

ドライビングシミュレータを用いた高速道路サグ部における追従挙動特性の解析

全日本空輸株式会社 非会員 吉澤隆司
*京都大学大学院工学研究科 正会員 ○塩見康博
京都大学経営管理大学院 正会員 宇野伸宏
大阪大学大学院工学研究科 正会員 飯田克弘

1. はじめに

高速道路単路部ではサグやトンネル入り口部をボトルネックとして渋滞が発生し、特に都市間高速道路では渋滞発生要因として主たる割合を占めている。こうした単路部の道路構造をボトルネックとする渋滞発生メカニズムは、個々の車両の挙動特性に大きく由来することが指摘されており¹⁾、その解明に向けては、詳細な車両挙動特性の把握が必要となる。特に、道路線形などの走行環境が追従挙動などの車両挙動特性に与える影響が明らかとなれば、走行しやすい道路構造設計の指針やドライバーに対する適切な注意喚起方法の提案などが可能となり、渋滞の軽減を図ることができると考えられる。

これまでも、追従挙動などの車両挙動特性と道路幾何構造の関係を分析した研究はなされており、縦断勾配の影響を明示的に考慮した追従モデル²⁾も提案されている。また、Hong *et al.*³⁾は、道路幾何構造の異なる区間で観測された車両走行軌跡データを用いて追従モデルパラメータを推定し、直線区間、曲線区間、合流区間でそれぞれパラメータ値が異なることを示している。しかしながら、走行挙動に影響を与える要因は天候・日照・周辺交通状況など多岐にわたる。その多くは人為的に制御することが困難であるため、実観測データからの的確に道路構造と走行挙動特性の関係を見出すのは困難である。

そこで本研究では同一の状況での走行実験が可能であるドライビングシミュレータ（以下DSと称する）を活用する。その上で、道路構造、及び先行走行挙動を因子とした追従走行実験を実施し、各要因が追従車両の走行挙動特性に与える影響を把握する。特に本稿では、道路構造としてサグ部の縦断勾配に着目し、直線、緩いサグ、急なサグ間での走行挙動特性の差異を統計的に検証する。

2. DSを用いた実験概要

本実験は、道路構造、及び先行車両挙動を因子とし、それ以外の交通条件を制御した環境の中で、被験者に先行車両への追従走行を指示し、その走行特性を把握することを目的とする。本稿はサグ部に焦点を当てた解析結果を整理したものであるが、本研究で実施した実験は道

Keywords: 交通流, ドライビングシミュレータ, 追従挙動

* 連絡先: shiomi@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp
(Phone) 075-383-3235

路構造としてサグとカーブを考慮して設計を行った。本章ではカーブ区間も含めた全体の実験概要を概説する。

2.1 DSの概要

本研究で用いたDSは3次元仮想空間上に高速道路を構築し、被験者に擬似的な走行体験をさせるものである。DS実験においてはその再現性が問題となるが、大口・飯田⁴⁾により、高速道路での追従走行の再現性が確認されている。以下では、被験者が運転する車両を「追従車」、追従車の一台前を走行する車両を「先行車」、それ以外の車両を「周辺車両」と呼ぶ。

2.2 道路モデルの設定

縦断勾配や曲線半径の値による追従挙動の差異をみるため、水準の異なる4種類のコースを用意した。以下、曲線半径が約800mのコースを「緩カーブ」、約400mのコースを「急カーブ」、登り部分の縦断勾配が約1.6%のコースを「緩サグ」、約5.0%のコースを「急サグ」と呼ぶ。なお、下り勾配は-1.9%で共通とする。表1に実験に用いたコースの概要を示す。表中の「直線」は、急カーブコースに含まれる約600mの区間を差し、この区間での挙動と、その他コースでの追従走行挙動を比較することで、道路線形と追従挙動特性の関係を見出すことを意図している。また、DS内では道路上任意の地点は、実際の高速道路と同様、特定地点からの距離標(KP)によって表される。表中の始点・終点の表記もそれに従っている。

表1 道路線形の種類と水準

No.	コース名	分析対象区間の道路線形諸元	実験走行区間		分析対象区間	
			始点KP	終点KP	始点KP	終点KP
1	緩カーブ	曲線半径 約800m 縦断勾配 約0.5%	2.5	4.5	3.2	4.2
2	急カーブ	曲線半径 約400m 縦断勾配 約-0.5%	7.8	12.0	8.8	9.8
3	緩サグ	曲線半径 約1,000m 縦断勾配 下り-1.9% 上り1.6%	63.2	60.6	62.5	61.3
4	急サグ	曲線半径 約1,000m 縦断勾配 下り-1.9% 上り5.0%	63.2	60.6	62.5	61.3
5	直線	曲線半径 約4,000m 縦断勾配 約-2.5%	7.8	12.0	8.2	8.8

2.3 先行車挙動の設定

追従車の挙動は先行車の挙動によって大きく影響を受けるので、たとえば登り部分で追従車に減速が生じたとしても、勾配の影響ではなく先行車の減速に起因している可能性がある。したがって、追従車の挙動に対する道路線形の影響を把握するためには、先行車による影響との分離が必要となる。そのため本実験では先行車の挙動に2種類のケースを設ける。具体的には、一方は先行車が常に95km/hの速度で走行するケース（以下、等速ケー

スと呼ぶ)とし、他方は先行車が道路線形に応じて加減速をするケースとする(以下、変速ケースと呼ぶ)。

2.4 周辺車両の設定

現実の走行環境に近づけるよう、周辺を走行する車両を配置する。その際、被験者に与える外的要因を道路線形と先行車の挙動のみに限定するため、いずれの走行ケースに対しても同様に周辺車両を配置する。

被験者の走行する追越車線では、追従車前方の車列が追従挙動に影響を与えないよう、先行車の前方に約250mの車間が常に維持するように車両を配置した。また、走行車線には常に70m程度の車間距離を維持しながら約90km/hの速度で走行する車群が存在するよう設定した。

2.5 実験の実施

以上の設定に基づき、計37名の被験者を対象として走行実験を行った。なお、被験者はすべて20代の学生である。被験者には各コースに対して変速・等速の2種類の先行車挙動ケースで追従走行を行ってもらい、一人につき計8回分の走行軌跡データを収集した。ただし、順序効果を排除するため、走行するコースの順序、先行車挙動ケースの順序は被験者間でランダムに設定した。また、実験走行に先駆け、各被験者には自由走行を含めて凡そ20分程度、DSでの走行を体験してもらうことにより、DSへの不慣れな状況を出来る限り排除するよう努めた。

3. 追従車走行挙動特性の把握

追従挙動の分析に先立ち、追従車の走行挙動に関する基礎的な分析として、走行速度の変化と道路線形の形状の関係を概観し、道路線形が追従車の走行に対して与える影響を把握する。図1、図2に各地点における全被験者の走行速度平均値の推移、及び先行車の速度の推移状況を示す。各図中には縦断面方向の道路線形が把握できるように、道路の縦断面(標高)も示している。

まず、等速ケースと変速ケースの差異について比較する。緩サグ(図1)では両ケースともに62.5KP付近から減速が始まり、サグ底部・上り勾配が開始する付近に至るまで減速し続け、先行車両の速度を下回り、最終的に、上り勾配部分で加速に転じ、先行車両速度まで回復する過程が読み取れる。この傾向は、急サグ(図2)に関しても同様に読み取ることができる。これより、程度の大きさは異なるものの、緩サグ、急サグともに、本研究で用いたDSにより、先行車の走行挙動によらず、サグでの勾配変化が追従車の走行速度に影響を与えていることが確認できる。また、各ケースにおいて追従車両が速度回復を開始する地点(言い換えると、最低速度が観測される地点)に着目すると、緩サグ・急サグのコースを問わず、等速ケースの方がより上流側で速度回復が始まる傾向にあることがわかる。これは、先行車がサグの影響を受けない等速の場合、追従車が減速後、早い段階で先行車と

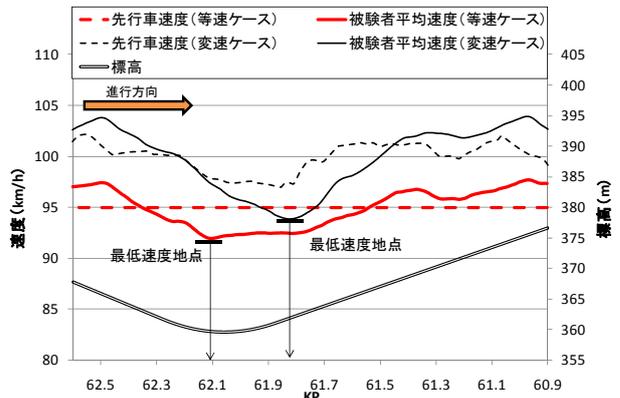


図1 緩サグ時の被験者平均速度推移

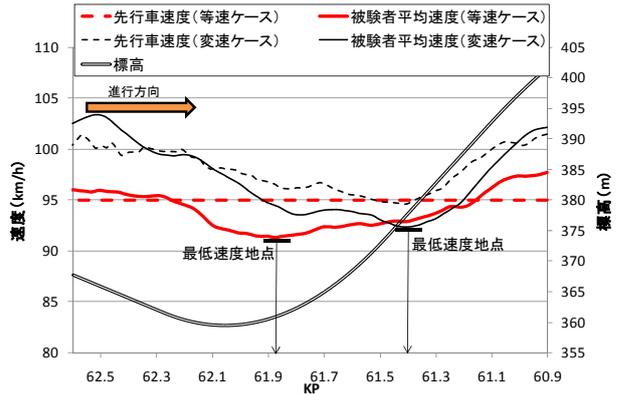


図2 急サグ時の被験者平均速度推移

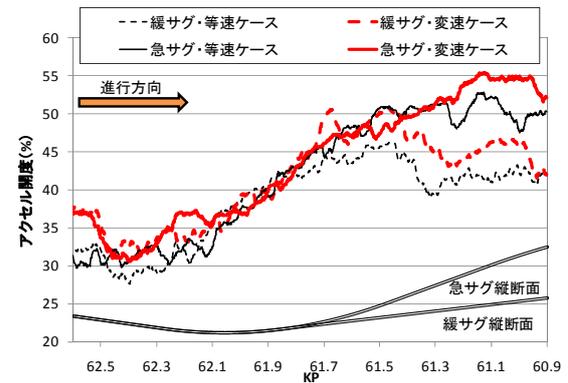


図3 被験者のアクセル開度平均の推移

の速度差が大きくなるため、より上流側で速度回復が開始されるものと考えられる。

次に、緩サグと急サグでの追従車両走行特性の差異に着目すると、いずれのケースについても、最低速度が観測される地点が緩サグより急サグの方がより下流側に位置し、かつ追従車の速度が先行車の速度を下回る状態が急サグの方が長く継続していることが読み取れる。

このことをより詳細に検証するため、図3に各地点におけるアクセル開度の被験者間平均の推移を示す。これより、62.1~61.7KPでは緩サグ・急サグを問わず、いずれのケースについても、アクセル開度の増加傾向がほぼ一定値であることが読み取れる。また、緩サグでは約45%のアクセル開度に至る61.6kpまで増加し続け、急サグではおよそ50~55%のアクセル開度に至る61.2kp程度まで増加し続け、その後、徐々に低下していく傾向にあるこ

とが分かる。これは、上り勾配の度合いによって加速に転じることが可能なアクセル開度が異なることを示唆している。すなわち、追従車速度が先行車のそれより相対的に低くなっていることを認知し、加速に転じるべくアクセルを踏み込む。ところが、上り勾配が急な程、加速するために必要なアクセル開度に至るまでにより長い時間を要するため、結果として、急サグの場合、緩サグとの比較で、低速度状態が長引いたものと考えられる。以上、上り勾配にて車両が加速に転じるまでの時間差のため、緩サグ・等速ケースを除き、平均速度が最低となる地点がサグの底部の下流側に位置する傾向が確認された。

4. 追従挙動モデルパラメータの推定方法

追従挙動特性を詳細に分析するため、DS 走行実験で得られた軌跡データに追従挙動モデルを適用し、道路線形・先行車挙動別にモデルパラメータを推定する。具体的には、表 1 に示した分析対象区間で取得された先行車、追従車の走行軌跡に基づき、追従挙動モデルのパラメータを推定する。この際、1 回の走行に対して 1 つのモデルパラメータを推定する。すなわち線形 3 種（緩サグ、急サグ、直線）、先行車挙動 2 種（等速、変速）の設定に対し、被験者 37 名が走行実験を行うため、計 222 (=3×2×37) 走行のデータが、パラメータ推定の対象となる。

4.1 追従モデルの選定

ケース間の差異の原因を明確化するため、既存の追従挙動モデルの中でも、モデルの構造がシンプルであり、パラメータの意味の物理的な解釈が比較的容易なものを選択する。こうした条件に見合う追従挙動モデルとして、式(1)に記す Helly モデル³⁾を適用する。

$$\ddot{x}_0(t + \Delta t) = a_1(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_0(t)) + a_2(x_1(t) - x_0(t)) + a_3 \quad (1)$$

ただし、 $\ddot{x}_0(t)$: 追従車の加速度、 $\dot{x}_0(t)$: 追従車の速度、 $x_0(t)$: 追従車の位置、 $\dot{x}_1(t)$: 先行車の速度、 $x_1(t)$: 先行車の位置、 t : 時刻、 Δt : 反応遅れ時間、 $a_i(i=1,2,3)$: パラメータ、を表す。右辺第一項の説明変数が相対速度、第二項が車間距離を各々意味するので、パラメータ a_1 、 a_2 はこれらに対する反応強度と解釈することができる。

4.2 追従モデルの推定方法

各時刻 t における加速度を従属変数、相対速度、車間距離を説明変数とし、最小二乗法によりパラメータを推定する。また、説明変数に対し従属変数を 0.1 秒から 3.0 秒まで 0.1 秒ずつ遅らせて推定を行い、決定係数が最大となるモデルを最適モデルとし、そのときの遅らせた時間を反応遅れ時間 Δt の推定値とする。

4.3 追従走行状態の判定

相対速度と車間距離を認知し加速度を調節するという Helly モデルのメカニズムに合致しない追従をする車両や、先行車を追従する意志がない車両についてはモデルの推定結果は意味をもたないと考えられる。追従挙動モデル

の分析に先立ち、以下の条件に該当する走行データは除外した。

条件 1 : 推定されたモデルの決定係数が 0.3 未満。

条件 2 : 車間距離を説明変数、相対速度を従属変数とする回帰モデルの決定係数が 0.9 以上。

条件 3 : 車頭時間が 3 秒以上の状態が 5 秒以上継続する。

条件 4 : 相対速度変動の極値が 1 つ以下。

条件 1 は Helly モデルの当てはまりの程度の確認、条件 2 は多重共線性の回避を目的としている。条件 3 は大きく車間距離が開いた走行を除外するための条件である。条件 4 は追従する意志を判定するものである。すなわち、追従状態とは先行車との相対関係を調節し走行する状態であると考え、相対速度が一方向的に増加・減少している場合、追従の意志がないと判断し除外した。その結果残った計 165 回分の走行データ (表 2) を用いて、追従モデルパラメータの推定を行い、その結果を比較する。

表 2 パラメータ推定に用いるデータ数の内訳

		線形			合計
		緩サグ	急サグ	直線	
先行車	等速	30	19	29	78
	変速	29	25	33	87
合計		59	44	62	165

5. 追従挙動モデルに基づく走行挙動特性分析

4. の手法で推定した結果を整理し、追従挙動モデルパラメータの道路線形・先行車挙動別の差異について考察を行う。具体的には、推定された相対速度パラメータ \hat{a}_1 、車間距離パラメータ \hat{a}_2 、反応遅れ時間 $\Delta \hat{t}$ に対し、それぞれ道路線形、及び先行車挙動を因子とする二元配置分散分析を行った。その結果を表 3~表 5、それぞれについて各水準におけるパラメータ平均値を図 4~図 6 に示す。

5.1 相対速度パラメータ a_1 について

表 3 より 5% 有意水準において道路線形が有意である一方、先行車挙動は非有意であり、運転者は先行車の挙動から有意な影響を受けることなく追従している可能性が高いといえる。また、交互作用も非有意であることから、道路線形の影響は先行車の挙動によらないといえる。

次に、図 4 に着目すると、いずれのケースに対しても直線コースのみが突出した値を示し、緩サグと急サグの間には大きな差が無いことが確認できる。この傾向は Bonferroni の多重比較によっても有意差が確認できる。この理由として、今回対象とした直線区間は -2.5% の緩い下り勾配であるため、一定量のアクセル入力に対してもサグの上り勾配区間より大きい加速が出力されることに起因すると考えられる。

5.2 車間距離パラメータ a_2 について

表 4 より道路線形については水準間に有意差である一方、先行車挙動については水準間に有意差は無いことが読み取れる。しかしながら、先行車と道路線形の交互作

表3 相対速度パラメータに関する分散分析結果

	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
先行車挙動	0.017	1	0.02	0.67	0.41
道路線形	0.53	2	0.26	10.6	0
先行車 * 道路線形	0.081	2	0.04	1.63	0.20
誤差	3.95	159	0.03		
総和	13.56	165			
修正総和	4.58	164			

$R^2 = 0.137$ (調整済み $R^2 = 0.110$)

表4 車間距離パラメータに関する分散分析結果

	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
先行車挙動	0.003	1	0.003	1.67	0.20
道路線形	0.028	2	0.014	8.10	0
先行車 * 道路線形	0.013	2	0.006	3.68	0.03
誤差	0.279	159	0.002		
総和	0.482	165			
修正総和	0.322	164			

$R^2 = 0.135$ (調整済み $R^2 = 0.107$)

表5 反応遅れ時間に関する分散分析結果

	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
先行車挙動	0.042	1	0.04	0.056	0.81
道路線形	9.58	2	4.79	6.38	0.002
先行車 * 道路線形	0.040	2	0.02	0.026	0.97
誤差	119.4	159	0.75		
総和	756.6	165			
修正総和	129.0	164			

$R^2 = 0.075$ (調整済み $R^2 = 0.045$)

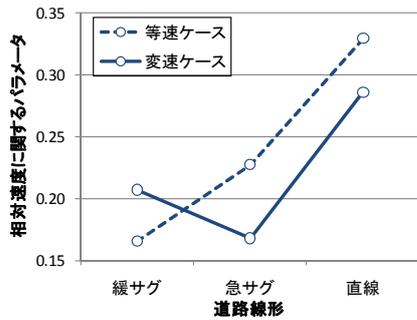


図4 相対速度パラメータ平均値の比較

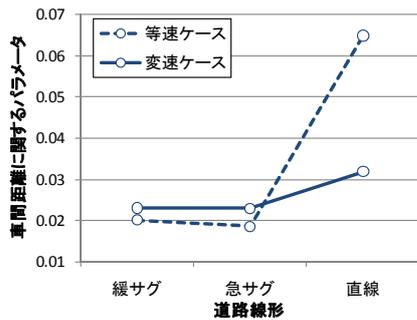


図5 車間距離パラメータ平均値の比較

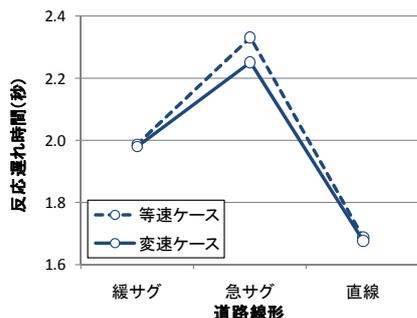


図6 反応遅れ時間平均値の比較

用も棄却され、先行車挙動と道路線形の組み合わせによってパラメータ平均値が異なることが示唆される。ここで、図5をみると、直線区間において等速ケースと変速ケースに乖離が生じていることが読み取れる。すなわち、直線区間の等速ケースでは、他の状況と比べて車間距離の変化に対して大きく反応する傾向があるといえる。

5.3 反応遅れ時間 Δt について

表5、図6より、反応遅れ時間に関しては、先行車挙動による差はほとんどなく、道路線形によって有意な差が生じていることが分かる。具体的には、直線区間で最も小さい反応時間を取り、続いて緩サグ、急サグの順に大きい値を取る。ここでの反応遅れ時間とは、運転者が相対速度、及び車間距離の変化を知覚してアクセル、もしくはブレーキ操作を行い、それが加減速度として反映されるまでの時間を意味する。図3からも伺えるように、サグの上り勾配部では加速するために必要なアクセル開度が大きいいため、その開度に至るまでの時間分だけ、反応遅れ時間が大きく推定されているものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、DSを用いて、3次元仮想空間での高速道路走行実験により取得した37名分の走行データを用いて、追従車走行挙動に対する道路線形の影響の検証を行った。その結果、被験者の追従挙動は先行車の挙動によらず、主に道路線形の違いによって有意に異なることが明らかとなった。特に、車両挙動に基づく追従挙動分析の結果より、サグ部では上り勾配の影響を受けて、相対速度や車間距離の変化に対する感度が小さく、かつ、反応遅れ時間が大きくなる傾向にあることが示された。また、反応遅れ時間と勾配の大きさとの関係性をアクセル開度に着目することによって指摘した。

今後は、縦断勾配と追従挙動特性の関係を定量的に把握し、サグ部での渋滞発生メカニズムを個々の車両挙動の観点で解明する必要がある。またその知見に基づき、渋滞の発生を軽減させるための道路設計基準やソフト的な施策の検討へ繋げていくことが求められる。

最後に、本研究の室内実験を行うにあたり、大阪大学工学研究科の山口将夫氏には多大なるご助力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

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, 660/IV-49, pp.39-51, 2000.
- 2) 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.
- 3) Hong, D., Uno, N., Kurauchi, F. and Imada, M. "Empirical Analysis of Drivers' Car-Following Heterogeneity based on Video Image Data", Proceedings of the 12th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies, pp.401-410, 2007.
- 4) 大口敬・飯田克弘, 高速道路サグにおける追従挙動特性解析におけるドライビング・シミュレータ技術の適用性, 交通工学 Vol.38, No.4, pp.41-50, 2003.