

実走実験とドライビングシミュレータを用いた室内実験によるサグ部の運転挙動分析

Analyses of Drivers' Behavior during Sag Sections

Based on the Results of Actual Driving Experiment and Indoor Driving Experiment

飯田 克弘^{*}・三木 隆史^{**}・森 康男^{***}・大口 敬^{****}・松本 晃一^{*****}

By Katsuhiro IIDA, Takashi MIKI, Yasuo MORI, Takashi OGUCHI and Koichi MATSUMOTO

1. はじめに

高速道路本線上の特定のサグにおいては、慢性的に渋滞が発生しており、その対策や緩和策を立てることが急務となっている。

これまでの研究では、サグにおける渋滞発生の原因の1つとして、ドライバーが無意識に速度を低下させる現象が指摘されている¹⁾。これは特定のサグにおいて、縦断勾配の変化への対応が遅れ、無意識のうちに速度が低下するという状態を示している。

ところが、このようにドライバーの運転行動仮説が提案されているにもかかわらず、サグにおける勾配変化の認知、速度低下の発生、そしてそれに対する回復行動までを一連の流れとして調査した事例はない。また、個々の運転行動変化の視点から渋滞発生原因の追求および渋滞抑制のための提案を行った研究事例も少なく²⁾³⁾、さらに、提案に対するドライバーの運転挙動に着目した効果の検証は、いずれの研究でも行われていない。

そこで本研究では、サグにおける運転挙動と道路構造との関連を分析することを目的として、ドライバーの速度、アクセル・ブレーキ使用量、心拍数、注視点変動に着目し、これらのデータを高速道路上での実走実験を通じて計測するとともに、行動変理由を事後のヒアリングにより調査した。そして、この分析結果と既往の研究での提案²⁾³⁾に基づいて、道路構造の改善方針を考察した。さらに、ドライビングシミュレータを用いた室内実験を行い、その再現性を確認した上で、この改善方針の効果を分析した。

2. 実走実験結果に基づく運転者行動の分析

キーワード：道路計画、交通行動分析

- ・ 正会員 博士(工) 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻
(〒565-0871 吹田市山田丘2-1, TEL/FAX:06-879-7611/7612)
- ・ 正会員 修士(工) 西日本旅客鉄道株式会社
- ・ 正会員 工博 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻
- ・ 正会員 博士(工) 東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻
- ・ 正会員 日本道路公団試験研究所交通環境研究部

(1) 実験概要

実験対象区間は、中央自動車道大月I.C.から上野原I.C.間とした(図-1)。この区間には中野・猿橋サグが存在するが、特に以下の点を選定理由とした。

- 1) 渋滞が多発している中野サグと、そうでない猿橋サグ⁴⁾とで運転挙動の比較を行うため。
- 2) 区間にI.C.やS.A.等が存在せず、交通量および車種構成の変化がないため。

なお走行は周辺交通の影響を考慮して、早朝の交通量の少ない時間帯(6:00~9:00)に行った。

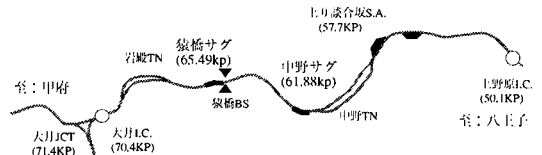


図-1 実験対象区間

さらに、実走実験終了後、それぞれの被験者に対して、運転行動記録(速度、アクセル・ブレーキ使用量の推移)とアイマークレコーダにより記録された前方ビデオ映像を提示してヒアリングを行い、勾配変化の認知を行った地点とその手掛かり、速度低下、アクセル使用増加の理由などを調査した。なお、表-1に本研究で使用する主な語句の定義を示す。

表-1 本研究で使用する主な語句の定義

速度低下：底部直近上流で速度が連続的に5km/h以上低下した場合を指す。
速度低下開始地点：速度低下が開始した地点のサグ底部を原点とした相対的距離(正の方向が下流側)。
速度低下量：速度低下開始地点から最も速度が低下した地点までの低下量。
アクセル使用増加：速度低下後にアクセル使用量が連続的に5%以上増加した場合を指す。
アクセル使用増加開始地点：アクセル使用増加が開始した地点のサグ底部を原点とした相対的距離(正の方向が下流側)。
アクセル使用増加量：アクセル使用量が再び減少に転じるまでの増加量。
勾配変化認知地点：被験者が縦断線形の下りから上りへの変化したと判断した地点のサグ底部を原点とした相対的距離(正の方向が下流側)。

また以上の一連の実験結果を統合した例を図-2に示す。なお実験期間は、平成10年10月26日から10月30日であり、被験者は免許取得後1年以上経過している男子学生10名とした。

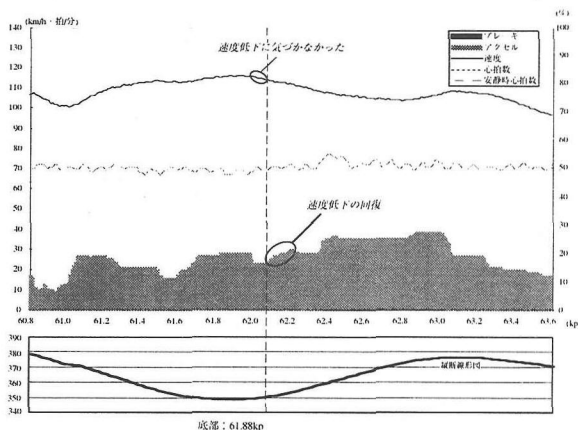


図-2 実験結果の統合図（下り中野サグ）

(2) 周辺走行車両の影響分析

運転挙動と道路構造との関連を分析するためには、実走実験で得られた運転行動のデータを、周辺走行車両の影響の有無によって分類する必要がある。

そこでまず、ヒアリング調査結果から、速度低下およびアクセル使用増加について、周辺走行車両の影響を理由として挙げたサンプルを「周辺走行車両の影響有り」、それ以外のサンプルを「周辺走行車両の影響無し」、という2つのグループに分類した。

次に、このグループ間での行動結果を比較することで、分類の妥当性を検証するとともに、その差の程度を把握した。表-2は速度低下開始時点において注視対象物が周辺走行車両であった場合とそうでない場合のサンプル数を、表-3はサグ底部付近における速度低下量および、縦断曲線区間における周辺走行車両への注視時間の総注視時間に占める割合を示している。ただし本研究では、視線の移動速度から視線運動をサッケード（高速の視線移動運動）とそうでないものに分離し、視線運動がサッケードでなければ注視していると定義する。なお、視線運動の閾値としては、10deg/secの値を採用している⁹⁾。

この結果、いずれの場合においても、これらのグ

表-2 速度低下開始時点における注視対象物

		注視対象物		合計
		周辺走行車両	周辺走行車両以外	
グループ	影響有り	11	4	15
	影響無し	5	17	22
合計		16	21	37

Fisher's Exact test (両側) = 5.88E-03 < 0.05 (有意水準5%)

表-3 グループ別速度低下量・注視時間割合の平均値

		速度低下量(km/h)	注視時間割合(%)
グループ	影響有り	12.00	51.7%
	影響無し	8.14	16.9%

ループ間で、5%の有意水準で差が認められた。この他、アクセル使用増加時点における注視対象物と車頭時間についても、それぞれ有意差が認められた。

以上の結果から、周辺走行車両の影響が明らかにできたとともに、ヒアリング調査に基づく分類の妥当性が示されたと考えることができる。なお以降の分析では、周辺走行車両の影響を受けなかったサンプルについてのみ扱うこととする。

(3) サグ間での行動結果の比較

サグ間での運転挙動の違いを分析した。表-4に、各被験者の運転行動結果の平均値をサグごとに示す。

表-4 各サグでの運転行動結果の比較

	下り中野サグ	下り猿橋サグ
勾配変化認知地点(km)	0.26	0.18
速度低下開始地点(km)	-0.30	-0.10
アクセル使用増加開始地点(km)	-0.08	0.14
速度低下量(km/h)	9.0	6.8
アクセル使用増加量(%)	16.2	8.0
	上り猿橋サグ	上り中野サグ
勾配変化認知地点(km)	0.18	0.24
速度低下開始地点(km)	-0.54	-0.34
アクセル使用増加開始地点(km)	-0.14	0.01
速度低下量(km/h)	6.3	10.3
アクセル使用増加量(%)	8.2	11.0

この結果から、勾配変化認知地点は全て、サグ底部の下流側へ遅れてた地点であることが分かる。これは、実験を行った全てのサグで縦断曲線半径が大きい ($r > 10,000\text{m}$) ため、既往の研究で言う勾配変化の認知遅れが発生したものと考えられる²⁾。また、速度低下は全て上流側で発生した。しかしこれらの項目からは、サグ間で有意な差は認められなかった。

次に、前方の視認性の良否と、勾配変化認知およびアクセル使用増加行動との関係について分析を行った。具体的には、まずサグ区間の上流から底部までの区間において、視認性を悪化させる要素として考えられる道路隣接切土法面、遮音壁、山の斜面などの近景の構造物(道路隣接要素)への注視時間が全注視時間に占める割合を求める。この注視時間割合と勾配変化認知地点、およびアクセル使用増加開始地点との相関係数を求めて、これらの構造物への注視行動がサグの認知・判断挙動へ与える影響を調べた。結果を表-5に示す。

この結果から、中野サグでは上下線ともに、これ

表-5 道路隣接要素への注視時間割合と各地点との相関係数

	下り中野サグ	下り猿橋サグ
勾配変化認知地点	0.914	-0.675
アクセル使用増加開始地点	0.706	0.140
	上り猿橋サグ	上り中野サグ
勾配変化認知地点	-0.051	0.123
アクセル使用増加開始地点	-0.087	0.822

注) 網掛け部は無相関の仮説が棄却されなかったデータ

らの要素への注視時間割合が高いほどが、勾配変化認知地点やアクセル使用増加開始地点が、下流側へ遅れることが分かった。これは、中野サグは上下線ともに、進行方向の見通しを悪化させる要素の影響が強いことを示している。

(4) 道路構造の影響による運転挙動変化の把握

これまでの分析結果から、サグにおけるドライバーの運転挙動について、図-3に示す流れを把握することができた。これは既往の研究で指摘されている仮説を概ね表す結果となったが、意図した減速と無意識の減速を分離して分析した事例はこれまでになく、今回行ったヒアリング調査によって得られた知見であると考えられる。そこで無意識の速度低下と意図した速度低下それぞれのデータ群について、速度低下量と速度低下の継続時間で回帰を行った(図-4)。これをみると、無意識の速度低下は、意図した速度低下と比較して、単位時間当たりの低下量が大いという傾向を読み取ることができる。

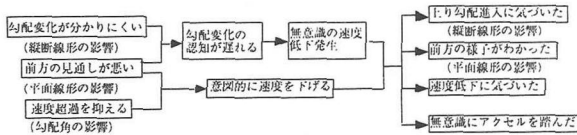


図-3 運転行動変化の流れ

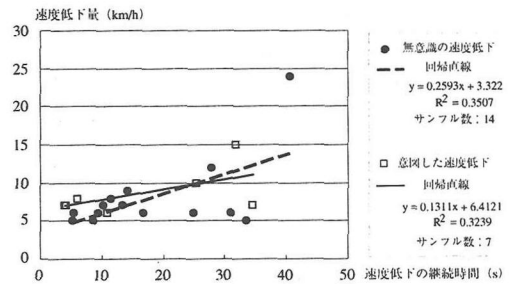


図-4 速度低下に対する意識の違いによる低下量の違い

3. 道路構造改善方針の考察

以上の結果から、サグにおける勾配変化認知遅れによる速度低下は、縦断線形の影響と前方の見通しの良否に影響を受けると考察した。

そこで、サグにおける道路構造改善方針としては、

- 1) 縦断曲線半径を設計基準値まで小さくし、勾配変化認知を促す。
- 2) 前方の見通しを悪化させる要素を取り除き、視界を拡大することで、勾配変化認知を促す。

の2点が有効であると考えた。

4. 室内実験による改善方針の評価

(1) 実験システム

本研究で用いた室内実験システムの構成を図-5に示す。データおよび操作の流れは以下の通りである。

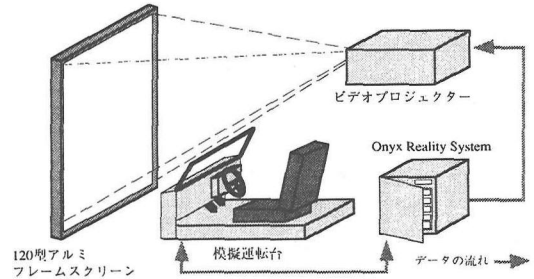


図-5 実験システムの構成図

- 1) ワークステーションで生成された仮想空間CGが、スクリーンに映し出される。
- 2) 映し出された画像に対する操作者の反応(アクセル使用、ブレーキ使用、ハンドル操作)が、模擬運転台を通じて入力される。
- 3) 運転台からの入力情報によって、CGの生成を制御する。このとき運転台の速度計には、CGの生成レートを速度換算した値が表示される。

ここで、加減速度については、空気抵抗や路面抵抗だけでなく、縦断線形に応じて自転車にかかる重力加速度の影響も考慮している。また走行音も出力しているが、現状では速度や周辺状況に応じた音響の変化は再現していない。

(2) 実験区間

実験対象区間は、実走実験区間のうち、上り線の猿橋および中野サグを含む区間とした。さらに、中野サグで渋滞が頻発していることを考慮して、上述した改善方針を中野サグに適用し、運転挙動の相対変化を調査することを目的とした。ただし、以下の分析において猿橋サグおよび中野サグは図-6の定義に従うものとする。

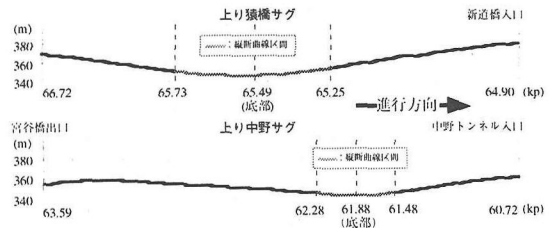


図-6 室内実験における猿橋サグ・中野サグの定義

(3) 被験者と測定項目

被験者は、実走実験経験者 10 名を含む 35 名である。また調査項目は実走実験と同様とした。なお速度、アクセル使用量、ブレーキ使用量は実験走行ごとにワークステーションに自動的に記録することができる。

(4) 室内実験における行動再現性評価

筆者らは高速道路単路部およびトンネル進入部において、既に室内実験の再現性を確認しているが⁶⁾、本研究では縦断方向の加減速度が強く影響するため、あらためて再現性を評価した。

まず、それぞれのサグにいて、速度、アクセル使用量、心拍数の区間平均値を求めた。そしてこの平均値が等しいことを帰無仮説として、ウィルコクソンの順位和検定（有意水準 5%）を行った（表-6）。これより、アクセル使用量に関してのみ帰無仮説が棄却された。これは、アクセルペダルの重さが実車と多少異なることが関係していると推察できる。なお、これ以外については、帰無仮説が棄却されず、実験間での違いがあるとは言えない結果となった。

表-6 測定項目の平均値と有意差検定結果

		猿橋サグ		中野サグ	
		実走実験	室内実験	実走実験	室内実験
速度 (km/h)	平均値	98.7	102.2	98.3	105.1
	検定統計量(W)	42		46	
アクセル使用量 (%)	平均値	17.3	41.3	18.7	43.7
	検定統計量(W)	57		57	
心拍数 (拍/分)	平均値	70.2	69.7	77.3	67.4
	検定統計量(W)	39		32	
ウィルコクソン検定値		26	52	26	52

$W \leq W_c$ もしくは $W \geq W_c$ の場合に帰無仮説を棄却する（網掛け部）

次に、上記のデータの推移を比較するために、測定値を 10m ごとの平均値に換算した値を用いて相関係数を求めた（表-7）。この結果、心拍数変動の推移に関しては無相関の仮説が棄却されず、猿橋サグの速度の推移で矛盾が見られたが、それ以外の速度の推移、アクセル使用量の推移に関しては、室内実験と実走実験で関連性を示すことができた。ここで猿橋サグにおいて、アクセル使用量推移の相関が高いにもかかわらず速度推移の相関に矛盾が生じたのは、区間の起点がすでに下り勾配に入っていたことが原因として考えられる。今回はワークステーションの性能限界のため連続する 6km 区間の CG しか作成できておらず、今後の課題として CG 区間を調整し、猿橋サグにおける再現性を検討しなければならない。

(5) 改善方針の有効性評価

上述した改善方針の具体的な内容を以下に示す。

- 1) 縦断曲線半径を、現状の $r=11,594\text{m}$ から設計基準値である $r=2,000\text{m}$ に変更する

表-7 測定項目の推移と相関係数

		速度	アクセル使用量	心拍数	t 値
猿橋サグ	相関係数	-0.18	0.85	0.02	1.97
	検定統計量 T	-2.71	23.84	0.33	
中野サグ	相関係数	0.51	0.90	-0.02	1.97
	検定統計量 T	9.88	35.00	-0.31	

$|T| < t$ の場合、無相関の帰無仮説が棄却されない（網掛け部）

表-8 室内実験における運転行動のデータの平均値

	現状再現	縦断変更	見通し変更
速度低下開始地点 (km)	-0.32	-0.25	-0.34
速度低下量 (km/h)	16.6	17.8	16.4
アクセル使用増加地点 (km)	0.02	0.00	-0.03
反応遅れ距離 (km)	0.34	0.25	0.30

注) 網掛けは改善効果の見られた部分

- 2) 隣接する切土法面、防音壁、山の斜面を取り除く
中野サグに適用した改善方針の有効性を評価するために、運転挙動のデータを比較した。表-8 は、各サグにおけるそれぞれの運転行動変化のデータの平均値である。ここで反応遅れ距離とは、速度低下が発生してからアクセルを踏むまでの距離である。

この結果、反応遅れ距離やアクセル使用増加地点は、いずれの方針でもその平均値がわずかに小さくなっていることが分かった。

5. まとめ

本研究では、まず実走実験とその結果に対するヒアリングによって、サグ部における運転者一連の行動を調査した。そしてその結果および既往の研究に基づいて提案されたサグ部の道路構造改善方針について、室内実験によりその効果を評価した。

今後は、まず実験システムについて、その操作性をより向上させる必要がある。その上で縦断曲線半径を段階的に変化させた代替案を作成して追加実験を行い、その感度を分析すると同時にサンプル数を充実させることが必要である。

参考文献

- 1) 越 正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文集，第 371 号，pp.1-7，1986。
- 2) 越 正毅・大口 敬：高速道路サグにおける渋滞とその対策，道路，pp.65-69，1995。
- 3) 藤原 寛史・越 正毅：首都高速道路のサグ部および曲線部におけるドライバーの運転挙動に関する研究，第 17 回交通工学研究発表会論文報告集，pp.85-88，1997。
- 4) 社団法人 交通工学研究会：高速道路の交通容量に関する調査検討報告書，1998。
- 5) 福田良子，佐久間美能留，中村悦夫，福田忠彦：注視点の定義に関する実験的検討，人間工学，Vol.32，No.4，197-204，1996。
- 6) 飯田克弘・森 康男・金 鍾受・池田武司・三木隆史：バーチャリアリティシミュレーションによる室内実験システムの構築とその再現性検討，土木計画学研究・講演集，No.21(1)，pp.507-510，1998。