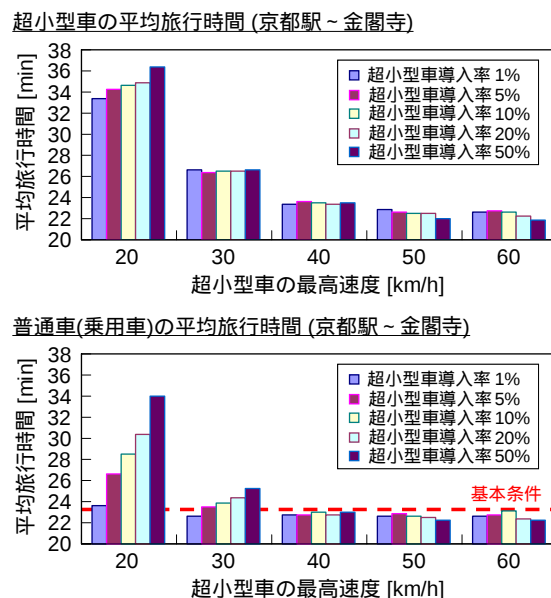


図-14 超小型車を導入した際の各車種の京都駅～金閣寺間平均旅行時間の変化

度30 km/hにおいては基本条件での平均速度の1.2倍程度となった。このような速度の遅い超小型車が多く導入されることで、普通車(乗用車)および大型車(貨物車)の交通も阻害される。同図に示されるように、超小型車の最高速度が20 km/hおよび30 km/hの場合、導入率の上昇に伴い普通車(乗用車)および大型車(貨物車)においても旅行時間が増大することが確認された。超小型車の最高速度が40 km/h以上の場合、いずれに車種に対しても導入率の増大による旅行時間の悪化は確認されなかった。

以上の結果はあくまでも平均旅行時間の変化である。個別の車両についてどのように旅行時間の変化がもたらされているかを確認するため、代表的な条件(最高速度20 km/h, 30 km/h, 40 km/hの超小型車導入率20%)の同時

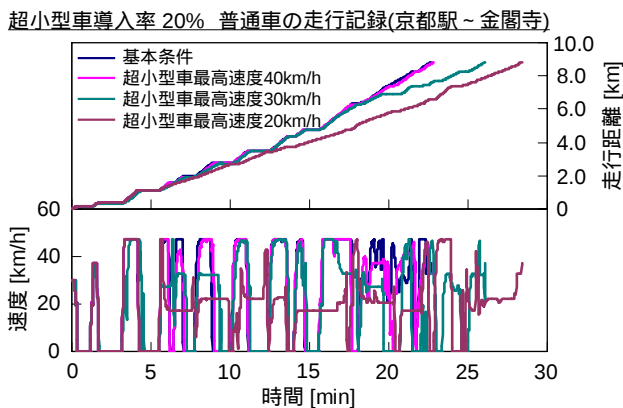


図-15 超小型車導入率 20%における超小型車の最高速度の違いによる普通車の走行状態への影響

刻において、京都駅～金閣寺間の同一ルート上に普通車(乗用車)のプロブ車両を投入し、その走行記録を比較した。解析結果を図-15に示す。同図より、各条件における速度の結果から、周囲を走行する車両環境の違いにより自車の速度が影響を受けていることが確認できる。これにより、走行時間の経過に伴い最高速度の違いによる走行距離の乖離が大きくなり、周囲を走行する超小型車の最高速度が遅くなるほど、目的地への到着時間が遅れていることがわかる。また、この傾向は図-14に示した傾向と概ね一致した。特に、超小型車の最高速度が40 km/hの条件においては、超小型車を導入していない基本条件に対して速度が低下することもあるが、結果的に目的地への到着時間は基本条件とほぼ一致していることも確認できる。

### (3) 燃料消費量および電力消費量の評価

#### a) 超小型車がガソリン自動車の場合

超小型車の原動機がガソリンエンジンであると仮定した場合の全車両の平均燃料消費量(燃費)の結果を図-16に、また、各車種の平均燃費の結果を図-17に示す。

超小型車は小型で軽量であることから普通車よりも燃費性能が優れている。このため、超小型車を導入した際には全車両の平均燃費が向上することが図-16から明らかである。また、超小型車の最高速度の変化により、全車両の平均燃費は大きくは変化しないことが確認できた。

図-17より、超小型車については最高速度が低くなるほど燃費性能が向上する結果が得られた。これは、走行速度の低い方が走行に必要なエネルギーを抑制することに大きく起因している。また、最高速度20 km/h～40 km/hにかけては導入率の増加によりわずかに燃費性能が改善できている。これは、導入率の増加に伴い道路占有面積が減少し(渋滞が短くなり)、よりアイドル運転が減少したためであると推測される。

普通車(乗用車)の平均燃費においては、超小型車の最高速度が20 km/hで大幅な悪化に繋がっている。周囲に

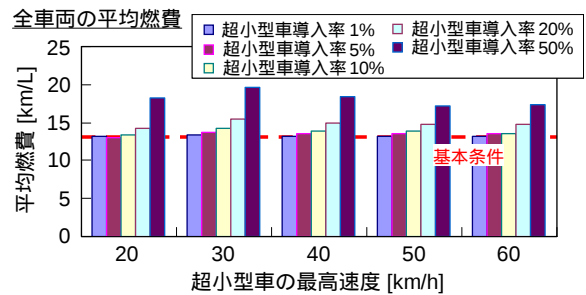


図-16 超小型車を導入した際の全車両平均燃費の変化

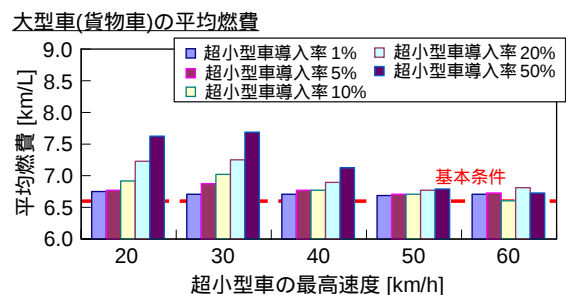
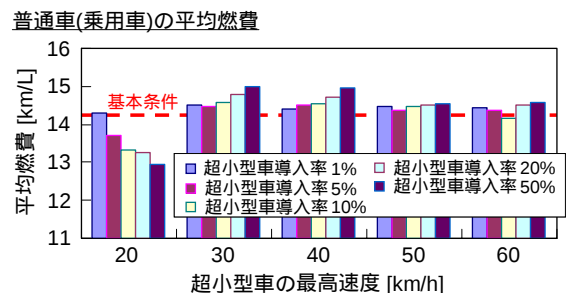
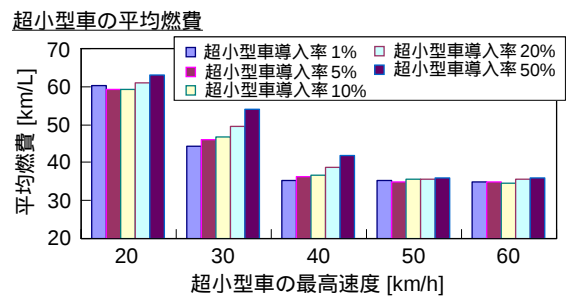


図-17 超小型車を導入した際の各車種平均燃費の変化

速度の違い超小型車が走行している場合、普通車もその交通流に合わせて走行するため平均速度が低下する。ガソリン自動車においては、速度の低い条件ではエンジンの効率が悪化するため、燃費の悪化を招いてしまう。また、自車の経路上に超小型車が出現、消滅を繰り返すと、その分無駄な加減速が発生するため、エネルギー消費量が增大する。これらの要因により、最高速度が20 km/hの超小型車が導入された場合には、普通車乗用車()の燃費が著しく悪化したものと考えられる。一方、超小型車の最高速度が30 km/hおよび40 km/hにおいては燃費の優れた速度で安定して走行することが可能となり、超小型車の導入率の増加により燃費が改善したものと考えられる。

大型車(貨物車)においては、最高速度20 km/h～40 km/hの超小型車を導入した場合、導入率の増大とともに平均燃費が改善する結果となった。これらの理由は、最高速度が30 km/hおよび40 km/hの超小型車を導入した場合の普通車(乗用車)と同様であると考えられる。ただし、ディーゼル自動車の場合、エンジンの運転領域が低負荷域の場合でもガソリンエンジンほどの効率の悪化はないため、超小型車の最高速度が20 km/hの場合においても導入率の増大とともに平均燃費が改善する結果となった。

#### b) 超小型車が電気自動車の場合

超小型車の原動機が電気モータであると仮定した場合の超小型車の電力消費量(電費)を図-18に示す。なお、超小型車の原動機種別のみを前項までと変更した。したがって、交通流、平均速度、平均旅行時間および他の車種の平均燃費等への影響はないため、ここでは超小型車の電費の解析結果のみを示す。

図-17に示したガソリン自動車の場合と同様に、超小型車の最高速度の低下とともに平均電費が向上する結果となった。これは、走行速度が低い条件では走行に必要なエネルギーを抑制できるためである。また、超小型車の導入率の違いによる電費への影響はガソリン自動車の場合と比較して小さい。これは、電気自動車の場合、車両の停止時にモータも停止するため無駄なエネルギー消費がないことと、原動機であるモータの効率は運転領域の違いによる影響がガソリンエンジンと比較して小さいことに起因する。

#### (4) CO<sub>2</sub>排出量の評価

CO<sub>2</sub>排出量は燃費または電費の逆数に比例して変化するので、超小型車の導入による各車種のCO<sub>2</sub>排出量への影響は、前節の燃費の結果を参考にするとよい。したがってここでは、超小型車がガソリン自動車の場合と電気自動車の場合におけるCO<sub>2</sub>排出量の差異と全車両のCO<sub>2</sub>排出量への影響を明らかにした。

図-19にガソリン自動車の場合、電気自動車の場合のそれぞれにおける超小型車のCO<sub>2</sub>排出量の解析結果を示す。なお、同図では一台の車両が1 km走行した際に排出

超小型車の平均電費

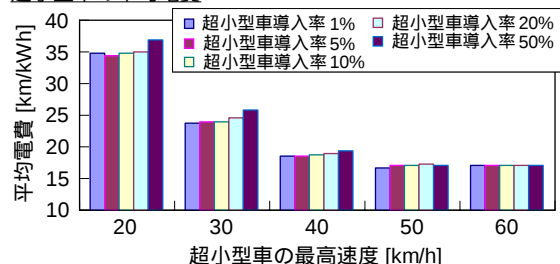


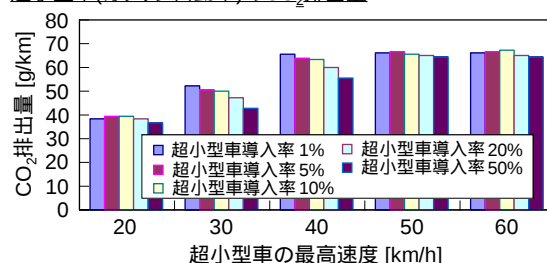
図-18 超小型車を導入した際の超小型車の平均電費の変化

されるCO<sub>2</sub>排出量を示している。ただし、電気自動車の場合は実際には走行時にCO<sub>2</sub>排出されないが、消費した電力量に応じてCO<sub>2</sub>を排出したものと見なした。

同図より、電気自動車はガソリン自動車と比較して全体的に低いCO<sub>2</sub>排出量となっていることがわかる。これは、個々の車両にエンジンを搭載するよりも、原子力発電や高効率火力発電により得られる電力を使用した方がCO<sub>2</sub>排出量が低減できることを意味している。最高速度の違いに対するCO<sub>2</sub>排出量への影響は、燃費あるいは電費の結果からも明らかであり、最高速度が低くなるにつれてより走行抵抗の少ない条件で走行可能となるためにCO<sub>2</sub>排出量も低減した。

これらの超小型車を導入した際の全車両のCO<sub>2</sub>排出量削減効果を図-20に示す。なお、ここでは超小型車を

超小型車(ガソリン自動車)のCO<sub>2</sub>排出量



超小型車(電気自動車)のCO<sub>2</sub>排出量

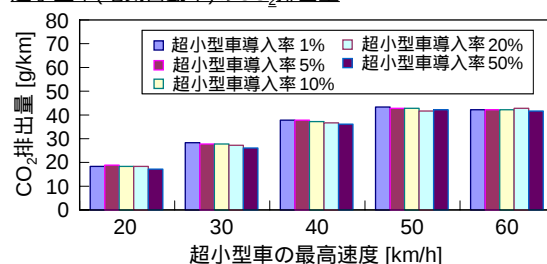
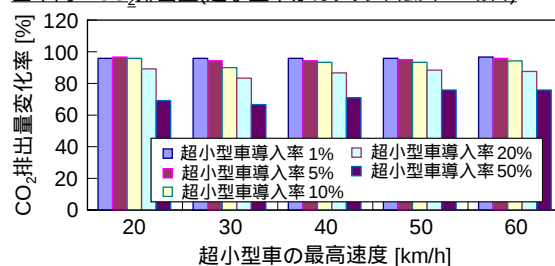


図-19 超小型車のCO<sub>2</sub>排出量解析結果

全車両のCO<sub>2</sub>排出量(超小型車がガソリン自動車の場合)



全車両のCO<sub>2</sub>排出量(超小型車が電気自動車の場合)

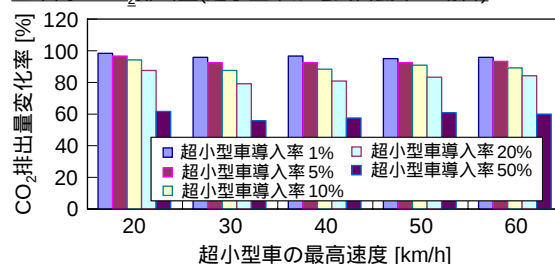


図-20 全車両のCO<sub>2</sub>排出量削減効果(基本条件=100%)

導入していない基本条件におけるCO<sub>2</sub>排出量を100%としている。同図より、超小型車の最高速度がいずれの場合においても、超小型車の導入率の上昇に伴いCO<sub>2</sub>排出量削減効果が得られる結果となった。その効果は、超小型車が電気自動車の場合の方が、ガソリン自動車の場合よりもわずかに大きい。例えば、超小型車導入率20%では、ガソリン自動車の場合、約10%前後、電気自動車の場合、約15%前後のCO<sub>2</sub>排出量削減効果が見込める。

#### 4. まとめ

超小型車の衝突時における被害を軽減することを狙いとして最高速度の抑制に着目し、新たに自動車の燃料消費量、CO<sub>2</sub>排出量等の詳細な計算方法を反映した交通流シミュレーションを用いることで、超小型車に設けられた最高速度が、従来の交通環境下における旅行時間、燃料消費量、およびCO<sub>2</sub>排出量への影響を評価した。

交通流シミュレーションに新たに反映した自動車の燃料消費量等の計算は、車両の運動方程式に基づいた物理モデルおよび原動機の効率を厳密に考慮することで得られた瞬時燃料消費量・電力消費量参照テーブル(速度・加速度対応)に基づいて算出するモデルである。これにより、精度の高い燃料消費量あるいは電力消費量の計算が可能となった。

これを活用して超小型車の最高速度および導入率を変化させて交通流シミュレーションを実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) 超小型車の最高速度が20 km/hおよび30 km/hの場合、超小型車の導入率の増大に伴い周囲を走行する普通車(乗用車)、大型車(貨物車)といった他の従来車の平均速度の低下を招く。一方、超小型車の最高速度を40 km/h以上とすることで、超小型車の導入率によらず従来車の平均速度を維持することが可能となる。
- (2) 平均速度の低下は、同時に旅行時間の増大を招く。したがって、従来車の交通環境を維持するためにも、超小型車の最高速度を40 km/h以上とすることが望ましい。
- (3) 超小型車の最高速度の低下および導入率の増大は、超小型車そのものに加えて、普通車(乗用車)および大型車(貨物車)の平均燃費改善に繋がる。しかしながら、超小型車の最高速度を極度に低下させると、普通車(乗用車)の燃費悪化に繋がる。
- (4) 超小型車の導入による全体でのCO<sub>2</sub>排出量の削減については、超小型車の最高速度によらず一定の効果が得られる。例えば、超小型車導入率20%では、ガソリン自動車の場合、約10%前後、電気自動車の場

合、約15%前後のCO<sub>2</sub>排出量削減効果が見込める。

以上を総括すると、超小型車の衝突時における被害を軽減することを目的として超小型車の最高速度を制限した場合、最高速度40 km/h程度とすることで、他の車両の交通流(均速度、旅行時間)および燃費の悪化を抑制しつつ、CO<sub>2</sub>排出量を抑制可能であることが示された。

ただし、本交通流シミュレーションではドライバの個々の運転特性や車両性能の違いを考慮できていないため、定性的な結果として捉える必要がある。これらの因子による交通流への影響、例えば、前方車両に対するあおりやそれに伴う無駄な加減速等により、渋滞や燃費悪化を引き起こすことも考えられる。このため、今後はこのような因子も含めた解析が必要となる。

#### 付録 交通流シミュレーションにおける車線変更のケース

各車両の車線変更は以下に記載した6ケースで実施する。これら項目には優先度を設け、既に優先度上位で判定がされている状態では上位の行動パターンで車線変更を実行する。以下、優先の高い順に車線変更のケースを記述する。

##### ケース1: バスのバス停への停車

(内容) 最左側車線を走行していないバス車両が存在する場合、当該バスが停車すべきバス停に接近した場合車線変更(左側車線へ)を行う。

(判定処理) 下記 ~ を全て満足する場合に車線変更を行う。

- 自車両がバスである
- 現在走行中のリンクが交差点内リンクではない
- 最も左側を走行していない
- 次に停車するバス停が現在走行しているリンク上にある

##### ケース2: 右左折(専用)車線への車線変更

(内容) 右左折専用車線(専用レーンがない場合は右左折可能なレーン)に車線変更する。

(判定処理) 現在の車線を走行し続けると、目的ルート上の次のリンクに走行できない場合、目的ルートに走行可能な車線に変更する(ステップ毎に常に判断)。

##### ケース3: 停車(乗降処理)中のバスの追い越し

(内容) バス停に停車しているバスが存在し、追い越し可能な車線が存在する場合に一般車両(超小型車、普通車、大型車)が車線変更を行う。ただし、バスベイがあるバ

ス停では車線変更をせずに追い越す。

(判定処理)下記 ～ を全て満足する場合に車線変更を行う。

一般車両である

前方走行車両がバスであり、バス停に停車するために減速している状態である

前方車両との距離が30m以内である

現在走行中の車線の終わりまで30m以上ある

現在走行中のリンクが交差点内リンクではない

右に車線がある

#### ケース4：次走行リンクで右左折処理に入るときの車線変更

(内容) 現在走行中のリンクに接続する次のリンクの先が交差点で、当該交差点で右左折を予定している場合、交差点に接続されているリンクに入る際に必要があれば車線変更を行う。

(判定処理) 下記 ～ を全て満足する場合に車線変更を行う。

現在走行中の車線の終わりまで20m以上ある

現在走行中のリンクの次のリンクの交差点で右左折する予定がある

現在走行中の車線を走行した場合、車線変更が必要になる

#### ケース5：PTPS(占有・優先)関連

(内容) 原則PTPS区間におけるバスは設定されたPTPSレーンで走行する。一般車両は、走行リンクがPTPS区間の場合、占有区間であれば右左折処理を除き当該レーンに入らないようにし、優先レーンであればバスが後方より接近してきた場合は速やかに当該レーンから抜けるために車線変更を行う。

(判定処理(占有・優先走行車両の場合)) 下記 ～ を全て満足する場合に車線変更を行う。

現在走行中のリンクに車線設定がしてある

現在走行中の車線が占有・優先車線ではない場合、車線変更し占有、優先レーンを走行するように車線変更する

(判定処理(一般車両の場合)) 下記 ～ を全て満足する場合に車線変更を行う。

現在走行中のリンクに車線設定がしてある

現在走行中の車線が占有・優先車線である

現在走行中車線で右左折処理を行わない場合

#### ケース6：複数車線道路における混雑度の平均化

(内容) 複数の車線を有するリンクにおいて、車線間での偏った混雑を回避し(均等化を行うために)車線変更を行う。

(判定処理)下記 ～ を全て満足する場合に車線変更を行う。

自車両がバスではない

現在走行中の車線の先頭車両が停車している

現在走行中の車線の混雑率が0.3以上

両隣どちらかの車線の混雑率が現在走行中の車線の混雑率より低い

ただし、混雑率は以下のように定義する

混雑率 = (Σ (車両長 + 目標最小車間距離)) / 車線長

#### 参考文献

- 1) 「高齢者にやさしい自動車開発委員会」報告書、高齢者にやさしい自動車開発委員会、2011.2
- 2) 工藤 希、佐藤 安弘、水間毅、"軌道系交通の導入評価のための都市交通シミュレータ"、第44回土木計画学研究発表会、講演論文集、No.292、2011
- 3) 飯田恭敬他、交通工学、1992
- 4) 新・道路運送車両の保安基準(省令・告示全条文)、交文社、別添 41
- 5) 「事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/guide/index.html>
- 6) 「平成 22 年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について(お知らせ)」、環境省ホームページ、2012.1、<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14702>
- 7) 「超小型モビリティの利活用に関する実証実験等による調査業務」報告書、国土交通省 都市・地域整備局街路交通施設課・自動車交通局技術安全部環境課、2011.5
- 8) 「超小型モビリティの仕様における要件に関する技術検討業務」報告書、国土交通省自動車交通局技術安全部環境課、2011.3
- 9) 「乗用車(自家用、営業用)の大型化(重量化)の推移」、環境統計集、環境省、2011、<http://www.env.go.jp/doc/toukei/data/09ex420.xls>

(2012.8.3 受付)

# A STUDY ON MAXIMUM SPEED OF ULTRA COMPACT VEHICLES USING TRAFFIC FLOW SIMULATION BASED ON THE CALCULATION OF VEHICLE FUEL COMSUMPTION

Norifumi MIZUSHIMA, Nozomi KUDO, Tetsuya NIIKUNI and Hiroyuki OHNO

Ultra compact vehicles (UCVs) which are one or two-seater have attracted much attention. This is because their configuration provides the minimum cabin space required for commuter use and contributes to reduce energy consumption and CO<sub>2</sub> emission for travel due to their light weight in comparison to regular sized passenger vehicles. They can also secure the means of mobility for elderly people in Japan especially in local regions where have limited public transportation infrastructure.

In this study, the maximum speed of UCVs was discussed with the use of traffic flow simulation based on the calculation of vehicle fuel consumption in terms of reducing damage caused by collisions and simultaneously avoiding the deterioration of traffic flow.

When the maximum speed of UCVs was set to 30 km/h, the traffic flow of conventional vehicles deteriorated with the increase of the adoption rate of UCVs. In the case that the maximum speed of UCVs was set to 20 km/h, the fuel consumption of conventional passenger vehicles also deteriorated. These results indicates that by setting the maximum speed of UCVs about 40 km/h, UCVs would be introduced to local roads without any effects on conventional vehicles or traffic flow, even when the maximum speed of UCVs are restricted separately from other conventional vehicles in order to reduce damage of crash.