視覚情報に体感情報を付与した場合におけるドリフトコーナリング時の操舵特性と発汗量の変化について*

野 崎 博 路^{*1}

About the Change in the Amount of Perspiration and Steer Characteristic by Giving Visual Information and Body Sensory Information in the Drift Cornering

Hiromichi NOZAKI^{*2}

^{*2} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Kinki University,
3-4-1 Kowakae, Higashiosaka-shi, Osaka, 577-8502 Japan

The following has been understood for the change in the steer characteristic and the amount of perspiration in the drift cornering when not only visual information but also body sensory information is added. When body sensory information joins visual information as for the driver, it has been understood that the amount of perspiration increases overall and can do the drift control continuing with a moderate tension. In the drive only of visual information, the driver comes to arrive easily at spin because the drift control is difficult. And, it has been understood that the amount of perspiration increases greatly compared with the case to give body sensory information, and becomes the one with a very high risk. Moreover, the driver can control an adequate drift compared with driving only visual information in feed back body sensory information on the roll angle to the steer. Therefore, the importance of the perception of the state of the vehicle by giving the driver moderate body sensory information was able to be confirmed, and a preferable direction as the vehicle was clarified.

Key Words: Automobile, Maneuverability, Human Engineering, Human Interface, Vehicle Dynamics, Stability

1. まえがき

ドライバが車両を運転する場合に用いる情報に関する知見については、ドライバの操縦モデルとして、近藤⁽¹⁾により提案された前方注視モデル(予見制御)モデルが有る。ドライバは主として、前方注視点における車両重心点と目標コースの横変位のズレと、車両中心線と目標コースとのなす角度をフィードバックすることにより、前方注視点における目標コースとの偏差をフィードバックするというドライバモデルが提案されており、レーンチェンジ時のドライバの操縦を含めたクローズドループのシミュレーション解析等に用いられ、実走行時の定性的な性質を把握することができるようになった。その後、吉本⁽²⁾により、コーナリング中のモデルについて、二次予測モデルとして、ヨー角速度、車体スリップ角速度も加えて、将来到達するであろうコースと、目標コースとの偏差をフィードバックするドライバモデルが提案され、実走行時のコーナリングに近いシミュレーションを可能とした。また、井口⁽³⁾により、ハンドルに

戻ってくる反力も自動車の運動に関する情報をドライバに与えていて、前述の視覚フィードバックだけの場合におけるドライバの弱点を補ってくれていると示される。

すなわち、ドライバは、視覚だけでは補えない操縦コントロールを体感フィードバックを加えることにより、難しい操縦をしいられる際にも対応できている傾向があると判断できる。

そこで、本稿では、ドリフトコントロールのように難しい操縦行動において、ドライバは、車両のロール等の動きもフィードバックパラメータとして加えてコントロールしていると考えられたので、その検討を行った。

具体的には、ドライバが運転中に得られる情報としては、①視覚情報に加えて、②体感情報があると考え、特に、ドリフトコーナリングのように、難しい車両コントロール時には、ドライバは、①の視覚情報だけでは、不十分で、②の体感情報をもフィードバックして操舵コントロールしていると考えられた。そこで、本研究では、ドライビングシミュレータを用い、モーション ON 時と、モーション OFF 時において、ドリフトコーナリングを行ない、その検証実験を行なうと共に、その時の操舵特性の把握を行なった。

また、同時に、ドリフトコントロール時のドライバ

* 原稿受付 2005 年 3 月 14 日。

^{*1} 正員、近畿大学理工学部(〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)。

E-mail: nozaki@mech.kindai.ac.jp

の緊張度や、スピンに至った場合のヒヤッとした危険感の度合いが、モーション ON 時と、モーション OFF 時において、どのように異なるのか、発汗量による検討実験を行なった。

2. 実験装置（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の概要を以下に示す（表1，図1，図2）。

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が組み込まれている。

ドライバは、80 インチモニタースクリーンから約2m離れたモーション装置付シートに着席する。スクリーンとの高さ関係も、視線がほぼ水平になるように設定している。

ハンドルからの反力は、リターンズプリングによる簡単なものであるが、実走行時とは、やや異なっている。

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、行なっていない。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。具体的には、定常旋回

時のドライビングシミュレータのロール角データと、モーション装置の実際のロール角が、ほぼ同様の値になるように設定した。

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

*生体反応データ： 発汗量

図3は、発汗計のセンシング部であるカプセルを手のひらに装着した様子を示す。

本実験で使用した2チャンネル型発汗計（株式会社スキノ製）は、構成が簡単かつ取り扱いが容易なルームエアーを基準にした差分方式換気カプセルである。従来のように、乾燥空気や N_2 ガスを必要としないルームエアーをカプセルに供給している新しい方式のものを採用している。詳細については、参考文献④を参照方。

Fig. 1 Driving simulator

Table 1 Specification of driving simulator

Driving simulator made by Fuji Heavy Industries Ltd. + Motion base of two simple axes (Joy Chair-R1) made by Kawada industries Inc.		
Motion system of driver's seat	Movable axis	Roll & pitch (Two axes)
	The maximum movable range	±15deg (Both of two axes)
	The maximum boarding weight	100kg
	The maximum angle velocity	40deg/sec
Drive input device	Steering wheel, accelerator pedal, and brake pedal	
Pseudo steering reaction force mechanism	Method with return spring	
View display device	Projector and 80-inch monitor screen	
Data base of view	Oval course used by American motorsports	
Control	Personal computer (windows 2000 PC)	
Simulation program of vehicle movement	Four-wheel model (CarSim (Version 5.16)) made by Mechanical Simulation Corporation.

Fig. 2 Outline of driving simulator

Fig. 3 State to install perspiration meter in mere of hand

3. 実験方法と車両モデル及び車両特性

- ・実験の被験者は表2に示すように、ドライビングシミュレータとドリフトコーナリングに比較的慣れた2名と、ドライビングシミュレータに不慣れた2名の計4名で、モーション ON, OFF 交互に5回ずつ行った。
- ・ドリフトコーナリングのし易さのフィーリング評価も行った。

Table 2 Subject

Subject	A	B	C	D
Age	24	22	24	24
Experience of DS	More than 2years	More than 2years	Less than 1years	Less than 1years
Driving Experience	More than 4years	More than 3years	Less than 1years	More than 2years
How often use a car	Everyday	Everyday	Twice a week	Twice a week

All subjects are males.

① J ターン走行実験 (図4)

・直線路の後に半径75mの半円を旋回し直線へ抜けるJターン走行実験を行なった。進入速度は90km/hと100km/hの2段階で行なった。ドリフトを伴うコーナリングとなるような高めの車速域に条件設定した。旋回中は、アクセルワークにより、指定速度域を維持するよう義務づけた。被験者には、特に、グリップ走行、ドリフト走行などの走行方法は指定せず、目標コースを追従するよう義務づけた。車両がJターンコースを抜けきるか、もしくは車両がスピンしたら走行を終了とした。

Fig. 4 J turn course

②ドリフト円旋回実験 (図5)

・ドライバは、半径75mの旋回試験において限界コーナリング中にアクセルを踏み込んで後輪をパワースライドさせ、カウンターステアを当て、その後カウンターステアの量をコントロールして、ドリフトアングルを維持しながら75Rのドリフト旋回のコントロールを続ける方式で行った。

補足すると、後述のドライビングシミュレータのタイヤ特性において記述しているように、制駆動力を考慮した摩擦楕円の概念を用いているので、限界コーナリング時に加速することによって、後輪の横力が減少してスピン傾向に陥るので、カウンターステアにより、ドリフトをコントロールしてドリフトアングルを維持するという方式である。

ドライビングシミュレータ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 5.16) というフルビークル車両運動シミュレーションソフトを組み込んでいる。図6は、車両モデルの概要を示す。表3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、図7に示すように、リジットアクスルであり、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(5)を参照方。

Fig. 5 Turning course

Fig. 6 Rigid bodies in the vehicle math model

Fig. 7 Solid-axle movement

Table 3 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
Total	10
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
Total	27

本実験に使用した試験車両の諸元を図8に示す。車両のエンジンレイアウト及び駆動形式は、ドリフト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、リアドライブ)の車両モデルを用いた。車両諸元は全幅1500mm、ホイールベース2690mm、前輪中心から車両最後尾まで3800mm、前輪中心から重心の中心点まで1014mm、地上から重心までの高さ542mm、車両質量1527kg、ロール慣性モーメント606.1kg·m²、ピッチ慣性モーメント2741.9kg·m²、ヨー慣性モーメント2741.9kg·m²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図9に示すような一般的なタイヤ特性を用いた。

また、加速減速時の特性は図10に示すような特性とした。

(Tire/ground friction coefficient for this data 0.87)

Fig. 9 Tire cornering force characteristic

Fig. 10 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、これらの定義が異なる二つの量を一つの量に統合して扱い、この量がある一定値とすると、コーナリングと制動運動の複合状態を表わしたものの、すなわち摩擦楕円について、CarSimのコンパインド特性の計算に基づきこの摩擦楕円の概念を用いて計算を行っている。

PacejkaのMagic Formulaの複合入力モデルの考え方を適用しており、詳細は、参考文献(6)を参照方。

ここで、タイヤのスリップ角は、タイヤの進行方向とタイヤの向いている方向とのなす角を示す。また、タイヤのスリップ率は、車両が制動した時の車体速度と車輪の周速度との差を車体速度に対する比率で表示したものを示す。

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、ドリフト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が模擬できる。

4. 実験結果

4.1 実験時の操舵特性と発汗量の変化について

図11にJターン走行実験(進入速度 100km/h)のコース追従成功率, 図12にドリフト円旋回実験でのドリフト維持時間を示す。図13にJターンのフィーリング評価を示す。モーション ON 時は, モーション OFF 時に比べ, J ターンコースの追従成功率が高く(図11), ドリフト維持時間も長いことから(図12), 全被験者においてモーション ON 時のほうがドリフトコントロールを比較的うまく行えていることがわかる。また図13より, フィーリング評価もモーション ON 時のほうが高く, これはドリフト円旋回においても同様であった。

ドリフト円旋回実験の被験者Aの実験結果(時系列波形)を図14に示す。ドリフトコーナリング中における発汗が点線のモーション OFF 時に比べ, 実線の ON 時では変化が大きくなっている。車体スリップ角の変動に対してモーション OFF 時では 15° 前後でカウンターステアを当て始めているのに対して, ON 時では 10° 前後とカウンターステアを当てるタイミングが若干早い傾向がみられた。また, スピンアウト後に危険感から起こる発汗では, 視覚情報のみのモーション OFF 時のほうが ON 時に比べ, 大きく変化する傾向がみられた。このようなことについて, 定量的に解析した結果を次に示す。

Fig.11 Rate of success (J-turn 100km/h)

Fig.12 Average time of drift cornering (Drift cornering)

Fig.13 Subjective rating (J-turn 100km/h)

Fig.14 Experiment result of drift cornering (Subject A)
(Drift cornering)

4.2 モーション装置の ON・OFF によるドリフトコーナリングの発汗量の変化 モーション装置 ON・OFF 別のドリフト旋回中における発汗増分量の平均値と標準偏差を図15に示す。

全被験者において, モーション ON 時では OFF 時に比べ発汗が大きく増加しており, カウンターのあて直しによりドリフトコーナリングを繰り返し走行し続けるドリフト円旋回実験では, 特に顕著な差がみられた。視覚情報に体感情報を付与した時ではドリフトコーナリング中における発汗量の増加が大きい結果となった。

モーション ON 時では比較的うまくドリフト維持を行えていることから, ON 時の発汗量の増加は, 体

Fig.15 Comparison of perspiration
(Maintaining the drift cornering)

感情情報をフィードバックしながらドリフト維持を行っている活発な精神活動によるものと考えられる

4.3 モーション装置の ON・OFF によるスピン直後の発汗量の変化 スピン直後の発汗の増加において、モーション ON・OFF で差異がみられたので、全実験結果からスピン直後の発汗増分量について、モーション ON・OFF 別で平均値と標準偏差を取り、図 16 に示すように比較を行った。被験者 B では、両実験においてモーション ON 時でスピンのなかった為に比較は行えない。

J ターン走行実験及びドリフト円旋回実験でもモーション ON 時ではスピン後の定常値からの発汗増加量が平均で $0.1 \text{ mg/cm}^2/\text{min}$ 前後であるのに対し、OFF 時では $0.2 \text{ mg/cm}^2/\text{min}$ 前後と全被験者において増加量が大きい結果となった。各被験者が「OFF 時では、スピンの気付くのに遅れがでる」とコメントしていることから、OFF 時のスピン直後の危険感の強さが、発汗量の差異となって現れている事がわかった。

Fig.16 Comparison of perspiration
(After spin)

4.4 ロール角の操舵に対する影響 操舵角とロール角のリサージュ波形を図 17 に示す。

モーション ON 時では、ロールが限界に近づくカウンターステアを行い、ロール角を減少させている。そして、カウンターステアの当て、そして、戻しの操舵とロール角の関係は滑らかな、規則的な丸みのあるリサージュ波形となっており、ロールに対応した操舵となっていることがわかった。

一方、モーション OFF 時では、リサージュ波形は交錯するなど、不規則な形状であり、ロール角をフィードバックして操舵しているとは言い難い。

モーション ON 時では被験者はロール角をフィードバックしながら、カウンターステアの繰り返しによるドリフトコントロールを行なっていることがわかった。

Fig17 Relation of roll angle - steering wheel angle
(Subject C, J-turn, $V=100\text{km/h}$)

4-5 第1カウンターステア時の車体スリップ角の差異について

図18はドライバが最初のカウンターステアを行なったときの車体スリップ角について示す。全ての被験者において、モーション装置 ON の場合の方が、車体スリップ角 10° 付近でカウンターステアを行なうことができている。一方、モーション OFF の場合は、カウンターステアが遅れ、またカウンターステアのタイミングにばらつきが見られた。

従って、モーション装置 ON の場合は、ドライバは、4-4 項に示すように、ロール角の体感情報をフィードバックすることにより、図18に示すように、ドリフトコーナリングをうまくコントロールできていることがわかった。

Fig18 Comparison of vehicle slip angle at first counter

5. 結論

視覚情報に体感情報を付与した場合におけるドリフトコーナリング時の操舵特性と発汗量の変化について検討を行なった結果、次のことがわかった。

- (1) ドライバは視覚情報に体感情報が加わると、発汗量は全体的に増加し適度な緊張と共に、ドリフトコントロールを持続的に行っている事がわかった。
- (2) 視覚情報のみの運転では、ドリフトコントロールが難しくスピンに至り易く、その時の発汗量は体感情報を付与した場合に比べて大きく増加し、非常にリスクの高いものとなることがわかった。
- (3) ドライバはロール角の体感情報を操舵にフィードバックすることで、視覚情報のみの運転時に比べ的確なドリフトコントロールを行えており、ドライバに適度な体感情報を与えることで車両状態を知覚させることの重要性が確認でき、車両としての望ましい方向性を明らかにした。具体的には、ドリフトコーナリング時は、ドライバは、後輪のタイヤの滑り挙動の微妙な変化（グリップ方向に向かっているのか、あるいは、スピン方向に滑りが進行する方向なのか）を、視覚情報だけでなく、体感情報もフィードバックすることに

より、難しいドリフトコントロールを行うことができていたということがわかった。従って、ドリフトコントロール域では、車体は、ある程度のロールは、有った方が、コントロールし易いということがわかった。

以上については、ドライビングシミュレータを用いて、ロールの動きの有無により、ドリフトコントロール時の操縦特性の違いを明らかにしたものである。実車においても、ロール剛性をかなり大きくしたハードサスペンションの車両で走行を行った場合、グリップからドリフトへ急変する感じが有り、これは、ロールの動きが微小となった結果、車両挙動情報が少なくなった為と推察できる。従って、前述のドライビングシミュレータにおける結果と同様に、車両のロール等の体感情報がドライバのコーナリング中のグリップ限界時からドリフトコントロール時の情報を補ってこれていることによると判断できる。ただ、実車の場合は、他の情報提示（例えば、横加速度）との関係もあると考えられ、これらについては、今後の課題と致したい。

6. あとがき

今後は、本研究内容を発展させ、視覚情報と体感情報をフィードバックする、ドリフトコーナリング時のドライバモデルの検討、そして、車両側のアシストコントロール等についてさらに検討を進めたい。さらに、人—自動車系として、人にとって望ましい車両の方向性について、人と車の両面から、検討を行っていきたい。

参考文献

- (1) 近藤政市, 自動車の操舵と運動間に存在する基礎的關係について, 自動車技術会論文集, 5, (1968)
- (2) 吉本堅一, 予測を含む操舵モデルによる人間自動車系のシミュレーション, 日本機械学会誌, 71-596, (1968), 1181-1186
- (3) 井口雅一, 運転者の運動特性からみた自動車の走行安定性, 日本機械学会誌, 62-491, (1968), 1715-1722
- (4) 菊池雅博・鈴木純三・中島浩二・坂口正雄・大橋俊夫, 差分方式による2チャンネル携帯型発汗計について, 発汗学, 9-1, (2002), 31-36
- (5) Yukio Watanabe, Michael W. Sayers, Extending Vehicle Dynamics Software for Analysis, Design, Control, and Real-Time Testing, Proceedings of 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, (2002), 407-412
- (6) Pacejka H.B., Sharp R. S., Shear Force Development by Pneumatic Tyres in Steady State Conditions: A Review of Modelling Aspects, Vehicle System Dynamics, vol.20, (1991), 121-176
- (7) 澤田東一, 生体反応による車両操舵特性の評価に関する研究, 人間工学, 19-5, (1983), 265-272
- (8) 神谷公一・濱谷克則・磯村有宏, 運転者の緊張度分析 — 緊張度モデルと典型的な走行状態への適用 —, 自動車技術会論文集, 24-4, (1993), 113-117
- (9) 上野克己・滝川善治, 皮膚インピーダンス計測における自動車性能評価への適用, 自動車技術, 45-10, (1991), 73-77
- (10) 大野宏司・山本有造・坂部匡彦・渡邊一矢, ドライバの危険感に基づく危険度表示システムの開発, 機論, 67-663, (2001), 212-217
- (11) 谷田公二, 制動行動におけるドライバの心拍数変化, Honda R&D Technical Review, 13-2, (2001), 91-97