

交通シミュレーションにおける速度制限の実装

Implementation of Speed Limits in Traffic Simulation

森津 秀夫*

Hideo Moritsu

走行する車両の速度を制御することは交通シミュレーションにおける最も基礎的な技術であるが、ネットワーク構成によってシミュレーション結果が影響される場合がある。そこでネットワーク構成の影響を受けにくく、車両の属性や運転者の特性を考慮することも可能な速度制限の実装方法を提案した。すなわち、道路条件としての速度制限を車両それぞれに走行条件として随時持たせ、加速度計算に用いる方法である。

キーワード：交通シミュレーション、速度制限、VISITOK

I. はじめに

現在における一般的な交通シミュレーションは、道路ネットワーク上の自動車交通流を再現することを目的としたものである。そこで用いられている交通シミュレーションモデルでは、コンピュータ内部での道路ネットワークと車両走行の表現方法がモデル化の要となっている。車両走行モデルは道路上における車両の走行挙動を表すものであり、起こり得る様々な道路交通状況に対応できるものでなければならない。基礎となるのは車両の加減速度の決定であり、追従モデルを適用することが多い。

加減速は車両の速度を制御するために行うのであり、速度制御が交通シミュレーションの基礎的技術である。前方に近接して車両が存在する場合は追従走行を行うため、自車の希望速度や道路の速度制限への対応は2次的な要素となる。一方、先行車を意識することなく自由走行する場合は、道路条件としての速度制限と運転者の希望速度に適合するように速度を制御することが主たる目的となる。複数の車両が車群を形成しているとき、先頭車両の挙動が車群の動きを決定することになり、先頭車両の挙動は速度制限により大きな影響を受ける。したがって、交通流のシミュレーションに際して速度制限を正確に表現することは極めて重要である。

車両走行モデルに速度制限を導入することは、一般には容易であると受け取られている。しかし、速度制限に関する解釈の違いやシミュレーション用道路ネットワークの構成の影響を受けて車両挙動が変化することがある。ネットワーク構成技術の巧拙によって交通流を現況再現する精

度が左右されることも実際に起こるのである。これは交通シミュレーションを普及させるためには無視できない問題であり、交通シミュレーションの適用において利用者に関わらず同じ結果が得られるようにしなければならない。

ここでは交通シミュレーションモデルにどのように速度制限を組み込むべきかを考察し、ネットワーク構成による影響を受けにくく、無駄な計算を減らすことが可能な速度制限の実装方法を提案する。以下、Ⅱでは交通シミュレーションにおける交通流モデルと速度制限に関して概観する。Ⅲでは速度制限の適用によってシミュレーション結果に生じる問題を考察する。Ⅳにおいては交通シミュレーションで速度制限を行う場合に備えるべき要件を考察し、それを満足する速度制限の実装方法を提案する。なお、本研究における速度制限は最高速度の制限を意味するものとし、最低速度の制限は考えない。

Ⅱ. 交通流モデルと速度制限

道路交通流を表現する交通流モデルには流体モデルや追従モデル、車群モデルなどがある。交通シミュレーションにおいてもこれらが使用され、広範囲の道路ネットワークを対象とするマクロモデルには流体モデルが使われる。比較的規模の小さなネットワークで個々の車両の動きを再現しようとするミクロモデルには追従モデルが使われ、車群モデルはその中間が対象となる。対象とするネットワーク規模が異なり、再現する交通現象の内容と精度が違っても、現実の交通現象を表現しようとする目的は同じである。評価指標とする交通流特性においてシミュレーション結果が一致することが求められるのである。道路交通流における主要な交通流特性値は交通量、速度、交通密度である。交通シミュレーションでは発生交通量を入力し、道路断面での通過交通量や区間速度を出力値として現況再現性の評価指標とするのが一般的である。そしてシミュレーション結果を適合させるための制御に用いられるのが道路区間における交通容量の調整や速度制限である。

マクロモデルを取り上げると、 $Q-V$ (交通量-速度) 曲線や $K-V$ (交通密度-速度) 曲線によって交通流の平均速度が決められる。 $Q-V$ 曲線を用いる場合、ある道路断面での交通量あるいは交通流率に対応する速度を求めることになる。 $Q-V$ 曲線を適合させるには交通容量を意味する最大交通流率 (q_c)、自由速度 (v_f) を調整すればよい (図 1)。 $K-V$ 曲線を用いる場合は道路区間の交通密度に対応する速度を求め、飽和密度 (k_j) や自由速度を調整することになる (図 2)。ただし、求められる速度は交通流の空間平均速度であることに注意しなければならない。平均速度を制御することはできるが、各車両の速度制限を行うことにはならない。自由速度で最高速度を決めているように見えても、平均速度である限り、それ以上の速度で走行する車両が交通流に含まれることになる。したがって、マクロモデルを用いる交通シミュレーションには厳密な速度制限は馴染まないと言える。

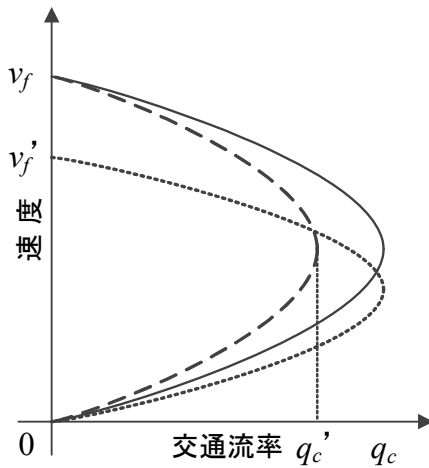


図 1. Q-V 曲線の適用

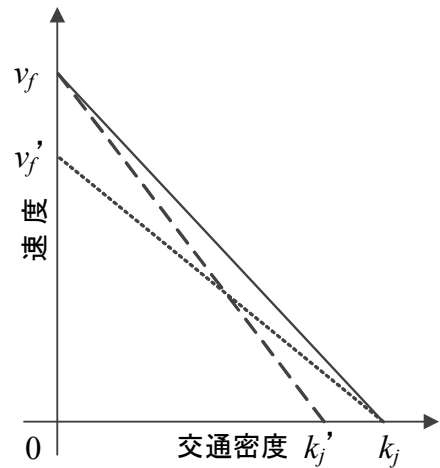


図 2. K-V 曲線の適用

車両ごとに速度制限を課すためにはマイクロシミュレーションでなければならない。マイクロシミュレーションでは一般に車両の加速度が決定変数とされ、自由走行時と追従走行時に分けて加速度を決めるモデルが使われる。交通流モデルとして追従モデルを適用するということに言われるが、個々の車両の加減速を決めることから車両走行モデルという言葉も使われる。ここでは著者が開発している VISITOK で採用している車両走行モデル¹⁾を例に説明する。自由走行モデルは式(1)、(2)で表され、速度は希望速度に漸近する。したがって制限速度を式(1)の希望速度とすれば、低速で走行している場合は時間の経過とともに制限速度に近づいていくことになる。何らかの理由で制限速度よりも高速で走行している場合も徐々に制限速度に近づくことになる。

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

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

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

追従走行モデルは式(3)、(4)に示すとおりである。式(3)では速度の制限はまったく考慮されていないが、加速度の正負は先行車との速度差によって決まる。先行車より遅い場合には加速し、速い場合は減速することになる。したがって先行車が制限速度以下の速度で走行しているとき、後

続車が制限速度を超えて加速する可能性はほとんどないと考えられる。交通流が安定であれば、反応遅れがあるためにわずかに制限速度を超過することがあったとしても、次の段階では加速度が負になり減速することになる。この特性を考慮すれば、追従走行時には積極的に速度制限に従わせなくてもよい場合がほとんどであろう。

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

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

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

Ⅲ. 速度制限に起因する問題

速度制限はマイクロシミュレーションにおいて車両の走行挙動を制御するための最も基礎的で必要不可欠なツールである。実現方法の詳細を明らかにしていなくても、すべての交通シミュレーションモデルで速度制限への対応が成されていると考えられる。速度制限の内容は単純であり、どのような交通シミュレータを用いても同じ結果が得られると一般に期待されるであろう。しかし、場合によっては速度制限の効果が微妙に異なることがあり、交通流へ影響することがある。交通シミュレーションは渋滞が生じるような場面に適用されるのが普通であり、そのような状態では微小な交通流の変動が大きく作用することがあり得る。ここでは速度制限の適用方法によって交通流のシミュレーション結果に影響が生じる例を示すことにする。

道路ネットワークを対象とした交通シミュレーションはコンピュータ内部に道路ネットワークを構築し、その上で車両を走行させるものである。ネットワークの表現方法は様々であり、通常のノードとリンクを用いるものもあれば、独自の構成要素を定義してネットワークを組み立てているものもある。車両に速度制限を課す場合、それらのネットワーク構成要素に関係づけることが行われる。ここでは VISITOK で用いているセクションによるネットワーク表現²⁾で考えることにする。

図3において車両はセクション1からセクション2の方向へ走行するものとする。(a)に示すようにセクション1における制限速度を V_1 、セクション2における制限速度を V_2 とし、 $V_2 < V_1$ であるとする。単純化するために車両は走行中の1つ前方のセクションまでを考慮して加速度を決定すると仮定すると、セクション1の始点から前方の制限速度が V_2 に低下することが考慮されることになる。同じ区間に関し、セクション1をセクション1A、1Bに分割したのが(b)である。この場合、セクション2の制限速度が認識されるのは車両がセクション1Bに進入してからになる。

制限速度の低下にあわせて減速を開始する地点が(a)のネットワーク構成の場合よりも遅れる可能性があり、急減速が必要になるかも知れない。これはセクションを分割することによってシミュレーション結果が異なることがあり得ることを示している。

シミュレーションで速度制限を導入する目的は、法定の最高速度を反映させることや縦断勾配・平面線形等の幾何条件に基づく物理的制約に従わせることが考えられる。後者の場合は速度制限の区間に関する厳密性がとくに求められる。これに関する問題を図4に示す。なおシミュレーションモデルでは車両位置の基準点を定めているが、ここでは車両先端を基準点とするものとして説明する。

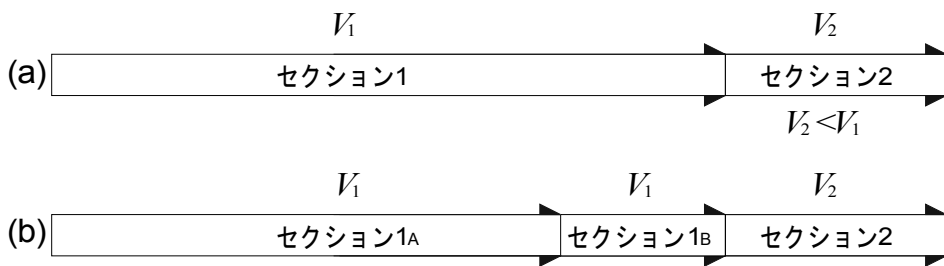


図3. セクションによる速度制限

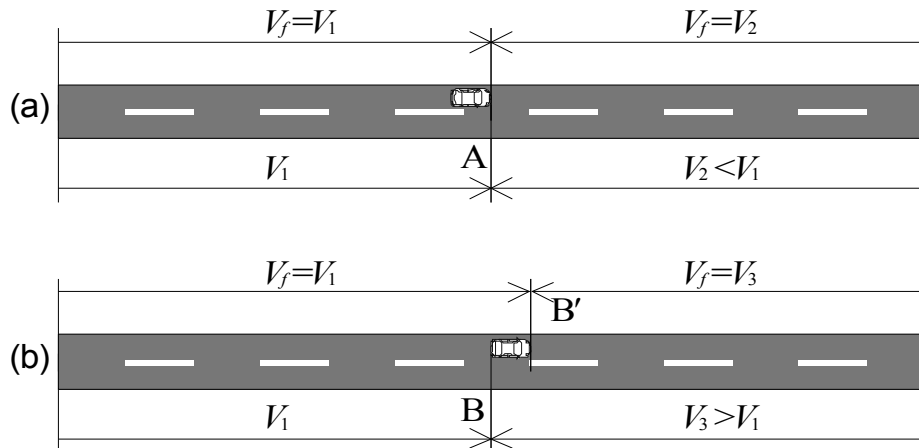


図4. 速度制限の適用区間

図4は地点Aあるいは地点Bで制限速度が変化する道路区間を示している。(a)では地点Aにおいて制限速度が V_1 から V_2 に下がり、(b)では地点Bにおいて制限速度が V_1 から V_3 に上がるものとする。(a)のように制限速度が低い区間に車両が進入する場合、車両先端がその地点に到達した時点で新たな制限速度が適用されなければならない。これは地点Aに達するときには速度が V_2 以下になるように減速するという条件が課されることを表している。さらに、速度制限に車両

が従うように加速度を決める自由走行モデルの希望速度が走行中の道路区間の制限速度に等しいものとして、希望速度 V_f は $V_f = V_2$ に変更される。

一方、(b)のように制限速度が高い区間に車両が進入した場合、車両後端が制限速度の低い区間を通過し終えるまでは希望速度を上げることはできない。小型車では大きな問題にはならないが、大型車やトレーラーが急曲線を曲がる場合にはこのようにしなければ安全な走行を再現できないことが明らかである。そこで、地点 B から車長だけ進んだ地点 B' に達した時点で希望速度を $V_f = V_3$ に変更することになる。速度制限を適用する状況によっては図 4 の(a)のように車長を考慮しなくてよいかも知れない。しかし、車両が制限速度の低い区間を抜けきるまで加速できない場合に車長を考えなければ、実際とは異なる結果を導きかねないことになる。

ここで示した最初の例は、ネットワークの組み方によって交通流のシミュレーション結果が影響を受けるケースを示したものである。2 番目の例は、速度制限の適用方法を厳格に定める必要があることを示すものである。交通シミュレーションモデルを開発するにあたっては、速度制限の適用によって交通流に意図しない影響が生じることを避けなければならない。

IV. 速度制限の実装方法

交通シミュレーションを行う際に速度制限をどのように実現するかはシミュレーションモデル全体に関係するものであり、それらと切り離して単独で考察することはできない。しかしながら、シミュレーションモデルに速度制限を実装するに際して考慮しなければならない要件はすべての交通シミュレーションにおいて共通である。そこで、まず交通シミュレーションモデルにおける速度制限が備えなければならない要件について述べ、それを満たす実装方法を提案する。

Ⅲで述べたように速度制限を設定する区間は実際の道路に対応するものでなければならない。シミュレーション用ネットワークの構成によりその効果が左右されてはならない。セクションなどのネットワーク構成要素内の任意の区間ごとに制限速度を変えることができないならば、速度制限区間を設ける目的でネットワークの構成を変えることになるかも知れない。しかし、それが交通流に影響してはならないということである。速度制限に関するデータはネットワーク構成要素を通じて管理することになっても、速度制限区間は任意の地点に設けることが可能であることが望ましいと考えられる。

速度制限区間は道路上の位置で定めるものであるが、場合によっては車両がその区間を完全に通過し終えるまで速度制限の効力を持たせる必要がある。これは制限速度を道路上の位置において固定的に与えることでは不十分であり、対象車両の車長を考慮して動的に扱う必要があることを意味している。また最近ではコンピュータの処理能力が向上したために計算量を削減する必要性は薄れてきたが、交通シミュレーションではなお重要な課題である。以上をまとめると、交通シミュレーションモデルにおける速度制限に関しては次の 3 点を満たすようにしなければならない。

- ① 速度制限の効果がネットワーク構成により影響されないこと
- ② 車長を考慮すべき場合にも対応できること
- ③ 無駄な計算を避けること

交通シミュレーションにおいて車両を走行させる際の決定変数は加速度である。一定の時間間隔ごとにすべての車両に関し、位置、速度等を更新し、その後に再度すべての車両に関してその状況に基づいて加速度を決めるのが一般的なシミュレーションの手順である。加速度を決定する車両走行モデルの入力は車両属性と道路条件、交通条件に分けることができる。道路条件は外生変数であり、シミュレーション結果に影響を受けないとするのが基本である。それに対して交通条件はシミュレーション結果に応じて時々刻々と変化するものである。

速度制限は通常は道路条件として取り扱えばよく、交通流の状態とは関係なく固定的に考えることができる。しかし、路上に駐停車車両があってその脇を減速して通過しなければならない場合、あるいは狭幅員道路で対向車と減速してすれ違う場合などには交通条件として速度制限が発生する。したがって、任意の地点で動的に速度制限が生じることを想定する必要がある。

車両の加速度を決定するとき、当該車両前方の道路条件と周囲の交通条件に基づく制約を考慮することになる。この場合、遙か前方まですべての道路条件を調べることは無意味であり、計算量を増大させるだけである。実際の運転状況に即し、視距の範囲内であつ最大限考慮すべき距離までの道路条件を探索すれば十分である。この処理はシミュレーションの更新間隔ごとに繰り返すことになるが、道路条件の探索からやり直すことは無駄な繰り返しになる。最近の交通シミュレーションでは0.1秒程度の更新間隔が採用されるが、それでは車両が1~2m進むたびに前方の探索を最初からやり直すことになるからである。そこで前回の更新時から拡大された前方の探索範囲で新たに見つかった道路条件を車両側に持たせるようにすれば、最小限の計算処理で済む。車両の進行によって不要になった道路条件は考慮すべき対象から除けばよい。探索範囲を距離で定義することにより、速度制限適用のタイミングを含めネットワークの組み方による交通流への影響を回避することも可能になる。

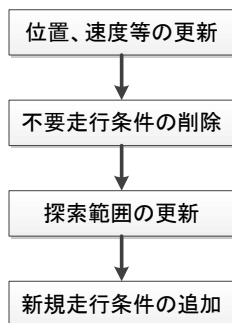


図 5. 更新処理時の走行条件の追加と削除

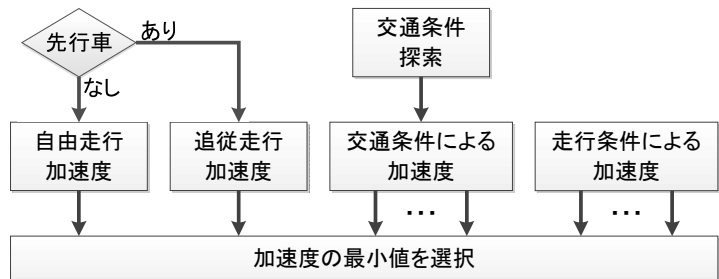


図 6. 車両加速度の計算

表 1. 速度制限のための走行条件

走行条件	属 性	車両の対応	削除条件
既定値としての制限速度の変更	<ul style="list-style-type: none"> ・変更地点までの距離 ・制限速度 	<ul style="list-style-type: none"> ・変更地点で規定値としての制限速度を変更する。 ・変更地点で新制限速度になるように加速度を求める。 	<ul style="list-style-type: none"> ・制限速度の変更
速度制限区間（道路条件）	<ul style="list-style-type: none"> ・開始地点までの距離 ・終了地点までの距離 ・制限速度 	<ul style="list-style-type: none"> ・区間に未到達の場合、開始地点で制限速度になるように加速度を求める。 ・区間内を走行中の場合、制限速度を希望速度として加速度を求める。 	<ul style="list-style-type: none"> ・終了地点を通過
速度制限区間（交通条件）	<ul style="list-style-type: none"> ・開始地点までの距離 ・終了地点までの距離 ・制限速度 ・対象交通事象 	<ul style="list-style-type: none"> ・区間に未到達の場合、開始地点で制限速度になるように加速度を求める。 ・区間内を走行中の場合、制限速度を希望速度として加速度を求める。 	<ul style="list-style-type: none"> ・終了地点を通過 ・対象交通事象が消滅

このように車両加速度を決める際に考慮すべき道路条件が見つかったとき、車両に道路条件の内容を示す走行条件として持たせることにする。道路条件から走行条件を生成するには必要に応じて車長を考慮して変更地点等までの距離を調整することができる。運転者の制限速度遵守傾向などの特性を反映させることも可能になる。シミュレーション更新時の走行条件に関わる処理の概念は図5に示すとおりであり、加速度を決定するための計算処理の概念は図6に示すとおりである。加速度の決定にあたって多数の条件を考慮しなければならないとき、それぞれの条件に基づいて求められる加速度の最小値を採用すれば車両が衝突することなく安全に走行させることができる。

速度制限が設定されたときに車両ごとに付与する走行条件は表1のようになる。自由走行時の目標速度となる希望速度を与える制限速度を変更するものは、法定の最高速度が変化する地点を表現するときなどに使用できる。車両が変更地点を通過するときに制限速度を変えるのは当然であるが、変更地点で指定された制限速度になるように速度制御を行う。これによって制限速度が変更されることを前提に減速を始めることになり、必要以上の加速と急減速もなくなる。そして、制限速度の変更後には当該走行条件は不要になるので削除することになる。

速度制限区間があったとき、車両はその開始地点で制限速度になるように制御され、区間内を走行中は自由走行時の目標速度は規制速度に変更される。そして区間通過後にこの走行条件は削

除される。たとえば駐停車車両などが原因で速度制限区間を設けるような交通条件による場合は特殊なケースであり、駐車車両が移動したようなときにも走行条件を削除することになる。また対向車との関係で減速するような場合は走行条件を作らず、単純に加速度の計算時に考慮すべき交通条件として扱えばよい。それは対向車の挙動によって遭遇地点が動的に変化することになり、車両に走行条件を持たせる利点がないからである。

V. おわりに

走行する車両の速度を制御することは交通シミュレーションにおける最も基礎的な技術である。実際の交通流を再現する際には、再現精度を高めるための重要な調整変数が道路区間の制限速度である。このように交通シミュレーションの根幹を成す速度制限であるが、これに関わる問題が皆無ということではない。使用する交通シミュレータによっては、ネットワークの組み方によって結果が左右されることがあり、速度制限の適用方法が原因のひとつと考えられることもある。そこで、ここでは交通シミュレーションにおける速度規制に関する問題を取り上げた。

速度制限の適用によってシミュレーション結果に生じる問題を考察し、交通シミュレーションで速度制限を行う場合に備えるべき要件とそれらを満たす速度制限の実装方法を提案した。すなわち、道路条件としての速度制限を車両それぞれに走行条件として持たせる方法である。ネットワーク構成の影響を受けにくくするとともに、車両の属性や運転者の特性を考慮することも可能なことから将来の拡張性も高いと考えられるものである。

参考文献

- 1) 森津秀夫：「坂道における交通シミュレーション」、『流通科学大学論集－経済・情報・政策編－』21, No.2 (2013), 107-116.
- 2) 森津秀夫：「交通シミュレーションのためのネットワークモデル」、『流通科学大学論集－経済・経営情報編－』14, No.3 (2006), 43-56.