

坂道における交通シミュレーション

Traffic Simulation in the Slopes

森津 秀夫*

Hideo Moritsu

交通ネットワークシミュレーションにおいても車両の細かな走行挙動の再現性が求められるようになった。坂道に特有の交通現象の再現に対する要求もそのひとつである。そこで、ここでは坂道に特有の交通現象として上り勾配での速度低下と下り勾配における無意識の速度上昇を取り上げ、そのモデル化を行った。これらを使ったシミュレーションにおいては意図した動作が確認され、2つの交通現象に関するモデル化の妥当性が示された。

キーワード：交通シミュレーション、坂道、勾配区間、VISITOK

I. はじめに

交通シミュレーションを活用するために多くの交通シミュレータが開発され、実用化されている。シミュレーションの対象となる交通現象は多岐にわたり、多様な交通シミュレータが存在する。しかし、開発者の手を離れて商品として提供されている交通シミュレータの多くは交通ネットワークを取り扱うものである。現時点において、一般的な交通シミュレータは交通ネットワークシミュレーションを行うためのものを意味していると受け取ることができる。交通ネットワークシミュレーションの目的は交通ネットワークフローの再現である。したがって、交通需要を入力として与えたとき、交通ネットワークを構成する道路区間や交差点等の交通流特性に関する出力が現実と合致するものであればよい。すなわち交通量や平均走行速度、渋滞長などの時間的変化を再現できれば、交通シミュレータは十分な機能を有すると判断される。

交通シミュレーションの適用事例が多くなると、交通シミュレータの開発意図とは異なる適用が行われることがある。そのひとつに車両の走行挙動自体に再現性を要求するものがある。交通ネットワークを対象とするシミュレーションではあるが、道路区間を走行する車両の速度変化に関してシミュレーション結果が観測された交通現象と整合性があることをも求めるものである。具体的な例が勾配を有する坂道における走行挙動に関する要求であり、勾配抵抗によって引き起こされる特有の速度変化を考慮したモデル化が必要となる。

個々の車両の速度変化の再現性は、集計的な特性値で交通ネットワークフローの再現性を検証

する交通シミュレータに対しては過度の要求である。交通シミュレータが備える機能を越えた要求が行われるのは、最近の交通シミュレータがアニメーション表示を標準とすることが背景にあると考えられる。個々の車両の動きをアニメーションで示すため、微細な走行挙動までも正確に再現できるという期待が生じたのであろう。この要求はシミュレーションの目的を考えたとき、不合理なものではない。むしろ車両の挙動をアニメーション表示するからには当然のことであり、交通シミュレーションの再現性をより高いレベルで実現する必要が生じてきたことを意味しているのである。ただし、交通シミュレーションモデルは採用する車両走行モデルの種類により分類されるが、道路・交通条件に応じた細かな速度変化を表現できるのはマイクロモデルに限られる。

この研究では、交通ネットワークシミュレーションにおいて坂道に特有の交通現象をも再現することを目的とする。マイクロモデルに分類され、著者が開発を続けている交通シミュレータ VISITOK で使用している車両走行モデルの改良方法を示し、モデル化の妥当性を検証することにする。以下、IIでは交通シミュレーションのための車両走行モデルを概観する。IIIでは坂道における走行挙動のモデル化について述べ、IVでその検証を行う。

II. 交通シミュレーションのための車両走行モデル

交通シミュレーションモデルには交通ネットワークにおける需要予測を目的として発展してきたものと、車両挙動の再現を目的として発展してきたものがある。コンピュータの処理能力が十分でなかったとき、前者は必要な規模の交通ネットワークを扱えることを優先し、処理能力の向上の結果、対象とするネットワーク規模を拡大する必要がなければシミュレーションモデルを緻密化してきた。一方、車両挙動の再現から出発したシミュレーションモデルはコンピュータ処理能力の向上を対象の拡大に利用し、単路部から交差点、ネットワークをも扱うようになってきた。

これらの経緯を経て現在の交通ネットワークシミュレーションモデルがあるが、それぞれの作成時期や開発意図によって使われる車両走行モデルが異なっている。当初からネットワークシミュレーションを対象としたモデルでは、車両走行モデルに計算量が少ない流体モデルが採用され、シミュレーションモデルの分類でマクロモデルに位置づけられた。交通密度、交通量、速度といった交通流特性値に関するモデルを用いてネットワークフローの変化を表現するものであり、大規模なネットワークにも適用が可能である。しかし、車両を個別に扱わないためにアニメーション表示には不向きであり、経路を明示的に示すことが必要な場合には適さない。そこで交通流特性モデルを基礎としながらも車両を離散的に扱うように改良されたものもあり、このような車両走行モデルを用いるものをメソモデルと分類することがある¹⁾。

車両挙動を忠実に再現しようとするシミュレーションでは、追従モデルを基本とする車両走行モデルが用いられてきた。追い越しができない道路区間においては、車両は先行車との追突を避けるように速度を制御しなければならない。この交通現象を表現した追従理論を適用するもので

あるが、前方に追従対象となる車両が存在しない自由走行のためのモデルを併用することが必要である。シミュレーションを行う際の決定変数は車両の加速度であるが、シミュレーションモデルの中には追従モデルを使用しているとしながら速度や位置を決定変数としているものもある。追従モデルを基本とする車両走行モデルを用いるシミュレーションモデルはマイクロモデルと位置づけられている。

マクロモデルあるいはメソモデルでは離散的な車両の走行挙動を取り扱わないため、坂道に特有の交通現象を再現することは困難である。マイクロモデルを使用することが必要であり、ここでは著者が開発を続けている VISITOK を用いることにする。VISITOK で採用している車両走行モデルは以下のとおりであり、自由走行モデルは式 (1)、(2) で表される。

$$\alpha(t+T) = \kappa \{ v_f - v(t) \} \quad (1)$$

$$\alpha_{\min} \leq \alpha(t+T) \leq \alpha_{\max} \quad (2)$$

ここに、 $\alpha(t+T)$ ：時刻 $t+T$ における加速度

α_{\min} ：最小加速度

α_{\max} ：最大加速度

v_f ：希望速度

$v(t)$ ：時刻 t における速度

κ ：係数

T ：反応遅れ

式 (1) はその時刻における速度と希望速度の差に比例して加速度を変えることを示している。式 (2) においては加速度に最小値と最大値を設け、物理的に不可能な加速度や減速度にならないようにしている。

追従走行モデルは式 (3)、(4) に示すとおりである。式 (3) は先行車との速度差だけでなく、速度と車間距離による影響を加味して加速度を決定するものである。基本としているのは一般性の高い追従モデル²⁾である。理論的な検討を行う場合には車頭距離が使われるが、現実には車間距離が運転者に認識されるのであり、この点を修正した式である。また式 (4) では自由走行モデルと同様に加速度の最小値と最大値を設けている。

$$\alpha_{n+1}(t+T) = \lambda \frac{\{v_{n+1}(t)\}^m}{\{x_n(t) - L_n - x_{n+1}(t)\}^l} [v_n(t) - v_{n+1}(t)] \quad (3)$$

$$\alpha_{\min} \leq \alpha_{n+1}(t+T) \leq \alpha_{\max} \quad (4)$$

ここに、 $\alpha_{n+1}(t+T)$ ：先頭から $n+1$ 番目の車両の時刻 $t+T$ における加速度

$v_n(t)$ ：先頭から n 番目の車両の時刻 t における速度

$x_n(t)$ ：先頭から n 番目の車両の時刻 t における位置

L_n ：先頭から n 番目の車両の長さ

λ, m, l : 係数

式(1)～(4)だけではさまざまな走行挙動を表現することはできない。決められた地点での停止、速度制限など、その時点における各種の走行条件への対応を経て車両の加速度が決定される。

Ⅲ. 坂道における走行挙動のモデル化

1. 坂道に特有の交通現象

坂道においては勾配抵抗が生じるため、車両は平坦部とは異なる走行挙動を示す。一般に問題となるのは上り勾配の場合であり、勾配が大きくなれば走行速度の低下を招くことになる。この現象はとくに貨物車や大型車で顕著であり、交通流の円滑性を阻害する要因となる。そのため勾配値および勾配長と登坂速度との関係が明らかにされ³⁾、必要な箇所には登坂車線が設置されている。

登坂車線が設置されている区間を含むネットワークを対象とするシミュレーションでは、貨物車等の登坂車線への車線変更を再現することが求められる。この場合、速度低下が車線変更の要因となるため、上り勾配における速度低下をモデル化することが必要になる。また登坂車線が設置されていなくても、貨物車等の速度低下が後続車に及ぼす影響を無視できないような場合においてはこのようなモデル化を導入すべきであると考えられる。

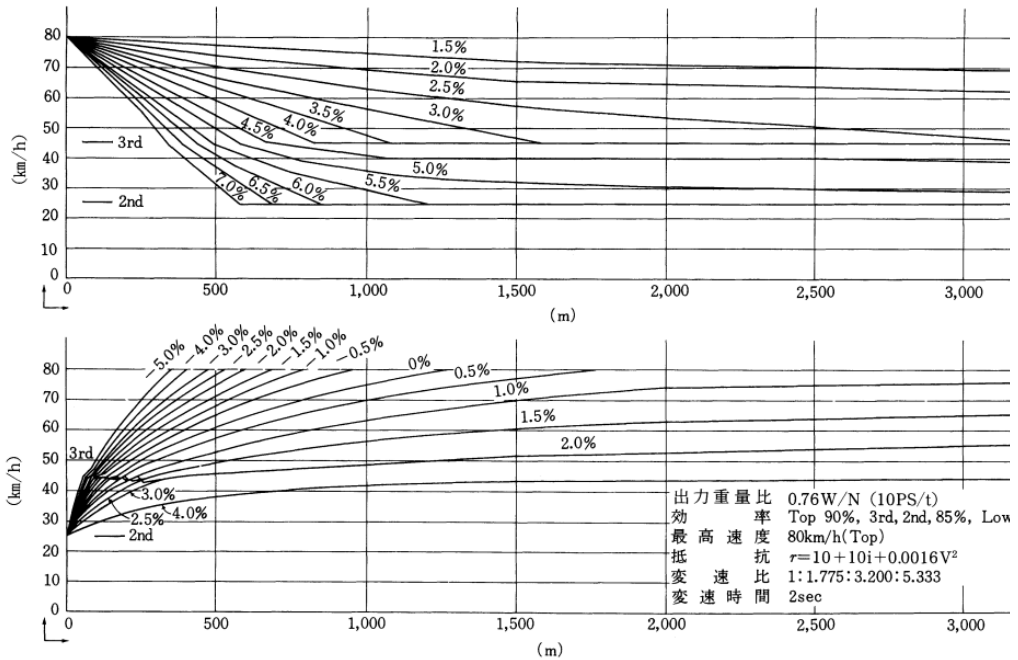
下り勾配においては走行抵抗が負となるため、車両の加速性能が低下することはない。逆に制動距離が長くなり安全性が問題になることが考えられる。しかし一般的なネットワークシミュレーションでは事故が生じるような極限状態を対象とするのではないため、敢えて下り勾配における減速性能の低下をモデル化する必要性は低いと考えられる。むしろ下り勾配で問題となるのは、長い坂道を下るとき、運転者が気づかないうちに速度が徐々に速くなることである。この現象は、下り勾配区間に続くサグで発生する渋滞を増大させる要因にもなるのである。長大な下り勾配区間が含まれる場合はネットワークフローに対する影響が考えられるので、この現象をモデル化することは有意義であろう。

以上の点から坂道に特有の交通現象のうち、ここでは上り勾配における速度低下と下り勾配における無意識の速度上昇のモデル化を行うことにする。IIで示した VISITOK の車両走行モデルを前提としてこれらの交通現象を表すための改良を検討する。

2. 上り勾配における速度低下のモデル化

道路の幾何設計では縦断勾配の扱いは重要な要素のひとつであり、道路構造令において道路の種別区分と設計速度に対して許容される縦断勾配が規定されている。道路構造令を適用する際の手引きとなる解説書³⁾では縦断勾配の基準の算定根拠となる登坂時の運転力学が解説されており、

登坂車線設置必要区間の算定に用いる登坂性能曲線が示されている（図1）。



「道路構造令の解説と運用（改訂版）」より引用

図1. 登坂性能曲線

シミュレーションにおいては図1に示される登坂性能曲線が再現されるように車両を走行させればよいと考えられる。図1は始端速度が80km/hと25km/hの場合における走行距離と速度との関係を表したものである。始端速度が80km/hのときは徐々に速度が低下することになり、勾配が大きいほど速度低下は急速で大きい。そして十分な走行距離を経れば、勾配に応じて一定の速度に収束している。始端速度が25km/hのときは加速できるが、勾配が大きければ極めて緩やかな加速しか得られない。この場合も十分な走行距離が与えられれば、先ほどと同じ速度に収束すると考えられる。

このような現象をシミュレーションで表現する最も簡単な方法は勾配に応じた希望速度を与えることである。式(1)、(2)で表される自由走行モデルで走行距離と速度との関係を図示すると、図2のようになる。

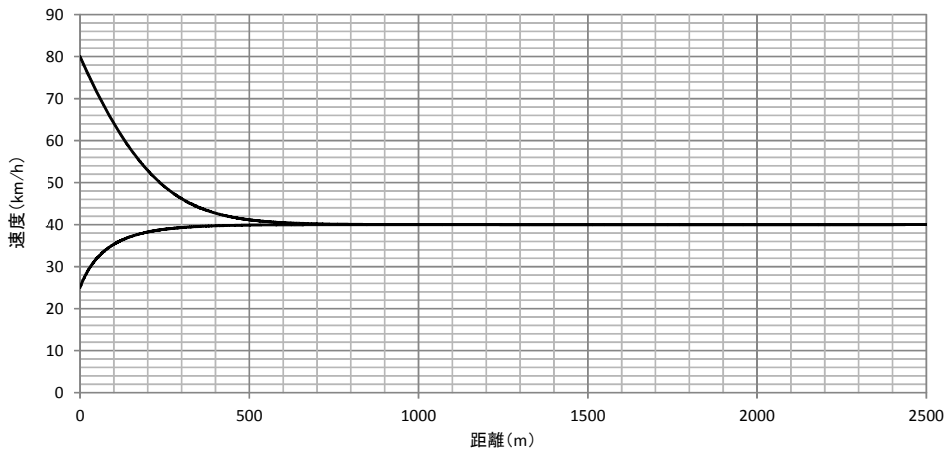


図 2. 自由走行モデルによる走行速度

図 2 では始端速度が 80km/h および 25km/h で希望速度が 40km/h の場合を図示しており、登坂性能曲線に類似した速度の変化が得られることがわかる。速度変化の大きさは式 (1) における係数 κ により決定される。そこで勾配に対応させて希望速度と κ を変更すれば、図 1 に示される関係を再現することが可能である。

この方法を用いるのであれば、シミュレーションモデルに大きな変更は必要ない。シミュレーションでは車両は常に前方の道路条件を調べ、速度制限等にあわせて速度調整を行うようにモデル化されている。上り勾配で固定的に最高速度を抑えれば、それに基づいて決められる各車両の希望速度も抑えられる。その結果、勾配区間に入る前に低下させられた希望速度にまで減速することになり、実際と合致しない状態が生じる。そこで、車両が勾配区間に進入した後に希望速度等を変更するようにならなければならない。また、係数は κ だけであるので、登坂性能曲線に合わせるための細かな調整は困難である。さらに、式 (1) は追従走行時には適用されないため、追従走行モデルの係数調整を検討しなければならないことも問題となる。この場合は図 1 のようなモデル化の対象がないため、交通現象の観測、分析から始めなければならないであろう。

次に考えられるのは区間速度制限を行う方法⁴⁾である。勾配区間の始端から必要な距離をおいて速度制限区間を設置すれば、擬似的に速度低下を表現できる。この方法を用いるのであれば、すでにシミュレータに備わっている機能を使用するだけであり、新たなモデル開発は不要である。その一方で速度変化の大きさを調整することはできないため、登坂性能曲線に合わせることは不可能である。

上り勾配で平坦部と走行挙動が異なるのは車両自体が原因となるのであり、それに基づいてモデル化するのが合理的であると考えられる。式 (2)、(4) で使われている最大加速度および最小加速度は車種ごとに設定され、従来のモデルでは加速度の絶対的な限界値を示す定数として定義

されている。しかし、実際には車両の速度が低速か高速かによって最大加速度は異なるなど、つねに一定値であるとは考えられない。道路の縦断勾配もこれらを左右する要因である。そこで、ここでは勾配と速度によって最大加速度を変え、式(5)の関係を用いることにする。

$$\alpha_{\max}(t) = f_{\alpha}\{v(t), \theta\} \quad (5)$$

ここに、 $\alpha_{\max}(t)$ ：時刻 t における最大加速度

θ ：道路の縦断勾配

最大加速度をその時点の速度で決める点を除けば、車両走行モデルに変更はない。自由走行時でも追従走行時でも式(5)で求めた最大加速度を適用すればよい。なお、上り勾配における速度低下のモデル化には必要ないが、最小加速度すなわち最大減速度にも同様にして勾配との関係を規定することが可能である。

3. 下り勾配における速度上昇のモデル化

長い下り坂が続く場合でも、運転者が十分な注意を払えば一定の速度を保って走行することができる。しかし速度維持を心がけずに走行すれば、坂を下るにしたがって徐々に速度が増すことになる。ここではこの現象を、時間経過とともに希望速度を高めることによってモデル化することにする。また維持すべき速度と走行速度の乖離が大きくなれば運転者は速度上昇に気づき、元の速度に低下させるように減速することが考えられる。よって、各時刻の希望速度 $v'_f(t)$ を式(6)で求め、式(1)における v_f に代えて使用するものとする。

$$v'_f(t) = (1+r)v'_f(t-\Delta t) \quad (6)$$

ただし、 $(1+r)v'_f(t-\Delta t) > (1+R)v_f$ ならば $v'_f(t) = v_f$

ここに、 $v'_f(t)$ ：時刻 t における希望速度

r ：速度上昇率を表す係数

R ：速度乖離の最大値

Δt ：更新時間間隔

速度上昇率を表す係数 r は調整に用いるためのものであり、 r を大きくすれば急激に速度が上昇することになり、下り勾配が急であることに対応する。速度乖離の最大値 R を大きくすれば希望速度と走行速度との乖離を大きく許容することになり、運転者が速度上昇に気づかないことになる。

IV. 坂道における交通シミュレーションの検証

1. 上り勾配における速度低下のシミュレーション

速度ごとに最大加速度を設定する方法を用いるには、その関係を具体的に決めなければならない。ここでは必要最小限の値だけを定め、意図した走行挙動を得ることが可能であるかを調べる

ことにする。すなわち、速度が 0 および 80km/h のときの最大加速度、最大加速度が 0 となる速度を決め、その間を直線で補完するものである。80km/h の速度を使用するのは図 1 の登坂性能曲線と結果を対比させるためである。

図 3 に示すように 2 ケースの最大加速度を設定して始端速度が 80km/h と 25km/h の場合のシミュレーションを行ったところ、図 4 の結果が得られた。

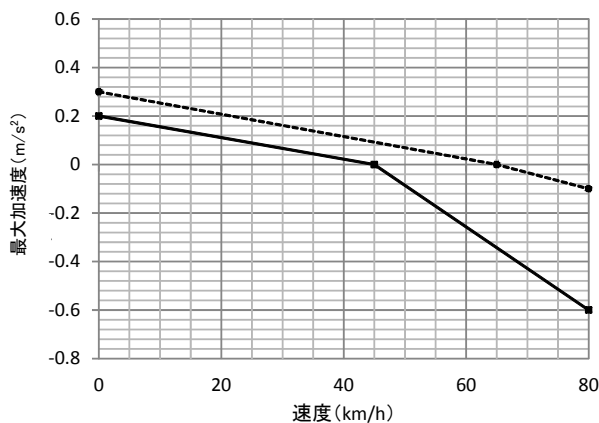


図 3. 速度と最大加速度の関係

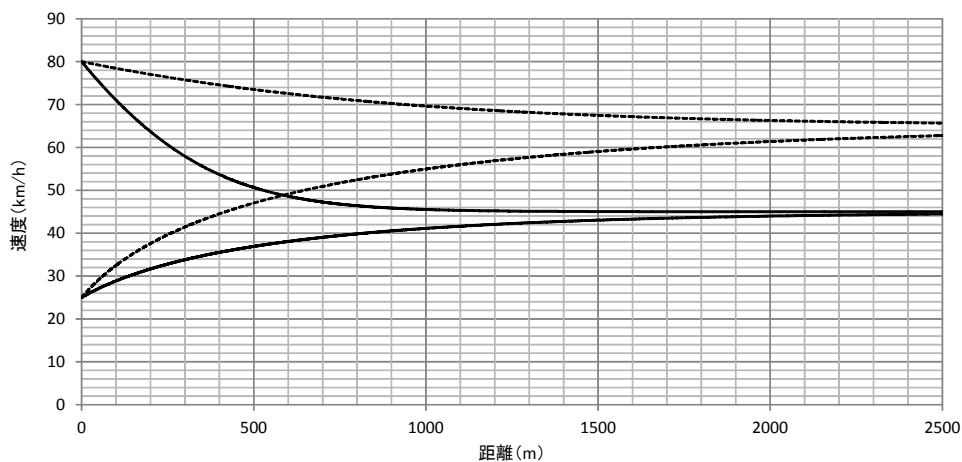


図 4. 最大加速度の設定による走行速度の変化

図 3、4 における実線は図 1 の登坂性能曲線における 4% の勾配に相当するように調整したものである。車両の駆動力が走行抵抗と等しくなりその速度を維持して登坂できる均衡速度は 45km/h としている。破線は 2% の勾配における登坂性能曲線に近いものであり、均衡速度を 65km/h とし

ている。図3では速度と最大加速度の関係を3点で決めただけであるが、シミュレーションの結果は登坂性能曲線に近いものとなった。速度-最大加速度曲線の調整を重ねれば、シミュレーション結果と登坂性能曲線の差を小さくすることが可能であろう。また勾配の大小による走行挙動の違いも表現できることが示されている。したがって、意図したシミュレーション結果が得られており、上り勾配における速度低下のモデル化は妥当であると考えられる。

2. 下り勾配における速度上昇のシミュレーション

下り勾配区間において運転者が意識しない間に速度が上昇する現象を表すため、希望速度を時間経過とともに大きくする方法を提案した。モデルは簡単であり、希望速度の上昇率を左右する係数を設定すればシミュレーションを実施できる。また速度の乖離が大きくなったときに元の速度に戻させる場合には、速度乖離の最大値を与えればよい。そこで、1秒間に0.1%の割合で希望速度を上昇させ、速度が10%上回ったときに希望速度を元に戻すようにしてシミュレーションを行った結果、図5に示す速度変化が得られた。なお、始端速度と希望速度はともに50km/hとした。

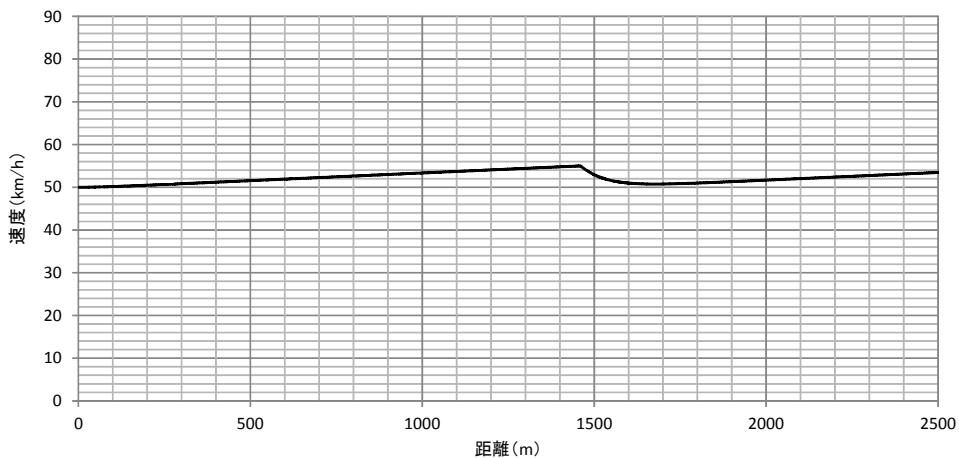


図5. 下り勾配速度上昇モデルによる速度変化

図5の計算例では始端から約100秒で1460m走行したとき、速度が55km/hを超過した。この時点で希望速度を50km/hに設定し直して減速したが、再び徐々に速度が上昇している。このように対象とした交通現象を再現できており、下り勾配における速度上昇のモデル化は妥当であると考えられる。なお図5は自由走行を行う車両をシミュレーションしたものであるが、希望速度の上昇は追従走行を行う車両に対しても適用する。

先行車が図5に示すように速度を変化させたとき後続車は追従して速度を変化させるが、場合

によっては先行車よりも大きな速度変化が生じることがある。その結果、交通流は不安定になり追突事故が発生したり渋滞原因になったりする。渋滞原因となると、ネットワークフローにも影響を与えることになる。ここで用いたモデル化により、そのような交通現象を再現できる可能性があると言える。

V. おわりに

交通ネットワークフローの再現を目的とするシミュレーションにおいても車両の細かな走行挙動を忠実に再現することが求められることがある。走行挙動をより緻密にモデル化することはシミュレーションの再現性の向上に寄与する可能性があるが、ネットワークフローを捉える観点からは必ずしも必要でないかもしれない。しかしながら、シミュレーション結果をアニメーションで示すことが当然とされる時代になり、このような要求にも対応せざるを得なくなった。そこで、ここでは坂道における2つの交通現象を取り上げ、それを表すことができるように車両走行モデルを改良した。すなわち、上り勾配における速度低下のモデル化と下り勾配における速度上昇のモデル化である。上り勾配における速度低下に関しては勾配と速度によって最大加速度を変える方法を提案し、下り勾配における速度上昇に関しては希望速度を時間経過とともにシフトさせる方法を提案した。そしてシミュレーションによる検証を行った結果、これらのモデル化の妥当性を示すことができた。

速度によって最大加速度を変える方法は上り勾配を持つ道路区間に適用することを想定したものであったが、平坦部においても速度によって最大加速度は変わり得る。したがって加速度を決定するための計算量の増加が問題にならなければ、ここで提案したモデルをあらゆる場合の加速度決定に導入することが望ましいと考えられる。そのためにはシミュレーションで適切な結果を得ることができるように、勾配、速度と最大加速度の関係を定めなければならない。また下り勾配における速度上昇のモデルを適用する場合には、対象とする道路区間での交通流の観測・解析とそれに基づく係数の設定が不可欠である。これらがここで提案したモデルを適用する際の課題である。

参考文献

- 1) 交通工学研究会：『交通シミュレーション活用のススメ』（交通工学研究会，2012）。
- 2) 佐佐木綱 監修，飯田恭敬 編著：『交通工学』（国民科学社，1992）。
- 3) 日本道路協会：『道路構造令の解説と運用（改訂版）』（丸善，2004）。
- 4) 森津秀夫：「狭幅員道路における交通シミュレーションの検証」、『流通科学大学論集－経済・情報・政策編－』20, No.2 (2012), 79-90.