

## ドライビングシミュレータ

末富隆雅\*

アクティブセーフティ関連技術の研究開発においては、自動車の運動性能だけでなく、運転者の行動も含めて事故防止ができるかを、評価する必要がある。車両、障害物および路上施設への衝突の危険性のある実験を人間が運転した状態で試験しなければならず、実車での実験においては、実験条件が限定される。そこで、模擬的に運転状況を体験、評価できるドライビングシミュレータが用いられている。ここでは研究開発用のドライビングシミュレータの技術動向とドライビングシミュレータがアクティブセーフティ関連技術にどのように使われているかの事例を紹介する。

### Driving Simulator

Takamasa SUETOMI\*

In developing active safety relevant technologies, not only vehicle dynamics performance but also collision avoidance performance involving driver's behavior should be tested and be evaluated. Because collision avoidance performance tests have hazards to collide with vehicles and/or obstacles, tests in actual vehicle driven by human drivers are limited within restricted traffic situations. Therefore driving simulators in which drivers can experience emergent situation virtually are used for such experiments. Here, technology trends in driving simulators for research and development, and some applications of them to active safety technologies are described.

#### 1. はじめに

現在の自動車交通が抱えている課題として、交通事故の削減、輸送効率の向上、地球環境の保護などがあり、交通事故を予防する技術として自動車のアクティブセーフティ技術が研究開発されている。

アクティブセーフティ技術は、人間の運転を支援したり、人間に代わり運転を行う。運転を支援する技術においては、支援を開始し、その支援する制御量が運転者に適したものであるかや、これを利用する運転者とのインタフェースや依存関係が問題とな

る。また、人間に代わり運転を行う場合にも、切り替わるタイミングや制御状態を認知させるインタフェースなどのヒューマンファクタの問題がある。

このようなヒューマンファクタの研究においては、事故に至るかもしれない走行状況での運転を行わなければならない、実車の試験においては、テストコースにおいても安全性確保のためには走行状況が限定される。そこで、運転者に模擬感覚を与えることで、これら事故直前状況での運転者の反応やアクティブセーフティ技術に対する運転者の反応を調べることができるドライビングシミュレータへの期待が大きくなってきている。特に、人間には個人差が大きいことから、多くの運転者のデータを同じ走行状況で収集するためにも、実験の再現性の面でのメリットも大きい。

\* マツダ㈱技術研究所主任  
Principal Research Engineer, Technical Research Center,  
Mazda Motor Corporation  
原稿受理 1998年6月29日

安全に研究・開発や乗員訓練を行うことの出来るシミュレータとしては、フライトシミュレータが昔から一般に使われているが、自動車では実車の製作費が比較的安価なためにシミュレータを用いるとかえって割高となるため、これまでの研究、開発での使用が一般的でなかった。しかし、最近の高性能計算機や画像処理技術の低価格化やアクティブセーフティ技術への期待の中で多くの研究機関で用いられるようになってきた。

本稿では、ドライビングシミュレータの技術動向について紹介するとともに、これを用いたアクティブセーフティ技術の研究事例について述べる。

## 2. ドライビングシミュレータ

### 2-1 ドライビングシミュレータの構成

ドライビングシミュレータは、Fig.1 に示すように、車両運動や走行状況を計算する計算機、走行時の視界を運転者に提示する道路画像生成装置、走行時の加減速感覚を与える運動模擬装置、エンジン音などの音響模擬装置、ハンドル反力などの操作感覚模擬装置からなる。

運転者の運転操作（アクセル、ブレーキ、ハンドル等）は、計算機に入力され、車両運動や自動車以外の交通環境がリアルタイムに計算される。そして、道路画像生成装置はこの車両の現在位置、姿勢や周囲の交通状況から車両周囲の道路画像を作成し、生成された画像は運転席内のスクリーンに投映され、運転者はこの画像を見て運転を続ける。運動模擬装置は、運転者に加速度感覚や回転感覚を与えるために可動運転席を動かす。音響模擬装置は、走行状況に応じたエンジン音、タイヤ音を発生させる。操作感覚としては、ハンドルやペダルに適当な操作力が

付与され、速度計や回転計にも走行状態が表示される。

#### 1) 計算機

ドライビングシミュレータに用いる計算機には、車両運動を計算するための高速演算機能と、運転操作信号を入力し、模擬感覚を発生させるリアルタイムのI/O制御機能の機能が必須である。

車両運動モデルの自由度は、運転者の未定の運転操作に対応するために、操安性解析で用いるステアリング、ばね上の前後、左右、上下、ロール、ピッチ、ヨーの他、駆動系・制動系で用いるエンジン回転、各輪のホイール・スピン等の計10~20自由度である。

また、周囲の交通状況を模擬するために、先行車、側方車、交差点通過車などの車両の位置、速度、加速度の計算を行う走行シナリオ制御も行う。

#### 2) 道路画像模擬装置

道路画像は、車両の位置、姿勢情報をもとに、作成してある3次元の道路データベースより必要な地形情報を選び、3次元透視変換、描画処理を行い、フルカラー画像が作成される。路面や建築物にはテクスチャ処理を行い、距離感、速度感を分かりやすくしている。

#### 3) 運動模擬装置

加減速感をドライバが感じることで、車両の挙動をつかむことができ、運転しやすくなる。そのために、加減速感覚や旋回中の横加速度をドライバに体感させるためにドライバの乗る運転席の運動を制御する。

#### 4) 音響模擬装置

エンジン音によりエンジン回転数やその変化を知ることができ、スピードは制御しやすくなる。また、タイヤのスキール音によりタイヤのグリップ力が限界に近いことを知ることにも出来る。このような走行音の模擬再生のためには、実車音を収録して、電子的に再生する方式がよく用いられている。これにより、エンジン回転数、車速、スロットル開度に応じた走行音を再生することができる。

#### 5) 操作感覚模擬装置

ハンドルには電気モータなどにより、車両運動計算結果の操舵力を発生させる。また、アクセル、ブレーキなどのペダルは、調整されたばね、ダンパにより実車に近い踏力を発生させたり、アクティブに反力を制御する方法もある。

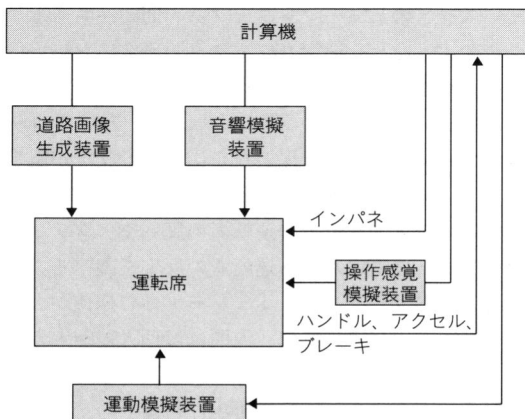


Fig.1 ドライビングシミュレータの構成

### 2-2 ドライビングシミュレータの技術動向

1980年代頃まではドライビングシミュレータは高価であったために限られた研究機関でのみ利用されていたが、1990年代以降は、運動模擬装置を持たない小型のシミュレータや大規模な運動模擬機構や視野角を持つ大型シミュレータが開発されてきている。

自動車は、広い範囲の空間を運動できるが、ドライビングシミュレータでは、限られた空間で運動感覚を模擬再生することになり、距離感や速度感などの視覚の奥行感覚、運動感覚の面での物理的な制約がある。これを感覚上で解消するための技術動向について述べる。

1) 画像生成技術の動向

ドライビングシミュレータでの視界は、CGにより画像を生成し、運転席前方のスクリーンに投射するのが一般的である。奥行感が欠乏する原因としては、スクリーンやCRTという2次元平面に投影する方法を用いることにより、両眼視差、輻湊角、焦点距離が実世界と異なることと、実際の画像と異なるCG映像の質感によるものがある。前者の単眼視、焦点距離による問題については、フライトシミュレータと異なり、自動車では数メートル先の近くの路面から数百メートル先の遠くの路面までが対象となるので、影響が大きい。この対策として、スクリーンとの距離を離したり、ステレオ視を用いる方法が試みられ、二輪車用のシミュレータではHMDを用いたものも開発されている。しかし、長時間の実験を行うためには、立体視では目の疲れが生じるため、研究への応用は困難である。

後者のCGでの質感については、テクスチャや陰影などの処理能力の向上により、PCを基本とするシステムでも高レベルの質感の再現が可能となってきている。

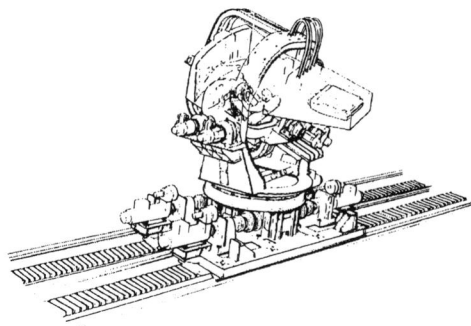
2) 運動模擬技術の動向

画像生成装置が低価格化されたことで、運動模擬機構を持たない、固定式のドライビングシミュレータが多くの研究機関で用いられるようになってきている。この場合に市街地のような加減速が多い走行シーンでは動揺病(酔い)をおこしやすくなり、特に画角が大きい場合には顕著なため、ほぼ一定速での高速走行などに走行シーンが限定される。この解決のために、運動模擬機構を備えたシミュレータが使われている。

シミュレータでは、運動範囲に制限があるため、次のような方法で運動感覚の模擬を行う。

①傾斜による重力加速度の分力で、水平加速度を模

(a) 横運動模擬



(b) 縦運動模擬

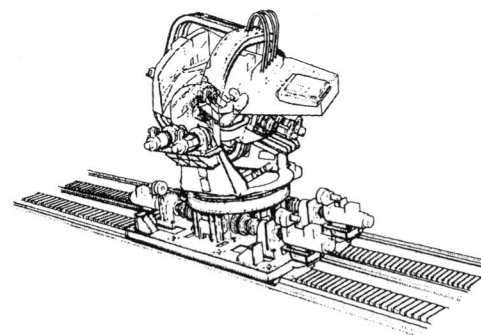


Fig.2 マツダ・ドライビングシミュレータ

擬する

- ②感覚の変化の大きい高周波数成分のみ再現する
- ③運動をスケール・ダウンする

運動の変化が重要となるため、②のウオッシュアウトと呼ばれる手法を用いて加速度や回転速度の過渡時を実際の動きで実現し、加速度の定常成分は、①の重力成分を用いて模擬するのが一般的であり、この時の回転による違和感を少なくするために③によりスケール・ダウンを行う。

また、運動模擬のシミュレータ酔いやドライバの運転操作に対する効果も明らかになってきている。ここでは、減速時のブレーキ操作の再現性に及ぼす前後運動の効果について述べる。Fig.2に実験に用いたマツダ・ドライビングシミュレータを示す<sup>1)</sup>。運転席の3自由度の回転と1自由度の水平並動機構を持つ。運転席を回転させることで、運転者の前後加速度の再現あるいは、横加速度の再現を行うことができる。

Fig.3には、ドライビングシミュレータで減速を行うときの運動模擬の自由度数と運転者の減速挙動の関係を示す<sup>2)</sup>。ここでは10回の挙動の平均プロフィールを示している。実道やピッチと前後動を用い

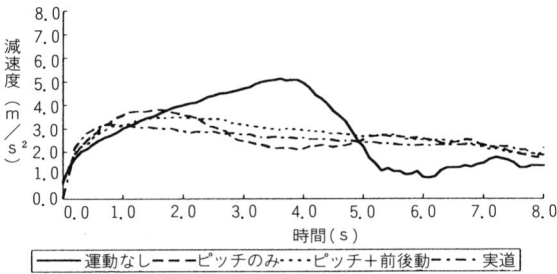


Fig.3 運動模擬自由度と運転者の減速挙動

での運動模擬では、減速中ほぼ一定の減速度で減速が行われているが、ピッチだけでは、運動の発生が遅れるために、最初オーバーシュート気味に大きく減速し、その後に加速度を感じてからブレーキを緩めており、安定した減速動作が行われていない。運動なしでは、減速度の大きさが分からないために不安定となり、最初緩くて後で踏み増す場合や最初から強く踏み過ぎる場合などがある。

このように、水平動があることで、ドライビングシミュレータでの運転者の運転操作は実際の運転操作に近くなる。そこで、最近では前後、横方向の運動範囲の大きい大型のドライビングシミュレータが開発されている。現在稼動しているものは、ダイムラーベンツのものだけであるが、フランスや米国において国家プロジェクトとして開発中である。

ダイムラーベンツ社は、自動車の予防安全の研究・開発を主目的として、1984年に180度の視野を持ち、乗用車1台を搭載できる6自由度共働支持型シミュレータを開発した。しかし、横運動に制約があるため、その後、1995年に大幅な改造を行い、Fig.4に示す横運動用のレールを増設し、可動範囲を増やしている<sup>3)</sup>。

欧州では、INRETS(フランス国立交通・安全研究所)、プジョー、ルノーによる共同プロジェクトと

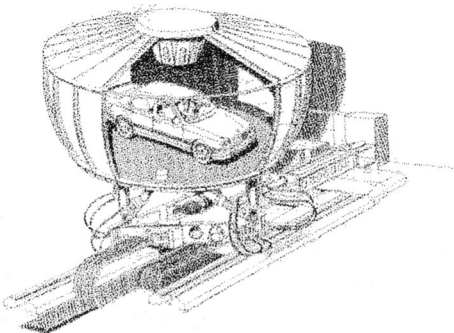


Fig.4 ダイムラーベンツ・ドライビングシミュレータ

してSARAが開発されており、1998年に完成の予定である。モーション・システムは、Fig.5<sup>4)</sup>に示すように6自由度共働支持式モーション・ベースをXY軸の並進機構で動かす構造であり、ピッチとロールは±30度、振動装置は3~30Hzで、6自由度、1.5Gまで可能となっている。

米国ではNADS (National Advanced Driving Simulator)を開発中である。これは、±10mのXY運動機構を備えた9自由度のモーションベースを持つ、現在実用、計画中のものでは最大規模のものである。

このような大規模運動模擬装置が開発されてきており、模擬できる走行場面も拡大してきている。しかし、走行場面によっては、高速の定常走行のように可動範囲が小さくてもよいものや、急減速など大きな可動範囲が必要なものもある。大規模な運動模擬装置は建設、維持管理において膨大な時間、コストを要することになり、研究用途によってどのくらいの運動模擬機構が必要かを定量的に調べ、用途に合った装置を選択する必要がある。

### 3. ドライビングシミュレータを用いた アクティブセーフティ技術研究

#### 3-1 アクティブセーフティ技術における ヒューマンファクタ

アクティブセーフティ技術は、人間の運転を支援したり、人間に替わり運転を行う。運転を支援する場合には、支援を開始する状況や、支援する制御量が運転行動に適合したものであるか、またこれを利用する運転者とのインタフェースや信頼依存関係が問題となる。また、人間に替わり運転を行う場合にも、切り替わる状況や制御状態を運転者に認知させるインタフェースなどのヒューマンファクタの問題がある。アクティブセーフティ技術におけるヒューマンファクタには以下のようなものがある。

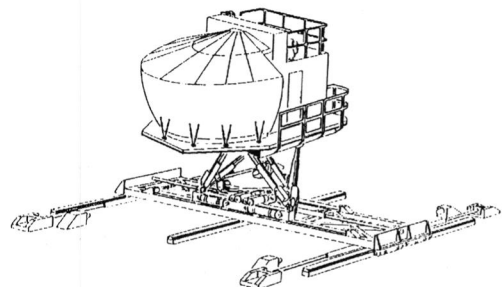


Fig.5 SARA

1) 誤作動・不要作動

衝突警告のように周囲の外部環境を認識するシステムでは、環境変化やノイズなどにより、障害物と誤検出した誤警告が発生することがある。誤警告を防ごうと検出条件を厳しくすると危険な障害物を検出しない欠警告となることもあり、さまざまな道路環境での認識処理の評価を行う必要がある。

また、ドライバの個人差や、意識して車間距離が近いときなどドライバが対象に気づいているのに警告が発生すれば煩わしいと感じスイッチを切ることになるし、常に警告が発生させながら運転していれば、本当に危険になって警告が出たときに危険だと思わなくなってしまう。このような警告が不要とならないように人間の運転特性に合わせる必要がある。

2) 警告タイミング

危険警告が発生するという事は、ドライバが危険に対して気づかずにいるときであり、居眠りやぼんやり状態など普通の運転状態より反応や操作が適切に行えない状況である。このような状況において警告の発生によりドライバが適切に反応して事故回避できるようなタイミングである必要がある。

3) 情報提供方式

ドライバに不要な情報を与えても、それを理解するのに負荷がかかったり、注意を向け過ぎることがあれば不安全になるばかりか、システムを使わなくなりサービスが無効となる。ドライバが理解しやすい表示デザインや音声など提供方法とする必要がある。

例えば、警報音についても、その周波数成分やテンポにより運転者に与える緊迫感が変わることが知られている。

4) ドライバとシステムの役割分担

システムが車両の制御を行うときに、ドライバの操作を優先するかシステムの操作を優先するかという問題がある。ドライバの操作を優先すると、例えば前方の障害物に対し自動減速を行っているが、隣車線に回避できるので車線変更するなど、システムが認識できない状況までドライバが広く状況判断することができる。一方で、回避制御が開始するまでドライバが何もしなかったのだから、ドライバが正しく状況判断できる状態ではなく、パニックになって誤った操作をする可能性も高いの

で、システムを優先すべきという考えもある。ドライバの誤操作やシステムの誤作動の発生可能性も考慮して、今後実際にシステムに対してドライバがどのような行動をとるかを調査し、ドライバとシステムの関わりを考えていく必要がある。

5) 自動/手動の切替え

自動走行中に何らかの理由で自動走行できなくなり手動に切り替えなければならなくなったときにドライバがどのように反応するか、どのような方法で切替えをドライバに伝達するかも重要である。

6) ドライバの運転行動

ドライバが警告システムを頼りにして、危険だと警告音が鳴るはずだと思い自身での安全確認行動を行わなくなる可能性があることも考慮する必要がある。

以下の各項では、車間距離モニタでの情報提供方式の検討<sup>5)</sup>、障害物警報での警告タイミングの検討<sup>6)</sup>、車線逸脱警報での警告タイミングの検討<sup>7)</sup> 事例について報告する。

3-2 車間距離モニタの情報提供方式

1) 車間距離モニタ

車間距離モニタは、先行車両との車間距離をCCDカメラやレーザレダで検出し、その値を運転者に提示することで、安全な車間距離を保持させる装置である。Fig.6に示すようないくつかの表示方式が提案されている。

2) 実験方法

速度を変化させる先行車に追従して走行し、モニタへ注意が集中し前方への注意が欠如することを評価するために、道路上に看板が現れるとスイッチを押す作業を並行して行った。

安全性の指標として、接近時の車間距離、前車接

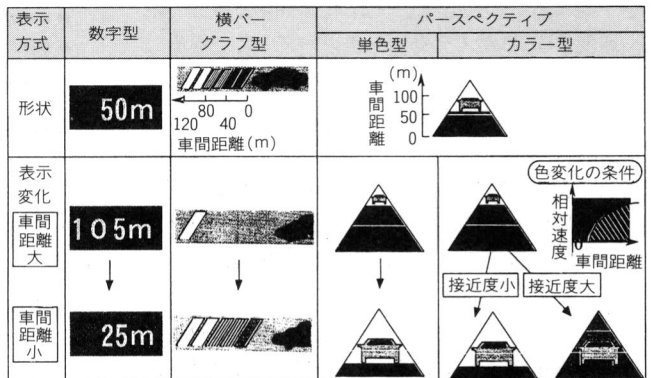


Fig.6 車間距離モニタ

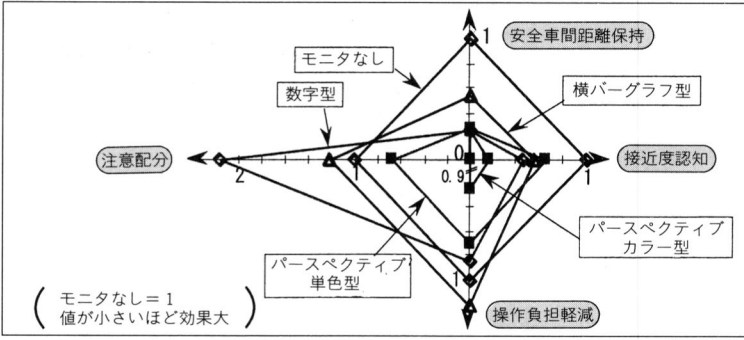


Fig.7 車間距離モニタの評価結果

近時の減速開始の余裕、前方道路への注意（看板への反応時間）、運転負担の指標として加速度の大ききで評価を行った。

3) 実験結果

安全性、運転負担について総合的に評価した。Fig.7に評価結果を示す。

①数字型

安全車間距離保持・接近度認知の効果は大きい、注意配分が不適切となる。

②横バググラフ型

安全車間距離保持・接近度認知の効果は中程度である。

③パースペクティブ単色型

安全車間距離保持の効果は大きい、接近度認知の効果は中程度である。

④パースペクティブ・カラー型

全評価項目について効果が大きい。

3-3 障害物警報の警告タイミング

1) 障害物警報

追突事故は、死亡事故となることは少ないものの、事故数は全体の3割を占める。この事故の多くは居眠りや脇見などの前方不注意によるものであり、これを予防するものとして、先行車両や障害物との距離や速度をCCDカメラやレーザーレーダなどで検出して、衝突しそうなときに警報を運転者に与える衝突警報システムが開発されている。

2) 実験方法

実交通での追突事故の多くは、運転者の脇見やぼんやりが原因となっており、事故を避けるのが難しい先行車の急減速の場面を想定して実験を行った。運転中に脇見を誘発させるようなスイッチ操作を行わせる副次タスクを被験者に課し、これと同期して先行車を減速させることで、追突事故発生状況を再現した。ここでの副次タスクとしては、インパネの

5ヶ所に設置したLEDランプが点灯したときに、そのランプを即座に押すように指示した。運転者は、2車線道路を、80~100km/hで走行する車両に追従して走行する。

最初に、シミュレータでの走行や車両特性に慣れるために約10分間走行したあとで、LEDランプの点灯による脇見の誘導に同期して、前車の

急減速や隣車線からの割込みが行われる。

被験者は、19歳から26歳までの運転免許を有する45名の男性である。

この実験で用いた障害物警報は、次式で示す警報車間距離よりも実際の車間距離が小さくなったときに警報が発生する。前車が減速開始後、以内に運転者が減速操作を開始すれば衝突を回避できる警告タイミングである。

$$L_o = \frac{V_f^2}{2\alpha_f} - \frac{V_l^2}{2\alpha_l} + V_f \cdot t_1$$

$L_o$ : 警報車間距離

$V_f$ : 自車車速

$V_l$ : 前車車速

$\alpha_f$ : 想定自車減速度 (=0.6G)

$\alpha_l$ : 想定前車減速度 (=0.8G)

$t_1$ : 余裕時間 (=1.0s)

3) 実験結果

前車が100km/hから30km/hまで0.8Gで減速を開始してから被験者がブレーキを踏み始めるまでの反応時間を、前車が減速を開始したときの車間距離に対

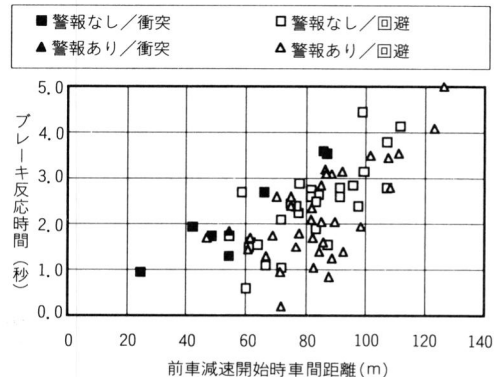


Fig.8 前車減速時の車間距離と反応時間

して、Fig.8に示す。ここでは、ブレーキ操作を行わずにステアリングで回避した場合や、ブレーキより先にステアリング操作した場合を除いている。前車減速時の車間距離が短く、反応が遅いときに衝突している。そして、警報のあるときには、反応時間が短くなり、衝突した数も少なくなっている。

警報のない場合とある場合でブレーキの反応遅れ時間の平均値を追従の車間距離で小（車間時間1秒未満）、中（車間時間1～2秒）、大（車間時間2秒以上）のグループに分けて比較すると、Fig.9に示すように、警報があると警報がない場合に較べて、平均で約0.5秒反応時間が早くなっている（ $p < 0.01$ ）。

警報のない場合とある場合で、前車に衝突した被験者の割合を比較してFig.10に示す。脇見という運転者の不安全行動と急減速という危険状況を同時に起こすことで、警報がないときには、19%もの被験者が衝突している。一方、警報がある場合では、衝突を起こした被験者はわずか2%に減っており、余裕時間1.0秒の障害物警報は追突事故の回避に十分な効果があることが確認できた（ $p < 0.05$ ）。

3-4 車線逸脱警報の警告タイミング

1) 車線逸脱警報

路外逸脱や工作物衝突などの車両単独事故は、死亡事故の1/4を占める。この人的要因として、居眠

りやぼんやりによる前方不注意から車線を逸脱する場合と、速度超過や操作誤りにより車両の限界を超える場合とがある。前者の場合に、このような車線からの逸脱を防止するシステムとして、車線逸脱警報システムが開発されている。これは、白線の位置を検出するCCDカメラや路上の磁気ネイルの位置を検出する磁気センサにより、車両の車線内での位置や方向を測定して、車線を逸脱しそうになったときに警告を発して運転者に注意を喚起するものである。

2) 実験方法

シミュレータ走行において短時間で低覚醒状態となるように、周囲の交通もない単調な道路を夜間、アクセル、ブレーキ操作の不要なオートクルーズを用いた27.8m/s(100km/h)での走行を行った。道路は車線幅が3.8mの片側2車線道路であり、直線部分と緩和曲線を含むR500とR1000の2種類の曲線部によって構成される。直線部が47%、カーブが53%である。

被験者は13名の19～24歳の男性であり、60分間の走行を、警報なしと警報ありの2実験を別の日の同時刻に行った。

この実験で用いた車線逸脱警報の警告タイミングは、車両のルームミラー位置（CCDカメラ装着想定位置）が以下の条件のときに、警報が発生する。

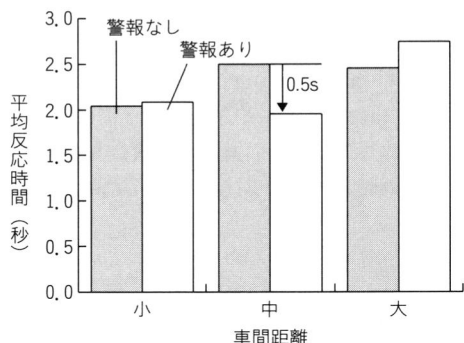


Fig.9 前車減速開始後の反応時間

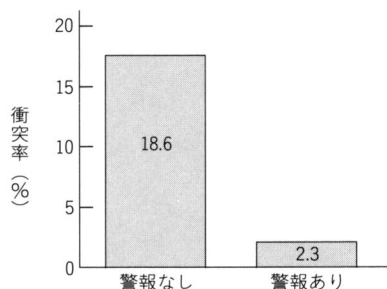


Fig.10 衝突率

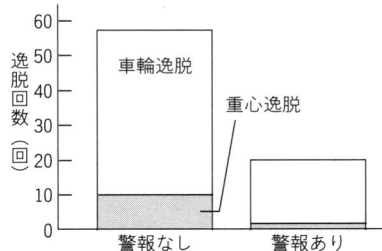


Fig.11 車線逸脱回数

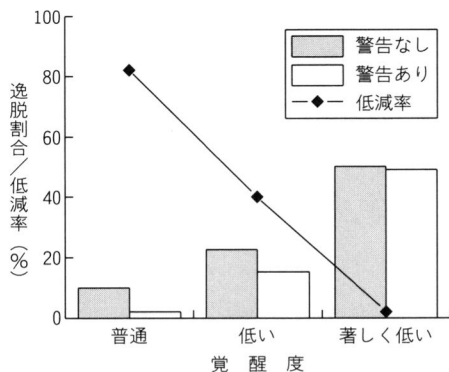


Fig.12 覚醒度と車線逸脱率

現在偏差：車線左右端より1 m以下

将来偏差：2秒先の将来偏差が車線左右端を越える  
覚醒度は、脳波の $\alpha$ 波比率で判別する。

### 3) 実験結果

Fig.11に警報のない場合とある場合の実験での60分間の走行中に車線を逸脱した回数を示す。警報により、車輪逸脱（車輪が白線を越える）は67%減少しており、重心逸脱（車両重心が白線を越える）は81%減少している。

警報が発生する条件でも、逸脱しているが、Fig.12に示すように覚醒度と逸脱割合の関係から考察する。ここでの逸脱割合は、1分間に1回でも逸脱した割合であり、1分間の $\alpha$ 波パワー比率で覚醒度を判別した。覚醒度が普通、低いときは警報による効果が見られるが、著しく低いときには、警報による効果は小さい。このような覚醒低下状況においては、通常では運転者は運転を中止する状況であり、警報があるからといって居眠状態で運転することは危険なことであり、このような状態では警報による注意喚起だけでは事故を防ぐことはできず、車両制御による回避が必要なことを示している。また、覚醒を維持させることも重要なことを示している。

### 4. おわりに

ここではドライビングシミュレータの技術動向とアクティブセーフティへの応用の一事例を紹介した。最近の安全走行システムの研究開発においては、運転者の反応を含めた検討を行うにはドライビングシミュレータが不可欠となっており、事故直前の状況を模擬するための大規模なシミュレータも海外では開発されている。

シミュレータで得られたドライバの反応を基にア

クティブセーフティ技術が開発されていくことになり、シミュレータにおけるドライバの運転行動の再現性の検証方法や基準の標準化や、装置と再現性との関係を明確化することがこれからの課題である。

また、今回は主に車両周囲の環境を認識しドライバに情報や警告を与える技術についての評価を紹介したが、車両安定化制御技術の評価にはさらに車両運動模擬技術の向上が課題となる。

### 参考文献

- 1) 末富他「大振幅モーション・システムをもつドライビング・シミュレータ」自動車技術会学術講演会前刷集、No.902、1990年
- 2) 末富他「ドライビング・シミュレータの運動システムの緊急回避操作再現への効果」自動車技術会論文集、Vol.28、No.3、1997年
- 3) Wilfried Kading et al.: The Advanced Daimler-Benz Driving Simulator, SAE Paper 950175
- 4) Michel Lacroix et al.: SARA Car Driving Simulator: An Ambitious Research and Development Tool
- 5) 木戸他「車間距離モニタの安全性向上・負担軽減についての研究」日本機械学会第5回交通・物流部門大会講演論文集、1996年
- 6) T.Suetomi et al.: Driver Behavior Under a Collision Warning System - A Driving Simulator Study, SAE Paper 970279
- 7) 末富他「運転者の回避特性に適合した車線逸脱警報の研究」自動車技術会学術講演会前刷集、No.973、1997年