

個人的差異を考慮した追従挙動分析と渋滞シミュレーション

インフラ計画研究室 高瀬 修一

指導教官 松本 昌二

佐野 可寸志

1. 研究の背景と目的

近年、日本の高速道路網は着実に整備が進展してきており、主要都市間を結ぶ大動脈としての重要な役割を担っている。しかし、飛躍的に利便性が向上した一方で、高速道路の利用者の増加が、交通渋滞を引き起こす原因ともなっている。

渋滞が頻繁に発生する地点、いわゆるボトルネックにおいて、同じ交通量であっても渋滞が発生する場合としない場合があることが明らかになっている。これはドライバーの質の違い、つまり個人的差異が影響しているものと思われる。

現在までに実際の交通現象を再現する目的で様々な追従挙動モデルが提案されている。しかし、実際の交通現象を限定的にしか再現しきれていないのが現状である。もちろん、モデルを用いて実交通現象を再現する以上は何らかの限定条件が不可欠ではあるが、既存のどのモデルのパラメータにおいても、この範囲ならば有効であるという実用的な範囲が示されておらず、未だに一般的な傾向は見いだせていない。これは、モデル構造が複雑になりすぎたために、パラメータの安定性に問題が生じたということが考えられる。

また、加速や減速、車間距離の長短、相対速度の大小など追従挙動に関する様々な走行状況に応じて、モデルのパラメータが変化する事を考慮した研究もほとんどない。

そこで、本研究では上記を踏まえ、実際の追従実験のデータを用いて、追従挙動の個人的差異及び走行状況別差異を明らかにすること、並

びにモデル構造ができるだけシンプルで、パラメータの意味の物理的な解釈が比較的容易な、既存の4つの追従挙動モデルの中から走行状況別に有効なモデルを提案することを目的とする。

2. 追従実験データの概要

本研究に用いた追従実験データの概要は表1の通りである。いずれも渋滞が頻繁に発生しているサグ地点において実施された追従実験のデータである。データの仕様は、0.1秒ごとに先行車の速度、先行車の加速度、追従車の速度、追従車の加速度、車間距離、相対速度を記録したものである。4つのケースにおいてドライバーは全て異なるため、便宜的にA、B、C、Dと名付けた。データ数はそれぞれ1732, 1170, 1909, 1431である。なお、このデータは東京都立大学の大口敬助教授からご提供いただいたものである。

表1 追従実験データの概要

ドライバー	実験場所
A	東名自動車道 uphill 31kp ~ 28kp 区間
B	中央自動車道 uphill 63kp ~ 60kp 区間
C	中央自動車道 uphill 64kp 付近 ~ 61kp 付近 (中野橋付近)
D	中央自動車道 uphill 64kp 付近 ~ 61kp 付近 (中野橋付近)

3. 分析に用いた既存の4つの追従挙動モデル

既存の追従挙動モデルの中から、モデル構造ができるだけシンプルで、パラメータの意味の物理的な解釈が比較的容易である、という観点から以下の4つのモデルを選択した。

GM モデル

$$\dot{V}_F(t+T) = \mathbf{a} \frac{\{V_L(t)\}^m}{\{X_L(t) - X_F(t)\}^l} \{V_L(t) - V_F(t)\} \quad (1)$$

線形 Kometani モデル

$$\dot{V}_F(t+T) = \mathbf{a}_1 \{V_L(t) - V_F(t)\} + \mathbf{a}_2 \dot{V}_L(t) \quad (2)$$

非線形 Kometani モデル

$$\dot{V}_F(t+T) = \mathbf{a}_1 \{V_L(t) - V_F(t)\} + \mathbf{a}_2 \dot{V}_L(t) + \mathbf{a}_3 \left\{ V_L(t) \dot{V}_L(t) - V_F(t) \dot{V}_F(t) \right\} \quad (3)$$

Helley モデル

$$\dot{V}_F(t+T) = \mathbf{a}_1 \{V_L(t) - V_F(t)\} + \mathbf{a}_2 \left[\{X_L(t) - X_F(t)\} - \left\{ \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 V_F(t) + \mathbf{b}_2 \dot{V}_F(t) \right\} \right] \quad (4)$$

ここに

$\dot{V}_F(t+T)$: 時間遅れ T 秒後の追従車加速度

$V_L(t)$ 、 $V_F(t)$: 時刻 t の時の先行車速度、追従車速度

$\dot{V}_L(t)$ 、 $\dot{V}_F(t)$: 時刻 t の時の先行車加速度、追従車加速度

$V_L(t) - V_F(t)$: 時刻 t の時の相対速度

$X_L(t) - X_F(t)$: 時刻 t の時の車間距離

m 、 l 、 \mathbf{a}_1 、 \mathbf{a}_2 、 \mathbf{a}_3 、 \mathbf{b}_0 、 \mathbf{b}_1 、 \mathbf{b}_2 : パラメータである。

追従車の加速度との時系列変動の相互相関分析からドライバーの反応遅れ時間を推定した。先行車に対して追従車の時系列データを 0 秒から 3.0 秒まで 0.1 秒ずつずらして相互相関係数を算出し、これが最大となる時のずらし時間を「反応遅れ時間」として、そのドライバーの平均的な運転挙動特性を表す指標とした。推定された反応遅れ時間の値を表 2 に示す。

表 2 反応遅れ時間の推定結果

ドライバー	反応遅れ時間T(秒)	相関係数
A	1.3	0.78
B	1.8	0.68
C	2.6	0.81
D	1.7	0.62

4. 反応遅れ時間の推定

反応遅れ時間とは、各追従走行モデルにおいて様々な入力情報が与えられてから、実際に加減速を開始するまでのタイムラグのことであり、追従走行挙動を考える上で重要な指標の一つである。そこで、追従実験によって得られたデータから反応遅れ時間の推定を行った。

$$\dot{V}_F(t+T) = \{V_L(t) - V_F(t)\} \quad (5)$$

式(1)は追従車加速度が時間遅れ T を伴って、相対速度に比例する構造となっている。このモデル構造を踏まえ、先行車と追従車の相対速度と

それぞれのドライバーにおける相関係数の最大値は 0.62 ~ 0.81 であり、相対速度と追従車の加速度には、ある遅れ時間を伴った相関があると言える。相関係数が低いドライバー B とドライバー D は、ドライバー A とドライバー C よりも相対的に「ふまじめに」追従している、またはあまり追従状態であるとは言えない挙動ではないかと考えられる。また、ドライバー C は他の 3 人のドライバーと比較して反応遅れ時間が大きいことから、比較的「のんびり」したドライバーであることをうかがわせる。

5. 追従挙動モデルのパラメータ推定

3.で挙げた既存の4つの追従挙動モデルのパラメータ推定を 追従挙動全体、 加速時、 減速時、 追従車速度が 15m/s 以下、 追従車速度が 15m/s 以上、 車間距離が 20m 以下、 車間距離が 20m 以上、 相対速度がプラス、 相対速度がマイナスの9つの走行状況において4人のドライバーそれぞれについて行った。この際に4で推定した反応遅れ時間を基にした。結果を表3～表5に示す。なお、表中において斜線部分は該当データがなかったことを示すものである。

線形 Kometani モデルのパラメータ 1_1 、 2_2 については非線形 Kometani モデルの 1_1 、 2_2 と、 Helley モデルのパラメータ 1_1 、 2_2 については非線形 Kometani モデルの 1_1 、 3_3 とそれぞれ同様の傾向であったため、表には示さないものとする。

GM モデルはどのパラメータもばらつきが非常に大きく、走行状況別に見ても、ドライバー別に見ても、全く一般的な傾向を見出すことができなかった。

非線形 Kometani モデルは、相対速度に対するパラメータ 1_1 、先行車加速度に対するパラメータ 2_2 が、 Helley モデルは相対速度に対するパラメータ 1_1 が比較的安定していた。

非線形 Kometani モデルの 3_3 及び Helley モデルの 2_2 についてはゼロに非常に近い値であり、モデル全体に及ぼす影響度が小さいと言える。

Helley モデルの 0_0 、 1_1 、 2_2 については GM モデルと同様にばらつきが非常に大きく、一般的な傾向を見出すことはできなかった

表3 GM モデルのパラメータ推定結果

パラメータ ドライバー					m				l			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
全体	2.20	5.24×10^{-3}	2.21×10^{-2}	0.42	0.52	-1.89	1.78	1.77	0.92	-3.28	0.95	1.71
加速時	2.49	1.94×10^{-2}	45.69	5.76	-0.41	-5.78	-1.87	-0.94	5.65×10^{-2}	-6.67	-0.24	-0.12
減速時	3.73	7.31×10^{-4}	1.38×10^{-5}	7.81×10^{-2}	0.84	3.24	4.77	3.29	1.47	1.21	1.53	2.68
追従車速度15m/s以下	0.90				0.79				-0.77			
追従車速度15m/s以上	13.76				-0.92				-0.13			
車間距離20m以下	3.11		262.86		0.73		-0.85		1.23		1.50	
車間距離20m以上	1.68		0.23		-2.47		-7.49		-1.96		-7.31	
相対速度がプラス	2.55	7.51×10^{-7}	1.91	1.85×10^{-4}	-0.56	-5.84	-0.57	2.42	9.37×10^{-2}	-9.77	1.29×10^{-2}	0.17
相対速度がマイナス	5.09	14.41	5.44×10^{-3}	170.56	0.87	2.81	2.71	2.34	1.62	3.71	1.43	4.00

表4 非線形 Kometani モデルのパラメータ推定結果

パラメータ ドライバー	1				2				3			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
全体	0.20	0.29	0.19	0.22	0.74	0.52	0.52	0.48	9.32×10^{-3}	-3.91×10^{-3}	-7.36×10^{-3}	-5.71×10^{-3}
加速時	0.20	0.26	0.23	0.19	0.74	0.76	0.11	0.13	-2.31×10^{-2}	-1.30×10^{-2}	5.43×10^{-3}	3.46×10^{-3}
減速時	0.30	0.31	0.16	0.25	0.72	0.21	0.75	0.37	1.35×10^{-2}	3.01×10^{-3}	-1.08×10^{-2}	4.21×10^{-3}
追従車速度15m/s以下	0.25				0.64				1.27×10^{-2}			
追従車速度15m/s以上	0.16				0.86				-1.19×10^{-2}			
車間距離20m以下	0.21		0.20		0.74		0.57		9.82×10^{-3}		-5.99×10^{-3}	
車間距離20m以上	0.21		0.18		0.74		0.29		-1.84×10^{-2}		-2.01×10^{-3}	
相対速度がプラス	0.13	2.87×10^{-2}	0.19	0.16	0.71	0.41	0.45	0.27	-1.78×10^{-2}	-6.64×10^{-3}	-4.75×10^{-3}	-4.06×10^{-3}
相対速度がマイナス	0.24	0.34	0.11	0.14	0.77	0.39	0.70	0.85	-4.77×10^{-3}	1.97×10^{-4}	-1.12×10^{-2}	-7.73×10^{-3}

表5 Helley モデルのパラメータ推定結果

パラメータ ドライバー	0				1				2			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
全体	-8.35	4.21	-41.71	24.26	1.68	0.95	2.89	0.36	-45.37	-3.66	-10.18	-12.50
加速時	-137.93	9.01	-77.63	54.19	6.29	0.91	4.53	-0.92	-322.56	-33.04	3.26	35.58
減速時	-5.50	3.50	21.19	16.91	1.39	1.19	-0.30	0.56	-22.78	6.47	-14.30	-6.66
追従車速度15m/s以下	-461.28				48.78				-478.25			
追従車速度15m/s以上	-16.66				1.97				-42.43			
車間距離20m以下	42.91		-33.57		2.50		2.47		-141.19		-9.09	
車間距離20m以上	-0.48		24.16		-1.28		-1.34×10^{-2}		9.97		10.00	
相対速度がプラス	79.10	1.02	-63.04	66.79	-1.69	0.88	3.94	-1.42	72.97	-6.27	-20.98	-35.94
相対速度がマイナス	1.80	-0.93	-33.25	14.00	0.98	1.12	2.57	0.65	-16.61	4.11	-4.94	-6.81

6. 実交通現象の再現性の検証

5.で求めた走行状況別のパラメータを用いて、各モデルが走行状況別にどれだけ実際の交通現象を再現し得るのか、その検証を行った。検証に当たっては、パラメータを適用した結果、モデルから得られた追従車加速度と追従実験のデータの追従車加速度との相関を求める事

により行った。結果を表6～表9に示す。なお、表中の()内の数字はR²値であり、R²値が0.7以上の時は、0.6～0.7の時は、0.6未満の時は×で表した。網掛け部分はR²値が0.7以上の箇所である。斜線部分は該当データが無かったことを示すものである。

表6 GM モデルの再現性検証結果

	A	B	C	D
全体	(0.69)	×(0.52)	(0.67)	×(0.41)
加速時	×(0.59)	×(0.53)	(0.66)	×(0.37)
減速時	×(0.51)	×(0.46)	×(0.55)	×(0.34)
追従車速度15m/s以下	(0.76)			
追従車速度15m/s以上	(0.67)			
車間距離20m以下	(0.65)		(0.64)	
車間距離20m以上	(0.66)		(0.80)	
相対速度がプラス	×(0.57)	×(0.04)	×(0.39)	×(0.22)
相対速度がマイナス	×(0.46)	×(0.28)	×(0.48)	×(0.06)

表7 線形 Kometani モデルの再現性検証結果

	A	B	C	D
全体	(0.82)	×(0.57)	(0.69)	×(0.44)
加速時	×(0.59)	(0.60)	(0.67)	×(0.40)
減速時	(0.75)	×(0.48)	(0.70)	×(0.43)
追従車速度15m/s以下	(0.83)			
追従車速度15m/s以上	(0.82)			
車間距離20m以下	(0.82)		(0.70)	
車間距離20m以上	(0.85)		(0.83)	
相対速度がプラス	(0.67)	×(0.20)	×(0.50)	×(0.18)
相対速度がマイナス	(0.68)	×(0.36)	×(0.51)	×(0.25)

表 8 非線形 Kometani モデルの再現性検証結果

	A	B	C	D
全体	(0.83)	× (0.57)	(0.73)	× (0.47)
加速時	(0.74)	(0.61)	(0.67)	× (0.40)
減速時	(0.77)	× (0.48)	(0.70)	× (0.43)
追従車速度15m/s以下	(0.84)			
追従車速度15m/s以上	(0.83)			
車間距離20m以下	(0.83)		(0.72)	
車間距離20m以上	(0.87)		(0.83)	
相対速度がプラス	(0.75)	× (0.25)	× (0.55)	× (0.23)
相対速度がマイナス	(0.68)	× (0.36)	× (0.55)	× (0.29)

表 9 Helley モデルの再現性検証結果

	A	B	C	D
全体	(0.75)	× (0.55)	(0.71)	× (0.47)
加速時	(0.64)	× (0.57)	(0.69)	× (0.43)
減速時	(0.59)	× (0.52)	(0.63)	× (0.43)
追従車速度15m/s以下	(0.80)			
追従車速度15m/s以上	(0.76)			
車間距離20m以下	(0.70)		(0.69)	
車間距離20m以上	(0.88)		(0.91)	
相対速度がプラス	(0.69)	× (0.28)	× (0.45)	× (0.23)
相対速度がマイナス	× (0.58)	× (0.40)	× (0.52)	× (0.30)

ドライバー別に見ると、BとDについてはどのモデルにおいても高い再現性を得られなかった。つまり、今回の4つのモデルで表現しきれない挙動を示していたか、追従状態とは言えない挙動ではなかったのではないと思われる。AとCについては線形 Kometani モデル、非線形 Kometani モデル、Helley モデルにおいて複数の走行状況で高い再現性が確認できた。特に、Aの場合にその傾向が顕著であった。また、走行状況別に見ると、相対速度がマイナスの時はどのモデルにおいても低い再現性とどまっている。このことから、今回の4つのモデルでは、追従車がだんだんと先行車に近づいていくような挙動を十分に再現しきれないと考えられる。相対速度がプラスの時もAについて非線形 Kometani モデルが唯一高い再現性を表しているだけであり、全体的に今回の4つのモデルは4人のドライバーの相対速度の変化に

対する挙動に対応しきれていないと言えそうである。加速時の走行状況においても同様の傾向が確認できた。

7. 結論と今後の課題

本研究により得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 反応遅れ時間が個人ごとにより差があることが明らかとなった。
- 2) GM モデルについては、個人別、走行状況別のパラメータのばらつきが大きく、再現性検証の結果、適用範囲がかなり狭いことが明らかとなった。また、走行状況別に有効な知見は得られなかった。
- 3) 線形 Kometani モデルについては、パラメータの安定性が高く、再現性検証の結果、適用範囲が広いことが明らかとなった。また、減速時、車間距離が 20m 以下、20m 以上の場合に適用

するのが有効だと言えそうである。

4)非線形 Kometani モデルについては、パラメータの安定性に若干の問題があるものの、再現性検証の結果、適用範囲が広いことが明らかとなった。また、減速時、車間距離が 20m 以下、20m 以上、相対速度がプラスの場合に適用するのが有効だと言えそうである。

5)Helley モデルについては、パラメータの安定性に問題があるが、再現性検証の結果、GM モデルと比較して適用範囲は狭くないことが明らかとなった。また、車間距離が 20m 以上の場合に適用するのが有効だと言えそうである。

また、今後の課題としては以下のことが考えられる。

- 1) 質の高い多数の実験データの分析によって、パラメータの個人間の分布、及び個人内の分布を明らかにすること
- 2)環境の変化によってパラメータの値がどのように変化するかを明らかにする
- 3)本研究は乗用車を対象に行ったが、大型車の追従挙動の分析も必要である。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会,「道路の交通容量」, 1984 .
- 2) 日本道路協会,「道路構造令の解説と運用」, 1983 .
- 3) 森浩,「都市間高速道路における追従特性と交通容量の研究」, 東京大学学位論文, 1986 .
- 4) 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 / - 5 , pp . 1 - 7 , 1986 .
- 5) 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, Vol . 458 , pp . 4 - 18 , 1993 .
- 6) 大庭孝之,「車両の追従挙動に関する実験的研究」, 東京大学修士論文, 1989 .
- 7) 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」, 土木学会第 43 回年次学術講演会, pp . 252 - 253 , 1988 .