

高速道路単路部渋滞発生解析 －追従挙動モデルの整理と今後の展望－

大口 敬¹¹ 正会員 博士(工学) 東京都立大学助教授 大学院工学研究科(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

高速道路単路部を交通容量上の隘路とする渋滞現象の発生メカニズムを定量的に把握・評価し、渋滞を予防する道路設計、渋滞を緩和・解消する交通運用、AHSなど将来技術の影響評価などを可能とするためには、運転挙動モデル、特に追従挙動モデルの開発が重要である。本稿では、過去に開発された運転挙動モデルの中で特に追従挙動モデルをとりあげ、その特性を概観・整理する。関連して、人間による車両の制御モデルにおける扱いを紹介し、人間特性のモデリング手法の応用可能性を示唆する。最後に、これらの研究から得られる知見を整理し、高速道路単路部渋滞の発生現象を記述できるような追従挙動モデルに関する今後の研究展望をまとめる。

Key Words: car-following, basic freeway segment, capacity bottleneck

1. はじめに

車両挙動の中で最も単純、基本的かつ重要な車両挙動特性は、カーブや勾配など道路幾何構造に対して速度・加速度を調整する「単独挙動」と前方車両との車間距離や相対速度などを調整する「追従挙動」であろう。

速度分布や車頭時間分布などの、定常状態交通流の単独・追従挙動の特性(静的特性)については既にある程度知見が得られているが、空間的・時間的に変化する特性(動的特性)については、未だ断片的・定性的な知識が得られているに過ぎないとと言えよう。

交差点の信号機や料金所ブースなど交通流外部からの介入で交通容量が決まる現象と異なり、高速道路単路部のサグやトンネル入口部を交通容量上の隘路(ボトルネック)とする現象では、交通流内部の特性に起因して、減速波の発生、上流への增幅伝播、低速流と渋滞待ち行列の形成などの現象が自然発生的に生じる^{1),2)}。

今のところ、時々刻々と各車両の位置・速度・加速度などの運動状態を説明するような、動的な車両挙動モデルを用いたシミュレーション解析によって、交通容量上の隘路区間の特性や道路の安全性などを評価し、道路設計や交通対策に適用するまでには至っていない。

2. 車両挙動モデルの意義と既存研究の系譜

(1) 車両挙動モデルの開発の必要性

サグやトンネル入口部における渋滞発生時の交通流率(渋滞発生時交通容量)、及び渋滞が安定した後の捌

け交通流率(渋滞後捌け交通容量)は、車両の挙動特性により規定されるものと考えられる。もし全てのサグとトンネル入口がボトルネックとなり、またその容量に一定の傾向や何らかの客観指標(勾配、勾配差、平面線形パラメータなど)との相関があれば、この客観指標を用いて隘路の交通容量が推定できる。しかしこうした明確な傾向や相関は知られておらず、また全てのサグやトンネル入口部がボトルネックとなるわけではない。あるサグがボトルネックになるかどうかを判別する術すら、やっと糸口を掴みかけているところ^{3),4)}である。ただ隘路の場所は決まっているため、運転挙動が何らかのその場所の道路幾何構造から影響を受けることが、渋滞発生の原因と考えられている。

単路部以外にも、合分流部や織込み区間も交通流内部に起因した隘路現象を起こし得る。これらの隘路区間の交通容量評価の場合は「車線変更挙動」のモデルが必要となるが、この場合も車線変更車両も含めた車間距離と反応時間などの取り方が交通容量を決定する主要要因と考えられるので、この場合も結局追従挙動特性が重要な役割を担っている。

交通流内部に起因する隘路現象を再現するための運転挙動の特性分析とモデル化、特に「単独挙動」と「追従挙動」のモデル化を行い、

- ・ボトルネックとなるかどうか
- ・減速波発生と增幅伝播
- ・渋滞発生時交通容量
- ・渋滞先頭発進位置の安定
- ・渋滞後捌け交通容量

といった高速道路単路部渋滞現象の特性を、運転挙動モデルに基づくシミュレーションを用いて再現できれば、隘路を作らないまたは隘路容量を高く設定する道路設計指針、既存の隘路の渋滞を緩和・解消する交通運用手法、など根本的な渋滞対策を検討することができよう。またITS技術も有力な渋滞解消策として期待されているが、たとえば運転支援・一部運転自動化技術であるAHS(Advanced cruise-assist Highway System)について、交通の安全・円滑両面を担保するようなAHS車両のシステム性能設計、一般車両と混在した交通流の安全性・円滑性の検討、などAHSの導入効果を評価するためにも、運転挙動モデルとこれを用いた交通流シミュレーション技術は重要であろう。

本稿では、こうしたシミュレーション解析に耐え得るような「実用的な」運転挙動モデルの開発が必要との観点から、特に「追従挙動モデル」に的を絞って既存モデルや関連する既存知見を整理し、今後のモデル開発の方向性について展望する。

(2) 研究系譜と本稿における整理方法

車両の運転挙動のモデリングは、交通工学黎明期以来の古典的な基礎研究分野である。古典的な車両挙動モデルの中でも、特に前方車両を追従する追従挙動モデルは、ミクロな交通流現象の基礎モデルとして1950年代から研究され、数多くの事例がある^{2), 5) ~ 61)}。追従挙動モデルの中で、単項初等関数式(7)の一般式形にまとめられた「GMモデル¹⁷⁾」(General Motors社の研究所で開発されたためこう呼ばれる)が最も良く知られ幅広く利用されているが、交通工学分野以外の応用数学・物理学、交通心理学、情報処理学、制御工学などにおいても、各々の分野の目的意識に則った異なるモデルが数多く提案されている。

こうした各分野で開発されたモデル同士を網羅的に整理・展望した文献はこれまで見当たらない。3.では、筆者が目の届く限りで集めた様々な追従挙動モデルについて整理・概観を試みる。

まず研究のアプローチを次の3種類に大きく分類する。

1. モデルの提案と考察・分析

2. モデルの安定性解析

3. マクロ交通モデル (Q-V-K 関係) との関係分析

1.については、各モデル導出の歴史的経緯にもとづく分類ではなく、特にモデル構造の違いによってa)~g)まで7種類に分類して紹介する。

車両挙動は、運転者が道路などの運転環境から得る情報を認知・判断した結果として生じるものであるが、その入力情報のほとんどは視覚情報と考えられる。そこで3.の中で、運転者の視覚環境情報やその認知・判断に関する研究を紹介する^{62) ~ 69)}。

特に自動車工学の分野を中心として、主として自動車の操縦安定性などの安全性検討の立場から運転挙動が分析され、運転挙動を人間-機械(マン-マシン)系として捉えて自動制御理論を応用したモデリングが試みられている^{70) ~ 94)}。4.では、こうした制御工学分野における車両を人間が制御する場合のモデリングの考え方を紹介する。

5.では、これらの研究から得られる知見を整理し、高速道路単路部渋滞の発生現象を記述できるような追従挙動モデルに関連する今後の研究展望をまとめる。

なお車両挙動モデルの中には、車線変更挙動に関するモデルもあり、これまで多く研究されている。これらの車線変更挙動モデルの開発は、対向2車線道路におけるはみ出し追越し時の対向車との安全の確保、多車線道路における追越し行動や車群形成、交差点発進後の車群拡散、などの特性分析を目的として、また高速道路では、合流部挙動や織込区間の分合流挙動と避走挙動などの合理的説明、合分流部/織込み区間の付加車線長などの道路構造設計、道路構造が所与の合分流部/織込み区間の交通容量を車両挙動モデルから内生的に求めて評価することなどを目的として研究されている(詳しくは片倉のレビュー論文⁹⁵⁾を参照)。本稿では特に「追従挙動」に対象を絞り、「車線変更挙動」は殊には扱わない。

3. 追従挙動に関する既存の研究

(1) 追従モデル構造の分類・整理

ここで追従挙動モデルとは、追従車両が前方車両との車間距離や相対速度などの変化を刺激(入力)とし、これに対応して反応(加速度)を出力するもの、と考える。

$$\text{反応(出力)} = \text{反応強度(感度)} \times \text{刺激(入力)} \quad (1)$$

ここで「反応強度(感度)」は定数とは限らず、必要に応じて刺激(入力)の関数として記述されることも許されるものとする。既存の各モデルにはさまざまな理論的背景、数学的な導出手法に違いがあり、原典論文によって追従挙動モデルの表現方法が異なる場合がある。そこで筆者は、それぞれのモデルについて車両の加速度を反応出力とする式(1)の形に統一し、各モデルを整理して再解釈を試みた。

なお各変数・定数に次の記号を用いる。

t : 時刻 [s]

$x_0(t)$: 先頭車位置 [m]

$\dot{x}_0(t) = v_0(t)$: 先頭車速度 [m/s]

$\ddot{x}_0(t) = \dot{v}_0(t) = a_0(t)$: 先頭車加速度 [m/s²]

$x_1(t)$: 1台目追従車位置 [m]

$\dot{x}_1(t) = v_1(t)$: 1台目追従車速度 [m/s]
 $\ddot{x}_1(t) = \dot{v}_1(t) = a_1(t)$: 1台目追従車両加速度 [m/s²]
 $x_n, \dot{x}_n, \ddot{x}_n$: n台目追従車位置, 速度, 加速度
 $\theta_n(t)$: 時刻 t の n台目位置の縦断勾配角度
 $T, T_1, T_2, T_3, T_4, T_1^+, T_2^+, T_1^-, T_2^-$
 : 反応遅れ時間 (制御むだ時間) のパラメータ
 $\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_1^+, \alpha_1^-, \alpha_2^+, \alpha_2^-, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$
 : 係数パラメータ

$l, m, n, h, l^+, l^-, m^+, m^-$: べき乗パラメータ
 G : 重力加速度 (定数)

a) 単項初等関数型

Pipes⁵⁾は、前方車両との相対速度 ($\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)$) を刺激 (入力) とし、反応強度 α を介して出力加速度 $\ddot{x}_1(t)$ が決まるモデル構造を最初に提案した。

$$\ddot{x}_1(t) = \alpha(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \quad (2)$$

Chandler, Herman ら⁶⁾は、上式 (2) に「反応遅れ時間 (response time lag) : T 」を導入している。なお制御工学分野では「制御の遅れ (delay)」の概念と区別するため、 T は「むだ時間」と呼ばれる。

$$\ddot{x}_1(t+T) = \alpha(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \quad (3)$$

式 (2), (3) はいずれも時刻 t に対する線形微分方程式であるため、周波数領域 s へラプラス変換して様々な理論解析が行われている^{5)~13)}。

前方車速度を入力とし追従車速度を出力とする追従車速度の制御系を考えると、式 (3) は、「むだ時間を持つ積分動作」と言える(4. 参照)。この伝達関数 $G(s)$ は次のようになる。

$$G(s) = \alpha \frac{e^{-Ts}}{s} \quad (4)$$

古典制御理論では、伝達関数の特性方程式 ($1+G(s) = 0$) の根からこの制御系の安定性を調べることができる。

前方車両の速度変動に対して追従車両の速度変動が小さくなり、前方車速度へ収束することを「局所安定性 (local stability)」と呼ぶ。理論的には特性方程式の根の実数部が正となる条件、 $T \times \alpha < \pi/2$ が局所安定性の条件となる¹⁰⁾。また局所安定であっても、追従車両の2台目、3台目と反応が後方車両に伝播するにつれて、速度変動が大きくなつて発散することも有り得る。後方車両の速度変化が収束することを「漸次安定性 (asymptotic stability)」と言い、この条件は $T \times \alpha < 1/2$ となる⁶⁾。

なお Chandler, Herman ら⁶⁾は、式 (3) の反応強度 α を一定とせずに、追従車速度の関数 ($\alpha = \beta_0 + \beta_1 \dot{x}_1$) と仮定したモデル(この場合は線形微分方程式とはならない)についても検討している。

Gazis, Herman ら¹⁰⁾は、式 (3) の反応強度に、車頭距離の逆数を含む非線形構造を提案している。

$$\ddot{x}_1(t+T) = \frac{\alpha}{x_0(t) - x_1(t)} (\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \quad (5)$$

十分に安定した追従状態では反応遅れ時間を無視できるものと考え、式 (5) の両辺を積分すると次式が得られる。

$$\dot{x}_1(t) = c \ln\left(\frac{\rho_j}{\rho}\right) \quad (6)$$

ここに c, ρ_j は定数、 $\rho = 1/(x_{i-1} - x_i)$ は交通密度で、式 (6) は Greenberg の提案した交通流マクロモデル⁹⁶⁾に一致し、整合する点が特徴である。

Gazis, Herman, Rothery¹⁷⁾は、式 (5) の反応強度に速度の影響を加え、また速度と車頭距離の逆数に整数のべき乗を考慮したモデルを提案し、May and Keller²¹⁾はこのべき乗を任意の実数とした場合を解析している。

$$\ddot{x}_1(t+T) = \alpha \frac{\{\dot{x}_1(t)\}^m}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^l} (\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \quad (7)$$

式 (7) は、線形式 (2), (3), 非線形式 (5) を特別な場合として含む一般式であり、世界的に最も良く知られている追従挙動モデルである。本モデルは、いくつかの特性解析が試みられている^{23), 53), 60)}。

b) 単項指數関数型

Newell¹⁶⁾は、実測結果から車頭距離を速度の指數関数としている。これを微分して次式 (8) が得られる。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1(t+T) &= \alpha_1 \cdot e^{-\alpha_2 \{x_0(t) - x_1(t) - \alpha_3\}} \\ &\times (\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \end{aligned} \quad (8)$$

Ceder²⁸⁾は、一般化単項式 (7) の反応強度を式 (9) のように修正している。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1(t+T) &= \frac{\alpha_1 \cdot e^{-(\alpha_2 / \{x_0(t) - x_1(t)\})}}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^2} \\ &\times (\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \end{aligned} \quad (9)$$

式 (9) で追従挙動モデルの反応強度に指數関数を用いる理由は、主に式 (6) の交通流マクロモデルの論理的不整合を改良することを目的としているからである。

c) 線形多項式型

Kometani & Sasaki⁷⁾は、刺激 (入力) として線形式 (3) に前方車両加速度を加えた式を提案し、その安定性を解析している⁸⁾。

$$\ddot{x}_1(t+T) = \alpha_1(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) + \alpha_2 \ddot{x}_0(t) \quad (10)$$

Holley¹⁴⁾は、目標車間距離と実際の車間距離の差の項を加えた式を提案している。ここで目標車間距離は

速度と加速度の線形関数で与えられる。

$$\begin{aligned}\ddot{x}_1(t+T) &= \alpha_1(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \\ &\quad + \alpha_2[(x_0(t) - x_1(t)) \\ &\quad - (\beta_0 + \beta_1\dot{x}(t) + \beta_2\ddot{x}(t))]\end{aligned}\quad (11)$$

Herman & Rothery¹⁹⁾は、線形式(3)にもう一台前方車両との相対速度を加えた多項式を検討しているが、実測データによる検証の結果、二台前の車両の影響は無視できるとした。二台前を考慮する場合は解析が困難となるため、その後こうした取組みは見られない。

$$\ddot{x}_2(t+T) = \alpha_1(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) + \alpha_2(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \quad (12)$$

d) 非線形多項式型

Kometani & Sasaki^{11),12)}は、2次の項を含む非線形多項式を提案し安定性解析を試みている。

$$\begin{aligned}\ddot{x}_1(t+T) &= \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2\dot{x}_1(t+T)} \{(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \\ &\quad + \alpha_3\ddot{x}_0(t) + \alpha_4\dot{x}_0(t)\dot{x}_0(t) + \alpha_5\dot{x}_1(t)\dot{x}_1(t)\}\end{aligned}\quad (13)$$

Bando ら⁵⁰⁾は、目標速度を車頭距離の tanh 関数とし、加速度を目標速度と実際の速度の差で与えている。

$$\begin{aligned}\ddot{x}_1(t) &= \alpha \{(\alpha_1 \tanh(\alpha_2(x_0(t) - x_1(t)) - \alpha_3) + \alpha_4) \\ &\quad - \dot{x}_1\}\end{aligned}\quad (14)$$

彼らはこのモデルの安定性解析^{56),57)}、反応遅れ時間 T を考えた場合の交通流特性⁵⁸⁾などを検討している。

黒沢⁴⁷⁾は、人間の感覚を考察して独自モデルを提案しており、これを式(1)の形にすると、入力刺激を前方車速度と自車速度の相対速度比と見なすことができる。

$$\ddot{x}_1(t) = \alpha_1 \left[1 - \frac{(\alpha_2\dot{x}_1(t) + \alpha_3)^2}{(x_0(t) - x_1(t))^2} \cdot \frac{\dot{x}_1(t)}{\dot{x}_0(t)} \right] \quad (15)$$

古谷^{31),32)}は、人間の感覚的な安全性指標を「 z 感覚」と名づけ、カタストロフィ理論に基づくモデルを提案しており、これを式(1)の形に整理すると、入力刺激は速度項と「 z 感覚」の偏差項の和として表される。

$$\ddot{x}_1(t+T) = \alpha_1\dot{x}_1(t) + \alpha_2[z(t) - Z^*] \quad (16)$$

ここで $z(t) > 1$ 、 $Z^* > 1$ で、それぞれ次式の解として得られる。

$$\begin{aligned}\{z(t)\}^3 + 3\frac{\dot{x}_1(t) - V_f}{V_f} z(t) \\ + \frac{(2H_f + H_c) - (x_0(t) - x_1(t))}{H_f - H_c} &= 0 \\ \{Z^*\}^3 - 3Z^* + \frac{2H_f + H_c - H_0}{H_f - H_c} &= 0\end{aligned}$$

ここに、 V_f は自由速度(基準速度)を表すパラメータ、 H_f は速度 V_f 時の限界(最小)追従車頭距離を表すパラメータ、 H_c は停止時の限界(最小)車頭距離($H_c < H_f$)を表すパラメータ、 H_0 は停止時の正常な停止車頭距離($H_c < H_0 < H_f$)を表すパラメータである。

中山ら⁴⁴⁾は、車頭距離-相対速度平面上の追従挙動特性が螺旋状の走行軌跡となることから、前方車両速度を一定と近似して追従挙動モデルを導出している。これを式(1)の形に整理すると、入力刺激として相対速度と車間距離余裕の2つの非線型項の和となる。

$$\begin{aligned}\ddot{x}_1(t+T) &= \frac{\alpha_3}{\alpha_1 Y + \alpha_2} \{x_0 - x_1 - L\} \\ &\quad + \frac{\alpha_4}{\alpha_1 Y + \alpha_2} \{\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)\}\end{aligned}\quad (17)$$

ここに、 $Y = (x_0 - x_1 - L)/(\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t))$ 、 L は希望車頭距離を意味する定数パラメータである。

e) 非線形多項式複数反応遅れ時間型

以下の2つのモデルでは、各項毎にまたは状況に応じて「反応遅れ時間」が異なることを提案している。

越らは次の4項からなるモデルを提案し²⁾、実際に高速道路単路部サグで自然に渋滞が起きた時の各車両の追従挙動を上空より観測し⁴¹⁾、そのデータを用いてモデルパラメータを推定した⁴⁸⁾。

$$\begin{aligned}f_1(t+T_1) &= \frac{\alpha_1}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^l} (\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \\ f_2(t+T_2) &= \frac{\alpha_2}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^n} (x_0(t) - x_1(t) - g(t)) \\ f_3(t+T_3) &= \alpha_3 \{\dot{x}_1(t) - V_f\} \\ g(t) &= \beta_0 + \beta_1\dot{x}_1(t) + \beta_2\{\dot{x}_1(t)\}^2 + \beta_3\{\dot{x}_1(t)\}^3 \\ \ddot{x}_1(t) &= f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) - \alpha_4 \sin\{\theta_1(t)\}\end{aligned}\quad (18)$$

尾崎^{46),49)}は、式(18)を基本としながら、第一項 $f_1(t)$ と第二項 $f_2(t)$ を一般化して正負の加速度時のパラメータが異なるものとし、第三項に前方車加速度を刺激入力とすることを提案し、観測した追従挙動データを用いて検証した⁴⁵⁾。

$$\begin{cases} f_1(t+T_1^+) = \frac{\alpha_1^+ \{\dot{x}_1(t)\}^{m^+}}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^{l^+}} (\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \\ f_1(t+T_1^-) = \frac{\alpha_1^- \{\dot{x}_1(t)\}^{m^-}}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^{l^-}} (\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1(t)) \\ f_2(t+T_2^+) = \frac{\alpha_2^+ (x_0(t) - x_1(t) - g(t))}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^{n^+}} \\ f_2(t+T_2^-) = \frac{\alpha_2^- (x_0(t) - x_1(t) - g(t))}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^{n^-}} \end{cases}$$

(ここに $+$ は $\dot{x}_1(t) \geq 0$ の場合、 $-$ は $\dot{x}_1(t) < 0$ の場合)

$$\begin{aligned}f_3(t+T_3) &= \frac{\alpha_3}{\{x_0(t) - x_1(t)\}^k} \ddot{x}_0(t) \\ f_4(t+T_4) &= G[\sin\{\theta_1(t+T_4)\} - \sin\{\theta_1(t)\}] \\ g(t) &= \beta_0 + \beta_1\dot{x}_1(t) + \beta_2\{\dot{x}_1(t)\}^2 + \beta_3\{\dot{x}_1(t)\}^3\end{aligned}$$

$$\ddot{x}_1(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) + f_4(t) \quad (19)$$

なお、上記 2 式 (18), (19) は、いずれもサグ区間の交通流現象を想定し、サグにおける勾配変化による入力刺激をモデルに取り入れている点も特徴である。

f) 変動反応遅れ時間多項式型

Del Castillo⁵³⁾は、古典的な Lighthill & Whithman のマクロ交通流モデル⁹⁷⁾に整合するような追従挙動モデルを検討^{51), 52)}し、「反応遅れ時間」は刺激の入力時刻における状態量を説明変数とする関数 $\tau(t)$ で表されたとした。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1(t + \tau(t)) &= \alpha_1\{\dot{x}_0(t) - \dot{x}_1\} \\ &+ \alpha_2\{H(t) - F^{-1}(\dot{x}_1(t))\} + \alpha_3\ddot{x}_0(t) \quad (20) \\ \tau(t) &= \frac{H(t)}{\dot{x}_1(t) - F(H(t)) + H(t) \cdot \frac{dF}{dH}} \\ H(t) &= x_0(t) - x_1(t) \\ F(t) : H(t) &\text{に関する任意関数 (所与とする)} \end{aligned}$$

g) その他のモデル化手法

他にファジィ推論モデル^{39), 43)}、パラメータ同定にニューラルネットワークを組合せたファジィモデル⁶¹⁾を追従挙動に適用した例などもある。ファジィやニューラルネットワークを用いたモデルは、システムが複雑な場合のモデル化や制御には有効な手法と考えられている。しかしこうしたモデリング手法では一般にモデルパラメータが多くなり、パラメータ値に基づいてシステム特性を解析するには向かない手法と考えられる。

以上a) ~g) に分類された各モデルを用いて単路部渋滞再現を試みると、渋滞が発生しないか若しくは速度変動が不安定になって追突してしまう場合が多く、また実走行データで検証されたモデルでさえ、パラメータの組合せを少し変えただけで簡単に追突を起こしてしまうことがある。つまり追突せずに渋滞が発生するようなモデル構造(またはモデルパラメータの範囲)の一般的な特性は未だ不明なのである。

(2) 追従挙動モデルとマクロ交通流モデル

式 (5), (9), (14) のように、追従挙動モデルが安定状態に収束した時の交通流状態全体の Q-V-K 関係を求め、一般に知られているマクロ交通流モデル (Q-V-K 関係を表す理論式) を追従挙動モデルから導出することは、多くの研究者を魅了しているようである (Herman ら^{10), 13), 17), Edie¹⁵⁾, May ら^{21), 33), Ceder ら^{27), 28), 30), 佐藤・五十嵐^{29), 阿部・高森^{37), Bando ら⁵⁰⁾).}}}}}

Q-V-K 関係を現わすマクロ交通流モデルは、ある対象区間(断面)の一定時間の平均的な交通流特性を表現

する。実際の交通現象は散らばりが大きく、マクロ交通流モデルとは基本的に交通流の流体近似モデルなので、実現象とマクロ交通流モデルはあまり一致しない。

実際の交通には前方車両の影響を受けない自由走行車両も含まれるが、追従挙動モデルとは前方車両に追従する挙動をモデル化したに過ぎず、追従挙動のみを用いてマクロ交通流モデルのような交通特性は導出できないはずである。実際に追従車両と自由走行車両を明示的に分けて、道路一断面で計測される車頭時間分布を説明するモデルも存在する⁹⁸⁾。

マクロ交通流モデルは道路一断面の定常的現象を説明したもので、追従挙動は道路延長上を移動しながら行われるものである。対象としている道路が延長方向に一様な道路構造・交通条件でマクロ交通流モデルが変わらない場合にのみ、a) ~g) に分類されるような動的な追従挙動モデルとマクロ交通流モデルは整合すべき論理的根拠を持つ。しかし隘路現象の起こるサグは、まさしく道路延長上のマクロ交通流モデルのパラメータが変化する区間なのだと考えられる。

以上 3 つの理由により、追従挙動モデルにマクロ交通流モデルと理論的に精緻な整合性を求めるることは、あまり重要なことでは無いように思われる。

(3) 追従挙動特性分析と視覚環境情報

明確に定式化されたある特定の追従挙動モデルを対象とせずに、理論的に追従挙動特性を検討した研究として、Kometani & Sasaki¹⁸⁾, Michaels²⁰⁾, Pipes²²⁾, Weiss²⁵⁾, Gipps³⁴⁾などがある。動的な追従挙動モデルの一般的な理論的検討は、例えば車頭時間分布のような統計的・静的モデルと整合するためにも重要であろう。

また Rockwell ら²⁴⁾, Evans and Rothery²⁶⁾, 岩崎 and Tenny³⁵⁾, 越ら^{36), 38), 41), 48), 54), 55)}, 尾崎⁴⁰⁾, 山田^{42), 59)}などは、追従走行実験や路外観測などによるデータに基づいて、実証的に反応強度や反応遅れ時間などの追従挙動を精査・分析しており、これは実現象を再現する「実用的な」追従挙動モデルの開発にとって非常に重要であろう。

一方、高速道路単路部の或るサグ区間が隘路となる原因を、運転者の受けける視覚環境的影響という観点から解明しようとする試みも存在する^{3) ~4), 62) ~66)}。これらでは、例えばサグ区間の勾配変化を視覚的に認知する上で、錯認や誤認、認知不能、認知遅れなどが無意識下の速度低下の原因となることを立証しようとしている。

車間距離、相対速度、相対加速度などの人間の認知特性を知ることは、特に追従挙動の元となる人間の制御特性を明らかにすることを意味する。人間はこれらを

認知して制御の入力刺激としているはずであるが、いずれも視覚環境情報が主な情報源と考えられる。

人間の感覚尺度には、一般に「Weber-Fechner の法則(対数認知則)」が成立するとされる。これは、物理的な刺激量 (I) の微少な違い (dI) の認識可能な閾値は「 $dI/I = \text{一定}$ 」となる法則(Weber の法則)に基づき、主観的な感覚量 (φ) は刺激量 (I) の対数に比例する、という仮説(Fechner の法則)である($\varphi = K_1 \ln I + K_2$ (K_1, K_2 : 定数))⁶⁷⁾。音量の主観的尺度の「ホン」などのように、この対数認知則は一般に正しいと考えられがちだが、実は必ずしも正しくない論拠も多くあり、認知心理学では安易な適用を戒めている⁶⁷⁾。

認知心理学において人間の距離の知覚量は、客観的距離に比例しないとされる⁶⁷⁾。これには、「等間隔に並んだ電信柱が見かけ上は等間隔には見えない」という相対距離の知覚の問題、及び「空を飛ぶ飛行機と星の距離の違いが感じられない」という絶対距離の知覚の問題、の2つがある。単純に対数認知則を適用すると、距離知覚量は客観的距離に対して逆減するものの無限に増大するため、上述の飛行機の光と星の問題を説明できない。このように、距離知覚量を包括的に説明できるモデルはまだ無いのである。

村田⁶⁸⁾、及び南宮ら⁶⁹⁾は、それぞれ実際の車両を用いた実験によって、車間距離の心理的な尺度(車間距離が適切、長い、短い)を分析し、一定の範囲で対数認知法則が成立することを確認している。つまり一定の範囲内の車間距離を扱う限りでは、近似的に対数認知則が成立するものと考えてよく、追従挙動モデルに応用可能な知見と言えよう。

4. 制御工学分野による車両挙動モデリング手法

(1) 人間-機械系のモデル

車両挙動モデルの研究には、3.に示した交通工学分野の車両の動的挙動モデル以外に、「車両」を「人」と「自動車」に分離し、車両挙動の元となる人間-機械系のモデルを研究するものがある。交通工学の研究分野でも、角ら⁷⁰⁾は信号交差点の発進時の車両騒音の評価のために人間-機械系のモデルを提案している。

林⁷¹⁾によれば、自動車を人間が制御する行動については古くから研究されており、古典制御理論を利用して人間の制御特性を伝達関数($H(s)$)で表すと、次のように表現されるという。

$$H(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) e^{-Ls} \quad (21)$$

式(21)は、「むだ時間を持つPID制御」と言える。PID制御は古典制御理論⁷²⁾の典型的な制御方法である。式(21)では、入力信号(刺激)に対して「むだ時間 L 」だ

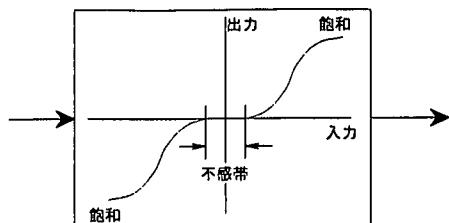


図-1 非線形性⁷⁴⁾

け遅れて制御出力が得られ、この制御出力は、入力に比例する成分 K_P (比例動作: Proportional control action)と、入力の時間積分に比例する成分 $1/(T_I s)$ (積分動作: Integral control action)と、入力の時間微分に比例する成分 $T_D s$ (微分動作: Derivative control action)、からなっている(PID動作)。 K_P は比例ゲイン(proportional gain)、 T_I は積分時間(integral time)、 T_D は微分時間(derivative time)と呼ばれ、いずれも定数パラメータである⁷³⁾。ここで s はその関数が時間 t の関数のラプラス変換となる複素変数である。なお林⁷¹⁾は、人間の動作が式(21)の伝達関数で表現できるためには、人間の動作が線形である必要があり、非線形性が少ない範囲内でのみ有効なモデルであることを強調している。

人間-機械系の基礎的研究については井口の著書⁷⁴⁾に詳しい。人間の制御モデルとそのパラメータの推定結果が多く示されている。井口⁷⁴⁾は、人間の制御動作を、予知(precognitive)動作、追跡(pursuit)動作、補償(compensatory)動作の3つに分類し、また林⁷¹⁾はこの予知動作を予覚動作と呼び、更に予見(preview)動作も加えた4つに分類している。

補償動作とは、目標値と制御値の差のみが与えられ、これを無くすように制御するフィードバック動作である。追跡動作とは、目標値と制御量が別々に与えられ、目標値の変動を見ながら制御量を目標値に合わせていく動作であり、フィードバックだけでなく、目標値の変動を想定したフィードフォワード制御も行い得る。予知動作(予覚動作)とは、人間が制御量の変動をあらかじめ知っていて制御量のフィードバック無しに制御する(一種のプログラム制御)オーブン・ループ制御である。予見動作とは、フィードバックした現在の状態量にもとづき、過去からの状態変化や制御対象のモデルなどを利用して将来の状態を予想し、これを制御に反映させるものである。

モデルは、補償動作、追跡動作、予知動作の順に複雑となり、実証分析も理論解析も難しくなる。一般に自動車の運転動作は、近い将来の状態を予想しながらの「予見制御による追跡動作」と言えよう。このような制御モデルは、実証分析の困難さが研究の壁となってい

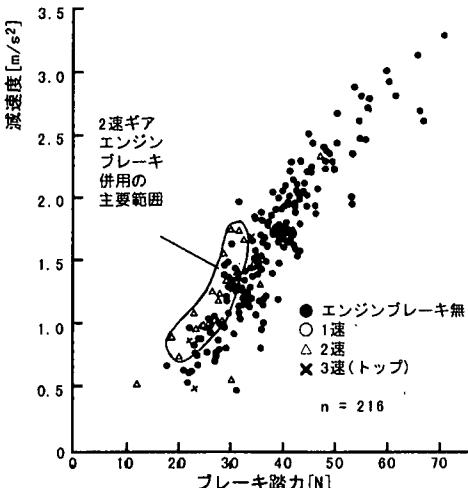


図-2 交差点流入時のブレーキ踏力と減速度⁷⁷⁾

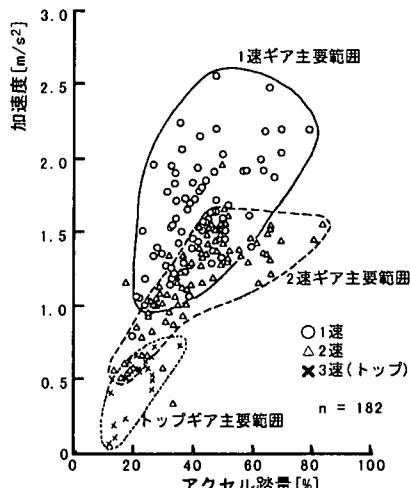


図-3 交差点通過時のアクセル踏量と加速度⁷⁷⁾

る(林⁷¹⁾).

なお人間の感覚には、

- 1)Weber-Fechner 則⁶⁷⁾が成立することが多い、
 - 2)微細な刺激は「閾値」以下では反応できない、
 - 3)人間の動作範囲に限界最大値がある、
- という非線形な特徴が存在する。これら1), 2), 3)の特徴を入力と出力の関係で表すと図-1のようになる。井口⁷⁴⁾によれば、こうした非線形性は人間の動作を考える上で避けることのできない問題であり、追従挙動モデルで「反応遅れ時間」と呼ばれる応答の時間的な遅れ(むだ時間)と共に、人間-機械系の制御モデルにおいて、考慮せざるを得ないものとされている。

(2) 制御理論の適用研究例

永井ら^{75),76)}は、人間-自動車系を一つの閉ループ系としてモデル化し、人間の操舵角と操舵トルクという2つの操作量を操作する操舵制御を、いずれもむだ時間と1次遅れを持った線形フィードバック系とし、「ハイブリッド操舵モデル」として定式化した。

$$H(s) = \frac{K_p}{1 + T_{Is}} e^{-Ls} \quad (22)$$

これは、むだ時間を伴う積分動作(P制御)という点では式(4)と同じであるが、 $1/T_{Is}$ が $1/(1+T_{Is})$ となって「1次遅れ」を伴なう点が特徴である。

また永井ら⁷⁷⁾は、対向車のギャップを判断して交差点で右折する実験から操舵と加減速挙動のファジイ制御モデル化を試みているが、実験データからは、人間の操作するブレーキとアクセルの操作量と実際の車両の物理的な加減速度とが、ほぼ比例することが示されている(図-2、図-3参照)。これは、アクセル・ブレーキの操作モデルの代りに加速度・減速度を出力とするモデルを考えても良いことを意味し、貴重な知見である。

日本自動車研究所(JARI)のグループ^{78)~80)}や、清水ら⁸¹⁾は、緊急回避操作による車線変更時のドライバーの操舵モデルとして、プログラム制御(予知・予覚動作)操舵モデルを提案している。こうした緊急性の高い動作では、ある程度決まった挙動と考えられるため、プログラム制御モデルが適合する分野と言えよう。

緊急時ではない通常の運転動作には、非線形性や動作の曖昧性(ファジイ性)が目立つであろう。藤岡・田久保^{82)~84)}、景山ら⁸⁵⁾は、ニューラルネットワークモデル、ファジィニューラルネットワークモデルにより、操舵・加減速動作をモデル化し、良好なモデル性能を示している。

(3) ハイブリッド型制御モデル例

吉本らのハイブリッド型制御モデル^{91)~93)}は、曲線路の操舵と車速制御モデル^{86),87)}、前方車との車間距離制御モデル⁸⁸⁾、制限速度走行時の動作モデル⁸⁹⁾、道路屈曲部の幅員や緩和曲線による運転動作への影響分析とモデル化⁹⁰⁾、自動運転車速制御アルゴリズム^{92),93)}、を統合したものである。いずれも予見追跡制御と非線形モデルが特徴である。これは複雑な人間の制御動作をニューラルネットワークを用いる代りに複数の制御則を切り替えるハイブリッドモデルで対応したものと言える。

この中で特に追従挙動特性に関する研究は興味深いものであるが、停止または減速挙動のみに焦点を当てている点が通常の追従挙動モデルとは異なる。

a) 車間距離制御

前方車両との車間距離制御モデル⁸⁸⁾では、運転者は車間時間 T_m (=車間距離/自車速度)を認知し、現状のアクセル/ブレーキ操作量で走行した場合の予見時間 τ_h 秒後の車間時間 T_m^* を予測し、運転者に固有の目

標車間時間 T_d と T_m^* の偏差にゲインを掛けたものをアクセル／ブレーキ操作量の増分値として、離散的積分動作で操作量を決めている。なお偏差には操作量の増加・減少方向の別に閾値を設け、閾値以下では操作量を修正しない。

b) 障害物停止時の減速動作

自動運転用車速制御アルゴリズム^{92),93)}の検討では、障害物を認知して減速する動作をむだ時間を持つ予見追跡制御とし、ブレーキ操作量は離散的積分動作で決めている。ここで一定の予見時間だけ将来を予見するのではなく、障害物の手前に予見位置 D_v ($D_v = 30[m]$) を設定し、この位置での速度 v^* を予見する点が特徴である。予見位置の安全速度 v_s を $7.0[m/s]$ とし、 v^* と v_s の偏差（相対速度）に対応してブレーキ操作量を決定する。この偏差には閾値 $e_{v \min}$ を考えるが、 $e_{v \min}$ は現在位置と D_v までの距離に比例するように、近くなればより小さい相対速度でも認識できるように変化させる。なお、予見位置 D_v を超えると別の減速挙動モデルに切替り、現在の減速度を維持した場合の停止位置の障害物までの距離 D^* と目標停止位置 D_s の偏差（相対距離）に対応した減速挙動としている。

また路上の障害物を前方走行車両に置き換えて、予見追跡制御による減速挙動モデルを追従走行に拡張したものについても提案している^{92),93)}。これは、障害物に速度 $v_t[m/s]$ を持たせ、目標停止位置の代りに目標相対距離： D_d を導入し、これを v_t の1次関数： $D_d = D_s + C_v v_t$ としている（ここに $D_s = D_c = 40[m]$ 、比例定数 $C_v = 3.6[s]$ ）。

c) ドライビングシミュレータによる知見

ハイブリッドモデルは、可動コックピットで前後 G/横 G を体感可能なドライビングシミュレータの実験データで検証をしているが、その実験結果からはいくつかの興味深い知見が報告されている。

1. アクセルを踏むより離す方が反応強度が大きい⁸⁹⁾、
2. アクセル踏力には最小閾値がある⁸⁹⁾、
3. 予見時間 τ_h は $1.5 \sim 2.0$ 秒（実車両で $2 \sim 3$ 秒）⁸⁹⁾、
4. 曲線を適切にトラッキングするには、横ジャーケ（jerk：加速度の時間微分）は約 $0.2 \sim 0.8[m/s^3]$ ⁹⁰⁾、
5. 緩和曲線区間内でブレーキオフ／ブレーキオンのタイミングを計っている⁹⁰⁾、
6. 車両速度が低速の場合は操舵角を制御し、高速の場合は操舵力を制御している⁹¹⁾

これらは、追従挙動モデルのみならず車両挙動モデル一般にとって貴重な知見である。しかし、ドライビングシミュレータから得られた知見であって実際の車両で検証されたわけではないので、実際の交通現象、特に渋滞が発生するような混雑時の交通流の再現に有効であるかどうかは確認が必要である。

(4) 実走行データによる知見

豊田中央研究所グループ⁹⁴⁾は、2台の実験車両を用い、高速道路で被験者に $80 \sim 100[km/h]$ の一定速度、一定車間距離で追従するタスクを科し、前方車の接近を検知して減速する動作を解析して次の事を見出した。

1. 相対加速度認知の閾値は、約 $-0.4 \sim -0.74[m/s^2]$ 。
2. 相対速度認知の閾値は約 $-0.05 \sim -0.08[m/s]$ 。
3. 平均車間距離の約 $0.05 \sim 0.2$ 倍が閾値で、実車間距離の偏差を認知する。
4. 相対加速度が約 $-0.75[m/s^2]$ 以上で緊急ブレーキ。
5. 通常は車間時間を限界車間時間よりも短くならないよう減速制御するが、限界車間時間は交通流状態により変化する（車間時間＝車間距離/追従車速度）。この走行実験が行われた交通条件は明確でないため、隘路現象が発生するような高密度交通流条件下でも成立する特性であるかどうかは定かではない。

5. 追従挙動モデルの今後の研究展望

現状では、高速道路単路部において渋滞が発生する現象を一般的に追従挙動モデルの積重ねによって再現することは非常に困難である。特定の観測結果に合わせるだけであれば、これを再現可能なモデルも存在する^{48),46)}が、パラメータの異なる車両同士の順番を入れ替えれば簡単に追突が発生し、交通流を構成する各車両のパラメータの一般的特性は明らかではなく、渋滞の発生現象を再現する一般的なモデルは得られていない。

高速道路単路部における隘路としてサグを考えた場合に、あるサグで渋滞が発生し別のサグでは渋滞が発生しないことを説明できるような追従挙動モデルの構造を見出すことが現在の目標であろう。またこれは、追従挙動だけでなくサグにおける道路線形の影響を取り込んだモデルである必要がある。以上の検討を進める上で今後必要な研究には、次のような研究内容を考えられる。

1. 渋滞発生解析可能な追従挙動モデルの必要条件
2. 既存の追従挙動モデルの性能評価
3. 追従挙動モデルの改良
4. モデルを用いた応用発展研究
5. 調査・解析

前節3., 4. の検討を踏まえて、これらの項目について今後の研究展望を以下に整理する。

(1) 追従挙動モデルの必要条件

a) 局所安定性の解釈

通常、制御工学で行われる安定性解析では、入力としてインパルス入力を考え、その応答振動特性を分析する。従って追従挙動モデルの安定性解析の場合、前方

車両の速度にインパルス入力を与え、追従車両の速度変動が分析されてきた。この場合理論的には前方車に無限大の加速度（の絶対値）がかかることになるが、現実の加速度（の絶対値）には必ず限界があるので、インパルス応答に基づく局所安定性条件は理論的な安定条件ではあるが、現実の追従挙動の安定性とは必ずしも一致しない可能性がある。従って現実的な入力条件の範囲における局所安定性を何らかの形で別途検討する必要があるものと考えられる。

b) 追突発生条件の明示的扱い

これまでの安定性解析では、追従車両の速度変動振幅の減衰を判断基準にしている。すなわち減衰しない（増幅か一定振幅）場合を不安定とし、減衰すれば安定とする。しかし減衰する場合でも入力刺激に対する最初の反応が強すぎて、大きな速度変動が生じればその段階で追突する可能性があるが、通常の安定性条件ではこの点は考慮できない。これはラプラス変換により周波数領域（ s 領域）で解析するためである。

モデルパラメータの範囲を実用的な観点から検討するには、この「追突が発生しない」という基準は重要な考え方である。従って周波数領域（ s 領域）ではなく時間領域（ t 領域）での分析が必要である。

c) 停止の明示的扱い

車両の加減速性能には物理的限界があり、これを超えることは（少なくとも交通の安全を確保したままでは）あり得ない。通常の渋滞発生時に減速波が後続の車両へ増幅伝播した時、何台か後方の車両が必ず限界減速度に達する（フル・ブレーキング）わけではない。現実には減速波が増幅されて上流へ伝播するうちに、後続車両にはフル・ブレーキングに至る前に停止または極低速走行が出現し、それ以上は速度変動の振幅は増幅しない。つまり一旦車両が停止に至ればそれ以上速度変動は増幅しないので、速度変動が無限に増大することは有り得ないのである。サグにおける渋滞の発生時の交通流現象を追従挙動モデルにより再現するためには、「停止」に至るまでに加減速度の限界値が発生せず、追突も発生しないことが再現できることが求められよう。

d) 安定性と速度変動の大きさの関係

自由流で低密度交通流の場合は、基本的に追従挙動は局所安定であろう。前方車両が加減速を繰り返しても、追従車両の運転者は通常うまく速度調整をして速度変動を減衰させており、振動が減衰せずに残り続けることは考えられない。十分に大きな前方車両の速度変動に対しては、追従車両は局所安定的に速度調節するであろう。そうしないと直ぐに追突事故に直結する。

しかし非常に僅かな前方車両の速度変化に対しては、人間の知覚に不感応域が存在するため、むしろ局所不安定的に増幅された反応を返すのかもしれない。こう

した微弱な速度変化をきっかけとして減速波が発生するのがサグなどの渋滞発生現象の特徴である。つまり追従挙動の安定性は入力（速度変動）の大きさ、速さ（振動数）などにも依存するものと予想される。これらは非線形モデルの特徴と考えられる。こうした特性を有する追従挙動モデルが求められる。

e) 安定性と不安定性の共存

自由流で低密度交通流の場合は、上流の交通流は下流の交通流の影響を受けない。これは追従挙動モデルの安定性の観点からは、漸次安定であることを意味する。

一方渋滞発生時の高密度交通流では、減速波が上流へ増幅して伝播し、下流の交通状態が上流へ影響を与えることが実測されている^{2), 48), 4)}。これは実は漸次不安定な現象と解釈できる。

このように、追従挙動には漸次安定性が確保されている場合もあれば、漸次不安定であるような特性も併せ持っていると考えられる。こうした漸次安定性と漸次不安定性は、どこで切り替わり、どう共存し得るのであろうか。少なくとも、こうした特性は非線形モデルの特徴であることは確かである。

また減速波は上流へ伝播しているので、ある車両が減速した地点よりも、次の車両の減速地点は上流側の地点になる。通常の周波数領域上の安定性解析では車両の位置に関する情報が得られない。従ってやはり時間領域での分析が必要である。

f) サグにおける道路線形の影響

サグの勾配差が減速波を起こして渋滞のきっかけとなるが、勾配差が大きいほど渋滞し易いわけではなく、むしろ勾配差が分かり難いほうが渋滞が起こる⁴⁾。しかし勾配差が遠景ではっきりと分かる場所でも渋滞は発生する。縦断曲線区間が長くて勾配変化が微少だと渋滞が起こるらしい⁴⁾。しかし勾配変化が十分小さければ速度低下は本来無視できるのかもしれない。

実際には 2 つの運転挙動特性が混在しているように思われる⁶⁾。1 つは、勾配差や勾配変化が微少で認知し難いために、運転者が勾配変化分を補償するようなアクセル操作ができない、無意識のうちに速度低下を起こすのである。もう 1 つは、勾配差や勾配変化を認知して意識的に補償行動を取るのだが、補償行動が勾配変化に正確に対応しないために、速度変動に擾乱が生じて減速波を起こすのである。

既存の運転挙動モデルで、勾配変化の影響を表現しているのは式(18)と(19)だけであるが、これは上記のような 2 つの複雑な運転挙動特性を取り入れてはいない。低密度交通流での単独走行実験で勾配変化の影響を調べると、運転挙動の任意性が高くて検証困難である。また低密度交通流時の勾配変化の影響と、高密度交通流時における勾配変化の影響が同じである保証は

ない。低密度交通流時には道路線形に関する視覚情報は豊富だが、高密度交通流時には周辺車両に邪魔され道路線形は視認し難くなる。さらに周辺車両も自車両と同様に速度低下を起こしており、自車両速度の認知感度が非常に低下することも想像される。

高密度交通流時の勾配変化の影響を調べることは容易でないが、この課題を解決してこうした影響を適切にモデル化できなければ、サグにおける渋滞の発生現象を再現する一般的なモデルは構築できないであろう。

(2) モデル構造の改良とモデル分析

既存の追従挙動モデルが上記のa)～f)の条件をどれだけ満たすか、主にシミュレーションによる数値実験とその解析により特性分析を進めることが必要である。

その上で3., 4.における検討を踏まえると、必要に応じて次のようなモデル構造の改良が考えられる。

1. これまでの追従挙動モデルは全てフィードバック制御であったが、これにフィードフォワード(将来を見越す)制御を加える
2. 人間の反応に存在する非線型性(図-1 参照)を適用する
3. 視覚情報の対数認知則を適用する

これらのアイディアを具体的にモデル構造として実現するとともに、このモデルの理論解析や数値実験による特性解析、実証データによる検証を進めていくことが求められる。

検討内容には、例えば全く均一な運転者(追従挙動モデルパラメータがすべて同一)でも必ずある条件を満たせば渋滞は発生するのか、それとも非均一性に本質的な渋滞発生の要因があるのかを明らかにすること、あるいは、渋滞が発生しているサグと発生しないサグの特性の違いを、モデル構造によって説明すること、などが考えられる。さらに道路構造やモデルパラメータに応じて、追従挙動特性及びこれから導かれる交通流特性がどのように変化するのか、感度分析を行い、望ましい道路構造や運転挙動特性を検討することも重要なである。

またAHSを例えればサグ部の円滑化対策として導入する場合に、次の2点を事前に十分に評価することが肝要であろう。1つは、AHSのシステム・パラメータのチューニングである。システムが装着されていない現状の車両の追従挙動と比較して、AHSの性能をどのようにすることで渋滞改善効果が得られるのかを明らかにする必要がある。また、通常車両とAHS車両の混在時のサグ部における交通流全体の状態(円滑性・安全性)の性能を評価することも必要である。いずれも追従挙動モデルを確立するにより、こうした応用研究の可能性が開かれるものと考えられる。

(3) 調査・解析

a) 実証データの蓄積

様々な既存または改良された追従挙動モデルは、実際の追従挙動の観測データにより検証され、一般性を見出すことが求められる。

ここで渋滞発生前後の高密度交通流における運転挙動に絞って、分析に十分耐えられる量と質のデータを揃えることが重要である。道路線形や逐次車両位置を正確に把握したデータを、様々な場所や条件の「渋滞の発生前後の交通状態」で蓄積する必要がある。なおこれには、時空間上を動的に変化する実交通現象の定量観測手法の確立が不可欠である。

渋滞現象の実態もよく分かっていない。渋滞後捌け容量に渋滞巻込まれ時間と相関が見られること⁹⁹⁾、渋滞発生時交通容量にも別の上流渋滞の巻込まれ経験と関係が見られること¹⁰⁰⁾、渋滞発生時交通量に大きなばらつきがあり確率的な扱いが必要なこと¹⁰⁰⁾、図形可変渋滞情報板が隘路となる事例報告¹⁰¹⁾、単路部渋滞発生時における車線利用率の追越車線への偏りと付加車線による車線利用率の均等化に関する実証分析^{102)～105)}、など近年高速道路単路部の容量特性は少しずつ解明されつつあるが、いずれも一部の対象区間でしか確認されていない場合が多く、こうした個別の知見を広く一般化して検証する研究も必要である。

b) モデル特性のシミュレーション実験

多くの追従挙動モデルにおいては理論解析が困難であり、シミュレーションによる数値実験を系統立てて実施してパラメータの感度分析や安定性解析を行い、様々な既存または改良された追従挙動モデルについて、5.(1)のa)～f)に示された追従挙動特性を備えているか精査する必要がある。

シミュレーション実験の場合には、スキャンインターパル、反応遅れ時間などの設定、モデル構造の修正・変更、実験の実行時間や実行可能台数、出力可能な時間・空間範囲、ブレラン方法などに関する自由度の確保、出入力変数と計算の精度が数値実験結果に及ぼす影響の確認、などに留意することが重要である。

c) 走行シミュレータの援用

交通流シミュレーション実験では必ずモデルが必要だが、CG(Computer Graphics)により仮想的な交通流状況を生成し、走行環境を模擬した走行シミュレータを用いた模擬運転走行実験手法も存在する^{66),106)}。実際の道路においては、前方車を含む周辺の走行車両環境に大きく左右されて運転挙動データの取得条件が制御出来ないのでに対し、走行シミュレータでは同じ条件で同一の被験者に繰り返し調査をしたり、被験者を変えて調査することができる。こうした調査から同一の被験者からなる仮想的な交通流を生成してその特性を

分析したり、複数の追従特性の混在する場合との比較を行うことが出来る。走行シミュレータを利用する場合には、これが実際の道路上における車両運転挙動をどれだけ再現可能か、限界を踏まえつつ常に検証をすることが肝要であろう。

d) 追従挙動以外の運転挙動

高速道路単路部における渋滞の発生に対して支配的な要因は追従挙動特性であると思われる。しかし渋滞発生のきっかけに車線変更が影響している可能性も否定できない。特に渋滞発生時交通容量に大きなばらつきがあることは、車線変更挙動の発生確率とも関連性がある可能性がある。

本稿では高速道路単路部における渋滞発生時の交通現象解析を目的とした運転挙動モデルについて整理・展望してきたが、これらの検討は一般的なさまざまな道路区間における交通流現象の解析に対しても有益な知見をもたらすであろう。分合流部や織込み区間の交通容量、交差点の飽和交通流率の規定要因、あるいは道路線形など道路幾何構造と運転挙動の関係などについて、基礎的な運転挙動特性や調査・解析手法に関する蓄積という点で大いに貢献するものと期待される。

謝辞：本稿の検討の一部は、建設省委託研究：「ITSに関する基礎的先端的研究」(受託研究代表者：東京大学生産技術研究所坂内正夫教授)による補助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 越正毅：高速道路トンネルの交通現象、国際交通安全学会誌、Vol.10, No.1, pp.32-38, 1984.
- 2) 越正毅：高速道路のボトルネック容量、土木学会論文集、No.371/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 3) 越正毅、大口敬：高速道路サグにおける渋滞とその対策、道路、No.651, pp.65-69, 1995.
- 4) 大口敬：高速道路サグにおける渋滞の発生と道路線形との関係、土木学会論文集、No.524/IV-29, pp.69-78, 1995.
- 5) Pipes, L. A.: An Operational Analysis of Traffic Dynamics, *Journal of Applied Physics*, Vol.24, No.3, pp.274-287, 1953.
- 6) Chandler, R. E., Herman R. and Montroll, E. W.: Traffic Dynamics: Studies in Car Following, *Oper. Res.*, Vol.6, pp.165-184, 1958.
- 7) Kometani, E. and Sasaki, T.: On the Stability of Traffic Flow (Report 1), *J. Oper. Res. Soc. Japan*, Vol.2, No.1, pp.11-26, 1958.
- 8) Kometani, E. and Sasaki, T.: On the Stability of Traffic Flow (Report 2), *J. Oper. Res. Soc. Japan*, Vol.2, No.2, pp.60-79, 1959.
- 9) Herman, R., Montroll, E. W., Potts, R. B. and Rothery, R. W.: Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Follwing, *Oper. Res.*, Vol.7, pp.86-106, 1959.
- 10) Gazis, D. C., Herman, R. and Potts, R. B.: Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow, *Oper. Res.*, Vol.7, pp.499-505, 1959.
- 11) Kometani, E. and Sasaki, T.: A Safety Index for Traffic with Linear Spacing, *Oper. Res.*, Vol.7, pp.704-720, 1959.
- 12) Kometani, E. and Sasaki, T.: Dynamic Behavior of Traffic with a Nonlinear Spacing-Speed Relationship, *Theory of Traffic Flow (Proc. of Sym. on TTF(GM))*, pp.105-119, 1959.
- 13) Herman, R. and Potts, R. B.: Single-Lane Traffic Theory and Experiment, *Theory of Traffic Flow (Proc. of Sym. on TTF(GM))*, pp.120-146, 1959.
- 14) Helly, W.: Simulation of Bottlenecks in Single-Lane Traffic Flow, *Theory of Traffic Flow (Proc. of Sym. on TTF(GM))*, pp.207-238, 1959.
- 15) Edie, L. C.: Car-Following and Steady-State Theory for Non-Congested Traffic, *Oper. Res.*, Vol.9, pp.66-76, 1961.
- 16) Newell, G. F.: Nonlinear Effects in the Dynamic of Car Following, *Oper. Res.*, Vol.9, pp.209-229, 1961.
- 17) Gazis, D. C., Herman, R. and Rothery, R. W.: Non-linear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow, *Oper. Res.*, Vol.9, pp.545-567, 1961.
- 18) Kometani, E. and Sasaki, T.: Car-Following Theory and Stability Limit of Traffic Volume, *J. Oper. Res. Soc. Japan*, Vol.3, pp.176-190, 1961.
- 19) Herman, R. and Rothery, W.: Car Following and Steady State Flow, *Proc. of 2nd ISTTF(London)*, pp.1-11, 1963.
- 20) Michaels, R. M.: Perceptual Factors in Car-Following, *Proc. of 2nd ISTTF(London)*, pp.44-59, 1963.
- 21) May, A. D. and Keller, H. E. M.: Non-Integer Car-Following Models, *Highway Res. Board*, No.199, pp.19-32, 1967.
- 22) Pipes, L. A.: Car Following Models and the Fundamental Diagram of Road Traffic, *Transpn. Res.*, Vol.1, pp.21-29, 1967.
- 23) Unwin, E. A. and Duckstein, L.: Stability of Reciprocal-Spacing Type Car Following Models, *Transpn. Sci.*, Vol.1, pp.95-108, 1967.
- 24) Rockwell, T. H., Ernst, R. L. and Hanken, A.: A Sensitivity Analysis of Empirically Derived Car-Following Models, *Transpn. Res.*, Vol.2, pp.363-373, 1968.
- 25) Weiss, G.: On the Statistics of the Linear Car Following Model, *Transpn. Sci.*, Vol.3, pp.88-89, 1969.
- 26) Evans, L. and Rothery, R.: Experimental Measurements of Perceptual Thresholds in Car-Following, *Highway Res. Recrd.*, No.464, pp.13-29, 1973.
- 27) Ceder, A. and May, A. D.: Further Evaluation of Single- and Two-Regime Traffic Flow Models, *Transpn. Res. Recrd.*, No.567, pp.1-15, 1976.
- 28) Ceder, A.: Deterministic Traffic Flow Model for the Two-Regime Approach, *Transpn. Res. Recrd.*, No.567, pp.16-30, 1976.
- 29) 佐藤馨一、五十嵐日出夫：非線型交通流モデルに関する研究、土木学会論文報告集、No.258, pp.85-95, 1977.
- 30) Ceder, A.: Stable Phase-Plane and Car-Following Behavior as Applied to a Macroscopic Phenomenon, *Trans. Sci.*, Vol.13, pp.64-79, 1979.
- 31) 古谷直道：車の運転とカタストロフ、数理科学、No.196, pp.36-42, 1979.
- 32) 古谷直道：車の運転とブロクセミクス、数理科学、No.198, pp.62-69, 1979.
- 33) Easa, S. M. and May, A. D.: Generalized Procedure for Estimating Single- and Two-Regime Traffic-Flow Models, *Transpn. Res. Recrd.*, No.772, pp.24-37, 1980.
- 34) Gipps, P. G.: A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation, *Transpn. Res.*, Vol.15B, No.2,

- pp.105-111, 1981.
- 35) 岩崎征人, N. Tenny : 大きな速度変化を受ける追従車両の走行挙動特性, 土木学会論文集, No.353/IV-2, pp.111-117, 1985.
- 36) 大庭孝之, 越正毅, 赤羽弘和 : 追従挙動における反応遅れに関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, No.42IV, pp.58-59, 1987.
- 37) 阿部幸康, 高森衛 : 追従方程式から得られる交通流モデルの一般解に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, No.42IV, pp.60-61, 1987.
- 38) 大庭孝之, 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和 : 渋滞流における追従挙動モデルの検証, 土木学会年次学術講演会講演概要集, No.43IV, pp.252-253, 1988.
- 39) 大口敬, 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和 : ファジイ推論を用いた車両の追従挙動モデル, 土木計画学研究・講演集, No.13, pp.221-228, 1990.
- 40) 尾崎晴男 : 自動車の追従走行挙動に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.375-380, 1991.
- 41) J. Xing, 大口敬, 越正毅 : 高速道路単路部の交通流の動的特性, 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.621-628, 1991.
- 42) 山田稔, 鈴木徹 : 街路の追従走行における速度と車間距離の変動に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.10, pp.87-94, 1992.
- 43) Kikuchi, S. and Chakroborty, P.: Car-Following Model Based on Fuzzy Inference System, *Transp. Res. Recrd.*, No.1365, pp.82-91, 1992.
- 44) 中山晴幸, 和田幹彦, 市川孝太郎 : スパイアル曲線を用いた交通流シミュレーション・モデルの検討, 交通工学研究発表会論文集, No.13, pp.25-28, 1993.
- 45) Ozaki, H.: Reaction and Anticipation in the Car-Following Behavior, *Proc. of 12th ISTTT(Berkley)*, pp.349-366, 1993.
- 46) 尾崎晴男 : 車両の追従挙動とサグの隘路現象, 東京大学博士(工学)学位論文, 1994.
- 47) 黒沢隆一 : 交通検討用汎用運転モデルの提案, 交通工学研究発表会論文集, No.14, pp.165-168, 1994.
- 48) J. Xing, 越正毅 : 高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追従挙動の研究, 土木学会論文集, No.506/IV-26, pp.45-55, 1995.
- 49) Ozaki, H.: Assistance of Drivers to Mitigate Highway Capacity Problem, *Proc. of 2nd WC on ITS(Yokohama)*, pp.1727-1731, 1995.
- 50) Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. and Sugiyama, Y.: Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation, *Journal of Physical Review E*, Vol.51, No.2, pp.1035-1042, 1995.
- 51) Del Castillo, J. M. and Benitez, F. G.: On the Functional Form of the Speed-Density Relationship - I: General Theory, *Transp. Res.*, Vol.28B, No.5, pp.373-389, 1995.
- 52) Del Castillo, J. M. and Benitez, F. G.: On the Functional Form of the Speed-Density Relationship - II: Empirical Investigation, *Transp. Res.*, Vol.28B, No.5, pp.391-406, 1995.
- 53) Del Castillo, J. M.: A Car Following Model Based on the Lighthill-Whitham Theory, *Proc. of 13th ISTTT(Lyon)*, pp.517-538, 1996.
- 54) 越正毅, 安井一彦, 小松弘一 : 高速道路サグにおける車両の走行挙動に関する研究, 交通工学研究発表会論文報告集, No.17, pp.81-84, 1997.
- 55) 藤原寛史, 越正毅 : 首都高速道路のサグ部及び曲線部におけるドライバーの運転挙動に関する研究, 交通工学研究発表会論文報告集, No.17, pp.85-88, 1997.
- 56) Nakanishi, K., Itoh K., Igarashi Y. and Bando, M.: Solvable optimal velocity models and asymptotic trajectory, *Journal of Physical Review E*, Vol.55, No.6, pp.6519-6532, 1997.
- 57) Sugiyama, Y. and Yamada, H.: Simple and exactly solvable model for queue dynamics, *Journal of Physical Review E*, Vol.55, No.6, pp.7749-7752, 1997.
- 58) Bando, M., Hasebe, K., Nakanishi, K. and Nakayama, A.: Analysis of optimal velocity model with explicit delay, *Journal of Physical Review E*, Vol.58, No.5, pp.5429-5435, 1997.
- 59) 山田稔, 山形耕一, 伊東英則 : 道路形状別にみた単路部における運転者の追従特性の統計的モデル表現に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.765-772, 1998.
- 60) Holland, E. N.: A Generalised Stability Criterion for Motorway Traffic, *Transpn. Res.*, Vol.32B, No.2, pp.141-154, 1998.
- 61) 井ノロ弘昭, 河上省吾, 荻野弘 : ファジイ的ニューラルネットワークを用いた追従走行モデルの構築, 土木情報システム論文集, No.7, pp.73-80, 1998.
- 62) 大口敬, 越正毅, 桑原雅夫, 池内岳彦 : 高速道路サグの視認性に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, No.47IV, pp.336-337, 1992.
- 63) 大口敬 : 高速道路サグの道路構造と視認性, 高速道路と自動車, Vol.35, No.11, pp.31-37, 1992.
- 64) Ozaki, H.: Perception Ability of Vertical Road Alignment by Drivers, *Proc. of 3rd WC on ITS(Orlando)*, CD-ROM only, 1996.
- 65) 小谷益男, 岩崎征人, 児島正之, 古市朋輝 : 高速道路のサグ部における運転者の認知特性に関する基礎的研究, 土木計画学研究・講演集, No.21(2), pp.913-916, 1998.
- 66) 飯田克弘, 三木隆史, 森康男, 大口敬, 松本晃一 : 寒走実験とドライビングシミュレータを用いた室内実験によるサグ部の運転挙動分析, 土木計画学研究・講演集, No.22(2), pp.967-970, 1999.
- 67) 田崎京二, 大山正, 楠渡清二編 : 視覚情報処理 - 生理学・心理学・生体工学-, 朝倉書店, 1982.
- 68) 村田隆裕 : 自動車運転者の車間距離認知, 交通工学, Vol.22, No.6, pp.21-29, 1987.
- 69) 南宮 Moon, 門田博知, 今田寛典 : 運転者の曖昧性を考慮した運転行動の解析法に関する基礎研究, 土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp.359-366, 1991.
- 70) 角知恵, 渡辺義則, 坂口裕司, 河原瑞将, 寺町賢一 : 信号交差点を発進する車群先頭車のマン・マシン・システム・モデル, 土木学会論文集, No.530/IV-30, pp.99-107, 1996.
- 71) 林喜男 : 人間の制御行動, 國際交通安全学会誌, Vol.3, No.4, pp.5-12, 1977.
- 72) 近藤文治編 : 基礎制御工学, 森北出版, 1977.
- 73) 山本重彦, 加藤尚武 : PID 制御の基礎と応用, 朝倉書店, 1997.
- 74) 井口雅一 : 人間-機械系 - 人による機械の制御-(情報科学講座 : B. 生体情報 : B.9. 生物工学), 共立出版, 1970.
- 75) 竹内良治, 寺西孝一郎, 永井正夫 : ハイブリッド操舵モデルによる人間-自動車系の操作性評価, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.912-1, pp.161-164, 1991.
- 76) 永井正夫 : 適応操舵による人間-自動車系の閉ループ特性の解析と評価, 自動車技術会論文集, No.35, pp.104-111, 1987.
- 77) 永井正夫, 小島幸夫, 佐藤博文 : 交差点通過時の人間-自動車系の研究(第1報:右折行動のファジイ制御モデルと走行実験), 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.872, pp.449-454, 1987.
- 78) 相馬仁, 平松金雄, 岩元貞雄 : ファジイ推論を応用したプログラム操舵モデル, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, No.881, pp.113-116, 1988.
- 79) 平松金雄, 相馬仁 : 車線変更時のドライバ挙動のモデル

- 化, 自動車技術会論文集, No.38, pp.55–61, 1988.
- 80) 相馬仁, 平松金雄 : 車線変更時のドライバモデルーブログラム操舵モデルの有用性-, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, No.871, pp.67–72, 1987.
- 81) 清水明禎, 酒井宏, 築地原政文, 大山敏晴 : プログラム操舵と 3 次予測操舵による熟練ドライバーのモデル化, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.936, pp.161–164, 1993.
- 82) 藤岡健彦, 田久保宣晃 : 神経回路網(ニューラルネットワーク)を利用した運転者モデルの研究, 自動車技術会論文集, Vol.22, No.2, pp.69–72, 1991.
- 83) 田久保宣晃, 藤岡健彦 : 神経回路網(ニューラルネットワーク)を利用した運転者モデルの研究-第 2 報:一般路での走行シミュレーション-, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.902-2, pp.189–192, 1990.
- 84) 藤岡健彦, 田久保宣晃 : 神経回路網(ニューラルネットワーク)を利用した運転者モデルの研究, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, No.901, pp.261–264, 1990.
- 85) 景山一郎, 渡邊良則, 大和田克幸 : ニューラルネットワークを用いた人間-自動車系のモデル化, 自動車技術, Vol.48, No.12, pp.5–11, 1994.
- 86) 末富隆雅, 坂田晴彦, 後藤功一, 吉本堅一 : 運転者の車速制御動作のモデル化, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, No.871, pp.73–78, 1987.
- 87) 末富隆雅, 吉本堅一, 坂田晴彦, 後藤功一 : 曲線路走行中の運転者の車速制御のモデル化, 自動車技術会論文集, No.38, pp.78–84, 1988.
- 88) 坂田晴彦, 吉本堅一, 平野敏樹 : ドライバの車間距離制御に関する研究, 自動車技術会論文集, No.41, pp.51–56, 1989.
- 89) 渡辺昇治, 吉本堅一 : 運転動作モデルの改良, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.892, pp.217–220, 1989.
- 90) 鶴巻良博, 中川淳, 吉本堅一 : 道路幅員を考慮した運転動作のモデル化, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.912-1, pp.201–204, 1991.
- 91) 渡辺昇治, 吉本堅一 : 高・低速走行時の運転者の操舵角／トルク・ハイブリッド制御動作モデルの提案, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, No.921, pp.13–16, 1992.
- 92) 田中幹, 田辺英昭, 吉本堅一 : 自動車の運転における車速制御動作のモデリング, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.936, pp.153–156, 1993.
- 93) 吉本堅一, 田辺英昭, 田中幹 : 自動運転のための車速制御アルゴリズム, 自動車技術会論文集, Vol.27, No.1, pp.145–149, 1996.
- 94) 服部義和, 浅野勝宏, 岩間紀男, 重松崇 : 追従走行時の減速ドライバモデル, 自動車技術会秋季学術講演会前刷集, No.936, pp.157–160, 1993.
- 95) 片倉正彦 : 織込み区間にに関する研究の現状と課題, 土木学会論文集, No.440/IV-16, pp.33–40, 1992.
- 96) Greenberg, H.: An Analysis of Traffic Flow, *Oper. Res.*, Vol.7, pp.79–85, 1959.
- 97) Lighthill, M. J. and Whitham, G. B.: On Kinematic Waves: 1. Flood Movement in Long Rivers, *Proc. of the Royal Society of London*, Series A, Vol.229, pp.281–316, 1955.
- 98) 田村洋一, 横木武: 自由車・追従車構成に着目した車頭時間分布モデルに関する研究, 土木学会論文報告集, No.336, pp.159–168, 1983.
- 99) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和 : 高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究, 土木学会論文集, No.458/IV-18, pp.65–71, 1993.
- 100) 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則, 大谷武彦 : 高速道路単路部渋滞発生時の交通現象解析, 土木計画学研究・講演集, No.21(2), pp.905–908, 1998.
- 101) 仲柴二三夫, 竹本勝典, 折野好倫 : 可変情報板が交通流に及ぼす影響について, 交通工学研究発表会論文報告集, No.17, pp.153–156, 1997.
- 102) 栗原光二, 日置洋平 : 高速道路ボトルネックの交通容量改善策, 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.731–738, 1995.
- 103) 栗原光二, 羽山章, 富高久智 : トンネル断面と交通容量に関する評価分析-名神高速道路梶原・天王山トンネルを対象として-, 交通工学, Vol.32, No.1, pp.39–47, 1997.
- 104) 渡邊亨, 山岸将人, 安積淳一, 大口敬 : 付加車線の車線利用率は正効果に関する実証的研究, 土木計画学研究・講演集, No.23, 2000(掲載予定).
- 105) 大口敬, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 渡邊亨 : ボトルネック上流における車線利用率の矯正効果と付加車線設置形態, 交通工学, 投稿中.
- 106) 金子哲也, 大口敬, 飯田克弘, 渡邊亨 : ドライビング・シミュレータを用いた追従挙動特性の研究, 土木計画学研究・講演集, No.23, 2000(掲載予定).

(1999.11.8 受付)

ANALYSIS OF BOTTLENECK PHENOMENA AT BASIC FREEWAY SEGMENTS - CAR-FOLLOWING MODEL AND FUTURE EXPLORATION -

Takashi OGUCHI

This paper deals with the importance of 'Driving Behavior models' from the points of view of academic interests and engineering aspects. For academic interests, the mechanism of occurrence of capacity bottlenecks at basic freeway segments, which occur around sag sections or entrance of tunnels, should be clear. From the aspects of engineering, it is important to find countermeasures for such bottleneck phenomenon by traffic operation, road design, or future technology like Advanced cruise-assist Highway Systems. In this paper, reviewing the former driving behavior models, especially car-following behavior models, including man-machine model in the field of control theory, the future research needs for car-following models to analyzing bottleneck phenomena at basic freeway segments are summarized.