

ドライビングシミュレータを用いた 高速道路サグ部の追従挙動解析に向けた実験設計

伏屋 和晃¹・葛西 誠²・寺部 慎太郎³

¹非会員 東京理科大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒270-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail:j7611630@ed.noda.tus.ac.jp

²正会員 東京理科大学 理工学部 土木工学科 助教 (〒270-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail:kasai@rs.noda.tus.ac.jp

³正会員 東京理科大学 理工学部 土木工学科 准教授 (〒270-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail:terabe@rs.noda.tus.ac.jp

高速道路単路部における渋滞発生は、道路幾何構造の交通流に対する何らかの影響により、交通容量を低下させることによるものと考えられている。こうしたボトルネック現象の要因とされている、減速波発生および上流増幅伝播の交通流に与える影響を確認するため、実挙動観測では不可能な「過去の見解に基づいた実験条件の設定」を可能にするドライビングシミュレータによって、減速波を模擬した実験条件を作成する。そして、交通流率を増幅伝播の指標として分析することで、幾何構造によって交通流率に差異があるか否かを判断する。結論として、こうした制御された実験が渋滞原因の特定に寄与する可能性を秘めていることに言及する。

Key Words : *traffic flow, car-following behavior, bottleneck phenomena, driving simulator*

1. はじめに

高速道路単路部における主な渋滞発生箇所として、サグやトンネル入り口等が知られている¹⁾²⁾。これらの箇所では、道路幾何構造が交通流に何らかの影響を及ぼし、交通容量を低下させていると考えられている。こうした容量低下はボトルネック現象と呼ばれており、ボトルネックが形成される理由としては、サグ上り坂での無意識の速度低下が減速波として上流方向に増幅伝播することが考えられる¹⁾²⁾と説明されている。しかしながら、サグ部上流の下り坂における車両間の速度のばらつきが交通流中の速度の乱れを生み、減速波の発生を招いているとの観測に基づいた仮説も提示されており³⁾、必ずしも上り坂での速度低下が容量低下の本質ではないものと思われる。さらに、事故渋滞の伴う渋滞流が形成され、事故処理後渋滞先頭が上流に遷移しある特定のサグに留まる「定着現象」⁴⁾も良く知られるようになったが、これによれば、そもそも速度低下が容量を低下させるのではなく渋滞先頭からの緩慢な加速が容量低下の本質ではないかとも思われる。

この渋滞メカニズムの解明を行うためには、渋滞が追

従挙動の累積から発生するという知見を踏まえ、一對の車車間（先行車—追従車）の追従挙動を説明できる追従モデルの構築²⁾⁵⁾⁶⁾、さらに、交通流と道路幾何構造の関係性に踏み込む必要があるとされている⁵⁾⁷⁾。しかし、これを進める上で前提となる走行挙動データの取得において、実観測は、多大な労力を要する上、時空間的に十分な大きさの個々の車両の実挙動データの取得が困難であること、車両属性構成比や気象等の外的要因によって乱されていることなどの理由から、渋滞解明に繋げることのできる有用なデータ取得が困難であったことも事実である。このことから、追従挙動と幾何構造との関係については精査が不十分であり、未だ、ボトルネック形成のメカニズムについては統一的な見解を共有するに至っていないのが現状である⁵⁾。

したがって、困難な実交通流中での挙動観測データ取得に代わり、ドライビングシミュレータ（以下 DS）による追従挙動データ取得も、現実感との乖離など留意すべき点はあるが有用と考えられるところであり、交通流現象の解析にも活用された例がある⁹⁾¹⁰⁾。特に、周辺環境の制御が可能であり、余分な外的要因を排除できる点は、上記のようなボトルネック現象に対する様々な仮説

を比較できる点で極めて優れた特徴を有すると期待される。

したがって、本研究の目的は以下の3点に要約できる：1) DSを用いて追従挙動解析に堪えうるデータが取得できるか否かを判断するため、渋滞発生時に生じるとされる減速波伝播を模擬した実験条件を策定する、2) その上で、減速波増幅伝播現象が確認できるかを交通流率を指標として判断する、3) 幾何構造によって交通流率に差異があるか否かを判断する。

2. 実験概要

(1) 道路線形数値の設定

本実験はDSを用いて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。著名なボトルネックである東北道下り羽生PA付近のサグ部を模した全長約5000mで下り-0.5%から上り1.5%のサグを作成する。なお、走行開始から、被験者の希望車間距離に到達し、安定した追従走行に至った上で、サグでの挙動検証を行うため、縦断・平面線形が共に直線である約2000mの助走区間を設ける。

(2) 先行車挙動の設定

人工的に減速波を発生させ、減速波に巻き込まれた後の挙動がどうかを観察する。そのために先行車の挙動データを設定し、追従車の挙動を解析する。先行車挙動データ設定の考え方について、以下に述べる。まず、一般的に考えられている渋滞発生メカニズムを見つめる¹²⁾。まず、サグ下流域(上り坂部)で、ある車両に無意識の減速が生じる。そして、サグ中流域(サグ底部)、サグ上流域(下り坂)へと、減速幅を拡大させながら、減速波の増幅伝播が生じ、最終的に低速度域でほぼ完全停止を強いられ、ここに大きな車群が到着すると渋滞に至るとされる。図-2はこれを模式的に描いたものである。以下では、説明の簡略化のため、最初に発生する減速を「減速波初期」、中流域に伝播した減速を「減速波中期」、上流域まで伝播し、渋滞に至る直前の減速を「減速波末期」と呼ぶ。

表-1 先行車挙動設定数値

	減速前速度 (km/h)	減速時加速度 (m/s ²)	最低速度 (km/h)	加速時加速度 (m/s ²)	加速後速度 (km/h)
減速初期	87.5	-0.7	72.0	0.5	87.5
減速中期	87.5	-1.5	56.0	1.0	87.5
減速末期	87.5	-3.5	41.5	1.0	87.5

仮に、上り坂での速度低下が渋滞の原因であるならば、減速波の「自然発生」が容量低下の本質であることになる。したがって、上り坂(サグ下流)で人為的に減速波を発生させた状態、同様に下り坂(サグ上流)で減速波を発生させた状態を想定しよう。これらはそれぞれ、先行車挙動データとして、上り坂(サグ下流)で減速した場合、下り坂(サグ上流)で減速した場合に対応する。仮に、これら2つの場合で追従挙動に有意な差があれば、少なくとも減速波の「自然発生」だけでは容量低下は説明できない可能性が高いことを意味するだろう。この場合、減速波の「増幅伝播」の様子が異なることが、容量低下の原因であることの状況証拠となる。

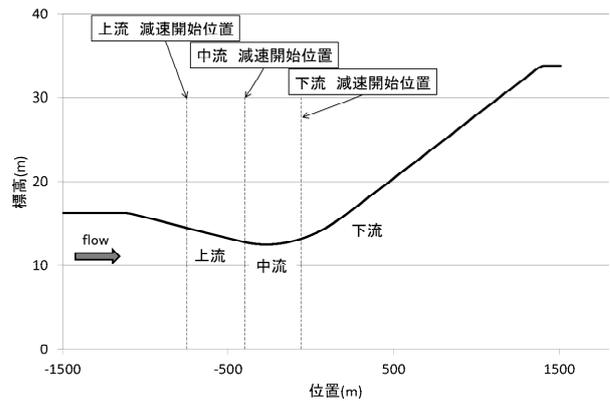


図-1 実験で走行する道路の縦断線形

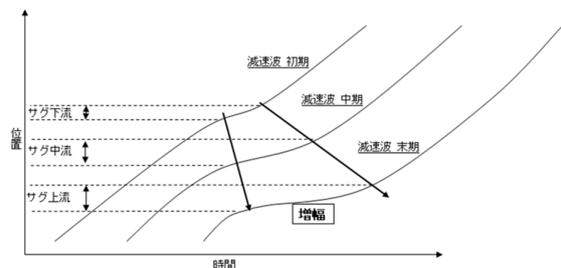


図-2 減速波の伝播過程の模式図 (Time-space 図)

■ 減速波初期 ■ 減速波中期 ■ 減速波末期

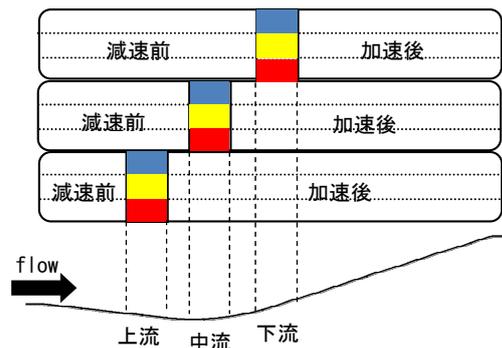


図-3 先行車挙動設定パターン

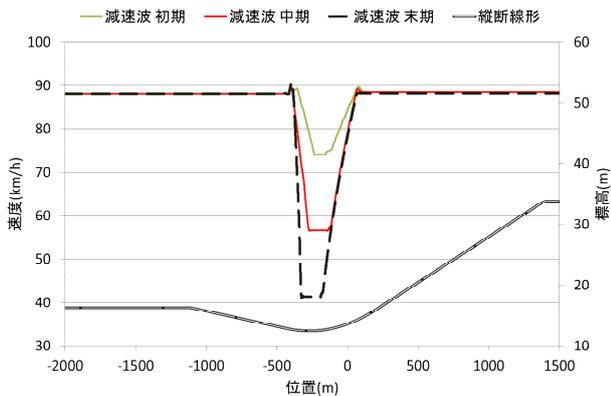


図-4 先行車の減速パターン（サグ中流部）



図-5 先行車および追越車線車両の様子

このことを踏まえ、先行車データとして、以下の 3×3=9 通りの先行車データを設定する（図-3）。減速波の度合いが軽度のもの（減速波初期），中程度のもの（減速波中期），大きいもの（減速波末期），の3種類，さらにその減速が，サグ下流，中流，上流それぞれで発生する場合，である。ここで，3種類の減速パターンの速度，加速度の設定数値を表-1 に，サグ中流に発生させた3種類の減速パターンの位置—速度図を，図-4に示す。

(3) 追越車線の車両の設定

被験者に対する距離感の目安，および実走行の感覚に近づけるため，追越車線に複数台の車両を表示させる。一定車間距離 60m で，追越車線に 85km/h の等速での走行を続ける車群を形成させる。運転者の視点で見た，周辺環境の様子を図-5に示す。

(4) 作成した減速シナリオでの追従走行試験

以上の設定に基づき，被験者 5 名（4 名学生，1 名教員，全員男性）を対象として，追従走行試験を行う。各

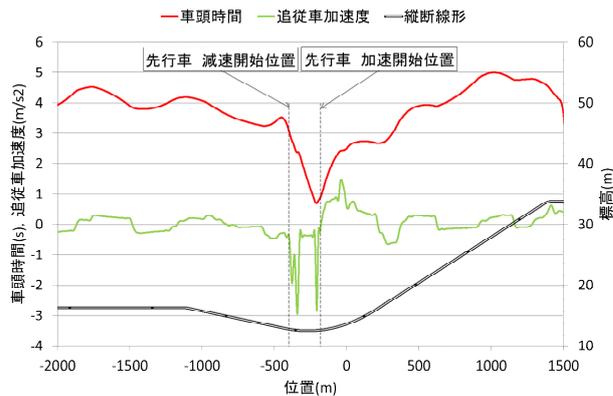


図-6 サグ中流での減速末期における車頭時間，追従車加速度推移

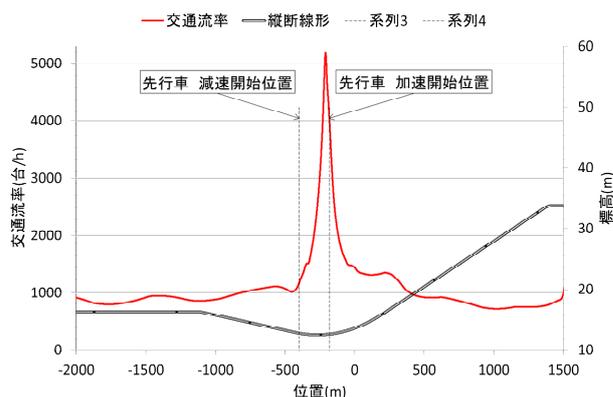


図-7 縦断勾配変化による交通流率の推移

被験者に対し，サグ上流・中流・下流それぞれに対し，減速初期・中期・末期のシナリオを計 9 パターンを走行させ，計 45 回分の走行挙動データが取得される。

3. 先行車減速挙動の追従挙動への影響

各被験者による走行で得られる，先行車と追従車の挙動データから，サグ中流で先行車に減速末期を発生させた際の車頭時間と追従車加速度の勾配変化による推移を図-6に示す。

取得されたデータから，先行車と追従車の車間距離を求め，この車間距離を追従車加速度で除したものを車頭時間(s)とし，この車頭時間の逆数を取り，毎時に換算したものを交通流率（1 時間フローレート）(台/h)と定義する。この交通流率は断面で定義された量ではないので，厳密に言えば交通容量の大小を判断するのに適切ではないが，容量の代理指標として用いることとする。ここで，

図-6 における勾配変化に伴う車頭時間推移から求めた交通流率の推移を図-7 に示す。

追従車挙動の特徴として、先行車の減速に伴う減速区間を抜け、加速に転じた後に車頭時間は増加する傾向にある。そして、上り坂でその交通流率の低下が顕著となる走行が確認される。

この交通流率の低下はこの地点における交通容量の低下を意味すると考えられる。

ここで、本実験の分析パターンおよびその模式図を示す。

1) 幾何構造の違いによる加速後の交通流率の比較

幾何構造が加速波面下流での加速の良し悪しに影響をしているかどうかを分析する。

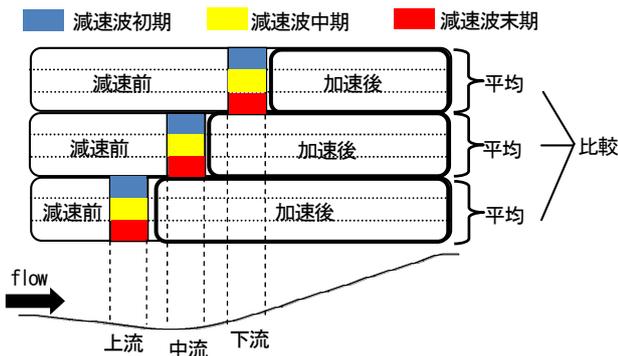


図-8 加速後交通流率の比較の模式図

2) 幾何構造の違いによる減速前後の交通流率の比較

上流に対して交通容量は低下するか（ボトルネックとなり得るか）を検証する。

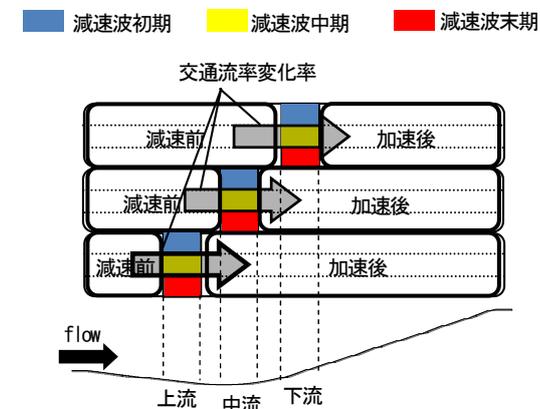


図-9 交通流率の変化率算出の模式図

3) 減速の度合いの違いによる交通流率の比較

減速の度合いによって、加速後の流率が異なるかどうかを検証する。

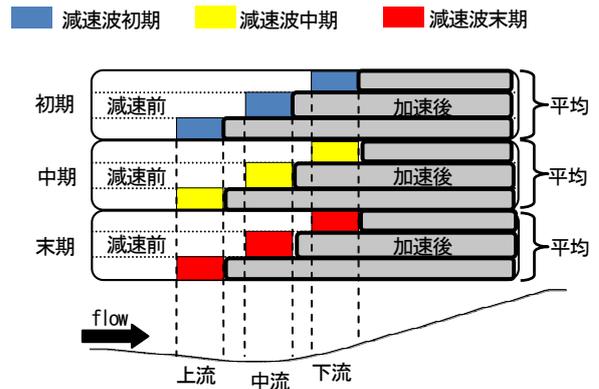


図-10 減速度合いの比較の模式図

4) 減速の度合いの違いによる、減速前後での交通流率の比較

減速の度合いによって、交通容量の低下は異なるかを検証する。

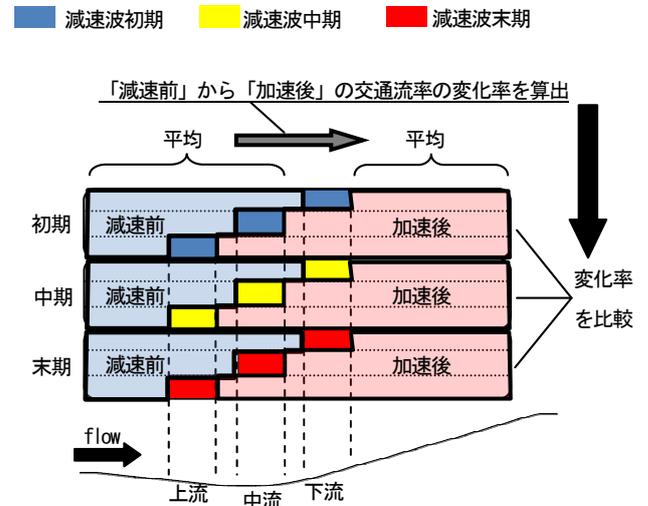


図-11 減速度合いによる交通流率変化率比較の模式図

(1) 先行車減速位置による追従挙動の差異

a) 先行車加速後の交通流率

先行車の減速挙動の発生位置の違いによる追従挙動および交通流への影響の差異を調べることで、道路幾何構造による影響を検証する。

減速区間を抜けた後の、加速後の交通流率を求める。まず、図-13 のように減速終了後の加速開始からサグ終端までの交通流率の位置に対する連続量の平均値を各被験者の全ての走行データで算出する。そして、このデータを減速位置が上流・中流・下流の3パターンに分類し、それぞれのパターンでの平均値を求める。

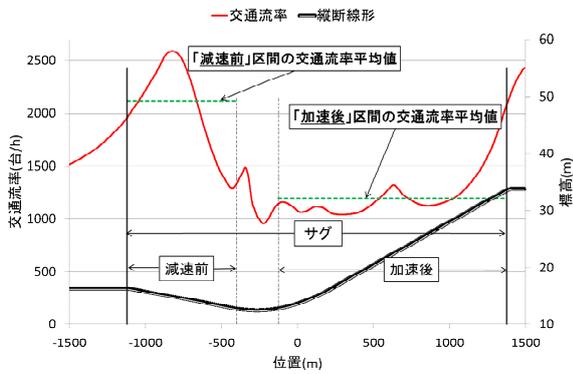


図-12 平均交通流率の算出方法

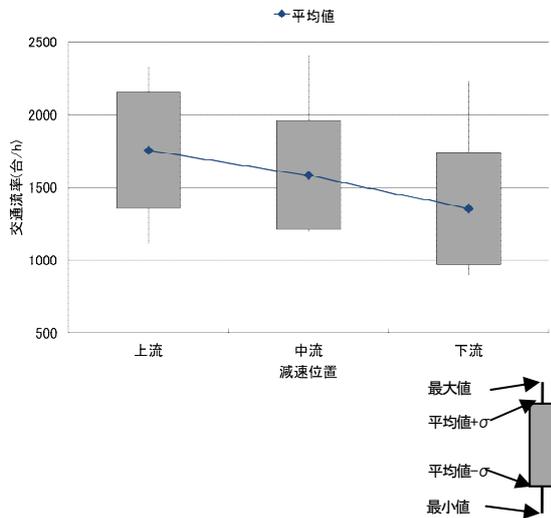


図-13 先行車減速位置による加速後の交通流率

表-2 減速位置による加速後交通流率の差の検定

	自由度	t値	有意確率	判定
上流-中流	14	1.24	0.236	
上流-下流	14	3.01	0.009	***
中流-下流	14	1.70	0.111	

*** : 1%有意

** : 5%有意

* : 10%有意

これによって、減速位置の違いによる加速後の交通流率の違いを把握する。ここで、減速位置別の加速後交通流率を図-13に示す。

図-13によると、先行車の減速位置によって、その後の交通流率に差が生じることが分かる。そして、上流、中流の順に交通流率が低く、下流での減速が最も加速後の交通流率を低い値にした。これは、上流での減速では、負の勾配での速度回復が容易であり、車頭時間を小さい値に保つことができたことが、交通流率を高い値で維持できた要因と考えられる。また、サグ底部中流での減速も、減速上流ほどの速度回復は困難であるものの、縦断

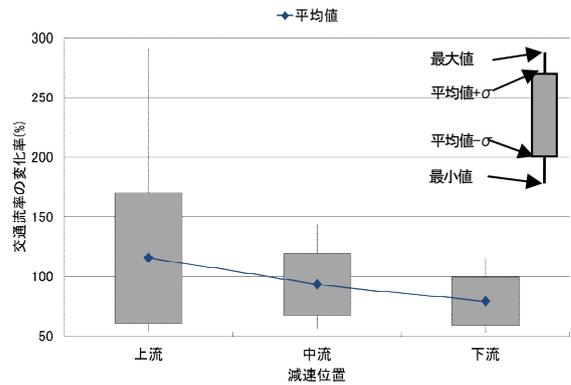


図-14 減速位置による交通流率の変化率

表-3 減速波通過による交通流率変化率の差の検定

	自由度	t値	有意確率	判定
上流-中流	14	0.981	0.171	
上流-下流	14	2.47	0.0271	**
中流-下流	14	1.72	0.107	

*** : 1%有意

** : 5%有意

* : 10%有意

曲線区間での加速であり、比較的容易に加速がなされた結果であると考えられる。これらに対し、下流での減速は、その後の正の勾配度での速度回復、先行車の加速への対応が困難となったためと推察できる。

この3つの値で、母平均の平均値の差の検定を行うと表-2の結果を得る。これを見ると、先行車減速位置が上流の場合と中流の場合および中流の場合と下流の場合では加速後の交通流率には有意な差は見られないが、上流の場合と下流の場合で、1%有意の差が見られる。これは、サグ下流での減速が上流でのそれと比較して、著しく加速後の挙動に影響を与えることを示しており、サグ下流での減速が渋滞発生に繋がり得ることを示唆する結果である。

b) 減速前と加速後の交通流率の変化

先行車の各減速位置において、減速前の平均交通流率を a)と同様の方法で算出する(図-12)。そして、a)で既に求められた加速後の平均交通流率を減速前の平均交通流率で除し、交通流率の変化率を求めることで、先行車の減速挙動によって、交通流率がどう変化するかを減速位置別に検証する。この変化率を示したグラフを図-14に示す。

図-14より、上流での減速のみで、加速後の交通流率の増加が確認されるが、中流、下流ではともに、減速区間を抜けてから、減少している。特に、下流での減速シナリオにおいては、80%以下に減少する。上流での減速

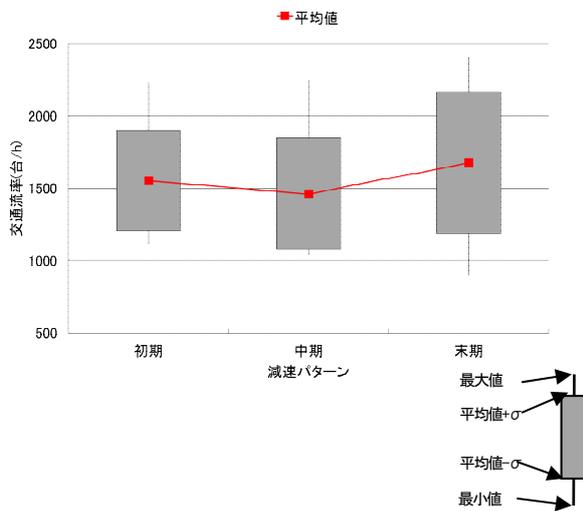


図-15 減速パターンによる加速後の交通流率

表-4 減速度合いによる加速後交通流率の差の検定

	自由度	t値	有意確率	判定
初期-中期	14	0.671	0.513	
初期-末期	14	0.815	0.429	
中期-末期	14	1.36	0.197	

*** : 1%有意

** : 5%有意

* : 10%有意

については、負の勾配での加速となり、速度回復の容易さから、その後の交通流には影響を与えないと考えられる。しかし、これに対して、下流での減速では、加速後の交通流率の変化が大きく、負の影響が強い。母平均の平均値の差の検定結果(表-3)を見ても、減速位置が上流と中流、および中流と下流では有意な差は見られないが、上流の場合と下流の場合の値の差は5%有意となる。このことから、両シナリオ間では、追従車に与える影響として明らかな差が生じ、下流での減速は交通流率の低下をもたらすことを示している。

(2) 減速パターンによる追従挙動の差異

先行車の減速パターン(減速波初期、中期、末期)による追従挙動の差異を検証を行ってみる。各被験者の走行シナリオごとに算出した先行車加速後の平均交通流率を、減速初期、中期、末期で分類し、それぞれの平均値を算出した。減速パターンによる先行車加速後の交通流率を図-15に示す。

図-15を見ると、加速後の交通流率が最も高くなるのが減速末期、次が、減速初期で、最も加速後の交通流率が低いのが、中期の減速パターンという結果となった。しかし、それぞれの値の母平均の平均値の差の検定結果を示した表-4を見ると、どの組み合わせについても有

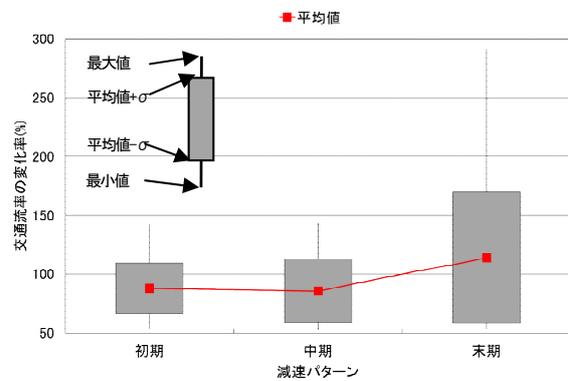


図-16 減速パターンによる交通流率の変化率

表-5 減速波通過による交通流率変化率の差の検定

	自由度	t値	有意確率	判定
初期-中期	14	0.265	0.795	
初期-末期	14	1.69	0.114	
中期-末期	14	1.79	0.0955	***

*** : 1%有意

** : 5%有意

* : 10%有意

意な差は見られない。ここで、加速後の交通流率の変化率(加速後の交通流率/減速前の交通流率)を算出し、減速パターンごとに平均値を求め整理したもの、およびそれぞれの値の母平均の平均値の差の検定結果を図-16、表-5に示す。これを見ると、初期と中期、初期と末期では有意な差は見られないが、中期と末期に10%の有意な差が見られる。このことから、減速波中期には末期に比べ、加速後の交通流率を下落させる要素が存在するといえる。この要素を明らかにするのは、今後の課題とするが、走行後に行った被験者への質問では、減速中期パターンは中途半端な減速であることから、加速時に再度先行車の減速が生じるのではないかと、迷いが起きやすいという感想も得られており、以上のことから、減速パターンの比較では、中程度の減速がその後の加速を最も困難にし、交通流率を低下させる傾向があることが分かる。

4. おわりに

本実験では、DSを用いて、周辺環境を設定し、道路線形要素および先行車以外の自車の走行に影響を与える要因を排除した上で、先行車挙動を既往研究の減速波伝播の見解に基づいて9シナリオ設定し、追従挙動の分析を行った。

結果として、先行車の減速位置、減速パターンそれぞ

れにおいて、いくつか有意な差が確認された。

・減速区間を抜けた後の加速後交通流率は下流のサグ上り坂での減速パターンが最も低い値となり、さらに、減速前から加速後に交通流率が最も下落する結果となった。これは、上り坂での加速によっては、減速波を増大させる要素を含むことを示唆している。

・3つの減速パターンによる、加速後の交通流率を比較すると、減速末期が加速後に交通流率を上昇させる一方で、減速中期が最も下落させることが分かった。

以上の結果は、被験者5名という少数の実験結果であり、さらに、静的なデータとして算出した値のみでの分析であり、必ずしも一般性のある結果とは言えない。しかし、DSを用いた実験および分析には、実観測では不可能な「過去の見解に基づいた実験条件の設定」を可能にし、今後の渋滞解明を進める上で、分析の幅を広げ、新たな視点で研究を行うことのできる非常に有用な方法の1つであるといえる。

謝辞：本実験を行うにあたり、本田技研工業株式会社の小野浩氏よりDS利用の多大なる補助を受けた。ここに記して深謝する。

参考文献

- 1) 越正毅：高速道路トンネルの交通現象，国際交通安全学会誌，Vol.10，No.1，pp.32-38，1984.
- 2) 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/IV-5，pp.1-7，1986.
- 3) 武藤憲弘，赤羽弘和：車両の走行軌跡の精密観測に基づくサグ渋滞の分析，土木計画学研究・講演集，Vol.40，2009.
- 4) 野中康弘，石田貴志，内山久雄：都市間高速道路単路部における渋滞定着要因に関する一考察，土木計画学研究・講演集，Vol.26，2002.
- 5) 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，No.660/IV-49，pp.39-51，2000.
- 6) 葛西誠，内山久雄，野中康弘：スパイラル曲線として表現される車両追従挙動のモデル化，土木学会論文集 D，Vol.63，No.1，pp.65-75，2007.
- 7) 尾崎晴男：車両の追従挙動とサグ部の隘路現象，東京大学博士(工学)論文，1994.
- 8) 邢健，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.
- 9) 塩見康博，吉澤隆司，宇野伸宏，飯田克弘：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，第30回交通工学研究発表会論文集，2010.
- 10) 大口敬，金子哲也，飯田克也，渡邊亨：ドライビング・シミュレータを用いた道路線形と追従挙動特性に関する研究，土木計画学・講演集 No.24(2)，2001.

DESIGN OF AN EXPERIMENT FOR ANALYSIS OF CAR-FOLLOWING BEHAVIOR IN BOTTLENECK SECTION ON EXPRESSWAY USING DRIVING SIMULATOR

Kazuaki FUSHIYA, Makoto KASAI, Shintaro TERABE