

追従走行時の反応時間特性に関する実験的検証*

Experimental Analysis of Reaction Time of Car-Following Model*

鈴木淳**・中辻隆***・吾田洋一****・Ranjitkar PRAKASH*****

By Jun SUZUKI**・Takashi NAKATSUJI***・Yoichi AZUTA****・Ranjitkar PRAKASH*****

1. はじめに

ミクロ交通流シミュレーションモデルにおいて運転者の反応時間、感度等のパラメータはシミュレーション結果に極めて大きな影響を与える決定的なパラメータである。これらのパラメータ特性に関しては、1950年代における Chandler¹⁾、Hermann²⁾ および Gazis³⁾ による先駆的研究を嚆矢としてこれまで数多くの研究がなされてきている⁴⁾。

追従時の反応時間と追従挙動の漸次安定性は、シミュレーションの再現性評価の観点からも極めて重要であり近年においても活発な研究がなされてきている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。しかしながら、車群の運動を計測するのに十分な機器の開発がされていなかったこともあり、追従挙動仮説モデル、あるいは漸次安定性に関する特性を実験的に検証するまでには至っていない。

RTK-GPS はドップラー効果に基づく補正効果によって車両の位置や速度を数cm程度の精度⁸⁾で連続的に計測することが可能であり、格段に精度の高い試験が可能となってきた。また、これまでの追従試験では困難であった曲線部における走行挙動の計測も可能になってきている。

北海道大学と開発局土木研究所は、追従挙動特性の実証的検証を行うために、RTK-GPSを用いた追従試験を実施し、計測された試験データを用いて走行条件や車群中の位置が反応時間に及ぼす影響について分析を行った。

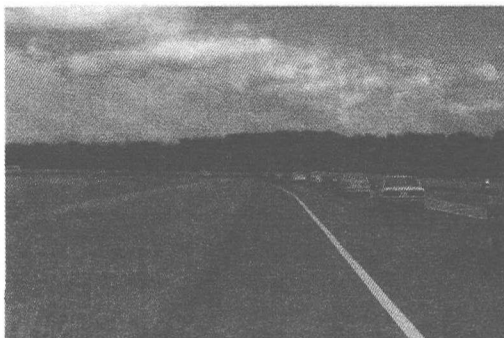
2. 追従走行試験

(1) 走行試験

走行試験は2000年10月16日～10月18日に、独立行政法人開発局土木研究所所有の苫小牧寒地試験道路（図—1）にて行われた。この試走路は1200mの直線区間と曲線半径50mのカーブ区間からなる延長約2700mの周回路である。RTK-GPSによる試験は固定基準点方式とし、試験路周辺の座標既知点から外挿した基準点を試験路内に設置し、衛星からの信号と同時に基準点からの補正信号を各車両に送信した。走行試験には10台の乗用車を用いた。試験に用いた車両及び車両配列は表—1の通りである。車両配列はA-type、B-typeの2パターンで行った。その並びを表—2に示す。先頭車の運転者は2名であり、A-type、B-typeのパターンと運転者を組み合わせて走行試験を行った。運転者は、先頭車と最後尾車を除き20歳代の男性である。走行試験は車両10台にRTK-GPSを取り付けて、車両位置、速度等を0.1秒ごとに計測した。図—2は追従試験の実施状況である。



図—1 苫小牧寒地試験道路⁹⁾



図—2 追従試験状況(苫小牧寒地試験道路)

*キーワード：追従試験、反応時間、図式解法、RTK-GPS

**学生員，工修，北海道大学大学院工学研究科

(札幌市北区北13条西8丁目，

TEL011-706-6217, FAX011-706-6216)

***正員，工博，北海道大学大学院工学研究科

(札幌市北区北13条西8丁目，

TEL011-706-6215, FAX011-706-6216)

****正員，北海道開発局土木研究所交通研究室

(札幌市豊平区平岸1条3丁目

TEL011-841-1738, FAX011-841-9747)

*****学生員，工修，北海道大学大学院工学研究科

(札幌市北区北13条西8丁目，

TEL011-706-6822, FAX011-706-6216)

表—1 走行試験に用いた車両

配車順列	A Type	B Type
先頭	1号車	1号車
	2号車	8号車
	3号車	7号車
	4号車	6号車
	5号車	5号車
	6号車	4号車
	7号車	3号車
	8号車	2号車
	9号車	9号車
最後尾	10号車	10号車

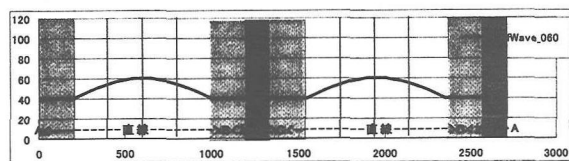
表—2 走行試験における車両配列

車両番号	年式	車種
1号車	平成3年	ハイゼット
2号車	平成12年	カペラ
3号車	平成10年	ローレル
4号車	平成10年	セフィーロ
5号車	平成12年	ブルーバード
6号車	平成12年	スカイライン
7号車	平成10年	プリメーラ
8号車	平成12年	アベニールワゴン
9号車	昭和60年	ビスタ
10号車	昭和63年	サファリ

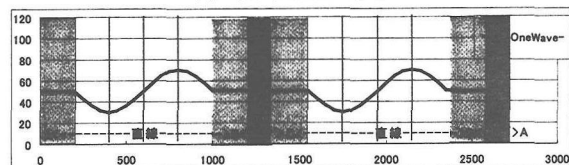
(2) 走行試験パターン

試験は、静止状態、直線部、曲線部、および交差点部において行われた。静止状態での計測はRTK-GPSの精度を検証するために予め決められた位置に10台の車両を停止させた状態で計測を行った。仕様通りにほぼ数cm以内の計測誤差を確認した。

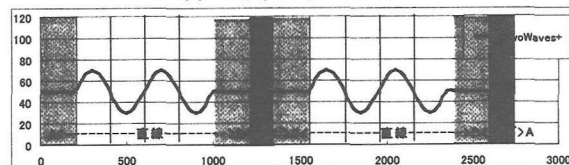
ここでは直線走行試験部における計測データを用いて分析を行った。走行パターンを図—3に示す。安定性に関する理論的解析⁶⁾との対応を想定し、先頭車の速度を正弦波上に変化させて後続車に追従させた。例えば半波長走行においては、十分手前において40km/hでの定常走行を保った後、直線部約1km区間を利用して速度を60km/hまで上げその後40km/hに戻す走行(H60)を行っている。半波長走行は速度を80km/hまで上げその後40km/hに戻している走行(H80)もある。また、1波長から3波長の試験では、定常走行から最初に速度を上げるパターン(+パターン)に加え定常走行から最初に速度を下げるパターン(-パターン)も行っている。それぞれ波長の数字と±パターンを組み合わせ、試験条件名を1+,1-,2+,2-,3+,3-と定義した。ランダム走行(R)とは、40km/hから80km/hの範囲内で先頭車の速度を自由に变化させている走行である。定速走行においてはほぼ20, 40, 60, 80km/hを保つように走行している。それぞれ試験条件をC20,C40,C60,C80と定義した。実際の試験においては、車両配列のタイプA、Bも変えながら追従車両に走行パターンを予測させないようランダムな順序で実施されている。表—3に各走行パターンの試験回数を示す。



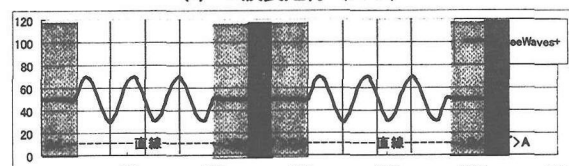
(a) 半波長走行 (H)



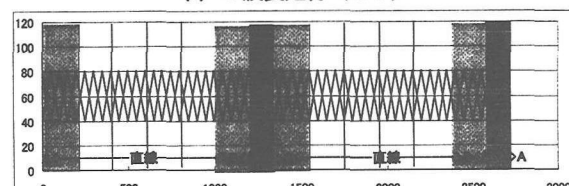
(b) 1波長走行 (1+)



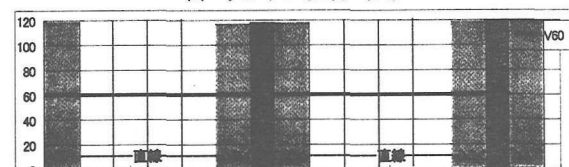
(c) 2波長走行 (2+)



(d) 3波長走行 (3+)



(e) ランダム走行 (R)



(f) 定速走行 (C)

図—3 走行パターン

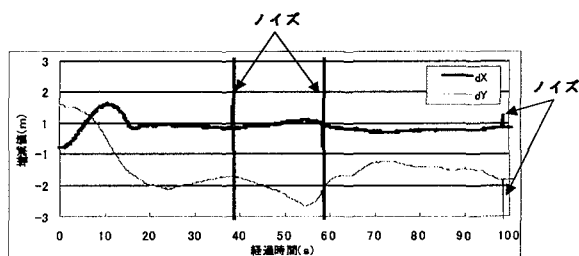
表—3 各走行パターンの試験回数

Pattern	A	B
半波長走行(H60,H80)	4	6
1波長走行(1+,1-)	4	4
2波長走行(2+,2-)	2	6
3波長走行(3+,3-)	4	5
ランダム走行(R)	4	4
定速走行(C20,C40,C60,C80)	11	2
合計	29	27

3. 取得データの処理・編集

(1) ノイズ

RTK GPS の計測データにも希ではあるがデータのノイズが含まれることがある。これは電波の受信がうまくいかない等の原因が考えられる。図—4は RTK GPS のデータにおける、絶対位置を 0.1 秒ごとの X 方向、Y 方向の増減値 (dX、dY) を示したものである。この図には位置の計測データにはパルス上のノイズ成分が含まれている。本実験によって得られたデータには 100 秒間 (1000 個) のデータの中に平均 0~3 個の頻度で瞬間的なノイズが現れたが、一般的な GPS 計測において 1~2% の発生が起こることを考えると、このノイズは極めて少ないことが分かる。ここでは、これらの箇所は前後のデータを用いて線形補間を行った。



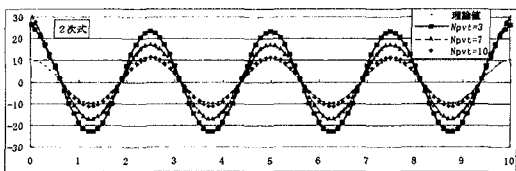
図—4 計測データに含まれたノイズ

速度データに関しては、速度自体がドップラー効果を利用して位置データとは独立に計測されているため、ノイズも全く独立に発生する。しかも位置データと比べその発生は極めて希であった。

(2) 加速度の算出

RTK-GPS から得られるデータは位置、速度であり、加速度は取得できない。そのため、速度を数値微分することで加速度を算出した。数値微分にはいくつかの方法があるが、ここでは多項近似、スプライン近似、及びフーリエ微分の手法を比較検討した。その結果多項近似による手法を採用した。これは、速度の原データに対してある時間幅の範囲で標本値を最小二乗法により近似し、その後、近似式を時間幅の中心点における微係数を使って加速度を算出する方法である。しかしこのようにして求める微分値は、近似式の次数や前後どれだけの範囲の近傍点までを使用するかによって変動が大きいため、微分値が正確な値に最も近くなるように近似式の次数と範囲を検証した。検証には sin 波形をサンプルとして使用した。そして、この波形を 2 次式、3 次式、4 次式で、前後それぞれ 3 個、7 個、10 個の近傍点 (NPvt=3、7、10) までの範囲を用いた場合別に微分値を求め、理論値との比較を行った。図—5は 2 次式におけるそれぞれ 3 個、7

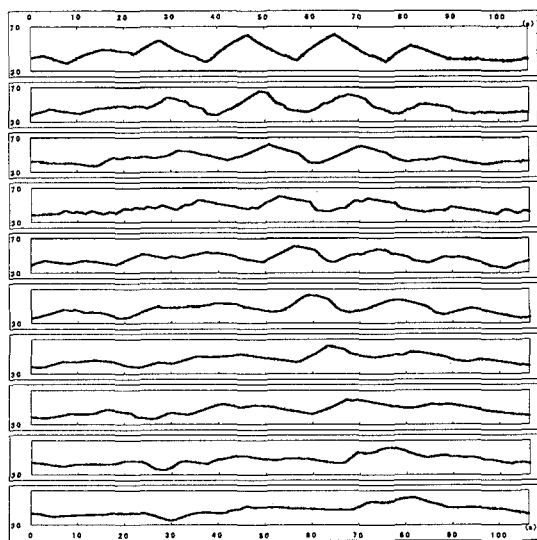
個、10 個の近傍点 (NPvt=3、7、10) および理論値の比較を表した図である。この図より、前後それぞれ 10 個の近傍点までを用いた 2 次式による最小二乗近似で行うのが最適と判断されたので、この方法を用いて加速度の算出を行った。



図—5 2次式で近似した近傍点毎の Sin カーブ

(3) データ編集

位置データや速度データのノイズを除去し、さらに数値微分から求めた加速度データ、あるいは前者との車間距離データを加えて走行試験毎に一つのファイルを作成した。各ファイルは EXCEL 形式であり、各シートには先頭車から順々に最後尾車までのデータが記録してある。図—6はデータの一例として 10 台の車の 3 波長走行時 (50Km/h の定常走行より最初に速度を上げ、3 波長を描くように $\pm 20\text{Km/h}$ の加減速を行うパターン) における速度変化を示している。横軸は時刻、縦軸は速度を表している。グラフは上から 2 台目、3 台目、4 台目と実際の試験走行順の結果である。この図から、先頭車の走行波形が追従車に伝搬している様子が示されている。



図—6 3波長走行時(3+)における試験データ例

4 反応時間推定法

(1) 追従モデル

反応時間を推定するにあたり、本研究では刺激—反応モデルを用いている。刺激—応答モデルは式1に示される。

$$\text{応答} = (\text{感度}) \times \text{刺激} \quad (1)$$

刺激—応答モデル式(1)でもっとも簡単なモデルは式(2)の通りである。相対速度項が刺激であり、加速度項が応答である。

$$\ddot{x}_i(t+T) = \lambda [\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i-1}(t)] \quad (2)$$

式(2)において、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$ 、 λ はそれぞれ速度、加速度、感度定数を表し、 $i-1$ 、 i 、 t 、 T はそれぞれ前走車、追従車、時刻、反応時間を表す。

(2) 相関係数法⁹⁾

一般的に式(2)における反応時間は、相対速度と加速度との相互相関係数を用いて推定される事が多い。すなわち図-7に示すように、ある区間範囲において反応時間が一定であるという仮定の下で加速度と相対速度データをずらしながら相関係数を逐次計算してゆき、最も相関係数が高いときの時間のずれを反応時間とするものである。

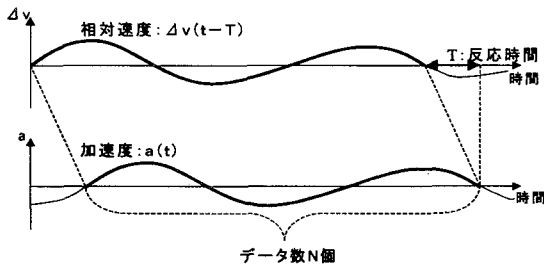


図-7 反応時間算出過程

表-4はA-typeの配車パターンにおける追従順番別反応時間の平均値と標準偏差を表している。表中の数字は上段が平均値、下段の括弧内は標準偏差である。この結果から、反応時間は走行条件によっても車群中の位置によっても大きく異なっている。また、ばらつきも大きくなっている。

表-4においては1つの走行試験中反応時間は一定であることを暗黙裡に仮定している。しかし、尾崎⁵⁾やGurusinghe⁹⁾が指摘しているように反応時間は走行状況によって変化していることが予想される。このことが、表-4のばらつきの一因になっていると考えられる。

表-4 正弦走行パターンに対する反応時間の平均値と標準偏差(A-type)

AVパターン	2台目	3台目	4台目	5台目	6台目	7台目	8台目	9台目	10台目
0.5波長	1.7 (0.3)	1.5 (0.1)	1.7 (0.3)	1.0 (0.1)	1.7 (0.2)	1.4 (0.05)	2.0 (0.00)		
1波長	1.4 (0.13)	1.7 (0.22)	1.5 (0.33)	1.2 (0.17)	1.5 (0.19)	1.5 (0.11)	1.7 (0.18)	1.1 (0.19)	1.3 (0.42)
2波長	1.1 (0.10)	0.8 (0.21)	1.6 (0.45)	1.5 (0.15)	2.0 (0.05)	1.9 (0.15)	1.6 (0.05)	1.7 (0.35)	1.7 (0.31)
3波長	1.3 (0.25)	0.7 (0.19)	1.1 (0.16)	1.1 (0.19)	1.7 (0.25)	1.6 (0.21)	1.9 (0.17)	1.6 (0.45)	1.4 (0.05)

反応時間の時間変動を見るために、相対速度と加速度の相関係数がある時間刻み毎に求めた。すなわちある時刻 t における反応時間を時間 $(t - \Delta T, t + \Delta T)$ における相互相関係数を最大にするタイムラグとして定義した。図8に解析事例を示す。反応時間が不規則に変動していることが示されている。

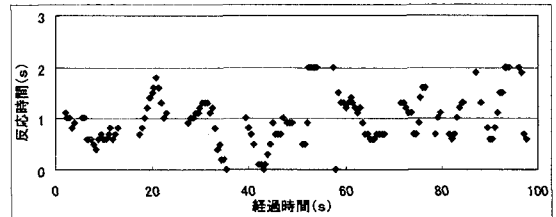


図-8 反応時間の時間変動

(3) 図式解法¹⁰⁾

図-8においては反応時間は等時間間隔 0.5 秒ごとに計算されたが、その合理性は保証されていない。GURUSINGHE¹⁰⁾は反応時間はイベントの発生毎に変化するという仮定の基に図式解法を提案した。これは相対速度と加速度を同じグラフ上にプロットして、相対速度に変化が現れるポイントと、そのポイントと一致する加速度に変化が現れるポイントをそれぞれ見つけたし、その時間差を反応時間として求める解法である。

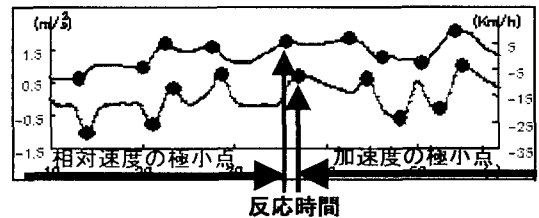


図-9 刺激—応答モデルにおける図式解法

図-9は図式解法を使った反応時間の求め方を示したグラフである。波線が相対速度、実線が加速度を示している。横軸は時刻、第一縦軸は加速度、第二縦軸は相対速度を示している。例として相対速度における極小点を抽出し矢印で示してある。また、それに対応する加速度

における極小点が矢印で示してある。これらの時間差が反応時間として定義される。極大点も同様に算出される。図一9において大きな●で表された点が実データより算出された反応時間解析点である。このようにして反応時間を求める方法は運転者の追従挙動を確実に追うことができるが、膨大な時間を要する。本研究においては相対速度と加速度の極大極小点を自動判別し、それらの点に対応する反応時間と加速度を自動的に求める処理プログラムの開発を行った。こうして求めた反応時間の中には明らかに対応していない点も含まれるので、各点の結果をモニターしながら反応時間の計算を表一3の全データに対して行った。その結果、合計 5334 個の反応時間が得られた。

表—5 走行パターン別反応時間特性

	A-Type			B-Type		
	度数	平均	SD	度数	平均	SD
H60	142	1.25	0.36	312	1.28	0.37
H80	170	1.19	0.30	178	1.18	0.34
1-	194	1.27	0.36	200	1.28	0.48
1+	260	1.24	0.41	218	1.27	0.48
2-	128	1.28	0.45	162	1.20	0.35
2+				356	1.27	0.52
3-	85	1.09	0.32	275	1.36	0.43
3+	295	1.23	0.40	167	1.38	0.61
R	328	1.22	0.46	402	1.26	0.59
V20	547	1.21	0.43			
V40	247	1.27	0.44	280	1.37	0.60
V60	202	1.29	0.50			
V80	216	1.40	0.57			

表—6 車群の位置別反応時間特性

	A-Type			B-Type		
	度数	平均	SD	度数	平均	SD
02	448	1.14	0.39	219	1.32	0.36
03	320	1.31	0.54	189	1.43	0.62
04	366	1.20	0.36	233	1.52	0.67
05	439	1.15	0.29	336	1.18	0.44
06	315	1.30	0.37	377	1.24	0.37
07	202	1.43	0.53	291	1.22	0.49
08	268	1.29	0.52	283	1.14	0.48
09	235	1.26	0.43	261	1.34	0.54
10	221	1.31	0.56	361	1.31	0.44

表一5、表一6はそれぞれ図式解法によって求められた走行パターン別反応時間特性、および車群の位置別反応時間特性を表している。A-type, B-type は配車タイプの違い、度数は算出された度数、平均は平均値、SD は標準偏差を示す。H60 や 1+等々は試験条件名（2(2) 参照）を表し、02, 03 など、車群の位置を表す。これらの表より走行パターンや車群の位置によっては明確な特性はみられていない。

5 反応時間解析

ここでは反応時間の特性を3つの観点から解析を行った。まず試験条件や車群の位置の違いによる反応時間の分散や平均値の相違について調べた。次に反応時間の分布形状について、さらには反応時間と走行状況データとの相関性についても分析を行った。

(1) 反応時間の分散と平均値

反応時間が走行パターンによって有意な差があるかどうかを調べるために、t 検定、F 検定をすべての組み合わせに対して行った(有意水準 5%)。表一7は配車タイプ A と B における試験結果である。H60, H80 等はそれぞれ走行パターンを示している。対角線より右上が F 検定の結果、左が t 検定の結果である。網掛けがしてある所は、それぞれ境界値を越えたものを示している。F 検定における網掛け部は分散に有意な差があったもの、t 検定における網掛け部は平均に有意な差があったものを示している。なお、t 検定の境界値はおおよそ 1.96 であり、F 検定の境界値は 1.21 から 1.49 である。これらの結果から、反応時間の平均値に関しては t 検定による網掛け部が少ないことから 80Km/h の定速走行を除いて平均値に有意な差があるものは少ない。しかし、F 検定については差があるものが多く存在している。特に定速走行においては他のパターンとばらつきに有意な差が多く見られている。

表—7 走行パターンによる反応時間の変化

	A-Type									
	HalfWave	Wave Running	Random				Constant			
	H60	H80	1-	1+	2-	2+	3-	3+	R	
H60	1.19	1.01	1.13	1.25			1.13	1.11	1.27	1.19
H80	0.93	1.18	1.35	1.49			1.05	1.32	1.52	1.42
1-	0.31	1.35	1.14	1.26			1.12	1.12	1.29	1.20
1+	0.21	0.79	0.58	1.10			1.28	1.02	1.13	1.05
2-	0.43	1.33	0.17	0.66			1.41	1.13	1.02	1.05
2+										
3-	1.95	1.29	2.32	1.85	2.23			1.25	1.44	1.35
3+	0.37	0.64	0.78	0.18	0.83			1.76	1.15	1.07
R	0.37	0.60	0.77	0.20	0.82			1.66	0.02	1.07
V20	0.75	0.31	1.20	0.62	1.19			1.51	0.43	0.41
V40	0.27	1.28	0.04	0.55	0.21			2.18	0.75	0.76
V60	0.50	1.46	0.24	0.78	0.04			2.24	0.97	0.99
V80	2.02	3.09	1.94	2.60	1.51			3.42	2.86	2.85

t検定

	B-Type									
	HalfWave	Wave Running	Random				Constant			
	H60	H80	1-	1+	2-	2+	3-	3+	R	
H60	1.09	1.30	1.32	1.05	1.42	1.18	1.68	1.61		1.64
H80	1.77	1.42	1.43	1.04	1.54	1.28	1.83	1.76		1.79
1-	0.01	1.49	1.01	1.37	1.09	1.11	1.29	1.24		1.26
1+	0.20	1.34	0.16	1.38	1.08	1.12	1.27	1.23		1.25
2-	1.31	0.36	1.12	0.98	1.49	1.24	1.76	1.69		1.73
2+	0.18	1.44	0.14	0.03	1.03	1.20	1.19	1.14		1.16
3-	1.60	3.02	1.35	1.55	2.61	1.67	1.42	1.37		1.39
3+	1.51	2.66	1.28	1.44	2.27	1.49	0.20	1.04		1.02
R	0.38	1.22	0.30	0.14	0.83	0.20	1.83	1.65		1.02
V20										
V40	1.54	2.75	1.28	1.47	2.32	1.62	0.06	0.13		1.79
V60										
V80										

t検定

次に反応時間が車群の位置によって変化があるかどうかを確認するために t 検定、F 検定を同様に行った。表一8はそれぞれ配車タイプ A と B における検定結果である。数値 02, 03, 04・・・は車群の位置を示している。つまり 02 は先頭車から数えて2番目の走行車、03 は3番目の走行車と続く。対角線より右上が F 検定、左が t 検定の検定結果である。t 検定の境界値はおおよそ 1.964

であり、F 検定の境界値は 1.17 から 1.29 である。走行パターンの結果に比べ平均または分散に有意な差がある事例が多い。これらの結果から、t 検定においても F 検定においても差があるものが多く車群の位置による影響は大きいと言える。しかしながら表一六に見るように平均値および標準偏差に車群の先頭から後方にかけて傾向的な変化は見られず、運転者の個人的な特性の反映と考えられる。

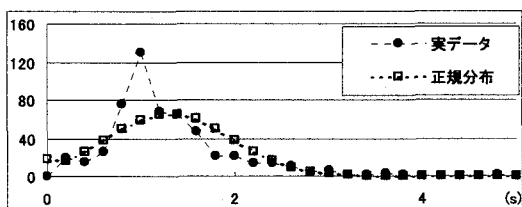
表一八 車群の位置による反応時間の変化

A-Type										
A	02	03	04	05	06	07	08	09	10	
02		1.37	1.08	1.35	1.06	1.36	1.32	1.11	1.43	
03	3.46		1.48	1.85	1.45	1.01	1.04	1.23	1.04	
04	1.49	2.04		1.24	1.02	1.47	1.43	1.20	1.54	
05	0.38	3.02	1.21		1.27	1.83	1.78	1.49	1.92	F
06	3.70	0.03	2.24	3.65		1.44	1.40	1.18	1.51	検定
07	5.31	1.93	4.08	5.47	2.17		1.03	1.23	1.05	
08	3.00	0.28	1.69	2.90	0.27	2.13		1.19	1.08	
09	2.44	0.71	1.18	2.38	0.74	2.55	0.42		1.28	
10	3.10	0.00	1.88	3.05	0.03	1.76	0.25	0.64		t検定

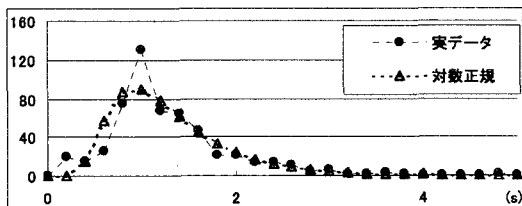
B-Type										
B	02	03	04	05	06	07	08	09	10	
02		1.70	1.83	1.20	1.01	1.34	1.33	1.48	1.21	
03	1.6		1.07	1.41	1.68	1.27	1.28	1.15	1.41	
04	2.9	1.1		1.52	1.80	1.36	1.37	1.23	1.51	
05	2.6	3.7	5.2		1.19	1.11	1.10	1.23	1.00	F
06	1.6	2.9	4.5	1.2		1.32	1.31	1.47	1.19	検定
07	1.7	3	4.5	0.7	0.5		1.01	1.11	1.11	
08	3.1	4.1	5.6	0.8	2	1.3		1.12	1.10	
09	0.3	1.2	2.5	2.8	1.9	2	3.3		1.23	
10	2.4	1.8	3.3	2.5	1.4	1.7	3.1	0.6		t検定

(2) 反応時間の分布形状

シミュレーションモデルにおいて、反応時間は一般的に正規分布が仮定されることが多い。ここで、反応時間の分布形状が正規分布あるいは対数正規分布を仮定したときの適合度検定を行った。



(1) 実データの度数分布と正規分布



(2) 実データの度数分布と対数正規分布

図一〇 20Km/h 一定における実データと分布形の比較

図一10は試験条件 20Km/h 一定走行時における反応時間の度数分布と(1)正規分布、(2)対数正規分布を比較したものである。ここで、反応時間は全3回の試験に対して図式解法を用いて求めたものである。いずれも横軸は反応時間(単位秒)であり縦軸は度数である。図にみるように対数正規分布のほうが反応時間の度数分布に近い確率分布形状をしていることがわかる。

次に、反応時間の確率分布が対数正規分布に近いことを検証するためにカイ二乗検定を行った。表一九、表一10は走行パターン別、車群の位置別に正規分布、対数正規分布の χ^2 値と5%境界値を示したものである。

正規分布、対数正規分布ともに全ての関係において5%境界値以下であり、いずれも適合しているが、ほとんどの場合において対数正規分布の方が正規分布より χ^2 値が小さくなっている。このことは、反応時間の分布としては正規分布よりも対数正規分布の方が適合性に優れていることを表している。

表一九 試験条件による χ^2 値

A type													
	H60	H80	1-	1+	2-	2+	3-	3+	R	V20	V40	V60	V80
正規分布	50	38	38	54	41		28	57	85	140	41	67	38
対数正規	41	29	18	24	11		16	8	18	45	23	39	11
5%境界値	171	200	226	299	155		108	336	370	601	284	236	251

B type													
	H60	H80	1-	1+	2-	2+	3-	3+	R	V20	V40	V60	V80
正規分布	58	53	52	86	53	92	56	62	68		65		
対数正規	12	16	14	29	19	31	34	20	23		18		
5%境界値	353	209	234	253	192	400	314	198	450		284		

表一〇 車群の位置による χ^2 値

A type										
	02	03	04	05	06	07	08	09	10	
正規分布	114	77	103	103	36	58	60	59	26	
対数正規	27	34	40	25	68	24	17	17	18	
5%境界値	497	363	380	489	357	236	307	271	257	

B type										
	02	03	04	05	06	07	08	09	10	
正規分布	25	19	64	71	179	112	123	24	51	
対数正規	49	17	62	16	56	55	44	47	17	
5%境界値	406	222	270	380	422	331	322	299	405	

(3) 反応時間と走行状況データとの相関

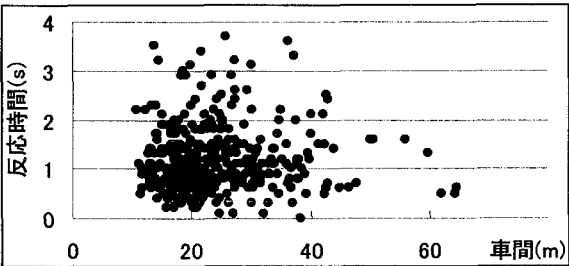
上にも述べたように反応時間は車間、速度、あるいは加速度の関数として表現することが尾崎⁵⁾やGurusinghe⁶⁾によって提案されている。ここでは車間、速度、加速度および相対速度を説明変数とした反応時間の重回帰モデルを作成するに先立って反応時間とこれらの変数との相関係数を調べた。図一11と図一12は車群の位置02車に対する反応時間と車間、および加速度との相関を示している。両図から明らかなように全く相関性は見られていない。加速度や相対速度に対しても同様であった。一般的に車間、速度、加速度、あるいは相対速度の間には相関性があるのでそれを除去するために主

成分分析を行った。表一 1 は車群の位置毎に行った主成分分析の結果である。全ての場合において説明変数は第2主成分までに 83%~93%集約されていることが分かる。次に第1主成分値 Z_1 と第2主成分値 Z_2 を用いて反応時間の重回帰モデルを作成した。式 (3) はそのモデル式である。

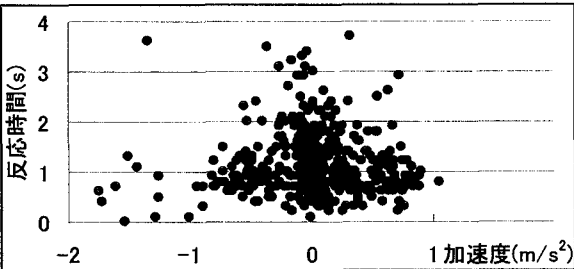
$$F = a_0 + a_1 Z_1 + a_2 Z_2 \tag{3}$$

車群の位置ごとに作成された重回帰モデルの決定係数を表一 2 に示す。いずれの場合も決定係数は 0.1 前後であった。

以上のことからここで求めた反応時間は、車間、加速度、速度、相対速度、いずれの要因とも相関性は小さく、これらの要因を説明変数とする反応時間の回帰モデルの成立は困難であると言える。



図—1 1 車間—反応時間の関係



図—1 2 加速度—反応時間の関係

表 1 1 反応時間の説明変数に対する主成分分析

A type

A-type	02	03	04	05	06	07	08	09	10
累積比率(第一軸)	0.50	0.53	0.51	0.53	0.53	0.60	0.56	0.55	0.57
累積比率(第二軸)	0.87	0.92	0.83	0.85	0.89	0.93	0.92	0.92	0.92

B type

B-type	02	03	04	05	06	07	08	09	10
累積比率(第一軸)	0.56	0.61	0.47	0.60	0.54	0.62	0.56	0.52	0.55
累積比率(第二軸)	0.92	0.91	0.87	0.87	0.85	0.93	0.89	0.91	0.87

表 1 2 反応時間の説明変数に対する主成分分析

A type

A-type	02	03	04	05	06	07	08	09	10
観測度数	448	320	366	439	315	202	268	235	221
決定係数 R^2	0.01	0.02	0.05	0.04	0.06	0.01	0.04	0.01	0.08

B type

B-type	02	03	04	05	06	07	08	09	10
観測度数	219	189	233	336	377	291	283	261	361
決定係数 R^2	0.04	0.17	0.05	0.04	0.06	0.13	0.07	0.07	0.02

6 おわりに

本研究においてRTK-GPS機器を用いた追従試験の試験方法とデータ処理方法を確立することができた。さらに、RTK-GPSを用いた実験によって得られた計測データを従来より正確で迅速に処理するシステムを作成した。さらに、図式解法を用いて反応時間を半自動的に求めるプログラム開発を行い、作業の効率性を高めた。求められた反応時間を用いて解析を行った結果、反応時間の変化は走行パターンによる影響よりも車群の位置による影響の方が大きいことを示した。また、反応時間の分布形状は正規分布よりも対数正規分布の方がより適合していることも示した。最後に、反応時間に関しては車間、加速度、速度、相対速度との主成分分析、及び重回帰分析の結果から反応時間の回帰モデルの作成は困難であることを示した。

最後に、追従試験の実施に際し、RTK-GPSの機材貸与および技術指導に対して多大な協力を賜ったトリンプルジャパン (株) 井沢氏および岩部氏に関係各位に記して謝意を表します。

参考文献

1) Chandler, R. E. et. al.: Traffic Dynamics, studies in Car Following, Operations Research, Vol. 6 (2). pp 165-184, 1958

2) Hermann R. et. al.: Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following, Operations research, Operations Research, Vol 7 (1). pp 86-106, 1959

3) Gazis D C. et. al.: Nonlinear Follow the Leader Models of the Traffic Flow, Operations Research, Operations Research Society of America, Vol 9 (2). pp 545-567, 1961

4) Gerlough, D. L. et. al.: Traffic Flow Theory, Transportation Research Board, Special Report No. 165, Washington D.C., 1975 (Updated: N. Gartner, et. al., Traffic Flow Theory: A state-of-the-Art Report, <http://www.cta.ornl.gov/cta/research/trb/tft.html>, 1998

- 5) Ozaki H.: Reaction and Anticipation in the Car-Following Behaviour, Proc. 12th international symposium on transportation and traffic flow theory, pp 349-366, 1993
- 6) Zhang, X et. al: Stability analysis of the classical car-following model, Transportation Research. Part B, Vol: 31 No: 6, pp 441-462, 1997
- 7) Del Castillo et. al.: The reaction time of drivers and the stability of traffic flow, Transportation Research. Part B, Vol: 28 No: 1, pp 35-60, 1994
- 8) G. S. Gurusinghe, 中辻:RTK-GPS を用いた車両追従試験と車群中の反応時間特性,第 21 交通工学研究発表会論文集, pp.213-216, 2001
- 9) 開発土木研究所交通研究室, 2000, 北海道の交通事故統計ソフトウェア
- 10) Gemunu S. GURUSINGHE et. al., A Car Following Model Incorporating Excess Critical Speed Concept, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 4, No.2, pp.171-184, 2001

追従走行時の反応時間特性に関する実験的検証*

鈴木淳**・中辻隆***・吾田洋一****・Ranjitkar PRAKASH*****

本研究ではRTK-GPSを用いた車10台による追従実験を行い、さまざまな走行パターンを行い、質の高いデータが得られた。これらのデータを使い、グラフ理論を用いて反応時間を半自動的に算出するシステムの構築をした。

算出された反応時間の解析を行い、走行パターンの変化による反応時間の平均には大きな差がなかったが車群の位置によって分散、平均ともに反応時間に影響をあたえることを示した。また、反応時間の度数分布形状は正規分布より対数正規分布の方がより適合していることを示した。さらに、車間、速度、加速度、相対速度を用いて反応時間の関係式を作るのは困難であることも示した。

Experimental Analysis of Reaction Time of Car-Following Model*

By Jun SUZUKI**・Takashi NAKATSUJI***・Yoichi AZUTA****・Ranjitkar PRAKASH*****

Car-following experiments with 10 vehicles were conducted using a RTK-GPS on a probing field for various versions driving patterns. A semi-automatic procedure was developed to calculate drivers reaction time by means of a graphcal method.

There was little difference among the means of reaction time for various driving patterns. The position is a platoon influenced on the mean and variance of reaction time. The logarithmic normal distribution was better fitted to the distribution of the reaction time measured. It was hard to describe the reaction time with a linear regression model of spacing, speed, acceleration, and relative speed.