

# 追従モデルへの指数平滑化の適用

## Application of Exponential Smoothing to Car-following Model

森津 秀夫\*

Hideo Moritsu

追従挙動を表現した追従モデルの用途は自動運転の走行制御へ拡がることが考えられる。この場合、過剰な追従反応を避けるために交通状況を時系列的に捉えることが重要になる。そこで、追従行動の各段階を明確にしたモジュール化追従モデルの現況把握指標に指数平滑化を適用することを提案する。シミュレーションの結果、追従モデルの基本的特性を損ねずに先行車の微細な変動への過剰な追従反応の抑制が可能であることが示された。

キーワード：追従モデル、指数平滑化、走行挙動、走行制御、交通シミュレーション

### I. はじめに

追従理論は自動車の走行挙動を表現するために考え出され、道路交通流の取扱いにおける有効性・有用性は疑いない。追従挙動を解明して道路交通流の安定性を論じることから始まり、現在では交通シミュレーションに追従モデルは不可欠な存在となっている。追従モデルの構築は運転者が自らの判断で車両を操作することを前提としたものであったが、近年は運転操作を車両側に代替させる試みが盛んになってきた。なかでもアダプティブクルーズコントロールは追従走行を自動化したのと同じと考えることができ、自動ブレーキもまた追突を回避する追従モデルの応用と言える。追従モデルを取り巻く環境は大きく変わったのである。

これらの経緯から、追従モデルは運転者が判断して車両を操作する際の走行挙動をモデル化したものであったが、機械による走行制御へも適用範囲が拡大されてきたと考えることができる。モデルの前提や適用範囲が変われば、求められる要件も変化する。このような変化に対応することを目的として追従モデルを機能別にモジュール化することを提案し<sup>1)</sup>、モジュール化した追従モデルの特性を考察した<sup>2)</sup>。これによって追従モデルの拡張性は高まったが、モデルの基本的な考え方は変わっていない。それは従来の追従モデルはある時間断面における状態に応じて加速度を決定するものであり、静的モデルに位置づけられるということである。

静的モデルとしての追従モデルは、運転者が直前を含めて過去の状況を一切利用しないと想定していることになる。これは現実的ではなく、運転者は先行車と自車に関して少なくとも直前の

一定時間の状況を把握・記憶し、判断に利用すると考えることが妥当である。状況を時系列的に捉え、それに基づいて加減速に関する意思決定を行うと考えるならば、追従モデルを動的モデルとして取り扱うことが必要となる。そこで、ここでは追従モデルを動的モデル化し、時系列的な状況変化を取り込むために指数平滑化を適用することを検討する。

IIにおいて追従モデルの課題を示し、IIIでは追従モデルの動的モデル化と指数平滑化の適用について述べる。IVにおいては、提案する指数平滑型追従モデルの機能検証を行い、実際問題への適用可能性を明らかにする。

## II. 追従モデルの課題

追従モデルは追突を避けて先行車に追従走行する車両の走行挙動を表現するモデルである。先行車との車頭距離あるいは車間距離、速度差、さらに当該車両の速度といった指標を説明変数として後続車の加速度を決定するモデルである。追従モデルに従って車両を走行させたときに実現する交通流は、その安定性の分析に使われてきた。

個々の車両の走行挙動を再現する交通シミュレーションが一般的になったことにより、追従モデルの有用性が高まった。交通シミュレーションを必要とする状況のほとんどは他の車両の影響を受けながら走行する場合であり、追従走行を考慮しなければならないからである。現在では、追従モデルの主用途は交通シミュレーションにおける車両走行モデルであると言っても過言ではない。交通シミュレーションの結果が広く受け入れられているのは、車両走行の基礎となっている追従モデルあるいは追従理論に対する信頼が寄与しているからである。

一般的な交通シミュレーションは想定される交通需要に対する交通ネットワークフローの予測を目的とすることがほとんどであり、渋滞発生の有無が関心事であることが多い。このような場合、対象とする交通需要は急激な加減速変化を生じることがない比較的安定した状態であることが特徴であり、交通流の安定性が問われることはないと考えられる。交通ネットワークフローを再現する道具として現実の車両挙動を模した追従モデルを使用しているに過ぎない。

交通シミュレーションはコンピューター内部で車両の動きを再現するだけであるが、実際に車両を動かすために追従モデルを使用することもできる。アダプティブクルーズコントロールや自動ブレーキはその適用例と考えることができ、実現が近いトラックの隊列走行にも追従理論が適用されるべきである。これらは追従モデルの適用分野を車両の走行制御に拡大することになり、本来の目的であった道路交通流の分析とは大きく異なる点が生じる。そのひとつは、交通シミュレーションにおける車両の追突は問題事象発生の可能性を示すに過ぎないが、走行制御への適用時には追突事故が現実には生じないようにできる限り回避しなければならないことである。

さらに本質的な相違点はモデル構築の前提条件である。時間遅れを考慮した追従モデルが確立したのは現在から約60年前であり<sup>3)</sup>、当然のごとく運転者が自らの判断に基づいて車両を運転操

作することを前提としている。しかし、自動運転の走行制御モデルとして考える場合、追従走行の要因となる各種指標の取得から加減速判断、運転操作に至るすべての段階において運転者が介在することはない。

追従モデルが走行挙動モデルから走行制御モデルへと性格を変えたとき、従来は問題にしていなかったことを改めて検討する必要がある。それは車両の追従走行というダイナミックな交通現象をモデル化する追従モデルが静的モデルであるということである。遅れ時間を伴うことはあっても、加速度はある時間断面の交通状況のみによって決定されるのであり、交通状況の時間的变化を要因として加速度が決められるのではない。交通シミュレーションへの適用時も短い時間間隔ごとに加速度の決定を繰り返しているに過ぎない。走行制御モデルとして使用する場合はさらに微小な時間間隔で適用されるかもしれないが、既存の追従モデルを使用するならば基本的な違いはない。

人間である運転者は、ある瞬間の事象だけを記憶しているわけではない。少なくとも直前の一定時間における交通状況の変化を認識していると考えるのが自然である。従来は、それをとくに考慮しなくても必要十分な追従モデルを完成させることができたと考えられる。だが微小な時間間隔で加速度の決定を繰り返した場合、ノイズに近い状況変化が直接に加速度に影響を与えることになる。追従モデルの出力として振幅の大きい加速と減速が前後の脈絡なく生じれば、安全を損なうに至らなくても円滑・快適な走行が保てなくなるおそれがある。したがって、このような加減速の変化を排除しなければならないが、追従走行に真に必要な加速度の変化までもが除かれてはならない。加減速変化の必要性を判断するには、交通状況の変化を加減速判断の要因に取り入れることが求められることになる。

機械の判断と比較して運転者の判断は鈍いということもあろうが、運転者は交通状況の変化を一連の流れとして把握しているから不要な加減速変化を行わないと考えられる。この運転者の行動を忠実にモデル化するならば、交通状況の時間的变化をモデルの説明変数として取り込むことは運転者の追従行動をモデル化する観点からも合理性を有することになる。機械による走行制御への適用時の問題解消が改良の動機ではあるが、運転者の走行挙動のモデル化から逸脱することはない。交通状況の時間的变化に応じて加速度が決定されるように追従モデルを動的モデル化することが新たな課題であると言えよう。

### Ⅲ. 追従モデルの動的モデル化

従来の追従モデルの説明変数には、ある時間断面における交通状況を示す指標が用いられていた。一般的な交通現象は時間とともに連続的に変化していくことから、時間断面を切り出して加速度を決めたとしても、追従モデルが出力する加速度の連続性に問題は生じなかった。追従モデルによって不自然な車両挙動が生じるのは、先行車が不規則で瞬間的な加速度変化を行った場合に限られる。

このような状況を交通シミュレーションで再現する必要性はほとんどないであろうが、実際には観測誤差や運転者の誤操作等により同様の状況が引き起こされる可能性があると考えられる。

自動運転を目的とするとき、時間断面データを用いた加速度決定を極めて短い時間間隔で繰り返すことが考えられる。交通流の安定性を損なう原因に遅れ時間の大きさが関与していることが、追従モデルの研究で明らかにされている。追従モデルの計算を短い時間間隔で繰り返すことは、遅れ時間の短縮につながり、交通流の安定性を増す観点からは好ましいであろう。しかし、先行車への追従性が高く、不規則な速度変化にも敏感に反応することは逆に交通流を不安定にすることも考えられる。すなわち、従来の追従モデルを自動運転の走行制御に適用したとき、先行車の微細な変動への過剰な追従反応が交通流の安定性に悪影響を及ぼす危険性の有無を検討しておく必要があると考えられる。

このような観点から、追従走行における加減速判断に用いる交通状況を時系列的に捉えることは検討する価値があると考えられる。その目的は交通状況の瞬間的な変動に過剰反応することなく、安全で安定した走行を実現することである。換言すれば、時系列的取扱いによる一種のフィルターを追従モデルに導入することを検討するものである。しかし、このような改良によって運転行動の合理的なモデルとして受け入れられている追従モデルの枠組みを壊すことは避けなければならない。追従走行が不安定にならないように配慮することも必要である。

上記の目的を果たすには交通状況を時系列データとして扱い、過去のデータを使って不要な瞬間的な変化への追従反応を抑止することが考えられる。先行車の挙動に追従するにはその時点以前の時系列データを経過時間に応じて加味することが求められ、これに適するのが指数平滑化である。そこで、ここでは追従モデルへ指数平滑化を適用することを検討する。ただし、追従モデルに指数平滑化を導入したときに運転行動との対応における整合性が失われてはならない。そのため、表1に示す著者が提案したモジュール化追従モデルを基礎とし、これに指数平滑化を組み込むことにする。

表1では追従行動の段階ごとにサブモデルを設け、具体的な例として VISITOK 追従モデルを使って説明している。なお指数平滑化を適用するにあたり、追従モデルが一定時間間隔ごとに計算されることを前提とする。追従モデルの主たる用途である交通シミュレーションにおいても、適用可能性が高まる自動運転時の走行制御においてもこれを前提とすることに問題はない。

時系列データとして取り扱い、指数平滑化を適用するのは表1における現況把握指標と考えられる。現況把握指標に基づいて決定された加減速判断以降の段階では、過去の判断自体を認識しておかなければならないことから妥当ではない。走行特性値に適用する場合は複数の特性値の時間的な変化を扱うことになり、運転者の行動としては複雑さが増すことになる。VISITOK 追従モデルの例のように1つの現況把握指標を用いるだけであれば最小限の変更で指数平滑化を適用でき、シンプルで扱いやすいモデルとなる。

表 1. モジュール化追従モデルを構成するサブモデルの概要（参考文献 2）より引用）

サブモデル	出力時刻	出力	VISITOK 追従モデルの出力
車両観測	$t + T_1$	$x_n(t), x_{n+1}(t)$	$v_{n+1}(t), v_n(t) - v_{n+1}(t), x_n(t) - L_n - x_{n+1}(t)$
現況把握	$t + \sum_{i=1}^2 T_i$	$y_{n+1}(t) = f_1(x_n(t), x_{n+1}(t))$	$y_{n+1}(t)$ $= \{v_n(t) - v_{n+1}(t)\} / \{x_n(t) - L_n - x_{n+1}(t)\}^l$
加減速判断	$t + \sum_{i=1}^3 T_i$	$z_{n+1}(t) = f_2(y_{n+1}(t))$	$z_{n+1}(t)$ $= \lambda_1 \{v_n(t) - v_{n+1}(t)\} / \{x_n(t) - L_n - x_{n+1}(t)\}^l$
運転操作	$t + \sum_{i=1}^4 T_i$	$a_{n+1}(t) = f_3(z_{n+1}(t))$	$a_{n+1}(t) = z_{n+1}(t)$ $= \lambda_1 \{v_n(t) - v_{n+1}(t)\} / \{x_n(t) - L_n - x_{n+1}(t)\}^l$
車両反応	$t + \sum_{i=1}^5 T_i$ $= t + T$	$\alpha_{n+1}(t + T)$ $= f_4(a_{n+1}(t), T, x_{n+1}(t + T))$	$\alpha_{n+1}(t + T)$ $= \lambda_1 \frac{\{v_n(t) - v_{n+1}(t)\}}{\{x_n(t) - L_n - x_{n+1}(t)\}^l} \lambda_2 \{v_{n+1}(t)\}^m$ $= \lambda \frac{\{v_{n+1}(t)\}^m}{\{x_n(t) - L_n - x_{n+1}(t)\}^l} \{v_n(t) - v_{n+1}(t)\}$

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

$T, T_1 \sim T_5$ ：遅れ時間

$v_n(t)$ ：時刻  $t$  における先頭から  $n$  番目の車両の速度

$\lambda, \lambda_1, \lambda_2, l, m$ ：定数 ( $\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2$ )

$x_n(t)$ ：時刻  $t$  における先頭から  $n$  番目の車両の走行特性値

$x_n(t)$ ：時刻  $t$  における先頭から  $n$  番目の車両の位置

$y_{n+1}(t)$ ：時刻  $t$  における先頭から  $n+1$  番目の車両の現況把握指標

$y_{n+1}(t)$ ：時刻  $t$  における先頭から  $n+1$  番目の車両の加減速度を判断する指標

$z_{n+1}(t)$ ：時刻  $t$  における先頭から  $n+1$  番目の車両の目標加減速度

$L_n$ ：先頭から  $n$  番目の車両の長さ

$a_{n+1}(t)$ ：時刻  $t$  における先頭から  $n+1$  番目の車両の運転操作量

VISITOK 追従モデルで示すと、指数平滑化を適用した現況把握指標は式(1)で求めることになる。

$$y_{n+1}(t) = \beta \{v_n(t) - v_{n+1}(t)\} / \{x_n(t) - L_n - x_{n+1}(t)\}^l + (1 - \beta) y_{n+1}(t - \Delta t) \quad (1)$$

ここに、 $\beta$ ：平滑化定数 ( $0 \leq \beta \leq 1$ )

$\Delta t$ ：追従モデルの適用時間間隔

平滑化定数  $\beta$  を大きくすれば従来の追従モデルの結果に近づき、 $\beta = 1$  のときにはそれ以前の現況把握指標の値は影響しないことになる。平滑化定数を小さくすれば新たな状況変化への反応が弱くなり、 $\beta = 0$  のときにはまったく追従しないことになる。

#### IV. 指数平滑化型追従モデルの機能検証

ここでは追従モデルへの指数平滑化の導入が追従挙動にどのような効果、影響をもたらすのかを検証し、その実用性を明らかにする。そのため、VISITOK 追従モデルにおける現況把握指標の算定に式(1)を用いるようにした指数平滑化型追従モデルを使用してシミュレーションを行う。追従モデルの基本的要件である先行車への追従特性の変化を検討したあとで指数平滑化の導入効果を調べることにする。

まず追従モデルの検証でよく使われる先行車が一定時間に渡り減速し、その後に加速して元の速度に戻るといった走行パターンにおける後続車の追従挙動を調べる。具体的には先行車が 50km/h から 4 秒で 40km/h に減速後、4 秒で 50km/h に戻し、その後は定速走行する状況を設定する。なおすべてのシミュレーションは時間間隔 0.01 秒ごとに更新計算を行い、加速度の計算も 0.01 秒ごとに行うものとする。VISITOK 追従モデルにおける定数は  $\lambda = 6.1$ ,  $l = 2$ ,  $L_n = 4.5\text{m}$  とし、遅れ時間は現況把握までに 0.2 秒、加速度の発現までに 0.5 秒とする。

開始時の車間距離を速度 50km/h において十分に安全が保てる距離とされる 32m に設定したとき、シミュレーション結果は図 1 のようになった。平滑化定数が  $\beta = 1$  のとき、指数平滑化を適用しない場合を示している。この設定条件では平滑化定数を小さくしても後続車の速度変化にはほとんど影響が現れておらず、図 1 では平滑化定数を小さくした  $\beta = 0.1$  の結果を記したが、 $\beta = 1$  の場合と区別がつかない状態である。

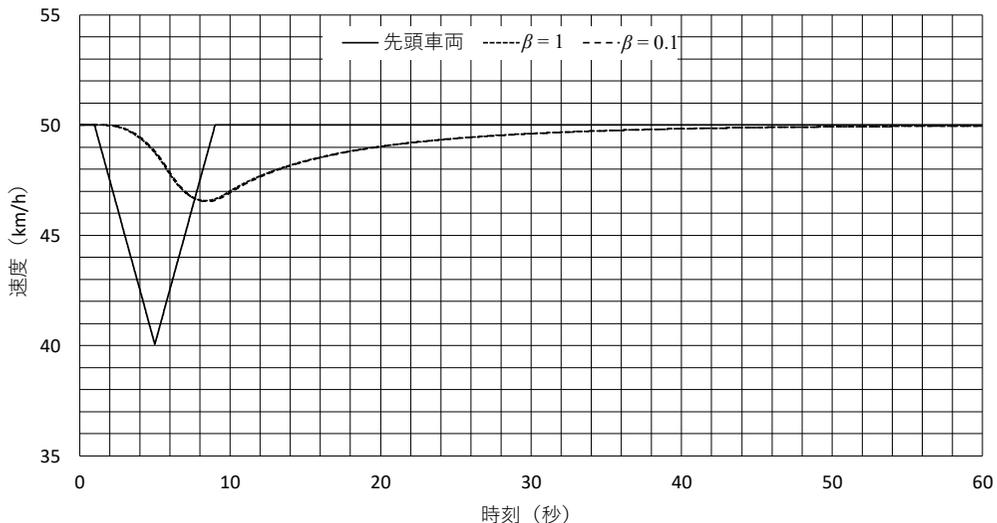


図 1. 速度変化 (開始時車間距離 32m)

先行車との車間距離が小さいほど、後続車は敏感な追従挙動を示すことになる。そこで、開始

時の車間距離を図1のケースの約1/3の10.5m(車頭距離は15m)に設定した結果が図2である。この図では減速から加速あるいは加速から減速に転じる箇所でやや違いが見られる。この間の車間距離の変化を表したのが図3である。収束する速度に若干の違いが生じるが、車間距離の時間的変化にも大きな差は見られない。これらの図1~3から、指数平滑化を導入しても追従挙動の応答性に大きな変化を生じることはなく、追従モデルの特性を損ねる悪影響は見られないことがわかる。

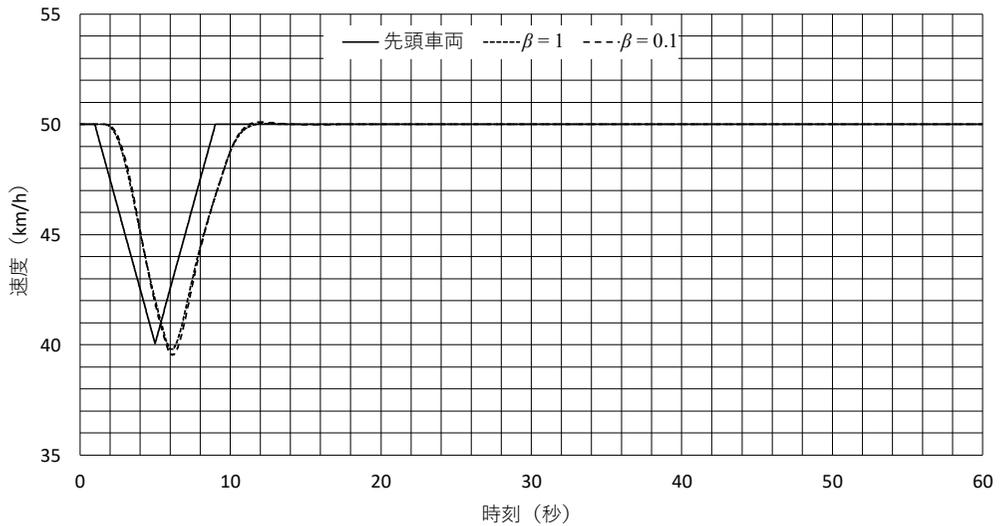


図2. 速度変化(開始時車間距離10.5m)

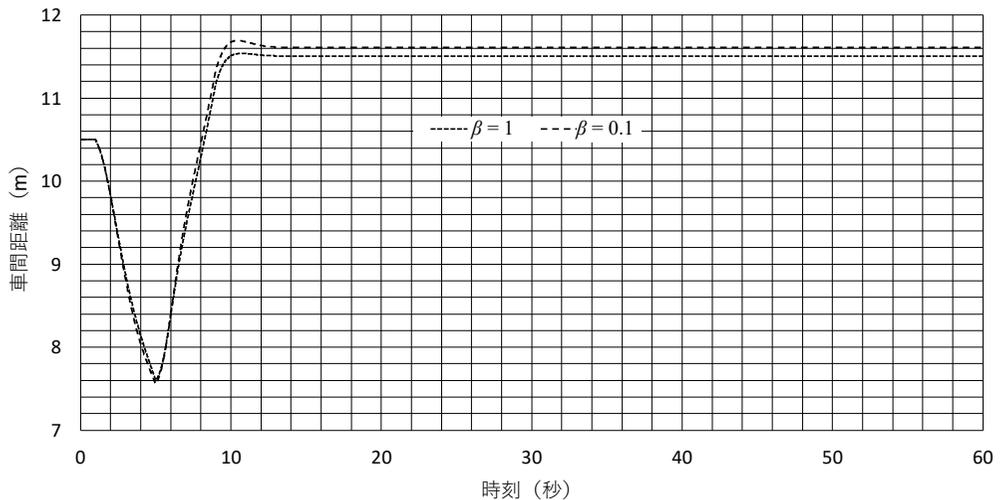


図3. 車間距離の変化(開始時車間距離10.5m)

次に、指数平滑化を導入した効果を調べることにする。そのため、後続車が現況把握するとき使用する走行特性値に観測誤差が含まれることを想定したシミュレーションを行う。一様乱数により速度差に $-1.0\sim 1.0\text{m/s}$ 、車間距離に $-1.0\sim 1.0\text{m}$ の誤差を与え、誤差を加えた値で現況把握指標を求めるものとする。

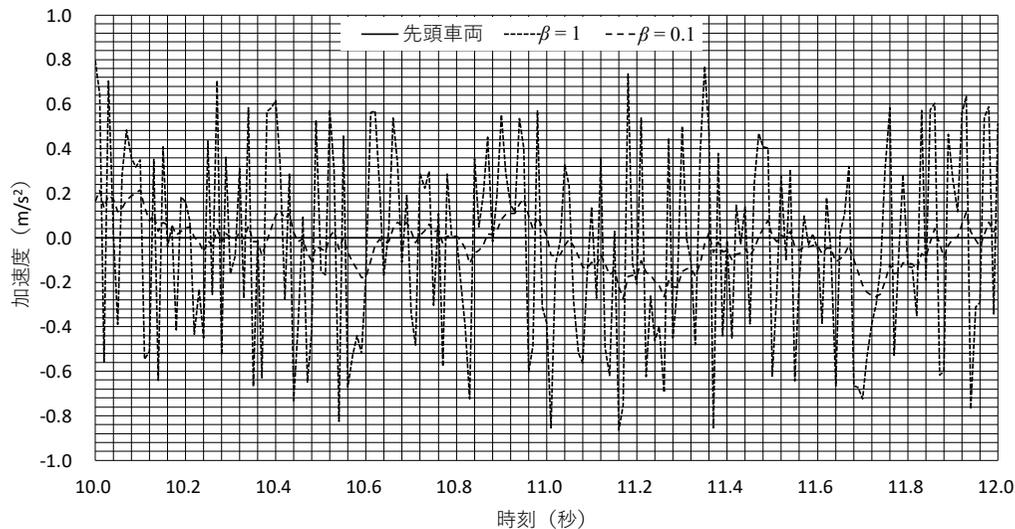


図 4. 観測誤差が生じる場合の加速度変化

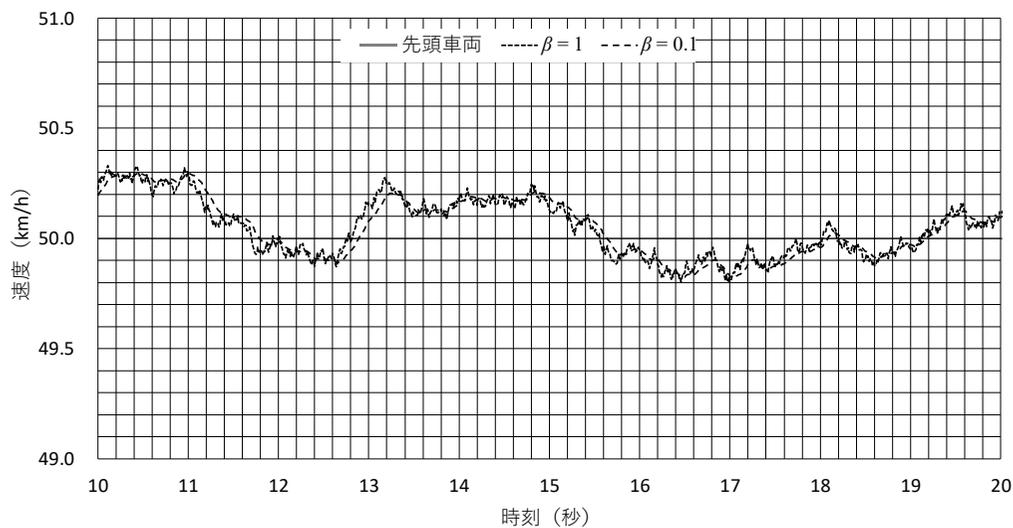


図 5. 観測誤差が生じる場合の速度変化

シミュレーションの結果、加速度の変化は図4に示すようになり、これに基づく速度の変化は図5のようになった。なお、指数平滑化による影響がわかりやすいように、 $\beta = 1$ の場合も $\beta = 0.1$ の場合も同じ乱数列を使用した。指数平滑化を適用したことにより加速度の振幅は小さくなり、加速から減速、減速から加速への変化を繰り返すことも少なくなっていることがわかる。加速度の累積である速度の変化も落ち着いていることが図5から読み取ることができる。この結果を見れば指数平滑化の導入効果は予想されたとおりであり、過剰な追従反応を緩和するフィルターの役割を果たすことが示された。指数平滑化型追従モデルは実用に供し得る可能性を有することが示されたと考えられる。

## V. おわりに

追従モデルは運転者の行動をモデル化することから始まり、交通シミュレーションが主たる用途になっているが、自動運転における走行制御への適用も視野に入っている。用途を拡大すれば使い方も変化し、極めて短い時間間隔で追従モデルによる加速度計算が繰り返されることが想定される。このような場合、ある時間断面における交通状況のみに基づいて加速度を決定するという追従モデルの構成が問題を生じることになる。瞬間的な交通状況の変化をそのまま加速度に反映させることになり、円滑な走行が妨げられてしまうのである。そこで、ここでは交通状況の時系列的変化を考慮して加速度を決定するように追従モデルを改良し、そのために指数平滑化を適用することを提案した。

最初に追従モデルの課題を示し、著者が提案したモジュール化追従モデルを対象に動的モデル化と指数平滑化の適用について述べた。さらに提案した指数平滑化型追従モデルの機能検証を行った結果、追従モデルの基本的特性を損ねることなく指数平滑化の効果が得られることが示された。従来の追従モデルで決定される加速度に指数平滑化を適用しても、おそらくは同様の結果が得られると考えられる。しかし、それでは運転者がそれ以前に決めた加速度を考慮してその時点の加速度を決定することになり、走行挙動を表現するモデルとしての合理性が失われる。提案した指数平滑化型追従モデルのように、交通状況を時系列で捉えることをモデル化の方が妥当であると言える。

一般に実施される交通シミュレーションに指数平滑化型追従モデルを適用する必要性はほとんどないと考えられる。それは、シミュレーションで使用される交通需要と車両走行モデルが瞬間的なあるいは不規則な速度変化をもたらすことがないからである。指数平滑化型追従モデルが必要とされるのは実際に車両が走行する場面であり、自動運転における走行制御がそうであろう。また追突を避ける走行の安全性の確保ではなく快適性の確保が目的となるかもしれない。指数平滑化を導入することは追従モデルの合理性を失わせるものではなく、さらに発展させるための新たなステップになると考える。

## 参考文献

- 1) 森津秀夫：「追従モデルのモジュール化」,『流通科学大学論集－経済・情報・政策編－』23, No.2 (2015), 85-94.
- 2) 森津秀夫：「モジュール化追従モデルの特性」,『流通科学大学論集－経済・情報・政策編－』26, No.2 (2018), 73-82.
- 3) 佐佐木綱監修, 飯田恭敬編著：『交通工学』（国民科学社, 1992）.