

追従モデルのモジュール化

Modularization of Car-following Model

森津 秀夫*

Hideo Moritsu

交通流の安定性を分析するために開発された追従モデルは交通シミュレーションの車両走行モデルの基礎となり、自動運転の車両制御への応用も図られている。このような追従モデルを取り巻く環境の変化により、高い精度で追従挙動を再現でき、より多くの要因を考慮できることが求められるようになった。そこで車両の追従挙動を見直して機能分割し、モジュール化した追従モデルの概念を提案した。

キーワード：交通シミュレーション、追従モデル、モジュール化

I. はじめに

道路上の交通現象を分析し、それを再現するために用いられるのが道路交通流理論である。これらは対象とする交通現象に応じて展開されているが、前方を走行する車両の影響を受けて走行する車両の挙動を扱うのが追従理論である。当初における追従理論の関心事は交通流の安定性を分析することであったが、現在は交通シミュレーションにおいて車両を走行させるために広く適用されている。交通シミュレーションモデルで最も重要な役割を果たす車両走行モデルは、追従理論に基づく追従モデルを基礎として構築されているのである。近年は自動車の自動運転に関する技術開発が盛んになっているが、自動運転に不可欠な制御のひとつが追突を避けて安全な走行を維持することである。これはまさに追従理論の意図するところであり、追従モデルの適用領域がさらに拡大すると考えられる。

このように追従モデルの使われ方は変化してきており、求められるモデルの要件も変わってきた。高い精度で追従挙動を再現でき、追従挙動に関係するより多くの要因を考慮できることが必要になってきたと考えられる。そこで、ここでは車両の追従挙動を見直して機能分割し、追従モデルの再構築を行うことにする。以下、IIにおいて追従モデルを概観し、IIIでは追従挙動を生み出す運転行動や車両動作の再検討を行う。その結果を基に、IVでモジュール化した追従モデルの概念を提案する。

II. 追従モデルの概要

1. 道路交通流理論における追従モデル

道路交通流理論は、道路上の多数の車両の動きを交通流という流れとして取り扱うものである。交通流の状態を表す特性値を使って道路交通流の特性を明らかにし、モデル化することによって交通現象を再現することを目的としている。どのような交通現象を分析したいのか、あるいはどのような精緻さで交通現象を記述したいのかにより、モデル化の方法も多様である。交通流の全体的な特徴を巨視的に捉えたいとき、すなわちマクロなモデル化には交通流を流体と見なして流体力学の法則を適用しようとする流体モデルが使われる。車両の発生などには確率統計的モデルが使用され、待ちが生じるシステムには待ち行列モデルが適用される。そして、前方の車両の影響を受けながら走行する車列の安定性を分析するために考えられたのが追従モデルであり、車両挙動のレベルで交通流を微視的に捉えるミクロなモデル化に位置づけられる。

追従モデルは道路交通流理論に欠かせないものとなり、道路交通流を扱う交通工学の教科書的な書籍では必ず解説されてきた^{1)~8)}。追従理論が対象とするのは道路の延長方向に多数の車が列をなして走行し、追い越しができない状態である。これはあたかも外れることができない軌道上を走行しているのと同じであると考えることができる。運転者は前方車両に追突しないように速度を調節することが想定されている。このとき追従車両の加速度は直前の車両との速度差に比例するものとし、応答には遅れ時間が生じるとしたのが、佐佐木や他の研究者により提案された式(1)に示す線形追従モデルである⁷⁾。

$$\alpha_{n+1}(t+T) = \lambda [v_n(t) - v_{n+1}(t)] \quad (1)$$

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

T ：反応遅れ

$v_n(t)$ ：先頭から n 番目の車両の時刻 t における速度

λ ：定数

追従理論の要点は追従行動には反応遅れ T が生じることであり、反応する強さを表す定数 λ とともに速度変化による交通流の安定性を規定するものである。式(1)は追従モデルの特性を備えた最も単純なモデルであるが、実際の運転者の挙動を表現するには必ずしも十分ではなく、Gazisらによって式(2)に示す一般的な追従モデルが提案された⁷⁾。

$$\alpha_{n+1}(t+T) = \lambda \frac{\{v_{n+1}(t+T)\}^m}{\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l} [v_n(t) - v_{n+1}(t)] \quad (2)$$

ここに、 $x_n(t)$ ：先頭から n 番目の車両の時刻 t における位置

m, l ：定数

式(2)では追従車両の加速度は速度差に比例するだけでなく距離の l 乗に反比例し、加速度が適用される時刻の追従車両の速度の m 乗に比例するとしているのである。定数 λ, m, l は観測さ

れた交通流に適合するように定められる。実際には1組の定数で交通流を完全に表現することはできず、車両タイプや運転者の属性、加減速などの走行モードによって複数の定数を使い分けることが行われている。式(2)は現在でも基礎的追従モデルとして認識されており、適用例は多いと考えられる。ある瞬間だけでなく過去の時点にも対応させたり、直前だけでなくさらに前方の車両の動きにも対応させたりするなどの試みも行われている。

2. 追従モデルに対するニーズの変化

追従理論は追従走行時に交通流に生じた乱れの伝播を分析するために開発されたものである。追従モデルを使って速度変化が後続車に伝播する際の局所的安定性と漸近的安定性が分析されている。単純なモデルの場合には理論的な分析が可能であるが、複雑なモデルではシミュレーションによって交通流を再現することが有効な手段となる。このときのシミュレーションは実際の追従挙動に適合するモデルを求めることが目的であり、理論的分析の一環として行われるものである。

交通シミュレーションは追従理論に匹敵する歴史を持ち、さまざまな交通現象の分析、再現に使われてきた。つねにコンピュータの処理能力の制約を受けてきたが、その制約をあまり意識する必要がなくなってきつつあるのが現状である。個々の車両の動きを再現するシミュレーションは単路部や交差点部などの局地的な交通現象を扱う場合に限られていたが、現在では比較的規模が大きな道路ネットワークを対象とすることも可能になっている。交通ネットワークシミュレーションに関して見ても、従来は流体モデルが適用されていたケースに対しても、極めて大規模なネットワークでなければ車両を個別に扱う追従モデルが使用されるようになってきた。

このように、交通シミュレーションは個々の車両の挙動からモデル化することが主流になっている。その理由には経路選択行動を考慮する必要性が高まっていることがある。情報通信技術の進歩は道路交通システムにも変革をもたらし、走行中に運転者が獲得できる情報は質と量の両面で飛躍的に向上した。リアルタイムで入手できる交通情報に基づいて運転者はより適切な経路に変更することができる。一方で運転者の経路選択が交通流に及ぼす影響を検討するには、個々の車両挙動のシミュレーションが必要となるのである。

それぞれの車両の走行挙動をシミュレーションで再現しようとする、様々な条件下での動きに対応させなければならない。しかし、基礎となるのは走行に影響する前方車両が存在しない場合の自由走行と、前方車両について走行せざるを得ない場合の追従走行を表現することである。自由走行は希望速度まで加速させた後は定速走行させることを基本とすればよく、追従走行は追従モデルを適用することになる。この点から、追従モデルは交通シミュレーションにおける車両走行モデルの根幹をなしているといえる。

交通シミュレーションはコンピュータ上の仮想的な道路ネットワークにおいて車両を走行させ

るものであるが、コンピュータ制御で現実の道路上の車両を走行させることも実用化されるようになった。速度を一定に保つクルーズコントロールは古くから使われてきた技術であり、アダプティブクルーズコントロールでは先行車との車間距離を維持する機能が付与された。このためには先行車を監視するセンサーが必要であり、センサーを含む情報処理技術が進展した結果である。さらに、この技術開発の延長上には人間が関与しない無人での自動運転の実用化も間近になっている。これらもまた追従モデルの新たな適用対象である。

追従モデルは道路交通流の安定性解析から始まり、交通シミュレーションの車両走行モデル、自動運転における追従制御へと適用が広がってきた。追従理論そのものは現在においても通用するものであると考えられるが、このようなニーズの変化への対応を検討しなければならない。すなわち精密な制御を行うために求められるモデルのアウトプットの質的变化、「車両」の挙動としての一括的な扱いから「運転者」と「車両」それぞれの挙動の扱い、さらには車両を構成するサブシステムの挙動を考慮する必要性の検討などである。

Ⅲ. 追従挙動の再検討

追従理論が考案されたときは交通流の安定性を分析するにはどうすべきかが考えられたと推測される。その目的を達するために運転者の追従挙動を考察し、モデル化が図られたのであろう。追従モデルの適用方法が変化した状況においては、あらためて追従挙動を検討し直してモデルを再構築することが必要である。このような観点から追従走行する車両及びその運転者の挙動を整理し直すことにする。

運転者の基本的な行動原理として希望速度で走行しようとするのが仮定できる。この仮定を設ければ、停止していたり希望速度より低速で走行したりしている場合、可能であれば希望速度まで加速してその後は希望速度を維持することになる。逆に何らかの要因によって希望速度よりも高速で走行している場合、その要因が取り除かれれば希望速度まで減速してその後は希望速度を維持することになる。これが自車の走行速度を自由に決めることができる場合、すなわち自由走行時の走行モデルである。追従走行時もこの自由走行モデルを前提とすることになる。

実際の追従走行時には、運転者はほとんど無意識のうちに連続的に運転操作を行っていると考えられる。しかし、それを詳細にモデル化するにはその行動に含まれる要素を明確にしなければならない。追従走行においては次に示す運転者の行動、車両の動作が行われていると考えることができる。

- ①車両観測
- ②現況把握
- ③加減速判断
- ④運転操作

⑤車両反応

「車両観測」は先行車の位置と速度、場合によっては加速度や走行モードを知るためのものである。相対的な関係を求めるには自車の位置、速度等も調べなければならない。従来の状態では運転者の目視が観測手段であることから観測精度は高くはなく、観測結果を数値で表すよりも感覚的な表現の方が適しているかも知れない。追突防止機能が備わった車両ではカメラやレーダーを応用したセンサーが装備されており、目視によるよりも高い観測精度が得られると考えてよい。

「現況把握」は先行車及び自車の観測値から交通の現況を把握するものである。追突の危険性や車間距離の増減など、加減速の判断に資する指標を算出する過程を示している。「加減速判断」は「現況把握」で求められた結果から操作目標となる加減速の度合いを決定するものである。現実には具体的な加減速の数値を運転者が決めているわけではないが、操作の強度が意思決定されているのである。

意思決定された加減速に関する判断に基づいて「運転操作」が行われる。すなわち加速、速度維持、減速のための操作のいずれかが実行されるのであり、車両がそれに反応して動作するのである（「車両反応」）。「運転操作」に至るまでのプロセスが運転者の行動であり、「車両反応」のみが車両の動作である。追従理論では反応遅れ時間を運転者によるものと車両応答によるものからなると考えており、これらを分けて扱うことには妥当性がある。

従来から使われている追従モデルは、これらの一連の運転行動や車両動作をまとめてひとつの数式で表現しているのである。しかしながら、追従挙動のプロセスを取り巻く状況は変化しつつある。車両に装備されたシステムの支援を受けたり、場合によってはシステムに制御をゆだねたりすることも現実となっている。自動化の導入状況は追従挙動のプロセスによって異なる。したがって、ある部分を自動化した場合の追従挙動の変化を明らかにしたいならば、追従挙動のそれぞれのプロセスを明示的に取り扱ったモデル化が必要であると考えられる。

IV. モジュール化した追従モデル

追従挙動の車両観測から車両反応に至る一連のプロセスの流れは決まっており、フィードバックされるものではない。先行車及び自車の観測値から決定した加減速度によって自車の速度や位置が変化する。それが観測値として再び使われることになるが、一定の時間が経過した後のことである。したがって、追従挙動を構成するプロセスは次のプロセスに入力値を与えるだけであり、入出力の関係を規定すればプロセスごとに検討することが可能である。そこで追従モデルをモジュール化すれば、図1のように考えることができる。

図1では追従挙動のプロセスごとにモジュール化し、その間で引き渡される入出力項目を示している。また各モジュールでは長短の違いはあっても処理に要する時間が遅れとなることを明示した。現実の運転動作ではこれらのプロセスが連続的に実行されるのであるが、交通シミュレー

ションの場合は一定の時間間隔で適用されるのが一般的である。また自動運転における制御でも交通シミュレーションと同様に短い時間間隔で適用されると考えられる。以下、プロセスを分離したモジュールを表すサブモデルに関して考察する。

車両観測モデルは先行車及び自車の位置、速度等の観測を表すものである。従来の追従モデルでは観測誤差には言及していないが、通常の運転者による目視では比較的大きな観測誤差が生じることが考えられる。道路条件や気象条件による影響のように、特定の条件下で観測に偏りが起きたり、測定範囲が制限されたりすることもあり得る。これらを考慮するのであれば、この車両観測モデルに組み込むことが適当である。車載カメラや各種レーダーなどのセンサーを使えばより正確に観測することができ、観測誤差を考慮した追従モデルの場合にはセンサーの使用に意味がある。しかし観測値を数

値によって運転者に提供しても、追従判断が感覚的なものであればそれに影響を与えるとするには疑問があろう。

このモデルの出力は先行車と自車の位置や速度等の走行特性データであり、次の段階である現況把握モデルの入力となる。必ずしも出力は数値でなくともかまわず、ファジィによる追従モデルでは定性的データが使われることも考えられる。この段階における遅れ T_1 は小さいと考えられるが、時刻 t における先行車の走行特性値 $x_n(t)$ と自車の走行特性値 $x_{n+1}(t)$ が時刻 $t+T_1$ に出力されることになる。式 (2) に示す Gazis らによる一般的な追従モデルの場合は、時刻 t において観測された先行車の速度 $v_n(t)$ と位置 $x_n(t)$ 、自車の速度 $v_{n+1}(t)$ と位置 $x_{n+1}(t)$ がモデルの出力である。

現況把握モデルは式 (3) のように、車両観測モデルの出力である走行特性値 $x_n(t)$ 、 $x_{n+1}(t)$ を加工して加減速を判断するのに適した時刻 t における現況把握指標 $y_{n+1}(t)$ を作成するものである。この段階における遅れを T_2 とすると、 $y_{n+1}(t)$ を時刻 $t+T_1+T_2$ に出力することになる。

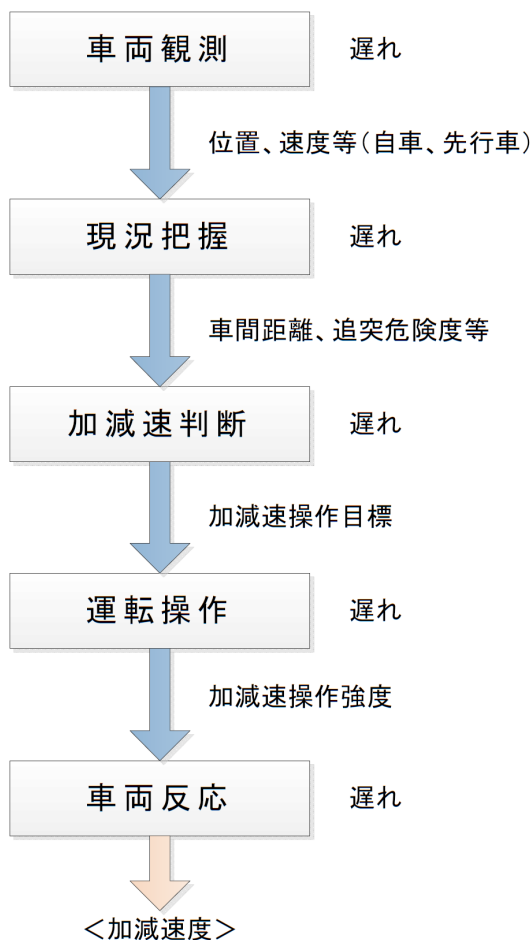


図 1. 追従モデルのモジュール

$$y_{n+1}(t) = f_1(x_n(t), x_{n+1}(t)) \quad (3)$$

たとえば最も単純な追従モデルで作成される指標は速度差であり、これが加減速度を決定する変数となる。Gazis らによる一般的な追従モデルでは車頭距離が大きくなるほど加減速度の変化が緩やかになることを想定しており、車頭距離に対する速度差の相対的な値を指標としていることになる。すなわち式 (4) で求められる $y_{n+1}(t)$ が加減速度を判断する指標として使われていることになる。

$$y_{n+1}(t) = [v_n(t) - v_{n+1}(t)] / \{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l \quad (4)$$

$y_{n+1}(t)$ には先行車と自車の速度差に関する指標が使われてきたのであるが、追従理論の基本に立ち返ると追突の危険性を運転者がどう捉えていると考えるかが要点である。追突が切迫しているときには運転者は可能な最大の減速を行おうとすると考えられる。したがって車間距離が縮小する状況下では追突するまでに要する時間も指標になり得るであろう。一方で車間距離が拡大する場面では追突予想時間は指標にはならず、自車の希望速度への不足が指標になるかも知れない。これらを勘案して適切な指標を選択すべきである。

加減速判断モデルは現況把握モデルの出力指標から加減速に関する運転操作の目標を決定するものである。現在の自車と先行車の位置関係等を総合的に評価し、加速すべきかあるいは減速すべきか、その程度がどれだけかを定めることになる。この段階だけを取り出せば、「最大限の減速が必要」、「緩やかな加速が適当」といった言語表現の出力がふさわしい。しかしファジイを用いるのではなく一般的な形で数値化するのであれば、操作目標は加減速度を使用するのが適切である。

ここでの遅れを T_3 とすると、式 (5) によって $y_{n+1}(t)$ から時刻 t における目標加減速度 $z_{n+1}(t)$ を算出し、時刻 $t+T_1+T_2+T_3$ に出力することになる。Gazis らによる一般的な追従モデルでは式 (6) の部分がこれに当てはまると解釈することができる。

$$z_{n+1}(t) = f_2(y_{n+1}(t)) \quad (5)$$

$$z_{n+1}(t) = \lambda_1 [v_n(t) - v_{n+1}(t)] / \{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l \quad (6)$$

運転操作モデルは運転者が体を動かして目標とする加減速度を得ようとする操作の実行を表すものである。加速する場合にはアクセルペダルを踏み、減速しようとする場合にはブレーキペダルを踏むといった動作である。目標加減速度に比例する強さの動きが行われるとするのが普通であろう。だが速度差により車間距離が増減することを認識していても、敢えて操作を見送ることも考えられる。これは運転者心理に関わるものであるが、追従挙動で運転者の心理を考慮するのであれば、加減速判断モデルや運転操作モデルに組み込むことになるであろう。

ここでの遅れ T_4 は $T_1 \sim T_3$ と比べて大きいと考えられる。式 (7) によって目標加減速度 $z_{n+1}(t)$ から求めた時刻 t における運転操作量 $a_{n+1}(t)$ が時刻 $t+T_1+T_2+T_3+T_4$ に実行されることになる。Gazis らによる一般的な追従モデルでは運転操作を明示的に考慮していないため、式 (8) のように目標

加減速度をそのまま運転操作量と見なすことにする。

$$a_{n+1}(t) = f_3(z_{n+1}(t)) \quad (7)$$

$$a_{n+1}(t) = z_{n+1}(t) = \lambda_1 [v_n(t) - v_{n+1}(t)] / \{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l \quad (8)$$

車両反応モデルは実行された運転操作に対し、車両がどのように動作するかを表すものである。たとえばある強さ以上の力でブレーキペダルを踏んだとしても、得られる減速度は変化しないと考えられる。また同じ操作をしても、その操作が適用される時点の速度によって引き起こされる加減速度は異なるであろう。車両反応モデルはこのような車両の機構に基づく反応をモデル化するものであり、追従モデルの最終的な出力を与えることになる。

ここでの遅れ T_5 は比較的大きく、実験等によって明らかにしやすいものである。 T_5 は車種による差が大きいと考えられ、技術開発によって縮小され得るものでもある。追従モデルの使用目的によって異なるが、従来は各段階で生じる遅れを区別する必要はなかった。しかし、今後においてもその必要性がないと断言することはできないと考えられる。拡張性を考慮すれば遅れを段階ごとに定義することには意味がある。式 (9) のようにこの段階に至るまでの遅れの総和を T とすると、追従モデルの出力である時刻 $t+T$ に発現する加減速度 $a_{n+1}(t+T)$ が式 (10) によって求められることになる。式 (10) においては、明示的に観測したものではなくとも発現する時点の速度等の走行特性によって加減速度が影響されることを表している。

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \quad (9)$$

$$\alpha_{n+1}(t+T) = f_4(a_{n+1}(t), T, \mathbf{x}_{n+1}(t+T)) \quad (10)$$

表 1. 追従モデルを構成するサブモデルの概要

| サブモデル | 出力時刻 | 出力 | Gazis らによる 一般的な追従モデルの出力 |
|-------|-------------------------------------|--|---|
| 車両観測 | $t + T_1$ | $\mathbf{x}_n(t), \mathbf{x}_{n+1}(t)$ | $x_n(t), v_n(t), x_{n+1}(t), v_{n+1}(t)$ |
| 現況把握 | $t + \sum_{i=1}^2 T_i$ | $\mathbf{y}_{n+1}(t)$ $= f_1(\mathbf{x}_n(t), \mathbf{x}_{n+1}(t))$ | $y_{n+1}(t)$ $= [v_n(t) - v_{n+1}(t)] / \{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l$ |
| 加減速判断 | $t + \sum_{i=1}^3 T_i$ | $z_{n+1}(t)$ $= f_2(\mathbf{y}_{n+1}(t))$ | $z_{n+1}(t)$ $= \lambda_1 [v_n(t) - v_{n+1}(t)] / \{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l$ |
| 運転操作 | $t + \sum_{i=1}^4 T_i$ | $a_{n+1}(t)$ $= f_3(z_{n+1}(t))$ | $a_{n+1}(t) = z_{n+1}(t)$ $= \lambda_1 [v_n(t) - v_{n+1}(t)] / \{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l$ |
| 車両反応 | $t + \sum_{i=1}^5 T_i$ $= t + T$ | $\alpha_{n+1}(t+T)$ $= f_4(a_{n+1}(t), T, \mathbf{x}_{n+1}(t+T))$ | $\alpha_{n+1}(t+T)$ $= \lambda_1 \frac{[v_n(t) - v_{n+1}(t)]}{\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l} \lambda_2 \{v_{n+1}(t+T)\}^m$ $= \lambda \frac{\{v_{n+1}(t+T)\}^m}{\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l} [v_n(t) - v_{n+1}(t)]$ |

Gazis らによる一般的な追従モデルでは式 (11) のようになり、速度に応じて加減速度が変化する現象はこの段階で生じると見なすことができる。ただし、定数 λ , λ_1 , λ_2 は式 (12) を満たすものとする。

$$\begin{aligned}\alpha_{n+1}(t+T) &= \lambda_1 \frac{[v_n(t) - v_{n+1}(t)]}{\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l} \lambda_2 \{v_{n+1}(t+T)\}^m \\ &= \lambda \frac{\{v_{n+1}(t+T)\}^m}{\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^l} [v_n(t) - v_{n+1}(t)]\end{aligned}\quad (11)$$

$$\lambda = \lambda_1 \times \lambda_2 \quad (12)$$

以上の追従モデルを構成するサブモデルの概要をまとめると、表 1 のとおりである。それぞれのサブモデルの具体的内容を検討すれば、従来は表現しにくかった追従挙動に影響する事象を記述できるであろう。

追従理論では時間経過を離散的に捉えているわけではなく、追従モデルは連続的に適用されるものである。しかし、現在における主たる適用対象である交通シミュレーションでは離散的な時間間隔ごとに追従モデルによる計算が行われ、将来における最大の適用対象となる自動運転等の追従制御でも同様である。このような適用の場合には微小時間間隔の間は加減速度に変化はないというように想定することができ、それを前提とした制御量の決定が可能になる。追従モデルの適用もアナログからデジタルへと変化してきたのであるが、適用対象を限定すればそれを前提としたモデル構築が可能であり、新たな展開も期待される。そのような場合においても、ここで示したモジュール化した追従モデルの枠組みの概念が役立つと考えられる。

V. おわりに

車両走行を記述する基礎となる追従モデルに対するニーズや求められるモデルの要件は変わってきており、高い精度で追従挙動を再現できるとともに、より多くの要因を考慮することが必要になってきた。そこで車両の追従挙動を見直して機能分割し、モジュール化した追従モデルの概念を提案した。車両観測、現況把握、加減速判断、運転操作、車両反応の段階ごとにサブモデルを設けて追従モデルを構築するものである。サブモデルの出力と出力時刻を示し、Gazis らによる一般的な追従モデルをサブモデルに分割する場合の解釈について述べた。

ここで示したのはモジュール化した追従モデルの枠組みにすぎないが、ひとつのモデルとして扱っていたものの内部に踏み込むことによって新たな発展が可能になると考えられる。追従モデル自体がそうであったように、合理的な仮定の下にサブモデルを構築し、その特性が交通現象を説明する上で有用であることを明らかにすれば、作成したモデルは受け入れられるであろう。このような研究は今後の課題である。

参考文献

- 1) 米谷英二・渡辺新三・毛利正光：『交通工学』（国民科学社，1965）。
- 2) R.ハーバーマン著，中井暉久訳：『交通流の数学モデル』（現代数学社，1981）。
- 3) 越正毅・明神証：新体系土木工学 61 『道路（I）』（技報堂出版，1983）。
- 4) 米谷英二監修：『新訂版交通工学』（国民科学社，1987）。
- 5) 越正毅編著：『交通工学通論』（技術書院，1989）。
- 6) 卷上安爾・井上矩之・三星昭宏：『交通工学』（理工図書，1990）。
- 7) 佐佐木綱監修，飯田恭敬編著：『交通工学』（国民科学社，1992）。
- 8) 大蔵泉：土木系大学講義シリーズ16『交通工学』（コロナ社，1993）。