

一時停止交差点における運転支援システムの個人適合に向けた基礎検討

基村竜晟^{†1}

北陸先端科学技術大学院大学

田中貴紘^{†2}

名古屋大学

岡田将吾^{†3}

北陸先端科学技術大学院大学

1. はじめに

近年、日本では高齢化が進むにつれて高齢の運転免許保有者数も増加し続けており [1], 高齢者の自動車事故防止は重要な問題となっている。運転は複雑な認知処理が必要となるため [2], 認知機能が低下したドライバにとって安全に運転をすることは難しくなる。運転を中止させることは事故防止のための有効な手段ではあるが、完全自動運転が実現されていない現状においては高齢者の移動が困難となる地域も多い。また、運転の中止はうつ病の発症リスク増加など健康状態に影響を与える可能性があり [3], 安全な運転をできるだけ長く続けることは高齢者が移動手段を確保するための重要な課題である。

安全運転の促進において運転支援システムは有効な手段の一つであり、現在も様々な運転支援システムが市販の車に搭載されている [4]。しかし、システムの多くは平均的なドライバに合わせて作られており [5], 認知機能が低下した高齢者に合わせて作られているものは少ない。高齢者の事故要因の一つである認知機能の低下は若者にはあまり現れない要因の一つであり、高齢ドライバと若年ドライバの主な事故要因は異なる。例えば、若者はリスクをとる運転や技術不足、高齢者は知覚や判断に原因がある [6]。また首の柔軟さなど安全確認に必要な身体機能も異なることも報告されている [7] ことから、高齢者と若者の間で安全な運転に向けて変容させるべき運転行動は異なり、それに伴って必要な運転支援も異なると考えられる。そのため高齢ドライバの安全運転の実現のためには、認知機能の低下に合わせた運転支援システムの開発が必要である。このように高齢ドライバの安全運転を促進することは重要な課題であるにもかかわらず、どのような支援が高齢者に有効であるかを明らかにした研究は少なく、明らかになっていない。

本研究ではドライバ特性や認知機能と運転支援による運転行動変容の関係性の解明のために、ドライビングシミュ

レータを用いてデータ収集と分析を行う。特に、高齢者の事故リスクが高く、認知負荷がかかりやすい一時停止交差点での運転支援に着目し、ドライバの運転行動や視線・顔向きデータを収集する。これらのデータを用いて、運転セッションごとに安全運転の指標となる運転行動指標を算出し、運転支援はこの運転行動指標の改善、つまり運転行動の変容を目的とする。さらに、高齢ドライバの認知機能を把握するために Trail Making Test (TMT) [8] と有効視野検査 (UFOV) [9] をドライバに実施し、他にもドライバ特性を把握するためにいくつかの質問紙調査をドライバに実施した。一時停止交差点で行う運転支援は、支援の情報の多さ、支援の内容の観点から異なる複数の支援を行い、どの支援が運転行動改善につながったか、またドライバのドライバ特性・認知機能によって運転支援効果がどのように変化するかを分析する。本研究はデータ分析によって、運転行動の変容のための効果的な支援はドライバ特性・認知機能によって異なることを明らかにし、運転支援の個人適合の重要性を示す。

2. 関連研究

2.1. 一時停止交差点での高齢ドライバの運転行動

Yonekawa ら [10] は高齢ドライバが一時停止交差点に速い速度で侵入し、十分な左右確認を行わない傾向にあることを示した。また、公道での実験では認知機能が低下したドライバは左右の確認をあまり行わず、その確認時間も短い傾向にあることが示された [11]。Yoshihara ら [12] は一時停止交差点を通過する際、高齢ドライバは中高年ドライバに比べ、左右確認時の頭の動きの幅が狭くゆっくりとしており、車速も速くなる傾向があることを示した。さらに、短時間の注視も高齢ドライバの行動の特徴の一つであり、Dukic・Broberg [7] は視覚的探索行動を分析し、高齢ドライバは他の車などの動的対象物をあまり見ていないことを発見した。これらの先行研究でも示されているように、高齢ドライバは一時停止や左右確認が不十分な傾向にあるため、運転支援によって運転行動を変容させることが一時停止交差点での事故リスク低減につながる。

一時停止標識がある交差点では、一時停止線の前で停止し、左右を確認し車や歩行者が通過しないことを確認して

Basic Study for Personalization of Driver Assistance Systems at Intersections with Stop sign

^{†1} RYUSEI KIMURA, Japan Advanced Institute of Science and Technology

^{†2} TAKAHIRO TANAKA, Nagoya University

^{†3} SHOGO OKADA, Japan Advanced Institute of Science and Technology

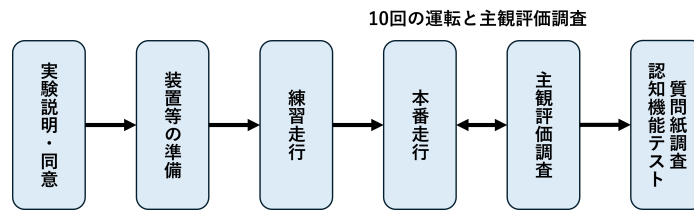


図1 被験者実験の手順.

から発進する必要がある。もし、一時停止または左右確認のどちらか一方でも不足していれば、重大な事故につながる可能性がある。Yonekawa[10]らは単に一時停止交差点で停止を促すのではなく、横断物の存在を確認し回避行動の準備を促したり、車両があれば警告を発したりする支援システムの重要性を主張している。一方で、複数の運転行動を指示する運転支援は特に認知機能が低下した運転中のドライバーにとって負担となる可能性がある。また、どのような運転行動を指示することで実際に運転行動が変容し、安全運転が促進されるかということも明らかになっていない。そこで、本研究ではオンライン運転支援において、支援の情報の多さ・支援の内容が異なる複数の支援を高齢ドライバーに対して行い、どのような支援を行うことで運転行動が変容されるかを調べる。

2.2. 高齢ドライバーのための運転支援

Geら[13]は、いくつかの運転シナリオにおいて有効な運転支援の内容を調査した。質問紙による調査を行い、“You are getting too close to the lead vehicle.”という状況を知らせる通知や、“Please increase the distance from the lead vehicle.”という行動を指示するフィードバックが、ドライバーの安全運転の意欲を高めることを示した。特に、状況通知と行動指示の両方が含まれる内容のフィードバックは、状況通知と行動指示のいずれかのみが含まれるフィードバックと同等かそれ以上にドライバーの安全運転の意欲を高めた。一方で、支援の内容と実際の運転行動の変容の関係性については明らかになっていない。特に高齢ドライバーにとって運転は認知的負荷がかかる行動であり、そのような状況で状況通知と行動指示の両方を含む支援を理解し、運転行動変化させられるかは明らかでない。運転支援に関して、支援の量と行動変容の関係性を調べた研究は見つからなかったが、道路標識が含む情報の量とドライバーの認知負荷や反応の関係性は多くの論文で明らかにされている。Fuら[14]は道路標識に含まれる情報の多さと標識への反応時間を分析し、情報が多いほど反応時間は遅くなることが分かった。また、同じ情報量の標識に反応するのにかかる時間は個人によって異なることも示された[15]。道路標識の情報の多さと同様に、運転中の音声支援の情報の多さとドライバーの

支援受容や支援に対する反応の関係性は運転支援を行う上で重要な要素であるにもかかわらず、明らかにはなっていない。本研究では、高齢ドライバーの事故リスクが高い一時停止標識付きの交差点において、一時停止標識があるという状況通知としっかり速度を落とし左右確認を促す行動指示をドライバーに提示し、支援内容・情報の多さと高齢ドライバーの運転行動変容の関係性を明らかにする。

運転支援システムを高齢ドライバーに適合する場合、支援の内容以外にも支援提示のモダリティ（音声、視覚、触覚など）、タイミング、および支援頻度などのパラメータによって支援効果は変化すると考えられる。支援提示のモダリティに関して、Xuら[16]は、高齢ドライバーに危険警告を行う際の効果的なモダリティとタイミングの閾値を調査した。触覚（ハンドルの振動）による警告を使用した場合、音声による警告よりも飛び出してきた歩行者に対する視線の固定時間がわずかに長くなることを示した。また、Adellら[17]では、アクセルペダルを通じた触覚支援が音声のピープ音警告よりも効果的であったものの、多くのドライバーはピープ音システムを好んでいた。これらの研究の結果とシステムの実装の容易さを考慮し、本研究で用いる運転支援システムでは音声による支援を採用する。

Xuら[16]は、高齢ドライバーが危険警告を早いタイミングで受けることを好み、運転パフォーマンスも早いタイミングの警告の方が良かったことを示した。そのため、本研究のシステムの支援提示タイミングはドライバーが支援を提示されてから運転行動を変えるのに十分な時間があるタイミングで行い、すべての支援は同じタイミングで行う。

3. 方法

3.1. 被験者

運転免許を保有し、日常的に運転を行う高齢者を中心に40人（女性26人、男性14人）のドライバーを募集し、被験者実験を行った。被験者の年齢の範囲は19歳から83歳で、平均年齢は59.48、標準偏差は14.93であった。被験者の運転歴の平均（標準偏差）は37.00（15.21）、運転頻度の平均（標準偏差）は週に5.87（1.88）日であった。2名の被験者が乗り物酔いのため実験を中断したため、残りの38名のデータを用いて分析を行う。

3.2. 実験の手順

被験者実験の手順を図 1 に示す。被験者実験は実験の説明・同意、準備、ドライビングシミュレータでの練習走行、10 回の本番走行と支援システムへの主観評価アンケート、質問紙調査、認知機能テストで構成される。まず、被験者からインフォームドコンセントを得たうえで、生体信号取得のための装置の装着やシミュレータの椅子の調整を行った。練習走行はシミュレータでの運転操作に慣れてもらうことを目的としており、被験者が十分に操作に慣れたと感じるまで練習走行用のコースでの運転を実施した。本番走行では一時停止標識がある交差点を走行しながら数種類の支援を体験し、その後支援に対する主観評価の調査を行った。シミュレータでの運転終了後、被験者のドライバ特性を獲得するために質問紙調査と認知機能テストを実施した。本実験は、北陸先端科学技術大学院大学ライフサイエンス委員会の承認を得た上で実施された。

3.3. 運転コースと一時停止支援

本番走行で被験者は全 10 セッションの運転をドライビングシミュレータ上で行う。運転コースは全て住宅街に設置された制限速度が 40km/h の一方通行道路であり、一時停止標識がある交差点を直進することが求められる。また、交差点の周辺には建物を設置することで左右の見通しが悪く、左右から通過する自動車または自転車の確認が難しいコースを作成した。運転セッションが開始されると「次の交差点を直進してください。」という音声アナウンスが行われ、被験者に経路案内を行う。一時停止交差点の通過時には複数の自動車または自転車のいずれかが交差する道路を通過するイベントが発生する。自動車または自転車の通過タイミングは、被験者が減速せずに交差点に進入した場合に衝突し、さらに一時停止した後左右確認を行わずに進出した場合に衝突するタイミングに設定した。そのため、被験者が自動車または自転車と衝突しないためには、交差点進入前に一時停止を行い、左右確認によって自動車または自転車が通過し安全に直進できることを確かめたうえで直進することが必要となる。1 回の運転セッションの平均走行時間は 71 秒であった。

被験者は交差点進入前に運転支援が行われるセッションと行われないセッションを体験する。運転支援が行われるセッションでは 4 種類の運転支援のうちいずれかの支援が行われる。支援はいずれも音声アナウンスで行われる。4 種類の運転支援のアナウンス内容は

支援 1: 「一時停止です。」

支援 2: 「一時停止です。しっかり停止しましょう。」

支援 3: 「一時停止です。左右を確認しましょう。」

支援 4: 「一時停止です。しっかり停止して、左右を確認しま

しょう。」

である。1 つ目の支援では交差点で一時停止が必要なことだけを伝える。2 つ目の支援では一時停止が必要なことに加えて、「しっかり停止しましょう。」といった具体的な運転行動を促す。3 つ目の支援では一時停止が必要なことに加えて、「左右を確認しましょう。」といった別の具体的な運転行動を促す。4 つ目の支援では一時停止が必要なことに加えて、「しっかり停止して、左右を確認しましょう。」といった 2 つの具体的な運転行動を促す。アナウンスの開始タイミングは全て同じであり、被験者がアナウンスを聞いてからブレーキを踏み、一時停止を行うのに十分な時間があるタイミングでアナウンスを行った。

3.4. データ収集

3.4.1 映像データ

運転中の視線・顔向き情報を取得するためにウェブカメラを前方スクリーン上部に設置し、運転セッション中の被験者の上半身の映像データを取得した。

3.4.2 生体データ

走行中の生体データを empathica 社のリストバンド型の EmbracePlus を用いて皮膚電気活動、体温、血圧を取得した。生体データ以外には加速度とジャイロスコープも EmbracePlus から取得した。

3.4.3 運転データ

運転中は速度や加速度などの車両情報、アクセル・ブレーキペダルの開閉度、操舵角に加えて、他の車両や自転車の位置、運転する車両との衝突が記録される。これらの運転ログ情報を用いて、交差点におけるドライバの運転行動や他の移動物体とのインタラクションの分析を行う。

3.4.4 質問紙調査

本研究では複数のドライバ特性を測定し運転行動や支援効果との関係性を分析を行う。以下では、本研究で使用した質問紙とドライバ特性について説明する。

運転スタイルチェックシート (Driving Style Questionnaire: 以降 DSQ と記す) [18] は Ishibashi らによって開発されたドライバ個人特性の評価指標であり、18 問で構成される質問によってドライバの心理的な運転スタイルを測定する。

運転負担感受性チェックシート (Workload Sensitivity Questionnaire: 以降 WSQ と記す) [18] はドライバの心理的な運転負担を測定する質問紙である。小嶋ら [19] は WSQ の短縮版を作成し、38 問から 10 問まで質問数を削減した。本研究ではこの短縮版 WSQ を使用する。

BigFive はパーソナリティを外向性、協調性、誠実性、神経症傾向、開放性の 5 つの枠組みでとらえようとするモデルである。本研究では Gosling らによって作成された BigFive

性格特性を 10 項目で測定する質問紙 [20] の日本語版である TIPI-J[21] を使用してドライバの性格特性を測定する。

自覚の高齢者運転特性アンケート [22] は Akamatsu らによって作成された質問紙で、運転場面での認知機能変化の自覚を測定する。18 項目で構成される質問紙で、視機能の変化 (状況知覚)、細かい操作能力の変化 (タスク/システム要因)、運転操作能力の変化 (行為の実行)、状況把握能力の変化 (状況理解・予測)、状況対応能力の変化 (判断・意図形成)、負担感受性の変化 (運転者特性・状態)、動作機能の変化 (運転者特性・状態) の計 7 項目を測定する。

3.4.5 認知機能テスト

TMT: TMT は神経障害のスクリーニングテストバッテリーなど広く使用されている神経心理学的検査であり認知的な処理速度、順序付け、柔軟性、視覚運動能力といった認知領域を測定すると考えられている [23]。現在よく使用されている TMT[8] には Part A と Part B の二種類があり、Part A では用紙に配置されている 1 から 25 までの数字を順に線で結び、Part B では用紙に配置されている数字と文字を「1, あ, 2, い」というように交互にかつ順番に線で結ぶ。本研究ではテストにかかる時間を計測し分析に用いる。

UFOV: UFOV テストは視覚感覚機能、視覚処理速度、視覚的注意など運転に関連する能力を測定するテストである。本研究で使用した UFOV テストは心理学的測定ソフトウェアの Inquisit 向けに配布されているものであり^{*1}、コンピュータを用いて実施した。UFOV テストは 3 つの下位テストから構成される。一つ目のテストでは画面の中心に短い時間 (16~325 ミリ秒) 提示される物体 (車またはトラック) を正しく識別するタスクを遂行し、中心視の処理速度を測定する。二つ目のテストでは画面中央に提示される物体 (車またはトラック) を正しく識別し、さらに周辺に提示される車の物体の位置 (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 のいずれかの角度) を認識するタスクを遂行し、分割的注意能力を測定する。三つ目のテストは二つ目のテストに注意を散漫させるための三角の物体を配置したものであり、選択的注意能力を測定する。それぞれのテストでは刺激の提示時間が次第に短くなり、難易度が高くなっていく。被験者が 75% の精度で正解するのに必要な刺激提示時間がそれぞれのテストの得点となる。

4. 運転行動の分析

はじめに、運転支によるの行動変容効果を確認するために運転セッションごとの運転行動指標を作成する。次に階層的重回帰分析を行い、支援種類ごとの支援効果の検証と

ドライバ特性・認知機能による支援効果の調整効果の分析を行う。ドライバ特性・認知機能による調整効果の存在は、ドライバ特性・認知機能によって支援効果が異なることを示し、運転支援システムの個人適合により効果的な支援を行うことの有効性が示唆される。階層的重回帰分析の概要を図 2 に示す。

4.1. 運転行動指標

支援効果を確認するために、複数の安全な運転行動の指標を運転データ・映像データから計算する。用いる運転行動指標は Time To Collision (TTC), 停止フレーム数, 左右確認回数, 左右確認時の平均車速, 左右確認時の平均注視秒数である。停止フレーム数以外の指標は [12] で使用されているものと同様である。これらの指標は 1 セッションごとに計算される。

4.1.1 TTC

TTC はある時点の速度を維持した場合の衝突までの時間であり、TTC の値が小さい運転セッションは衝突のリスクが高く危険な運転を行ったことを意味する。時系列フレームごとに被験者が運転する車と交差点において左右から通過する複数の自動車または自転車との TTC を計算し、セッションの中で最小の値をそのセッションの TTC とする。ただし、自動車または自転車と衝突したセッションについては TTC を 0 とする。

4.1.2 停止フレーム数

速度が 0.15km/h 未満となったフレーム数をブレーキにより停止しているフレームとみなし、セッション中の停止しているフレーム数を計算する。少ない停止フレーム数は一時停止が不十分であることを示す。

4.1.3 左右確認

左右確認行動を計測するために、映像データから運転中の被験者の顔向きを取得する。顔向きの取得にはオープンソースソフトウェアの Openface[24] を用いて、顔向きのピッチ, ヨー, ロール (radian) を 30Hz ごとに取得した。その後、窓幅を 15 とした移動平均によって、これらの顔向き時系列データの平滑化を行った。顔向きのヨー方向の角度の絶対値が $\theta = 0.17$ rad を超えたフレームを左右確認を行ったフレームとした。この閾値は [12] で使用されている値と同じであり、本研究でのデータセットにおいても左右確認を上手く検出することができた。左右確認を行っているフレームで連続しているものを左右確認フェーズとし、1 回の運転セッションごとの左右確認回数を左右確認フェーズの回数として算出した。少ない左右確認回数は不十分な安全確認を示す。

また、左右確認フェーズ中の平均車速をさらに 1 セッションの中で平均したものを左右確認時の平均車速とする。大

^{*1} <https://www.millisecond.com/download/library/usefulfieldofviewtest>

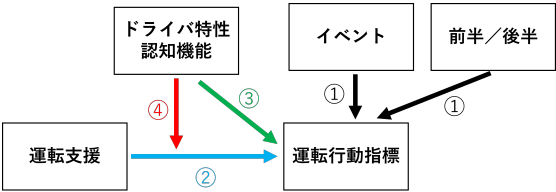


図 2 階層的重回帰分析の概要図。ステップごとに使用する変数を 1, 2, 3, 4 と追加し、運転行動指標を説明する回帰モデルを構築する。

きい速度での左右確認は危険な運転行動であり、左右確認時の平均車速を算出することでこの危険な運転行動を評価する。

左右確認フェーズ秒数をセッション内で平均し、左右確認時の平均注視秒数を算出する。安全確認時の小さい注視秒数は不十分な安全確認につながる。

4.2. 階層的重回帰分析

4.2.1 ステップ 1：発生イベントの違い・慣れの影響の分析

運転行動に影響を与える要因として、支援内容とドライバ特性以外にも発生イベントの違い（自動車通過・自転車通過）や発生イベントへの慣れといった要因が考えられる。そのため支援内容とドライバ特性について分析を行う前に、これら二つの要因が運転行動にどのような影響を与えるかについて分析を行う。被説明変数は運転行動指標であり、各指標に対して以下の式で回帰分析を行う。

$$y = \beta_0 + \beta_{car_event} D_{car_event}$$
 (1)

$$y = \beta_0 + \beta_{first_half} D_{first_half}$$
 (2)

説明変数のダミー変数 D_{car_event} は自動車通過イベントのセッションでは 1 の値をとり、自転車通過イベントのセッションでは 0 の値をとる。 D_{first_half} は全 10 回のセッションのうち前半 5 回のセッションでは 1 の値をとり、後半 5 回のセッションでは 0 の値をとる。

回帰分析の回帰係数 β_{car_event} , β_{first_half} , と回帰係数の p 値, 決定係数 R^2 を表 1, 2 に示す。有意水準を 5% に設定し、回帰係数の t 検定を行ったところ、発生イベントに関しては、TTC と左右確認回数において回帰係数が有意となった。自動車通過イベントが発生したセッションでは自転車通過イベントが発生したセッションに比べて TTC が小さくなり、左右確認回数が増加した。自動車は自転車よりも通過速度が速いので、自動車通過イベントでは TTC が短くなり、より多くの左右確認が行われたと考えられる。前半・後半セッションの変数に関しては左右確認時の平均注視秒数において回帰係数が有意となり、前半のほうが注視秒数が短かった。原因としては被験者が何度か自動車・自転車

表 1 発生イベント種類による運転行動指標の回帰分析。

運転行動指標	β_{car_event}	p	R^2
TTC	-0.703	0.000	0.124
停止フレーム	-0.021	0.839	0.000
左右確認回数	0.300	0.003	0.023
左右確認時の平均車速	0.039	0.712	0.000
左右確認時の平均注視秒数	-0.101	0.329	0.003

表 2 前半・後半セッションによる運転行動指標の回帰分析。

運転行動指標	β_{first_half}	p	R^2
TTC	-0.122	0.237	0.004
停止フレーム数	-0.057	0.583	0.001
左右確認回数	0.007	0.948	0.000
左右確認時の平均車速	-0.054	0.607	0.001
左右確認時の平均注視秒数	-0.270	0.008	0.018

イベントを経験するうちに、画面のどこに注目すれば効率よく交差点を直進することができるかを学び、視線の移動が少なくなったためと考えられる。これらの傾向は本来の目的である支援種類・ドライバ特性と運転行動指標の関係性の分析においてはノイズとなるため、各運転行動指標に対して有意となったダミー変数をこれからの分析では固定し、ノイズを抑制する。

4.2.2 ステップ 2：支援種類と運転行動の関係性の分析

次に支援の種類によって運転行動指標がどの程度変化するかを確認するため、支援種類の説明変数により運転行動指標の回帰分析を以下の式で行う。

$$y = \beta_0 + \beta_{s_0} D_{s_0} + \beta_{s_1} D_{s_1} + \beta_{s_2} D_{s_2} + \beta_{s_3} D_{s_3} + \beta_{s_4} D_{s_4}$$
 (3)

ダミー変数 D_{s_0} は支援が行われなかったセッションで 1 の値をとり、 D_{s_1} , D_{s_2} , D_{s_3} , D_{s_4} はそれぞれ支援種類に関する変数であり、例えば D_{s_1} は 3.3 章で述べた支援 1 が行われたセッションで 1 の値をとる。

回帰分析の回帰係数と回帰係数の p 値, 決定係数 R^2 , 回帰モデルの F 値を表 3 に示す。結果から、どの運転行動指標についても有意となった係数はなく、被験者全体をまとめて見ると支援の違いによる運転行動の変化は確かめられなかった。また、支援種類を考慮せずに支援あり/なしのダミー変数を用いた回帰分析も行ったが、その場合でも支援による運転行動の変化は確かめられなかった。

4.2.3 ステップ 3：ドライバ特性・認知機能と運転行動の関係性の分析

ステップ 2 で使用した支援種類のダミー変数に加えて、ドライバ特性・認知機能の変数を追加し回帰分析を行う。ド

表 3 支援種類による運転行動指標の回帰分析.

運転行動指標	$\beta_{s_0}(p)$	$\beta_{s_1}(p)$	$\beta_{s_2}(p)$	$\beta_{s_3}(p)$	$\beta_{s_4}(p)$	R^2	$F(p)$
TTC	0.06 (0.55)	0.05 (0.62)	0.11 (0.24)	0.11 (0.26)	-0.04 (0.69)	0.12	10.79 (0.00)
停止フレーム数	-0.12 (0.25)	0.17 (0.10)	-0.05 (0.61)	-0.03 (0.79)	0.03 (0.80)	-0.00	0.90 (0.46)
左右確認回数	-0.10 (0.35)	-0.08 (0.42)	0.01 (0.89)	0.10 (0.35)	-0.06 (0.58)	0.01	2.11 (0.06)
左右確認時の平均車速	0.08 (0.48)	-0.09 (0.41)	-0.11 (0.30)	0.10 (0.37)	0.02 (0.83)	-0.00	0.63 (0.64)
左右確認時の注視秒数	-0.04 (0.69)	0.05 (0.64)	0.08 (0.43)	-0.01 (0.95)	0.03 (0.77)	0.01	1.53 (0.18)

表 4 支援種類とドライバ特性・認知機能による運転行動指標の回帰分析.

運転行動指標	$\beta_{s_0}(p)$	$\beta_{s_1}(p)$	$\beta_{s_2}(p)$	$\beta_{s_3}(p)$	$\beta_{s_4}(p)$	R^2_{adj}	$F(p)$
TTC	0.07 (0.42)	0.07 (0.44)	0.14 (0.13)	0.12 (0.17)	-0.01 (0.88)	0.24	6.40 (0.00)
停止フレーム数	-0.12 (0.21)	0.17 (0.08)	-0.05 (0.60)	-0.03 (0.75)	0.03 (0.74)	0.09	3.72 (0.00)
左右確認回数	-0.10 (0.15)	-0.08 (0.26)	0.02 (0.79)	0.09 (0.20)	-0.06 (0.42)	0.54	16.50 (0.00)
左右確認時の平均車速	0.07 (0.28)	-0.08 (0.26)	-0.09 (0.18)	0.09 (0.21)	0.01 (0.86)	0.56	12.89 (0.00)
左右確認時の注視秒数	-0.03 (0.74)	0.06 (0.49)	0.09 (0.27)	0.00 (0.95)	0.05 (0.56)	0.38	6.80 (0.00)

ライバ特性の変数は質問紙調査によって得られた 31 個の変数であり、認知機能の変数は TMT と UFOV に関する 6 個であり、すべての変数に標準化を行った。ステップ 2 で用いた支援種類の変数に加えてこれらのドライバ特性・認知機能の変数を使用し、増加法の逐次変数選択により自由度修正済み決定係数が増加するまで変数を追加し回帰モデルを構築した。ただし、支援種類に関する全ての変数は最初に必ず追加し、その後ドライバ特性・認知機能の変数を追加する。表 4 に変数選択後の回帰分析における支援種類のダミー変数の回帰係数と回帰係数の p 値、自由度修正済み決定係数 R^2_{adj} 、回帰モデルの F 値を示す。

有意となった支援種類のダミー変数はなかったが、ドライバ特性・認知機能変数を追加することですべての行動指標において、ステップ 2 の回帰モデルよりも自由度修正済み決定係数が上昇した。特に左右確認回数と左右確認時の平均車速の自由度修正済み決定係数はそれぞれ、0.54、0.56 と大幅に上昇し、ドライバ特性によってこれらの指標が大きく説明されることが示された。一方で停止フレーム数の自由度修正済み決定係数は 0.09 と他の行動指標に比べて低く、支援種類変数とドライバ特性変数では停止フレーム数を説明できないことを示している。

4.2.4 ステップ 4：ドライバ特性・認知機能と支援種類の交互作用の分析

最後に、支援種類とドライバ特性・認知機能の変数の交互作用項によってどの程度行動指標が説明されるかを明らかにする。この交互作用項はドライバ特性・認知機能に応じて異なる支援効果をとらえる役割を持つ。ステップ 3 で使用した支援種類変数、ドライバ特性・認知機能変数に加えて、支援種類 - ドライバ特性・認知機能のすべての組合せ

による交互作用項を用いて増加法の逐次変数選択により回帰モデルを構築する。表 5 に変数選択後の回帰分析における支援種類のダミー変数の回帰係数と回帰係数の p 値、自由度修正済み決定係数 R^2_{adj} 、回帰モデルの F 値を示す。

停止フレーム数の回帰モデルにおいて $\beta_{s_1} = 0.18$ の p 値が 0.02 で有意となった。つまり、音声支援の内容が「一時停止です。」であった場合、他の支援に比べて停止フレーム数が増加した。自由度修正済み決定係数に関しては全ての行動指標においてステップ 3 の回帰モデルよりも高い値となった。そのため、支援種類とドライバ特性・認知機能の変数の交互作用は運転行動を説明するのに有効な変数であり、ドライバ特性・認知機能によって効果的な支援種類が異なることが分かる。特に停止フレーム数の決定係数が大きく増加したことから、停止フレーム数は支援による行動変容効果がドライバに大きく依存していることが示された。

5. 考察

ステップ 3 とステップ 4 の回帰分析の結果（表 4、表 5）を比較し、交互作用項の追加による回帰モデルの決定係数が最も向上した停止フレーム数について、どのような交互作用項が精度向上をもたらしたかを分析する。表 6 に特徴量選択後の回帰モデルにおいて係数の p 値が 0.05 未満であった交互作用項を示す。16 個の交互作用項が有意となり、そのうち 15 個が一時停止を知らせるだけの支援 1 との交互作用項であった。このことから、支援 1 が行われたときにドライバ特性や認知機能に応じて停止フレーム数に変化が起きやすいことが分かる。TMT や UFOV に関する係数が負となっているため、認知機能が低いドライバは一時停止を知ら

表 5 支援種類とドライバ特性・認知機能、またそれらの交互作用による運転行動指標の回帰分析.

運転行動指標	$\beta_{s_0} (p)$	$\beta_{s_1} (p)$	$\beta_{s_2} (p)$	$\beta_{s_3} (p)$	$\beta_{s_4} (p)$	R^2_{adj}	$F (p)$
TTC	0.07 (0.36)	0.06 (0.45)	0.13 (0.09)	0.11 (0.13)	-0.01 (0.87)	0.49	4.73 (0.00)
停止フレーム数	-0.11 (0.16)	0.18 (0.02)	-0.05 (0.56)	-0.02 (0.81)	0.04 (0.63)	0.43	4.62 (0.00)
左右確認回数	-0.09 (0.10)	-0.08 (0.16)	0.02 (0.72)	0.10 (0.09)	-0.05 (0.37)	0.71	9.69 (0.00)
左右確認時の平均車速	0.08 (0.20)	-0.08 (0.19)	-0.10 (0.10)	0.07 (0.22)	0.00 (0.99)	0.68	9.31 (0.00)
左右確認時の注視秒数	-0.03 (0.61)	0.06 (0.40)	0.09 (0.18)	-0.01 (0.86)	0.05 (0.49)	0.58	6.07 (0.00)

表 6 停止フレーム数の特徴量選択済み回帰モデルにおいて有意であった交互作用項.

支援種類	ドライバ特性・認知機能項目	回帰係数
support1	TMT_B (認知機能)	-0.92
	UFOV_1 (認知機能)	-1.10
	運転に対する消極性 (DSQ)	0.85
	せっかちな運転 (DSQ)	0.84
	几帳面な運転 (DSQ)	0.82
	細かいハンドル操作や速度調整が必要な道で運転 (WSQ)	-0.62
	細かいハンドル操作をひんばんにする運転 (WSQ)	0.73
	ルートや目的地を探しながら運転 (WSQ)	-1.36
	動作機能の変化 (運転者特性・状態) (自覚的)	0.50
	状況対応能力の変化 (判断・意図形成) (自覚的)	1.37
	状況把握能力の変化 (状況理解・予測) (自覚的)	0.74
	細かい操作能力の変化 (タスク/システム要因) (自覚的)	-0.58
	勤勉性 (TIPI)	0.76
	神経症傾向 (TIPI)	-0.57
support3	開放性 (TIPI)	-0.31
	状況把握能力の変化 (状況理解・予測) (自覚的)	0.28

せる支援のみの場合は停止フレームが大きいことが分かる。また、几帳面な運転傾向にあるドライバや勤勉性が高いドライバは状況指示だけでもしっかり停止する傾向にあった。さらに、状況対応能力や状況把握能力の低下を自覚しているドライバも状況指示の支援でしっかり停止する傾向があり、運転能力の低下に気づき安全運転を心がけているため、少ない情報の支援でも安全運転を行った可能性がある。

しかし、多くの交互作用項が有意となっていることから、ドライバのある特性のみに着目して支援効果の変容を結論付けることは難しく、支援効果は多様なドライバ特性や認知機能に応じて変化することが考えられる。

6. まとめ

本研究では、高齢ドライバに向けた一時停止交差点での運転支援において、効果的な支援内容や情報の多さ、また支援による運転行動変容とドライバ特性・認知機能との関係性を分析した。回帰分析の結果、全体的には支援内容や情報の多さによって運転行動に変化はなかった。しかし、支

援種類とドライバ特性・認知機能の交互作用項を追加することで運転行動を大きく説明できることが分かり、ドライバ特性・認知機能によって効果的な支援の種類は異なることが明らかになった。特に停止フレーム数は本研究で用いた運転行動指標の中で最も支援効果がドライバ特性・認知機能に依存した指標であり、ドライバの多様な特性に応じて支援効果が異なることが示唆された。本研究では、ドライバ特性・認知機能によって支援効果が異なった理由や、今後どのように運転支援の個人適応を行えばよいかなどの分析は行われておらず、これらは今後の課題である。

参考文献

[1] 内閣府：令和 6 年版交通安全白書 全文 (2024)。(2024 年 7 月 12 日取得)。
[2] Anderson, S. W., Rizzo, M., Shi, Q., Uc, E. Y. and Dawson, J. D.: Cognitive abilities related to driving performance in a simulator and crashing on the road, *Driving Assessment Conference*, Vol. 3, No. 2005, University of Iowa (2005).

- [3] Ragland, D. R., Satariano, W. A. and MacLeod, K. E.: Driving cessation and increased depressive symptoms, *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, Vol. 60, No. 3, pp. 399–403 (2005).
- [4] Bengler, K., Dietmayer, K., Farber, B., Maurer, M., Stiller, C. and Winner, H.: Three decades of driver assistance systems: Review and future perspectives, *IEEE Intelligent transportation systems magazine*, Vol. 6, No. 4, pp. 6–22 (2014).
- [5] Martinez, C. M., Heucke, M., Wang, F.-Y., Gao, B. and Cao, D.: Driving style recognition for intelligent vehicle control and advanced driver assistance: A survey, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 19, No. 3, pp. 666–676 (2017).
- [6] McGwin Jr, G. and Brown, D. B.: Characteristics of traffic crashes among young, middle-aged, and older drivers, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 31, No. 3, pp. 181–198 (1999).
- [7] Dukic, T. and Broberg, T.: Older drivers’ visual search behaviour at intersections, *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, Vol. 15, No. 4, pp. 462–470 (2012).
- [8] Reitan, R. M. and Reitan, R. M.: Trail Making Test: Manual for Administration and Scoring (1992).
- [9] Ball, K. and Owsley, C.: The useful field of view test: a new technique for evaluating age-related declines in visual function., *Journal of the American Optometric Association*, Vol. 64, No. 1, pp. 71–79 (1993).
- [10] Yonekawa, T., Sasaki, K. and Iwazaki, K.: Driving Behavior Analysis of Elderly Drivers Passing Through Stop Sign Intersection Using Driving Simulator, *International journal of automotive engineering*, Vol. 5, pp. 137–144 (2014).
- [11] Yonekawa, T., Tanaka, T., Aoki, H., Yamagishi, M., Yoshihara, Y., Takeuchi, E., Takahashi, I., Ninomiya, Y., Kanamori, H., Suzuki, T. and Inagami, M.: Relationship between Senior Drivers’ Cognitive and Physical Functions and Urban Driving Behaviors during Behind-the-Wheel Driving Education Sessions with Driving Instructors, *Journal of Transportation Technologies*, Vol. 7, pp. 148–166 (2017).
- [12] Yoshihara, Y., Tanaka, T., Osuga, S., Fujikake, K., Karatas, N. and Kanamori, H.: Identifying High-Risk Older Drivers by Head-Movement Monitoring Using a Commercial Driver Monitoring Camera, *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 1021–1028 (2020).
- [13] Ge, Y., Luo, X. and Qu, W.: Impact of feedback content on dangerous driving behaviours based on the triangle model of responsibility, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* (2023).
- [14] Fu, Q., Wu, C. and chao Lv, N.: Study on the Reaction Time for Road Traffic Signs Information Volume, *ICTIS 2013*, pp. 1533–1541 (2013).
- [15] Chen, Y., Du, Z., Xu, J. and Luo, S.: Impact of traffic signs on driving speed at mountain highway tunnel entrances- The role of low-volume intermittent information, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 106, pp. 328–339 (2024).
- [16] Xu, J. and Bowers, A. R.: Hazard warning modalities and timing thresholds for older drivers with impaired vision., *Accident; analysis and prevention*, Vol. 202, p. 107599 (2024).
- [17] Adell, E., Várhelyi, A. and Hjälm Dahl, M.: Auditory and haptic systems for in-car speed management—A comparative real life study, *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, Vol. 11, No. 6, pp. 445–458 (2008).
- [18] Ishibashi, M., Okuwa, M., Doi, S. and Akamatsu, M.: Indices for characterizing driving style and their relevance to car following behavior, *SICE Annual Conference 2007*, IEEE, pp. 1132–1137 (2007).
- [19] 小嶋理江, 青木宏文, 山内さつき, 島崎 敢, 米川 隆: 高齢ドライバのための短縮版「運転負担感受性チェックシート」作成の試み, *自動車技術会論文集*, Vol. 53, No. 3, pp. 560–566 (2022).
- [20] Gosling, S. D., Rentfrow, P. J. and Swann Jr, W. B.: A very brief measure of the Big-Five personality domains, *Journal of Research in personality*, Vol. 37, No. 6, pp. 504–528 (2003).
- [21] 小塩真司, 阿部晋吾, Cutrone, P.: 日本語版 Ten Item Personality Inventory (TIPI-J) 作成の試み, パーソナリティ研究, Vol. 21, No. 1, pp. 40–52 (2012).
- [22] Akamatsu, M., Hayama, K., Iwasaki, A., Takahashi, J. and Daigo, H.: Cognitive and Physical Factors in Changes to the Automobile Driving Ability of Elderly People and Their Mobility Life .Questionnaire Survey in Various Regions of Japan, *Iatss Research*, Vol. 30, pp. 38–51 (2006).
- [23] Bowie, C. R. and Harvey, P. D.: Administration and interpretation of the Trail Making Test, *Nature Protocols*, Vol. 1, pp. 2277–2281 (2006).
- [24] Baltrušaitis, T., Robinson, P. and Morency, L.-P.: Openface: an open source facial behavior analysis toolkit, *2016 IEEE winter conference on applications of computer vision (WACV)*, IEEE, pp. 1–10 (2016).