

〔論 文〕

サスペンションのステア特性がドライバの運転行動に及ぼす影響

森 和典*・梶山項羽市*

Influence that Steer Characteristics of Suspension exerts
on Driver's Driving Behavior

Kazunori MORI, Kouichi KAJIYAMA

Abstract

An experiment with a driving simulator was executed and the relationship between perceived vehicle characteristics thought that driver's driving proficiency, and driving ease easily was examined. As a result, it was clarified that the beginner tended to operate the steering wheel exaggeratedly while driving, and liked vehicles that had a understeer cornering characteristic that was stronger, more so than the expert. Moreover, the driving simulator supplied to the experiment had a simple make-up, and it has been understood that there is value to some degree when driver's driving behavior and vehicle dynamics are researched. The vehicle characteristics of the experiment, such as the roll steer characteristics of the suspension were adjusted and changed. The influence that these suspension characteristics exerted on maneuverability and stability of vehicle was understood by the simulation calculation beforehand.

Keywords: Man-Vehicle System, Driving Behavior, Driving Proficiency, Vehicle Dynamics, Cornering Characteristics, Driving Simulator

1. まえがき

自動車の予防安全性の向上を図るために、いかなる運転性能を有した自動車がドライバにとって運転しやすいかを調べている。この一環として、まずはドライバの運転習熟度と制御しやすい車両旋回特性との関連性に焦点を当ててみた。初心者と熟練者とはカーブを曲がる際の運転行動が異なることは、これまでの研究でよく知られており、運転経験のある人であれば誰しも無意識のうちに経験することでもある。さらに、運転習熟度の違いにより制御しやすい車両特性も異なるのではないかということも推察できる。「初心者は熟練者よりも強いアンダーステア特性の車両を好む傾向にある」との経験則が成り立つ。アンダーステア特性が強い車両ほど、方向を変える際にハンドル角を大きく操作する必要がある。常

にハンドルを大きく操作する傾向の初心者にとっては運転しやすくなるとも考えられる。運転習熟度と車両の制御しやすさに関して、公表されたものはD.H.Weirらの研究⁽¹⁾⁽²⁾しか見当たらず、習熟度とヨーレイト定常ゲイン、応答速度の関係について記されている。しかし、実験は官能評価によるものであり定量的な裏づけとなるデータは無い。

本研究では、ドライビングシミュレータ (DS) を用いて、運転習熟度の異なる被験者に対して、サスペンションのステア特性が異なる複数の車両を運転操作させる実験を行った。その結果、前述の経験則を実証できる定量的な実験データなどいくつかの知見を得た。ここでは、研究の概要とともに今後の研究の展開内容について報告する。

* 交通機械工学科
平成19年4月19日受理

2. サスペンションのステア特性

2.1 車両運動性能の計算について

DS実験に用いる車両の旋回特性は、調整が比較的容易にできて性能への影響が大きいロールステアやコンプライアンスステアなど前後輪サスペンションのステア特性を調節することで変更を行った。本章では、サスペンション・ステア特性が車両運動性能へ及ぼす影響をシミュレーション計算により調べたので、その結果を示す。計算では非線形多自由度モデルの車両運動解析ソフト「Car Sim」(MSC 製)を使用して、ステップ操舵による車両の応答安定性を調べた。なお、計算に用いた車両諸元および車両特性データは、一般的な小型乗用車のものとした。

また、トー角変化の方向は、前輪サスペンションにおいて、タイヤの力が減る方向をアンダーステア (US) 側、増加する方向をオーバーステア (OS) 側とする。後輪サスペンションでは、逆に、タイヤ力が減少する方向をオーバーステア (OS) 側、増加する方向をアンダーステア (US) 側とする。さらに、ステア特性の変化率は、タイヤ力が増加する方向を+、減少する方向を-とする。

2.2 ロールステア

サスペンションおよびステアリングを構成するリンクの幾何学的な関係により、車輪が上下動すると、車輪のトー角が変化する。これをロールステアと呼ぶ。車両が

旋回するとき、旋回外輪はリバウンドし、内輪はバウンドする。この車輪の上下動 (対車体基準の動き) により、トー角が変化して車両運動性能に影響を及ぼす。メカニズムの簡単な説明を図1に示す。なお、単位ロール角当りのトー角の変化をロールステア率 (%) で定義する。基本車両のロールステア率は、前輪がUS側2%、後輪がOS側8%である。

図2は、速度120km/h時におけるステップ操舵時のヨーレイト応答特性の計算結果である。図2の左図は、後輪のロールステア率を基本車両に同じとし、前輪のロールステア率を基本車両に対して10%変化させたときの結果である。+10%、-10%は、それぞれ8%OSと12%USを意味する。右図は、前輪のロールステア率を変えずに、後輪のみを基本車両に対して10%変化させたときの結果である。+10%、-10%は、それぞれ2%USと

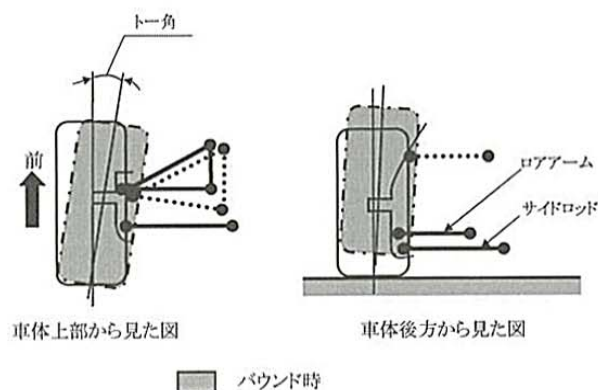


図1 ロールステア

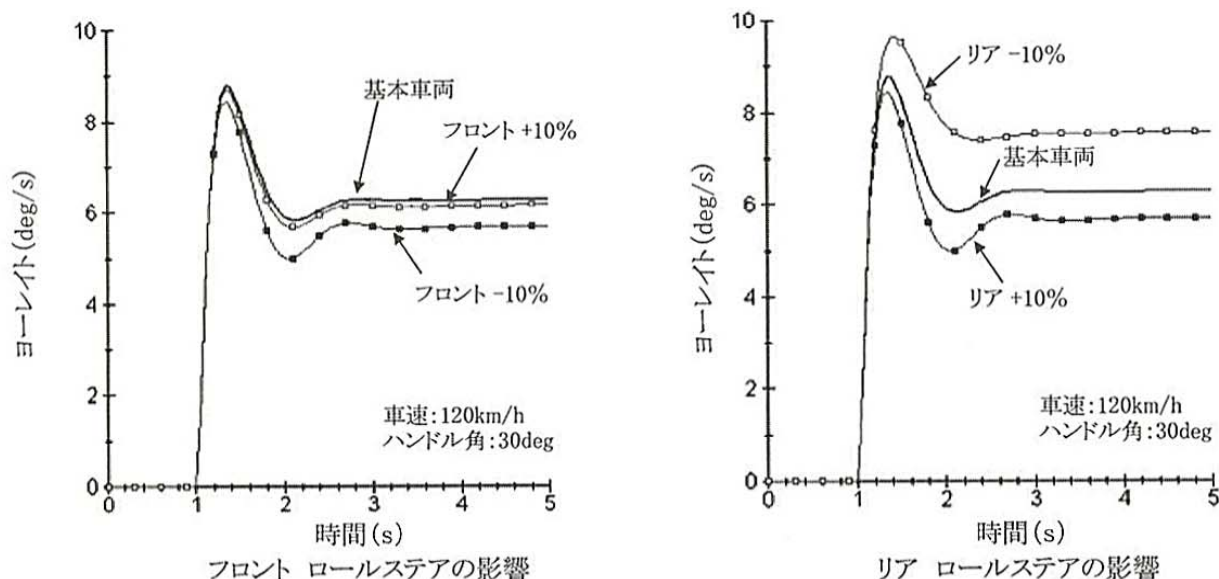


図2 ステップ応答

18%OSを意味する。後輪側は前輪側よりも、ロールステアの変化代に対してヨーレイトの定常値や減衰特性が大きく変化する。前輪よりも後輪のロールステアのほうが、運動性能に及ぼす影響が大きいことがわかる⁽³⁾。

図3および図4は、それぞれ後輪のロールステア率に対するスタビリティファクタおよび対数減衰率の変化を示す。ここで、横軸のロールステア率の値は、基本車両との差である。基本車両の後輪ロールステア率8%OSを原点としている。なお、ヨーレイトの定常値と車両のステア特性や安定性を示すスタビリティファクタは、次式の関係がある⁽⁴⁾。

$$\left(\frac{r}{\theta}\right)_0 = \frac{v}{N(1+K_s v^2)} \quad (1)$$

ただし、左辺はヨーレイトの定常値、 r :ヨーレイト、 θ :ステアリング操舵角、 N :ステアリング・ギヤ比、 l :ホイールベース、 K_s :スタビリティファクタ、 v :車速

後輪のロールステア率をUS側にすると、スタビリティファクタが大きくなり、車両としてアンダーステアが強まる。一方でヨーレイトの減衰性は低下する傾向にある。

2.3 コンプライアンスステア

タイヤには、旋回時は路面との間に横力が発生し、制動駆動時には前後力が働く。このような力がタイヤに作用すると、サスペンションのリンクやアームに取り付けられたゴム・ブッシュなどの柔性により、タイヤがわず

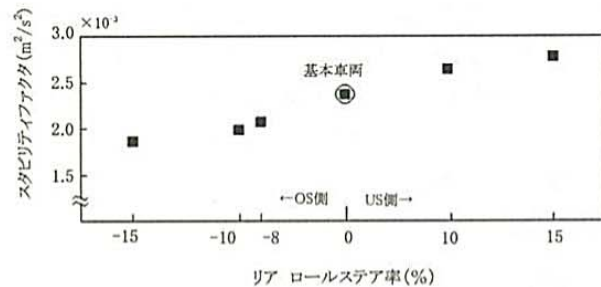


図3 ロールステア率とスタビリティファクタ

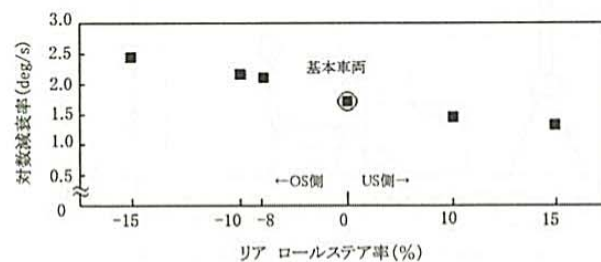


図4 ロールステア率と対数減衰率

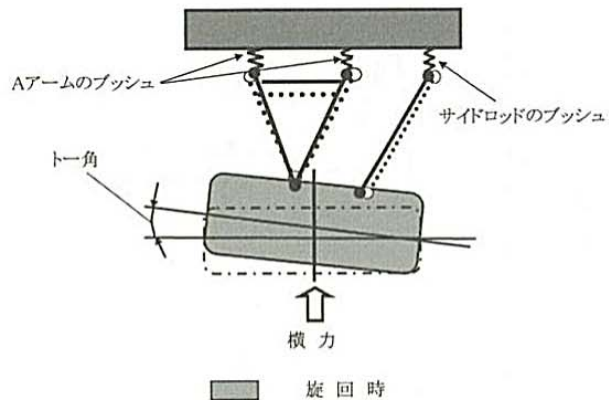
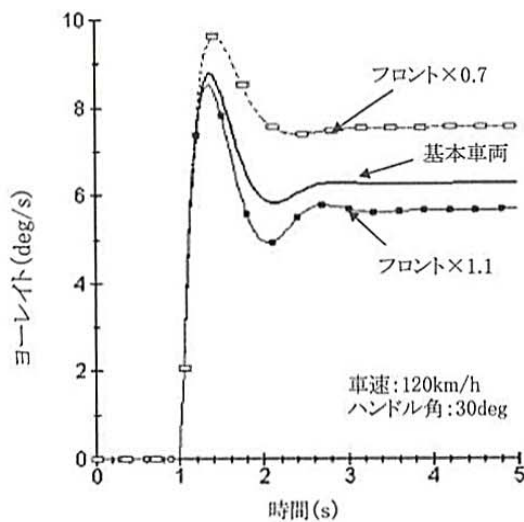


図5 コンプライアンスステア

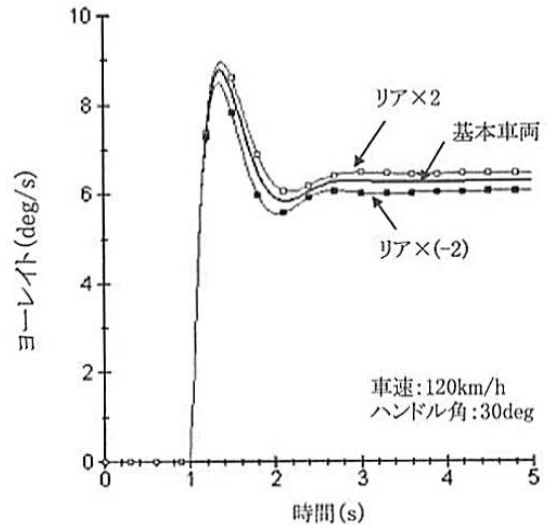
かに操舵される。このステア角がコンプライアンスステアと呼ばれる。コンプライアンスステアのUS、OSの方向性および符号は、ロールステアの場合と同じとする。本論では、横力(左右力)によるコンプライアンスステアを取り扱う。図5にはコンプライアンスステア発生の簡単な説明を示す。基本車両のコンプライアンスステアは、前輪をUS側 2.7×10^{-4} (deg/N)、後輪をOS側 1.0×10^{-5} (deg/N)とする。

図6は、速度120km/h時におけるステップ操舵時のヨーレイト応答特性の計算結果である。図6の左図は、後輪のコンプライアンスステアを基本車両に同じとし、前輪のコンプライアンスステアを基本車両に対して0.7倍および1.1倍に変化させたときの結果である。右図は、前輪のコンプライアンスステアを変えずに、後輪のコンプライアンスステアのみを+2倍および-2倍にしたときの結果である。前輪側は後輪側よりも、コンプライアンスステアの変化代に対してヨーレイトの定常値や減衰特性が大きく変化する。コンプライアンスステアが車両運動性能に及ぼす影響は、ロールステアの場合とは逆に、後輪よりも前輪のほうが大きい。

図7および図8は、それぞれ前輪のコンプライアンスステアに対するスタビリティファクタおよび対数減衰率の変化を示す。前輪のコンプライアンスステアをUS側から0に近づけるほど、スタビリティファクタが小さくなり車両としてアンダーステアが弱まるが、その傾向が把握できる。また、前輪コンプライアンスステアがUS側 1.0×10^{-4} (deg/N)のとき、ヨーレイト減衰性が最大になる。つまり、減衰性を最適にする前輪コンプライアンスステアが存在すると考えられる。



フロント コンプライアンスステアの影響



リア コンプライアンスステアの影響

図6 ステップ応答

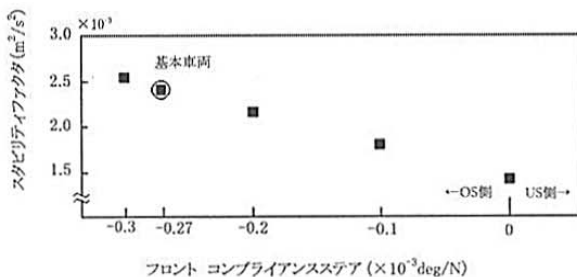


図7 コンプライアンスステアとスタビリティファクタ

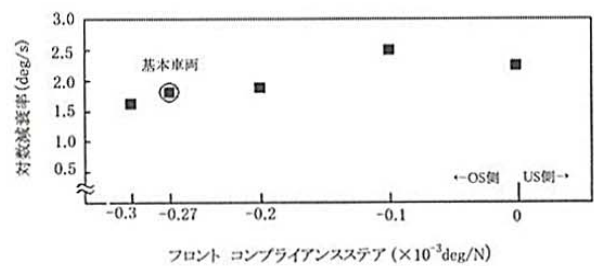


図8 コンプライアンスステアと対数減衰率

3. 実験

3.1 実験概要

簡易型DSを用いた模擬走行実験により、サスペンションステア特性がドライバの運転行動に及ぼす影響を調べるために、次のことを実施する。

車両の旋回特性は、運転行動への影響が大きいと考えられるロールステア特性を調整して変更する。被験者は、自己申告させた累積走行距離を参考にしながら、熟練者と初心者とに分類する。熟練者および初心者に旋回特性の異なる車両を運転させて、官能評価により最も運転しやすい車両を選択させる。また、走行実験における車両運動状態の諸量を測定し、その分析結果と官能評価の結果とを比較する。

3.2 実験装置

実験に用いた簡易型DSの構成を図9に示す。ソフトウェアは、前述の「Car Sim」をベースにDS用として開発されたもの(MSC製)である。このDSは、運転席を

据付とし、液晶プロジェクトにより前景をスクリーンに映すという簡単な構成のものであり、定置型DSに属する。入力装置には、本来、ゲーム機のハンドルとフットペダルを使用するが、臨場感を出すため、実車用ハンドルも使えるように改良した。図10は、このDSを用いた実験風景を撮影したものである。

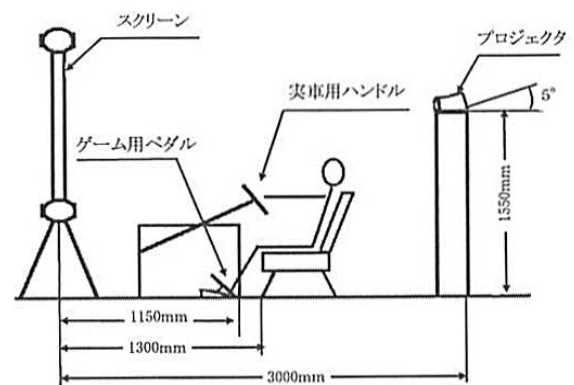


図9 DSの構成

3.3 車両特性

基本車両の車両諸元や仕様は、前章のシミュレーション計算で用いたものと同じとする。実験は、基本車両および基本車両のロールステア特性を変更した9種類の車両、総計10種類の実験車両をDS上で用いて行った。表1は、各実験車両のロールステア特性の一覧表である。ロールステア率の変更幅は、丁度区切りが良い値を採用している。

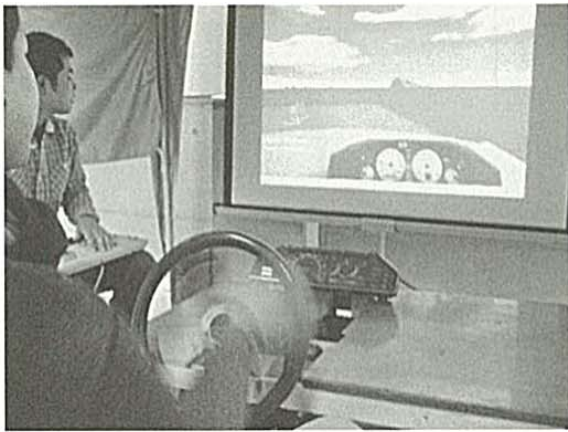


図10 DSによる実験風景

表1 実験車両のロールステア率

		ロール ステア	ロールステア率(%)	
			FRONT	REAR
基本車両		0	us2%	os8%
フロントのみ 変更	F0	2	0%	os8%
	F1	10	os8%	os8%
	F2	-10	us12%	os8%
リヤのみ変更	R1	10	us2%	os18%
	R2	-10	us2%	us2%
	R3	15	us2%	os23%
フロント及び リア変更	FR0	F2, R8	0%	0%
	FR1	10	os8%	os18%
	FR2	-10	us12%	us2%

表2 被験者の運転歴一覧

	運転歴 (走行距離)	年齢・性別
初心者1	約500km	21歳・男
初心者2	約500km	19歳・男
初心者3	約200km	18歳・男
熟練者1	約100,000km	27歳・男
熟練者2	約95,000km	25歳・男
熟練者3	約120,000km	23歳・男

3.4 被験者

被験者は、18歳～27歳の男性6名である。これまで走行した距離を自己申告してもらい、1,000km以下を「初心者」、約100,000km以上で運転経験5年以上を「熟練者」として分類した。表2は、被験者の運転歴の一覧である。

3.5 実験方法

オーバルコース（周回路）の緩いカーブを旋回走行する実験と、JASOに規定されているスラローム通過実験を行った。両者とも官能評価を行い、特に後者は実験時におけるハンドル角、ヨーレイト、横加速度、ロール角などのデータを採取した。オーバルコースの走行は、約120km/hにて行い、パイロンスラローム走行は、JASO C706 87により、パイロン間隔30m、車速65km/hで実施した。参考のため、図11は車速に対するヨーレイト定常値の変化を示す。また、実験に際しては、ハンドルを極力滑らかに操作し、パイロンに触れない範囲で可能な限り近づくことを被験者に指示した。

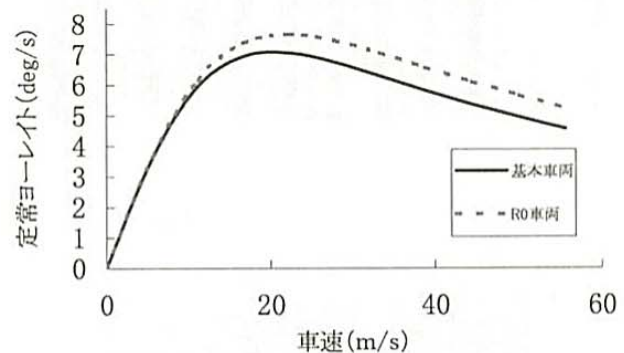


図11 車速に対するヨーレイトの定常値

4. 実験結果

図12は、パイロン通過実験時の実測データの例を示す。式(2)を用いて振幅の平均値を計算して、比較を行った。

$$\text{振幅の平均値} = \frac{a+b+c+d}{4} \quad (2)$$

図13は、被験者が10仕様の実験車両を運転したときのハンドル角振幅の平均値を示す。棒グラフの値は、初心者、熟練者それぞれ3名のハンドル角平均値の相加平均である。また、3名の最大値と最小値を図中に垂直な線で示している。図14は、ヨーレイト振幅の平均値を示す。なお、その他の測定データは、結果の傾向がほぼ同じであるために割愛する。

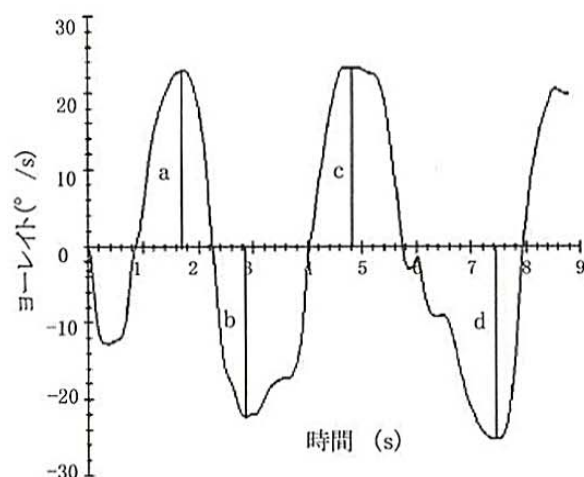
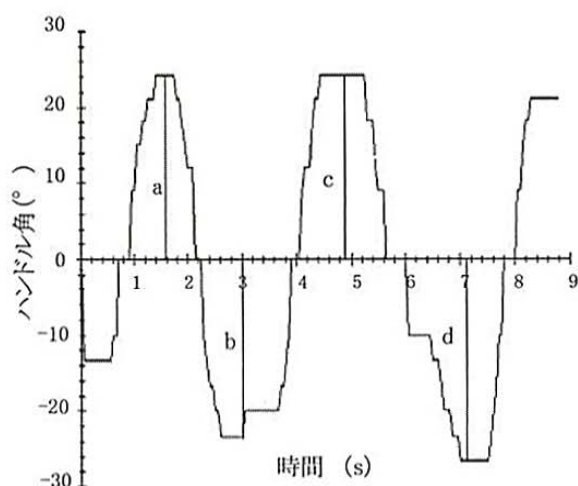


図12 ハンドル操舵角, ヨーレート (実測値)

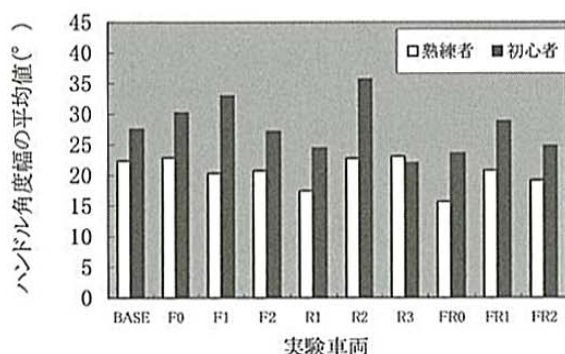


図13 車両使用毎のハンドル操舵角

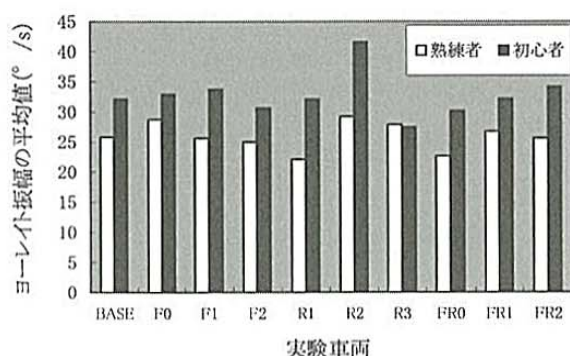


図14 車両使用毎のヨーレート

全般的に熟練者は小さいハンドル角でスムーズなハンドル操作を行う。一方で初心者は、ヨーレートに強い反応を示し、ハンドル角を大きく操作する傾向にある。車両仕様別に数値を比較すると、熟練者は基本車両が、初心者はアンダーステアの強いR3仕様の車両が最も小さなハンドル角、ヨーレート振幅を示す。

しかし、熟練者3名を個々に調べると、基本車両の仕

様を中心にして微妙に好みの差が現れた。また、数値データと官能評価は、よく符合し、好みの仕様を運転した場合にはハンドル角等の変動幅も小さいことがわかった。初心者3名は、ほぼ同じ傾向であった。

5. まとめ

5.1 サスペンションのステア特性

ロールステアおよび左右力によるコンプライアンスステアが車両運動性能に及ぼす影響をシミュレーション計算により調べ、次の結果を得た。

- (1) 後輪側は前輪側よりも、ロールステアの変化代に対してヨーレートの定常値や減衰特性が大きく変化する。前輪よりも後輪のロールステアのほうが、運動性能に及ぼす影響が大きい。
- (2) 後輪のロールステア率をUS側にするほど、スタビリティファクタが大きくなり、車両としてアンダーステアが強まる。一方でヨーレートの減衰性は低下する傾向にある。
- (3) 前輪側は後輪側よりも、コンプライアンスステアの変化代に対してヨーレートの定常値や減衰特性が大きく変化する。コンプライアンスステアが車両運動性能に及ぼす影響は、ロールステアの場合とは逆に、後輪よりも前輪のほうが大きい。
- (4) 減衰性を最適にする前輪コンプライアンスステアが存在すると考えられる。

5.2 制御しやすい車両特性

ドライバの運転習熟度と制御しやすい車両特性との関連性について調べるため、簡易型DSを用いて、運転初心者と熟練者に対してサスペンションのロールステア特性

を変更した複数車両による走行実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) パイロン通過実験の結果、初心者は習熟者に比べてハンドルを大きく操舵する傾向にある。初心者および習熟者ともにハンドル操舵量の平均値が最も小さくなる車両特性 (Optimal 特性と呼ぶ) が存在する。
- (2) Optimal 特性から判断して、運転熟練者は弱アンダーステア特性を好む。初心者はこれよりも強いアンダーステア特性の車両のほうが制御しやすい。
- (3) 運転習熟度の違いに関わらず、Optimal 特性の車両は周回路、パイロン通過走行の官能評価においても最も制御しやすいことがわかった。
- (4) 経験則や既知の文献内容を、DS を用いた実験により定量的に検証できた。

6. 今後の展開

車両運動性能に影響する特性も様々なものがあり、それらが制御のしやすさに複合的に関連しているものと考えられている。制御しやすい車両特性に関しては単純な解は存在し得ないが、少しずつ研究を積み重ねていかなければならない。本報のように、ロールステアを変更すると、アンダーステアなどの静的な特性だけではなく、ヨーレイトや横加速度の応答性など動的特性も変化する。動特性の影響については今回は検討しなかった。今後、ロールステアだけではなく、コンプライアンスステア、ステアリングギヤ比などを調整することにより、静特性を一定にして、ヨーレイトの減衰性、共振周波数、位相遅れなど動特性を変えた車両により実験を行う必要がある。横加速度、スリップ角、ロール、ピッチ、バウンシングなど車体運動の影響を検討することも重要であろう。また、被験者も走行距離による習熟度を分けるだけでなく、性別、年齢、運動能力、気質などによる分類も考慮していきたい。

制御しやすい車両運動特性とはどういうものかは、この分野の長い歴史に亘る研究により、定量的に把握されている特性も数多く、その成果は実際の開発現場で活用されている。しかしながら、自動車開発の最終段階にお

いては、プロのテストドライバの官能評価により、「乗り味」をさらに良くするために、特性の微調整作業 (いわゆるチューニング) が繰り返し行われ、各部品仕様が決定される。つまりテストドライバの好みや味付けに決定権を有することになる。自動車は人が操作し制御するものであるが、現在でも精密な計測実験を行ってもわからない微妙な動きも人ならば感じるができる。そのため、最終仕様の決定の際は、プロのテストドライバとエンジニアの経験や感性に頼らざるを得ない部分も多々あるのが実情である。しかしながら、プロであれば、老若男女すべての人間特性を把握しているかといえ、難しい問題である。やはり、ある程度定量的なデータの裏づけに基づいて、様々な形態の人間特性、制御しやすい車両特性に関する知見を得た上で、車両開発を推進することが必要になると思われる。あらかじめ数多くの知見が得られていれば、開発車両のターゲットユーザやコンセプトに応じた味付けも、現在より少ないマンパワーで短期間に達成できる可能性がある。

7. 謝 辞

本研究を実施するに際して、DS の改造や実験を行うなど、熱心に協力してくれた当時の大学院生の南陽平君 (平成16年度修士課程修了、ダイハツテクナー(株)) および平成16、17年度の卒業研究生諸君に感謝の意を表します。

文 献

- (1) D.H.Weir, R.J.Dimarco, "Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data", SAE Paper, No.780010 (1978).
- (2) 安部正人, 車両の運動と制御, 共立出版, (1979), 182-183.
- (3) 入江南海雄・芝端康二, リヤサスペンション特性が操縦安定性に及ぼす影響, 自動車技術, 39- 3 (1985), 275-285.
- (4) 森和典, タイヤ姿勢角制御を適用した自動車の制動や駆動を伴う場合の旋回性能, 日本機械学会論文集, 60-577, C (1994- 9), 208-214.