

ドライバモデルを考慮した曲線部における追従特性に関する研究*

A Study on Car-Following in a Curve in Consideration of a Driver Model*

鈴木遼**・中辻隆***・Prakash RANJITKAR****

By Haruka SUZUKI**・Takashi NAKATSUJI***・Prakash RANJITKAR****

1. はじめに

現代の自動車交通は、様々な交通問題を抱えている。自動車が前走車に追従して走行する状況は交通量に関係なく日常的に存在しており、交通事故、交通渋滞等の交通問題を発生させている。追従走行時における車両の挙動を解析し、その特性を明らかにすることが、これらの問題を解決する一助になるといえる。

交通流特性を解析する交通流モデルは、多くの研究が行われ、数多く存在している。そして、追従走行を表現する追従モデルも多くのものが提案されている。しかし、実際の車両走行データを用いて追従モデルの精度を検証した研究は少ない。さらに、既存の追従モデルの多くは直線部を対象としており、曲線部の追従走行を考慮したものはない。だが、実際の道路は直線部と曲線部の組み合わせからなっているため、曲線部における追従挙動を表現しうるモデルが必要とされている。

本研究では、実際の走行データに既存の追従モデルを適用し、曲線部における精度を検証する。さらに、運転操作を表現するドライバモデルに着目し、曲線部においても再現性の高い交通流モデルを構築する。これらの分析から、曲線部における車両の追従特性を明らかにすることを目的としている。

2. 交通流モデルの概要

(1) 既存の追従モデル

各車両の走行は車群の状況や前走車の走行の変化に依存するとして、車両の挙動をモデル化したものが追従モデルである。これまでに多くの追従モデルが提案されているが、運転者の操作が良く反映されるため、多くのモデルが車両の挙動を表す指標として加速度を目的変数に用いている。GM モデルは General Motor 社によって提案されたモデルであり、基本的な追従モデルといえる。このモデルは追従車の加速度（応答）は、前走車との相対速度（刺激）に比例するという形態（刺激-応答型）をとっている。以下に GM モデルを（1）式に示す。

$$a(t+T) = \lambda \Delta V(t) \quad (1)$$

a : 加速度 T : 反応時間

ΔV : 相対速度 λ : 感度定数

t : 時刻

(2) ドライバモデルの概要

ドライバの運転操作の様子をモデル化したものがドライバモデルである。本研究では、曲線部の走行を表現するため、道路線形の変化によって車両の挙動が与えられるドライバモデルを構築した。構築したドライバモデルを（2）式に示す。

$$a(t+T) = f(x) \quad (2)$$

x : 道路線形

3. 苫小牧寒地試験道路における追従走行試験

(1) 走行試験路の概要

走行試験は平成 12 年 10 月に、苫小牧市柏原にある北海道開発局開発土木研究所所有の苫小牧寒地試験道路において行った。この試験路は、1200mの直

*キーワード：交通流、交通制御、交通管理

**学生員、北海道大学大学院工学研究科

（北海道札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目、
TEL011-706-6217、E-mail: haruka@eng.hokudai.ac.jp）

***正員、工博、北海道大学大学院工学研究科

（北海道札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目、
TEL011-706-6215、E-mail: naka@eng.hokudai.ac.jp）

****学生員、工修、北海道大学大学院工学研究科

（北海道札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目、
TEL011-706-6822、E-mail: pranjitkar@yahoo.com）

線部と曲線半径 50m (緩和曲線なし)の曲線部からなる延長約 2700mの周回路である(図1)。本研究では、道路区間を道路線形により直線部(S) 曲線部(C)および遷移区間(SC, CS)に分類する(表1)。

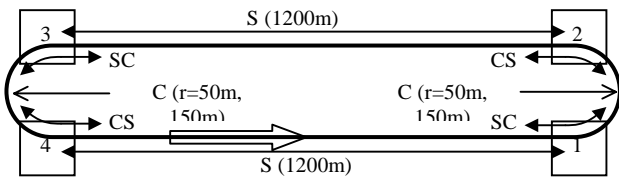


図 - 1 試験路概略図
表 - 1 道路区間の分類

S(直線部)	直線部走行(点4~点1・点2~点3)
C(曲線部)	曲線部走行(点1~点2・点3~点4)
SC(遷移区間:直線 曲線)	点1・点3の通過前後3秒間の走行
CS(遷移区間:曲線 直線)	点2・点4の通過前後3秒間の走行

(2) 追従走行試験の内容

計測は各試験車両に GPS アンテナを取り付け、リアルタイムキネマティック (RTK) GPS を用いた。RTK-GPS は、連続的にデータを取得でき、誤差が数 cm と低い値であるため、自動車の走行試験の計測に適した方法といえる。RTK-GPS による計測で時刻、位置、速度のデータを 0.1 秒毎に取得した。

試験車両は 10 台であり、2 通りの配車順列で走行試験を行っている。なお、路面は乾燥状態であった。先頭車は表 2 に示す走行パターンを組み合わせで走行し、後続の車は前走車に追従して走行した。

表 - 2 先頭車の走行パターン

線形走行パターン	内容	
直線部	HalfWave 060	平均40km/h・最大60km/hの正弦半波長
	HalfWave 080	平均40km/h・最大80km/hの正弦半波長
	OneWave+	平均50km/h ± 20km/hの正弦1波長(+)
	OneWave-	平均50km/h ± 20km/hの正弦1波長(-)
	TwoWaves+	平均50km/h ± 20km/hの正弦2波長(+)
	TwoWaves-	平均50km/h ± 20km/hの正弦2波長(-)
	ThreeWaves+	平均50km/h ± 20km/hの正弦3波長(+)
	ThreeWaves-	平均50km/h ± 20km/hの正弦3波長(-)
	Random	40km/h-80km/hの自由走行
	V20	20km/h一定走行
曲線部	V40	40km/h一定走行
	V60	60km/h一定走行
	V80	80km/h一定走行
	V80	直線部:80km/h・曲線部:安全な速度

(3) 追従走行プログラムによる追従走行の把握

追従走行試験によって得られたデータから、各車両の走行の様子を再現するプログラムを作成した(図2)。このプログラムにより、各車両や車群全体の走行を視覚化し、追従走行および走行試験の把握をした。また、車両の色を加速度や速度等の指標でグラデーションの変化で表現し、時刻-速度や加速度-相対速度等のグラフを車両の動きに対応して描画

することによって、各車両の挙動を多角的に表現することが可能となった。

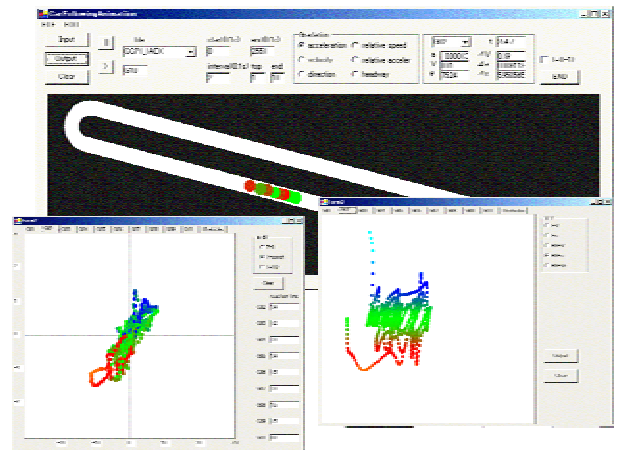


図 - 2 追従走行再現プログラム

4. 交通流モデルの構築

得られた走行データを表1に示した区間で分割し、それぞれの道路区間で重回帰分析を行うことで各交通流モデルを構築した。このとき、反応時間を既存研究¹⁾より平均値を求めて1.5秒とし、この時間だけ加速度のデータをずらして目的変数とし、重回帰分析を行った。

(1) GM モデル (GM)

既存の追従モデルである GM モデルを曲線部に適用する。本研究では以下のように式を設定し、重回帰分析によりパラメータを算出した。

$$a(t+T) = \beta_1 \Delta V(t) + \beta_2 \quad (3)$$

β_i : 係数

(2) ドライバモデル 1 (DM1)

本研究では、直線部や曲線部等の道路線形の変化からドライバの操作を表現するドライバモデルを採用する。道路線形の変化を表す指標として、曲線半径や片勾配等が考えられるが、走行試験路の形状から、本研究では曲線部の始点または終点までの距離を採用した。すなわち、車両が直線部にある場合、曲線部の始まる地点までの距離である。また、ドライバはこの始点(終点)までの距離と前走車との車間距離の両方を考慮し、車両を操作すると考え、加速度、速度を加えた4つの変量を説明変数とするモデルを構築した。これをドライバモデル1(DM1)と

する。また、目的変数には加速度を用いる。これは説明変数の変化を受けて、ドライバが車両を操作するまでの時間（反応時間）を考慮した時刻における加速度である。（４）式にDM1を示す。

$$a(t+T) = \beta_1 a(t) + \beta_2 V(t) + \beta_3 d(t) + \beta_4 \Delta x(t) + \beta_5 \quad (4)$$

V:速度

Δx :車間距離

d:曲線部の始点（終点）までの距離

(3) ドライバモデル2 (DM2)

DM1に対して、各時刻における始点（終点）までの距離と車間距離のうち、小さい方の値を目的変数に採用したドライバモデルを構築した。これをドライバモデル2 (DM2)とする。DM1とDM2を比較することで、目的変数に始点（終点）までの距離と車間距離の両方を用いることの有効性を検証する。（５）式にDM2を示す。

$$a(t+T) = \beta_1 a(t) + \beta_2 V(t) + \beta_3 \min(d(t), \Delta x(t)) + \beta_4 \quad (5)$$

(4) 混合モデル (MM)

追従モデル (GMモデル) とドライバモデル1を組み合わせた混合モデルを構築する。これを混合モデル (MM) とする。このモデルは、説明変数としてDM1の4つの変数に、GMモデルの説明変数である相対速度を加えた5つの変数で表されるモデルである。

(6)式にMMを示す。

$$a(t+T) = \beta_1 a(t) + \beta_2 V(t) + \beta_3 d(t) + \beta_4 \Delta x(t) + \beta_5 \Delta V(t) + \beta_6 \quad (6)$$

5. 交通流モデルの分析

(1) 各モデルの推定結果

重回帰分析により、各モデルの係数を推定した。表3～表5に推定されたGM、DM1、MMの各係数と係数のt値の平均値を示す。偏回帰係数を検定し、説明変数の有効性を検証した。このとき有意水準は5%とした。

表3～表5に示したt値から、いずれの係数も全ての道路区間で有意であり、構築した交通流モデルが有効といえる。相対速度のt値が直線部で高い値

であるが、その他の係数の道路区間による差異は特に見られない。係数の値については、相対速度や車間距離は正であることから、妥当であるといえる。速度の係数は、道路区間にかかわらず負の値であり、速度が高すぎるときにドライバは減速するという操作が反映されている。一方、加速度の係数は直線部では正の値であるが、曲線部や遷移区間では負の値である。このことから、曲線部と遷移区間では以前の時刻を基準とし、ドライバは操作を修正していると考えられる。以上より、係数に矛盾が生じていないと考えられる。

表-3 交通流モデルの係数、t値 (GM)

道路区間	直線部	曲線部	遷移SC	遷移CS	
相対速度	係数	0.094	0.076	0.110	0.094
	t値	41.748	14.604	14.107	14.645
定数項	係数	-0.017	0.111	-0.120	0.190
	t値	3.634	8.471	8.025	11.414
自由度	350-900	100-160	60	60	
臨界値	1.963-1.967	1.975-1.984	2.000	2.000	

表-4 交通流モデルの係数、t値 (DM1)

道路区間	直線部	曲線部	遷移SC	遷移CS	
加速度	係数	0.520	-0.009	-0.401	-0.348
	t値	19.204	5.022	5.119	6.802
速度	係数	-0.036	-0.104	-0.120	-0.089
	t値	14.051	11.849	9.943	11.625
始点の距離	係数	0.000	-0.004	0.001	0.000
	t値	6.602	5.000	3.203	2.905
車間距離	係数	0.033	0.104	0.168	0.229
	t値	8.878	9.684	6.128	13.370
定数項	係数	0.778	2.611	1.360	-1.158
	t値	11.501	7.863	6.751	7.504
自由度	350-900	100-160	60	60	
臨界値	1.963-1.967	1.975-1.984	2.000	2.000	

表-5 交通流モデルの係数、t値 (MM)

道路区間	直線部	曲線部	遷移SC	遷移CS	
加速度	係数	0.221	-0.079	-0.439	-0.450
	t値	8.883	5.141	4.771	5.747
速度	係数	-0.017	-0.049	-0.060	-0.030
	t値	7.978	5.996	4.579	4.709
始点の距離	係数	0.000	-0.001	0.000	0.000
	t値	5.845	2.676	2.834	2.594
車間距離	係数	0.022	0.085	0.086	0.144
	t値	6.805	6.892	5.236	7.072
相対速度	係数	0.066	0.056	0.038	0.054
	t値	21.692	7.008	5.202	6.328
定数項	係数	0.115	0.420	0.646	-2.181
	t値	6.762	5.273	5.107	5.606
自由度	350-900	100-160	60	60	
臨界値	1.963-1.967	1.975-1.984	2.000	2.000	

(2) 運転者や道路区間毎の精度の検証

構築した各モデルの精度を検証する。ここでは、実測値から算出された加速度とモデルによる加速度の相関を取り、決定係数 (R²値) を指標値として用いる。図3、図4に車両別のR²値の平均値、図5にモデル別、道路区間別のR²値の平均値を示す。図3、図4より、モデルの違いによる傾向は全ての車両に

共通したものといえる。すなわち、車群の位置による差は見られず、車両間にも差は無い。図5より、DM1はDM2より全ての区間でR²値が高く、始点(終点)までの距離と車間距離の両方を同時に用いることで適合性が高くなったといえる。また、DM1、MMは曲線部と遷移区間で直線部よりR²値が高く、この2つのモデルが曲線部の走行を表現することに適したモデルと考えられる。直線部においては、DM1とMMに大きな差があることから、相対速度が重要な指標であると考えられる。

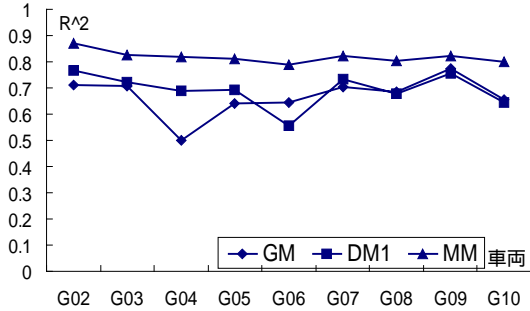


図 - 3 車両別のR²値平均値(直線部)

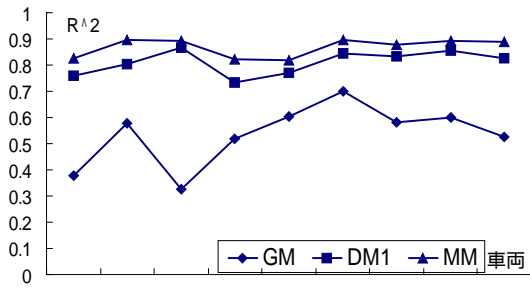


図 - 4 車両別のR²値平均値(曲線部)

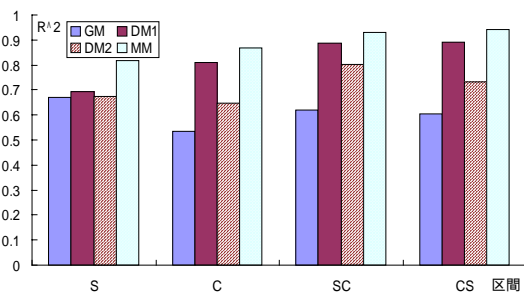


図 - 5 道路区間別の各モデルのR²値

(3) 各モデル特性の解析

GM、DM1、MM各モデルの特性を、t検定およびF検定を用いて明らかとする。t検定は2変量間の平均値、F検定は2変量間の分散にそれぞれ有意な差が存在するかを検定する手法である。(2)で得られたR²値を用いて、各道路区間でモデル間のt検定とF検定を行った。有意水準は5%とした。このとき、t検定における臨界値は2.306、F検定における臨界値は3.44となる。それぞれの道路区間毎に、モデル間の

検定を行った結果を表6に示す。斜線より左下部がt検定によるt値、右上部がF検定によるF値を示している。また、網掛け部分は有意差が認められる組み合わせである。

モデル間に差があった組は、t検定では12組中11組、F検定では12組中9組が存在している。すなわち、モデル間のR²値には差があり、交通流モデルによって適合性に差があるといえる。DM1、MMは、直線部以外ではR²値が0.8以上と高い値であるため(図5)曲線部と遷移区間でこの2つのモデルは適合性が高いものと考えられる。

表 - 6 モデル間検定結果

(直線部、=5%)				(曲線部、=5%)			
S	GM	DM1	MM	C	GM	DM1	MM
GM		1.38	10.46	GM		6.29	11.57
DM1	0.912		7.60	DM1	6.776		1.84
MM	6.094	7.827		MM	8.633	7.409	

(遷移区間 SC、=5%)				(遷移区間 CS、=5%)			
SC	GM	DM1	MM	CS	GM	DM1	MM
GM		7.99	14.76	GM		7.59	26.99
DM1	8.957		1.85	DM1	7.652		3.56
MM	8.965	4.552		MM	9.553	5.701	

6. おわりに

本研究の成果として、曲線部における追従走行に有効な交通流モデルを構築したことが挙げられる。曲線部における追従走行の解析には、道路線形を考慮したドライバモデルを導入することが有効であり、直線部における追従走行の解析とは異なるアプローチを必要とすること明らかとなった。

曲線部における追従特性として、始点(終点)までの距離と車間距離の両方が直線部よりも強く影響していることも示した。重回帰分析による係数の値からも、加速度と始点(終点)までの距離が曲線部では負の値であり、ドライバは直前の時刻の挙動や道路線形を考慮して修正した運転操作をしていると推考される。

参考文献

- 1) 鈴木ほか：追従走行時の反応時間特性に関する実験的検証,土木計画学研究論文集, Vol.19, No.4, pp.861-868, 2002.
- 2) 服部ほか：追従走行時の減速ドライバモデル,自動車技術会学術講演会前刷集, No.936, pp.157-160, 1993.