

## 緊急時のスピン回避性能向上に関する一考察

野崎 博路 \*

## Improvement of Spin Evasion Performance in Emergency

Hiromichi NOZAKI\*

When emergency evasion during running is required, the driver sometimes causes the vehicle to drift, a condition in which the rear wheels skid due to rapid steering. Under such conditions, the vehicle enters a very unstable state and often becomes uncontrollable. An unstable state of the vehicle induced by rapid steering was simulated, and the effect of differential steering assistance was examined. The results indicate that, in emergency evasion while cornering, during which the vehicle begins to drift, unstable behavior, such as spins, can be avoided by differential steering assistance, and both the stability and control of the vehicle improve remarkably. In addition, reduction of overshoot during spin evasion by the differential steering assistance has been shown to enable the vehicle to return to a state of stability in a short time in emergency evasion during straight-line running. Moreover, the effectiveness of differential steering assistance during emergency evasion was confirmed using a driving simulator. And, the influence of the response gain by the change of the steering wheel gear ratio was confirmed, too.

**Key Words :** Motion control, Automobile, Vehicle dynamics, Steering system, Maneuverability, Stability, Simulation, Driver model

## 1. まえがき

緊急回避を強いられた場合など、急操舵によって後輪がスキッドし、スピン傾向状態に陥る時がある。このような状況では車両が不安定状態になり、走行不能となってしまう。本研究では、急操舵による車両不安定状態を模擬し、微分操舵アシストの影響について検討を行った。“微分ハンドル”と一般に呼称される、微分項を含んだ操舵系の研究は、平尾<sup>1,2)</sup>によって行われ、更に、最適範囲についての研究が、中谷等<sup>3,4)</sup>によって行なわれた。しかし、これらの研究は、グリップ領域について、その効果を示している。

一方、グリップ領域において、4輪操舵システム(4WS)は、微分ハンドルより、操縦安定性向上に効果的と考えられており、4輪操舵システムは既に実用化されている。

しかし、4輪操舵システム(後輪の舵角のみを制御するもの<sup>5)</sup>)も、スピン傾向領域では、効果を発揮することはできない。何故ならば、スピン傾向状態では、後輪タイヤコーナリングフォースが飽和状態になっているので、4輪操舵システムによる後輪操舵コントロールでは、コーナリング

フォースを高めることができないからである。

コーナリング中の緊急回避等、シビアレーンチェンジの際は、回避操舵直後の切り返し操舵の際に、特にFR車(フロントエンジン、リヤドライブ)では、後輪が先に飽和してしまいスピン傾向となるケースが多い。

一方、微分操舵アシストは、カウンターステアの遅れを改善できるので、スピン傾向領域においては、非常に有効な改善手法と考えられた。

そこで、緊急回避時に車両がスピン傾向状態に陥る場合において、車両の操舵系に、操舵角速度に応じたアシスト的な前輪実舵角を、通常の前輪実舵角に付加する“微分操舵アシスト”の有効性の検討を行なった。

ここで、スピン傾向領域は後輪が最大コーナリングフォースを越えた領域を示し、グリップ領域は前後輪のタイヤスリップ角の比較的小さい領域で最大コーナリングフォースを越えていない領域を示す(Fig.1)。

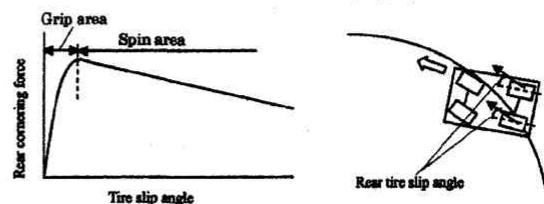


Fig. 1 Use area of rear wheel tire in the spin area and the grip area in the vehicle.

平成18年6月5日受理

\* 機械工学科

併せて、ステアリングギヤ比変更による応答ゲインの影響も確認した。

2. シミュレーションモデルの概要

2.1 車両モデルの概要

シミュレーションの車両モデルとして、メカニカルシミュレーションコーポレーション (MSC社:USA) の CarSim (Version 6) というフルビークル車両運動シミュレーションモデルを用いた。 Fig.2 は、車両モデルの概要を示す。 Table 1 に、車両の主要部の数と、自由度の数を示す。 リヤサスペンションは、 Fig.3 示すように、リジッドアクスルであり、2自由度 (アクスルの垂直の動きと、ロール) である。 詳細は、参考文献<sup>6)</sup>を参照。

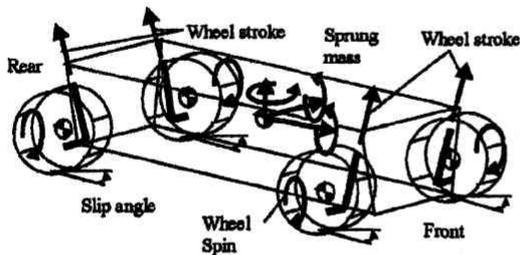


Fig. 2 Rigid bodies in the vehicle math model.

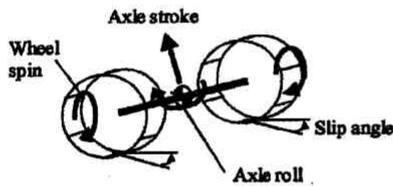


Fig. 3 Solid-axle movement.

Table 1 Bodies and degrees of freedom in car model.

Bodies	
Sprung mass body	1
Unsprung mass bodies (wheel carriers)	4
Rotating wheels	4
Engine crankshaft	1
<b>Total</b>	<b>10</b>

Degrees of freedom	
Sprung body translation (X, Y, Z)	3
Sprung body rotation (yaw, pitch, roll)	3
Suspension stroke	4
Wheel spin	4
Powertrain (Engine crank shaft)	1
Tire delayed slip (lateral, longitudinal)	8
Brake fluid pressure	4
<b>Total</b>	<b>27</b>

本実験に使用した試験車両の諸元を Fig.4 に示す。 車両のエンジンレイアウト及び駆動形式は、スピン傾向状態により陥りやすいFRレイアウト(フロントエンジンマウント、リヤドライブ)の車両モデルを用いた。

車両諸元は全幅 1500 mm, ホイールベース 2690 mm, 前輪中心から車両最後尾まで 3800 mm, 前輪中心から重心の中心点まで 1014 mm, 地上から重心までの高さ 542 mm, 車両質量 1527 kg, ロール慣性モーメント 606.1 kg・m<sup>2</sup>, ピッチ慣性モーメント 2741.9 kg・m<sup>2</sup>, ヨー慣性モーメント 2741.9 kg・m<sup>2</sup> などとなっている。

タイヤコーナリングフォース特性については、コーナリングフォース特性として Fig.5 に示すような一般的なタイヤ特性を用いた。

また、加減速時の特性はFig.6 に示すような特性とした。

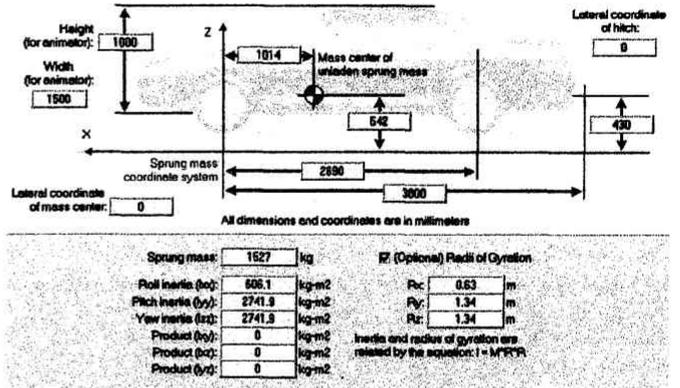
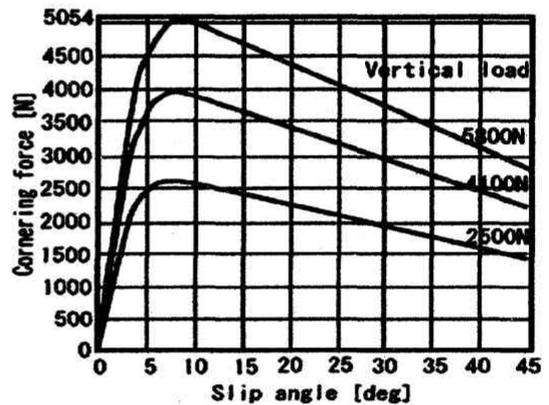


Fig. 4 Experiment vehicle data.



Tire/ground friction coefficient for this data 0.87

Fig. 5 Tire cornering force characteristic.

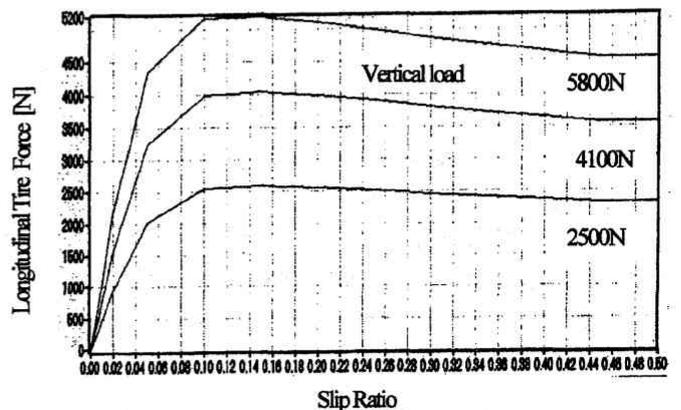


Fig. 6 Longitudinal tire force characteristic.

スリップ角とスリップ比が同時に付加される場合については、CarSim のコンパインド特性の計算に基づき摩擦楕円の概念を用いて計算を行っている<sup>7)</sup>。

従って、上述の摩擦楕円の概念を用いているので、限界コーナリング中に、加速を行なうと、加速によって後輪の横力が減少してスピン傾向に陥ったり、カウンターステアにより、スピン傾向をコントロールしたコーナリングを行ったりという、実車と同様の限界を越えた領域の走行シミュレーションができる。

2.2 ドライバモデル

本ドライバモデル(CarSim)では、MacAdam が提案した最適制御理論を用いた自動車モデルを用いている。(詳細は参考文献<sup>8) 9)</sup>を参照。)

Fig.7 に示すように、ドライバが予見時間における目標コースを認識する。予見時間は、予見距離を車両の速度で除したものである。ドライバは目標コースの認識と同時に、現在の車両の状態量から予見時間内に車両が走行すると思われる軌道(推定コース)を推定する。この推定コースは、ドライバが体で感じる車両の状態や前方視野の流れから予想されると考えられる。そして予見時間内における目標コースと推定コースの誤差を最小にするように操舵制御を行う。

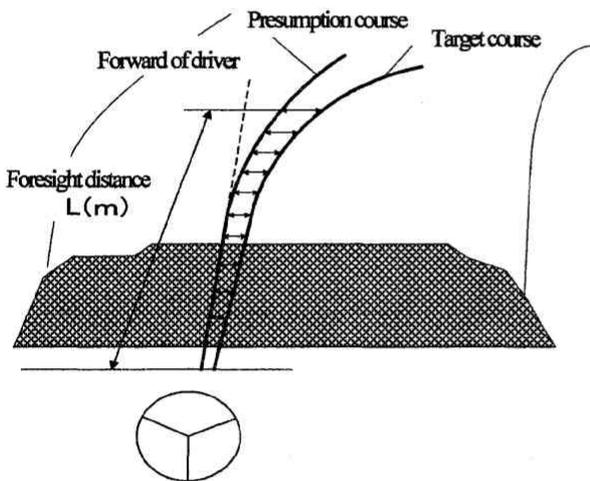


Fig. 7 Outline of driver model.

Fig.8に本ドライバモデルのアルゴリズムを示す。目標コースがドライバに与えられ、それと同時に車両の応答がドライバにフィードバックされる。これらの応答は、絶対座標系における車両の前車軸中央の位置( $X_v, Y_v$ )と車両の前方向および横方向速度( $V_x, V_y$ )と車両のヨー角およびヨーレイト( $\psi, \dot{\psi}$ )とコンプライアンスステア $U_0$ である。

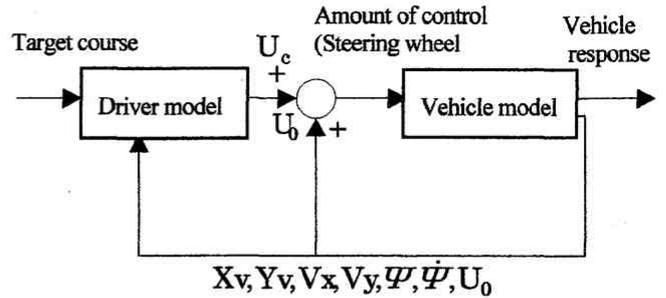


Fig. 8 Algorithm of driver model.

これらの情報を元にドライバは次の行動を行う。

- ①現在の車両の状態から、予見時間内における車両の移動軌跡を推定する(コース推定)。
- ②目標コースと推定コースのずれを最小にするように操舵する。この際、ドライバはコンプライアンスステアをあらかじめ予想し、これを加えて操舵をするものとする。
- ③ドライバの操舵は、ドライバの生態的な反応遅れ時間を考慮した。

本ドライバモデルは、コンプライアンスステアも定量的にフィードバックして、コンプライアンスステアのみで合わせて操舵している。理由は、コンプライアンスステアによって生じる誤差を無くするためである。実際の一般的なドライバを想定すれば、コンプライアンスステアを体感してフィードバックすることはできないかもしれないが、エキスパートドライバは、車のコンプライアンスステアも心得て操舵しているかもしれない。いずれにしても、コースの追従性を重視するために、コンプライアンスステアも補正して操舵するようにしている。

次に、ドライバモデルの式について、概要を示す。

推定コースの計算においては、次のような状態変数行列式で表現している。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $u$  はドライバからの操舵角入力、状態ベクトル $x$  は、次に示す。

- $x_1$ : 現在のドライバの位置を原点としてドライバの前方向  $X$  軸にとるドライバ座標系における、将来予想される車両重心の位置の  $Y$  座標。現在の車両重心位置の  $Y$  座標は 0 とする。
- $x_2$ : ドライバ座標系における、将来予想される車両の姿勢角 (ヨー角  $\psi$ )。現在の車両の姿勢角を 0 とする。
- $x_3$ : 車両の横方向速度,  $V_y$
- $x_4$ : 車両のヨーレイト,  $\dot{\psi}$

出力  $y$  は、ドライバ座標系における、将来予想されるドライバの  $Y$  座標を示す。式(1)をオイラー積分することにより、

現在のドライバの位置を原点としてドライバの前方を  $X$  軸にとるドライバ座標系において、0 から予見時間  $T$  までの間に移動するドライバの位置の  $Y$  座標を求めている (Fig.9)。

目標コースの計算においては、絶対座標系のコースデータのほかに、スタート地点からコースに沿った距離 ( $S$ ) を定義した。現在の道のり  $S$  において車速  $V_x$  で走行している時点での、予見時間内の目標コースの道のり  $S_{iarg,i}$  は、次式となる。

$$S_{iarg,i} = S + \frac{iV_x T}{m} \quad (2)$$

ここで、 $i = 1 \dots m (=10)$

目標コースの道のり  $S_{iarg,i}$  がわかれば、これをデータ ( $S, X, Y$ ) に照らし合わせて、絶対座標系での目標コース ( $X(S_{iarg}), Y(S_{iarg})$ ) が求められる。従って、現在の車両のヨー角  $\psi$  を用いて、ドライバ座標系における目標コースの横ずれ量は、次式となる。(Fig.9参照方)

$$Y_{iarg,i} = [Y(S_{iarg,i}) - Y_V] \cos(\psi) - [X(S_{iarg,i}) - X_V] \sin(\psi) \quad (3)$$

本ドライバモデルは最適制御をしており、目標コースから推定コースを差し引いた誤差を予見時間内で最小にするように操舵を行っている。

$$J = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_i (Y_{iarg,i} - y_i)^2 \quad (4)$$

ここで、 $W_i$  : 任意の重み付け関数

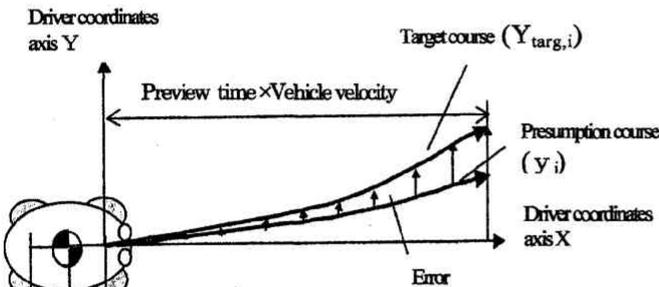


Fig.9 Error between target course and presumption course in driver coordinates axis.

### 2.3 車両の操舵方式 (微分操舵アシスト)

次に微分操舵アシストの操舵方式を式(5)に、ブロック線図を Fig.10 に示す。

$$\delta_f = \delta_H / N + P \cdot \dot{\delta}_H \quad (5)$$

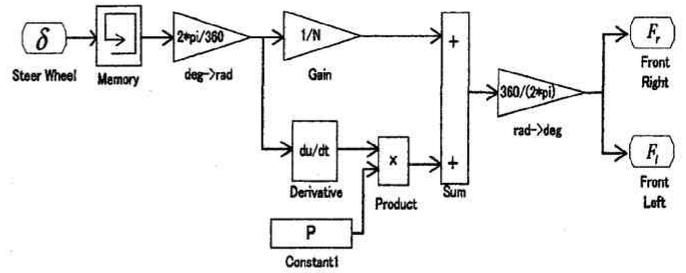


Fig.10 Block diagram of differentiation steer assist system.

ここで、 $\delta_f$  : 前輪実舵角、 $\delta_H$  : 操舵角、 $N$  : ステアリングギヤ比 (=12)、 $P$  : アシスト定数、 $\dot{\delta}_H$  : 操舵角速度

シミュレーションには  $P=0$  の車両 A (アシスト無し)、 $P=0.005$  の車両 B、 $P=0.007$  の車両 C の 3 車両ケースを用い、車両がスピン傾向状態に陥る状況で、微分操舵アシストが車両に及ぼす影響についてシミュレーションを行った。シミュレーションに用いたコースを Fig.11 に示す。

Fig.11(a)の定常円旋回レーンチェンジでは車速 100km/h と 110km/h について、Fig.11(b)のダブルレーンチェンジでは車速 130km/h と 140km/h でシミュレーションを行った。

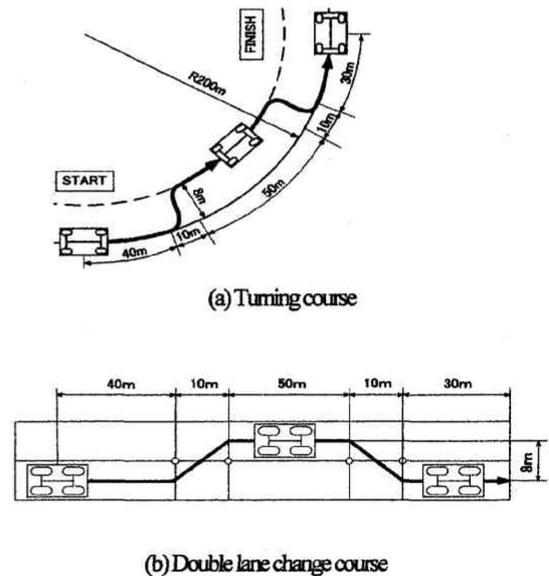


Fig.11 Running course.

### 3. シミュレーション結果

定常円旋回レーンチェンジのシミュレーション結果は、車速 110km/h の場合を Fig.12 から Fig.15 に示す。

Fig.12 の車両軌跡を見ると、微分操舵アシストを付加しない車両 A は急操舵を行った際、スピン傾向状態に陥った車両をコントロールできずスピンしている。しかし微分操舵アシストが付加されている車両 B と車両 C はスピンを回避し、元のコースに復帰できていることがわかった。

そこで、車両挙動の時系列波形により、微分操舵アシストの効果を、より詳しく把握を行った。

Fig.13 の操舵角では、急操舵を行ったことで発散している車両 A に比べ、車両 B と車両 C はカウンターステアをあて戻しを上手くコントロールでき、収束していることがわかった。この時車両 C は、操舵のあて戻しの回数が車両 B よりも少ない。従って、微分操舵アシストの定数が大きいと、ドライバのカウンターステアのコントロールをより容易に収束傾向にその度合いを強めることができることがわかった。

Fig.14 の車体スリップ角においては、車両 A は 10deg を越えスピン傾向状態に陥った車両をコントロールできずに発散しているが、車両 B と車両 C は、車体スリップ角 10deg を越えスピン傾向状態に陥った車両をコントロールし、一定値に収束できている。

Fig.15 の前輪実舵角において、車両 B と車両 C は微分操舵アシストの効果によって、微分操舵アシストを付加しない車両 A に対して、前輪実舵角の位相が進むことが確認できた。

Fig.13 と Fig.15 の操舵角と、前輪実舵角の時系列波形を対比してみると、微分操舵アシストを加えることにより、前輪実舵角の位相が進み、その位相進みにより、スピン傾向状態の車両コントロールに必要な前輪実舵角量が低減することがわかった。

以上により、このような、コーナリング中の緊急回避時において、車体スリップ角 10deg を越え、明らかにスピン傾向に陥った場合でも、微分操舵アシストを加えることにより、十分、スピンは回避できることがわかった。

ダブルレーンチェンジでのシミュレーション結果は、車速 140km/h の場合を Fig.16 から Fig.19 に示す。

この走行では、微分操舵アシストを付加しない車両 A と、車両 B がスピンし、車両 C のみがスピンしなかった。この結果より、微分操舵アシストが高速で走行する車両に及ぼす効果を明らかにすることができた。

Fig.19 の前輪実舵角のグラフでは、車両 B と車両 C は微分操舵アシストの効果により、微分操舵アシストを付加しない車両 A に対して前輪実舵角の位相が進むことが確認できた。

また、Fig.18 の車体スリップ角では、前輪実舵角の位相のわずかな違いによる影響が顕著に表れている。車両 A と車両 B は、前輪実舵角 (カウンターステア)のあて戻しのタイミングが遅れたことで、車体スリップ角が増大し、コントロール不能になりスピンしている。Fig.16 の車両軌跡では、車両 C は微分アシストを付加しなかった車両 A に比べオーバーシュートが少なく、安定性が高まることがわかった。

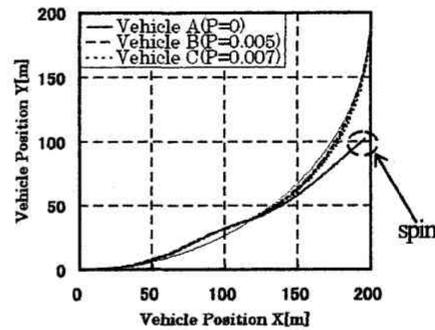


Fig.12 Running trajectory.

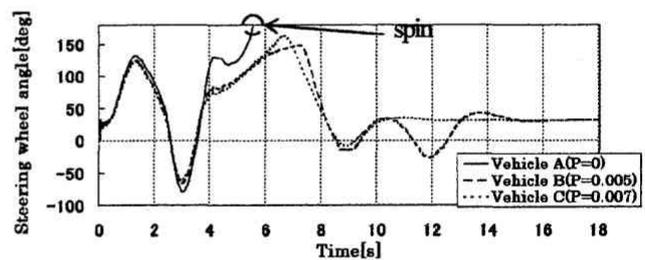


Fig.13 Steering wheel angle.

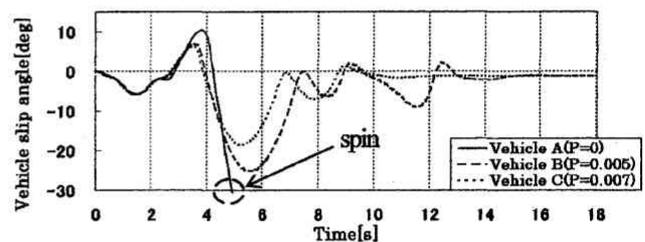


Fig.14 Vehicle body slip angle.

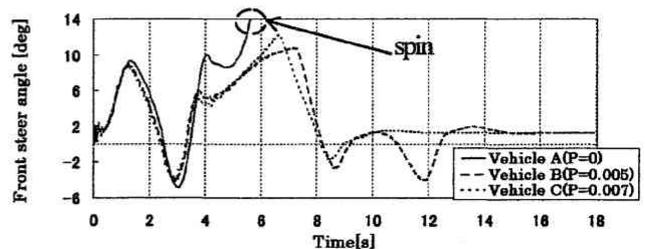


Fig.15 Front steer angle.

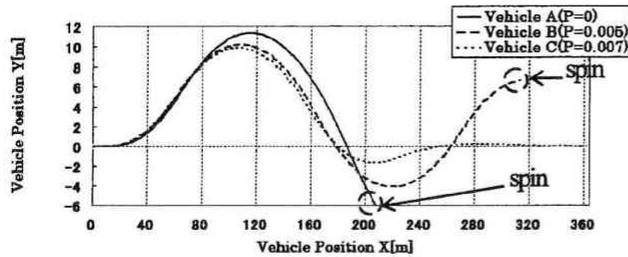


Fig.16 Running trajectory.

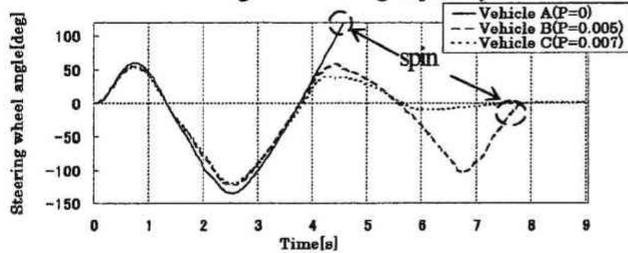


Fig.17 Steering wheel angle.

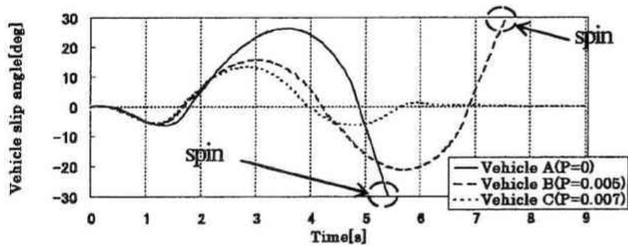


Fig.18 Vehicle body slip angle.

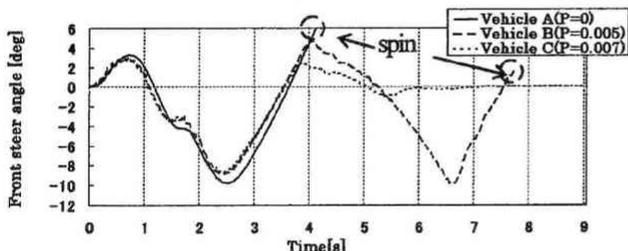


Fig.19 Front steer angle.

4. 試験結果 (ドライビングシミュレータによる確認)

4.1 試験装置 (ドライビングシミュレータ) の概要

本研究に用いたドライビングシミュレータ (バーチャルメカニクス製をベースにしている) の概要を以下に示す (Fig.20, Fig.21) .

ドライビングシミュレータの車両モデルとして, 2項のシミュレーションモデルと同様に, メカニカルシミュレーションコーポレーション (MSC社USA) の CarSim というフルビークル車両運動シミュレーションモデルを用いた.

シミュレータは, 運転状況を再現するために, 視界映像システム, 走行時のエンジン音等の車内音発生システム, そして, ロールとピッチの2自由度の運動ができるモーション装置を組み込まれている.

モーション装置のロールは, 車両運動モデルのロール角信号を入力して動作させている. 横加速度信号からのモーション装置のロールは, 行っていない.

理由としては, 高い横加速度状態のシミュレータでの再現は, 実際のギャップにより, シミュレータ酔い等の問題が生じるためである. そこで, ここでは, モーション装置のロールは, 実走行のロールを模擬できる程度のボリュームコントロールを行なっている.

また, 測定できる項目は次のようになっている.

- \*運転状態データ: 操舵角, 操舵トルク, 車速, 走行軌跡, 車体スリップ角, ヨーレイト, ヨー角, ロール角, ピッチ角, 横加速度, 4輪実舵角等

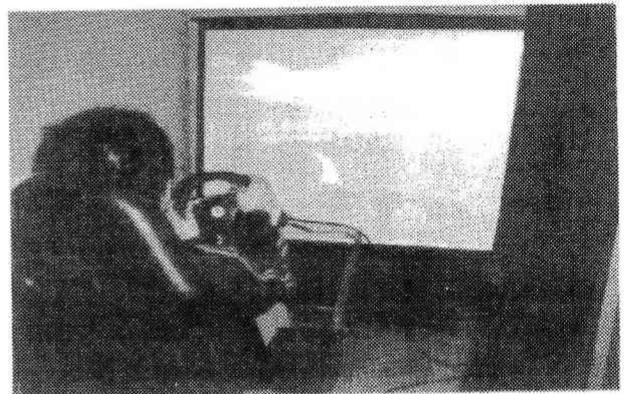


Fig.20 Driving simulator.

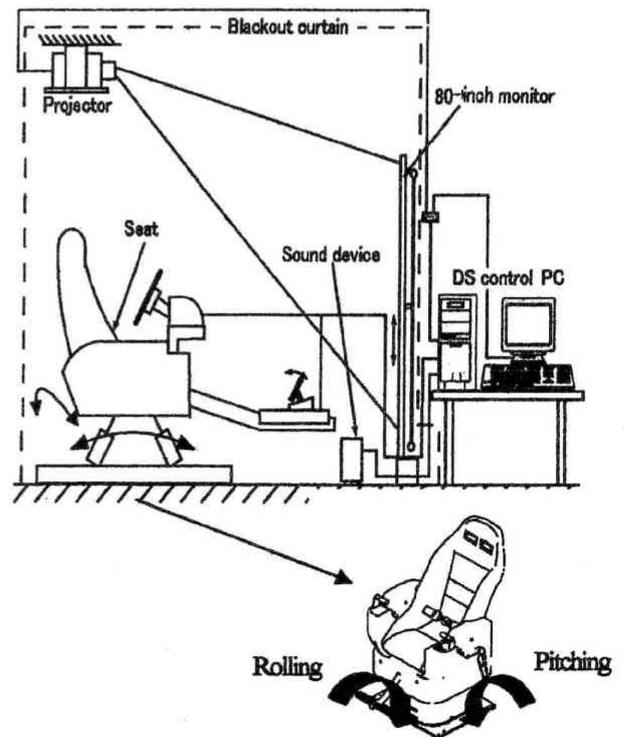


Fig.21 Outline of driving simulator.

4.2 被験者

実験の被験者は Table 2 に示すように、ドライビングシミュレータ及び運転に比較的慣れた2名と、ドライビングシミュレータ及び運転に不慣れな2名の計4名で、10回ずつ行った。

Table 2 Subject.

Subject	A	B	C	D
Experience of DS	More than 3years	More than 2years	Less than 1year	Less than 1year
Driving Experience	More than 4years	More than 3years	Less than 1year	More than 2years
How often use a car	Everyday	Everyday	Sometimes	Sometimes

All subjects are males

4.3 試験結果

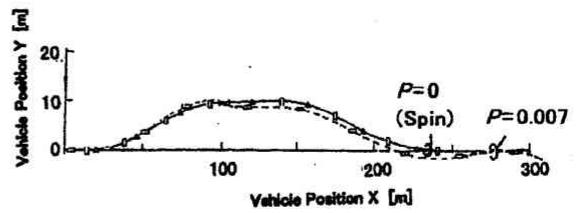
スピン傾向を伴う緊急回避を模擬した、ダブルレーンチェンジの場合において、微分操舵アシスト定数  $P=0$  (微分アシストが無い場合) と微分操舵アシスト定数  $P=0.007$  の場合について、ドライビングシミュレータを用い、走行確認を行なった。 Fig.22, Fig.23 は被験者A, 被験者Cの試験結果を示す(車速約 100km/h の場合)。各被験者共、ほぼ同様の傾向を示した。微分操舵アシスト定数  $P=0.007$  の場合、 $P=0$  (微分アシストが無い場合) に比べ、スピン傾向をコントロールしている時の後輪の横すべり挙動は穏やかとなった。また、微分操舵アシスト定数  $P=0.007$  の場合、カウンターステア操作に対する収束性が向上した。一方、微分操舵アシスト定数  $P=0$  (微分アシストが無い場合)、カウンターステアが間に合わず、急激となり、収束することなく、車両はスピンのままに到った。

Table 3 に、各被験者の実験結果の繰り返し性を示す。その結果は、被験者Aと同様に、ドライビングシミュレータ及び運転に比較的慣れた被験者Bも同様の傾向を示した。また、ドライビングシミュレータ及び運転に不慣れな被験者B, 被験者Cは、微分操舵アシスト定数  $P=0.007$  の場合でも、初めの方の1~2回目において、カウンターステアが間に合わず  $P=0$  (微分アシストが無い場合) と同様にスピンに到ってしまったケースがあったが、被験者A, B とほぼ同様の傾向であった。

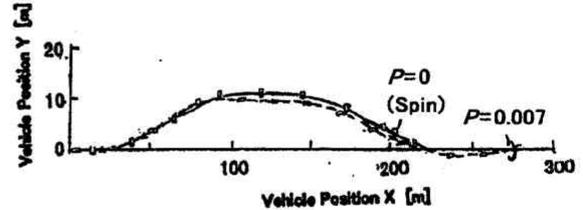
従って、微分操舵アシストが、スピン傾向を伴う緊急回避時の性能向上に有効であることが確認できた。

5. ステアリングギヤ比違いによるドリフト円旋回実験

ドライビングシミュレータを用い、比較的慣れたドライバ2名と不慣れなドライバ2名の計4名でステアリングギヤ比(N)を 15.0, 12.0, 9.0, 7.5, 6.0, 3.0 と変化させ、実舵角のゲインが変化する影響について実験を行った。操舵特性の関係図を Fig.24 に示す。

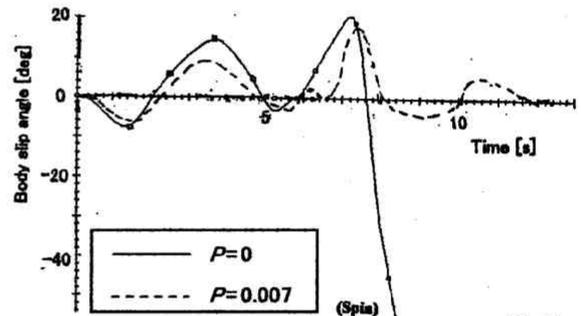


(Subject A)

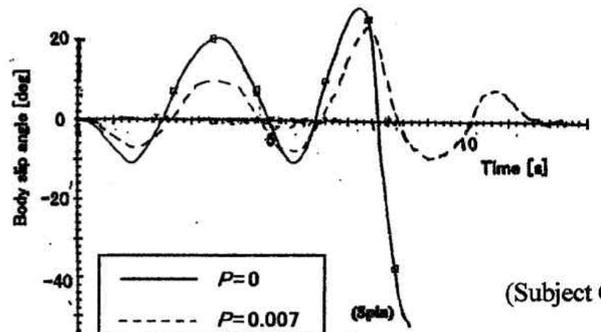


(Subject C)

Fig. 22 Experiment result of running trajectory with driving simulator.



(Subject A)



(Subject C)

Fig. 23 Experiment result of vehicle body slip angle with driving simulator.

Table 3 Repetition character of experiment.

	Subject A	Subject B	Subject C	Subject D
$P=0$	Always spin	Always spin	Always spin	Always spin
$P=0.007$	Always steady settling	Always steady settling	Steady settling :80% (Only 1st time and 2th time are spin.)	Steady settling :90% (Only 1st time is spin.)

実験データは代表例として比較的慣れたドライバー1名の操舵角と走行軌跡を Fig.25, Fig.26 に示す。通常車両相当の車両 A(N=15.0) はカウンターステアのあて戻しをうまくコントロールできずスピンアウトするが、車両 C(N=9.0)はステアリングギヤ比を比較的小さくしたため、カウンターステアをうまくコントロールでき、ドリフト円旋回を走行することができた。

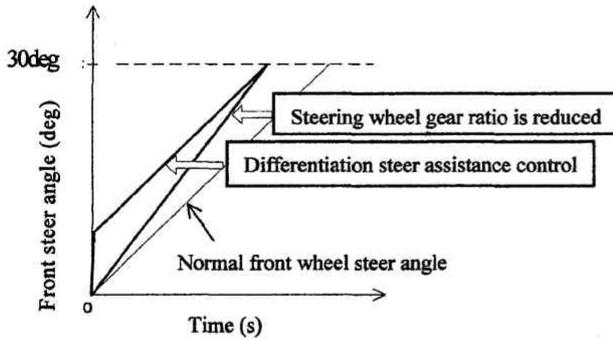


Fig. 24 Time ~ Front Steer angle.

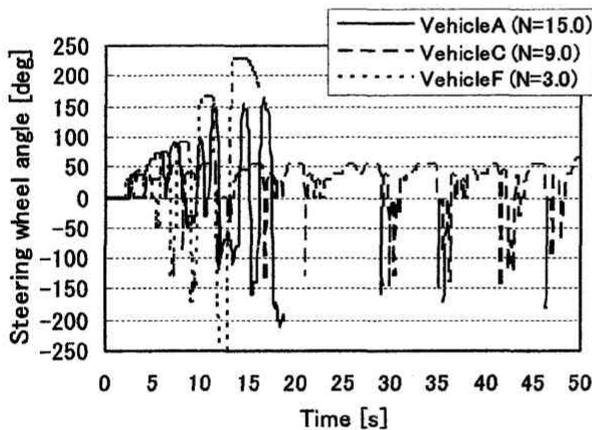


Fig. 25 Simulation results (Gear ratio).

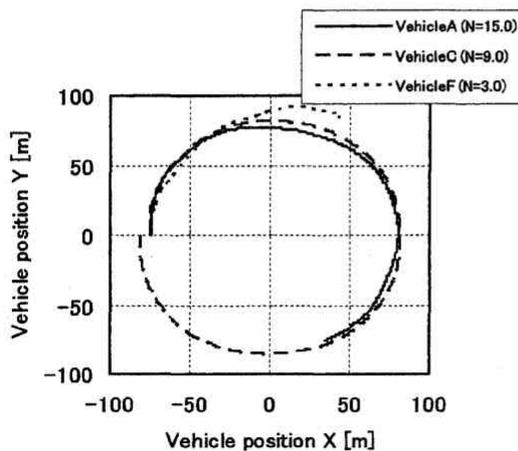


Fig. 26 Running trajectory.

また、車両 F(N=3.0)は、ステアリングギヤ比を極めて小さくしたため、走行を継続できないことがわかった。走行軌跡においても、車両 A よりも、車両 C の方が長く旋回を継続できることがわかった。車両 F は、コントロール性が著しく低下したため、すぐにスピンアウトしてしまうことがわかった。

## 6. 結 論

緊急回避性能の向上に関する一考察を行なった。

その結果、下記の結論が得られた。

(1) コーナリング中に緊急回避を行い車両がスピン傾向状態に陥った場合に、微分操舵アシストの効果により位相が進みカウンターステアの遅れをカバーできるので、スピン等の不安定な挙動を回避でき、コントロール性、安定性の向上が可能となること。

(2) 直線走行中の緊急回避では、微分操舵アシストを付加することで、オーバーシュートも少なくスピンを回避し短い時間で安定状態に戻れること。

(3) ステアリングギヤ比を適度に小さくすることで、応答ゲインが増し、狙いのカウンターステア角に早く達することができる。これは、位相を進める効果のある微分操舵アシストと同様に、後輪のスピン傾向をコントロールする際に、効果的であること。

## 7. あとがき

本研究では、緊急回避性能の向上手法を検討した。

今後は、更に効果的な手法について検討を進め、操舵アシストの望ましい方向を追及していきたい。

## 参考文献

- 1) 平尾収：自動車技術 23(1) (1969) 48.
- 2) 平尾収：自動車技術 20 (11) (1966) 995.
- 3) 宮森章広・中谷弘能：自技会前刷集 974 (1997) 101.
- 4) 中谷弘能：自技会前刷集 944 (1994) 133.
- 5) H.Inoue and F.Sugasawa, Proceedings of AVEC '92 (923047) (1992) 258.
- 6) Y.Watanabe and M.W. Sayers, Proceedings of 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control (2002) 407.
- 7) Pacejka H.B. and Sharp R. S., Vehicle System Dynamics 20 (1991) 121.
- 8) MacAdam, C.C., ASME 102 (3) (1980)
- 9) MacAdam, C.C., IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics 11 (1981)