

ファジィ推論を用いた車両の追従挙動モデル

A Car-Following Model Based on Fuzzy Theory

大口 敬^{*}・越 正毅^{**}・桑原雅夫^{***}・赤羽弘和^{****}

by Takashi OGUCHI, Masaki KOSHI, Masao KUWAHARA, Hirokazu AKAHANE

In this paper, a car-following model based on fuzzy theory is developed. The inputs of this model are same as those of another numerical car-following model developed by M.Koshi. Using the data collected by data-gathering cars, the parameters of the two models are estimated, and the performance of the fuzzy model is a little better than that of numerical one. In the traffic simulation using numerical model the rear-end collision is easily occurred, but fuzzy model can prevent such collision in some condition of the simulation.

1. はじめに

都市間高速道路のトンネルやサグ（縦断線形の凹部の底部）を頭にして、交通渋滞が発生している。これらのボトルネックの交通容量（渋滞後）は、2車線合計で2,200～2,700台/時程度であり、これまで信じられていた可能交通容量と比べると6割前後に過ぎない。このボトルネック現象は事故や故障といった外的要因によるのではなく、運転者達の普通の運

転挙動、ことに追従挙動の集積として交通流の内部で生成されるものである。そこで、このようなボトルネック現象の生成過程を明らかにし、道路交通現象の本質に対する理解を深めるため、我々は個々の車両の運転挙動をモデル化し、これらの挙動の集積として、交通流現象をシミュレーション等によって再現することを目指している。

車両の追従挙動をモデル化する試みは、1950年代後半から行われておりその歴史は古い。従来のモデルはいづれも数式によって表現されたモデルであるが、これまで為されてきたモデルでは未だ充分に交通流現象を再現するには至っていない。ここで交通流を構成している車両の行動は、人間の「曖昧」な、また非線形、非対称な認知、判断のもとになされるものであるとの観点に立つと、このような人間の持つ特性を直接的にモデル化できれば、これまでのモデルで表現できなかったような交通流現象が再現できるようになることも考えられる。本研究では、こ

- ^{*} 学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科
(〒106 港区六本木7-22-1)
- ^{**} 正会員 工博 東京大学工学部 教授
(〒113 文京区本郷7-3-1)
- ^{***} 正会員 Ph.D 東京大学生研 助教授
(〒106 港区六本木7-22-1)
- ^{****} 正会員 工博 千葉工業大学工学部 助教授
(〒275 習志野市津田沼2-17-1)

のような考えに立って、人間の特性である「曖昧さ」を、理論的に取り扱うことのできるファジイ理論を応用することで、追従モデルの開発を試みている。

本論文の構成は、第2章では既存の追従モデル（追従理論）についての簡単な概観を行う。次の第3章でファジイモデルの構成について概説し、第4章では追従走行データ及び交通流シミュレーションから、本モデルの妥当性について検討する。

2. 既存の追従モデル

車両の交通流を、微視的な車両の挙動としてモデル化しようとする研究は、A. D. MAY¹⁾によると A. ReuschelやL. A. Pilesによる研究辺りにまでさかのぼる。彼らは、ある二台の車両の追従車（n+1番目の車両）が前方車（n番目の車両）に対してとる関係は、次式で表されるものと考えた。

$$\ddot{x}_{n+1} = z + \kappa \dot{x}_{n+1} \quad (1)$$

ここに、 x_n : n番目の車両の位置

\dot{x}_n : n番目の車両の速度

(ドットは時間微分)

z : 停止時の車頭距離

κ : 比例定数

式(1)は、追従車が前方車に対してとる車間距離は、停止時の車間距離と速度に比例する成分との和になるということの意味している。

式(1)の両辺の時間微分をとると、

$$\ddot{x}_{n+1} = \lambda * (\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1}) \quad \text{但し、} \lambda \equiv \frac{1}{\kappa} \quad (2)$$

式(2)は、追従車の加速度（ \ddot{x}_{n+1} ）はこの2車間の相対速度（ $\{\dot{x}_n - \dot{x}_{n+1}\}$ ）に比例することを意味している。

式(2)に、位置（ x_n ）の時間変動に伴う運転者の反応遅れ時間Tを考慮すると次式ようになる。

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \lambda * \{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)\} \quad (3)$$

式(3)は、追越しを考えない場合に、前方車の影響を受けながら車両が走行（車群中を走行）する場合の車両の挙動（追従挙動）を表現しているものと考えられる。式(3)は、R. HERMAN²⁾をはじめ、最も単純かつ明快な追従モデルとして広く研究、利用され、また改良されてきた。

D. C. GAZIS³⁾は、式(3)の感度 λ は定数ではなく、車間距離の k 乗に逆比例する成分と追従車速度の h 乗に比例する成分が含まれるとする次式(4)を提案し、彼らやA. D. MAY¹⁾やA. CEDER⁴⁾は、この式のべき乗 h, k 及びモデル・パラメータ T, λ について、観測された巨視的な交通状態量の関係を最もよく説明するように推定を行った。

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \lambda * \frac{\{\dot{x}_{n+1}(t)\}^h * \{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)\}}{\{x_n(t) - x_{n+1}(t)\}^k} \quad (4)$$

(3)及び(4)の追従モデルでは、巨視量の関係（例えばQ-K関係）を説明するようにパラメータ推定が行われている。しかし越、岩崎⁵⁾の指摘にもあるように、交通流には自由流と渋滞流の2種類の性質の異なった流れがあり、お互いにそのQ-K関係は不連続である。従って自由流と渋滞流では追従挙動も異なるはずであるが、これらのモデルではその区別が為されていない。また自由流におけるQ-K関係は、前方車に追従している車と前方車に影響されない自由走行車（車群の先頭車）の両方を含むはずであるが、追従モデルを用いてQ-K関係を説明することは全ての車が追従状態であると仮定していることになり、これは明らかに誤りである。

巨視的な状態量は、ある時間内での集計量であり、その時間内での平均的な状態を示しているに過ぎず、これらの関係を説明するためにはモデル式(4)のような精緻でダイナミックなモデルは必ずしも必要ない。しかしサグやトンネルで自然渋滞が発生することは、交通需要と交通状態が時々刻々と変化し、ある時点で自由流から渋滞流へ遷移を起し、その時点の交通量よりも多くの交通量を捌くことができない、というボトルネック現象の生成を意味している。このような現象を説明するためには、自由流と渋滞流での追従挙動の本質的な違いを表現した追従挙動モデルを開発し、これを用いて交通現象をダイナミックに再現できることが必要である。

このような観点に立って、越⁵⁾は自由流及び渋滞流の追従モデルを一般的に表現した式(5)を提唱した。

式(5)の第1項は、車間距離の伸縮速度（ \dot{s} ）つまり前車との相対速度（RV）に比例し、車間距離の Q 乗に逆比例する加速度成分であり、式(4)で $h=0$ とおいたものと等しい。第2項における $f\{V_2\}$ は、速度

に応じた規準車間距離（目標とする車間距離）を意味し、第2項は実車間距離と規準車間距離との差に比例し、実車間距離の m 乗に逆比例するような加速度成分である。第3項は、道路の縦断勾配による速度抵抗の増分に比例する負の加速度成分である。第4項は、自由流におけるモデルにのみ存在する項であり、希望速度と実速度との差に比例する加速度成分である。

$$\begin{aligned}
 a(t) = & \frac{\lambda_1}{[s(t-T_1)]^q} RV(t-T_1) \\
 & + \frac{\lambda_2}{[s(t-T_2)]^n} \times RS(t-T_2) \\
 & - \lambda_3 \sin \theta \\
 & + \frac{\lambda_4}{[s(t-T_3)]^n} \times \{V \exp - v_2(t-T_3)\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

ここに、

相対速度： $RV(t) \equiv v_1(t) - v_2(t)$

車間距離余裕： $RS(t) \equiv s(t) - f\{V_2(t)\}$

規準車間距離： $f\{v_2\}$ （= s と v_2 の関係式）

希望速度： $V \exp$ （定数）

ただし、

$v_2(t)$ ：追従車速度、 $a(t)$ ：追従車加速度（ \dot{v}_2 ）

$v_1(t)$ ：前方車速度、 $s(t)$ ：車間距離

係数： $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 (> 0)$

反応遅れ： T_1, T_2, T_3

感度： q, m, n

自由流における追従モデルは、以上の4つの項の和として表現され、また追従車速度 $v_2 > V \exp$ となる場合には、第3項以外は働かないと仮定することで、車群の先頭車の挙動も同時にモデル化されている。渋滞流の追従モデルは、式(5)のはじめの3つの項によって表現されるものとし、また各パラメータは自由流の場合とは異なるものとしている。

このモデルの検証にあたっては、解析的な操作（積分）によって巨視的な交通状態量（ $Q-K$ 関係）を得ることが困難なため、コンピュータ・シミュレーションによって交通流を再現し検討する方法をとっている。このモデルのパラメータの同定には、追従車及び前方車の加速度、速度、両車間の車間距離を測定するシステム⁷⁾を用いて得られた追従実験データを用い、モデルによる追従シミュレーション出力と実データとの誤差を最小化するように、拡張カ

ルマンフィルター理論を応用した最適パラメータ推定が行われており⁸⁾、その結果式(3)や(4)のモデル式に比べ、特に渋滞流における追従挙動を非常によく説明できるモデルであることが示されている。

ところが、このモデル・パラメータを用いて、全ての車両が同じ挙動をすると仮定して自由流状態での交通流シミュレーションを行ってみると、何か後方の車両が容易に追突を起こしてしまう。この難点は、式(3)や(4)による追従モデルについても指摘されていたことであった。モデル式(5)におけるパラメータを、ある範囲内で変動させて様々なパラメータの組合せについても交通流シミュレーションが行われているが、未だ追突現象は解決されていない。

これらのモデルで交通現象がうまく再現できない理由として、そもそも全ての車が同じモデル・パラメータで追従するとの仮定に無理があるとも考えられるが、式(5)で表現されるモデルがまだ不十分であることも考えられる。そこで本研究では、自由流における追従挙動を取り上げて、その人間的な側面に着目し、ファジィ推論を応用してモデル（ファジィモデル）化することを試みている。なお本稿では、ファジィ推論及びファジィ理論については詳しく述べることは避けるつもりである。

ファジィモデルにおいても、追従挙動に及ぼす影響要因はモデル式(5)における独立変数と同じものを用いることとする。モデル出力（追従車加速度）を得る過程では、モデル式(5)（数式モデル）においては4項からなる非線形微分方程式の形で出力を与えたのに対し、ファジィモデルではファジィルールを用いて直感的に表現し、ファジィ推論で出力を求める点が、このモデルの特徴である。

3. モデルの構成

(1) モデル構造

モデルは、0.1秒スキャンのデジタル・シミュレーションを行うことを前提とする。時刻 t における入力変数として、

相対速度： $RV(t)$ 車間距離余裕： $RS(t)$

車間距離： $s(t)$ 追従車速度： $v_2(t)$

を与え、これらの影響が、反応時間遅れだけ先の出力変数（加速度： $a(t)$ ）に現れるものとする。反応遅れ T_1, T_2 及び T_3 は必ずしも定数である必要はな

く、本モデルでは T_1 が変化する場合も考える。

a) 入力変数変換 (X_1 & S_1 , X_2 & S_2 , X_3)

時刻 t において、入力変数 RV 、 RS 、 v_2 及び S を反応時間遅れだけ先の時刻の入力変数としてストックしておく必要がある。

$$\begin{aligned} RV(t) \& S(t) &\rightarrow T_1 \text{ (計算)} \\ \rightarrow X_1(t+T_1) &= RV(t) \ \& \ S_1(t+T_1) = S(t) \\ RS(t) \& S(t) &\rightarrow T_2 \\ \rightarrow X_2(t+T_2) &= RS(t) \ \& \ S_2(t+T_2) = S(t) \\ v_2(t) &\rightarrow T_3 \\ \rightarrow X_3(t+T_3) &= v_2(t) \end{aligned}$$

このようにしてあらかじめ時刻 t にストックされた、

$$\begin{aligned} X_1(t) \ \& \ S_1(t) \\ X_2(t) \ \& \ S_2(t) \\ X_3(t) \end{aligned} \quad \text{を} \text{入力変数とし、}$$

時刻 t の最終出力: $a(t)$ が決定される。

b) 出力変数の分解

最終出力 ($a(t)$) は、中間出力加速度 ($A(t)$) と中間出力バイアス ($B(t)$) の線形和によって表される。ここで、 $A(t)$ は $X_1(t)$ と $X_2(t)$ を独立変数とするファジイ推論 (ファジイ推論その1) 及び $S_1(t)$ と $S_2(t)$ を独立変数とするファジイ推論 (ファジイ推論その2) の結果を組み合わせて計算され、これは数式モデル (式(5)) における第1項と第2項とを合わせた意味を持っている。 $B(t)$ は更に速度成分 ($B_v(t)$) と勾配成分 ($B_g(t)$) の線形和に分解され、 $B_v(t)$ は、 $X_3(t)$ を独立変数とするファジイ推論 (ファジイ推論その3) で与えられものとし (数式モデルの第4項に相当)、 $B_g(t)$ は勾配 ($G(t)$ [%]) の定数倍で与えられる (同第3項に相当) ものとする。

(2) ファジイルールとメンバーシップ関数

a) ファジイ推論その1

この推論は、ファジイ推論その2 と併せて用いる

ことで、 $A(t)$ を決定するものである。この推論のファジイルールは、相対速度が正で大きければ加速度は正で大、逆の場合は逆である等といった我々の直感を、相対速度と車間距離余裕に関して表現したものである。このファジイルールを表-1に示す。

この表における P 、 Z 、 N 、 VP 、 VN は、それぞれ「正」、「ゼロ」、「負」、「正大」、「負大」を意味するファジイ集合であり、また第7ルールの $\{0.0\}$ は、唯一つの要素 0.0 からなる普通集合を意味している。これらのファジイ集合のメンバーシップ関数を図-1に示す。

表-1 ファジイ推論その1のルール

$X_1 \backslash X_2$	P	Z	N
P	¹ VP	⁵ P	--
Z	² P	⁷ 0.0	³ N
N	--	⁶ N	⁴ VN

注) 上付きの数字¹~⁷は、ルールの番号を示す

b) ファジイ推論その2

ファジイ推論その1によって、各ルールの適合度: ω_j ($j=1,7$) とその出力加速度値: α_j ($j=1,7$) が得られるが、更に車間距離が感度へ与える影響を各ルールの重みづけファクター: F_j ($j=1,7$) として設定し、このファクターを決めるのがこの推論である。 S_1 及び S_2 が入力となり、 S_1 、 S_2 、 F_j に関するファジイ集合として B (「大」) と S (「小」) を設定している (F_j については、さらに VB (B の2乗) と普通集合 $\{1.0\}$ を設定している)。このファジイルールを表-2に示す。またこれらのファジイ集合のメンバーシップ関数を図-2に示す。

ファジイ推論その1及びその2から得られる出力: α_j 、 ω_j 、 F_j ($j=1\sim7$) を用いて、中間加速度出力

表-2 ファジイ推論その2のルール

S_1	S_2	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
B	B	1	S	1	1	S	1	1
B	S	1	1	B	VB	1	B	1
S	B	1	S	1	1	S	1	1
S	S	1	1	B	VB	1	B	1

注) "1"の部分は、 F_j として普通集合 $\{1.0\}$ を用いることを意味する

表-3 ファジイ推論その3のルール

IF X_3 is P B, THEN B_v is $\{0.0\}$
 IF X_3 is P S, THEN B_v is P
 IF X_3 is N, THEN B_v is N

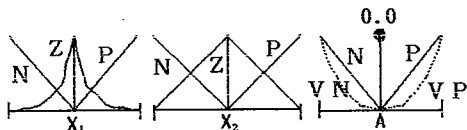


図-1 ファジイ推論その1のメンバーシップ関数

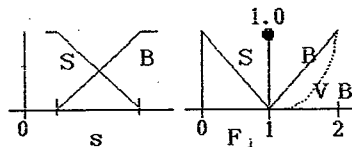


図-2 ファジイ推論その2のメンバーシップ関数

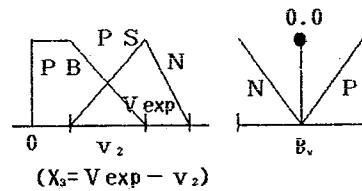


図-3 ファジイ推論その3のメンバーシップ関数

: $A(t)$ は、各スキャン毎に次式によって計算される。

$$A(t) = \frac{\sum (\alpha_j \times \omega_j \times F_j)}{\sum \alpha_j} \quad (6)$$

この計算方法は、通常は間接法推論と呼ばれている推論法⁹⁾の考え方をもとにしたもので、これに重みづけファクター: F_j を付け加えた「重み付き拡張間接法推論」とでも言うべきものであり、数式モデルにおける第1項と第2項のもつ意味を総合的に表現するために筆者が独自に考案したものである。

c) ファジイ推論その3

希望速度要因を取り込むために反応遅れだけ前の速度 (v_2) をストックしておき、時刻 t におけるこの速度と希望速度 (V_{exp}) との差 ($V_{exp} - v_2(t - T_3)$) を X_3 なる入力変数とし、これによる出力加速度バイアス: B_v を決定するための単純なファジイ推論である。 X_3 のファジイ集合としては、PB (「正大」)、PS (「正小」)、N (「負」) の3種類を用い、加速度バイアスには、Aと同じものを用いる。このファジイルールを表-3に示す。またこれらのファジイ集合のメンバーシップ関数を図-3に示す。

このルールとメンバーシップ関数を用いて、加速度バイアス値: $B_v(t)$ は次式(7)によって計算される(この方法を一般に間接法推論⁹⁾と呼ぶ)。ここに β_j は各ルールから得られた加速度であり、 w_j はその適合度である。

$$B_v(t) = \frac{\sum (\beta_j \times w_j)}{\sum \beta_j} \quad (7)$$

d) 反応時間遅れ T_1 を与えるファジイ推論

以上が入出力関係を決めるファジイ推論であった

が、 T_1 に関しては他の反応時間遅れ: T_2 、 T_3 と異なり、 RV の値及び s の値 (すなわち RS の値) によっては変化するのではないかと考えられる。すなわち、 RV が負でかつ RS も負であるような場合には反応時間遅れが短くなり、逆に RV が正であるかまたは RS が正であるような場合にはある一定の反応遅れ時間になるものと仮定することが出来よう。しかしこれはあくまでも仮説であるので、第4章では T_1 を固定値としたモデル (T_1 固定ファジイモデル) と、 T_1 を変化させたモデル (T_1 可変ファジイモデル) の両方を考え、比較検討を行っている。なお、反応時間遅れを固定値とした場合のその値は、数式モデルにおける値を採用することとした。このファジイルールを表-4に示す。

表-4 T_1 を与えるファジイ推論のルール

$RV \backslash RS$	NS	NB
NS	\tilde{T}_0	\tilde{Zero}
NB	\tilde{Zero}	\tilde{Zero}^2

RV 及び RS のファジイ集合としては、P (「正」)、NS (「負小」)、NB (「負大」) を用いることとし、 T_1 のファジイ集合としては、 \tilde{T}_0 (「およそ T_0 」)、 \tilde{Zero} (「およそゼロ位」)、 \tilde{Zero}^2 (「かなりゼロ」) を用いている。これらのファジイ集合のメンバーシップ関数を図-4に示す。

4. モデルの検証

(1) パラメータの同定

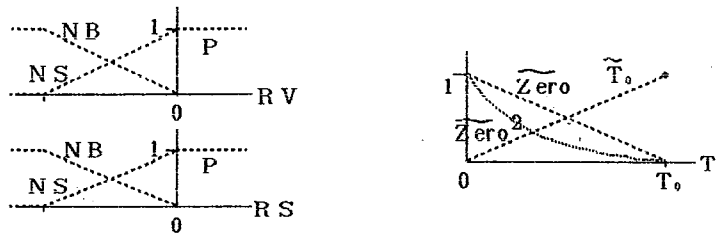


図-4 T_1 を与えるファジイ推論のメンバーシップ関数

第3章に示したファジイモデルにおいては、各々のファジイ推論で用いられるメンバーシップ関数の形状を規定するパラメータや、RSを与える規準車間距離 $\{v_2\}$ の係数、及び V_{exp} 等がそのモデルパラメータということになる。また、ある意味ではファジイルールも一種のパラメータであるとも考えられる。すなわち、例えばPB（「正大」）やPM（「正中」）も一種のパラメータとみなして、モデル・パフォーマンスを評価してPBからPMに変えた方が良くなるとの理由で変更した場合も、一種のパラメータを推定したとすることができる。

ファジイモデルの最大の難点のひとつは、モデル構造が非常に複雑な非線形モデルとなるため、モデルパラメータを同定する一定のアルゴリズムが無い点である⁹⁾。そのため本モデルにおいては、以下のような方法によってパラメータの同定を行った。

モデルの入力変数は、数式モデル（式(5)のモデル）における独立変数と同じものであり、モデル・パフォーマンスの評価についても数式モデルの場合と同じ方法を採用した。すなわち、数式モデルのパラメータ推定が行われている追従実験データをもとに、モデルによる出力と実験データとの誤差を評価規準として誤差を少なくする方向にパラメータを探索し、誤差の極小値を与えるパラメータを推定値とした。

評価規準に用いたのは、加速度のデータとシミュレーション値との平均平方誤差：RMSE（Root Mean Square Error）および車間距離のRMSE値であり、パラメータ探索のアルゴリズムには「直線探索付き最大傾斜法」¹⁰⁾を用いた。ファジイモデルのパラメータの多くはメンバーシップ関数の形状を与えるものであり、ファジイ理論の大きな利点の一つがメンバーシップ関数をかなり恣意的に、主観的に設定して良い点であることから、これらのパラメータの初期

値は容易に与えて良いことになる。すなわち、例えば相対速度が「大」と言えるのは、せいぜい10km/h～30km/h程度でありこれ以上や以下では我々の「大」という主観には合致しない。従って初期値として例えば20km/hを設定し、その周辺で得られた最適値を推定値としてしまっても良い。しかし反応時間遅れ： T_1 （ T_1 固定ファジイモデルの場合）、 T_2 、 T_3 、及び $f\{v_2\}$ の係数に関しては、数式モデルにおいて推定された値をそのまま推定値とすることにした。

すなわち、

$$T_1 = 2.6 \text{ 秒}, \quad T_2 = 6.0 \text{ 秒}, \quad T_3 = 10.0 \text{ 秒}$$

$$f\{v_2\} = 30.0 - 0.5234 \cdot v_2 + 0.006312 \cdot (v_2)^2 \quad (8)$$

（但し、 f の単位は[m]、 v_2 は[km/h]）

数式モデルによってパラメータが推定された実験データは、2台の改造実験車両⁷⁾を用いた中央自動車道・八王子-大月間で平日の昼間に走行実験を行い、その後研究室内でA/D変換と平滑化を行った⁷⁾約6分程度の1つの走行データである。時刻は0.1秒単位で離散化されているので、モデルの評価には3,600程度のデータが用いられることになる。このデータでパラメータ最適値が推定された数式モデルのパフォーマンスを、表-5にまとめる。ここで、CCとは相関係数（Correlation Coefficiency）のことである。表-5に示したファジイモデルのパフォーマンスについては、数式モデルのパラメータが拡張カルマンフィルタ理論に基づく最適値である⁹⁾のに対し、ファジイモデルのパラメータはあくまでも探索した範囲内での最適値であるため、 T_1 固定ファジイモデルに関しては、車間距離RMSEが最も小さくなったケースと、参考として加速度RMSEを最も小さくするものの2種類について示してある。

この表によると T_1 固定ファジイモデルは、車間距離についてはRMSEもCCも数式モデルよりも高い説明

力を持っていると言えよう。ここで加速度のRMSEを最小化した T_1 固定参考ファジィモデルをみると、加速度RMSE値は数式モデルの方が良く、加速度CC値は T_1 固定参考ファジィモデルの方が良い。このようなRMSEやCCといった統計量におけるこの程度の違いは、加速度の時系列変動のグラフを目で見る限りははっきりとした違いとして把握することはできない。また次節で述べる交通流シミュレーションにおける追突現象の回避が本研究の重要な目的の1つであることから、車間距離の誤差の縮小がシミュレーション結果を改善するものと期待されるので、 T_1 固定・可変共にファジィモデルでは車間距離RMSEの最小値を与えるパラメータを採用することにした。

また T_1 を変化させる（追突回避のため T_1 を短くする）ことは数式モデルでは不可能であったが、ファジィモデルでは充分可能である。この T_1 可変モデルの場合、表-5に示されている統計量からも、また時系列変動のグラフからも特に急激な減速時の挙動が良くモデル化されることが見いだすことができ、 T_1 固定モデルの場合よりも更にモデル・パフォーマンスが向上し得ることが示された。

(2) 交通流シミュレーション

以上の議論は、ある与えられた前方車の挙動に対する追従車両1台の挙動について議論したものであるが、実際の交通流現象は何台もの車両のこのような追従挙動の集積として生じるものである。従って追従モデルの検証には、モデルを用いて多くの車両を一斉に追従させた場合に、実際の交通現象に近い現象が再現できるかどうかを検討しなければならない。交通流シミュレーションにおいては、

- ① スキャン時間0.1秒のタイム・スキャン方式
- ② シミュレーション時間は300秒
- ③ 縦断線形は勾配0%の水平な平坦路とする
- ④ 先頭車は80km/hの定速で走行

⑤ 入力交通は一様到着交通

⑥ 2台目以降は、初期速度は先頭車と同じ、その後全車同じパラメータで追従させるという非常に単純な道路区間の理想化された条件を仮定した。

$$Q = K \cdot V \quad ; \quad K = 1/H \quad (9)$$

但し、 $H = s + L$: 車頭距離
 L : 車両の長さ

ここで交通流については一般に式(9)の関係が成立し、モデルには規準車間距離が関数 $f\{v_2\}$ で、また初期速度が80km/hと与えられているから、

$$V=80\text{km/h}, \quad s=f\{80,0\}, \quad L=5.0\text{m} \quad (\text{仮定})$$

を式(9)に代入すると、

車頭距離： $H=33.52\text{m}$ 、交通量： $Q \approx 2388\text{台/h}$ が得られる。ここで、希望速度要因（数式モデルの第4項、ファジィモデルのファジィ推論その3）を無視した場合、入力交通流率によらず、長い時間が経てば2388台/hに近づいていくはずである。従って、入力交通流率としてはこの2388台/hに近いものを与えれば良いであろう。以上の条件のもとに、パラメータが推定されている数式モデル、ファジィモデル（ T_1 固定と T_1 可変）の3つについてシミュレーションを行った。その結果を表-6に示す。

表-6によれば、いずれの場合も追突現象が起きる点は同じであるが、 T_1 可変ファジィモデルの場合に最も追突しにくくなっていることが分かる。ここで、各モデルの希望速度要因のために規準車間距離より車間距離を詰めて追従しようとするのが、追突現象を起こす原因の1つと考えて、希望速度要因をモデルから取り外してシミュレーションしたものが、表-6の右側の結果である。この場合、ファジィモデルを用いたシミュレーションでは比較的すぐに車間距離が規準車間距離と等しくなり、その後定常流現象

表-5 モデルの挙動 [データ：約6分間の追従走行データ]

モデル	加速度		車間距離	
	RMSE [m/s^2]	CC	RMSE [m]	CC
数式モデル (式(5))	0.2835	0.7214	6.80	0.535
T_1 固定ファジィモデル	0.3129	0.6948	6.01	0.651
< T_1 固定モデル参考>	<0.2985	0.7326	7.90	0.407>
T_1 可変ファジィモデル	0.3127	0.6629	5.66	0.688

表-6 交通流シミュレーション結果

初期速度における規準車頭距離	3 (80.0)+5.0 = 33.52m (交通量換算して2388台/h)		
入力交通流率	2300台/h (車頭距離に換算して34.78m)		
希望速度要因	あり	なし	
モデル	数式モデル	19台目が111.0秒目に追突	21台目が122.2秒目に追突
	T ₁ 固定ファジイモデル	8台目が64.1秒目に追突	追突生じず
	T ₁ 可変ファジイモデル	19台目が218.3秒目に追突	追突生じず

に落ち着く。ところが、数式モデルを用いた場合には規準車間距離の周りで振動現象が生じ、これが後方の車両に増幅されて結局追突現象が生じてしまう。

表-6に示した規準車間距離は、80km/hにおける交通量に換算して2388台/hという非常に高密度の交通状態を意味しており、これは実際の交通流においては密な車群内でのみ生じ得る値である。従って、この交通量レベルで全ての車両を一樣に発生させることは現実的な条件ではない。そこで規準車間距離をもう少し長くして、80km/hにおける交通量換算で約1739台/h程度のもので与え、入力交通流率もこの周辺の値を与えて、希望速度要因をモデルから取り外し、再度シミュレーションを行った。しかしながら、この場合も数式モデルではシミュレーション時間中に必ず追突現象が観測され、一方T₁固定ファジイモデル及びT₁可変ファジイモデルの場合は、共に速やかに一樣な交通流状態に収束することが観測された。

以上のように、数式モデルでは不安定な挙動を示して追突してしまうような条件下でも、本研究によって開発されたファジイモデルでは、一定の車間距離と速度を保つような一樣な交通流となり、実際の交通流現象に近いものが再現できることが示された。

5. まとめ

本研究の成果を簡単にまとめると次のようになる。

- ①ファジイ推論を用いた車両の追従モデルを開発し、そのモデル・パフォーマンスは数式モデル(式(5))と比べて遜色の無いものであることが示された。
- ②ファジイモデルを用いて、全ての車両を同じモデルパラメータで追従させて交通流シミュレーションを行い、これまでの追従モデルでは再現できなかった

ような交通流が再現できることが示された。

本モデルは1つの追従実験データを用いてパラメータが推定されただけであり、更に多くのデータを用いて検証する必要がある。また実交通流の再現には、まだ多くのモデル改良の余地が残されており、これらを今後課題として取り組む必要がある。

参考文献

- 1) A. D. MAY et. al.: "Non-Integer Car-Following Models", H. R. R. No. 199, 1967
- 2) R. HERMAN et. al.: "Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following", Oper. Res. Vol. 7-1, 1959
- 3) D. C. GAZIS, R. HERMAN et. al.: "Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow", Oper. Res. Vol. 9-4, 1961
- 4) A. CEDER, A. D. MAY: "Further Evaluation of Single- and Two-Regime Traffic Flow Models", T. R. R. No. 567, 1976
- 5) 越正毅, 岩崎, 大蔵, 西宮: 渋滞時の交通流現象に関する研究, 土木学会論文報告集, Vol. 306, 1981. 2.
- 6) 越正毅: 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, Vol. 371/IV-5, 1986
- 7) 赤羽弘和, 大庭, 桑原, 越: 車両の走行挙動計測システム, 土木計画学研究・講演集, No. 11, 1989. 11.
- 8) J. XING: "A Study on Car-Following Behaviour" 東京大学修士論文, 1989. 9.
- 9) 菅野道夫: 「ファジイ制御」, 日刊工業新聞社, 1988
- 10) 堀洋一: 直線探索付き最大傾斜法による最適化問題の数値計算プログラム, O H M, 1986. 6.