

車両の追従現象へのスパイラル曲線導入の試み*

A Trial Introduce Spiral Curve to the Following Model of Traffic Flow.

中山 晴幸** 和田 幹彦*** 市川孝太郎***

by Haruyuki Nakayama, Mikihiko Wada, Kohtarou Ichikawa

Numerical modeling for traffic flow simulator based on microscopic view simulation model have been developed. Traffic flow is effected by many factors, for example driver's reactions, influenced characteristics each other vehicles, area that driver want to keep surrounding the vehicle, and so on.

In this paper, authors investigated the influence factors of driving behaviors for traffic flow simulator and introduced spiral curve to numerical modeling. The result of traffic flow simulations that introduced spiral curve are shown effective to simulate behavior of flowing vehicle than previous one, and it is easy to include driver characteristics such as desire speed too.

1 はじめに

本研究の最終目的は、高速道路上における個々の車両の挙動が再現可能なミクロ・シミュレーション・モデルの構築である。本研究はこれまで、高速道路上を走行する車両の走行挙動についての調査を行いドライバー特性についての解析を行っている。さらに、高速道路の走行シミュレーション・モデル¹⁾を提案し、シミュレーションを試行している。これに伴い高速道路上を走行する車両の走行挙動についての調査を行い、各車両の属性、すなわちドライバー特性についての解析を行っている。

これまでの解析では、各ドライバーは走行中に

自車を中心としたテリトリーを持ち、車頭距離の長短で追従走行や車線変更などの行動を起こすことを確認している。また、各ドライバーはそれぞれ走行時の希望走行速度を持っていることを確認している。本論文は、これまで調査したデータを利用して追従走行時の車両の走行挙動を解析し、車両の走行挙動を決定するシミュレーション・モデルに対してスパイラル曲線を導入する検討を行ったものである。

2 車両の走行挙動解析

(1) 走行挙動の基本モデル

本研究では車両の走行挙動を、刺激-反応の観点からモデル化している。図1に本モデルの概念を図示した。モデルでは、各ドライバーが希望速度、パーソナルスペース、車線変更時の判断特性、すなわちドライバー特性を持っていると仮定している。ドライバーは車両周辺の状況や走行速度、車頭距離、相対速度感覚などの刺激を受け、さらに車両の性能

* キーワーズ 運転者、追従、数学モデル

** 正会員 工修 日本大学専任講師
理工学部交通土木工学科
(船橋市習志野台7-24-1)

*** 日本大学大学院 情報科学専攻
(船橋市習志野台7-24-1)

である内的条件、天候や道路線形といった外的条件および反応時間や隣車線からの影響である相互相関条件に影響されつつ、刺激に対する反応として車両の走行挙動を決定する。また加減速度の反応は刺激としてフィードバックされる。本研究ではこのモデルに基づいて、次のような調査および解析を行った。

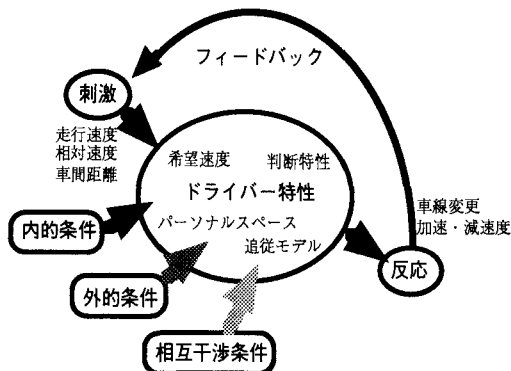


図1 シミュレーションの基本モデル

(2) 調査概要

シミュレーション・モデルの構築にあたり、高速道路上を追従走行する車両の走行挙動の調査および解析を行った。調査対象地点は首都高速6号線箱崎付近の下り車線および7号線東大島付近の上り車線である。これら車両の走行を撮影した映像からその軌跡を0.5秒毎に平面座標に座標変換し、各解析の基本データとして用いた。調査は、平日の午前7:30から8:30の間に、高速道路上を追従走行している車両の走行挙動をビデオカメラに収録した。その間の交通量は第一、第二車線合計でそれぞれ約2000台/h、2700台/h、平均速度は53km/h、80km/hであった。車線変更を行う車両については、車線変更車両が多く出現する首都高速7号線東大島付近上り車線の走行挙動のビデオ映像から得た基本データを利用した。

(3) 反応時間

反応時間は、ドライバーが車両を運転する場合の制御能力特性の一つである。反応時間は、基本データから各車両の時系列での加速度を算出したものを利用し、前車の加速度に対して追従車両の時間のずれ τ の値を0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0秒と仮定し、前車と追従車両の τ 秒後の加速度との相互相関係数を求め、最も相互相関係数の高い時間のずれ τ 秒を反応時間とした。

図2は同調査での反応時間と相互相関係数の頻度分布で、解析対象車両のうち正の相関を示したものは1103台で、大半は相関係数 r が0.7以上の相関と認められた。また、反応時間1.0秒で高い相関を示すものが約3割を占め、もっとも高い頻度であった。したがって、この地点での反応時間は1.0秒を中心に分布していると考えられる。さらに、首都高速道路7号線東大島付近の上り車線で行った調査でも同様の結果が得られ、追従車両の反応時間は概ね1.0秒をモードとして分布していると予想できる。

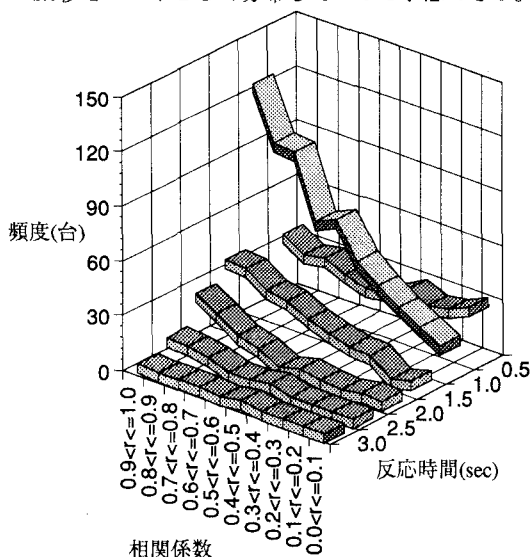


図2 反応時間と相互相関係数の頻度分布

(4) 追従走行時の車両の走行解析

追従挙動は前車と追従車両とのそれぞれ2台の関係を観察し、追従走行時の刺激である相対速度と車頭距離に関して、その時系列での軌跡から加速度を考察した。図3および図4には、前車および追従車両の相対速度と車頭距離の走行軌跡を0.5秒毎に示した。追従車両の走行軌跡は、反応時間の算出に利用したものと同一データを利用した。図中で追従車両の相対速度の負の値は追従車両の速度が前車の速度よりも速く前車に接近している状態で、正の値は追従車両の速度が前車の速度よりも遅く前車と離れる状態を示している。また矢印は時系列での最後の車両挙動を示している。これらは反応時間1.0秒で追従走行をしていると認められる車両で、相互相関係数はそれぞれ0.86、0.88であった。

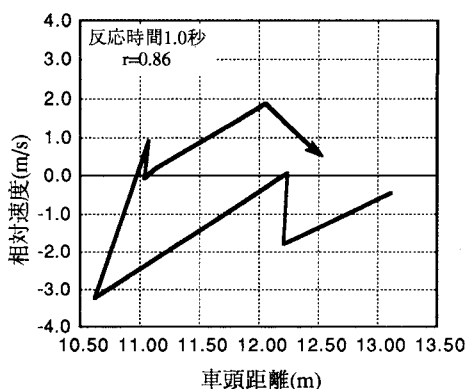


図3 追従車両の走行軌跡 a

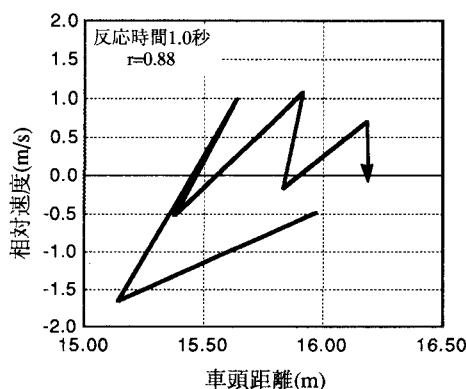


図4 追従車両の走行軌跡 b

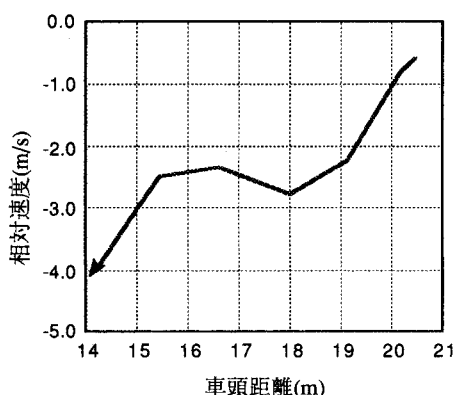


図5 車線変更する車両の走行軌跡 a

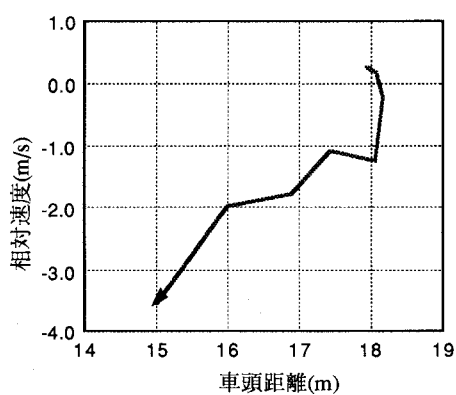


図6 車線変更をする車両の走行軌跡 b

図3および図4ともに車頭距離がある程度短くなると、減速して相対速度が正になるように反応し、一定の車頭距離を維持しようとする。また図4では、車頭距離が長くなりすぎないように加速して相対速度が負になるように調節し、一定の車頭距離で追従しようとしているのが分かる。さらに図4では、相対速度が負になると追従車両のドライバーは減速し、相対速度が正であれば、追従車両のドライバーは加速をはじめ、相対速度を0m/sに維持しようとしているのが分かる。すなわち、追従車両の走行軌跡は、ある一定の車頭距離を維持し、相対速度0m/s付近の安定した状態になるように時計廻りに螺旋の軌跡を描いていることが予想できる。

(5) 車線変更を行う車両の走行解析

図5および図6には、車線変更を行った車両の相対速度と車頭距離の時系列での走行軌跡を示した。これら車両は図中矢印の時点で車線変更を行っている。車線変更を行う車両の走行挙動は、図に示すと

おり車頭距離がしだいに短くなっているにも関わらず相対速度も負に大きく振れて、最終的に車線変更を行っていることが分かる。つまり追従走行を行っている車両は螺旋の軌跡を描くのに対して、車線変更を行う車両は、左下がりの走行軌跡を描いている。これら以外の車線変更を行った車両の走行軌跡も同様の軌跡を描いているものが多い。

(6) 車両の走行挙動決定モデル

追従挙動および車線変更時の挙動より、高速道路を走行をしている車両の走行挙動の決定モデルを図7に示した。追従走行をしている車両は、走行速度、車頭距離、相対速度感覚の刺激を受けこれらの刺激が小さくなるように加速追従、減速追従を繰り返す。このとき車両は、相対速度0m/sでドライバーが保ちたいと考える車頭距離（希望車頭距離）に向かって時計廻りの螺旋の走行軌跡を描く。また相対速度が負側に大きく振れ車頭距離が非常に短い状態では、次の瞬間前車と衝突することになる。したが

って、そのような状態になる前に車線変更を行う領域があり、この領域付近で車線変更の意思が決定される。

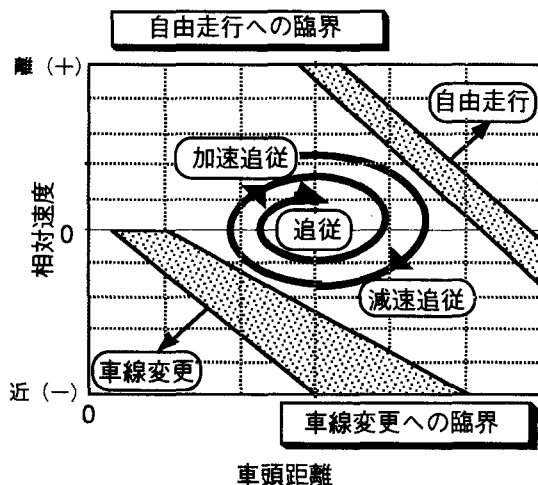


図7 走行挙動の決定モデル

3 追従理論

同一車線上を追従走行している車両の速度調節モデルの一つにHermanのモデルがあり、式(1)で表現されている。

$$x''_{n+1}(t+\tau) = \alpha \cdot \frac{[x'_n(t) - x'_{n+1}(t)]}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $x''_{n+1}(t+\tau)$: 後車の t 秒後の加速度(m/s^2)

$x'_n(t) - x'_{n+1}(t)$: 前後車の速度差(m/s)

$x_n(t) - x_{n+1}(t)$: 前後車の車頭距離(m)

α : 感度定数(m/s)

τ : 後車の反応時間(s)

式(1)は、車群の先頭から $n+1$ 番目の車両の加速度を、反応時間 τ 秒前の状態、つまり先頭から n 番目の車両と $n+1$ 番目の車両との速度差および車頭距離の関数として表されている。しかし各車両ごとに異なる属性を与えた場合、すなわちドライバー特性を考慮した場合には次の二つの問題が生じる。

第一は、追従車両が、車頭距離の短い状況で前車を追従する場合があることである。これは追従車両が前車より走行速度が速く前車に接近している状況では、追従車両は相対速度が 0m/s の安定な状態になるまで減速を続け、相対速度が 0m/s になった時点で反応をしなくなるのが原因である。

第二は反応遅れが後続車両に伝播し、その結果後続車両間で追突が発生してしまうことである。

4 スパイラル曲線の導入

追従車両の走行挙動の解析より、追従車両の相対速度と車頭距離の軌跡は相対速度が 0m/s でドライバーが希望している車頭距離に収束するように時計回りの螺旋を描くことが確認できた。本研究では、この追従現象のモデル化にあたり、調査結果を表現する数学モデルとしてスパイラル曲線を導入した。スパイラル曲線の一般式は式(2)に示されるもので、この場合、各係数の値によって原点を中心とする楕円を描く曲線や焦点に収束する曲線を表現することが可能である。したがって、車両の走行挙動の車頭距離—相対速度の関係は、式(3)のように表すことが可能である。また、先行車両の速度が一定であると仮定すれば、図8に示すように、相対速度の変化量は単位時間あたりの後車の加速度であり、さらに車頭距離の変化量は相対速度による走行速度の差である。したがって、スパイラル曲線の傾きは式(4)に示すように相対速度の変化量を車頭距離の変化量で除したものとなる。

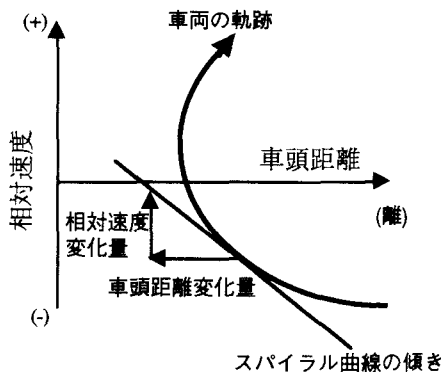


図8 スパイラル曲線概念図

$$y' = \frac{\gamma x + \delta y}{\alpha x + \beta y} \quad \text{式(2)}$$

$$Y' = \frac{\gamma(x-L) + \delta y}{\alpha(x-L) + \beta y} \quad \text{式(3)}$$

$$= \frac{-a \cdot \Delta t}{y_0 \cdot \Delta t - \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2} \quad \text{式(4)}$$

ここで、 Y' :スパイラル曲線の傾き

x : 車頭距離 L : 希望車頭距離

y : 相対速度 a : 加速度

y_0 : 相対速度初期値 Δt : 時間($\Delta t > 1$)

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: スパイラル曲線の係数

したがって、式(3) および式(4) から式(5) のように変形でき、後車の加速度を求めることができる。

$$a = \frac{2 \cdot y_0 \cdot Y'}{Y' - 2} \quad \text{式(5)}$$

5 シミュレーションの条件

図7で示したモデルを基にして交通流シミュレーション・プログラムをUNIXワークステーション上でC言語を用いて構築した。使用したワークステーションは、米国シリコングラフィックス社製のIRIS Indigoである。このシミュレーション・モデルでは、各ドライバーに希望走行速度と希望車頭距離などの属性を持たせている。車両は自由走行時に希望走行速度で走行し、前方に車両が存在し追従走行状態になれば、ドライバーは周辺の状態から相対速度、車頭距離の刺激を受け、刺激に反応して各ドライバーの属性に応じた加速度を発生させて追従するようにした。また、相対速度が負側に大きく車頭距離が短くなると、車線変更を行うように設定した。ドライバーの属性や各状況での条件は初めにファイルで与えるのでいろいろなパターンで試行が可能である。

表1 スパイラル曲線の係数

	α	β	γ	δ
ケース2	-0.1	0.5	-0.1	-1.0
ケース3	-0.1	0.75	-0.1	-1.0

試行は加速度の計算を式(1)の追従理論式を用いたケース1と、式(5)のスパイラル曲線を用いたケース2およびケース3について行った。試行条件は加速度の算出方法に関わらず次のような同一条件とした。試行した高速道路は、2車線で流入出口の無い距離1200mの直線区間で、交通量は第一車線800台/h、第二車線1200台/hに設定しポアソン分布により発生させた。また個々のドライバーに平均走行速度80km/h、標準偏差10km/hの正規分布で希望走行速度を設定し、先行車両に追従するタイプ(希望車頭距離40m)、車線変更が多いタイプ(希望車頭距離30m)、希望速度を守るタイプ(希望車頭距離50m)をそれぞれの比率5:3:2で属性を与えた。

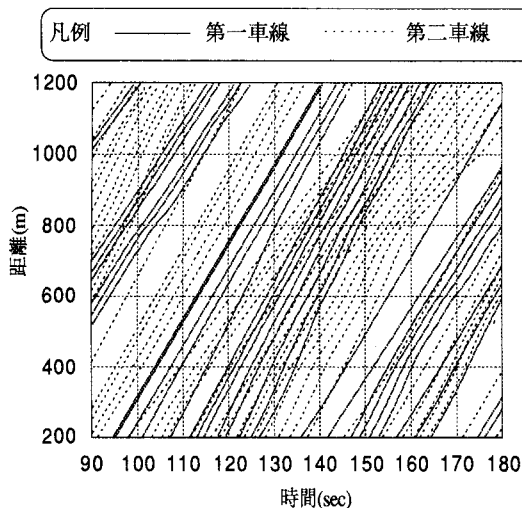


図10 シミュレーション試行結果ケース2

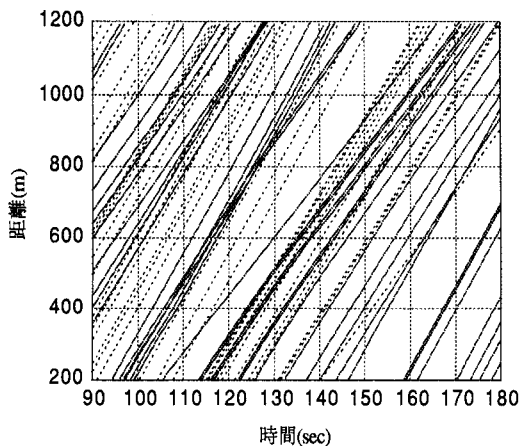


図9 シミュレーション試行結果ケース1

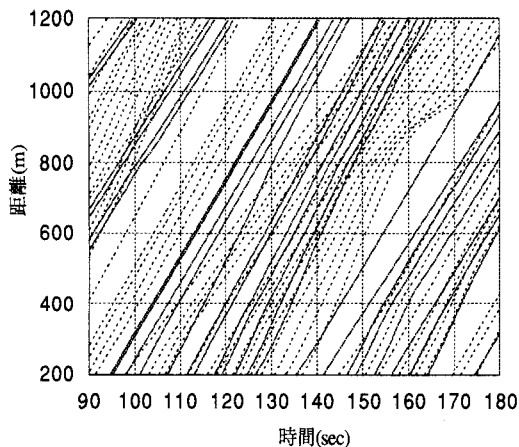


図11 シミュレーション試行結果ケース3

なお、式（１）中の追従条件式の感度定数には $\alpha=12.0$ を与え、式（５）中のスパイラル曲線の係数には表１に示す係数を与えた。反応時間は1.5秒としている。

6 シミュレーション試行結果

交通流シミュレーションの結果を図9～11に示した。図9のケース1は、加速度の計算を式（１）の追従理論式で行ったもので、図10のケース2、図11のケース3は式（５）のスパイラル曲線を用いたものである。図9では、車頭距離が短い状態で追従する車両が多く、車群に偏りが見られるが、図10、11では先行車に対し希望する車頭距離を保つように軌跡が揺らいでいることが分かる。また図10、11は、スパイラル曲線の係数以外の条件はまったく同じであることから係数の違いによって各車両の挙動が変化することが分かる。

図12には、加速度をスパイラル曲線で算出したケース2の試行結果より得られた追従車両の車頭距離—相対速度の挙動軌跡を示す。この図では、車頭距離が短い距離で発生した車両が、前車との相対速度を正に保ち、約40m付近の希望車頭距離および相対速度0m/s付近の安定した状態で追従しようと相対速度を調節して、時計周りの螺旋の走行軌跡を描いていることが表現されている。また、この車両は2—（４）で示した追従車両の走行軌跡に近い挙動である。

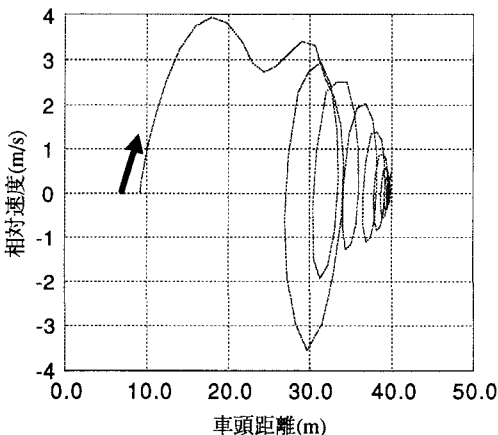


図12 追従車両の走行挙動（試行結果）

7 結論と今後の課題

（１）調査・解析

調査および解析から、車両の走行挙動について次のようにまとめることができる。

- 追従走行をしている車両の反応時間 τ は、 $\tau=1.0$ 秒で走行している車両が多く、1.0秒をモードとして分布している。
- 追従走行をしている車両は、各ドライバーが希望する車頭距離で、相対速度が0m/sの安定した状態に時計回りの螺旋の軌跡を描いて収束する傾向を示す。
- 追従走行状態と車線変更を行う状態の間に臨界線を仮定することができる。

（２）シミュレーション

シミュレーションについては、次のようにまとめることができる。

- モデルにスパイラル曲線を導入することにより、導入しない方法と比較して、極端に短い車頭距離で追従を行う車両が見られるなどの不都合な点を解消することができる。
- 加速度の計算にスパイラル曲線を用いたシミュレーション・モデルでは、ドライバーの希望車頭距離を考慮することができ、また車頭距離が希望の車頭距離より短い場合には、車頭距離を広げる反応を起こすような自然な追従現象が再現可能になった。

（３）今後の課題

今回は、追従走行をスパイラル曲線の特徴である螺旋状の軌跡を利用しているにすぎない。スパイラル曲線の各係数の性質と実用的な係数値を明らかにする必要がある。また、このままのスパイラル曲線では、加速度の計算に際し車頭距離、相対速度の刺激は考慮されるが、絶対的な走行速度に対するドライバーの反応特性を考慮できない。走行速度も考慮したモデルの検討も必要である。また車線変更の車両に関して、より詳細な解析が必要であろう。

8 参考文献

- 中山晴幸 日名地博：高速道路を走行する車両の挙動シミュレーション・モデルの検討、電気学会研究会資料、電気学会、pp.27～36 1992年