

追従走行時のドライバ挙動

自動車安全研究領域 成波 谷口哲夫 波多野忠 松島和男

1. ま え が き

ドライバの運転負担軽減や事故予防のため、様々な運転支援システムが開発され、実用化されつつある。これらのシステムはドライバの運転を補助するものなので、ドライバの運転特性に適應させる必要がある。しかし、ドライバの運転特性における研究は技術開発ほど進んでおらず、運転支援システムの実用化のキーになっている。運転時は一般に他の車に追従して走行することが多く、追突事故が自動車事故の全体の中で最も大きな割合を占めている⁽¹⁾。そのため、追突警報システムや追突軽減システムなどが精力的に開発されている。従って、追従走行時のドライバ運転特性の解明はより重要であると考えられる。

本研究は追従走行時のドライバの運転行動を取り上げ、その時のドライバの運転特性を明らかにすることを目的としている。前報⁽²⁾では、追従走行時にドライバがどのように車間距離を設定するかを、運転動機の観点から検討したが、本論文では、その車間距離を維持して先行車に追従する際にドライバがどのように運転するかについて解析する。

追従走行時のドライバの運転動作について、いくつかの研究がなされている⁽³⁻⁵⁾が、多くの場合単純な環境で単一のタスクを課された時のドライバのパフォーマンス、即ちドライバがすべての注意がそのタスクに向け、「最善を尽くそう」との条件で得られた最大能力を評価するものであり、道路上で実際に生じる運転行動とは異なるため、このような結果を実際の道路上の運転行動へ直接一般化することができるかは疑問である。実路上ではドライバの運転動作が操作能力よりも、ドライバの制御方針、即ちどのような目標にして何を重視するかは、ドライバの運転動作に大きな影響を与える場合が多いと考えられる。また走行環境や課された運転タスクなどがドライバの制御方針などに影響すると予想される。

これらのことによつて、本論文では、実路上でのドライバの追従時の運転動作を調べた上、ドライバの操作動作そのものより、ドライバの制御方針や動作における意志決定などに重点を置いて、追従時のドライバの運転動作のメカニズムを解析する。

2. 実験方法

供試車両2台を用いて、高速道路において追従走行実験を実施し、被験者の追従走行時の運動動作を調べた。

被験者に、「普段通りに先行車について走行して下さい」と教示し、その以外に運転の仕方については指示しなかった。被験者は20~50代の男性4名であった。実験では走行距離が約100kmであり、その中実験走行(データ計測)が約20kmであった。

道路環境が被験者の運転動作に影響すると思われるため、各被験者の実験は同じ区間、同じ時間帯で行った。実験は平日の午後4:00~6:00に行い、交通量はやや込んでいる状態であった(定地点測定で、走行車線は約1000台/時間、追越車線は約1300台/時間)。

実験中にドライバの操作動作、生体情報と車両状態量を計測した。ドライバの操作動作はアクセル開度、ブレーキ踏力とハンドル角、生体情報は心電図、車両状態量は車間距離、先行車と追従車の速度と加速度で、計9項目であった。

3. 解析方法

3.1. 運転動作の分類

ドライバの運転は一連の動作により構成され、運転動作には個人差があるものの、各ドライバは個人特有のパターンがあり、ほぼ一定である⁽⁶⁾。図1は、本実験での被験者Aのアクセル操作とブレーキ操作の一例である。図1より、運転動作特にアクセル操作はほぼ段階状に変化し、動作が始まってから、

操作量が一定まで立ち上がって、そしてそのまま終了まで保たれ、動作中に細かい調整をあまりしないことが読み取れる。他の被験者も似たようなパターンを示している。このことは、動作開始タイミング、最大操作量と持続時間が分かれば、被験者の運転動作がほぼ特定できることを示している。また、被験者は入力情報に基づき新しい動作のタイミングや最大操作量を決めた上操作を行い、動作中に時々刻々そのときの走行状況等に合わせて操作量を調整することがなく、既定のパターンで動作することを示している。言い換えれば、最大操作量は、動作開始の時点で決められているので、その時点での走行状況に関連するものと予想される。これに対して、動作中には各時刻の操作量が必ずしもそのときの走行状況に連動しないと考えられる。以上の考えに基づき、本論文では、被験者の運転動作の操作量と動作開始時の車両状態量等の入力情報との関係に着目し、重回帰分析法で被験者の運転動作特性を解析する。

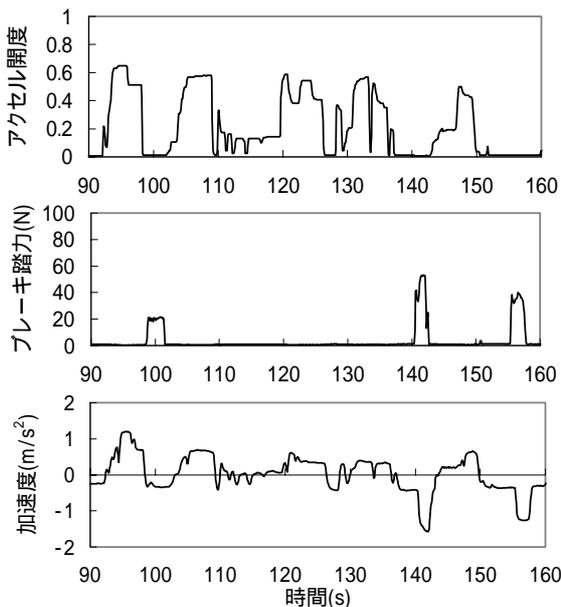


図1 アクセルとブレーキ操作（被験者A）

追従走行中に、ドライバは基本的にはアクセルやブレーキの操作によって速度を調整し、また速度調整によって先行車との車間距離を調整すると考えられる。速度調整の目的によれば、ドライバの運転動作は加速、減速と速度維持（自車加速度 0）の三つの動作に大別することができる。高速道路では、エンジンプレーキ（アクセルオフ）による減速する機会が多いため、ここで、ドライバの減速動作をさらにエンジンプレーキによる減速動作とフットブレーキ

キによる減速動作に細分する。即ち、本論文では、追従走行時の被験者の運転動作を速度維持、加速、エンジンプレーキ減速とフットブレーキ減速の4つに分けることにする。

各動作の操作量については、アクセル操作にせよブレーキ操作にせよ、いずれも速度調整のための制御量であり、また車両の前後加速度との相関が強い（相関係数 0.9 以上）ため、ここでは、操作量を、動作毎の最大加速度修正量（MVA）、即ち各動作中の最大加速度と該動作開始時の初期加速度との差を用いて評価する。

3.2. 重回帰分析

被験者がどのような情報の下に判断し、またそれらの情報が運転動作にどのくらい規定しているかについて、重回帰分析法を用いて解析する。

被験者の運転は、基本的には多目標制御行動であると考えられる。追従走行時の被験者は、先行車追従という行動目標のほか、安全性、運転負担、乗り心地なども考慮して運転動作を決めると考えられる。そこで、ここでは、入力情報として、追従タスクに直接関連すると思われる車両状態量以外、被験者の運転動作に影響すると考えられるほか情報も含めて解析を行う。

目的変数は最大加速度修正量とした。説明変数は、最初に、動作開始時の車両状態量として車間距離、車間時間、自車と先行車の速度と加速度、相対速度、相対加速度、被験者の緊張度を表すものとして RRI （心拍の R 波間隔、緊張すると小さくなる）、道路の線形を表すものとしてハンドル角などを取り上げ、変数増減法により選別した結果、車間距離 (hd)、相対速度 (vr)、相対加速度 (ar)、自車速度 ($v0$)、自車加速度 ($a0$)、 RRI とハンドル角 (str) の 7 変数とした。重回帰分析の結果、各被験者において重回帰係数は 0.8~0.9 ($p<0.01$) であり、被験者の運転動作をほぼ説明できると判断される。ここで、重回帰係数がより大きくなる理由の一つとしては、被験者の運転行動に大きく影響する環境要因が含まれていないことであると考えられる。

4. 解析結果

4.1. 動作における意思決定

図2には、目的変数（MVA）に対する各説明変数の標準偏回帰係数（以下回帰係数という）を示す。

回帰係数の方向（プラス・マイナス）は定性的にその説明変数が目的変数をどう規定するか、大きさ（絶対値）は定量的にどのくらい規定するか（寄与度）を表すものである。これらの回帰係数の比較によって、被験者がどの情報を重視し、どのように動作を決めたかを分析することができると考えられる。図2より、以下のことが読み取れる。

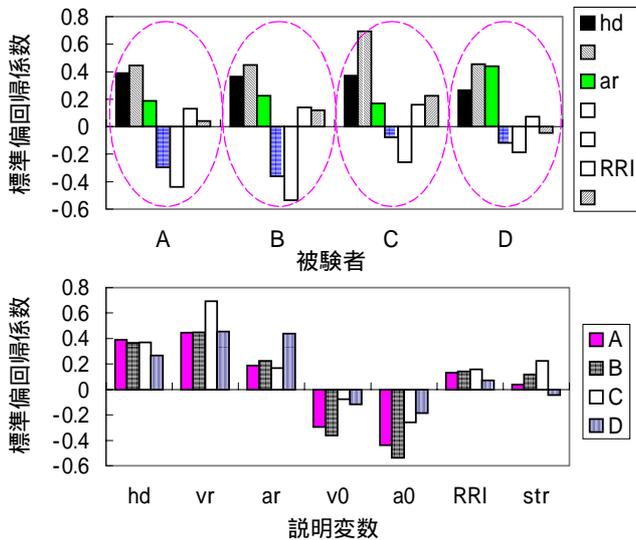


図2 最大加速度修正量における各説明係数の標準偏回帰係数

1) 各被験者 (A,B,C,D) において、説明変数における回帰係数の方向と相対的な大きさについては、個人差があるものの、ほぼ同様である (上図)。このことから、追従運転時に各被験者が似たようなパターンで意志決定を行うと考えられる。

2) 追従タスクに直接関連する情報が相対速度、車間距離と相対加速度であると考えられる。これらの情報については、被験者間で個人差が小さく、かつ寄与度が全体の中に占める割合が大きい (下図) のので、被験者は主に追従タスクに関連するこれらの情報に基づいて運転動作を決めると考えられる。

3) 相対速度における回帰係数は、車間距離に比べて絶対値が大きい (特に被験者 C,D, 上図) ため、被験者が車間距離よりも相対速度を重視すると思われる。相対加速度については、被験者 D を除けば回帰係数の絶対値が小さい。これは視覚による相対加速度の認知が難しいためであると考えられる。

4) 自車速度と自車加速度における回帰係数は、人によって異なり (A,B 大, C,D 小), 個人差が大きい。速度は安全性に、加速度は乗り心地に関係するものであると考えられるので、個人差が大きいことは、

安全性や乗り心地などのメインタスク以外の目標に対して、人によって考え方が異なることを示している。

5) RRI の回帰係数は全員プラスであるが、絶対値が小さい (下図) ため、被験者が緊張の場面において加速を控える傾向があるが、運転動作への影響が小さいと考えられる。また、ハンドル角についても絶対値が小さく、運転動作への影響が小さいと考えられる。

以上のことから、被験者は追従走行時主に相対速度、車間距離、自車速度と自車加速度などの情報に基づいて動作を決める。また被験者は車間距離より相対速度を重視し、追従という目標のほか、安全性や乗り心地なども考慮して、似たようなパターンで運転動作における意思決定を行うと考えられる。

4.2. 制御成績

運転動作の結果は、被験者の運転制御成績に反映されると思われる。ここでは、制御目標 (車間距離と相対速度) の標準偏差を用いて被験者の制御成績を評価する。図3には、高速道路での各被験者の車間距離と相対速度の標準偏差を示す。一般に車間距離が長くなると、車間距離と相対速度の制御成績が悪くなるため、制御成績を評価する際に車間距離の影響を考慮する必要があるが、今回は、各被験者の車間距離には大きな差がないため、その影響を考慮しない。

図3より、車間距離の標準偏差は個人差が大きいですが、相対速度の標準偏差は個人差が小さいことがわかる。車間距離と相対速度の標準偏差の絶対値は直

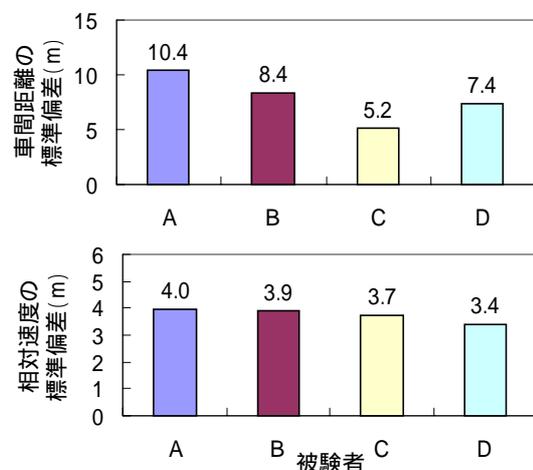


図3 追従走行時の各被験者の車間距離と相対速度における標準偏

接比較できないため、それぞれの認知閾値に比べて検討する。

Torf⁽⁷⁾は実車実験で相対速度における認知閾値を調べ、約 $3.0 \sim 3.7 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ (相対速度 / 車間距離, 車間距離 24m) である結果を得ている。本研究に適用して計算すると、それは約 $3.2 \sim 5.3 \text{km/h}$ (車間距離の平均値約 $30 \sim 40 \text{m}$) にあたり、図3の相対速度の標準偏差に近いことがわかる。各被験者の相対速度の標準偏差がほぼ同じ、かつ相対速度の閾値に近いことは、相対速度の制御が被験者の認知限界に関係する可能性があることを示唆している。

また、Snider⁽⁸⁾は車間距離の変化における認知閾値について実車実験で調査し、約 6.1% (車間距離の変化 / 車間距離, 車間距離 38m の場合) であることを示している。本研究に適用するとそれは約 $1.8 \sim 2.4 \text{m}$ にあたる。図3に示す車間距離の標準偏差がその値をはるかに上回る。即ち、認知閾値に比べて見ると、車間距離の制御成績が相対速度より悪いことを示している。

5. 考察

前章では、被験者は車間距離より相対速度を重視する制御方針の下に追従運転を行うと推定された。その理由については、以下に被験者の制御能力と制御容易さの観点から考察する。そのため、テストコースにおいて定車間距離の追従走行実験を行った。

5.1. 実験方法

実験は片道 2 車線のテストコース周回路 (5 km / 周) で行った。目標車間距離を指示してからスタートする。車速が 80km/h になってから、車間距離を被験者に口頭で提示しながら車間距離を目標車間距離まで調整してもらう。車両状態がほぼ安定してから、被験者に「できるだけこの車間距離を維持して追従して下さい」と教示し、計測を始める。先行車の走り方が追従車の運転動作や制御精度に影響すると考えられるので、先行車に、速度範囲を $80 \pm 20 \text{km/h}$ (第2章の高速道路実験に準じる)、各試行の速度のバラツキをなるべく同じようにすると教示した。実験条件として、目標車間距離 10m, 20m, 30m, 40m, 50m の 5 条件とし、被験者毎にランダムに指示した。被験者は高速道路の実験と同じメンバーであった。

5.2. 制御能力

高速道路とテストコース (A, B, C : 30m, D: 40m, 高速道路の平均車間距離に最も近い目標車間条件) での先行車速度の標準偏差を図4に示す。図4より、テストコースでは、各試行において先行車速度のバラツキは大きな差がないこと、また、高速道路に比べてテストコースでは先行車速度のバラツキが大きいことがわかる。

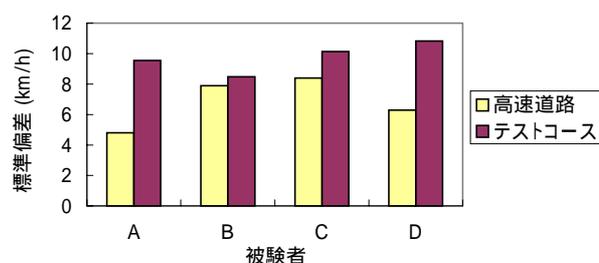


図4 先行車速度の標準偏差

図5には、高速道路とテストコースでの車間距離と相対速度における標準偏差を示す。テストコースでの各被験者の車間条件は図4と同様である。

相対速度 (図5下図) については、被験者 B は高速道路より標準偏差を抑えたが、他の被験者は高速道路と同様である。ここで、興味深いのは、道路環境 (高速道路 vs テストコース) や運転タスク (通常追従 vs 定車間追従)、また走行条件 (先行車速度等) などに関係せず、各被験者は相対速度における制御精度がほぼ同じであることである。このことは、相対速度の制御において、被験者が運転状況の変化に対応する能力を持つことと、それ以上に制御成績を上げられないことを示している。また、異なる状況

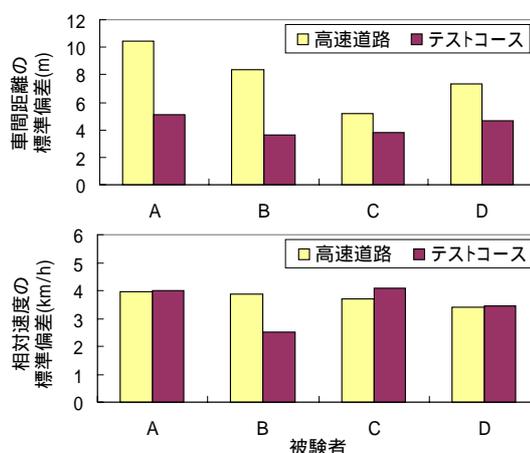


図5 高速道路とテストコースでの車間距離と相対速度の標準偏差の比較

では各被験者において、相対速度の標準偏差が 4.2 節に述べた認知閾値に近いことは、相対速度の制御において、高速道路でもテストコースでも被験者が認知限界能力を發揮していると推測される。

車間距離（図 5 上図）については、被験者全員、特に高速道路でバラツキの大きい被験者 A,B が大幅に改善し、かつ各被験者とも標準偏差が認知閾値に近づいている。このことは、被験者の制御能力について、相対速度にせよ車間距離にせよ被験者間には大きな差がない。また、高速道路では車間距離の制御成績が悪いのは、被験者の制御能力の問題ではないと考えられる。

5.3. 制御容易さ

高速道路とテストコースでの被験者の操作量と操作頻度を比較する。図 6 には、被験者 A の高速道路とテストコース（目標車間 30m）での最大加速度修正量（MVA）と最大加速度（MA）、及び持続時間の平均値と標準偏差を示す。図 6 より、高速道路に比べてテストコースでは被験者の操作量が大きく、持続時間が短いことがわかる ($p < 0.01$)。前述のように、高速道路に比べてテストコースでは、相対速度の制御精度はほぼ同じだが、車間距離の制御精度は大幅に改善された。このことも考えると、図 6 の結果は、被験者が車間距離のバラツキを抑えるために、動作修正を大きくかつ頻繁に行うようになることを示している。これにより、被験者は運転負担も増え、また乗り心地も悪くなると予想される。即ち、同じ認知限界までにバラツキを抑えるのに、車間距離が相対速度より制御しにくいことを示唆している。その理由についてはさらに検討する。

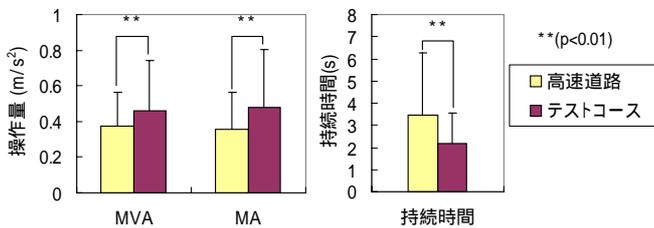


図 6 高速道路とテストコースでの操作動作の比較
（目標車間 30m, 被験者 A）

人間の運動の知覚特性から見ると、人間は参照のない絶対運動への検知が参照のある相対運動より悪い⁽⁹⁾。追従運転中に相対速度については常に先行車との相対静止状態 ($v_r=0$) と比較することができるのに対して、車間距離については目標車間距離の

ような参照がない（あるとしてもドライバの内部の心理距離というものである）ため、認知しにくいと考えられる。また、人間の車間距離と相対速度に対する認知閾値が注視時間によって異なる変化が起こり、即ち、注視時間が長くなると、相対速度における閾値は下げるが、車間距離における閾値が上がる。これが Evans⁽¹⁰⁾の研究からわかっている。これによれば、追従運転時、特に何かの動作を行おうとする時に、ドライバは先行車への注視時間が長くなると予想される。その結果、相対速度の認知がより易しく、車間距離の認知がより難しくなると推測される。

また、一般に人間が運動する目標を追従する時に、認知・判断から操作までに時間がかかる。このような遅れ時間を補償するために人間が予測制御を行う。ただし、追従させる制御対象の特性が 2 階以上の積分系になると制御が困難になる⁽¹¹⁾。恐らくこれは、制御者が自らの制御動作から制御対象の将来の状態を予測しにくくなることによるものであると考えられる。車の場合、ドライバのアクセルやブレーキ操作が車両の前後加速度にほぼ比例するので、ドライバの操作量 vs 相対速度には 1 階の積分要素が入り、操作量 vs 車間距離には 2 階の積分要素が入っていると考えられる。従って、車間距離は相対速度より制御しにくいと推測される。

以上のことから、車間距離は相対速度に比べて認知しにくくかつ制御しにくい。そのため、制御成績を上げるために運転負担や乗り心地などを犠牲しなければならない。それを避けるために、高速道路では被験者が意図的に車間距離の制御を緩めていると推測される。

6. まとめ

高速道路において追従走行実験を行い、追従走行時の被験者の運転動作を解析した。その結果、

(1) 追従走行時に、被験者は多目標制御を行い、追従という目標のほか、安全性や乗り心地なども考慮して、各被験者とも似たようなパターンで運転動作における意志決定を行うことがわかった。

(2) 被験者は主に相対速度、車間距離、自車速度と自車加速度などの情報に基づき動作を決めるが、その内車間距離よりも相対速度を重視することがわかった。

(3) 被験者は、基本的には、車間距離や相対速度を目標値に近づけるように制御を行うが、相対速度より車間距離が認知しにくく、かつ制御しにくいので、被験者が運転負担軽減などのため車間距離の制御を意図的に緩めると推測される。

今後は、さらに被験者の運転行動に影響を与えると思われる環境要因などを取り上げて検討することが必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 交通統計 H13 年版,(財)交通事故総合分析センター(2002)
- [2] 成波他,“追従走行時のドライバの運転特性に関する研究 - 運転動機の観点から見た車間距離設定のメカニズム -”,第2回交通安全環境研究所研究発表会論文集,p.69-74 (2002)
- [3] Y.Hattori, etc, “Analysis of Driver’s Decelerating Strategy in a Car-following Situation”, Vehicle System Dynamics, Vol.24, p.299-311 (1995)
- [4] 澤田東一他,“車間距離制御における運転者の動作特性”,人間工学, Vol.33, No.6, pp.363-370 (1997)
- [5] 飯島徹也他,“ブレーキ制御付 ACC の開発”,自動車技術会学術講演会前刷集, No.114-99, p.1-4 (1999)
- [6] 天野也寸志他,“緊急時におけるドライバの運転動作モデル(障害物回避時および車両特性急変時への適用)”,日本機械学会論文集(C), Vol.65, No.632, p.282-288(1999)
- [7] A.S.Torf and L.Duckstein, “A methodology for the determination of driver perceptual latency in car following”, Human Factors, Vol.8, p.441-447 (1966)
- [8] J.H.Snider, “The detection threshold for changes in headway”, Report No.EES202B-4, Ohio State Univ. (1966)
- [9] 日本視覚学会, 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店(2000)
- [10] L.Evans and R.Rothery, “Perceptual Thresholds in Car-following”, Transportation Science, Vol.11, No.1, p.60-72 (1977)
- [11] 佐藤方彦, 人間工学の基準数値数式便覧, 技報堂(1992)