

# スパイラル曲線として表現される車両追従挙動モデルの交通流再現性\*

A Study on Reproducibility of Traffic Flow of the Model of Car-following Behavior Illustrated as Spiral Movements\*

葛西 誠\*\*

By Makoto KASAI\*\*

## 1. はじめに

都市間高速道路単路部のサグ部やトンネル部を先頭とした自然渋滞は1970年代後半からその存在が認識されるようになり、時間損失に伴う経済損失を解消する必要に迫られた<sup>1)2)</sup>。しかし、交通流内部から渋滞が自然発生することは当時の常識からは想像し難いことであり<sup>1)2)</sup>、ボトルネック現象そのものの成因を特定できないが故に、いわば急所を突く対策を講ずることが不可能であった。これを受け、交通流を動的にかつミクロ的に分析することで、ボトルネック現象を説明する試みが続けられ、サグ部での速度低下を仮定する方法<sup>3)</sup>、または縦断勾配変化への応答の良いアクセルワークが不可能と仮定する方法<sup>4)</sup>によりボトルネック現象を表現できる可能性が示唆されている。

しかし、実際の渋滞対策を念頭に置くと、線形改良や付加車線整備などの道路幾何構造の改変に伴って、容量向上がどの程度見込まれるかを評価することが求められる。したがって、道路幾何構造が交通流へ及ぼす影響を定量的に記述する必要があるが、既往交通流モデルにはこの要求を満足するものは存在しない。

筆者ら<sup>5)</sup>は、実追従挙動の特徴である「スパイラル曲線挙動」を表現する追従挙動モデル（以下ばね質点モデルとする）を提唱した。本論文の目的は、1)この提唱モデルの交通流再現性を確認すること、2)位置によって追従特性（モデルのパラメータ値を変化させることで表現可能）を変化させたときに、渋滞先頭が特定の地点に留まることが表現可能かを確認することである。

## 2. 既往交通流モデル

高速道路単路部で見られる渋滞現象は、自由流から渋滞流への自発的な転移といえ、動的な扱いは最低限求められる。こうした観点からは、交通工学黎明期に提

唱された交通流モデルに要求を満たすものはない。例えば、Easa and May<sup>6)</sup>を代表とする静的な交通流モデルはもちろんのこと、古典的追従モデルの代表であるGMモデル<sup>7)</sup>も初期条件の設定によっては動的な現象が表現不可能であることが知られている。

高速道路上の交通流を動的に扱うことの必要性を述べたのは越<sup>2)</sup>であり、Xingら<sup>3)</sup>による実証、さらに尾崎<sup>4)8)</sup>による改良を経て、サグ部でのボトルネック現象に一定の説明を与える追従挙動モデルが得られている。しかし、例えばこれら追従挙動モデルのパラメータ値を僅かに変化させシミュレーションを実行すると不安定な挙動を示し追突が生じることも指摘されており<sup>9)</sup>、したがって個々の追従挙動の集積として交通流を表現することに不安があることも事実である。一般に追従挙動は前方車の挙動に対しある時間遅れの後に自車を制御するものと了解されているが、モデル中に時間遅れ項を導入することは、物理的には自由度が増大することを意味し、このために上述の不安定性が生じるという指摘がある<sup>10)</sup>。

交通工学分野以外へも目を向けると、例えば物理学分野からの参入として、空間を離散的に表現し車両移動ルールにセル・オートマトン理論を適用したNishinari *et al.*<sup>11)</sup>の研究がある。しかし、渋滞流域に相当する高密度クラスターが形成し上流伝播することは良好に表現できているものの、ボトルネックの形成過程については議論がない。そのほか、ミクロ追従型モデルも提唱されており、前方車との車間距離に応じて自車速度を制御するOV(Optimal Velocity) Model<sup>12)</sup>が広く認知されている。これを基に、サグ部では速度低下すると仮定し、ボトルネック同様の現象が再現されたとする研究<sup>13)</sup>も見られる。しかし、サグ部での速度低下がボトルネックの本質的構成要因であるか否かは自明ではなく、議論を要するところであろう。

いずれにせよ、既往交通流モデルは、自由流と渋滞流間の転移が表現できないこと、安定性が確保されないこと、道路幾何構造をパラメータとしておらずボトルネック現象が表現できないこと、のいずれかの問題を内包する。本研究はこの点を確認項目とし、提唱モデルの交通流再現性を議論する。

\* キーワーズ：交通流，交通容量

\*\*学生員，修(工)，東京理科大学大学院 理工学研究科  
土木工学専攻 (千葉県野田市山崎 2641

TEL: 04-7124-1501 Ext. 4058 FAX: 04-7123-9766

E-mail: j7606701@ed.noda.tus.ac.jp)

### 3. 提唱モデル

筆者ら<sup>5)</sup>は実追従挙動を車間距離-相対速度平面で観測すると、**図-1**のようにスパイラル状曲線を描くことを確認した。これを表現する物理系を**図-2**のように仮想し、以下のような常微分方程式として書き下した：

$$\frac{d^2Y}{dt^2} + \alpha \frac{dY}{dt} + \beta Y = p(t) \quad (1a)$$

$$p(t) = \beta Y_{\text{exp}}(t) \quad (1b)$$

$$Y_{\text{exp}}(t) = a_3 \{v_f(t)\}^3 + a_2 \{v_f(t)\}^2 + a_1 v_f(t) + a_0 \quad (1c)$$

ここに、 $t$ は時間、 $Y(t)$ は車間距離、 $v_f(t)$ は追従車速度、 $\alpha, \beta$ は係数である。 $p(t)$ は外力項であり、式(1b)の通り希望車間距離 $Y_{\text{exp}}(t)$ に比例する。 $Y_{\text{exp}}(t)$ は追従車速度の3次関数とし、 $a_n (n=1,2,\dots,4)$ は係数である。

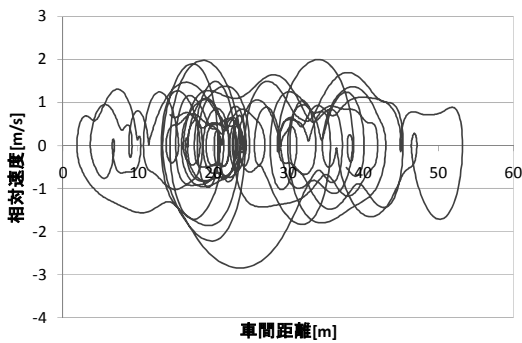


図-1 実挙動データのスパイラル曲線の例

式(1a)左辺は振動を表現し、 $\alpha$ は減衰あるいは発散の速さ、 $\beta$ は振動の速さと関係がある。具体的には**図-3**を参照されたい。**図-3**は $\alpha, \beta$ をそれぞれ2通り、計4通りに変化させ、仮想的にスパイラル曲線を描いたものである。

これらパラメータは、ドライバー属性・車種の構成や、道路幾何構造に依存した確率分布を持つと考えるこ

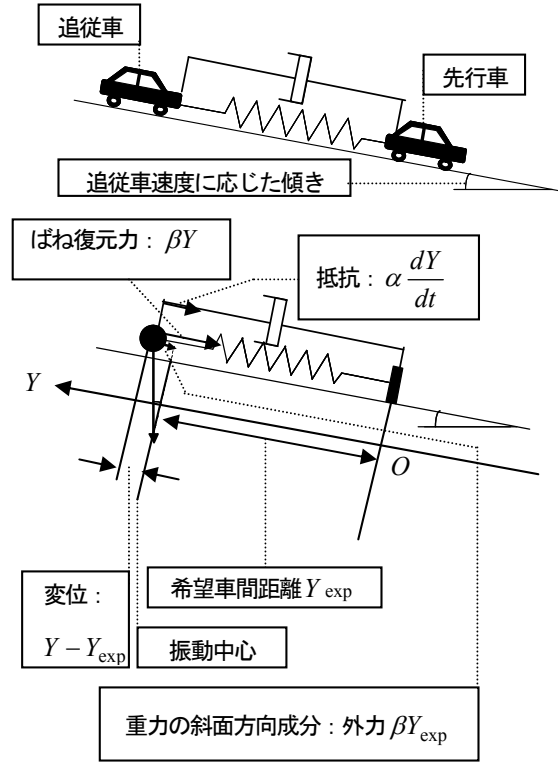


図-2 車両追従挙動のばね質点系への置き換え

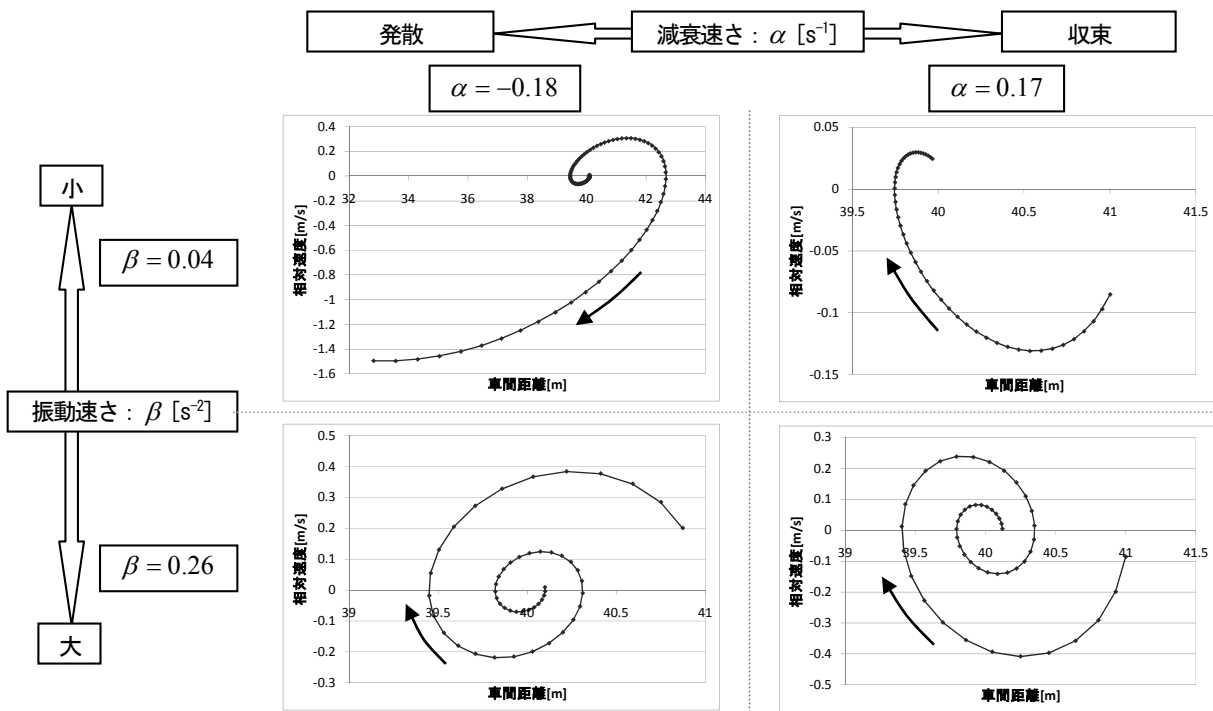


図-3 追従パラメータ $\alpha, \beta$ と振動状態の関係の概念

とが自然である。例えばある断面の交通容量が変動することは車群内のドライバー属性構成比の違いに由来するであろうし、また断面によって交通容量が異なっていることは道路幾何構造がパラメータとなっているためと考えられるであろう。実際、前者については、ビデオ観測から得た多数の車両挙動データを用いてパラメータ推定することにより、分布を持つことが示唆されている<sup>5)</sup>。しかしながら、以下では議論を簡単にするために、パラメータ値は全ての車両について同一の値とする。まず交通流を構成することが可能なパラメータ値範囲を探索し、その後、道路幾何構造による追従挙動の違いを反映させる方法について述べる。

#### 4. パラメータ値範囲の検討

##### (1) 希望車間距離パラメータの検討

式(1c)で示される希望車間距離項のパラメータ  $a_n$  の値は、以下のように定性的に範囲を推定することができる。表-1に示す通り、実挙動データとして(1)実路走行データによってパラメータ推定された値（「試験車両」とする）、(2)実路ビデオ観測データによって推定されたパラメータ分布の最頻値（「ビデオ観測」とする）および、代替案として「ビデオ観測」の値を僅かに変化させて作成した4つの試行パターンを用意する。図-4はそれぞれの試行パターンについて、一様定常流を仮定した

表-1 試行パターンと希望車間距離パラメータ設定値

パラメータ 試行パターン	$a_3$ [ $m^2s^3$ ]	$a_2$ [ $m^1s^2$ ]	$a_1$ [s]	$a_0$ [m]
試験車両	$3.33 \times 10^{-3}$	-0.123	3.00	3.32
ビデオ観測	$5.0 \times 10^{-3}$	0.05	2.0	12
代替案(1)	$5.0 \times 10^{-3}$	0.00	2.0	12
代替案(2)	$5.0 \times 10^{-3}$	-0.05	2.0	12
代替案(3)	$5.0 \times 10^{-3}$	-0.10	2.0	12
代替案(4)	$5.0 \times 10^{-3}$	-0.15	2.0	12

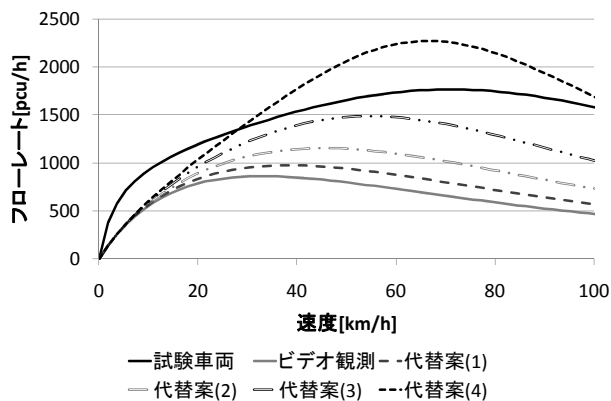


図-4 速度-フローレート曲線

ときの速度-フローレート曲線を示している。一般に単路の実現可能交通量は1,500pcu/lane/hrとされている<sup>3)</sup>ので、概ねこの知見に合致するのは代替案(3)である。

##### (2) 振動パラメータに関する安定性の検討

本追従モデルの集積で交通流が安定的に構成できるパラメータ値範囲を、シミュレーションによって実験的に求めてみよう。シミュレーション条件は以下の通りである：発生交通量1,500pcu/hr、車両発生間隔は最小車頭時間1.8秒かつ指数乱数に従う、全車追従、先頭車挙動は実路走行試験で採取されたデータをそのまま用いることとする。また、数値積分法として前進オイラー法を採用し、スキップインターバルは1/54秒とする。

図-5は、希望車間距離の設定として表-1の試行パターンを踏襲し、振動に係るパラメータ  $\alpha, \beta$  を変化させ、60分間の交通流を模擬したときに追突または後退が1度も発生していなかった場合のパラメータ値のセットを、パラメータ空間  $(\alpha, \beta, a_2)$  にプロットしてある。なお代替案(1)~(4)について値が変化しない希望車間距離パラメータは  $a_2$  のみであるため、 $a_3, a_1, a_0$  については図示にあたり考慮していない。図-5より、安定範囲は概ね  $\alpha > 0, 0 < \beta < 0.6$  となっており、 $a_2$  が大きいほど安定範囲は  $\alpha < 0$  にも及ぶようになる。いずれにせよ、追突等を生じずに交通流を構成することはパラメータ値を適切に選定すれば不可能ではないと言える。

次に、再現された交通流を実際に観察しよう。図-6は  $\alpha = 0.25, \beta = 0.5$ 、希望車間距離パラメータ値として代替案(3)を採用したときの速度コンター図である。なお色が濃いほど低速であることを意味する。減速波の上流伝播が確認でき、高密度流で見られる現象が再現できることが示されている。

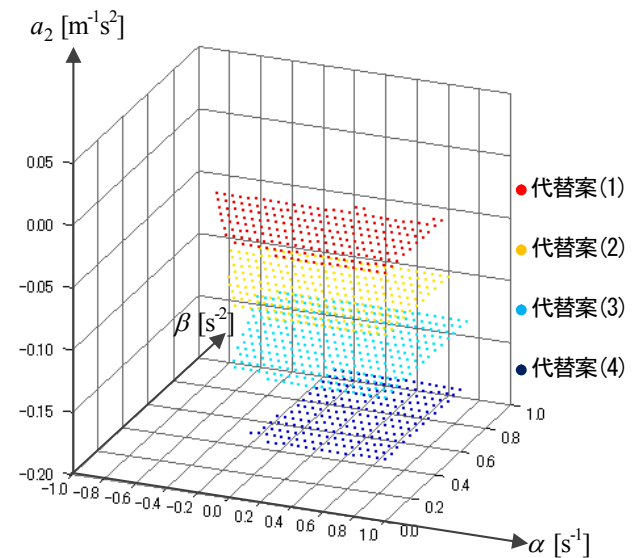


図-5 パラメータ空間  $(\alpha, \beta, a_2)$  における安定点

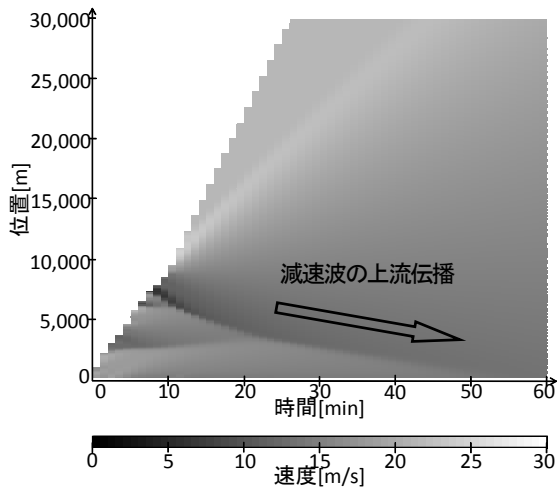


図-6  $\alpha = 0.25 [s^{-1}]$ ,  $\beta = 0.5 [s^{-2}]$ , 希望車間距離/パラメータ代替案(3)のときの速度コンター図

## 5. 定着現象の表現試行

ボトルネックが存在することは、追従挙動が道路幾何構造から何らかの影響を受けていることの証であろう。本章では走行位置によってばね質点モデルのパラメータ値を変化させ如何なる交通流が生成されるかを実験する。

ボトルネックでは、前方車の挙動にうまく反応できず追従が不安定になる地点である、という仮定はそれほど不合理ではあるまい。よって、前章にて不安定であるとされたパラメータ値をとる区間を意図的に設けシミュレーションを実行する。このため、不可避的に追突および後退が発生しているものの、敢えて以下の試行を行なう。不安定区間の設置位置・パラメータ値の設定によって無数のパターンが存在し得るが、紙面の都合上特徴的な結果の一例を図-7に示す。これは不安定区間を2カ所設けたときの速度コンター図であり、その区間(パラメータ値)は8,000-9,500m ( $\alpha = -0.1$ ,  $\beta = 0.085$ ), 10,000-10,500m ( $\alpha = -0.5$ ,  $\beta = 0.3$ )である。なおこれ以外の区間では安定なパラメータ値  $\alpha = -0.1$ ,  $\beta = 0.5$  をとる。希望車間距離パラメータ値は全区間に亘り表-1中の代替

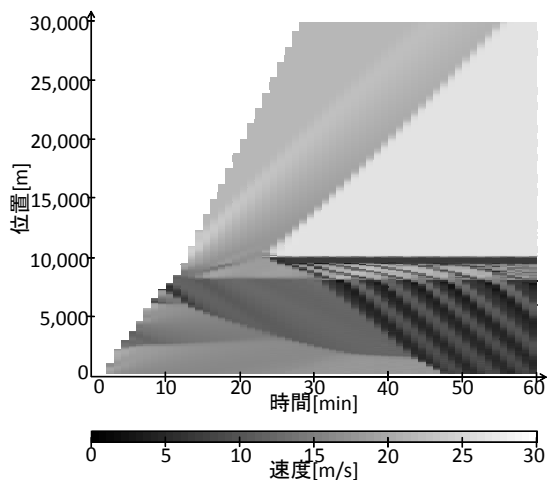


図-7 定着現象の再現例

案(3)とする。低速度域の先頭が8,000m付近に留まり、かつ渋滞流中を比較的低速な領域と高速な領域が交互に上流に伝播している様子が見て取れ、一般に渋滞流中で観測される現象を再現している。

## 6. むすび

本論文は提唱モデルの交通流再現性を検証したものである。追突など非現実な挙動を再現することなく交通流の構成が適切なパラメータ値の設定によって可能であることを示している。また走行位置によってパラメータ値を変化させることで、渋滞の発生、渋滞先頭の定着の様子が表現可能であることを示唆している。こうしたアプローチにより、いわゆる逆推定問題として交通容量とそれを規定する要因を特定することも可能と思われる。こうしてはじめて核心を突いた容量向上策が導入できるであろう。本論文の視点が対症療法ではない渋滞対策への第一歩となることを期待する。

### 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) 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.
- 4) 尾崎晴男：車両の追従挙動とサグ部の隘路現象，東京大学博士(工学)論文，1994.
- 5) 葛西誠，内山久雄，野中康弘：スパイラル曲線として表現される車両追従挙動のモデル化，土木学会論文集 D, Vol.63, No.1, pp.65-75, 2007.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Ozaki, H.: Reaction and Anticipation in the Car-Following Behavior, *Proc. Of 12th ISTTT*, pp.45-55, 1995.
- 9) 大口敬：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—，土木学会論文集，No.660/IV-49, pp.39-51, 2000.
- 10) 杉山雄規：交通流の物理，ながれ，Vol.22, No.2, pp.95-108, 2003.
- 11) Nishinari, K., Fukui, M. and Schadschneider, A.: A Stochastic Cellular Automaton Model for Traffic Flow with Multiple Metastable States, *J. Phys. A: Math. Gen.*, Vol.37, pp.3101-3110, 2004.
- 12) Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. and Sugiyama, Y.: Dynamic Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation, *Phys. Rev. E*, Vol.51, pp.1035-1042, 1995.
- 13) 只木進一，山本祥平，日永田泰啓：ボトルネックによる渋滞形成，応用力学研究所研究集会報告，No.18, ME-S5, 5pages, 2007.