

運転行動の変化に着目した高速道路サグ部における交通流への影響に関する先行研究レビュー と今後の学術研究に向けた展望

池谷 風馬¹・田中 伸治²・中村 文彦³・有吉 亮⁴・松行 美帆子⁵

¹ 学生会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

E-mail: ikeya-fuma-wm@ynu.jp

² 正会員 横浜国立大学大学院教授 都市イノベーション研究院 (同上)

E-mail: stanaka@ynu.ac.jp

³ 正会員 東京大学大学院特任教授 新領域科学研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: nakamura-fumi@edu.k.u-tokyo.ac.jp

⁴ 正会員 横浜国立大学大学院特任准教授 都市イノベーション研究院

(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

E-mail: ariyoshi-ryo-gd@ynu.ac.jp

⁵ 正会員 横浜国立大学大学院教授 都市イノベーション研究院 (同上)

E-mail: matsuyuki-mihoko-ht@ynu.ac.jp

これまでの研究より、サグ部などボトルネックとなりうる箇所が特定され、その地点での交通流改善に向けた方策の研究や提案が行われている。近年では、運転行動の変化を促すようなソフト面における方策が提案されている。ACCや自動運転など、手動運転とは異なる車両の登場に鑑みると、運転行動の変化とそれによる交通流への影響を明らかにすることは今後の学術的発展の余地として存在する。そこで本論文では、高速道路サグ部を対象とした個々の運転行動と交通流の関係に着目して既往研究のレビューを行う。既往研究における、運転行動などの評価指標、交通流への影響を整理し、それに伴う課題を明らかにすることで、今後の自動車交通社会も見据えた、運転行動と交通流に関する新たな研究の観点の構築を目指す。

Key Words: traffic congestion, traffic flow, driving behavior, sag, car following

1. 背景

高度経済成長期において、経済の発展とともにモータリゼーションが進展した結果、過度な自動車依存による、深刻な交通渋滞が生じ、外部不経済が生じてきた。高度経済成長期以降、車両性能や通信技術が幾度となく向上されているものの、現在においても交通渋滞は発生しており、交通における大きな問題の1つとなっている。交通渋滞の抑制・解消に向けて、近年では、TDMやATM¹⁾など、ソフト面での対策が行われている。国土交通省の調査結果²⁾より、渋滞損失時間は年間約 38.1 億時間と算出され、貨幣価値に換算すると年間約 12 兆円の損失が発生していることが示されている。

高速道路に着目すると、サグ部と呼ばれる下り坂から

上り坂に変化する地点がボトルネックとなり、そこに交通容量を超える交通流が流入することで交通集中渋滞が発生している。越³⁾は、サグ部を起点として渋滞が発生することについて、「運転者が勾配の変化に対応したアクセル操作を行わないために、無意識のうちに車両の速度が低下する。この速度低下が減速波として上流側に増幅伝播することで、大きな車群では後方の車両が低速走行や停止の状態に至る。」と説明している。

近年、交通事故の削減や交通渋滞の緩和を期待した自動車技術の開発が進んでおり、前の車両との間隔に応じて速度や車間を制御する Adaptive Cruise Control (ACC) などが普及している。また、道路空間の改善も同時に行われており、高速道路上の側面 LED パネルを設置し、進行方向に流れるように点滅を繰り返すことで車両速度

のコントロールを行う走光型視線誘導システムなどの導入も行われている。これらの登場に伴い、渋滞解消や緩和にどのように寄与するのか研究が存在し、実測やドライビングシミュレータを用いた分析が行われている⁴⁾⁹⁾。

これらの分析の中には、新しい技術の導入により、運転行動や車両挙動が変更され、交通渋滞の緩和や交通容量の増加につながったという結果が示されている。このことから、運転行動や車両挙動に変化を促すことは交通渋滞の緩和など交通流を改善するための手段の一つであると考えられる。

しかしながら、運転行動や車両挙動に着目した分析では、それぞれを表す指標を独自に定めている分析やモデルの変数に関する指標を収集している分析など様々なものがあり、統一されているとはいえない。

2. 本研究の目的と構成

上記の背景に示すように、これまでの交通流と運転行動や車両挙動に関する分析において、用いられてきた指標についてまとめることが必要であると考えられる。特に渋滞流や臨界状態においては、運転行動や車両挙動の小さな変化であっても交通流全体に大きな影響を及ぼすため、分析を行う際にはこれらの指標を網羅的に考慮することが望ましいと考えられる。また、自動運転に代表される新しい運転技術の普及によっても運転行動や車両挙動に変化が生じると考えられるため、今後の交通流を分析するためにも、これらの指標を整理しておくことが重要であると考えられる。

本研究では、運転行動や車両挙動の変化による交通流への影響が大きいとされる高速道路のサグ部を対象に、これまでの研究で取得されてきた運転行動や車両挙動の指標について整理し、自由流や渋滞流などの交通流への影響についてまとめることを目的とする。

指標を整理するにあたり、本研究で用いる用語について定義を行う。運転におけるドライバーに関する指標や車両に関する指標は運転行動や車両挙動、運転意図など様々な表現で定義されており、その中には、すべてをまとめて運転行動として分析しているものも存在する。本研究では運転中のドライバーに関する指標と車両に関する指標は別であると捉え、以下のように定義を行い、これまでの研究をまとめることとする。

- ・運転行動に関する指標：運転中におけるドライバーに関する指標。属性や希望車頭時間などが該当し、運転におけるヒューマンファクターも該当する。

- ・車両挙動に関する指標：運転中における車両に関する指標。速度や位置、加速度などが該当し、他車との関係性を示す相対速度や車頭時間なども該当する。

運転行動や車両挙動と交通流の関係については、追従挙動モデルに着目したレビュー論文がこれまでにいくつか発表されている。第3章でははじめに、これらの論文について整理を行う。

第4章以降では、和文による論文を対象として、各研究で用いられている指標を整理する。第4章では、実データやドライビングシミュレータを用いた研究について、分析に用いられている運転行動や車両挙動の指標の整理を行う。第5章では、追従モデルを用いた研究について、分析に用いられている指標の整理を行う。そして、第6章に結論を示し、本研究を構成する。

3. レビュー論文の整理と本研究の視点

(1) 追従挙動に関するレビュー論文の整理

サグ部などを含む、単路部の追従挙動のモデルについて、和文論文では大口¹⁰⁾によってまとめられている。この論文では、交通集中による交通渋滞は特定の場所を先頭に発生するケースが多いことから、その場所の道路幾何構造が運転行動や車両挙動に何らかの影響を与えていると考察している。また、ボトルネックによる交通渋滞発生時の交通流率、及び渋滞が安定した後の捌け交通流率は、車間距離や反応時間が重要な指標となるため、運転行動や車両挙動によって規定されるものであると指摘している。追従挙動モデルについては、式(1)を基本として、様々なモデルが開発されている。

$$\text{反応(出力)} = \text{反応強度(感度)} \times \text{刺激(入力)} \quad (1)$$

追従挙動モデルの開発は交通工学分野のみならず、認知心理学や制御工学など多くの分野で研究が行われている。しかし、今までの研究で提案されたモデルであってもパラメータを入れ替えるだけで衝突を起こしてしまうなど多くの課題が依然として存在していると述べている。また、運転行動に関する指標の中で、人間の感覚には、一般的に「Weber-Fechnerの法則(対数認知則)」が成立すること、微細な刺激は閾値以下では反応できないこと、人間の動作範囲に限界最大値があることを指摘している。Weber-Fechnerの法則とは、物理的な刺激量

(I)の微小な違い(dI)の認識可能な閾値は「 $dI/I = \text{一定}$ 」となる法則(Weberの法則)に基づき、主観的な感覚量(ϕ)は刺激量(I)の対数に比例するという仮説である(Fechnerの法則)。図-1は、上記で述べた人間の感覚をまとめたものであり、このような考え方から、運転行動を非線形として取り扱っているモデルも複数存在する。

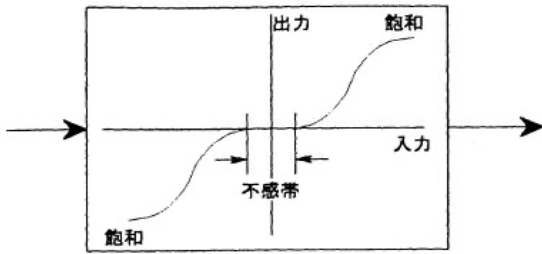


図-1 人間の感覚の非線形性¹⁵⁾

英文論文では、車両挙動を表現することを目指した交通工学の観点と運転行動を表現することを目指した交通心理学の観点に関するモデルについて、Mohammad et al¹⁶⁾によってまとめられている。この論文の中で、交通安全を向上を目指し、複雑な運転状況における追従挙動をより現実的に表現するために、モデルにおいて人的要因（ヒューマン・ファクター）を考慮することが必要と述べられている。人的要因の具体的な例として、以下の15個の指標を挙げている。

1. 属性：性別や年齢，収入など
2. 反応時間
3. 推定誤差：速度や距離を正確に推定できないこと
4. 知覚閾値：小さな変化に気づけないこと（図-1）
5. 時間的な先読み：次の瞬間の交通状況を予測すること
6. 空間的な先読み：前後の車両の位置を考慮すること
7. 交通状況における感度：交通状況に応じて運転を変化させること
8. 不完全な運転：同じ状況であっても、挙動が異なること
9. 積極的/消極的な運転傾向
10. 運転スキル
11. 運転の動機
12. 注意散漫な状態の有無
13. 希望走行速度
14. 希望車頭距離（車間距離）
15. 希望車頭時間（車間時間）

近年の複数の研究で用いられている追従挙動モデル、Helly's モデルや Interlligent Driver Model (IDM) , IDM+ などでは、上記の人的要因の内、希望走行速度や希望車頭時間、知覚閾値などが考慮されている。しかし、筆者らは現行のモデルであっても、人的要因が無視されていることが多いと指摘しており、今後のモデルに関する研究を行う上では、ヒューマンエラーなどの人的要因を考慮していく必要があると述べている。

(2) 本研究における指標整理の視点

以上に示すように、運転行動や車両挙動と交通流の関

係性を明らかにしようとした研究は数多く存在しており、それらをまとめたレビュー論文もいくつか存在する。一方で、これらの論文は、実データやドライビングシミュレータ^{5),10),11),17),22)}、追従挙動モデル^{4),12),13),26),34)}など様々なツールを用いて分析が行われているため、分析に用いられる運転行動や車両挙動の指標が研究ごとに異なることが課題として挙げられる。

そこで本研究では、高速道路サグ部における運転行動や車両挙動に関する研究を、実データ・ドライビングシミュレータから得られた結果から交通流の記述を試みた研究と追従挙動モデルなど運転行動や車両挙動の一部に仮定を置きながら交通流の記述を試みた研究に分け、そこで用いられている指標の整理を行う。一部の研究には、実データと追従挙動モデルの両方を用いて分析を行っているものも存在するが、その論文に関しては、追従挙動モデルの章で整理することとする。

(3) 本研究の対象文献

上記の整理を基に、運転行動や車両挙動と交通流の関係性を分析した研究について、前節で示した視点での整理を行う。分析に用いられる実データは、サグ部付近に設置されている車両感知器から得られるため、取得場所が限られており、そのようなデータが得られている日本の高速道路を対象にした研究が多い。そこで、本研究では和文での論文を対象とする。はじめに、和文で既に発表されている論文のうち、本研究の視点と関わりが深いと判断されるものの抽出を行った。抽出結果を表-1に示す。この表より、本研究の対象論文として、12の雑誌または論文集に搭載されている計22件を抽出することとした。

表-1 本研究の対象文献

ID	論文集・雑誌名	件数
1	土木学会論文集D3	7
2	土木計画学研究・論文集	
3	交通工学論文集	5
4	電子情報通信学会技術研究報告	2
5	土木計画学研究・講演集	1
6	交通工学研究発表会論文集	1
7	交通工学	1
8	映像情報メディア学会誌	1
9	生産研究	1
10	計測と制御	1
11	自動車技術会論文集	1
12	数理解析研究所講究録	1

4. 実データやドライビングシミュレータを用いた運転行動に関する論文の整理

飯田ら⁷⁾は、近年導入が進められている ACC 車両に着目し、高密度交通流を対象として、ACC 車両の混在によって交通流の円滑性や追突事故リスクがどのように変化するか分析している。ドライビングシミュレータによる追従積重ね実験の結果から、ACC 車両が混在することにより、高密度交通流における速度低下が緩やかになり、減速波の上流増幅伝播は見られなくなること、ドライバー自身の運転や周囲に注意を向ける余裕が生じること、ドライバーのストレス度合いが軽減する可能性があることを示唆している。その一方で、ACC 車両が混在していても、高密度交通流では、追突事故リスクが高くなる箇所があり、マニュアル操作が必要な車両が ACC 車両の緩やかな速度変化に気づくのが遅れたことが原因であると考察している。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、車頭時間や加速度、注意散漫の有無、注視点変動などが用いられている。

渡邊ら¹⁰⁾¹¹⁾は、近年サグ部における渋滞対策の一つとして、全国各地で導入が進められている走光型視線誘導システムに着目し、渋滞流中の捌け台数増加効果を高める発光要因を分析している。複数の発光体形状を用意し、運転行動などの変化を調べたドライビングシミュレータを用いた実験結果から、消灯時と比べて点灯時の場合は、発光形状にかかわらず捌け台数改善効果があること、特に矢印型の発光体は車頭時間が短縮される傾向にあり、車両の進行方向を指し示す図形が捌け台数の増加により効果的である可能性を示唆している。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、車頭時間や視認性などが用いられている。

飯田ら¹⁷⁾は、高速道路のサグ部における道路構造改善の評価を行うために、ドライビングシミュレータを使って運転行動や車両挙動のデータを収集し、データ解釈の根拠を得るためにプロトコル法によるヒヤリング調査を行っている。運転行動や車両挙動の指標には、速度、アクセル・ブレーキの使用量、注視点変動を用いており、それぞれの指標が変化する理由をヒヤリングによって被験者に尋ねている。分析結果より、ヒヤリング調査を行うことで、実験でない通常の走行では発生しない挙動を抽出できること、速度メータを見て速度を増加させた被験者に比べ、上り坂に気づき速度を増加させた被験者の方が速度開始地点のばらつきが小さくなること、縦断曲線半径の小さくすることで、運転者が上り坂に気づきやすくなり、サグ部における速度低下区間が短くなる傾向になることを示している。

飯田ら¹⁸⁾は、自由走行車両から抽出された 5 種類のサグ部における走行挙動パターンを用いて、それぞれのパ

ターンの車両が後続車にどのような影響を与えるか、ドライビングシミュレータを用いて分析している。走行挙動パターンは、速度低下の有無、速度低下位置、速度回復の有無が異なるものである。追従積重ね実験による分析結果から、サグ部での速度低下後の速度回復が見られない場合、車群全体に密な状態が形成される傾向にあること、密な状態の場合、前方車両の挙動が後続車両に与える影響としては大きくなる傾向にあることを明らかにしている。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、走行位置や速度、車頭時間などが用いられている。

大口¹⁹⁾らは、東名高速道路上り綾瀬 BS 付近のボトルネックを対象に、車両感知器データと交通事故記録から交通状況と交通事故の関連性を分析している。非拘束領域、臨界領域、渋滞領域に交通状況を分類し、交通量当たりの事故率を用いて、事故発生の危険性を比較した結果より、渋滞領域や臨界領域など高密度な交通流状態において事故率が桁違いに高いことを示している。この結果について、車群の中で極端に短い車頭距離で追従していることが主要な事故要因の一つである考察している。また分析結果より、交通集中渋滞対策には、交通事故対策としても効果があることを指摘している。

赤松²⁰⁾は、運転中におけるドライバーの認知・知覚能力について、道路環境や交通状況、高齢者ドライバー特性など様々な項目に分けて解説を行っている。サグ部におけるドライバーの認知・知覚能力について、下り坂のあとの平坦部や上り坂を知覚することが難しく、その結果、速度が低下し、渋滞につながると述べられている。また、追従走行における認知・知覚能力として、先行車両の大きさの増大（視角の変化速度）が減速を行うタイミングと相関が高いと指摘している。運転中の認知・知覚能力を低下させる要因として、考え事や会話、音楽鑑賞などを挙げており、限度のある情報処理容量に対し、運転以外の情報処理資源を投入することによって、認知・知覚能力が低下すると指摘している。また、情報処理容量は年齢や運転スキルなど運転行動の個人差によって異なること、同一のドライバーであっても、覚醒水準や疲労などによって減少すると指摘されている。

飯田ら²¹⁾は、都心部の高速道路に導入されている大深度地下高速道路について、地上との接続部が急勾配になることからサグ部などのボトルネックになる可能性を指摘し、このような道路構造が運転行動や車両挙動に与える影響について分析している。ドライビングシミュレータによる追従積重ね実験より、急な上り坂になっている部分において、大きな減速が生じ、車列が積み重なるほど速度が低下する傾向にあることを示している。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、車頭時間や加速度、アクセル・ブレーキの使用量、注視点変

動などが用いられている。

池谷ら²²⁾は、複数の高速道路を対象に、車両感知器データを用いて、渋滞発生前後での個々の車両の車頭時間がどのように変化しているの分析している。渋滞発生前後 1 時間の比較結果では、渋滞発生後に車頭時間の極端に長い車両がパルス状に発生していること、渋滞発生前後 100 台分の比較結果では、多くの地点で渋滞発生後に車頭時間の平均と分散が増加することを示している。特に、渋滞発生後にパルス状に発生している車頭時間の極端に長い車両に関しては、車群を形成する要因になり、Capacity Drop の原因の一つになっているのではないかと考察している。

5. 追従挙動モデルを用いた運転行動に関する論文の整理

(1) 追従挙動モデル

本章で整理する多くの論文において用いられている追従挙動モデル、IDM²³⁾について説明する。IDM は、前方車両との相対速度や車間距離に応じて、自由走行、追従走行の行動状態を切り替えて加速度を表現するモデルである。車両の加速度は以下の式で表す。

$$\dot{v} = a \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right] \quad (2a)$$

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_0 + \max \left(T v + \frac{v \Delta v}{2 \sqrt{ab}}, 0 \right) \quad (2b)$$

ここで、 \dot{v} : 対象車両の加速度、 v_n : 対象車両の速度、 v_0 : 対象車両の希望走行速度、 Δv_n : 先行車との相対速度、 s^* : 対象車両の希望車間距離、 s_n : 先行車との車間距離、 s_0 : 停止時最小車間距離、 T : 最小車間時間 (反応時間)、 a : 最大加速度、 b : 希望減速度である。

この IDM を改良し、自由走行状態と追従走行状態を明示的に分離し、各状態から想定される加速度の最小値を出力することで、現実的な交通容量の算定を可能にした IDM²⁴⁾がある。また、鈴木ら²⁵⁾はサグ部の縦断勾配による重力加速度を用いた抵抗成分を考慮した上で、自由走行時と追従走行時で分離したモデルを提案している。既往研究を整理する上で、IDM やその改良版を用いている論文に関しては、上記の変数を運転行動や車両挙動の指標として用いていると捉えることができる。

(2) 既往研究の整理

渡邊ら⁴⁾は、サグ部で生じる交通中渋滞の対策として、通信距離を 1km 程度に設定した車車間通信を用いて、渋滞区間での車群の位置と速度の情報を後続車両に通知し、

これに基づく渋滞原因となっている車両とその後続車両のドライバーに渋滞解消運転を促す手法を提案し、その有効性を評価している。高速道路上の車両感知器データから車両発生データを取得し、IDM に適用した分析結果より、車車間通信によって渋滞予見情報を含んだパケット (Congestion Expectation Message) を受け取った渋滞流より後方にある車両が渋滞吸収運転 (Jam-Absorption Driving) を行うことで平均速度が向上することを示している。具体的には、対象車両が 20-30% 等の低い状況においても平均走行速度が 15% 向上する結果となっている。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、IDM に関する指標が用いられている。

田平ら¹²⁾は、近年導入が進められている走光型視線誘導システムに着目し、走光型視線誘導システムが追従車両の相対速度の変動特性やドライバーの相対速度認知に及ぼす影響について分析を行っている。実道追従走行実験から得られた結果より、制限速度 60km/h の対象道路において、走光型視線誘導システムが 80km/h で運用されている場合、追従挙動のばらつきが抑制され、交通流を均一化できる可能性を示唆している。その後、IDM モデル基本とした追従挙動モデルや Helly モデルを用いて、ドライバーの相対速度の認知度合いを表現できるパラメータを推定した結果、走光型視線誘導システムを運用することで相対速度認知が向上する可能性があることを示唆している。また、追従挙動モデルを用いたシミュレーション分析結果より、走光型視線誘導システムを運用することによるドライバーの追従挙動の感度向上が速度低下に寄与し、上り勾配区間における追従車両群の総旅行時間が短縮されることを明らかにしている。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、IDM に関する指標の他に、交通状況におけるドライバーの感度などが用いられている。

柳原ら¹³⁾は、近年導入が進められている走光型視線誘導システムに着目し、設置の有無で追従挙動が異なると仮定し、実データを用いた追従挙動分析による交通流の比較分析を行っている。走行実験によって得られたデータを Helly モデルに適用し、パラメータを推定した結果より、走光型視線誘導システムが設置されることで、追従車両は先行車両との相対速度の変化に対して、より大きな加速度を素早く出力する傾向があり、積極的な追従を行っていることを明らかにしている。また、ミクロ交通シミュレーションによる分析結果から、走光型視線誘導システムの渋滞緩和効果が追従挙動モデルのパラメータ分布の僅かな違いに起因して現れることを示している。これに関して、感度分析を行った結果から、反応遅時間の減少、相対速度に対する反応強度の増大が捌け交通量に影響を与えていることを明らかにしている。この分析

において、運転行動や車両挙動に関する指標には、速度や希望車頭時間、反応時間などが用いられている。

宇野²⁹⁾は、高度道路交通システム (ITS) の中で交通安全の向上に大きく貢献すると考えられている走行支援道路システム (AHS) に着目し、AHS 機能が実装化された場合の車両の反応時間と交通流の安全性の関係性について分析している。人間の意思決定における曖昧さを考慮した UD ファジィ追従モデルを用いた分析結果より、AHS に対応した車両が交通流内に混在すると、追従走行における最小車間時間が増加し、後続車の最小車頭時間の減少もさえられる傾向にあることを示している。また、反応時間の短い AHS に対応した車両が存在することで、潜在的衝突危険時間も減少し、交通流の安定性や安全性の向上に寄与する可能性があると考えられている。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、相対速度や加速度/減速度、車頭距離の知覚値などが用いられている。

大口²⁹⁾は、サグ部における追従挙動のモデル化について、交通流を構成するドライバーの追従挙動特性にはばらつきが存在することから、このばらつきを適切にパラメータの分布として表現し、その構成割合によって渋滞発生のしやすさを確率的に表現できるようなシミュレーションモデルを作成することが望ましいと述べている。また、これまでに登場している追従挙動モデルをまとめた上で、局所安定性の解釈、追突発生条件の明示的扱い、停止の明示的扱い、安定性と速度変動の大きさの関係、安定性と不安定性の共存、サグ部の勾配変化の影響、モデル構造の検討、複雑系として捉えたアプローチを吟味していく必要があると考察している。

堀口²⁹⁾は、実務におけるシミュレーションの利用実体を整理し、高速道路合流部やサグ部における、微視的な視点での新たな交通現象解明の取り組みを踏まえたシミュレーション開発に関する展望を述べている。サグ部などで発生する渋滞が特定の車両挙動によって引き起こされている仮説に着目し、このような渋滞や交通流を表現するために、モデルに個人特性の現実のばらつきを反映させるための手法の開発、実用化が今後重要になると考察している。

葛西²⁹⁾は、交通流中の車間距離・相対速度平面上の軌跡がスパイラル状曲線になることに着目して、追従状態にある 2 台の車両をバネ質点系に希望車間距離に相当する強制外力が作用する非線形の類似としてとらえた追従挙動モデルを作成している。都市間高速道路のボトルネック部において発生した渋滞流の車両挙動データに作成したモデルを適用した結果から、車間距離の実測値と推定値の中等誤差が十分に小さいサンプルが多く得られたことから、大多数のドライバーの追従挙動がバネ質点系モデルによって表現可能であると考察している。この

分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、速度や車間距離、相対速度などが用いられている。

森川³⁰⁾は、サグ部における一般ドライバーの個人差・個人内差を考慮した追従挙動のモデル化を行い、一般ドライバー相当の追従挙動、先急ぎ運転相当の追従挙動のモデルを作成している。これらのモデルおよび接近離間状態評価指標 K_d を用いた ACC の追従挙動モデルを用いて、車群における先頭車緩減速時の後続車の挙動をシミュレーションによって評価している。車群の速度低下と燃料消費量を元に評価を行なった結果より、一般ドライバーや先急ぎドライバーに比べて、ACC 車両の方が、速度低下量・燃料消費量ともに向上することが示されている。また、40km/h 以下になった状態を渋滞とした場合、ACC の追従挙動モデルでは渋滞が発生せず、接近離間状態評価指標を用いた ACC による渋滞発生抑止効果があると確認している。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、速度や車間距離、ブレーキ使用量、加速度などが用いられている。

葛西³⁰⁾は、ドライビングシミュレータを用いた追従積重ね実験と階層ベイズ法を用いて、追従挙動のモデルによらない縦断勾配の影響を抽出している。用意された縦断勾配が異なる 2 種類のサグ部による追従積重ね実験データを車頭時間データに変換し、階層ベイズ推定の形式で記述される季節調整法の適用を行なった結果、縦断線形から交通流が受ける影響を暗示することができ、その影響については、階層ベイズにおけるハイパーパラメータで推定可能であることを示している。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、速度や車間距離などが用いられている。

牧野³⁰⁾は、高速道路サグ部における渋滞発生要因に関して、走行車線から追越車線への車線変更行動に着目し、路側ビデオ映像や時空間車両軌跡データなどを用いて、運転行動などの特徴を分析している。分析結果として、減速波が発生した交通流のうち 3 割弱が、追越車線への車線変更行動（割り込み）が直接的または間接的原因になっていることを確認している。その後、IDM+ を基本としたマイクロ交通流シミュレータを用いて、サグ部付近での臨界密度交通流において、車線変更を繰り返す車両と一般的な車両のサグ部通過所要時間を比較し、両者の時間に差異がほぼ見られなかったことを明らかにしている。これらの結果から、サグ部における渋滞対策の一つのコンセプトとして、車線変更行動自体の抑制を図ることが有効ではないかと考察している。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、IDM に関する指標の他に、車線変更を行う際の前方向後方ラグなどが用いられている。

西元³⁰⁾は、近年実用化が始まっている車車間通信を用いて車間距離や速度を自動制御する運転技術、

表-2 各分析における車両挙動や運転行動に関する指標

	車両挙動関連指標													運転行動関連指標																							
	速度	相対速度	加加速度	最大加加速度	車両位置	車頭距離	車頭時間	停止時最小車頭距離	安全車頭時間	アクセル使用量	ブレーキ使用量	クリープ時間	発進遅れ	加速時間	属性	反応時間	推定誤差	知覚閾値	時間的な先読み	空間的な先読み	交通状況における感度	不完全な運転	積極的・安全思考の傾向	運転技術	運転の必要性	注意散漫	希望車頭時間	希望車頭距離	希望走行速度	希望減速度	注視点変動	運転感受性	運転スタイル				
渡邊ら(2017) ⁴⁾	○			○	○	○	○	○	○																												
飯田ら(2019) ⁵⁾	○		○			○	○									○											○							○			
渡邊ら(2018) ¹⁰⁾	○					○	○																														
渡邊ら(2018) ¹¹⁾	○					○	○																														
田平ら(2020) ¹²⁾	○	○	○	○				○	○	○											○					○	○	○	○								
柳原ら(2020) ¹³⁾	○		○		○											○											○										
飯田ら(2001) ¹⁷⁾	○									○	○																								○		
飯田ら(2001) ¹⁸⁾	○				○	○	○																														
大口(2004) ¹⁹⁾	○	○	○														○																				
赤松(2007) ²⁰⁾	○	○	○			○	○								○	○						○															
飯田ら(2019) ²¹⁾	○		○		○	○				○	○					○																				○	
池谷ら(2021) ²²⁾	○				○	○	○																													○	
宇野(2002) ²⁵⁾	○	○		○	○	○	○								○		○																				
大口(2002) ²⁷⁾	○	○	○			○											○																				
葛西ら(2007) ²⁹⁾	○	○			○	○																															
森川ら(2010) ³⁰⁾	○	○	○	○	○	○	○																														
葛西(2015) ³¹⁾	○				○	○	○																														
牧野ら(2015) ³²⁾	○			○	○	○	○	○	○	○							○									○	○	○	○								
西元ら(2016) ³³⁾	○	○		○				○	○	○																○	○	○	○							○	○
和田ら(2020) ³⁴⁾	○			○	○		○																				○	○	○	○						○	○

Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) に着目し、ドライバーに先行車両や先々行車両の加減速情報が提供された場合の運転行動や車両挙動の変化を分析している。ドライビングシミュレータを用いた実験結果より、先行車両情報よりも先々行車両情報の方がアクセル踏み込み量が 11.1%減少し、加速時間が 15%増加、クリープ走行時間が 50%増加など燃料消費量が向上するような運転が行われていることを示している。また、IDM+を用いた追従特性の解析結果より、先々行車両情報提供時の最大加加速度や希望減速度の値が大きくなる傾向を示している。これらの結果より、先行車両や先々行車両の情報がアクセルを踏み込む目安などに活用されているのではないかと考察している。

和田ら³⁴⁾は、連続体交通流理論に基づき、サグ部における実績最大交通量よりも捌け交通量が小さくなる現象 (Capacity Drop 現象) を実証的に分析している。サグ部周辺で取得された ETC2.0 プローブデータや車両感知器データより、複数の地点の速度変化を分析し、ボトルネック下流部では、渋滞している時間帯でも車線ごとに速度差が生じていること、速度は自由流速度よりも小さいことを示している。この結果について、ボトルネックを抜けた車両がその後緩慢な加速を行っていることによるものと考察している。得られたデータを有界加加速度制約 (BA 制約) を考慮した追従挙動モデルに適用した結果、ボトルネック通過後の速度回復挙動が実測と一致する結果になり、Capacity Drop 現象について交通流の BA 状態

が要因の一つであると考察している。この分析において、運転行動や車両挙動に関する指標には、速度や車頭時間、最大加加速度などが用いられている。

6. 結論

これまで整理してきた高速道路サグ部における運転行動や車両挙動に関する研究のうち、データなどを用いて分析を行っている研究や具体的な指標について言及している論文を対象に、分析で用いられた指標の整理を行う。整理した結果を表-2に示す。指標を整理するにあたり、車間距離や車頭距離など同様の意味で用いられているものは一つにまとめ、データの取得は行っているものの分析に用いられなかった指標に関しては除外している。また、運転行動に関する指標に関しては、Mohammad et al¹⁶⁾の人的要因の考慮が必要であるという指摘を考慮し、表内の指標で網掛けで示した 15 個の指標も示す。そのため、全ての研究で用いられていない指標も一部存在しており、この結果は Mohammad et al の結論を裏付けるものとなっている。表の行において網掛けで示した既往研究は、第 5 章で整理したモデルなどを用いて分析した研究であり、それ以外は第 4 章で示した実データやドライビングシミュレータを用いて分析した研究となっている。

この表より、実データやドライビングシミュレータによる分析に比べて追従挙動モデルなどによる分析の方が、運転行動に関する指標を多く用いていることがわかる。

これは、実データ、特に車両感知器などから得られるデータで分析を行う場合、分析対象となったドライバーの運転行動を取得することが難しいことが原因の一つであると考えられる。また、IDMやその改良版を用いた研究では、運転行動や車両挙動の指標が多く用いられている。そのため、個々の運転行動や車両挙動を考慮している研究が多く存在するものの、一部の指標において定数として仮定しているものもあり、仮定の値と実測値がずれてしまうと分析結果に変化が生じる可能性が考えられる。このことについては、複数の論文で指摘されており、運転行動の指標に関して、個人差や個人内差を表現することは今後の課題と考えられる。

本論文では、高速道路サグ部を対象とした個々の運転行動の変化、それによる交通流への影響に着目して既往研究のレビューを行った。レビューを行い、運転行動などを評価する指標や交通流への影響を整理した結果より、研究によって用いられる指標が大きく異なること、運転行動に関する指標についてはまだ考慮しきれていないものがあることを明らかにした。これらを整理した表-2のような結果を、これまでの研究で示しているものではなく、今後の運転行動や車両挙動と交通流の関係性を分析する上で重要なものになると考えられる。

本論文から得られた今後の課題として、まず、各指標における交通流への影響度合いに関する知見が必要であると考えられる。整理した全ての論文において、分析に用いられた指標が変化することで交通流に影響があることが示されている。一方で、他の論文と比較すると、分析で用いられていない指標も存在することから、各指標がどの程度交通流に影響を与えているか判断することが難しい。分析状況や仮定が異なるため、各指標を直接比較することはできないが、サグ部での臨界状態の交通流など特定の状態において、それぞれの指標がどの程度の影響力を持つのか整理する必要があると考えられる。

上記の課題と合わせて、用いられる指標を整理することが必要であると考えられる。分析に使用する指標が多くなれば、その分同定するパラメータも多くなる。このことを踏まえると、少数の指標で精度の高いモデルなどの構築が望ましく、指標を整理することが必要になると考えられる。一方で、上記の指標を網羅的に取り入れた研究がないことから、それぞれの相関などに関する知見は存在しない。指標を整理することで、交通流に関する研究の分析結果を比較することが容易になると考えられることから、その重要性は高いと考えられる。

本研究では、土木や交通工学における研究を中心に論文レビューを行った。しかし、交通流に関する分析は制御工学や情報工学、心理学などさまざまな分野で行われている。そのため、今回整理することができなかった論文はまだあると考えられ、それらの論文についても今後

レビューを行っていく必要があると考えられる。同様に、国外の論文にも対象を広げる必要があると考えられる。

また、柳原ら³⁵⁾の研究を例に挙げられるように、高速道路サグ部を対象とはしていないものの、運転行動に着目している研究も数多く存在する。また、ドライビングシミュレータやプローブデータなどの普及により、運転行動に関するデータの収集が容易になり始めており、今後も運転行動に着目した研究は増加すると考えられる。運転における属性や運転者心理の影響は、異なる交通状況においても共通するものがあると考えられるため、これらの論文に対しても、サグ部における追従挙動との関連性をみながら、整理していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 塩見康博：高速道路における日本式アクティブトラフィックマネジメントの体系化，科学研究費助成事業研究成果報告書，2019.
- 2) 国土交通省：都市圏の交通渋滞対策 -都市再生のための道路整備-，平成 13 年度～平成 14 年度プログラム評価書，2003.
- 3) 越正毅：高速道路のボトルネック容量，土木学会論文誌，第 371 号/IV-5，pp.1-7，1986.
- 4) 渡邊拓哉，森野博章：700MHz 帯車々間通信を利用した 2 車線高速道路における渋滞解消運転支援，信学技報，vol.117，No.71，pp.97-102，2017.
- 5) 飯田克弘，浅田真敬，多田昌裕，筑後智弘，西田将之，安時亨，澤田英郎：ACC が混在する高密度交通流の挙動と運転者挙動への影響，交通工学論文集(特集号 A)，第 5 巻，第 2 号，pp.A_80-A_89，2019.
- 6) Alexandros E. Papacharalampous, Meng Wang, Victor L. Knoop, Bernat Goni Ros, Toshimichi Takahashi, Ichiro Sakata, Bart van Arem, Serge P. Hoogendoorn : Mitigating Congestion at Sags with Adaptive Cruise Control Systems, 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.2451-2457, 2015.
- 7) Silvia F. Varotto, Haneen Farah, Klaus Bogenberger, Bart van Arem, Serge P. Hoogendoorn : Adaptations in driver behaviour characteristics during control transitions from full-range Adaptive Cruise Control to manual driving: an on-road study, Transportmetrica A: Transport Science, pp.776-806, 2020.
- 8) Bernat Goni Ros, Wouter J. Schekal, Alexandros E. Papacharalampous, Meng Wang, Victor L. Knoop, Ichiro Sakata, Bart van Arem, Serge P. Hoogendoorn : Using advanced adaptive cruise control systems to reduce congestion at sags: An evaluation based on microscopic traffic simulation, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, pp.411-426, 2019.
- 9) Hiroaki Morino, Takashi Inafune, Takuya Watanabe : Assisting Solution of Traffic Congestion at Sags Using Inter-Vehicle Communication with Heterogeneous Wireless Systems, IEEE Vehicular Networking Conference, pp.1-8, 2015.
- 10) 渡邊秀，柳原正実，小根山裕之：走光型視線誘導システムによる加速挙動時の車頭時間変化要因分析，土木学会論文誌 D3，Vol.74，No.5，pp.I_1219-I_1227，

- 2017.
- 11) 渡邊秀, 柳原正実, 小根山裕之: 渋滞時の加速挙動に着目した走光型視線誘導システムの影響分析, 交通工学論文集(特集号 A), 第 4 巻, 第 1 号, pp.A_88-A_96, 2018.
 - 12) 田平優太, 塩見康博: 追従時の相対速度変動に着目した走光型視線誘導システムの影響分析, 土木学会論文集 D3, Vol.75, No.6, pp.I_637-I_646, 2020.
 - 13) 柳原正実, 平木賢太, 小根山裕之: 走光型視線誘導システムによる追従挙動変化の交通流への影響分析, 交通工学論文集(特集号 A), 第 6 巻, 第 2 号, pp.A_55-A_62, 2020.
 - 14) Bernat Goni Ros, Victor L. Knoop, Bart van Arem, Serge P. Hoogendoorn: Mainstream Traffic Flow Control at Sags, Transportation Research Record: Journal of Transportation Board, pp.57-64, 2014.
 - 15) 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.
 - 16) Mohammad Saihuzzaman, Zudou Zheng: Incorporating human-factors in car-following models: A review of recent developing and reseach needs, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, pp.379-403, 2014.
 - 17) 飯田克弘, 池田武司, 河井健, 森康男, 山岸将人: プロトコル法を用いた運転者挙動分析結果に基づくサグ部の道路構造改善方針の検討, 土木学会論文集, Vol.18, No.15, pp.919-926, 2001.
 - 18) 飯田克弘, 河井健, 大口敬, 山岸将人, 森俊之: サグ部における車群先頭車両の速度推移特性が後続車両に与える影響の分析, 土木計画学研究・講演集, pp.661-664, 2001.
 - 19) 大口敬, 赤羽弘和, 山田芳嗣: 高速道路交通流の臨界領域における事故率の検討, 交通工学, 39 巻, 3 号, pp.41-46, 2004.
 - 20) 赤松幹之: 運転中に何を見て, 何を認知しているのか—道路, 交通, 運転特性, そして高齢者ドライバー—, 映像情報メディア学会誌, Vol.61, No.12, pp.1682-1688, 2007.
 - 21) 飯田克弘, 遠藤貴樹, 多田昌裕, 蓮花一己, 山本隆, 中村文彦, 糸島史浩: 大深度地下高速道路の JCT における車両および運転者の挙動の把握, 交通工学論文集(特集号 A), 第 5 巻, 第 2 号, pp.A_257-A_266, 2019.
 - 22) 池谷風馬, 田中伸治, 中村文彦, 有吉亮, 松行美帆子: 車両感知器データを用いた交通渋滞発生前後における車頭時間の経年変化に関する研究, 第 41 回交通工学研究発表会論文集, pp.251-257, 2021.
 - 23) Martin Treiber, Ansgar Hennecke, Dirk Helbing: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, Physical Review E, Vol.62, No.2, pp.1805-1824, 2000.
 - 24) Wouter J. Schakel, Bart van Arem, Bart D. Netten: Effects of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic Flow Stability, Proceeding of 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.19-22, 2010.
 - 25) 鈴木一史, 山田康右, 堀口良太, 岩武宏一: 高速道路サグ部渋滞対策に資する ACC の将来性能と渋滞緩和効果, 交通工学論文集, Vol.1, No.2, pp.B_60-B_67, 2015.
 - 26) 宇野伸宏: 道路交通流の分析アプローチと整流化の試み (非線形波動現象の構造と力学), 数理解析研究所講究録, No.1271, pp.181-190, 2002.
 - 27) 大口敬: 自動車ドライバの追従挙動, 計測と制御, 第 41 巻, 5 号, pp.372-377, 2002.
 - 28) 堀口良太: 最近の渋滞現象への取り組みと交通流シミュレーション, 信学技報, Vol.104, No.506, pp.37-40, 2004.
 - 29) 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.
 - 30) 森川翔, 加藤一郎, 伊佐治和美, 津留直彦: 接近離間状態評価指標用いた追従挙動モデルの提案, 自動車技術会論文集, pp.189-194, 2010.
 - 31) 葛西誠: ドライビングシミュレータ追従積重ね試験と階層ベイズ法による縦断線形の影響の抽出, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.5, pp.I_917-I_929, 2015.
 - 32) 牧野浩志, 鈴木一史, 鹿野島秀行, 山田康右, 堀口良太: 車線変更行動に着目したサグ部渋滞発生要因の分析と渋滞対策アプローチ, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.5, pp.I_1001-I-1009, 2015.
 - 33) 西元崇, 松本修一, 葛西誠, 長澤俊範, 岩瀬幸一: ドライビングシミュレータを用いた情報提供における車両挙動解析—先行車両と先々行車両情報の比較—, 土木学会論文集 D3, Vol.72, No.5, pp.I_1115-I-1122, 2016.
 - 34) 和田健太郎, 邢健, 大口敬: 連続体交通流理論に基づく高速道路サグ部における Capacity Drop 現象の実証分析, 生産研究, 72 巻, 2 号, pp.165-171, 2020.
 - 35) 柳原正実, 宇野伸宏, 中村俊之: 運転意図に基づく外部刺激の影響分析手法—模擬走行実験における合流支援情報を例に, 交通工学論文集(特集号 A), 第 1 巻, 第 2 号, pp.A_207-A_216, 2015.

(?? 受付)

A REVIEW OF PREVIOUS RESEARCH ON THE EFFECTS ON TRAFFIC FLOW IN SAGS FOCUSING ON CHANGES IN DRIVING BEHAVIOR AND A PERSPECTIVE FOR FUTURE ACADEMIC RESEARCH

Fuma IKEYA, Shinji TANAKA, Fumihiko NAKAMURA, Ryo ARIYOSHI,
and Mihoko MATSUYUKI