

スパイラル曲線を用いた追従モデルの構築*

A Study on Car Following Model Applied Spiral Curve *

石田貴志**・成田紘也***・野中康弘****・葛西誠*****

By Takashi ISHIDA**・Koya NARITA***・Yasuhiro NONAKA****・Makoto KASAI*****

1. はじめに

都市間高速道路は我が国の経済を支える社会基盤であるがゆえ、一度渋滞が発生するとその経済的損失は多大なものとなるばかりでなく、交通事故の増加や環境負荷にも影響を与え、大きな社会問題となっている。本研究で対象とする都市間高速道路単路部の上り坂やサグ部で発生している渋滞も、現在の社会・経済状況に適応した効果的な渋滞対策を見出せないというのが実情である。その理由は、渋滞発生メカニズムに合理的な説明がつけられず、ミクロシミュレーション分析を構成する追従モデルにおいても渋滞発生現象を表現できていないことに他ならない。つまり、付加車線の設置やTDMなど肌理細かな渋滞対策の効果を計測することのできるシミュレーション分析に踏み切るために、これを表現し得る追従モデルの構築が急務である。

そこで、本研究では都市間高速道路単路部におけるミクロシミュレーション分析を行うために、既往研究では表現できなかった渋滞発生現象を表現できる新たな追従モデル構造を提案し、シミュレーションによって、構築した追従モデルの適用性を検証することを目的とする。なお、本誌では紙面の都合上、追従モデル構造の提案を主に記し、シミュレーションの条件等は必要最小限の記述に留めることとする。

*キーワード：交通流

**正会員, 修(工), (株)道路計画 技術部

(東京都新宿区新宿2-13-10武蔵野ビル3階,

TEL:03-3357-9220, E-mail:t_ishida@doro.co.jp)

***非会員,東日本旅客鉄道(株) 秋田支社土木技術センター

****正会員, 東京理科大学大学院理工学研究科

*****学生会員, 東京理科大学大学院理工学研究科

2. 既往研究のレビュー

自動車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、現在も鋭意研究が行われている。追従モデルの系譜については、大口の文献¹⁾に詳しいが、ここでは、2つの主な追従モデルと、現在の追従モデルが解決すべき課題について筆者らの認識と合わせて整理する。

現在、多くの文献によって引用されているモデルは、越が提唱したモデルである^{2),3)}。このモデルは、単路部のサグやトンネルでの自然渋滞が発生するボトルネック部において、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おこすことの再現を試みたものであり、特定の観測結果に合わせるだけであれば再現可能となっている。

また、中山らは本研究とはアプローチの方法は違うものの、スパイラル曲線を用いた追従モデルを提唱している⁴⁾。このスパイラル曲線による追従モデルは、先行車の速度が一定であると仮定したとき、相対速度の変化量は単位時間あたりの追従車の加速度で表すことができるとしたものである。

これらのモデルを含め、現在考えられている追従モデルの抱える問題点として、各モデルを用いて単路部渋滞の再現を試みると、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、実挙動に即した、追突せずに、勾配等線形条件等が異なるボトルネックにおいて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)の一般的特性は未だ不明であり、課題となっている。

3. 追従モデルの構造式

本研究では、追従挙動がスパイラル曲線によって支配されることに基づいて、追従モデルを構築する。スパイラル曲線は横軸に車間距離、縦軸に相対速度をとり、追従挙動をトレースすると、時計回りの螺旋曲線を描き、希望車間距離(相対速度0)に収束するものである。図1は実際に渋滞流中をプローブカーで走行したときに得られたスパイラル曲線である。上述のとおり、螺旋を描きながら希望車間距離に収束しようとする動きが確認できる。また、このスパイラル曲線を形成する車間距離と相対速度をそれぞれ縦軸に、経過時刻を横軸にとると図2、3のように減衰曲線を描くことに着目し、モデル構造を2つの減衰曲線の組合せで表現する以下の式(1)とする。

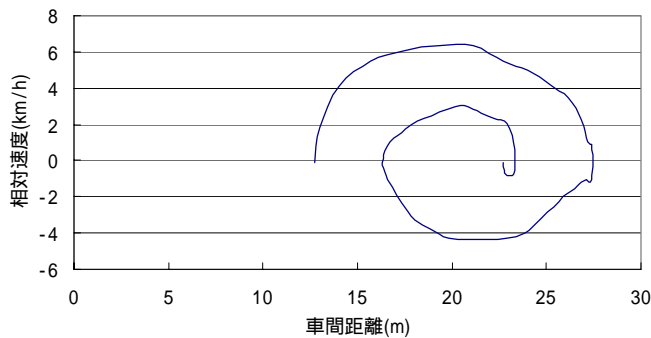


図1 実挙動のスパイラル曲線

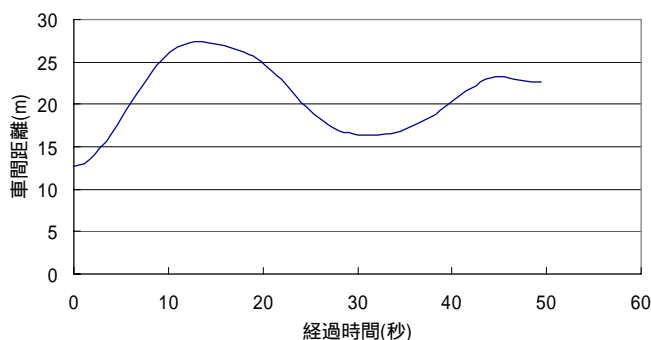


図2 実挙動の車間距離変動図

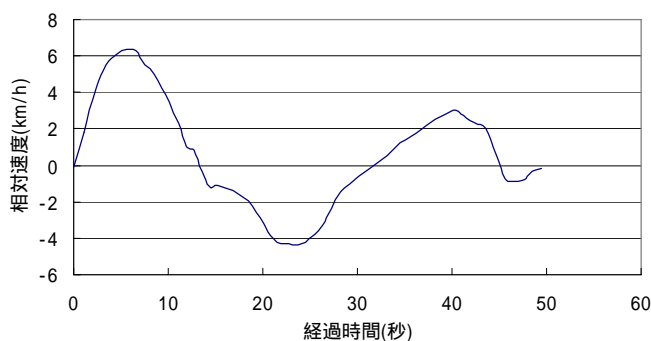


図3 実挙動の相対速度変動図

$$\begin{aligned} y_1 &= a_1 \exp(-k_1 t) \cos(\omega t + \varepsilon_1) + A \\ y_2 &= a_2 \exp(-k_2 t) \cos(\omega t + \varepsilon_2) \end{aligned} \quad \text{式(1)}$$

ここで、

- y_1 : 車間距離 (m)
- y_2 : 相対速度 (km/h)
- t : 経過時間 (s) (全て 0 から始まる)
- a_1, a_2 : 振幅
- k_1, k_2 : 減衰の強さ
- ω : 角振動数 (1/s)
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 位相
- A : 希望車間距離 (m)

このとき、 t を変数とし、 $a, k, \omega, \varepsilon, A$ をスパイラルパラメータとここでは呼ぶ。スパイラルパラメータの制約条件は以下のとおりとなる。

$$\begin{cases} a_1, a_2 > 0 \\ k_1, k_2 > 0 \\ 2 \times 2/4 \leq \varepsilon_1 < 2 \times 6/4 \\ 2 \times 3/4 \leq \varepsilon_2 < 2 \times 7/4 \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 2 \times 1/4 \\ A > 0 \end{cases}$$

y_1, y_2 はそれぞれ車間距離と相対速度を表す構造式であり、指数曲線と \cos 曲線を組合せることで、減衰振動を表すことができる。 a_1, a_2 は振幅を表すパラメータで、位相 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ を変えると理論上は正負のどちらの符号もとりに得るため、ここでは正の値という制約条件を与える。 a_1, a_2 が大きくなるほど、それぞれ車間距離と相対速度のとり得る値は大きくなる。 k_1, k_2 は減衰の強さを表すパラメータである。 k_1, k_2 に正の値という制約条件を与えることによって、減衰振動を表すことができる。このとき、 k_1, k_2 が負の値をとると、 y_1, y_2 は減衰せずに発散する。また、 k_1, k_2 の値が大きいほど、減衰が強くなり、収束しやすいことを示す。 ω は角振動数であり、 2π を周期 T で除したものである。 ω は y_1, y_2 において共通の値であり、それ

ぞれの値を異にすると、スパイラル曲線が歪むことになる。 ε_1 , ε_2 は位相でありスパイラル曲線の開始位置を示すものである。また ε_2 は ε_1 より $1/4$ 周期進めた値とすることによって実挙動に適したスパイラル曲線を得ることができる。また、 ε_1 , ε_2 を 2 周期で変化させると他のパラメータはいくつもの値をとることが可能となるため、 $2 \times 2/4 \leq \varepsilon_1 < 2 \times 6/4$, $2 \times 3/4 \leq \varepsilon_2 < 2 \times 7/4$ という制約条件を与える。最後に、 A は y_1 を平行移動させた量であり、スパイラル曲線が収束する車間距離である。これは実挙動においては希望車間距離を示す。

スパイラル曲線を構造式の基にすることの利点は、反応遅れを考慮することができること、実挙動にも適していること、スパイラルパラメータを正しく推定すれば追突することがなく、シミュレーションで制御をすることが容易であるということが挙げられる。

4. データ取得方法とパラメータの推定

本研究における追従データは、株式会社道路計画が開発したスピードレコーダーを用いて、10 日間、高速道路 2 路線、10 人の運転手で 3 年間にわたって行なったフローティング調査から得ている。追従する車線は、安全性と調査実施の容易さから第一走行車線としている。プローブカーはトヨタ自動車のカリブ、イブサム、カローラ、日産自動車のラルゴ、三菱ふそうのガッツ(1.5t 車)の 5 台を用い、あらゆるパターンの組合せで追従させている。54 走行のうち渋滞流を走行した 18 走行のデータから、渋滞流 571、非渋滞流 152、加速遷移流 213、減速遷移流 52 の計 988 個のスパイラル曲線を抽出する。この抽出したスパイラル曲線の 8 つのパラメータは最尤推定法により推定した。

得られたパラメータの平均値と標準偏差は表 1 に示すとおりである。また、実測値のスパイラル曲線と、推定したパラメータから描くことのできるそれとを比較した一例を図 4 に示す。

表 1 推定スパイラルパラメータの平均と標準偏差

パラメータ	a_1	k_1	A (m)	
平均値	3.380	0.083	24.193	
標準偏差	3.120	0.124	13.143	
パラメータ	a_2	k_2	ω (1/s)	T (s)
平均値	4.956	0.091	0.517	14.987
標準偏差	3.741	0.124	0.257	6.974

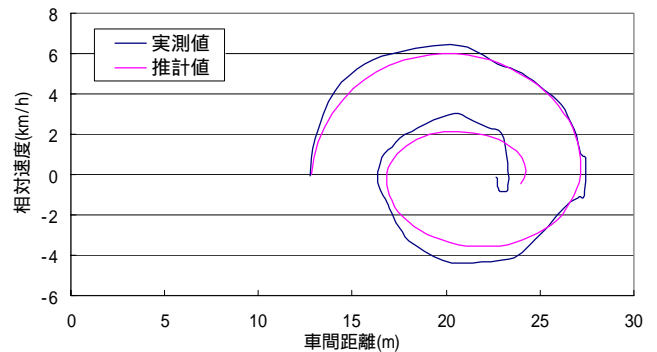


図 4 スパイラル曲線の実測値と推定値との比較

5. シミュレーション分析

シミュレーション分析を行うために、スパイラルパラメータを他の要因で説明することを試みる。各車両の追従挙動は同一ドライバーであっても、同じ条件下で走行しても一様でなく様々な挙動を示す。つまり、スパイラルパラメータを 1 つに定めることは非常に困難であり、一様の確率分布を持つと考えることが重要である。そこで、推定したスパイラルパラメータをどのように式(1)に与えるかについて、以下にパラメータ間の関係について述べる。

まず変数、つまり追従時間 t について述べる。追従時間とは追従を開始してから(スパイラル曲線を描きはじめてから)、次のスパイラル曲線を描きはじめるまでの時間である。本来は線形が変化するときや、隣接する車線において他車両が追越しを行なったとき等のアクセルワークに関連して次のスパイラル曲線を描きはじめると考えられるが、全ての線形の変わり目で新たなスパイラル曲線が描かれるとは限らないことや、今回の調査では隣接する車両のデータを取得できなかったことから、取得したデータの度数分布に近似する χ^2 分布に基づいて追従時間 t を与えることとする。

次にスパイラルパラメータ a_1 について述べる。スパイラルパラメータ a_1 はスパイラル曲線の大き

さを直接表すものである．筆者らの研究によると⁵⁾，ボトルネックとなる地点の縦断勾配と平面曲線半径の組合せ，上り坂と下り坂，左右カーブ，遮音壁や切土，ボトルネック地点が明確であるかどうかガスパイラル曲線の大きさに影響を与えている．これに加え，スパイラルパラメータ a_1 は周期 T と正の相関があることを考慮し，以下の式(2)の実験式を与える．式(2)の実験式の係数は実際の交通現象を表現できるように与える．さらに式(2)で求めた a_1' を実際の a_1 に即して確率的に与える．

$$a_1' = 0.3 | \ln(R/1000) | + 0.15Ve + 0.1Al + 0.3Wa + 0.3Cl + 0.2T - 0.6 \quad \text{式(2)}$$

- In : 勾配 (%)
- R : 平面曲線半径 (m)
- Ve : 上り坂ダミー
- Al : 左カーブダミー
- Wa : 遮音壁，切土ダミー
- Cl : 明確ダミー(事故見物渋滞のような渋滞の先頭が明確なとき 1)
- T : 周期 (秒)

また， a_2 ， k_1 ， k_2 ， ω については以下の関係式から確率的に与え， ε_1 ， ε_2 ， A は，シミュレーション上で，前のスパイラル曲線の終点と次のスパイラル曲線の始点が一致させるように与える．

$$\begin{cases} a_2 = f(a_1) \\ \frac{1}{\omega} = T = f(t) \\ k_1 = f(1/t) \\ k_2 = f(1/t) \end{cases}$$

式(1)で示した構造式と上記の関係式を用いてシミュレーションを行なった結果の一例として，図5にタイムスペース図として示す．このタイムスペース図からは非渋滞流から渋滞が起こっており，パラメータを変化させたときに衝突しないことを確認している．また，同一の交通条件で渋滞と非渋滞を表現できることも確認している．

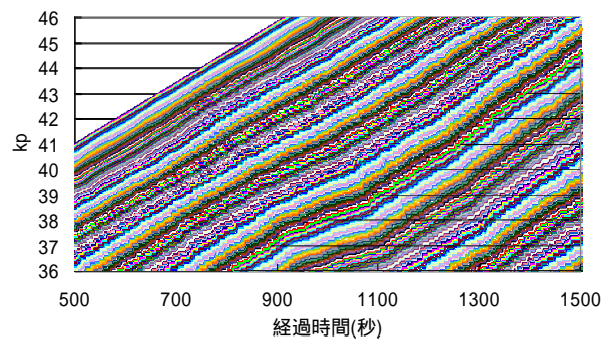


図5 シミュレーション結果(タイムスペース図)

6. まとめ

本研究で構築したモデルの検証にあたっては，顕在化しているボトルネックにおいて渋滞が発生するか，同一の交通条件で渋滞と非渋滞を表現できるか，個々の車両の追従挙動がスパイラル曲線になるか，パラメータを変化させたときに追突しないかに重点を置いた．その結果，顕在化している複数のボトルネックにおいて渋滞が発生し，同一の交通条件で渋滞と非渋滞を表現できた．さらに，個々の車両の追従挙動がスパイラル曲線になり，パラメータを変化させたときに追突しないことも確認した．これより，本研究で構築した追従モデルは，1車線のプロトタイプではあるものの，既往研究の課題の多くを解決したモデルであることが確認された．

参考文献

- 1)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，第 660 号/ 49，pp.39-51，2000
- 2)越正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集，第 371 号/ 5，pp.1-7，1986.7
- 3)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.45-55，1995.1
- 4)中山晴夫，和田幹彦，市川孝太郎：スパイラル曲線を用いた交通シミュレーションモデルの検討，第 13 回交通工学研究発表会論文集，pp.25-28，1993.11
- 5)石田貴志：高速道路単路部における追従モデルの構築，東京理科大学修士(工学)論文，2004.3