

ドライビングシミュレータによる ドライバ特性の把握と運転支援機能の評価

相馬 仁*
若杉貴志**

鈴木桂輔**
平松金雄***

ドライビングシミュレータは、危険な状況を安全に実験できる利点があり、また、実験条件の再現性に優れているため、同一の走行状況を繰り返し多数の被験者に対して実験できるのが特徴である。本研究ではこの特徴を活かし、まずドライビングシミュレータを用いたドライバ特性解析に基づく運転支援機能の設計・評価の方策について提案した。次に、この方策に従って、車線逸脱回避におけるドライバの特性解析を行い、車線逸脱の防止を目的とした運転支援機能の評価を行った。これより、車線逸脱警報のタイミング設定および警報の効果について考察した。

Analysis of Drivers' Characteristics and Evaluation of Driver Assistance Systems Using a Driving Simulator

Hitoshi SOMA*
Takashi WAKASUGI**

Keisuke SUZUKI**
Kaneo HIRAMATSU***

Driving simulators have the advantage of being able to experiment with dangerous situations in safety and, because they are better at reproducing experiment conditions, the same conditions can be recreated for an experiment involving multiple participants. This paper first proposes that these advantages be utilized in the design and evaluation methodology for driver assist system based on an analysis of driver characteristics. It then assesses driver assist systems for preventing lane departure by analyzing driver characteristics when avoiding them. It observes timing settings on lane departure warning systems and the effects of those warnings.

1. はじめに

安全、効率、環境および省エネは、道路交通における重要なキーワードである。これらに係わる各課

題の解決および性能向上のため、ITS (Intelligent Transport Systems) が推進されている。その中でも、事故を未然に防ぐ予防安全に係わるITS技術は重要である。ITSの導入によってドライバに代わって危険状況を検知し、車両からの警報や操作支援によってドライバの運転をサポートする技術が開発され、高度で先進的な予防安全技術の導入が図られようとしている。

しかし一方で、技術的可能性のみを追求したシステムの開発が先行していることも事実であり、ドライバに適合した機器またはシステム開発という点で、いまだ不十分と言わざるを得ない状況である。

ドライバに適合するITS機器やシステムを開発す

* (財)日本自動車研究所道路交通研究部主任研究員
Senior Researcher, Transportation Research Division,
Japan Automobile Research Institute

** (財)日本自動車研究所道路交通研究部研究員
Researcher, Transportation Research Division,
Japan Automobile Research Institute

*** (財)日本自動車研究所道路交通研究部部長
Division Director, Transportation Research Division,
Japan Automobile Research Institute
原稿受理 2000年7月5日

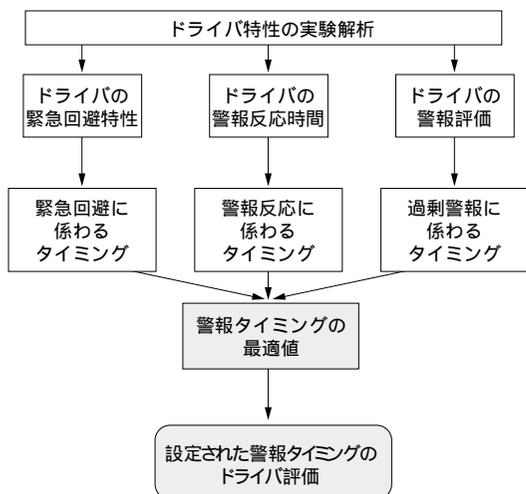


Fig.1 ドライバ特性解析に基づく運転支援機能の設計・評価の方策

るためには、処理ロジックやハードウェアの実現可能性だけを追求するのではなく、まず、通常運転や衝突回避などにおけるドライバの運転特性を十分に把握し、それらの特性を補完するか、あるいは阻害しないようにITS機器やシステムの基本設計を行う必要がある。

ドライバ特性を把握し、システム基本設計とその設計が妥当であることを確認する評価において、さまざまな方策が考えられるが、道路交通の予防安全のためには、衝突回避などの危険な状況での実験が必要となる。危険な状況での実験をテストコースなどにおいて実車を用いて行った場合、実際に衝突するかもしれないような状況での検討は困難である。例えば、平松らの実車走行実験¹⁾は、車両単独走行での危険な走行状況（湿潤路面での急カーブ走行など）を、テストコース上に、衝突しても安全なパイロンなどの障害物を用いて作るにより、実道路であればコース逸脱などの事故に至るかもしれないような状況での検討を行った典型例であるが、このような方法による実験が安全性の点からは限界である。

危険状況での実験を安全に、かつ、同一条件で何度も繰り返し実施可能なツールとして、ドライビングシミュレータ²⁾がある。ドライビングシミュレータでは、コンピュータグラフィクスなどによる前方視野画像や擬似的車両運動体感を与える動揺装置などを用いて仮想的な自動車走行環境を作り上げる。したがって、危険状況での実験が容易であるという利点だけでなく、将来のITS応用を目標とした、まだ未開発の装置やシステムを仮想的に作り上げ、試

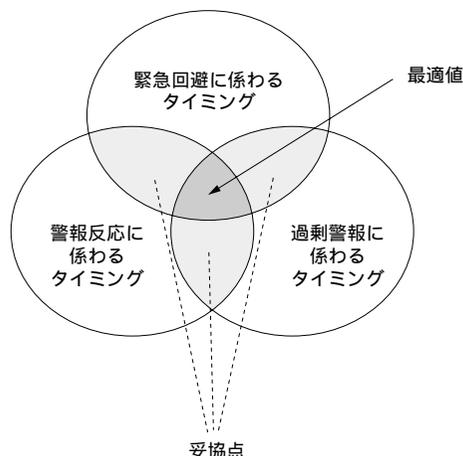


Fig.2 警報タイミングの最適値に関する概念図

作品製作前にそれらの事前評価が行えるという利点もある。

本論文では、このようなドライビングシミュレータの利点を活かし、走行中における警報の効果について、単に機械システムとしての性能の観点からではなく、ドライバ特性に基づき、かつ、ドライバの運行動向への効果という観点から行った評価実験の結果を示す。ここでは、まずドライバ特性解析に基づく運転支援機能の設計・評価の方策について提案する。次に、その方策に基づいて車線逸脱状況におけるドライバ特性の把握を行い、その結果より警報のタイミングを考察し、最後に警報を呈示したときの効果について評価する。

2. ドライビングシミュレータによる ドライバ特性解析に基づく 運転支援機能の設計・評価の方策

ITSにおける運転支援システムの開発・設計においては、さまざまな課題があることはいうまでもないが、ヒューマンファクタの観点から特に重要な課題の一つは、警報や支援操作のタイミングである。

タイミングを決定するために考慮すべき事項は次のとおりと考える。

[緊急回避に係わるタイミング] 衝突等を回避できるか、または傷害軽減されるタイミング (T1)

[警報等の反応に係わるタイミング] ドライバが警報や支援操作に反応するのに必要な時間が確保されるタイミング (T2)

[過剰警報等に係わるタイミング] ドライバに警報や支援操作が過剰あるいは不要と思われないタイミ

ング(T3)

ヒューマンファクタの観点からは、これらT1からT3のタイミングを満たすように最終的なタイミングを決める必要がある。これらのタイミングは、すべてドライバ特性との関係が深い。したがって、各タイミングに係わるドライバ特性を把握し、それに基づいて各タイミングを決定し、最適なタイミングとなるようT1からT3の最適点を探ることになる。

Fig.1は上記のフローを示したものであり、Fig.2は最適点の考え方を模式的に示したものである。Fig.1では、緊急回避や警報反応など、それぞれのドライバ特性からそれぞれのタイミングを設定し、それらより最適なタイミングを設定することが示されている。また、設定された最適と思われるタイミングが、実際に適切なものか否かを評価することも重要である。Fig.2では、最適値の考えがすべての円の交わった部分として示されているが、実際の設計では必ず最適値に設定できるとは限らず、妥協点と示した交わり部分でタイミングを設定せざるを得ないことも考えられる。なお、ここではタイミング設定を例に方策を述べたが、他の運転支援に係わる事項についても同様の考え方が成り立つ。

T1からT3に係わるドライバ特性を実験する際、ドライビングシミュレータは有用なツールである。これらのドライバ特性を調べる上では危険な走行実験を伴うことが多く、ドライビングシミュレータの特徴である実験時の安全性および再現性は有用である。

次章以降では、車線逸脱警報装置を対象に、ここで述べた方策にしたがって行った実験およびその結果について述べる。

3. 車線逸脱回避におけるドライバ特性と車線逸脱警報のタイミング

車線逸脱警報装置において逸脱回避の観点からは、逸脱回避に必要な時間（逸脱回避時間と定義する）を確保できるように警報タイミングを設定することが重要である。この逸脱回避時間に関する研究例は、筆者らが調べた範囲ではなく、逸脱回避時間を決定するための要因については明らかになっていない。

本章では、車線逸脱警報の出力タイミングの決定に利用することを目的に、車線逸脱回避におけるドライバ特性として、逸脱回避時間をドライビングシミュレータ実験により解析した。ここでは、車両の横方向に種々の大きさの運動外乱を与え、そのとき

の逸脱回避時間を定量的に計測した。なお、ここで扱う逸脱回避時間は、Fig.3に示すように、ドライバが修正操舵を行って車線逸脱を防ぐために必要な最短の時間と定義した（Table 1）。

3 - 1 実験方法

当研究所のドライビングシミュレータ^{3,4}（Fig.4）を用いて実験した。車線逸脱を誘発する状況を、幅員3.5mの直線路を走行中の車両に横方向外乱を突然加えて作った。横方向外乱として、インパルス状の横力とモーメントを車両重心点に入力した。車速は100km/hおよび60km/hとし、それぞれの車速で、車両重心点横方向加速度的最大値により評価した5水準の外乱を上昇系列で入力した。また、各被験者の最初の走行では外乱が加わることを伏せておき、ドライバが外乱入力を全く予期しない場合、つまり不測状況の操舵特性を計測した。第2走行以降は、ドライバは外乱入力を警戒しているため（予測状況）、外乱が入力されることについては明示し、入力の時期については不定として実験を行った。

模擬した車両は、全長4.7m、全幅1.7m、車両質量が約1,400kgのセダン型乗用車である。また、ドライビングシミュレータで模擬した車両の運動特性は実車と整合している。被験者は一般の男性13名（年齢：21～29歳）である。

3 - 2 実験結果

車速が100km/hの場合と60km/hの場合におけ

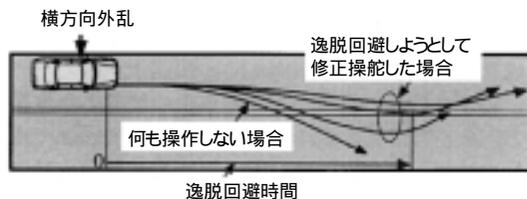


Fig.3 逸脱回避時間の定義

Table 1 強制的な車線逸脱実験の実験条件

車速 (km/h)	外乱による車両重心点の最大横方向加速度(m/s ²)	予測・不測
100	5.1	不測
	1.9	
	3.3	予測
	5.1	
	6.4	
	7.2	
60	1.1	予測
	1.9	
	3.2	
	4.3	
	4.8	

る、全ドライバの回避成功率を、外乱の大きざごとに整理した結果をFig.5に示す。横軸が逸脱回避時間を表わし、縦軸が回避成功率を示す。例えばFig.5(a)において、不測状況の外乱の大きざが 5.1 m/s^2 の場合、逸脱回避時間が 1.0 s では回避成功率は35%となる。いずれの車速条件とも回避成否の境界となる逸脱回避時間は非常に接近しており、 0.70 s 以下では回避成功率は0%となり、 1.0 s 以上では逸脱回避に成功している。

Fig.5(a)において、不測状況の操舵特性と予測状況の操舵特性とを比較すると(横方向加速度最大値が 5.1 m/s^2)、で示す不測状況での回避操舵では、で示す予測状況と比べて、回避成否の境界領域となる逸脱回避時間が 0.2 s 程度長くなっている。これは、外乱入力を予測していなかったため、事態の把握に要する情報処理時間が長くなったためと考える。

以上から、車両に外乱が加わって強制的に車線逸脱させられる状況でも、逸脱を回避するためには、少なくとも $0.7\sim 1.0\text{ s}$ の逸脱回避時間を確保すればよいことがわかる。すなわち、安全性の観点からは車線逸脱すると予想された時点から 1.0 s 程度前に車線逸脱警報を呈示すればよいことになる。

4. 車線逸脱警報のタイミングに関する評価と警報の効果

前章においては、車線逸脱回避におけるドライバ特性を調べ、逸脱回避時間を求めた。車線逸脱を防止するためには少なくともこの逸脱回避時間分だけ逸脱前に警報を呈示しなければならない。しかし、ドライバは警報に対して直ちに反応できるわけではなく、一般に反応時間分だけ遅れて操作が開始されることになる。この警報に対する反応時間が、先の逸脱回避時間よりも大きいと、ドライバは車線逸脱を回避できなくなる。

これまで実際に警報システムが作動する状況下で、警報に対するドライバの反応時間を測定した例はほとんど見あたらない。そこで、警報を呈示してからドライバが逸脱回避操舵を開始するまでの反応時間(警報反応時間と定義する)をドライビングシミュレータ実験で計測した。さらに、車線逸脱警報が有効と考えられる走行状況として居眠り運転が考えられるため、特に、覚醒度が低下した場合について計測し、低覚醒時における警報の有効性についても解析を行った。なお、このような居眠り運転の状況は実

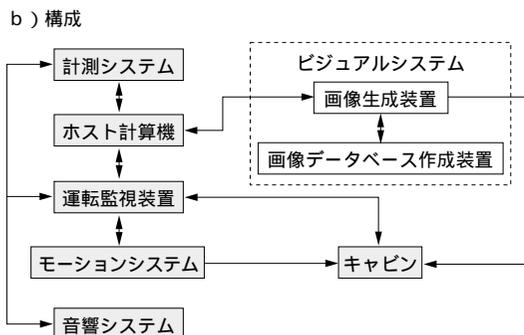
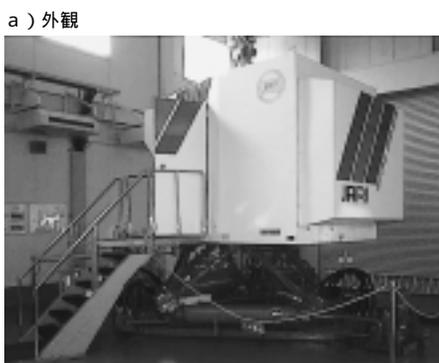


Fig.4 JARIドライビングシミュレータ

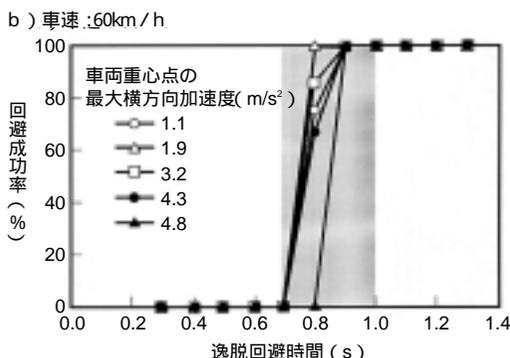
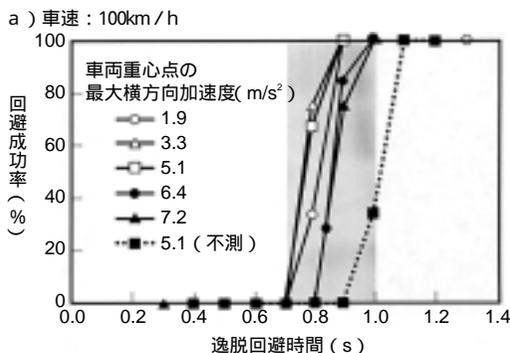


Fig.5 車線逸脱の回避成功率と逸脱回避時間との関係

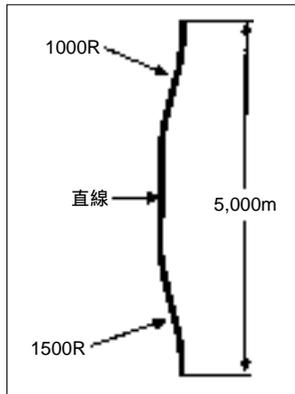


Fig.6 ドライビングシミュレータ上の走行コース

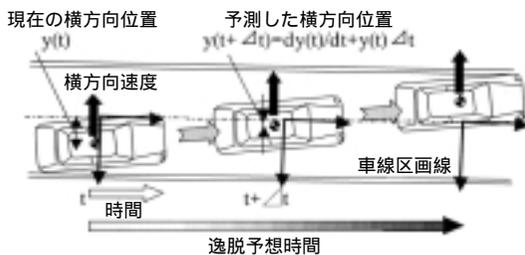


Fig.7 逸脱予想時間

車では非常に危険であるが、ドライビングシミュレータにより安全に実験が行える。また、単調な走行状況を作りやすいため、被験者は早くに居眠り状態になりやすく、居眠り運転実験が行いやすいという利点がある。

4-1 実験方法

走行コースとして、1,000mの直線部および1000Rと1500Rの曲線部からなる全長5,000mの高速道路をドライビングシミュレータ上に模擬し(Fig.6)、この区間が繰り返し現れるようにした。

実際の道路では横断勾配・凹凸・わだちなどにより、ドライバが修正操舵をまったくしないといずれ車両は車線を逸脱してしまう。しかし、ドライビングシミュレータで模擬した道路は、作成を簡単にするため、完全な平坦路(横断勾配なし、凹凸・わだちなし、路面からの振動はモーション装置で加振して体感させた)で作成した。そのため、ドライバがまったく修正操舵しなくてもほとんど車線逸脱しない状態となってしまった。そこで、実際の走行のように、ドライバが修正操舵をしないであると車線逸脱するように、ドライバには体感として感じられない程度の横方向外乱を車両に加えた。これにより、ドライバが修正操舵しないであると必ず車線逸

Table 2 実験者の覚醒度評価の目安

眠気レベル	意味	主な表情の変化
S L	少し眠そう	まばたきの増加
L	眠そう	瞼の開き具合減少、意識的なまばたきの発生
V L	非常に眠そう	瞼の閉じかけ、居眠り発生

Table 3 覚醒度の主観評価

眠気レベル	意味	眠気レベルの意味
S L	少し眠い	少し意識が低下しているものの、運転に支障はない
L	眠い	はっきりとした眠気を感じるが、何とか運転はできる
V L	非常に眠い	居眠りしそうな危険な状態、通常なら運転を諦める

脱するようになった。なお、横方向外乱は、横風に換算すると3m/s相当であり、10s間隔に2s間、左右交互に加えた。

車速は、前章の実験と同じく100km/hと60km/hである。また、被験者が早く低覚醒状態となるよう、夜間での走行を模擬し、オートクルーズ機能を設けてドライバがアクセル操作による車速維持操作をしなくてもよいようにした。被験者は男女各11名(25~38歳、平均30.1歳)で、前章と同じセダン型乗用車を運転させた。

1) 警報

警報呈示を判断するため、逸脱予想時間を定義する。逸脱予想時間とは、ドライバが修正操舵を行わないと仮定した場合、何秒後に車線逸脱するかを一次予測的に求めた時間である。つまり、Fig.7に示すように、現在の車両の車線に対する相対横方向速度を計測し、現在の車両横位置を初期値として横方向速度を積分して得られる将来の横位置により、各時点における車線逸脱までの時間を算出した。

走行中、逸脱予想時間がある値を下回ったときに警報を呈示するものとし、この値(警報タイミング)を1.0s、0.5s、および0.0s(=車線逸脱時)の3水準に設定した。警報の周波数は500Hzの音とした。

2) ドライバの覚醒度

運転中の被験者の表情をオペレータが観察し、Table 2の基準を目安にそのときのドライバの覚醒度を推定しながら実験した。さらに、表情からだけでは判断しにくいケースもあるため、車両横ずれ量

をモニタし、この値の変動を覚醒度判定の補足的指標として用いた。

3) 計測手順

まず初めに、各被験者の操舵反応時間の限界値を把握するため、音が鳴ったらできるだけ早く操舵して車線変更するタスクを行わせた。単純反応時間測定後、運転指標のベースラインとなるデータを1分間計測した。これは、被験者が通常の覚醒状態で普段同様に運転したときの基準データである。

この後の本実験では、低覚醒状態に達するまで警報条件を満たしても警報が呈示されないように警報装置のメインスイッチをオフにした。オペレータが計測したいと思った覚醒水準に達した時点でメインスイッチをオンにし、その後は、警報条件を満たした時点で警報が発生するようにした。そのまま1分間継続して運転を行わせ、停車後、最初の警報直前の眠気レベルをTable 3に示す三段階の評価尺度で自己申告させた。4 - 2以降の実験結果では、この自己申告結果をベースに整理している。

なお、警報反応時間が単純反応時間よりも小さくなることは考えにくいとため、被験者ごとに計測された警報反応時間がその被験者の単純反応時間よりも小さい場合には無効データとして除外した。

4 - 2 実験結果

1) 警報反応時間

計測した警報反応時間を実験条件ごとに比較した結果、条件間による有意差は見られなかった。そこで、実験条件を区別せず、眠気レベル別にデータを整理した(Fig.8)。Fig.8では、覚醒度低下が比較的小さい場合(SL)には、警報反応時間は平均値にして0.55s、90%ile値で0.67s程度である。一方、ドライバの覚醒度が著しく低下すると反応時間は増大し、平均値にして0.70s程度(VL)となる。ただし、居眠り状態(VL)での90%ile値は0.88sであり、居眠り運転に陥るような状況でも1.0sを超えるケースは観察されなかった。

このように、ドライバの警報反応時間は、前章で述べた安全上から決まる警報タイミング約1.0sを下回っており、予測された車線逸脱の約1.0s前に警報を呈示することは、ドライバの警報反応時間の観点からも妥当であると考えられる。

2) 車線逸脱警報の有効性

4 - 1節の「計測手順」で述べたように、本実験では、ドライバが低覚醒状態になるまで警報装置のメインスイッチはオフとなったままである。つまり、

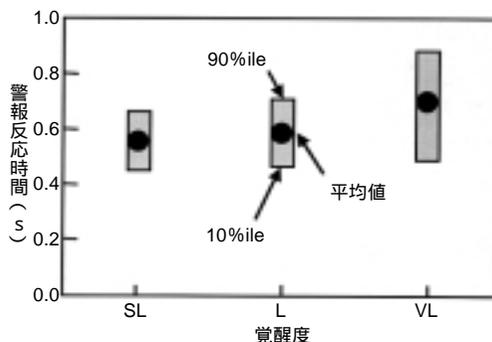


Fig.8 警報反応時間と覚醒度との関係

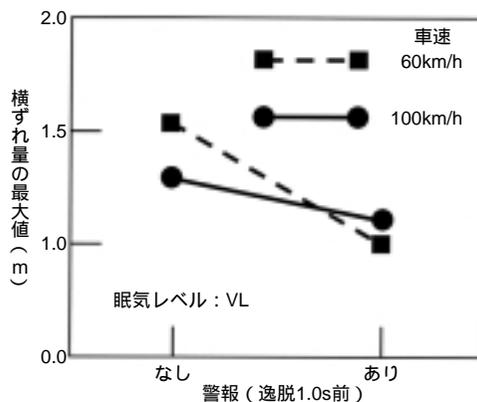


Fig.9 車線逸脱警報の効果

ドライバは、車線逸脱の状態になっても警報を聞くことができない。したがって、この状態は車線逸脱警報装置を装着していない車両を運転していることに相当する。一方、オペレータが警報装置のメインスイッチをオンにした後、一度警報が発生すれば、その後ドライバは警報装置が作動していることを認識する。つまり、この状態は車線逸脱警報装置を装着した車両を運転していることに相当する。そこで、最初の警報発生の前後でデータを分割し、警報前(すなわち警報装置なし)と警報後(警報装置あり)とを比較することにより、警報システムの効果を検証した。

Fig.9は、最も覚醒度が低いとき(VL)の警報の「あり・なし」による車両重心点の最大横ずれ量の違いを示している。警報タイミングは上記の考察から、逸脱の1.0s前に発するようにした。警報があることにより最大横ずれ量が減少していることがわかる。このように、警報の存在により低覚醒時においても、車線逸脱の防止に対して効果のあることが認められた。

5. まとめ

予防安全を目的とした運転支援装置の開発では、実車では困難な危険な状況での実験が不可欠であり、ドライビングシミュレータの利用は実験の安全性および再現性の点で有用である。また、ITS技術においては、その有効性が未知のシステムの実験・解析・評価も必要となり、コストや開発時間の短縮という点で、試作前に事前評価が行えるドライビングシミュレータには利点がある。

このような利点を活かし、本論文では、ドライバ特性解析に基づく運転支援機能の設計・評価の方策について提案し、その方策に基づいて、車線逸脱状況におけるドライバ特性の把握を行った。そして、その結果より警報のタイミングを考察し、最後に警報を呈示したときの効果について評価した。

これらの結果から、次のことがわかった。

車線逸脱の緊急回避的な観点からは車線逸脱の約1.0s前に警報を発する必要がある。

この値は、ドライバの警報反応時間を上回っていることから、車線逸脱警報装置の警報タイミングとして妥当であると考える。

なお、運転支援機能の設計・評価の方策(第2章)の三番目に記述した、過剰警報という点については、実車による検討を進めており、1.0sという警報タイミングであれば、ほぼ問題ないことが得られている⁵⁾。

本研究の結果の一部は、(財)自動車走行電子技術協会の平成11年度ITSの規格化事業に関する委託として実施された研究で得られたものである。

参考文献

- 1) 平松ほか「旋回時のドライバ操作とニア事故との関連について」『自動車研究』Vol. 8, No. 6, 1986年
- 2) 末富「ドライビングシミュレータ」『国際交通安全学会誌』Vol. 24, No. 2, 1998年
- 3) 相馬、佐藤、平松「研究用ドライビング・シミュレータの開発」『自動車研究』Vol. 17, No. 11, 1995年
- 4) H. Soma, T. Wakasugi, K. Satoh, K. Hiramatsu: Software Upgrade in JARI Driving Simulator for Applying to ITS Research, Driving Simulation Conference (DSC'99), 1999
- 5) The Experimental Analysis of time to Departure for the Design of Lane Departure Warning Systems, 7th Annual World Congress on Intelligent Transport Systems, 2000 (発表予定)